



SUSTENTABILIDADE

ESTRATÉGIAS DE PRODUTO, PROJETO E EXECUÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO PARA DESCARBONIZAÇÃO



PERSONALIDADE ENTREVISTADA

KAREN SCRIVENER:
COMPROMETIMENTO COM
PESQUISAS APLICADAS SOBRE
CIMENTOS E CONCRETOS

ENTIDADES DA CADEIA

CALCULADORA
CE CARBON

ENCONTRO E NOTÍCIAS

NOVA SEDE DA
COOPERATIVA DOS
ARTESÃOS DE BARRA NOVA

EMPRESAS E ENTIDADES LÍDERES DO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL ASSOCIADAS AO IBRACON

ADITIVOS



BUILDING TRUST



ADIÇÕES



PROTENSÃO



ARMADURA



RECUPERAÇÃO ESTRUTURAL



EQUIPAMENTOS



ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO



ESCRITÓRIOS DE PROJETOS



JUNTE-SE A ELAS

Associe-se ao IBRACON em defesa e valorização da Arquitetura e Engenharia do Brasil !

PRÉ-FABRICADOS



CONCRETO



CONTROLE TECNOLÓGICO



FIBRAS



FÓRMAS



CONSTRUTORAS



GOVERNO



EVENTOS



CIMENTO



SUMÁRIO

ENTENDENDO O CONCRETO

16 Do clínquer ao concreto: caminhos para a neutralidade de carbono no setor de construção



PESQUISA E DESENVOLVIMENTO

26 Quantum: concreto ecoeficiente e de alto desempenho



32 Aplicação da otimização topológica na redução de consumo de material em estruturas de concreto armado

38 Avaliação comparativa das emissões de estruturas em concreto armado produzidas no sul do Brasil

PESQUISA E DESENVOLVIMENTO

43 Produção de concreto sustentável para elementos pré-fabricados: aplicação de ultrassom de potência

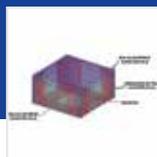


49 Estudo de desempenho de concretos estruturais produzidos com agregados reciclados mistos

54 Otimização topológica em estruturas de concreto: avanços tecnológicos e benefícios ambientais

ESTRUTURAS EM DETALHES

65 Avaliação da ecoeficiência do aço CA-70 em blocos de fundação de edifícios altos



CAPA

ANEXO DA EMBAIXADA DA SUÍÇA EM NOVA DELHI, ÍNDIA, CONSTRUÍDA COM BLOCOS DE CONCRETO LC3 E INAUGURADA EM 2015

CRÉDITO: LC3 PROJECT

Seções

- 5** EDITORIAL
- 7** COLUNA INSTITUCIONAL
- 8** CONVERSE COM O IBRACON
- 9** PERSONALIDADE ENTREVISTADA: KAREN SCRIVENER
- 24** ENTIDADES DA CADEIA
- 61** MANTENEDOR
- 71** ENCONTROS E NOTÍCIAS
- 77** ACONTECE NAS REGIONAIS



REVISTA OFICIAL DO IBRACON

Revista de caráter científico, tecnológico e informativo para o setor produtivo da construção civil, para o ensino e para a pesquisa em concreto.

ISSN 1809-7197

Tiragem desta edição: 2.500 exemplares | Publicação trimestral distribuída gratuitamente aos associados

EDITOR-CHEFE

→ Prof. Enio Pazini Figueiredo

JORNALISTA RESPONSÁVEL

→ Fábio Luis Pedroso — MTB 41.728
fabio@ibracon.org.br

PUBLICIDADE E PROMOÇÃO

→ Arlene Regnier de Lima Ferreira
arlene@ibracon.org.br

PROJETO GRÁFICO E DTP

→ Gill Pereira — MTB 21.353
gill.pereira@gmail.com

ASSINATURA E ATENDIMENTO

office@ibracon.org.br

GRÁFICA

Elyon
Preço: R\$ 12,00

As ideias emitidas pelos entrevistados ou em artigos assinados são de responsabilidade de seus autores e não expressam, necessariamente, a opinião do Instituto.

© Copyright 2025 IBRACON

Todos os direitos de reprodução reservados. Esta revista e suas partes não podem ser reproduzidas nem copiadas, em nenhuma forma de impressão mecânica, eletrônica, ou qualquer outra, sem o consentimento por escrito dos autores e editores.



INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO

Fundado em 1972

Declarado de Utilidade Pública Estadual

Lei 2538 de 11/11/1980

Declarado de Utilidade Pública Federal

Decreto 86871 de 25/01/1982

JULIO TIMERMAN

DIRETOR PRESIDENTE

PAULO HELENE

DIRETOR 1º VICE-PRESIDENTE

ENIO PAZINI FIGUEIREDO

DIRETOR 2º VICE-PRESIDENTE

CLÁUDIO SBRIGHI NETO

DIRETOR 1º SECRETÁRIO

JOSÉ VANDERLEI ABREU

DIRETOR 2º SECRETÁRIO

NELSON COVAS

DIRETOR 1º TESOUREIRO

PAULA LACERDA BAILLOT

DIRETORA 2ª TESOUREIRA

ERCIÓ THOMAZ

DIRETOR TÉCNICO

MAURÍCIO BIANCHINI

DIRETOR DE RELAÇÕES INSTITUCIONAIS

LEANDRO MOUTA TRAUTWEIN

DIRETOR DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO

MARCO ANTONIO CARNIO

DIRETOR DE PUBLICAÇÕES

TÚLIO NOGUEIRA BITTENCOURT

DIRETOR DE EVENTOS

JÉSSICA MARIANA PACHECO MISKO

DIRETORA DE CURSOS

CÉSAR HENRIQUE SATO DAHER

DIRETOR DE CERTIFICAÇÃO DE PESSOAL

RAFAEL TIMERMAN

DIRETOR DE MARKETING

JÉSSICA ANDRADE DANTAS

DIRETORA DE ATIVIDADES ESTUDANTIS

IBRACON

Av. Queiroz Filho, 1.700 — sala 407 / 408, Torre D — Vila Lobos Office Park
05319-000 - Vila Hamburguesa — São Paulo - SP — Tel. (11) 3735-0202

PRESIDENTE DO COMITÊ EDITORIAL

Enio Pazini Figueiredo

COMITÊ EDITORIAL MEMBROS

- Carlos Massucato (sustentabilidade)
- Eduardo Aquino Gambale (barragens)
- Fabiano Ferreira Chotoli (qualidade e desempenho)
- Jairo José de Oliveira Andrade (durabilidade)
- Lydio dos Santos B. de Mello (normalização)
- Manfredo Belohuby (cimentos e aditivos)
- Marco Carnio (estruturas e materiais não convencionais)
- Paulo Eduardo F. de Campos (Arquitetura)
- Paulo Fernando Araújo da Silva (controle da qualidade)
- Paulo Helene (tecnologia do concreto)
- Púlio Penna Firme Rodrigues (pisos e pavimentos)

PRESIDENTE DO COMITÊ CIENTÍFICO

Gláucia Dalfré

COMITÊ CIENTÍFICO MEMBROS

- Andrielli Morais (UFG)
- Ana Elizabete Jacinto (PUC-Campinas)
- Cristiane Bueno (UFSCAR)
- Edna Possan (Unila)
- Emerson Felix (UNESP)
- Fernanda G. da Silva Ferreira (UFSCAR)
- Fernando Couto (UFMG)
- Leandro Mouta (UNICAMP)
- Luiz Carlos de Almeida (UNICAMP)

- Marcelo Ferreira (UFSCAR)
- Marcelo H. Farias de Medeiros (UFPR)
- Margot Fabiana Pereira (UFSCAR)
- Maria Tereza da Silva Melo (UFCAT)
- Mariana Posterliti (UFMT)
- Nadia Carazim (PUC-Campinas)
- Ricardo Carrazedo (USP/São Carlos)
- Roberto Christ (UNISINOS)
- Rodrigo de Melo Lameiras (UNB)
- Rogério Carrazedo (USP/São Carlos)
- Sérgio Roberto da Silva (PUC-RS)
- Wallison Medeiros (UFCAT)
- Wellington Andrade da Silva (UFCAT)

Sustentabilidade do concreto: inovação e eficiência para um futuro de baixo carbono

Caro leitor,



Em novembro de 2025, o Brasil fará história ao sediar a COP 30, a 30ª Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas, em Belém do Pará. Este evento, de proporções globais, não apenas posiciona o nosso país no centro do debate sobre o clima, mas também nos impulsiona a uma transição

decisiva para uma economia de baixo carbono. Dentro desse cenário, a indústria da construção civil emerge como um ator crucial. Reconhecida mundialmente como um dos maiores emissores de gases de efeito estufa, ela tem a responsabilidade e a oportunidade de liderar a mudança.

A indústria brasileira do cimento já se destaca globalmente, apresentando uma das menores intensidades de carbono do mundo. Resultado de um esforço coletivo e de um compromisso genuíno com a inovação, empresas do setor estão investindo pesadamente para reduzir suas emissões líquidas, com metas ambiciosas como alcançar 475 kg de CO₂ por tonelada de produto cimentício até 2030. A inovação tecnológica é a força motriz por trás de todas essas transformações, permitindo que o setor se reinvente continuamente.

O IBRACON é parte integrante desse movimento, pois tem se dedicado a ser um catalisador de soluções sustentáveis. Para o Instituto, a sustentabilidade é uma prioridade estratégica. O IBRACON trabalha para promover o conhecimento técnico e científico necessário para criar um

futuro mais verde, fomentando a eficiência, a durabilidade e, acima de tudo, a descarbonização. Nossos Comitês Técnicos, pesquisas, eventos e publicações não apenas disseminam boas práticas, mas também mostram como o concreto pode ser uma solução eficiente e ambientalmente responsável para a infraestrutura e a habitação.

Um exemplo notável apoiado pelo IBRACON é o avanço do pavimento de concreto no Brasil. Dados do DNIT revelam um crescimento significativo do pavimento de concreto: 1,5% da malha rodoviária em 2015 para 4,5% em 2024. As projeções indicam que podemos alcançar 10% nos próximos anos. Esse avanço é estratégico, pois o pavimento de concreto pode reduzir em até 40% as emissões de CO₂ em comparação com o asfalto. O mesmo movimento pode ser identificado nas áreas urbanas. A cidade de Piracicaba no Estado de São Paulo pavimentou 45 km de avenidas e ruas de intenso fluxo de veículos. O uso do pavimento de concreto em vias urbanas configura uma alternativa estratégica e inovadora, com destaque para sua elevada durabilidade, que contribui diretamente para a redução dos custos operacionais relacionados à manutenção viária e dos veículos. Além disso, trata-se de uma solução alinhada às práticas sustentáveis, uma vez que favorece a mitigação das ilhas de calor urbanas e, por possuir alta refletância, reduzindo a demanda por iluminação pública, promovendo maior eficiência energética.

Outro ponto de vanguarda tecnológica nacional é a impressão 3D com argamassas de baixo impacto ambiental. Embora a tecnologia global ainda enfrente desafios para a redução de emissões, o Brasil se destaca com resultados promissores. Empresas brasileiras já entregaram mais de 10 casas impressas em 3D, demonstrando a viabilidade dessa abordagem. As argamassas estão sendo desenvolvidas com um

consumo de cimento abaixo de 300 kg/m³ e incorporam rejeitos industriais, superando todos os indicadores globais de performance. Somos benchmark!

Merece também grande destaque a aplicação dos conceitos de empacotamento e dispersão de partículas na formulação de concretos. Essas estratégias, que otimizam a granulometria, permitem reduzir a quantidade de cimento necessária. É uma ciência que contribui diretamente para a desmaterialização da construção.

A atuação do nosso setor deve ser direcionada à causa-raiz: a redução das emissões. A indústria precisa produzir cimentos com menor impacto mantendo a performance, e o setor do concreto deve adotar práticas que levem à desmaterialização. Para os tecnologistas, o desafio é claro: reduzir o consumo de cimento por metro cúbico. Para os projetistas, o foco é reduzir o volume de concreto em suas obras. O objetivo final é: diminuir a emissão de carbono por metro quadrado construído.

Nesse sentido, a Plataforma BIPc (Benchmark de Carbono em Projetos da Construção), a ser apresentada no Seminário de Sustentabilidade do Concreto GLOBE/IBRACON, durante o 66º Congresso Brasileiro do Concreto, é uma ferramenta aberta para comparações de emissões de carbono na fase de projeto, somando-se a outras para ajudar projetistas de estrutura e construtores a tomar decisões mais conscientes e baseadas em dados concretos.

A presente edição reflete o compromisso do IBRACON com esse futuro. Ela traz excelentes artigos técnicos, que merecem leitura atenta e reflexão. Eles reforçam o protagonismo do Brasil na liderança tecnológica do concreto e demonstram que é possível construir o futuro do nosso país com qualidade, eficiência e responsabilidade ambiental.

Boa leitura!

CARLOS MASSUCATO

COORDENADOR DO CT-101 E EDITOR-ASSOCIADO



NO PRUMO

Compartilhar teoria e prática da construção civil, com leveza, didatismo e criatividade. Esta é a proposta do livro "No Prumo".

O livro é dividido em duas partes. A primeira traça a história da construção no Brasil e sua relação com a cultura. A segunda revela, na prática, os conceitos e as técnicas consolidadas ao longo dessa história.

A publicação oferece uma leitura atual de temas que vão do projeto e da análise de solo aos serviços de concretagem, sistemas construtivos e sustentabilidade.

Com textos de Paulo Helene, professor titular da USP e diretor-presidente do IBRACON, e diretor da PhD Engenharia, e de Guilherme Aragão, jornalista e escritor, especialista em formação política e econômica do Brasil.

FORMATO: 21 x 29 cm

PÁGINAS: 170

ANO: 2017

VENDAS: Loja virtual (www.ibracon.org.br)



PRODUÇÃO



PATROCÍNIO



REALIZAÇÃO



MasterPEC 2025: qualificação e inovação em concreto para todo o Brasil



O Programa MasterPEC do IBRACON segue cumprindo seu papel de levar conhecimento técnico de excelência para diferentes regiões do país, formando profissionais cada vez mais preparados para enfrentar os

desafios da construção civil.

Em 2025, o Curso Pavimento Urbano de Concreto (PUC), realizado em parceria com a ABESC e ministrado pelos engenheiros Eduardo Guida Tartuce e Álvaro Barbosa, já capacitou centenas de profissionais. Foram quatro edições – Aracaju/SE (47 alunos), Porto Alegre/RS (29 alunos), Campo Grande/MS (74 alunos) e Natal/RN (51 alunos) – totalizando mais de 200 participantes. Com 14 horas de carga horária, o curso vem contribuindo para a formação de especialistas capazes de projetar e executar pavimentos urbanos de concreto de alta qualidade, trazendo benefícios diretos à mobilidade urbana, à durabilidade das vias e à economia de recursos públicos. A próxima edição deste curso está prevista para 15 e 17/09, em Balneário Camboriú/SC.

Outro destaque foi o curso Projeto e Execução de Fixações em Concreto – Teoria e Prática (Módulo 1:

Ancoragens Curtas), em parceria com a ABECE e com patrocínio da Âncora. Realizado em Valinhos/SP, sob a condução dos engenheiros Tiago Garcia Carmona e Wesley Oliveira do Nascimento, contou com 24 alunos em uma jornada de 8 horas de intensa troca de conhecimento aplicada à realidade de obra.

Em breve, o MasterPEC também marcará presença no 66º Congresso Brasileiro do Concreto, em Curitiba/PR, com o curso internacional Structural Health Monitoring (SHM), nos dias 27 e 28 de outubro. Com 20 horas de carga horária e a participação de especialistas renomados como Eloi Figueiredo, Ionut Moldovan, Michael Havbro Faber, Samuel da Silva e Túlio Bittencourt, o curso abordará desde fundamentos teóricos até práticas experimentais em pontes, com enfoque em técnicas de aprendizado de máquina, modelos estatísticos e adaptação às mudanças climáticas.

Os cursos do MasterPEC possuem o diferencial de uma combinação equilibrada entre teoria e prática, que facilita a aplicação imediata dos conteúdos no dia a dia profissional.

Convidamos a todos a ficarem atentos à programação dos próximos cursos. Qualificar-se é uma forma de se diferenciar no mercado e contribuir para uma engenharia cada vez mais sólida e inovadora.

JÉSSIKA PACHECO MISKO
DIRETORA DE CURSOS DO IBRACON (2023/2025)

CONVERSE COM O IBRACON

PERGUNTAS TÉCNICAS

O QUE SE PODE FAZER, HOJE, PARA TORNAR OS PROJETOS DE ESTRUTURAS DE CONCRETO MAIS SUSTENTÁVEIS?

Responder essa pergunta, que é muito oportuna, mas, ao mesmo tempo, complexa, requer algumas considerações.

Recentemente, alguns colegas brilhantes da USP de São Carlos propuseram aplicar os conceitos do método de otimização topológica na redução de consumo de material em estruturas de concreto armado.

A otimização topológica é um método computacional usado para determinar a distribuição ideal de material, visando otimizar o desempenho de uma estrutura sob certas condições. É uma ferramenta poderosa para encontrar layouts de projetos eficientes e inovadores.

Começa estabelecendo restrições, tais como: cargas aplicadas, condições de contorno e requisitos de desempenho. Muitas vezes, usa o método dos elementos finitos para representar o comportamento da estrutura. Uma função objetivo, por exemplo, minimizar a massa, ou o consumo de material, combinada com restrições, como limites de deslocamento ou tensões, também deve ser definida.

O resultado é uma distribuição de material que pode maximizar a função objetivo, resultando em um projeto estrutural otimizado e muito mais sustentável.

Essa é uma alternativa genérica interessante para ser utilizada pelo projetista estrutural, para reduzir volume de concreto e peso de aço, ou seja, desmaterializar a estrutura com economia financeira, além da contribuição ambiental.

Mas, existem outras possibilidades de desmaterializar e reduzir emissão de gases de efeito estufa, aparentemente bem

melhores e mais eficientes, como, por exemplo, aumentar resistência do concreto para desmaterializar e reduzir aço, ou seja, usar concretos de 60 MPa a 100 MPa e manter o modelo clássico de projetar.

Existem exemplos muito interessantes substituindo um concreto de $f_{ck} = 40$ MPa por concretos de 80 MPa a 100 MPa em pilares de concreto de edifícios altos, nos quais a economia de aço, fôrmas, concreto, agregados etc. pode chegar a mais de 30%! E essa opção praticamente só depende do projetista estrutural.

Outra alternativa, muito eficiente e simples, que também só depende do projetista estrutural, é mudar a data de controle do $f_{ck,est}$, por exemplo passar de 28 dias para 56d, 63d ou 91 dias. Não altera em nada o projeto, mas exige atenção e conhecimento do projetista, assim como maior interação com os responsáveis pela produção do concreto.

Óbvio, não funciona para pré-tensão e protensão a baixas idades, desforma a baixas idades, concreto projetado para túneis, onde a resistência atende a horas, mas para estacas, fundações, pilares de edifícios altos, reservatórios, estações de tratamento ETAs e ETEs, blocos de fundação, vigas de transição, e outras, pode ser uma alternativa financeira vantajosa e contribuir em mais 25% à redução de gases tipo estufa.

Nas estruturas de concreto, basicamente, os responsáveis pela elevada emissão de gases do tipo estufa são o aço das armaduras e o cimento do concreto. Então, um balanço inteligente entre resistências de concreto e taxas altas ou baixas de armadura pode reduzir significativamente a emissão de CO_2 . Por exemplo, muitas vezes num balanço entre pilares com taxas de armadura máximas de 4% e concretos de baixo consumo de cimento (f_{ck} de 20 MPa a 30 MPa), pode emitir

mais que pilares de 80 MPa e taxas de armadura de 1,5%. No caso de lajes, ainda é possível jogar com diferentes geometrias e tipologias, comparando opções de lajes maciças com laje com grelhas, nervuradas ou protendidas, sendo que, em geral, nervuradas emitem menores teores de gases estufa.

O tradicional estudo de dosagem, levando em conta a distribuição granulométrica e o grau de compactação, também continua sendo uma boa alternativa, mas não depende do projetista estrutural e sim de um bom tecnólogo de concreto. Usar cimentos com menores fatores de clínquer e mais adições ativas também são alternativas válidas, mas que não estão no âmbito da ação do projetista estrutural.

Escolher algumas soluções estruturais, tipo criar cabeças de pilar confinadas, pilares cilíndricos em lugar de prismáticos, considerar o concreto de bielas de compressão em blocos bem armados como concreto confinado, podem também ajudar na busca da sustentabilidade, assim como o uso de UHPC pode conduzir a novas formas de projetar, tais como: pilares tubulares e vigas tipo I ou H, com enorme redução de material, sem perda de rigidez nem de segurança.

CONVERSAS NA COMUNIDADE TQS, COM O PROF. RAFAEL SOUZA, DA UNIVERSIDADE DE MARINGÁ, COM O ENG. CONSULTOR DAVID OLIVEIRA, DA JACOBS DE SIDNEY, NA AUSTRÁLIA (QUE FOI PALESTRANTE DO IBRACON NO TEMPO DA PANDEMIA) E COM O ENG. CARLOS HENRIQUE CONSONI, DE PORTUGAL, NA QUAL REUNIMOS OS PROCEDIMENTOS BÁSICOS E CONCEITUAIS QUE PODEM SER ADOTADOS NO PROJETO ESTRUTURAL PARA REDUZIR EMISSÃO DE GASES TIPO ESTUFA NO CASO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO.

PROF. PAULO HELENE
VICE-PRESIDENTE DO IBRACON,
DIRETOR PhD ENGENHARIA 

Karen Scrivener

Karen Louise Scrivener nasceu na Inglaterra, em agosto de 1966. Seu interesse por química a levou a se graduar, em 1980, em Ciências dos Materiais na Universidade de Cambridge. Decidida a seguir a carreira acadêmica, obteve seu doutorado na área, em 1983, no Imperial College of London, sob a orientação do professor Pratt, onde trabalhou no Departamento de Ciências dos Materiais até 1995 como pesquisadora e professora.

Devido às más condições de financiamento da pesquisa nas universidades públicas na Inglaterra na década de 1990, Scrivener aceitou o convite para ser cientista sênior no Laboratório Central de Pesquisa da Lafarge, em Lyon, Paris, onde ficou até 2001, desenvolvendo pesquisas aplicadas sobre cimentos. Neste ano, regressou ao meio acadêmico, agora como professora titular e chefe do Laboratório de Materiais de Construção no Instituto de Ciência e Engenharia dos Materiais na Escola Politécnica Federal de Lausanne (EPFL), na Suíça.



Juntando academia e indústria, fundou, em 2004, o Nanocem, consórcio de 40 instituições de pesquisa e 20 parceiros industriais, voltado à pesquisa fundamental sobre o cimento e o concreto.

Karen Scrivener é coautora do relatório *"Eco-efficient cements: potential, economically viable solutions for a low-CO₂, cement-based materials industry"* para o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP).

Leia nesta entrevista* com a pesquisadora, sobre sua carreira profissional, suas perspectivas sobre as pesquisas sobre o cimento e o concreto, e como ela vê transição do setor construtivo para a meta de emissões líquidas nulas de carbono.

IBRACON VOCÊ PODE NOS CONTAR BREVEMENTE SOBRE SUA CARREIRA? POR QUE DECIDIU SE GRADUAR E SE PÓS-GRADUAR EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS?

| **KAREN SCRIVENER** | Bom, essa é uma pergunta muito interessante. Eu estava na escola e, como a maioria das pessoas, achava que ciência era apenas física ou química. Estava pensando em fazer química, mas tive a sorte de ir para a Universidade de Cambridge, onde, no primeiro ano, é obrigatório cursar várias disciplinas diferentes. Foi aí que descobri o que era ciência dos materiais e percebi que era

muito mais próximo do que eu queria fazer, porque trata das coisas que realmente usamos no nosso dia a dia. Quando me formei na graduação, procurei o Prof. Pratt no Imperial College of London, que me sugeriu algumas vagas de doutorado em nitreto de silício, que era um tema muito quente na época. Achei que era uma boa ideia, porque, mesmo tendo usado cimento por 200 anos, é incrível como sabemos pouco sobre como ele realmente funciona.

IBRACON E DEPOIS DISSO, POR QUE DECIDIU ENTRAR NO CENTRO DE PESQUISA DA LAFARGE?

* A TRANSCRIÇÃO DA ENTREVISTA REALIZADA EM INGLÊS POR NILS HAVELKA E SUA TRADUÇÃO PARA O PORTUGUÊS CONTOU COM O AUXÍLIO DO CHAT GPT.



ESTUDOS MOSTRAM QUE, SE COMBINARMOS
DIFERENTES ESTRATÉGIAS COM TECNOLOGIAS
JÁ EXISTENTES AO LONGO DA CADEIA DE VALOR
[DO CIMENTO], PODEMOS REDUZIR
DE 70% A 80% AS EMISSÕES [DE CO₂]



| **KAREN SCRIVENER** | Eu sempre quis ser acadêmica desde muito jovem. Mas, nos anos 90, no Reino Unido, o financiamento para a academia estava muito ruim. Resumindo: eu trabalhava com um material muito prático — o cimento — e, ao ir a conferências, ouvia pessoas da indústria dizendo que não estávamos fazendo as perguntas certas. Quando surgiu a oportunidade de entrar na indústria, pensei: “vamos tentar”.

Foi uma experiência muito enriquecedora, porque me deu uma nova perspectiva sobre tudo. Passei seis anos na indústria, entendendo o que realmente pode ser implementado e o que não pode.

Depois, tive a sorte de conseguir uma vaga acadêmica na Suíça, onde o financiamento para a ciência é muito melhor. E eu queria unir esses dois mundos — academia e indústria — para trabalhar juntos nas questões fundamentais. Isso me levou à criação do Nanocem, um consórcio com cerca de 40 parceiros acadêmicos e 20 industriais, que durou cerca de 20 anos até 2023. Mas, na verdade, não parou, pois agora foi assumido pela Innovandi, a rede de pesquisa da *Global Cement and Concrete Association* (GCCA).

DE EMISSÕES DESCRITOS NO ROTEIRO TECNOLÓGICO DE 2021?

| **KAREN SCRIVENER** | Essa é uma questão bastante complexa. A primeira parte diz respeito à demanda. É claro que a maioria das novas construções será em países em desenvolvimento, então a demanda crescerá. Mas o que nem sempre se leva em conta é que há regiões, como a China, onde a demanda está diminuindo. A China, que representa mais da metade da produção mundial de cimento, vai ter uma queda considerável — o que vai compensar parcialmente o aumento nos países em desenvolvimento. No geral, acho que a demanda global vai se manter relativamente constante ou crescer moderadamente (Fig. 1).

IBRACON A GCCA ESTIMA QUE O SETOR DE CIMENTO E CONCRETO EMITIRÁ ANUALMENTE 3,9 BILHÕES DE TONELADAS DE CARBONO EM 2050, SE NENHUMA AÇÃO FOR TOMADA. COMO VOCÊ AVALIA OS CAMINHOS TECNOLÓGICOS DE REDUÇÃO

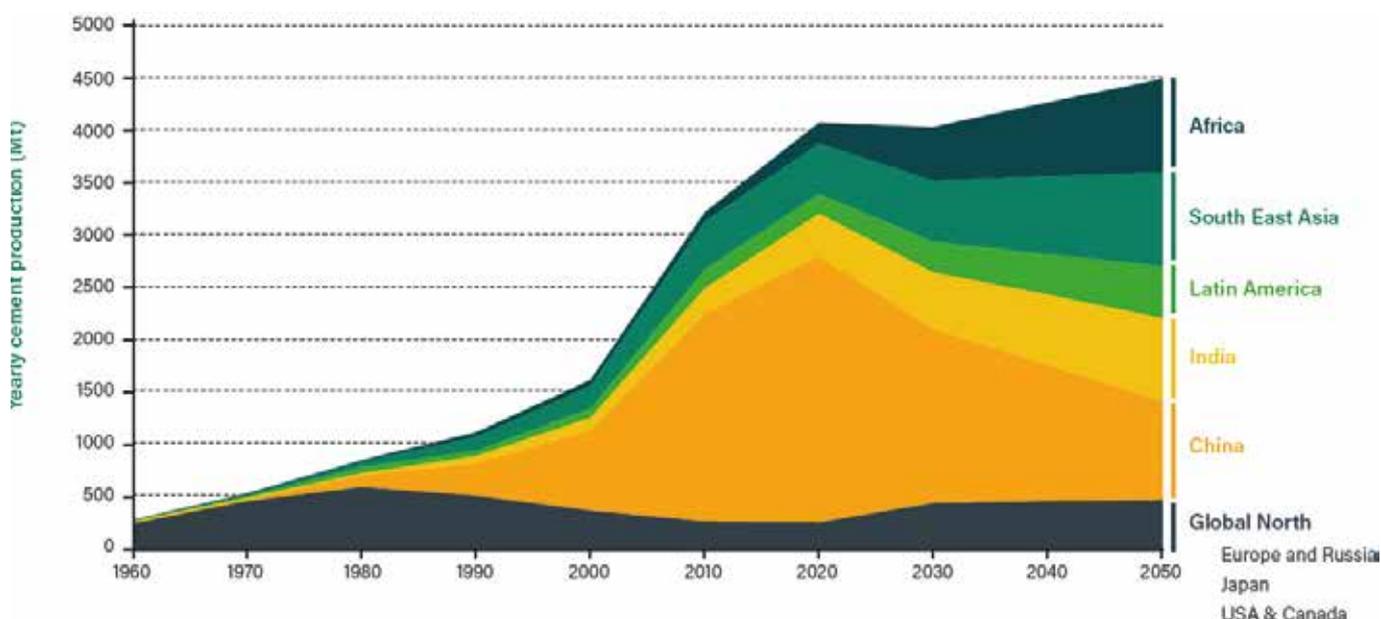


Figura 1 – Produção de cimento em diferentes regiões de 1960 a 2050.
Fonte: LMC, USGS, CSI

Mas, mesmo que as emissões de CO₂ se mantenham constantes, isso não é aceitável. Precisamos de estratégias reais de redução. Não existe solução milagrosa que substitua o concreto. Ele representa três quartos dos materiais usados no mundo e responde por cerca de 8% das emissões globais de CO₂ — o que não é tão surpreendente. O problema é que, como o cimento e o concreto já são materiais ecoeficientes, reduzir ainda mais as emissões é um desafio maior. No entanto, estudos mostram que, se combinarmos diferentes estratégias com tecnologias já existentes ao longo da cadeia de valor, podemos reduzir de 70% a 80% as emissões. Por exemplo:

- ▶ Produzir o clínquer da forma mais eficiente possível;

- ▶ Substituir o clínquer no cimento por outros materiais;
- ▶ Usar o mínimo possível de cimento no concreto;
- ▶ Usar o concreto de forma mais eficiente no projeto estrutural.

Essa é a base do Roteiro Tecnológico da GCCA, que considero bem elaborado. Pessoalmente, discordo um pouco das proporções atribuídas a cada estratégia. Acredito que o potencial da substituição de clínquer é maior do que o estimado — mas isso são nuances.

IBRACON **ESSAS MEDIDAS SERÃO TÉCNICA E ECONOMICAMENTE SUFICIENTES PARA ALCANÇAR A NEUTRALIDADE DE CARBONO ATÉ 2050?**

| **KAREN SCRIVENER** | Como eu disse, se usarmos as tecnologias já disponíveis, conseguimos reduzir de 70% a 80%. Mas, para chegar a zero, precisamos de outras estratégias, como captura de carbono. É muito mais importante focar no que podemos fazer agora do que esperar por soluções futuras. Reduzir 30%, 50%, 70% com o que já sabemos é mais urgente do que discutir os 20% finais.

IBRACON **POR QUE A GCCA DEU MAIS ÊNFASE À CAPTURA E ARMAZENAMENTO DE CARBONO DO QUE À PRODUÇÃO DE CIMENTOS COMPOSTOS?**

| **KAREN SCRIVENER** | A resposta é complexa. As empresas de cimento estão em transição. Estão percebendo que as vendas de clínquer não vão continuar subindo para sempre. Nos últimos cinco anos, houve uma tomada de consciência sobre como a captura de carbono é difícil. Existem algumas plantas pioneiras, mas todas são fortemente subsidiadas por dinheiro público. Além disso, muitos dizem que o aumento do preço do cimento por conta da captura (duas a quatro vezes) é insignificante no custo total de um edifício — mas essa é uma visão muito do Norte Global, onde a mão de obra é cara e os materiais são baratos. Nos países em desenvolvimento, é o contrário: mão de obra barata e

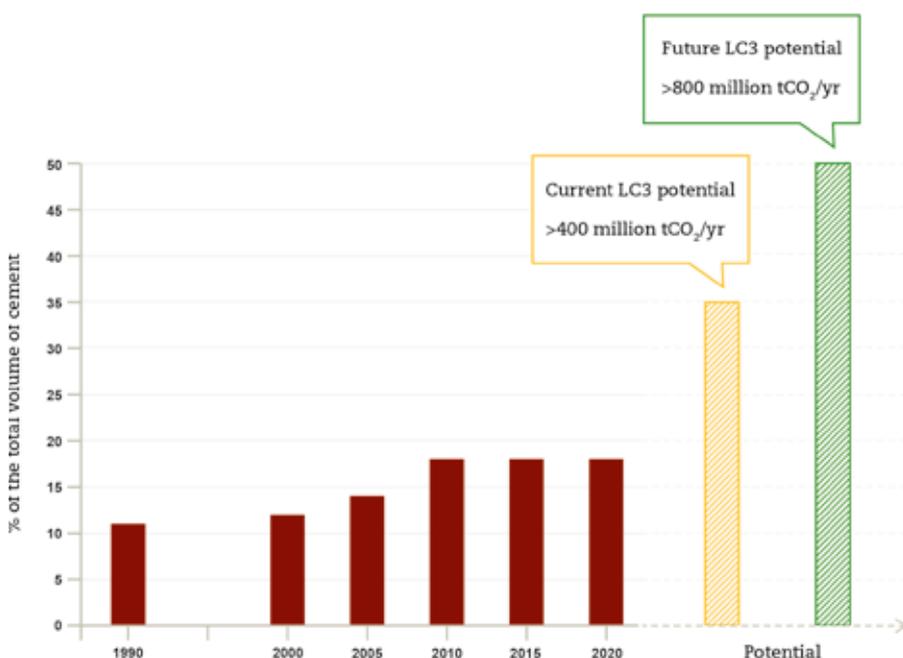


Figura 2 – Estimativa da substituição de clínquer por volume de cimento. Fonte: LC3 brochure



MUITOS DIZEM QUE O AUMENTO DO PREÇO DO CIMENTO POR CONTA DA CAPTURA É INSIGNIFICANTE NO CUSTO TOTAL DE UM EDIFÍCIO — MAS ESSA É UMA VISÃO DO NORTE GLOBAL, ONDE A MÃO DE OBRA É CARA E OS MATERIAIS SÃO BARATOS



“

CLARO QUE HÁ UM LIMITE FINAL, MAS 30% A 35% DE CLÍNQUER JÁ É VIÁVEL AGORA E, EM ESCALA MUNDIAL, SE ISSO FOSSE IMPLEMENTADO, REPRESENTARIA ALGO COMO 500 A 800 MILHÕES DE TONELADAS POR ANO EM REDUÇÃO DE CO₂

”

materiais caros. Aumentar o preço do cimento seria catastrófico. A maioria das pessoas na África, por exemplo, já vive dentro dos limites sustentáveis de CO₂, e dizer a elas para não se desenvolverem por causa das emissões históricas do Norte é inaceitável.

Por isso, precisamos de soluções mais baratas. E os substitutos do clínquer são justamente isso. A adoção de argilas calcinadas e de resíduos está crescendo muito nos últimos anos.

IBRACON VOCÊ E SUA EQUIPE DEMONSTRARAM A VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DO LC3 – UM CIMENTO COMPOSTO FEITO COM ARGILAS CALCINADAS E CALCÁRIO. PODE NOS DAR UMA VISÃO GERAL SOBRE O DESENVOLVIMENTO DESSA PESQUISA E QUAIS SÃO AS PRINCIPAIS BARREIRAS ATUAIS PARA SUBSTITUIR TOTALMENTE O CIMENTO PORTLAND COMUM PELO LC3 E OUTROS CIMENTOS COMPOSTOS SEMELHANTES?

| **KAREN SCRIVENER** | Basicamente, devemos entender que o uso de argilas calcinadas foi o caminho óbvio para expandir o uso de substitutos do clínquer. Nas últimas três a quatro décadas, temos usado principalmente três materiais: primeiro, calcário; depois, escória de alto forno, que vem da produção de aço; e, por fim, cinzas volantes. O calcário é abundante, mas não se pode substituir mais de 15% do clínquer sem comprometer as propriedades do cimento. A escória é um excelente substituto, podendo chegar facilmente a níveis de substituição de

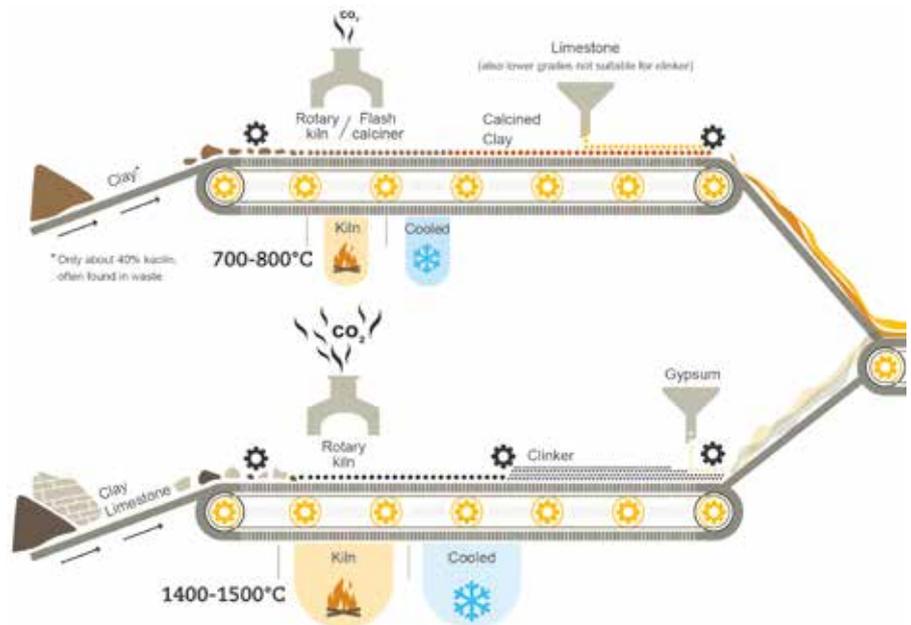


Figura 3 – Produção de cimento composto com calcário e argila calcinada.
Fonte: LC3 brochure

até 70%. Mas a quantidade de escória produzida mundialmente hoje representa apenas cerca de 10% da produção de cimento — e essa quantidade tende a diminuir no futuro à medida que nos afastamos dos altos fornos em direção a rotas mais eficientes de produção de aço. Por fim, as cinzas volantes vêm da queima do carvão — o principal responsável pelas emissões de CO₂. Nesse contexto, uma análise simples da química dos materiais disponíveis nos levou às argilas calcinadas. E então tivemos a descoberta fortuita de que a combinação de argila calcinada com calcário nos permite usar mais calcário por causa da sinergia entre eles. Foi essa a origem da pesquisa, e quando explico isso para as pessoas, acrescentando que pode ser produzido mais barato, elas perguntam: por que todo mundo não está fazendo isso? O primeiro ponto é que, na verdade, cada vez mais pessoas estão fazendo, porque o LC3 está entrando no mercado muito mais rapidamente do que fizeram a escória ou as cinzas volantes. O segundo ponto é que leva tempo para as pessoas se acostumarem com novas ideias. O terceiro é o custo de capital para construir plantas de calcinação. O quarto são os obstáculos em normas e códigos. O quinto é o problema de excesso de capacidade de produção de clínquer em muitos países. No Sudeste Asiático, por exemplo, muitos países têm mais do que o dobro da capacidade instalada que realmente utilizam. Mesmo na Índia, há 40% mais capacidade do que o uso real. Isso deveria ser visto como uma oportunidade de

converter muitos fornos para a calcinação de argila com baixo custo (Figura 3). Mas a indústria é conservadora.

A economia ainda não está clara. E não há incentivos suficientes para impulsionar a redução de CO₂ fora de algumas regiões como a Europa, por exemplo.

IBRACON **QUAIS SÃO OS LIMITES MÁXIMOS DE SUBSTITUIÇÃO DO CLÍNQUER POR ARGILAS CALCINADAS E CALCÁRIO, CONFORME OS ESTUDOS SOBRE CIMENTOS COMPOSTOS? PARA QUAIS APLICAÇÕES?**

| **KAREN SCRIVENER** | Essa é fácil de responder. Vimos desde o início que era possível obter desempenho equivalente ao CEM I com cerca de 50% de substituição do clínquer. Mas, claro, já hoje, a maioria dos cimentos utilizados mundialmente não é do tipo CEM I (95% de clínquer) — muitos já têm níveis consideráveis de substituição.

Quando buscamos obter desempenho equivalente aos cimentos que já têm substituições altas, podemos chegar tranquilamente a teores de clínquer na faixa de 30% a 35%. Claro que há um limite final, mas 30% a 35% de clínquer já é viável agora e, em escala mundial, se isso fosse implementado, representaria algo como 500 a 800 milhões de toneladas por ano em redução de CO₂ (Figura 2).

IBRACON **A SUBSTITUIÇÃO DO CLÍNQUER POR MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES COMO CINZAS VOLANTES, ESCÓRIA E ARGILAS NÃO É NOVA. OS ROMANOS USAVAM POZOLANAS EM SEUS AGLOMERANTES. CINZAS E ESCÓRIA SÃO USADAS DESDE A PRIMEIRA METADE DO SÉCULO XX EM CONSTRUÇÕES COMO BARRAGENS. PROFESSORES COMO KUMAR**

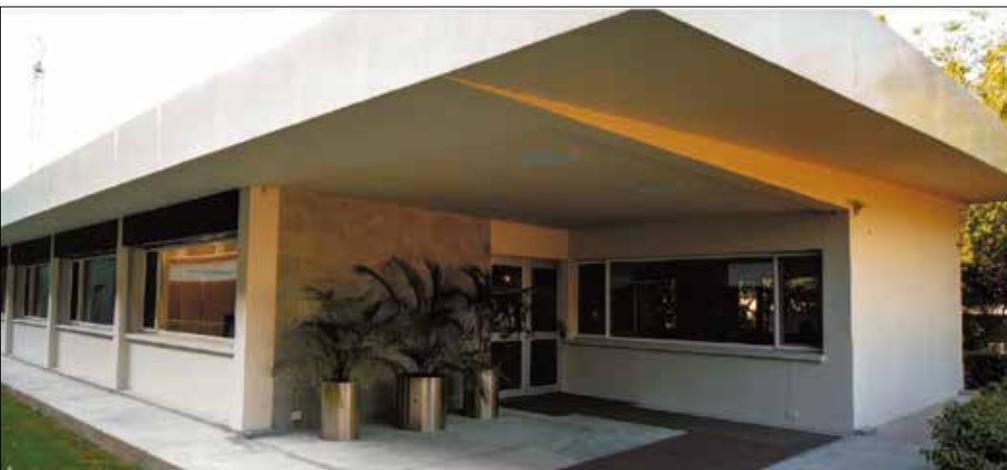


Figura 4 – Escritório da Agência Suíça para o Desenvolvimento e Cooperação na embaixada suíça em Nova Déli, na Índia.
Fonte: www.lc3.ch

MEHTA, MOHAN MALHOTRA E OUTROS JÁ DEFENDIAM ESSES MATERIAIS NOS ANOS 90. O QUE MUDOU DESDE ENTÃO PARA QUE ESSA SUBSTITUIÇÃO SE TORNASSE HOJE A PRINCIPAL ROTA TECNOLÓGICA PARA REDUÇÃO DE EMISSÕES, COMO RECOMENDA O RELATÓRIO DA ONU QUE VOCÊ COORDENOU?

| **KAREN SCRIVENER** | O que mudou foi o advento da mudança climática. Quando o Malhotra defendia isso há 30 anos, ainda não tínhamos consciência da urgência de enfrentar o problema. O segundo ponto é que, como já mencionei, os volumes disponíveis desses materiais clássicos (como cinzas e escória) são limitados. E a reatividade de materiais como pozolanas naturais também é limitada, o que restringe os níveis de substituição.

É aí que a combinação de argila calcinada com calcário muda o jogo, pois permite alcançar o mesmo desempenho com níveis de substituição muito maiores. Outro ponto é que ainda que igualemos as propriedades mecânicas aos 28 dias (padrão nas especificações técnicas), isso não é o que realmente importa no canteiro de obras, onde o desempenho precisa ser atingido em dois dias de cura para permitir o planejamento adequado das operações. Pois, desacelerar as obras aumenta os custos de mão de obra e capital proporcionalmente.

IBRACON **CONCRETOS COM MATERIAIS SUPLEMENTARES ENFRENTAM DIFICULDADES**

“

É AÍ QUE A COMBINAÇÃO DE ARGILA CALCINADA COM CALCÁRIO MUDA O JOGO, POIS PERMITE ALCANÇAR O MESMO DESEMPENHO COM NÍVEIS DE SUBSTITUIÇÃO MUITO MAIORES

”



OS CONCRETOS LC3 SE COMPORTAM DE FORMA MUITO SEMELHANTE AOS CONVENCIONAIS, COM UMA DIFERENÇA IMPORTANTE: A FLUÊNCIA É MUITO MENOR, O QUE É ÓTIMO PARA ESTRUTURAS DELGADAS



PRÁTICAS COMO BAIXA RESISTÊNCIA INICIAL, E O USO DE ADITIVOS PARA COMPENSAR ISSO PODE COMPROMETER A DURABILIDADE, INTERFERINDO NOS PROCESSOS QUÍMICOS DE HIDRATAÇÃO. COMO EQUILIBRAR DESEMPENHO E SUSTENTABILIDADE?

| **KAREN SCRIVENER** | Essa é uma questão crítica. Precisamos entender melhor qual desempenho realmente precisamos. E aqui a combinação de argila calcinada e calcário se destaca, pois são materiais muito reativos. Em laboratório, conseguimos desenvolver resistência em três ou quatro dias. Em escala industrial, com controle de distribuição do tamanho das partículas, moagem adequada do clínquer e uso de auxiliares de moagem, é totalmente viável produzir cimentos com desempenho equivalente já em um ou dois dias. Ou seja, temos muitos mecanismos para engenharia do cimento, sem precisar de aceleradores caros, que de qualquer forma trazem ganhos marginais.

IBRACON CIMENTOS COMPOSTOS COMO O LC3 SÃO COMPATÍVEIS COM PROJETOS DE ESTRUTURAS DELGADAS E OTIMIZADAS, QUE BUSCAM DESMATERIALIZAR O CONCRETO, OU COM IMPRESSÃO 3D DE CONCRETO, OU COM A IDEIA DE ESTENDER O ENSAIO DE RUPTURA PARA 56 DIAS? QUE SINERGIAS ESSAS TECNOLOGIAS TRAZEM PARA A REDUÇÃO DE CARBONO NA CONSTRUÇÃO?

| **KAREN SCRIVENER** | Vamos por partes.

Estruturas delgadas e design enxuto: o LC3 é totalmente

compatível. Na verdade, os concretos LC3 se comportam de forma muito semelhante aos convencionais, com uma diferença importante: a fluência é muito menor, até duas vezes menor, o que é ótimo para estruturas delgadas.

Impressão 3D: pode-se usar, mas, na minha opinião, é uma perda de tempo total. O motivo é não se poder usar agregados graúdos, o que leva ao aumento do teor de cimento. E mais cimento significa mais CO₂, seja qual for o tipo de cimento. A economia de material não compensa o aumento do impacto de CO₂. Isso já foi demonstrado por especialistas na área.

Estender o ensaio para 56 dias: como já falei, isso é um debate estéril. A resistência de 28 dias não é o que importa. Tecnologias modernas exigem desempenho em dois ou três dias. Estender para 56 dias significa dobrar o tempo de construção e o custo da mão de obra. Como consequência: só conseguiríamos construir metade dos edifícios que construímos hoje. Isso é uma questão de equidade social.

IBRACON O ROTEIRO DO GCCA DE 2021 ATRIBUI 6% DA REDUÇÃO DE CARBONO ATÉ 2050 À CARBONATAÇÃO/RECARBONATAÇÃO DO CONCRETO. VOCÊ CONCORDA? QUAIS SÃO OS CAMINHOS TECNOLÓGICOS MAIS PROMISSORES PARA ISSO?

| **KAREN SCRIVENER** | Concordo. Na verdade, esses 6% podem estar subestimados. No entanto, não devemos contar com isso como solução, porque isso já está acontecendo — todo o concreto construído já está absorvendo CO₂ da atmosfera. Devemos quantificar isso, sim. Mas, é claro, que a quantidade de CO₂ reabsorvida nunca será igual à quantidade emitida. Estamos estudando isso. Cimentos de baixo carbono absorvem menos CO₂, mas geralmente carbonatam mais rápido. De qualquer forma, se avaliarmos o quadro geral, os cimentos de baixo carbono sempre trazem benefícios.

IBRACON UMA DAS BARREIRAS AO AUMENTO DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E INDUSTRIAIS EM FORNOS DE CIMENTO É A PREOCUPAÇÃO PÚBLICA COM OS POLUENTES EMITIDOS. QUAIS SÃO OS PRINCIPAIS COMPOSTOS GERADOS AO QUEIMAR PNEUS, PLÁSTICOS PET E BIOMASSA? HÁ RISCOS À SAÚDE DA POPULAÇÃO PRÓXIMA ÀS FÁBRICAS?

| **KAREN SCRIVENER** | A resposta curta é: não deveria haver preocupação, desde que se sigam as regulamentações. Os testes já foram feitos. A destruição de moléculas tóxicas em fornos de cimento, que operam com chamas de 2000 °C, é muito mais eficiente do que em incineradores, que operam a 800 °C. Essa questão tem sido debatida por décadas. Todos os testes já foram feitos e é inequívoco: o uso de resíduos, seguindo as normas, é seguro.

IBRACON OUTRA BARREIRA AO COPROCESSAMENTO É A QUALIDADE DO CLÍNQUER, SEJA POR PERDA DE EFICIÊNCIA TÉRMICA NA CALCINAÇÃO OU PELA INCORPORAÇÃO DE CINZAS. O QUE INFLUENCIA ESSA QUALIDADE? QUAIS SOLUÇÕES TÉCNICAS PODEM GARANTIR BONS RESULTADOS?



Figura 5 – Edifício em execução na Colômbia com uso de LC3.

Fonte: Argos

| **KAREN SCRIVENER** | Essa pergunta é complexa demais para uma resposta simples. É um campo contínuo de pesquisa. É claro que o uso de resíduos afeta o clínquer. E, novamente, é por isso que as regulamentações existem — para controlar os tipos e misturas de resíduos que podem ser usados. Mas, mesmo do ponto de vista técnico, ainda há muito a descobrir.

IBRACON COMO VOCÊ AVALIA O CIMENTO E O CONCRETO EM COMPARAÇÃO COM OUTROS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO E POSSÍVEIS SUBSTITUTOS COMO GEOPOLÍMEROS E MATERIAIS ATIVADOS ALCALINAMENTE, EM TERMOS DE SEU POTENCIAL PARA O FUTURO?

| **KAREN SCRIVENER** | Essa é uma questão que me deixa muito irritada. Francamente, estamos trabalhando com coisas como geopolímeros há 70 anos e nada aconteceu. Não há nada no mercado. É inaceitável o tempo, o dinheiro e o potencial de jovens talentos que estamos desperdiçando nessa direção. Em poucas palavras: os únicos materiais não convencionais que funcionam à temperatura ambiente contêm escória de alto forno. Mas, como já disse, globalmente temos apenas 10% de escória em relação ao cimento. E 95% dessa escória já está sendo bem utilizada nos cimentos convencionais. Se retirarmos a escória dos cimentos convencionais para usar nos geopolímeros, aumentamos as emissões de CO₂, porque precisamos de ativadores alcalinos com pegada de carbono. Além disso, as tentativas de comercializar esses materiais nas últimas décadas fracassaram. A maioria das empresas que surgiram há mais de 10 anos não existe

mais porque não conseguiram superar problemas de regulamentação. Esses materiais nunca estarão disponíveis em escala real — seja em termos de recursos, regularidade, custo, seja em termos de emissões. Comparados ao LC3, com apenas 35% de clínquer, não fazem sentido.

IBRACON COMO SERÁ O CONCRETO DO FUTURO? O CIMENTO SERÁ ESPECIFICADO POR DESEMPENHO? O FATOR CLÍNQUER SERÁ DETERMINADO POR IA CONFORME A APLICAÇÃO ESTRUTURAL? TERÁ MAIS ADIÇÕES, ADITIVOS E AGREGADOS RECICLADOS?

| **KAREN SCRIVENER** | Claro que precisamos usar mais materiais substitutos, mais agregados reciclados. E a inteligência artificial pode, sim, ajudar a maximizar esses níveis de substituição. Em domínios bem definidos, ela pode interpretar os dados com precisão. Mas se os dados não existirem ou se quisermos extrapolar o domínio atual, ela não ajuda. O desempenho é fundamental, como discutimos. Mas é uma ilusão achar que podemos ter um padrão puramente baseado em desempenho que cubra todos os tipos de cimento — geopolímeros, cimentos de aluminato de cálcio, cimentos Portland. Isso seria perda de tempo. Precisamos focar na família de cimentos compostos, com clínquer Portland e substituições. Há muito espaço para avançar nas especificações de desempenho. Mas é necessário usar uma combinação inteligente de normas prescritivas e baseadas em desempenho. ☹

“

FRANCAMENTE, ESTAMOS TRABALHANDO COM COISAS COMO GEOPOLÍMEROS HÁ 70 ANOS E NADA ACONTECEU. NÃO HÁ NADA NO MERCADO

”

Do Clínquer ao Concreto: caminhos para a neutralidade de carbono no setor de construção

FÁBIO LUÍS PEDROSO - EDITOR - <https://orcid.org/0000-0002-5848-8710> - (fabio@ibracon.org.br) – IBRACON

RESUMO

O CONCRETO É FUNDAMENTAL PARA A INDUSTRIALIZAÇÃO E URBANIZAÇÃO, SENDO AMPLAMENTE USADO EM MORADIAS E INFRAESTRUTURA. A PRODUÇÃO GLOBAL DE CIMENTO AUMENTOU SIGNIFICATIVAMENTE, ESPECIALMENTE NO SUL GLOBAL, ASSOCIADA AO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. A CONSTRUÇÃO BASEADA EM CONCRETO APOIA 92% DOS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DA ONU. PORÉM, A INDÚSTRIA CIMENTEIRA É RESPONSÁVEL POR 7% DAS EMISSÕES GLOBAIS DE CO₂, PRINCIPALMENTE PELA PRODUÇÃO DE CLÍNQUER. PARA MITIGAR

ESSAS EMISSÕES, A ASSOCIAÇÃO GLOBAL DE CIMENTO E CONCRETO PUBLICOU, EM 2021, SEU ROADMAP TECNOLÓGICO, NO QUAL ESTABELECE ESTRATÉGIAS DE DESCARBONIZAÇÃO, TAIS COMO: SUBSTITUIÇÃO DO CLÍNQUER POR MATERIAIS SUPLEMENTARES, EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, USO DE COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS, TECNOLOGIAS DE CAPTURA E ARMAZENAMENTO DE CARBONO, OTIMIZAÇÃO DA DOSAGEM DO CONCRETO, OTIMIZAÇÃO DO PROJETO E EXECUÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO, ENTRE OUTRAS. O ROADMAP 2021 TRAÇA METAS PARA ZERAR EMISSÕES LÍQUIDAS EM 2050, MAS HÁ DESAFIOS ECONÔMICOS, TÉCNICOS E POLÍTICOS.

PALAVRAS-CHAVE: DESCARBONIZAÇÃO DO CIMENTO, DESMATERIALIZAÇÃO DA CONSTRUÇÃO, EMISSÕES LÍQUIDAS NULAS DE CARBONO, CONCRETOS ECOEFICIENTES.

1. INTRODUÇÃO

O concreto está intrinsecamente ligado à industrialização e urbanização modernas. Ele foi desde a Revolução Industrial empregado na construção de fábricas, estações de trem, canais, estradas, pontes e docas para armazenar e escoar a produção industrial em ascensão. Além disso, começou a ser usado na construção de moradias e

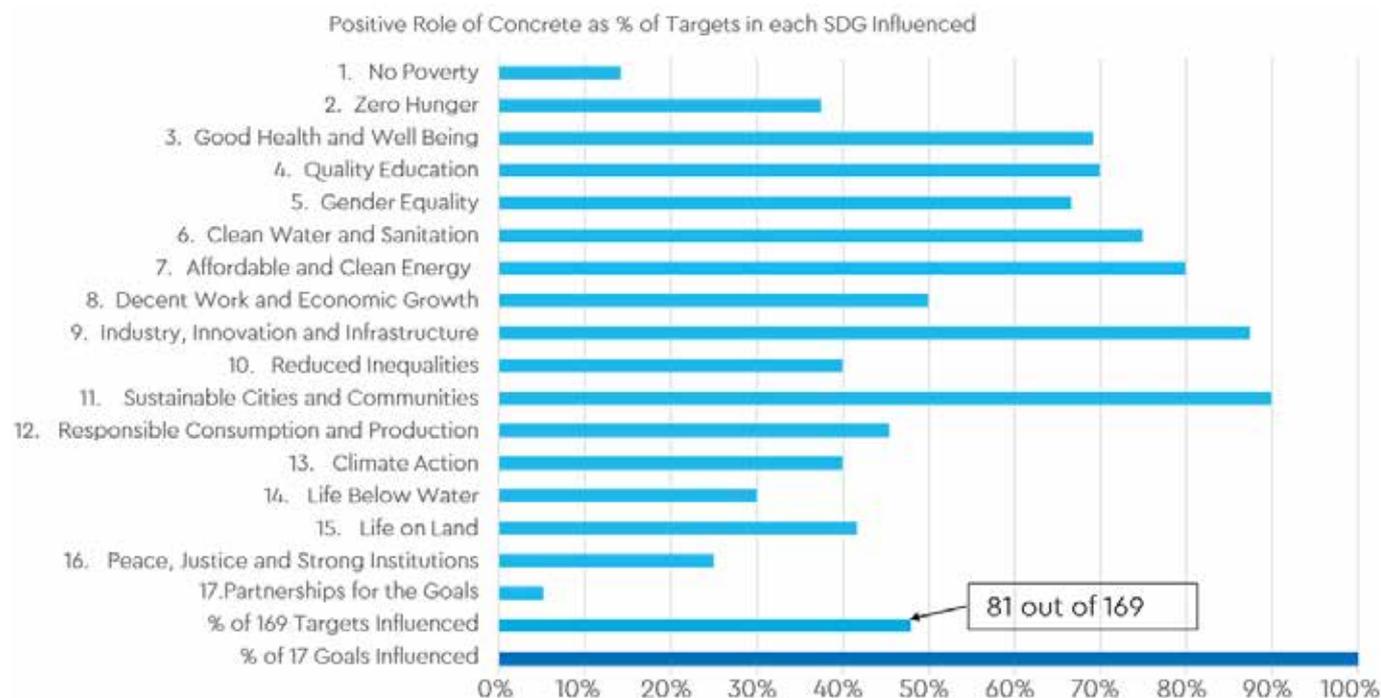


GRÁFICO 1

CONTRIBUIÇÃO POSITIVA DO CONCRETO EM RELAÇÃO AOS OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

FONTE: MINSON (2020)

obras que melhoram as condições de vida nas cidades. Isto porque era um material construtivo durável, resistente ao fogo e à água e facilmente produzido com matérias-primas abundantes e bem distribuídas geograficamente.

A produção mundial de cimento cresceu paulatinamente durante os séculos XIX e XX, atingindo um bilhão de toneladas em 1990. Com a entrada da China no comércio mundial, a produção mundial teve um salto vertiginoso, atingindo 4,2 bilhões de toneladas em 2022. Mais de 80% desta produção encontra-se atualmente em países em desenvolvimento no Sul Global (CGR, 2022).

Por isso, o aumento da produção de cimento e concreto é atualmente sinônimo de desenvolvimento econômico e social. O Escritório das Nações Unidas de Serviços para Projetos (UNOPS) credita ao ambiente construído o suporte necessário para se atingir 92% das 167 metas dos 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), por ele prover infraestrutura para distribuição de água e saneamento sanitário, energia e comunicações digitais, transporte e mobilidade urbanos, além de prédios para habitação, saúde, escolas etc. (Gráfico 1)

O relatório do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) "Iniciativa para o Clima e a Construção Sustentável", prevê dois cenários para a produção global de cimento: no de baixa demanda, a produção deve atingir 4,5 bilhões de toneladas em 2050; no cenário de alta demanda, seis bilhões de toneladas em 2050 (Scrivener, John e Gartner, 2016). É uma estimativa conservadora, uma vez que, nos últimos 64 anos, a produção de cimento cresceu 34 vezes, superando em muito o crescimento da população mundial, que cresceu apenas três vezes, ao contrário do que pressupõe o relatório (Gráfico 2).

A ONU estima que a população mundial deve atingir 9,8 bilhões de pessoas, 68% delas vivendo em cidades, de modo que três quartos da infraestrutura que existirá em 2050 será ainda construída.

Já é um fato científico que a industrialização iniciada na metade do século XVIII aumentou a concentração de gases do efeito estufa (GEE), em especial o gás carbônico (CO₂), principalmente em decorrência da queima de combustíveis

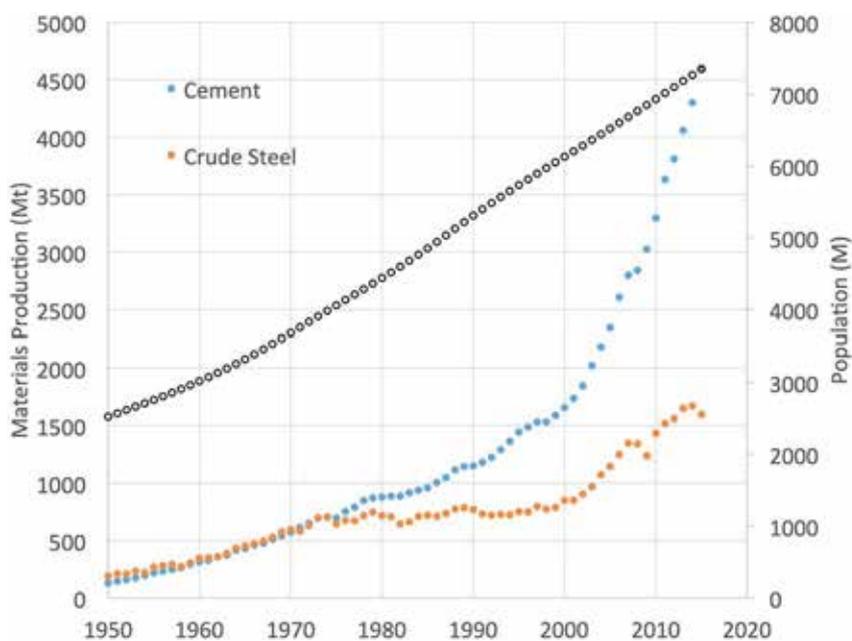


GRÁFICO 2

COMPARAÇÃO DA PRODUÇÃO DE CIMENTO E AÇO COM A POPULAÇÃO

FONTE: SCRIVENER, JOHN E GARTNER (2016)

fósseis. Atualmente, o mundo emite anualmente 55 bilhões de toneladas anuais de GEE (Forster *et al.*, 2024). A projeção da UNEP é que, no cenário corrente de desenvolvimento, ela ultrapasse 60 bilhões de toneladas em 2035. O aquecimento global causado pelo aumento da concentração de gases do efeito estufa na atmosfera altera o equilíbrio climático do planeta, aumentando a frequência e prolongando os eventos climáticos extremos.

Desde 1999, este fato científico é reconhecido pelas próprias cimenteiras reunidas na Iniciativa Cimenteira para a Sustentabilidade (CSI, em inglês), programa setorial que envolvia 24 companhias de cimento, com operações em mais de 100 países, respondendo por cerca de 30% da produção mundial de cimento na época, para lidar com os desafios do desenvolvimento sustentável.

A CSI criou, em 2003, um protocolo para medir e reportar as emissões de dióxido de carbono de seus membros, e lançou um sistema de coleta de dados (GNR, na sigla em inglês: *Getting the Number Right*) sobre o desempenho das plantas de cimento em termos de emissões de CO₂ e consumo de energia, não restrito aos seus membros, mas aberto

a todo o setor cimenteiro. Atualmente 850 plantas de cimento de 60 companhias, distribuídas geograficamente na Europa, América e Ásia, representando aproximadamente 80% da produção anual de cimento, sem considerar a produção chinesa, fornecem dados ao sistema.

As métricas do GNR estão relacionadas às principais rotas tecnológicas propostas pela indústria mundial de cimento para mitigar suas emissões de CO₂, consolidadas no Roadmap Tecnológico da Indústria de Cimento em 2008 e no Roadmap to Net Zero, de 2021. O Roadmap 2021, iniciativa da Associação Global de Cimento e Concreto (GCCA), formada por 50 companhias de cimento e 30 associações do setor cimenteiro e concreto, traça um caminho de implementação de tecnologias nos setores cimenteiro e concreto para zerar suas emissões líquidas de carbono em 2050, atendendo ao chamado do IPCC para limitar o aquecimento global em 1,5° C até o final deste século (Gráfico 3).

Para se manter dentro da meta do IPCC de aumento da temperatura média global em 1,5°, será preciso que haja uma redução das emissões de 7% anualmente a partir de 2030. No entanto, de 2011 a 2021, o crescimento anual das emissões foi de 1,5%.

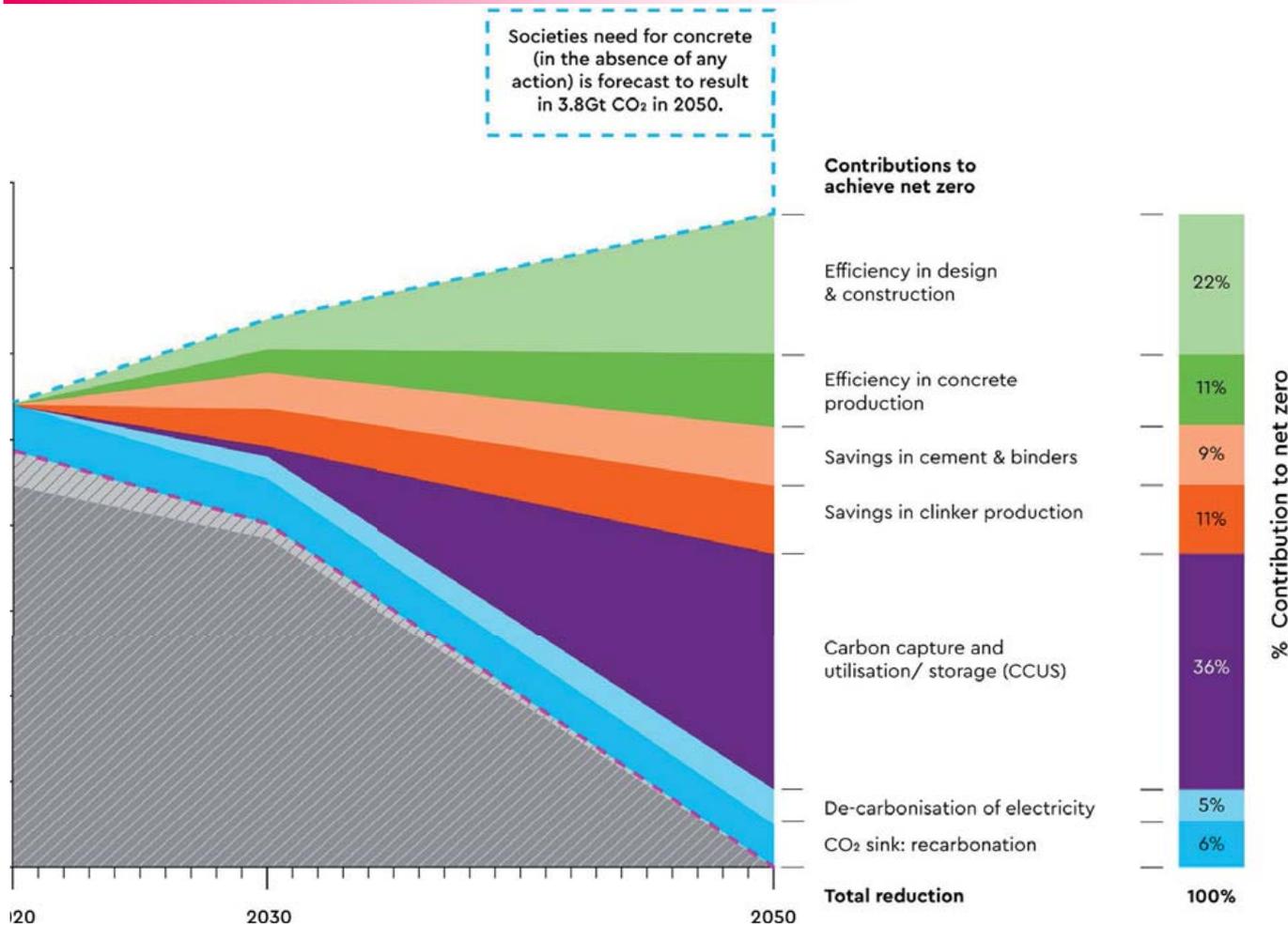


GRÁFICO 3

ESTIMATIVAS DE ABATIMENTO DE CARBONO PELOS SETORES DE CIMENTO E CONCRETO POR ROTAS TECNOLÓGICAS

Fonte: GCCA (2021)

2. ROTAS TECNOLÓGICAS DA DESCARBONIZAÇÃO DO CIMENTO

A quase totalidade das emissões de CO₂ advindas da indústria cimenteira diz respeito ao processo de produção do clínquer, produto da calcinação de calcário e argila a temperaturas acima de 1400 °C no forno. A descarbonatação do calcário no processo e a queima de combustíveis fósseis geram, para cada tonelada de clínquer produzido, cerca de 620 quilogramas de dióxido de carbono, na proporção de 60 para 40, na média mundial (Caldas *et al.*, 2024).

Em razão dessa proporção, a substituição do clínquer é a principal rota tecnológica de mitigação das emissões no setor cimenteiro. A substituição de clínquer por escórias de alto forno e cinzas volantes nos diferentes tipos de cimento vem acontecendo desde a década de 1970, impulsionada principalmente pela crise do petróleo de 1973. Esses materiais cimentícios suplementares (SCM), subprodutos

das indústrias siderúrgica e termelétrica, economizam energia térmica na medida em que dispensam em igual proporção a produção de clínquer pela cimenteira. Eles têm a capacidade de reagir com os produtos da hidratação do cimento, contribuindo para aglomerar os demais componentes do concreto (propriedade pozolânica).

De 1990 a 2020, o fator clínquer caiu, em média, entre os participantes do GNR de 83% para 75%, queda de 10%, com sua substituição pelos SCM. Com isso, as emissões de CO₂ por tonelada de cimento caíram globalmente 16% desde 1990, de 758 kg CO₂/t para 635 kg CO₂/t em 2020. No Brasil, de 1990 a 2022, as emissões específicas de carbono reduziram-se 17%, de 700 kg CO₂/t de cimento para 580 kg CO₂/t.

O uso global de cinza volante e escória de alto forno é, no entanto, limitado pela sua produção anual, disponibilidade regional, qualidade, desempenho técnico, normatização, entre outros fatores.

O montante de escória de alto forno disponível globalmente é cerca de 330 milhões de toneladas por ano, sendo que sua proporção em relação à produção mundial de cimento caiu de 17% em 1980 para 8% em 2014 (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2016). Segundo esses autores, a tendência é de a produção ficar abaixo deste patamar no longo prazo, devido à substituição das plantas siderúrgicas atuais por fornos elétricos mais modernos de arco, que não produzem escórias.

Por sua vez, a produção anual de cinza volante gira em torno de 5% da quantidade de calcário consumida na produção de clínquer (Damtoft *et al.*, 2008). A tendência é também de queda da produção pela substituição de usinas termelétricas por usinas de energia renovável no médio e longo prazo.

Para que esta rota tecnológica cumpra o potencial estimado de abatimento de 9% das emissões previstas para 2050

(Gráfico 3), será necessário usar novos SCM, como a argila caulinitica, com jazidas abundantes espalhadas pela natureza. Elas desenvolvem uma boa atividade pozolânica quando calcinadas a temperaturas entre 500 °C e 800 °C, consumindo menos energia elétrica e térmica e, conseqüentemente, emitindo menos CO₂ por tonelada em relação ao clínquer.

Atualmente, existem plantas em escala comercial em várias partes do mundo, como Suíça, Colômbia e Taiwan, produzindo 13 milhões de toneladas de argila calcinada. Esta produção deve complementar o uso de cinza volante e escória de alto forno em regiões onde sua produção está em queda.

Por outro lado, a adição mais disponível na natureza para substituir o clínquer é o calcário finamente moído, que dispensa calcinação. Ele cumpre duas funções complementares no concreto: reage com os produtos de hidratação do cimento, como os demais SCM, caracterizando-se como ligante; e ele ocupa os vazios entre os demais componentes do concreto, contribuindo com sua trabalhabilidade e impermeabilidade, exercendo papel de filer.

As práticas de mercado de cimento ensacado, com enorme variação nas taxas de substituição de clínquer por filer calcário, apontam para a potencialidade desta

estratégia (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2016). No entanto, a disseminação dessa substituição deve vir respaldada por mais estudos científicos e pela atualização normativa baseada nesses estudos, bem como pela mudança da cultura construtiva de cada país.

Estudos recentes têm explorado os efeitos sinérgicos das combinações otimizadas de argilas calcinadas e do calcário como materiais cimentícios suplementares. Esses estudos têm estabelecido que combinações na ordem de 50% de substituição do clínquer são capazes de manter as propriedades de desempenho desses cimentos em níveis similares aos cimentos atuais em uso. Levando esses estudos em conta, ECRA/CSI (2017, p. 124) estimam uma redução de até 380 MJ no consumo específico de energia térmica, uma redução de até 7 kWh no consumo específico de energia elétrica e uma redução de até 184 kg de CO₂ emitido por tonelada de cimento produzido (Tabela 1).

A crise do petróleo de 1973 impulsionou também a adoção das mais modernas tecnologias para aumentar a eficiência energética dos fornos de cimento. A substituição do processo de via úmida pelo processo de via seca foi intensificada a partir de 1990. Na via seca, a farinha de matérias-primas, úmida, passa por pré-aquecedores, uma série

de ciclones verticais formados pelos gases quentes exauridos dos fornos, antes de entrar no forno, o que faz com que as reações químicas de clínquerização ocorram mais rapidamente e com menor consumo energético. De 1990 a 2020, houve uma redução de 18% nas emissões específicas de CO₂ no setor, que foi de 4240 MJ/t de clínquer para 3460 MJ/t, pela adoção dessa estratégia.

Houve também uma redução de 14% no consumo de energia elétrica no setor cimenteiro mundial, com a introdução de moinhos verticais de rolos ou moinhos giratórios. De 1990 a 2020, o consumo elétrico no setor caiu de 119k Wh/t de cimento para 102 kWh/t. Com a implantação de tecnologias de captura, uso e estocagem de carbono no setor, o consumo elétrico deve aumentar, o que tornará a indústria cimenteira mais dependente da transição do setor elétrico para energias renováveis, para garantir emissões líquidas nulas de carbono.

A indústria de cimento tem enfatizado a rota da substituição de combustíveis fósseis por combustíveis alternativos, como pneus, resíduos domésticos e industriais, e biomassa. Ela teve início nos anos 1980 e continua aumentando sua participação na matriz energética da indústria cimenteira, por trazer redução de custos de produção e de emissões diretas e indiretas de gases do efeito estufa.

TABELA 1

ESTIMATIVAS DAS TAXAS DE SUBSTITUIÇÃO DE CLÍNQUER POR SCM E SEU IMPACTO NAS VARIAÇÕES DE CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGIA TÉRMICA E ELÉTRICA, E DE INTENSIDADE ESPECÍFICA DE EMISSÕES DE CO₂ ATÉ 2050

Adições	Taxas de substituição (%)	Varição máxima no consumo específico de energia térmica (MJ/t)	Varição máxima no consumo específico de energia elétrica (kWh/t)	Redução máxima na intensidade específica de CO ₂ (kg/t)	Varição máxima no consumo específico de energia térmica (%)*	Varição máxima no consumo de energia elétrica (%)**	Potencial máximo de redução na intensidade específica de CO ₂ (%)+**
Escória granulada de alto forno	30 a 70*	- 1590*	+ 10*	- 385*	-47	+10	-46
Cinza volante	25 a 35**	- 360**	- 15**	- 98**	-11	-14	-12
Pozolanas naturais	15 a 35***	- 360***	- 3***	- 91,7***	-11	-1	-11
Argila calcinada	15 a 35****	+150****	- 5****	- 75****	+4	-5	-9
Argila calcinada + calcário	50****	-380****	- 7****	- 184****	-11	-7	-22
Calcário + outros SCM	0 a 10***** 25*****	- 360*****	- 5*****	- 90*****	-11	-5	-11

Notas: *ECRA/CSI (2017, p. 109); ** ECRA/CSI (2017, p. 118); *** ECRA/CSI (2017, p. 121); **** ECRA/CSI (2017, p. 124); ***** ECRA/CSI (2017, p. 127);

+ESTIMATIVA A PARTIR DOS DADOS RESPECTIVOS DA LINHA E DE ECRA/CSI (2017, pp. 8-10) (NÃO INCLUI IMPACTO DA ADIÇÃO DE GESSO NO CIMENTO NO CÁLCULO); **ESTIMATIVA A PARTIR DOS DADOS RESPECTIVOS DA LINHA E DE ECRA/CSI (2017, pp. 11-13); ***ESTIMATIVA A PARTIR DOS DADOS RESPECTIVOS DA LINHA E DE SCRIVENER *et al.* (2016, p. 4) (NÃO INCLUI IMPACTO DA ADIÇÃO DE GESSO NO CIMENTO NO CÁLCULO).

Fonte: PEDROSO (2018)

O uso de combustíveis alternativos fez o consumo global por combustíveis fósseis se reduzir em 22% desde 1990 no setor cimenteiro (GNR). O Roadmap 2021 prevê que o uso de combustíveis alternativos nos fornos de cimento deve sair de um patamar médio de 6% em 2020 para 22% em 2030 e 43% em 2050. O patamar de 22% de substituição já foi alcançado pelas indústrias cimenteiras do GNR em 2022, o que demonstra a viabilidade técnica e econômica da previsão. Esta rota deve contribuir, juntamente com ganhos residuais em eficiência energética nas plantas de cimento e adição de matérias-primas como o filler calcário, com 11% de abatimento das emissões em 2050.

Todavia, persistem atualmente barreiras econômicas, técnicas e sociais para maior uso dos combustíveis alternativos nas plantas de cimento. No Brasil, por exemplo, que gera anualmente cerca de 106 milhões de toneladas de lixo, apenas 25 milhões são reaproveitados (reciclagem, compostagem e agregados reciclados de construção e demolição) e 40 milhões tem destinação adequada (aterros sanitários). O setor cimenteiro coprocessa atualmente 3,25 milhões de toneladas de resíduos, o que representa uma média de substituição

de 32%, patamar abaixo de países como Espanha (40%), França (56%), Estados Unidos (56%), Alemanha (76%) e Áustria (85%), ente outros (Gráfico 4). Em 2050, a indústria cimenteira nacional espera substituir 55% de combustíveis fósseis. Para isso, prevê aumentar o uso de biomassa em até 11% e de resíduos sólidos urbanos em até 35%. Os pneus inservíveis continuarão no patamar limite de 9% das substituições, tendo atingido sua disponibilidade.

A soma das contribuições de uso de combustíveis alternativos, de substituição de clínquer por materiais cimentícios suplementares e matérias-primas descarbonatadas, e de eficiência térmica e elétrica deve perfazer, segundo o Roadmap 2021, 20% de abatimento das emissões previstas em 2050, cerca de 760 milhões de toneladas de carbono, das 3,9 bilhões de toneladas estimadas de serem abatidas em 2050 (Gráfico 3). Uma contribuição marginal para esta meta deve vir da pesquisa, desenvolvimento e inovação de novos ligantes e do uso de energias renováveis nas plantas de cimento.

O Roadmap Net Zero 2050 do Brasil faz uma previsão mais otimista para a contribuição do setor cimenteiro nacional para se chegar em emissões líquidas nulas

em 2050 no segmento construtivo: 10% de redução proveniente da produção de clínquer (por meio de SCMs) e 21% de redução proveniente da produção de cimento (por meio de combustíveis alternativos, adição de filler calcário e eficiência energética), partindo das 40 milhões de toneladas de carbono emitidas em 2020 e estimando 65 milhões de toneladas que seriam emitidas em 2050, caso não se adote as rotas tecnológicas do mapeamento brasileiro (Gráfico 5).

Em nível mundial, o mapeamento tecnológico mais recente da indústria cimenteira delega 80% do abatimento previsto para se atingir emissões líquidas nulas em 2050 ao setor de produção e uso do concreto, e à implementação de tecnologias de captura, uso e armazenamento de carbono.

A captura e estocagem de carbono (CCS) consiste no sequestro do CO₂ à medida que é emitido na planta, na sua liquefação e transporte por meio de dutos, e, por fim, no seu armazenamento no subsolo, como em poços vazios de petróleo. No momento existem 100 projetos anunciados, dos quais 33 são esperados estarem finalizados até 2030. Nenhum deles no Brasil.



GRÁFICO 4

TAXA DE SUBSTITUIÇÃO DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS POR COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS

FONTE: GCCA (2021)

Contribuições para o Net Zero por categoria até 2050

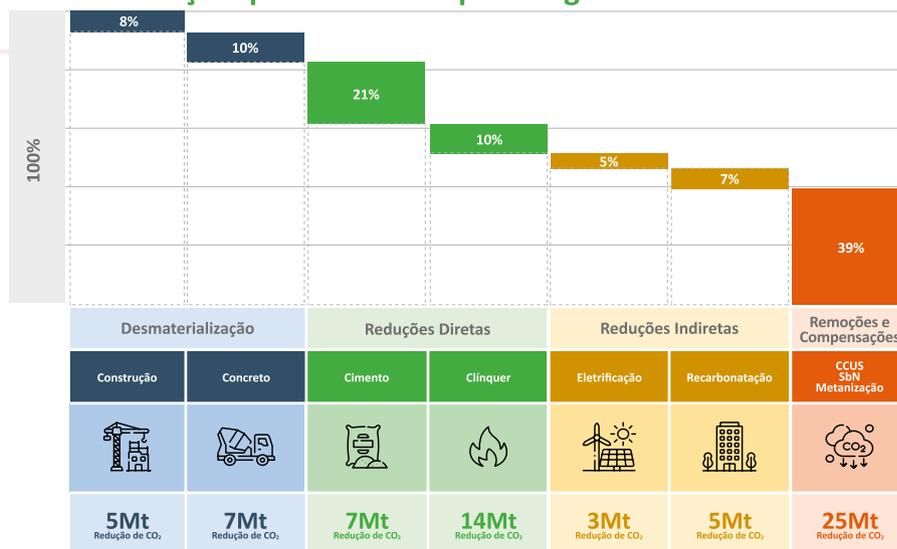


GRÁFICO 5

PARTICIPAÇÃO PERCENTUAL DE ROTAS TECNOLÓGICAS PARA ATINGIR EMISSÕES LÍQUIDAS NULAS EM 2050 NO ROADMAP BRASILEIRO

FONTE: ROADMAP DO NET ZERO - BRASIL

Por sua vez, a estratégia de captura e uso do carbono (CCU) é uma alternativa economicamente mais interessante para a indústria cimenteira, pois prescinde de um ambiente regulatório favorável econômica e tecnicamente em termos de logística de transporte e armazenamento e de mercado de carbono, e resulta na fabricação de insumos com valores de mercado, o que pode compensar seu custo de adoção e operação. Existem, atualmente, 58 projetos de CCU em estágio de implementação no mundo, 31 deles sendo projetos de escala completa, que devem contribuir, quando finalizados, para a captura de 25 milhões de toneladas de CO₂, bem abaixo da meta de 840 milhões de toneladas para 2050 para CCUS (Gráfico 3).

Um uso interessante para o gás carbônico capturado é a cura produtos pré-fabricados cimentícios de concreto simples, sem armadura. Estudos em andamento têm mostrado ganhos de resistência mecânica iniciais comparáveis à cura convencional do concreto (com vapor), com a vantagem de fixação do carbono capturado no produto cimentício. Faltam, porém, estimativas de abatimento de carbono para esta tecnologia.

Adicionalmente, o Plano Clima do Brasil prevê que a indústria cimenteira possa fazer uso do mercado de carbono regulado, comprando certificados do setor florestal e agropecuário, enquanto as tecnologias de CCUS não estejam amadurecidas.

3. ROTAS TECNOLÓGICAS DA DESCARBONIZAÇÃO DA CONSTRUÇÃO

Em termos de produção de concreto, existem alguns caminhos promissores. Em países em que esta produção é predominantemente feita em canteiros de obras, como a Índia e o Brasil, promover o maior uso de concreto dosado em central pode trazer economia em termos de emissões de carbono, pois esses concretos usam adições, melhor granulometria de agregados e dosagem do concreto adequada para a resistência mecânica especificada em projeto, fatores que favorecem o menor uso de cimento no concreto.

A quantidade de ligante no concreto pode ser reduzida ao seu limite mínimo por meio de técnicas de empacotamento e dispersão de partículas. O empacotamento visa minimizar os vazios entre os componentes do concreto por meio de um estudo

granulométrico refinado. A dispersão de partículas usa aditivos químicos que promovem a dispersão dos componentes no concreto fresco e, assim, garante sua trabalhabilidade com menos água. As duas técnicas combinadas são capazes de reduzir a quantidade de cimento necessária para ligar os demais componentes, produzindo um concreto de uma determinada classe de resistência com menor impacto ambiental (Veja artigo sobre o concreto Quantum nesta edição). Uma questão em aberto é quanto à durabilidade desses concretos, pois se sabe que existe uma correlação positiva entre a quantidade de cimento e a durabilidade do concreto.

Num estudo de caso publicado em periódico internacional, Belizario-Silva *et al.* (2021) demonstraram que a escolha entre o concreto convencional e um concreto inovador desenvolvido pelos autores em condições laboratoriais, com alto teor de fíler em substituição ao cimento e baixo teor de água, foi o principal determinante na variação da pegada de carbono de uma estrutura pré-fabricada, variando entre 124 tCO_{2e} e 324 tCO_{2e}, limites mínimo do concreto inovador e limite máximo do concreto convencional, respectivamente, em função do traço escolhido (Figura 1).

Para o cenário no qual foi usado apenas o concreto convencional, a pegada de carbono da estrutura variou de 162 tCO_{2e} e 324 tCO_{2e}. O principal fator decisivo neste caso para essa variação foi a escolha do tipo de laje do projeto estrutural: a laje

“pi” apresentou menor pegada de carbono (220 tCO_{2e}), sobretudo porque requer menor volume de concreto, seguida pelas lajes alveolares de 40 cm (244 tCO_{2e}) e de 16 cm (267 tCO_{2e}). O segundo fator mais importante nesse cenário foi a pegada de carbono do cimento composto, que variou em função da variação do teor de clínquer desses cimentos (Figura 2).

Os dados acima referem-se ao concreto dosado em central. Todavia, em países em que os cimentos ensacados perfazem a maior demanda e trazem uma quantidade alta de materiais cimentícios suplementares, como no Brasil, onde 60% do mercado de cimento é ensacado, pode ser também interessante manter este mercado para construções que demandem estruturas com baixa resistência mecânica, adotadas na autoconstrução.

A opção pelo concreto dosado em central ou concreto rodado em obra com cimento composto com alto teor de materiais cimentícios suplementares deverá ser informada, para cada caso, por meio de Avaliações do Ciclo de Vida dos produtos usados na obra em referência.

O GNR não se aplica ainda à produção de concreto e está em processo de adaptação para agregar os dados das associações de empresas de concretagem em nível mundial. Apesar disso, o Roadmap 2021 faz a previsão de que, globalmente, a otimização da produção do concreto deve levar à redução do conteúdo de clínquer nele em 5% em 2030 e em 14% em 2050

Resultados da análise de sensibilidade para o concreto convencional ou inovador (HFLW)

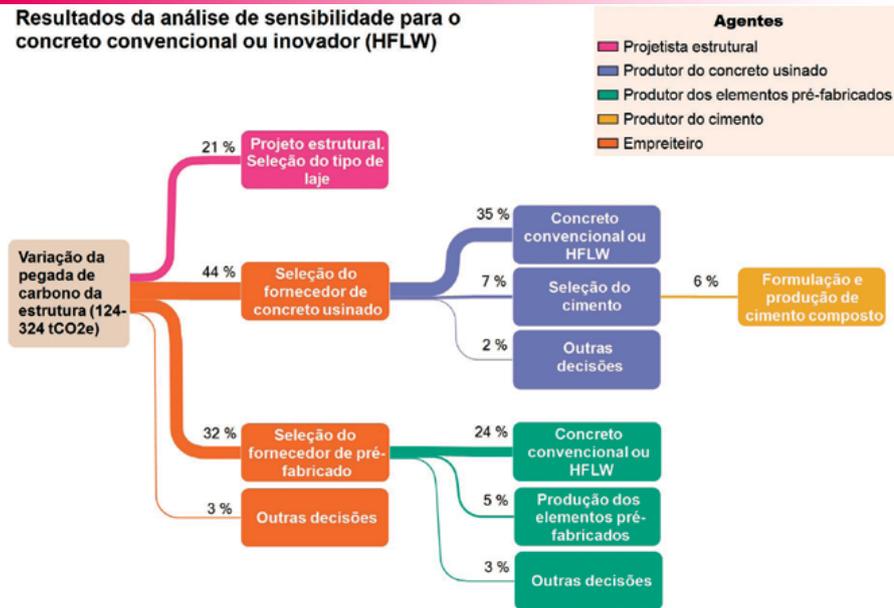


FIGURA 1

PORCENTAGENS CONTRIBUTIVAS DOS FATORES DETERMINANTES PARA A VARIACÃO DA PEGADA DE CARBONO DA ESTRUTURA EM ANÁLISE PARA O CENÁRIO QUE CONSIDERA O USO DE CONCRETO CONVENCIONAL OU INOVADOR

FONTE: BELIZARIO-SILVA *et al.* (2021)

para mitigar emissões de CO₂ por metro cúbico de concreto aplicado (Veja artigo na edição sobre ACV de concreto armado).

Por sua vez, o concreto de alta resistência usa menos água e tem uma melhor distribuição granulométrica, sendo menos poroso e permeável a agentes agressivos, como o próprio gás carbônico, cloretos e sulfatos, que ingressando no concreto atacam a película passivadora em redor das armaduras, que, por conseguinte iniciam processo corrosivo. Sendo assim, concretos de alta resistência, como o concreto de ultra-alto desempenho, requer menos manutenções periódicas e têm maior durabilidade; consequentemente, mantêm-se em serviço por muito mais tempo, preservando recursos materiais e energéticos.

A maior adoção de agregados reciclados de construção e demolição pode também contribuir para abater emissões no setor, uma vez que os agregados reciclados são usados em substituição às areias e britas naturais, que não precisarão ser explorados, processados e transportados. A Pesquisa Setorial 2024 da Associação Brasileira para a Reciclagem de Resíduos da Construção Civil (Abrecon) estima que apenas 25% dos 106 milhões de toneladas

em relação a 2020, o que deve contribuir para um abatimento nas emissões de 430 milhões de toneladas em 2050, isto é, 11% de redução (Gráfico 3).

Já, pelo lado da demanda por concreto, a descarbonização deve acontecer por meio da desmaterialização dos projetos estruturais e da maior eficiência executiva.

Um caso de desmaterialização, processo de projetar e construir uma estrutura com menos insumos e energia, e consequentemente, com menos desperdício e com a possibilidade de reaproveitamento de suas peças, sem comprometer seus requisitos de segurança, funcionalidade e durabilidade, foi exposto acima pelo estudo de Belizário-Silva *et al.* (Figura 2). Nela o projetista conta com opções de diferentes tipos de lajes, podendo optar pela laje com menor impacto ambiental. Outra rota de desmaterialização da estrutura de concreto é a otimização topológica, que consiste na busca pela melhor distribuição do concreto no projeto de estrutura, removendo material de regiões menos solicitadas, por meio do uso de software de modelagem numérica que promove o melhor balanceamento entre consumo de materiais e desempenho estrutural (Veja artigos sobre otimização topológica nesta edição).

Aumentar a resistência do concreto com maior consumo de cimento em sua produção pode, à primeira vista, parecer um

caminho contraproducente. Mas, estudos têm apontado que o aumento da resistência mecânica de pilares diminui consideravelmente sua seção transversal, o que leva ao menor consumo de concreto e aço na sua fabricação, contribuindo positivamente

Resultados da análise de sensibilidade para o concreto convencional

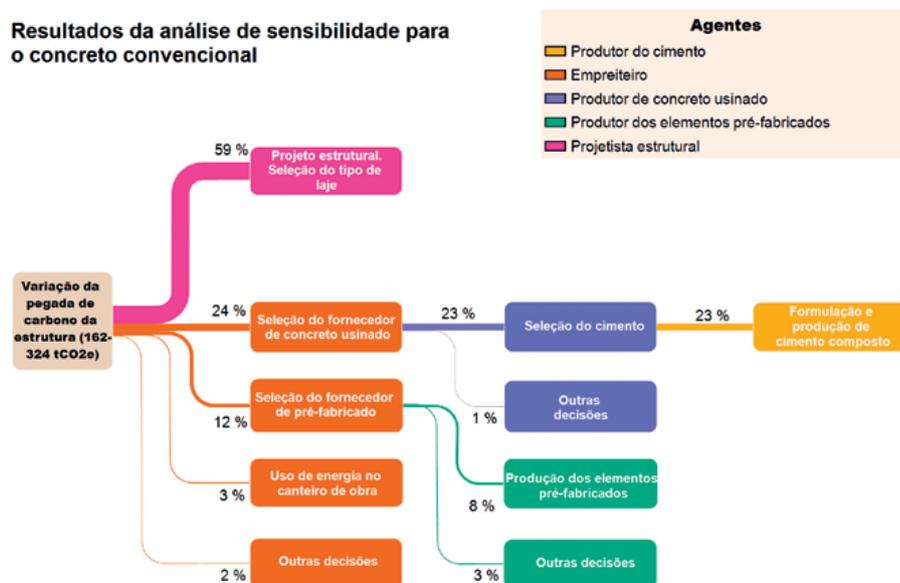


FIGURA 2

PERCENTAGENS CONTRIBUTIVAS DOS FATORES DETERMINANTES PARA VARIACÃO DA PEGADA DE CARBONO DA ESTRUTURA ANALISADA PARA O CENÁRIO QUE CONSIDERA APENAS O CONCRETO CONVENCIONAL

FONTE: BELIZARIO-SILVA *et al.* (2021)

de entulho por ano são reciclados. Segundo a pesquisa, apenas 16 milhões de metros cúbicos de agregados reciclados foram comercializados em 2023, diante do potencial estimado de 24 milhões. Adicionalmente, os agregados reciclados podem fixar o CO₂ capturado por meio da carbonatação e ter suas propriedades mecânicas melhoradas antes de seu uso no concreto.

O principal obstáculo ao maior uso do agregado reciclado não é técnico. Pesquisas conduzidas em universidades brasileiras têm demonstrado a viabilidade técnica de uso de 100% de agregado reciclado em concreto não estrutural (base de pavimentação, calçadas e aterros) e a norma brasileira faculta a substituição de até 20% do agregado natural por reciclado de concreto para estruturas de até 20 MPa em ambientes de média agressividade (classes I e II).

No entanto, o desconhecimento por parte de engenheiros e construtoras e a falta de políticas públicas fomentadoras do maior uso de reciclados na construção têm contribuído para sua baixa utilização no Brasil.

No que concerne ao abatimento de carbono com uso de agregados reciclados, como esses aumentam, no geral, o consumo de cimento, se faz necessário avaliar o balanço final entre esses dois fatores.

De qualquer modo, o uso de agregados reciclados é importante para reduzir a demanda por materiais naturais.

O Roadmap 2021 prevê que o potencial global de redução das emissões de carbono por meio de projeto e construção ecologicamente eficientes deve ser de 7% em 2030 e 22% em 2050, quando se deve evitar emissões da ordem de 840 milhões de toneladas (Gráfico 3).

Ele também estima que a recarbonatação do concreto possa contribuir com 6% de abatimento das emissões de carbono em 2050 (cerca de 240 milhões de toneladas).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O setor global de cimento e concreto apresenta um perfil de emissões desafiador, devido à sua dependência do processo de calcinação do clínquer e ao uso intensivo de combustíveis fósseis. As rotas tecnológicas delineadas no último roadmap da GCCA fornecem um arcabouço estratégico para a descarbonização, contemplando: redução do teor de clínquer, adoção de combustíveis alternativos e renováveis, desenvolvimento de tecnologias de captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS), otimização da dosagem do concreto, industrialização e otimização do

projeto e execução da estrutura de concreto.

Todavia, os dados disponíveis indicam que a implementação dessas soluções ainda está em estágio inicial, com lacunas significativas em termos de maturidade tecnológica, custo-efetividade e disponibilidade de infraestrutura. Em particular, a expansão da capacidade de CCUS e a contabilidade ambiental relativa à produção e consumo do concreto permanecem como gargalos críticos para o atingimento das metas de emissões líquidas zero.

A integração de tecnologias emergentes requer investimentos robustos em P&D, além da criação de um ambiente regulatório que favoreça a inovação e a adoção em escala industrial. A harmonização de padrões e métricas para monitoramento e reporte de emissões será essencial para garantir a transparência e a comparabilidade dos resultados.

Portanto, para a concretização das metas do setor, é imprescindível um esforço sistêmico que articule a inovação tecnológica, políticas públicas eficazes, incentivos econômicos e cooperação internacional, assegurando o desenvolvimento sustentável da cadeia produtiva de cimento e concreto, sem comprometer a competitividade global do setor. 🌱

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Belizario-Silva *et al.* Stakeholder influence on global warming potencial of reinforce concrete estrutura. *Journal of Building Engineering*, Vol. 44, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102979>
- [2] CALDAS, L.; SILVA, L.; SIQUEIRA, T.; TOLEDO FILHO, R. Descarbonização e Política Industrial: Desafios para a Cadeia do Cimento. *Decarbonization & Industrial Policy Working Paper DIP-BR05*, 2024.
- [3] DAMTOFT, J.S.; LUKASIK, J.; HERFORT, D.; SORRENTINO, D.; GARTNER, E.M. Sustainable development and climate change initiatives. *Cement and Concrete Research*, [S.l.], n. 38, pp. 115-127, 2008. doi:10.1016/j.comconres.2007.09.008
- [4] EUROPEAN CEMENT RESEARCH ACADEMY e CEMENT SUSTAINABILITY INICIATIVE. *Development of state of the art-techniques in cement manufacturing: trying to look ahead*. Duesseldorf, Geneva: ECRA/CSI, 2017. Disponível em: <<http://www.wbcdcement.org/technology>>. Acesso em: 20 dez. 2017.
- [5] Forster, Piers *et al.* Indicators of Global Climate Change: anual update of key indicators of the state of the climate system and human influence. *Earth System Science Data*, 2025, Vol. 17, N. 6 (<https://doi.org/10.5194/essd-17-2641-2025>)
- [6] Global Cement and Concrete Association: *Concrete Future – GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete (2020)*. <https://gccassociation.org/concretefuture/>
- [7] Global Cement and Concrete Association. *Concrete Future: Net Zero Progress Report 2024/202*.
- [8] Global Cement and Concrete Association. *GNR 2.0 – GCCA in Numbers*. Retrieved August 03, 2023 from <https://gccassociation.org/sustainability-innovation/gnr-gcca-in-numbers/>
- [9] Global Cement Report. *International Cement Review: 14th edition*, November 2022.
- [10] Minson, A: *The UN Sustainable Development Goals and Concrete*. In: *Proc. fib Symposium 2020, Concrete Structures for Resilient Society* (pp. 2237–2244). Shanghai, China (2020)
- [11] PEDROSO, F.L. *Perspectivas de valor e desenvolvimento tecnológico e científico do cimento: motivações passadas, presentes e futuras*. 2018. 305 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. Departamento de Filosofia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018
- [12] SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. *Eco-efficient cements: potential, economically viable solutions for a low-CO₂, cement-based materials industry*. Paris: United Nations Environment Programme (UNEP), 2016

Construção civil brasileira rumo à descarbonização: o papel estratégico da calculadora CECarbon

FRANCISCO ANTUNES DE VASCONCELLOS NETO - VICE-PRESIDENTE – SindusCon-SP



Diante da relevância do tema das mudanças climáticas e da necessidade de compreender como a construção civil brasileira se posiciona em relação às emissões de gases de efeito estufa no cenário global, além da importância de apoiar o setor nesse desafio, o Comitê de Meio Ambiente (Comasp) do SindusCon-SP, em parceria com a Secretaria Nacional de Habitação do Ministério das Cidades e a Agência de Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável (GIZ), desenvolveu a CECarbon - Calculadora de Eficiência Energética e Emissões de Carbono na Construção Civil - Edificações.

Trata-se da primeira ferramenta brasi-

leira criada especificamente para o setor de edificações e opera com base na metodologia reconhecida internacionalmente, GHG Protocol, que calcula o carbono incorporado, abrangendo as emissões dos materiais utilizados ao longo de todo o processo de fabricação, considerando desde a extração até o transporte até a obra. Além dos materiais, considera as emissões para a execução da obra até a entrega do empreendimento. Outra medição que a CECarbon permite é a energia embutida nestas mesmas fases. O desenvolvimento contou com a colaboração de construtoras e incorporadoras, o que garantiu uma linguagem técnica alinhada à realidade das obras.

A CECarbon é uma ferramenta online e totalmente gratuita, com suporte técnico oferecido pelo SindusCon-SP, também sem custo, o que permite seu uso por empresas de todos os portes e profissionais liberais, ampliando o acesso à gestão de emissões na construção civil. Permite a elaboração dos inventários em etapas distintas, na fase de projeto e na execução da obra, e inserção de dados em diferentes fases da obra, possibilitando a escolha de projeto, materiais e sistemas construtivos mais eficientes, acompanhando a evolução dos indicadores ao longo do tempo. Além disso, conta com um módulo específico para a elaboração do inventário

corporativo, abrangendo matriz, filiais e estandes de vendas, e disponibiliza o inventário integrado (obra e corporativo).

A calculadora gera relatórios detalhados e compatíveis com exigências de certificações, reguladores e instituições financeiras. Está hospedada em nuvem com segurança criptografada, é intuitiva e conta com curso online também gratuito com o objetivo de capacitar os usuários na utilização da ferramenta.

A CECarbon disponibiliza indicadores específicos estratificados por tipologia de empreendimento, padrão e sistema construtivo. Possibilita às empresas comparar resultados internos com o mercado e promover ações de redução desde a fase de projeto.

Desde seu lançamento, em dezembro de 2020, a CECarbon vem consolidando uma base de dados robusta e em constante evolução. Em maio de 2025, publicou, pelo segundo ano consecutivo, os indicadores setoriais, que vêm evidenciando o desempenho positivo do setor da construção no Brasil. As medições apontam uma média de 220 kg CO_{2e}/m² de área construída, um nível baixo em comparação com países desenvolvidos, reflexo principalmente da matriz energética majoritariamente limpa do país.

Esses dados também reforçam a necessidade de atenção ao carbono incorporado, que representa cerca de 50-60% das emissões em relação ao carbono operacional. As emissões operacionais são reduzidas por meio de soluções de eficiência energética e utilização de fontes mais limpas e renováveis. Isto torna a relevância do carbono incorporado ainda maior na pegada de carbono de novas edificações. Em empreendimentos com foco em eficiência energética, como net-zero, essa proporção pode chegar a mais de 70%. Considerando esse cenário, torna-se essencial avançar em estratégias específicas para redução do carbono incorporado ao longo do ciclo de vida das construções. Mesmo diante desse

cenário, o Brasil se destaca apresentando níveis de carbono incorporado consideravelmente mais baixos em relação à média internacional.

A consolidação dessa base de dados é fundamental e deve ser levada em consideração para fomentar o diálogo entre os diversos atores do setor e oferecer embasamento técnico para decisões mais sustentáveis. O impacto da ferramenta já ultrapassa os limites dos canteiros de obras e começa a influenciar políticas públicas, como, por exemplo, o uso do instrumento para obtenção do Selo Casa Azul+ Caixa, destinado a propostas de empreendimentos habitacionais que adotem solução eficientes nas edificações. Atende às diretrizes da Portaria nº 725/2023 do Ministério das Cidades, que recomenda seu uso em construções sustentáveis, assim como no IPTU Verde de Salvador (BA) e no Manual de Estratégias Sustentáveis de São José dos Campos (SP). Campinas (SP) se tornou pioneira no país ao adotar oficialmente a calculadora como instrumento de gestão climática, incorporando seu uso ao Plano Local de Ação Climática.

A ferramenta também está alinhada com a Taxonomia Sustentável Brasileira, o que pode contribuir para o acesso a financiamentos mais verdes para o setor.

A plataforma vem ganhando rápido protagonismo entre construtoras, incorporadoras, governos e até instituições financeiras interessadas em promover práticas mais sustentáveis. Só em 2024, a CECarbon registrou um aumento de 84% nos acessos e 52% no número de usuários, em relação a 2023, sendo responsável por mais de 100 inventários de emissões no setor da construção. Já é utilizada em obras distribuídas por todas as regiões do Brasil, abrangendo 13 estados, o Distrito Federal e mais de 100 cidades.

A falta de dados nacionais sobre as emissões de produtos e sistemas construtivos segue como um desafio para o setor da construção, já que esses podem se

diferir significativamente com relação aos dados internacionais.

A transição para uma economia de baixo carbono é um processo que precisa do engajamento de toda a cadeia produtiva e o fortalecimento de políticas públicas que promovam incentivos e regulamentações. A CECarbon se consolida, como um instrumento para orientar decisões mais sustentáveis, promover a inovação no setor e construir caminhos concretos para um futuro e cidades mais resilientes e de menor impacto climático.

PRÓXIMOS PASSOS

A CECarbon vem sendo continuamente aperfeiçoada, com atualizações anuais que acompanham a evolução do setor e do tema. Em 2025, está sendo desenvolvida sua quarta versão, que trará avanços importantes, como a integração com softwares de orçamento e com a metodologia BIM (*Building Information Modeling*). Além disso, a ferramenta passará a integrar uma plataforma de sustentabilidade, que também disponibilizará a CEHídrica - Calculadora de Eficiência Hídrica na Construção Civil, expandindo a gestão ambiental integrada para o setor de edificações.

Ainda em 2025, terá início o desenvolvimento de uma norma técnica da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) para a elaboração de inventários de emissões de gases de efeito estufa voltados especificamente ao setor da construção civil - edificações. Essa iniciativa busca promover a padronização e definição de métricas contribuindo para a gestão climática no setor.

A CECarbon está disponível em: www.cecarbon.com.br. O curso prático para utilização da calculadora pode ser acessado pelo link:

<https://sindusconsp.com.br/universidade/curso-pratico-para-uso-da-ferramenta-cecarbon-calculadora-de-consumo-energetico-e-emissoes-de-carbono-na-construcao-civil>. 

QUANTUM: concreto ecoeficiente e de alto desempenho

ALESSANDRA LORENZETTI DE CASTRO - PROF.^a DR.^a - <https://orcid.org/0000-0002-7248-7327> (alcastro@sc.usp.br) – USP
GUILHERME CÉSAR MARTINS DE MORAIS - ENG., **LUCAS ALVES MAGALHÃES** - ENG., **BERNARDO BRASIL DE AQUINO PORTO** - ENG. – Realmix Concreto
ERICH SILVA DOS SANTOS - ENG., **ROGÉRIO JOSÉ CÂNDIDO VENÂNCIO** - ENG. MESTRE – Chryso Saint-Gobain, GCP Brasil

RESUMO

BASEADO NOS CONCEITOS DE DISPERSÃO E EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS, O CONCRETO QUANTUM FOI DESENVOLVIDO COM O OBJETIVO DE ALCANÇAR DESEMPENHO ADEQUADO, COM DESENVOLVURA TECNOLÓGICA E MENOR PEGADA DE CARBONO, SENDO APLICÁVEL EM DIFERENTES CONDIÇÕES PARA EXECUÇÃO DE OBRAS DIVERSAS E, ASSIM, ATENDENDO ÀS NECESSIDADES DO MERCADO DA CONSTRUÇÃO CIVIL. CONTROLANDO A DISPERSÃO DAS PARTÍCULAS POR MEIO DA INCORPORAÇÃO DE ADITIVOS QUÍMICOS, APRESENTA CONSISTÊNCIA FLUIDA, FACILITANDO O LANÇAMENTO E ADENSAMENTO DO CONCRETO NAS FÔRMAS. DOSADO NA CENTRAL E COM MANUTENÇÃO DA CONSISTÊNCIA ATÉ A OBRA, ELIMINA A NECESSIDADE DE REDOSAGEM NO MOMENTO DE SUA APLICAÇÃO. NO ESTADO ENDURECIDO, APRESENTA DESEMPENHO MECÂNICO SATISFATÓRIO, COM CONSUMO DE CIMENTO REDUZIDO, CONTRIBUINDO PARA A REDUÇÃO DA EMISSÃO DE CO₂. DEVIDO À MAIOR EFICIÊNCIA NO USO DE LIGANTES, O CONCRETO SE TORNA ECOEFICIENTE. NO PRESENTE ARTIGO, SÃO APRESENTADAS AS PREMISSAS DO PROJETO, BEM COMO OS ENSAIOS PARA VALIDAÇÃO DOS TRAÇOS. DESSA FORMA, FOI POSSÍVEL OBTER CONCRETOS QUE ATENDEM ÀS EXIGÊNCIAS NORMATIVAS, PARA AS DIFERENTES CLASSES DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL, COM MENOR IMPACTO AMBIENTAL.

PALAVRAS-CHAVE: CONCRETO, ABATIMENTO, RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, DURABILIDADE, DESEMPENHO AMBIENTAL.

1. INTRODUÇÃO

Frente ao impacto ambiental do cimento Portland, matéria-prima essencial para produção do concreto, verifica-se uma pressão crescente para inovar e melhorar a sustentabilidade deste material, com os estudos indicando que o futuro está na otimização da dosagem com o aumento da

eficiência dos ligantes [1;2]. Diante desta preocupação, o uso de concretos sustentáveis e/ou ecoeficientes, que proporcionem redução do consumo de cimento e aprimoramento das propriedades mecânicas e durabilidade, é cada vez mais frequente.

Em linhas gerais, um concreto sustentável e/ou ecoeficiente pode ser definido como o concreto produzido utilizando materiais alternativos ou resíduos reciclados, a fim de reduzir o consumo de energia e de recursos naturais, e o impacto ambiental. Esse conceito integra questões ambientais ao material com relação ao fornecimento de matérias-primas, dosagem, projeto estrutural, construção e manutenção das estruturas de concreto. Esse concreto especial oferece inúmeros benefícios ambientais, técnicos e econômicos, como melhor trabalhabilidade e bombeabilidade, alta resistência mecânica, permeabilidade reduzida e, assim, maior durabilidade. Essas características promovem uma construção mais rápida, redução dos custos da construção e de manutenção, e aumento da vida útil das estruturas de concreto [3]. Além disso, promove o uso sustentável e inovador de resíduos e materiais alternativos não convencionais no concreto [4]. Assim, observa-se uma crescente demanda por esses concretos, estimulada pela busca por produtos de alta qualidade, pelo desejo de redução das emissões de gases de efeito estufa, pela necessidade de conservação de recursos naturais e por espaços limitados em aterros sanitários.

Neste contexto, visando reduzir o impacto ambiental do concreto aplicado na prática da construção civil, foi desenvolvido o QUANTUM, um concreto ecoeficiente e de alto desempenho. O presente artigo tem como objetivo apresentar este desenvolvimento tecnológico, indicando as premissas do projeto, a avaliação do

seu comportamento tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, e seu desempenho ambiental.

2. PREMISSAS DO PROJETO QUANTUM

Baseado nos conceitos de dispersão e empacotamento de partículas, o concreto QUANTUM foi desenvolvido no Centro de Tecnologia da Realmix Concreto, com o objetivo de alcançar desempenho adequado, com desenvoltura tecnológica e menor pegada de carbono, sendo aplicável em diferentes condições para a execução de obras diversas e, assim, atendendo às necessidades do mercado da construção civil.

Controlando a dispersão das partículas por meio da incorporação de aditivos químicos específicos, os concretos da linha QUANTUM apresentam consistência fluida, facilitando seu lançamento e adensamento nas fôrmas. Dosados na central com manutenção da consistência até a obra, eliminam a necessidade de redosagem no momento da aplicação. Com isso, obtém-se uma maior produtividade na etapa de concretagem e maior qualidade do elemento concretado, reduzindo defeitos na estrutura. Por meio do empacotamento de partículas, possuem uma composição otimizada, com consumo de cimento reduzido, para um desempenho mecânico satisfatório, contribuindo para a redução da emissão de CO₂. Além disso, reduzem efeitos adversos relacionados à ação térmica devido ao menor calor de hidratação, possibilitando a execução de elementos de fundação com número reduzido de camadas. Devido à maior eficiência no uso de ligantes, o concreto se torna ecoeficiente.

Sua linha de produtos contempla concretos com classe de resistência à compressão moderada e alta, podendo ser personalizado sob demandas específicas.

Com comportamento mecânico adequado às diversas demandas, auxilia a gestão de traços de concreto para a execução da estrutura, potencializando a redução de custos dos parâmetros do projeto, sem restrição para com a concepção arquitetônica e estrutural dos edifícios.

3. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS CONCRETOS QUANTUM

Para a produção dos concretos, foram considerados os materiais disponíveis na região metropolitana de Goiânia/GO, onde estão localizadas as centrais da Realmix Concreto:

- ▶ cimento Portland de alta resistência inicial e resistente a sulfatos (CPV ARI RS);
- ▶ sílica ativa como adição mineral;
- ▶ areia natural quartzosa, com dimensão máxima característica de 2,36 mm;
- ▶ areia artificial, de origem granítica, com dimensão máxima característica de 4,75 mm;
- ▶ dois tipos de agregado graúdo, ambos de origem granítica, com dimensão máxima característica de 9,5 mm e 19 mm;
- ▶ água recuperada de processos de preparo do concreto e/ou água proveniente de poço artesiano ou da rede de abastecimento local, de acordo com a NBR 15900-1:2009 [5];

TABELA 1

TRAÇOS DE CONCRETO QUANTUM PRODUZIDOS. CONSUMO EM KG/M³

Materiais	C40	C50	C60
Cimento	310	361	407
Sílica	26	30	34
Agregado total	1860	1803	1751
Água	174	173	173
Aditivo RA1	2,48	2,88	3,26
Aditivo RA2	2,17	2,52	2,85

- ▶ aditivo tipo RA1 para redução da quantidade de água de amassamento e manutenção da trabalhabilidade;
- ▶ aditivo tipo RA2 para garantir a coesão e consistência adequadas.

Foi desenvolvido um estudo de dosagem específico para os traços de concreto QUANTUM, mantendo-se fixos os teores de argamassa e de água/materiais secos. Assim, para atingir a faixa de abatimento estabelecida - (220 ± 30) mm -, foram ajustados os teores dos aditivos químicos constituintes da mistura. A composição dos concretos é apresentada na Tabela 1.

Para a validação dos traços, foram avaliadas diferentes propriedades, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido,

tanto em laboratório quanto em obra, por meio das seguintes determinações: abatimento com manutenção ao longo do tempo; resistências à compressão e à tração na flexão; módulo de elasticidade; absorção de água por imersão e por capilaridade; índice de vazios; variação dimensional; resistências à carbonatação e à penetração de íons cloreto; resistividade elétrica; e desempenho ambiental.

3.1 Comportamento no estado fresco

O comportamento dos concretos no estado fresco foi avaliado por meio da determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, realizado no momento do recebimento do concreto em obra. Verificou-se que os concretos apresentaram valores de abatimento dentro do limite estabelecido previamente, sendo observada a manutenção da consistência durante o trajeto entre a central e a obra, sem necessidade de redosagem, mesmo sob condições ambientais adversas (elevada temperatura e baixa umidade). Na Figura 1, são apresentadas amostras de QUANTUM no ensaio de abatimento para recebimento do concreto (Figura 1.a) e durante o lançamento nas fôrmas (Figura 1.b). É possível observar que, no momento da aplicação,



A



B



C

FIGURA 1

(A) AMOSTRA DE CONCRETO NO ENSAIO DE ABATIMENTO E (B) DURANTE O LANÇAMENTO. (C) ANÁLISE VISUAL DA SUPERFÍCIE FRATURADA DE UM CORPO DE PROVA DE CONCRETO, APÓS ENSAIO MECÂNICO

TABELA 2

RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS

Propriedade	Idade (dias)	C40	C50	C60
Resistência à compressão (MPa)	1	21,6 ± 0,6	26,2 ± 1,1	35,1 ± 3,2
	3	29,1 ± 1,5	41,6 ± 2,3	50,6 ± 2,1
	7	34,6 ± 2,1	49,3 ± 3,4	57,1 ± 4,0
	28	46,0 ± 4,3	55,5 ± 5,2	66,3 ± 6,2
Resistência à tração na flexão (MPa)	3	2,83 ± 0,13	3,83 ± 0,05	4,65 ± 0,14
	7	3,42 ± 0,37	4,36 ± 0,35	5,02 ± 0,45
	28	5,14 ± 0,98	5,88 ± 1,05	6,42 ± 1,28
Módulo de elasticidade estático E_{ci} (GPa)	3	23,3 ± 3,0	26,8 ± 3,5	27,6 ± 3,7
	7	24,9 ± 3,1	28,7 ± 3,6	29,1 ± 3,6
	28	26,2 ± 2,9	30,4 ± 3,1	32,5 ± 4,1
Módulo de elasticidade dinâmico E_{cd} (GPa)	3	32,6 ± 2,5	35,0 ± 2,6	34,3 ± 2,5
	7	33,7 ± 2,3	36,3 ± 2,5	39,6 ± 2,8
	28	35,1 ± 2,0	38,0 ± 2,3	42,5 ± 3,0
Módulo de elasticidade dinâmico E_{cid} (GPa)	3	22,2 ± 2,2	24,3 ± 2,4	24,3 ± 2,5
	7	24,8 ± 2,4	26,9 ± 2,6	29,2 ± 2,8
	28	26,2 ± 1,7	29,4 ± 2,8	33,5 ± 2,9

Nota: E_{ci} = MÓDULO DE ELASTICIDADE TANGENTE INICIAL (ESTÁTICO); E_{cd} = MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO; E_{cid} = MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO (EQUIVALENTE AO TANGENTE INICIAL), ESTIMADO A PARTIR DE E_{cd} , DE ACORDO COM ANEXO B DA NBR 8522-1:2021.

o material apresentou-se coeso, sem evidência de segregação ou exsudação. Uma amostra da superfície fraturada de um corpo de prova, após o ensaio mecânico, é apresentada na Figura 1.c, verificando-se a homogeneidade do material também no estado endurecido.

3.2 Propriedades mecânicas

Os resultados dos ensaios mecânicos realizados nos concretos QUANTUM são apresentados resumidamente na Tabela 2. Os valores correspondem aos valores médios e ao desvio-padrão obtidos a partir de corpos de prova moldados para o controle tecnológico dos concretos. Verifica-se que as classes de resistência avaliadas apresentaram desempenho mecânico satisfatório, atendendo aos critérios de controle do processo de dosagem da central, conforme NBR 7212:2024 [6].

Ressalta-se que no caso do módulo de elasticidade, os resultados foram obtidos considerando agregados graúdos de origem granítica de menor densidade (2,77 kg/m³), disponíveis na região metropolitana de Goiânia. Com o uso de agregados graúdos graníticos de maior densidade (2,87 kg/m³), é possível aumentar em até 7 GPa o valor do módulo de elasticidade em relação aos valores apresentados na Tabela 2.

3.3 Propriedades físicas

Com relação às propriedades físicas dos concretos QUANTUM, os ensaios foram realizados para determinação do índice de vazios e absorção de água por

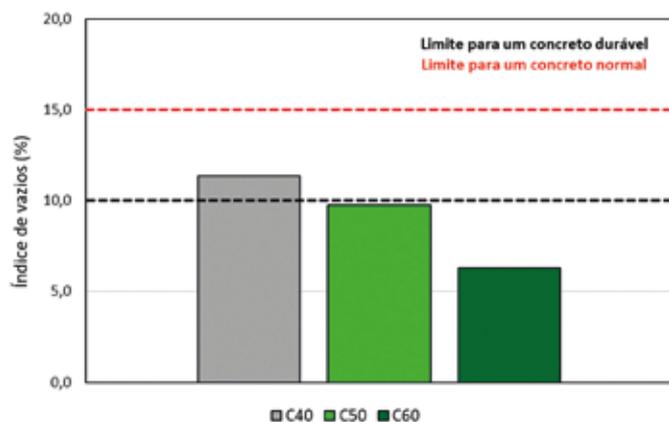
imersão. Os resultados obtidos aos 28 dias de idade são apresentados nas Figuras 2 e 3, respectivamente.

De acordo com a literatura, para um concreto ser durável, sua absorção de água por imersão deve ser, no máximo, de 4,2%, enquanto uma absorção máxima de 6,3% é especificada para um concreto normal; acima de 6,3%, o concreto é considerado deficiente. No caso do índice de vazios, os limites estabelecidos para um concreto ser considerado durável ou normal são, respectivamente, 10% e 15%; acima de 15%, o concreto é considerado deficiente. Assim, de acordo com os resultados obtidos, os traços de concreto QUANTUM podem ser classificados como normal ou durável.

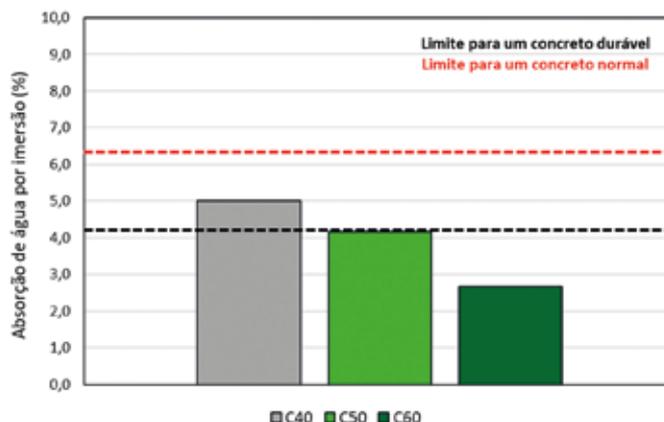
Além disso, na variação dimensional dos concretos, foi observada uma retração menor que 0,05% para todos os traços de concreto produzidos.

3.4 Durabilidade frente à ação da carbonatação e de íons cloreto

A durabilidade dos concretos QUANTUM foi avaliada por meio da determinação da resistência frente à ação da carbonatação e de íons cloreto. Os ensaios foram desenvolvidos no Laboratório de Ensaio de Materiais do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, para avaliação

**FIGURA 2**

RESULTADOS DO ÍNDICE DE VAZIOS

**FIGURA 3**

RESULTADOS DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

TABELA 3

RESULTADOS DO ENSAIO DE CARBONATAÇÃO ACELERADA

Traço	Idade (dias)	Profundidade de carbonatação (mm)	Coefficiente de carbonatação Kacel (mm.ano ^{-0,5})	Classificação	Estimativa de vida útil (anos)*
C40	112	11,29	25,8	Moderada	74
C60	112	1,56	3,6	Excepcional	3.748

Nota: *ESTIMATIVA CONSIDERANDO AMBIENTE URBANO (CAA II) E ESPESSURA DO COBRIMENTO 30 MM.

das resistências à carbonatação e à penetração de íons cloreto, e da resistividade elétrica volumétrica.

Para determinação da resistência à carbonatação foi utilizada uma câmara de carbonatação acelerada, com concentração de CO₂ de (3,0 ± 0,5)%, temperatura de (27 ± 2)°C, e umidade relativa de (65 ± 5)%, de acordo com a ISO 1920-12:2015 [7]. A medida da profundidade de carbonatação foi feita com o auxílio de um paquímetro, após a aspersão da solução de fenolftaleína na superfície de ruptura do corpo de prova, sendo os valores obtidos apresentados na Tabela 3 e ilustrados na Figura 4. Considerando as orientações da Prática Recomendada IBRACON para ensaio de carbonatação do concreto [8], os concretos podem ser classificados como de resistência moderada a excepcional frente à ação da carbonatação, considerando ambientes rural, urbano ou industrial leve.

A maioria das pesquisas de avaliação da durabilidade de concretos é realizada considerando ensaios acelerados, uma vez que ensaios de envelhecimento natural demandam longos períodos de tempo para uma análise consistente. O mecanismo de degradação do concreto nos ensaios acelerados difere das condições reais de exposição. No entanto, se a degradação avança da mesma forma, mas em velocidades diferentes nos dois casos, é possível determinar uma correlação entre as taxas de degradação promovida pelo ensaio acelerado e natural. Neste contexto, cabe destacar a dificuldade de se definir esta correlação devido à falta de dados de desempenho em uso em longo prazo para determinar a taxa de degradação em condições reais [9]. Como um exemplo raro de pesquisas que avaliam a carbonatação natural do concreto no Brasil, destaca-se o estudo desenvolvido na UFG, junto com a Eletrobrás Furnas, em que foram produzidos corpos de prova de concreto submetidos à carbonatação natural e acelerada. Resultados parciais foram publicados compilando os valores da profundidade de carbonatação natural obtidos ao longo de 10 anos de exposição na cidade de Goiânia/GO e, então, correlacionando-os aos resultados do ensaio acelerado, sendo obtida uma correlação razoável entre os coeficientes de carbonatação natural e acelerado para esta região [8]. Assim, adotando as correlações obtidas

neste estudo, ciente de que o QUANTUM foi desenvolvido para ser utilizado na mesma região, é possível estimar a vida útil desses concretos frente à ação da carbonatação, sendo obtidos 74 anos para o C40 e 3.748 anos para o C60.

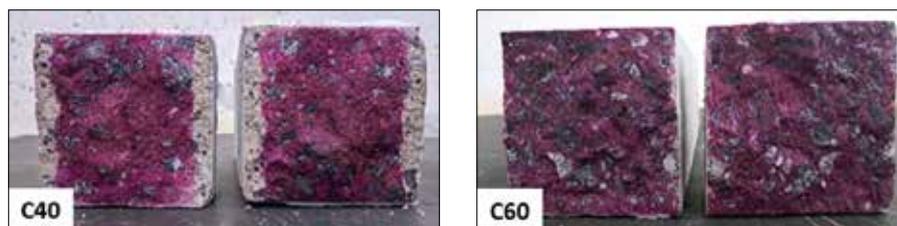
No caso da resistência à penetração de íons cloreto, a durabilidade dos traços QUANTUM foi avaliada por meio do ensaio de migração de cloreto no estado não estacionário prescrito na NT BUILD 492:2011 [10]. A medida da profundidade de penetração dos íons cloreto foi realizada pulverizando-se uma solução de nitrato de prata na superfície de ruptura do corpo de prova. Os resultados são apresentados na Tabela 4, sendo observados baixos valores tanto para o coeficiente de migração quanto para a profundidade de penetração de cloreto.

Como a corrosão das armaduras é um processo preponderantemente eletroquímico e que ocorre em meio aquoso, a determinação da resistência elétrica do concreto pode ser uma forma de controle e avaliação da proteção oferecida pelo material à armadura em elementos de concreto armado [11]. Além disso, a determinação da resistividade elétrica possibilita avaliar a facilidade com que os íons cloreto se movem através dos poros do concreto endurecido. A resistividade elétrica volumétrica dos traços QUANTUM foi determinada de acordo com a norma AASHTO TP 119:2015 [12], sendo os resultados obtidos apresentados na Tabela 4. Assim, os concretos podem ser classificados como de muito baixa permeabilidade

de íons cloreto e, conseqüentemente, com possibilidade muito baixa de penetração de íons cloreto, reduzindo drasticamente o risco de corrosão da armadura em estruturas de concreto expostas a ambientes com a presença deste agente agressivo.

3.5 Desempenho ambiental

Para avaliação do desempenho ambiental dos concretos QUANTUM, foram considerados o índice de intensidade de ligantes e o potencial de aquecimento global. O índice de intensidade de ligantes (IL) corresponde à quantidade de ligantes, por m³ de concreto, necessária para fornecer 1 MPa de resistência à compressão [13]. Desta forma, este índice possibilita uma comparação rápida e objetiva entre diferentes traços de concreto, uma vez que quanto maior IL, maior é a quantidade de ligantes necessária para se obter o mesmo desempenho mecânico e, portanto, menos ecoeficiente é o traço. O potencial de aquecimento global (GWP) foi analisado a partir do cálculo das emissões de CO_{2,eq} por m³ de concreto, utilizando a *Green Concrete LCA web tool*, de avaliação do ciclo de vida, desenvolvida na Universidade de Berkeley, Califórnia. Para o cálculo, os dados foram adequados ao escopo tecnológico do cenário brasileiro e consideradas informações de matriz energética, produção e transporte disponibilizadas por órgãos nacionais. Uma análise

**FIGURA 4**

CORPOS DE PROVA DE CONCRETO QUANTUM, APÓS ASPERSÃO DA SOLUÇÃO DE FENOLFTALEÍNA, PARA DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

TABELA 4

RESULTADOS DO ENSAIO DE MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETO E RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Traço	Idade (dias)	Profundidade de penetração de cloretos (mm)	Coefficiente de migração de cloreto ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{g}$)	Resistividade elétrica volumétrica ($\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$)	Classificação*
C40	112	1,57	0,279	94,8	Muito baixo
C60	112	0,78	0,056	126,0	Muito baixo

NOTA: *CLASSIFICAÇÃO DE PERMEABILIDADE DE ÍON CLORETO DE ACORDO COM AASHTO TP 119:2015.

complementar foi realizada considerando a correlação do potencial de aquecimento global com a resistência à compressão média dos concretos.

Os resultados do desempenho ambiental dos concretos QUANTUM são apresentados na Tabela 5, considerando os valores da resistência à compressão aos 28 dias. Para fins de comparação, também são apresentados os resultados do desempenho ambiental dos concretos de linha da Realmix, de mesma classe de resistência à compressão e abatimento. Para os todos os parâmetros analisados (IL, GWP e GWP/MPa) verifica-se uma redução média de 23% no impacto ambiental quando considerado o QUANTUM. Além disso, verificou-se que o desempenho ambiental dos concretos melhora com o aumento da resistência mecânica, ou seja, quanto maior a resistência à compressão do concreto, menores o índice de intensidade de ligantes e o potencial de aquecimento global e, portanto, mais ecoeficiente e sustentável é o traço de concreto.

4. APLICAÇÕES

A linha QUANTUM contempla concretos com classe de resistência à compressão moderada e alta (C30 ao C70). Dentre as aplicações práticas realizadas, destacam-se:

- **Blocos sobre estacas:** utilizando gelo em substituição parcial à água de amassamento, é possível reduzir a temperatura de lançamento do concreto, reduzindo a liberação de calor e, assim, possibilitando a redução do número de camadas para sua execução;
- **Pilares:** dada a consistência fluida do concreto, o preenchimento das fôrmas é melhorado, reduzindo falhas de concretagem e melhorando o acabamento superficial;

- **Vigas e lajes:** o bombeamento é facilitado, especialmente para grandes alturas, resultando em uma maior facilidade no lançamento, adensamento e acabamento da superfície.

Como continuidade do desenvolvimento de novos traços para demandas particulares, a linha QUANTUM conta também com traços específicos para a execução de blocos, com uma redução de cerca de 20% no consumo de cimento em relação ao traço original QUANTUM, visando atingir a resistência característica à compressão especificada na idade de 91 dias, (QUANTUM GB); e para a execução de lajes e pisos polidos, em cujo traço é feito um ajuste no teor de aditivos químicos para o controle do tempo de pega (QUANTUM FLOOR).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base no estudo realizado nos traços de concreto da linha QUANTUM, é possível identificar os seguintes pontos principais em relação aos concretos:

- **Durável:** os traços de concreto apresentaram características e qualidade que atendem às exigências de durabilidade prescritas na NBR 6118:2023 [14] e NBR 12655:2022 [15], para as diferentes classes de agressividade ambiental;
- **Mais sustentável:** com a redução de

até 30% no consumo de cimento, em relação aos traços de linha de mesma classe de resistência à compressão e abatimento, foi possível uma redução das emissões de CO_2 , diminuindo a pegada de carbono dos concretos. Além disso, obteve-se uma maior eficácia no uso de ligantes, resultando em misturas ecoeficientes;

- **Mais prático:** constituído de um menor consumo de cimento, há uma redução do calor de hidratação e, conseqüentemente, da liberação de calor pelo concreto durante a pega e o endurecimento, permitindo a execução de elementos de grande volume com número reduzido de camadas ou, ainda, reduzindo o intervalo de execução entre sucessivas camadas. A consistência fluida do concreto permitiu uma maior facilidade de lançamento e adensamento do concreto nas fôrmas;

- **Mais econômico:** com a otimização do processo de produção, é possível reduzir os custos de execução e ciclos de concretagem. Por ser dosado na central, com manutenção da consistência fluida até a obra, reduziu as etapas de recebimento do concreto no estado fresco e o período dos caminhões em obra, aumentando a produtividade tanto para a obra quanto para a concreteira.

Assim, os concretos da linha QUANTUM se mostram como materiais importantes para a descarbonização da construção civil vinculada à tecnologia do concreto. Esse benefício pode ser considerado especialmente em construções que buscam a certificação ambiental, uma vez que um concreto de reduzido impacto ambiental pode contribuir para com a pontuação vinculada aos materiais de construção constituintes de um empreendimento. ☺

TABELA 5

RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO AMBIENTAL DOS CONCRETOS

Concreto	C40	C50	C60	C40	C50	C60
	Traços de concreto de linha			Traços de concreto QUANTUM		
Parâmetro						
Cimento (kg/m^3)	425	510	560	310	361	407
Sílica (kg/m^3)	34	41	56	26	30	34
Ligante total (kg/m^3)	459	551	616	336	391	441
IL ($\text{kg}/\text{m}^3/\text{MPa}$)	9,02	9,58	8,85	7,30	7,05	6,65
GWP ($\text{kg CO}_{2\text{eq}}/\text{m}^3$)	405	484	557	322	369	412
GWP ($\text{kg CO}_{2\text{eq}}/\text{m}^3/\text{MPa}$)	8,90	8,82	8,58	7,00	6,67	6,22

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FLATT, R. J.; ROUSSEL, N.; CHEESEMAN, C. R. Concrete: An eco-material that needs to be improved. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 32, p. 2787-2798, 2012.
- [2] GRAZIA, M. T. *et al.* Investigation of the use of continuous particle packing models (PPMs) on the fresh and hardened properties of low-cement concrete (LCC) systems. *Construction and Building Materials*, v.195, p.524-536, 2019.
- [3] LIEW, K. M.; SOJOBI, A. O.; ZHANG, L. W. Green concrete: prospects and challenges. *Construction and Building Materials*, v.156, p. 1063-1095, 2017.
- [4] LOTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, v.41, p. 1244-1256, 2011.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15900-1: Água para amassamento do concreto - Parte 1: requisitos. Rio de Janeiro, 2009. 11 p.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7212: Concreto dosado em central - Preparo, fornecimento e controle. Rio de Janeiro, 2024. 25 p.
- [7] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 1920-12: Testing of concrete - Part 12: determination of the carbonation resistance of concrete - Accelerated carbonation method. Switzerland, 2015. 12 p.
- [8] RIBEIRO, D. V. *et al.* Prática recomendada IBRACON: procedimentos de ensaio de carbonatação acelerada (corpos de prova) e natural (testemunhos) do concreto. São Paulo: IBRACON, 2021. 39 p.
- [9] MEDEIROS, M. H. F.; ANDRADE, J. J. O.; HELENE, P. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. In: ISAIA, G. C. *et al.* (Ed.) *Concreto: ciência e tecnologia*. 3.ed. São Paulo: IBRACON, 2022. p. 857-896.
- [10] NORDTEST. NT Build 492: Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. Finland, 1999. 8 p.
- [11] LIMA, P. R. L. *et al.* Prática recomendada IBRACON: procedimento de determinação da resistividade elétrica em corpos de prova e testemunhos de concreto. São Paulo: IBRACON, 2021. 40 p.
- [12] AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). AASHTO TP 119: Provisional standard method of test for electrical resistivity of a concrete cylinder tested in a uniaxial resistance test. Washington, 2015. 17 p.
- [13] DAMINELLI, B. L. *et al.* Measuring the eco-efficiency of cement use. *Cement & Concrete Composites*, v.32, p. 555-562, 2010.
- [14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2023. 242 p.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2022. 22 p.

KIT de PRÁTICAS RECOMENDADAS sobre ENSAIOS de DURABILIDADE das ESTRUTURAS de CONCRETO

O conjunto de **Práticas Recomendadas Sobre os Ensaios de Durabilidade das Estruturas de Concreto** é fruto do trabalho do **Comitê Técnico IBRACON/ALCONPAT 702 Procedimentos para Ensaios de Avaliação da Durabilidade das Estruturas de Concreto**.



PROMOÇÃO: Kit com 5 Práticas + Guia de Prevenção da Reação Álcali-Agregado **SÓCIOS:** R\$ 300,00 | **NÃO SÓCIOS:** R\$ 550,00

Patrocínio



Adquira o seu na
Loja Virtual
do IBRACON:
<http://lojaibacon.org.br>

Aplicação da otimização topológica na redução de consumo **de material em estruturas de concreto armado**

GABRIEL NEVES QUEIROZ - MSc. - <https://orcid.org/0009-0005-9962-8934> (gabrielnvsqueiroz@usp.br) ;
EDSON DENNER LEONEL - PROF. DR. - <https://orcid.org/0000-0002-7842-0334> – **EESC/USP**

RESUMO

A OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA BUSCA A MELHOR DISTRIBUIÇÃO DE MATERIAL EM UM DOMÍNIO DE PROJETO, REPRESENTANDO UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PROMISSORA PARA A CONCEPÇÃO DE ESTRUTURAS MAIS LEVES E SUSTENTÁVEIS. NA CONSTRUÇÃO EM CONCRETO, SUA APLICAÇÃO TEM GRANDE RELEVÂNCIA, ESPECIALMENTE PARA A REDUÇÃO DA PEGADA DE CARBONO DESSE SETOR. NESTE TRABALHO, APLICA-SE A OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA PARA A GERAÇÃO DE MODELOS SIMPLIFICADOS DE BIELAS E TIRANTES PARA UM PILAR COM CONSOLO E UMA VIGA-PAREDE, COM VISTAS A AUXILIAR O DIMENSIONAMENTO POR PARTE DO PROJETISTA. OBSERVA-SE QUE OS MODELOS GERADOS SÃO FORTEMENTE INFLUENCIADOS PELA GEOMETRIA E PELAS CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO, EXIGINDO ANÁLISE ESPECÍFICA PARA CADA PROJETO. ALÉM DISSO, DEMONSTRA-SE QUE A FERRAMENTA IMPLEMENTADA PERMITE A IDENTIFICAÇÃO DE REGIÕES MENOS DESFAVORÁVEIS PARA O POSICIONAMENTO DE ABERTURAS, CONTRIBUINDO PARA UM CONSUMO MAIS RACIONAL DE AÇO NO CONCRETO ARMADO.

PALAVRAS-CHAVE: OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA, MODELOS DE BIELAS E TIRANTES, SIMP, MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS, CONCRETO ARMADO.

1. INTRODUÇÃO

Diante das crescentes preocupações com a sustentabilidade na construção civil e seu papel no combate às mudanças climáticas, diversas pesquisas têm sido feitas para reduzir a pegada de carbono associada ao setor. Segundo o relatório da *United Nations Environment Programme* (UNEP), a construção e a operação de edifícios foram responsáveis por 34% das emissões de CO₂ em escala global em 2023, sendo

aproximadamente 8% provenientes da produção de materiais de construção civil (UNEP, 2025), o que reforça a necessidade de mudanças. Entre os principais contribuintes pelas emissões de gases de efeito estufa estão o concreto, cuja produção demanda grande quantidade de cimento, e o aço, materiais que constituem os elementos fundamentais das estruturas de concreto armado. Nesse contexto, alguns avanços têm sido feitos para mitigar os impactos ambientais, como o uso de concretos de baixo carbono, a utilização de agregados reciclados, a incorporação de materiais cimentícios suplementares e a aplicação de materiais de elevado desempenho estrutural, como o concreto de ultra alto desempenho (UHPC) e o concreto reforçado com fibras (FRC).

Além das possibilidades citadas, uma estratégia promissora é a adoção de técnicas de otimização estrutural, que busca reduzir o consumo de material sem comprometer a segurança. Com isso, há uma redução dos impactos ambientais e dos custos associados à produção de materiais, o que é de interesse para o setor produtivo. Dentre as abordagens de otimização estrutural, destaca-se a otimização topológica (OT), definida como a busca pela melhor distribuição de material no domínio de projeto, removendo material das regiões menos solicitadas. A OT pode ser aplicada no projeto de estruturas complexas, auxiliando o projetista no dimensionamento.

As técnicas de OT para domínios contínuos surgiram no final da década de 1980, com o método de homogeneização proposto por Bendsøe e Kikuchi (1988). Isso foi possível graças ao desenvolvimento dos computadores acoplado ao advento de

métodos numéricos, como o Método dos Elementos Finitos (MEF). Em seguida, outras abordagens foram propostas, incluindo métodos de densidade, evolucionários e baseados na variação do contorno. Neste trabalho, utiliza-se o método *Solid Isotropic Material with Penalization* (SIMP), introduzido por Bendsøe (1989) e que distribui o material sobre o domínio de forma a obter a estrutura mais rígida possível.

Uma revisão abrangente sobre as aplicações da OT para sistemas construtivos em concreto pode ser encontrada em Stoiber e Kromoser (2021), que identificaram como principais áreas de aplicação a geração de modelos de bielas e tirantes e a modelagem multimaterial. No entanto, outras áreas também se destacam, como a consideração de múltiplos casos de carregamento, a imposição de restrições de tensão, além de abordagens envolvendo aspectos estéticos, protensão e impressão 3D de concreto. Os autores destacaram algumas particularidades da aplicação da OT a estruturas de concreto, exigindo cuidados especiais na modelagem devido ao seu comportamento mecânico complexo, com acentuada não linearidade material e assimetria entre as resistências à tração e à compressão.

Assim, este trabalho tem como objetivo exemplificar a aplicação da OT em projetos estruturais de concreto armado, visando auxiliar na geração de modelos de bielas e tirantes. Para isso, são estudados dois exemplos com o intuito de evidenciar a importância da adoção de um modelo específico em função da geometria e das condições de carregamento. Além disso, investiga-se a influência do posicionamento de aberturas em uma

viga-parede sobre a configuração do modelo de bielas e tirantes e o consumo estimado de armadura.

2. MODELOS DE BIELAS E TIRANTES

Os modelos de bielas e tirantes surgiram como uma generalização da analogia de treliça feita por Ritter e Morsch, permitindo a idealização do mecanismo de transferência de forças em elementos de concreto fissurados. Nesses modelos, os tirantes são representados pela armadura tracionada e as bielas por elementos comprimidos de concreto. Em grande parte dos projetos de engenharia, as hipóteses de cálculo que baseiam os métodos tradicionais de dimensionamento são adequadas. Contudo, para as chamadas regiões D, marcadas por descontinuidades geométricas ou mecânicas, como consolos curtos, blocos de fundação e nós de pórtico, a hipótese de Euler-Bernoulli deixa de ser válida, havendo uma distribuição não linear de deformações na seção transversal. Neste caso, o uso de modelos de bielas e tirantes é justificado por normas técnicas, como a ABNT NBR 6118:2023 (ABNT, 2023), para simplificar o dimensionamento. Assim, para estruturas complexas, a otimização topológica constitui uma ferramenta útil para a geração automática de modelos de bielas e tirantes, evitando o processo de tentativa e erro devido à falta de experiência prévia do projetista. Isso é possível porque, para uma estrutura contínua em estado plano de tensão, a configuração ótima gerada pela OT tende a ser similar a uma treliça. Dessa forma, o resultado da OT fornece uma configuração aproximada das bielas e dos tirantes, cabendo ao projetista a definição final do modelo e o dimensionamento (Liang; Xie; Steven, 2000).

3. OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

Apresentam-se brevemente alguns conceitos envolvidos na formulação do MEF, seguidos dos principais equacionamentos do método SIMP.

3.1 Método dos Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos é um método numérico amplamente utilizado para simulações estruturais, sendo incorporado em diversos softwares comerciais empregados por projetistas. Ele é baseado

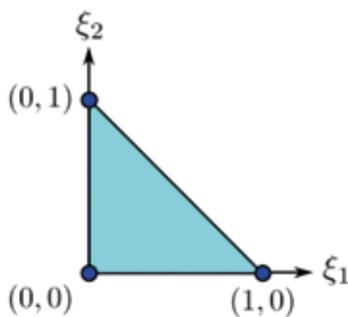


FIGURA 1

REPRESENTAÇÃO DE UM ELEMENTO FINITO T3 NO ESPAÇO DAS COORDENADAS ADIMENSIONAIS

FONTE: ELABORADO PELOS AUTORES

na subdivisão do domínio em elementos, transformando o problema originalmente contínuo em discreto. Assim, é possível obter soluções aproximadas por meio de um número finito de parâmetros nodais, como os deslocamentos, que constituem as incógnitas do problema.

Para domínios planos discretizados em elementos finitos triangulares, tem-se um sistema de coordenadas adimensionais (ξ_1, ξ_2) definido para cada elemento, com $\xi_i \in [0,1]$, sendo a direção dada por $i = 1,2$. A Figura 1 ilustra um elemento triangular de aproximação linear, contendo 3 nós (elemento T3), no espaço das coordenadas adimensionais.

Assim, os deslocamentos \vec{u} de um ponto qualquer podem ser interpolados a partir dos deslocamentos nodais \vec{U} do elemento finito, conforme a Equação 1 em notação indicial. Para isso, utilizam-se as funções de forma ϕ_i , com $i = 1,2,3$ indicando o nó do elemento sobre o qual a função é definida. A função de forma é unitária em seu nó de base e nula nos demais nós do elemento.

$$[1] \quad u_i(\xi_1, \xi_2) = \phi_i(\xi_1, \xi_2)U_i^l$$

A formulação do MEF pode ser diretamente deduzida a partir de teoremas de energia (Soriano, 2003). A energia interna reflete-se pela matriz de rigidez K , a qual, multiplicada pelos deslocamentos do corpo, deve ser igual ao vetor de forças externas \vec{F}^{ext} , como mostra a Equação 2.

$$[2] \quad K \cdot \vec{U} = \vec{F}^{ext}$$

3.2 Método SIMP

O método SIMP associa a cada elemento finito uma grandeza adimensional $\rho \in [0,1]$ denominada densidade, que indica se o elemento está vazio ou sólido. Essa grandeza, elevada a um parâmetro $p = 3$, realiza uma penalização da matriz constitutiva elástica original D^0 , resultando na matriz constitutiva efetiva D conforme a Equação 3.

$$[3] \quad D = \rho^p D^0$$

O problema de otimização é definido pela Equação 4, cuja função a ser minimizada é a flexibilidade c , dada pelo trabalho das forças externas, e as variáveis de projeto são as densidades dos elementos. Como restrições, tem-se o equilíbrio da estrutura, além de que o volume de material V_m não deve superar o volume final prescrito \vec{V}_f .

$$[4] \quad \begin{aligned} &\text{minimizar } c = \vec{F}^{ext} \cdot \vec{U} \\ &\text{sujeito a: } K \cdot \vec{U} = \vec{F}^{ext} \\ &V_m \leq \vec{V}_f \\ &0 \leq \rho \leq 1 \end{aligned}$$

A Equação 5 mostra o cálculo do gradiente da função objetivo em relação às densidades, sendo o índice sobrescrito el referente às grandezas do elemento analisado. Para atualizar as densidades, utiliza-se um critério de otimalidade com esquema de filtro apresentado por Sigmund (2001) a partir do gradiente calculado. Dessa forma, o método SIMP é capaz de redistribuir o material ao longo do domínio até que as mudanças nas densidades sejam suficientemente pequenas.

$$[5] \quad \frac{dc}{d\rho^{el}} = -p\rho^{p-1}\vec{U}^{el} \cdot K^{0,el} \cdot \vec{U}^{el}$$

4. RESULTADOS NUMÉRICOS

Apresentam-se dois exemplos de aplicação da OT a estruturas de concreto armado, sendo um pilar com consolo e uma viga-parede. As formulações foram implementadas em código computacional desenvolvido em linguagem FORTRAN, estando os códigos-fonte disponíveis aos interessados de forma gratuita sob demanda aos autores. Para ambos os casos, adotaram-se, para o concreto, módulo de elasticidade de 28,567 GPa e coeficiente de Poisson de 0,15.

4.1 Pilar com consolo

Tem-se, neste exemplo, um pilar de 2,7 m de altura contendo um consolo de 70 cm de altura e 60 cm de comprimento, com uma força vertical de 500 kN, conforme a Figura 2. Utilizou-se uma malha composta por 8850 elementos T3, considerando estado plano de tensão e espessura de 30 cm. Para o método SIMP, adotou-se um volume final igual a 40% do inicial.

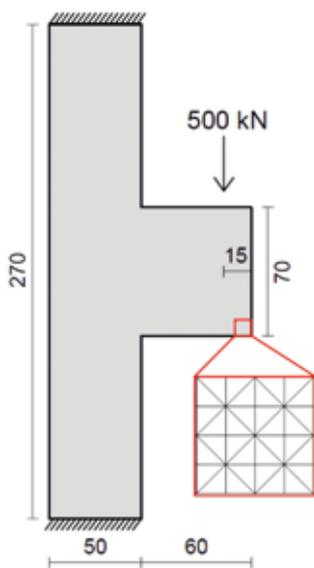


FIGURA 2
ESQUEMA DO PILAR COM CONSOLO E DETALHE DA MALHA UTILIZADA (DIMENSÕES EM CM)

FONTE: ELABORADO PELOS AUTORES

A Figura 3 mostra o resultado da OT, com as cores preto e cinza claro denotando presença e ausência de material, respectivamente. Observa-se que a configuração da estrutura é semelhante a um conjunto de barras de treliça. Para verificação de precisão, são

incluídos na Figura 3 os resultados obtidos por Bruggi (2009) usando o SIMP e por Almeida, Simonetti e Oliveira Neto (2013) usando um método evolucionário suavizado denominado SESO, havendo boa correspondência entre as soluções.

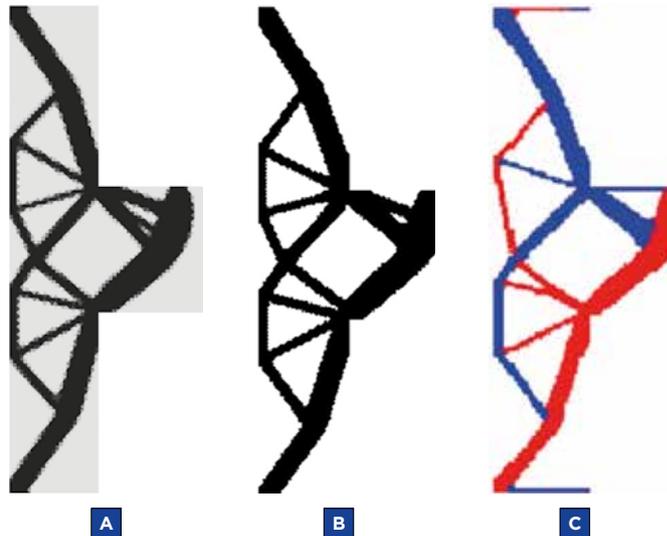


FIGURA 3
COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS PELOS AUTORES (A) E POR TRABALHOS DA LITERATURA USANDO OS MÉTODOS SIMP (B) E SESO (C)

FONTE: ELABORADO PELOS AUTORES (A), BRUGGI (2009) (B) E ALMEIDA, SIMONETTI E OLIVEIRA NETO (2013) (C)

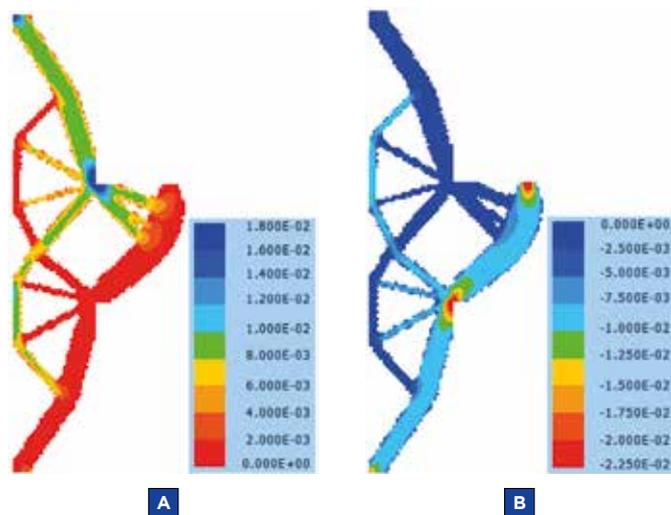


FIGURA 4
TENSÕES PRINCIPAIS DE TRAÇÃO (A) E DE COMPRESSÃO (B) PARA A ESTRUTURA RESULTANTE (VALORES EM GPA)

FONTE: ELABORADO PELOS AUTORES

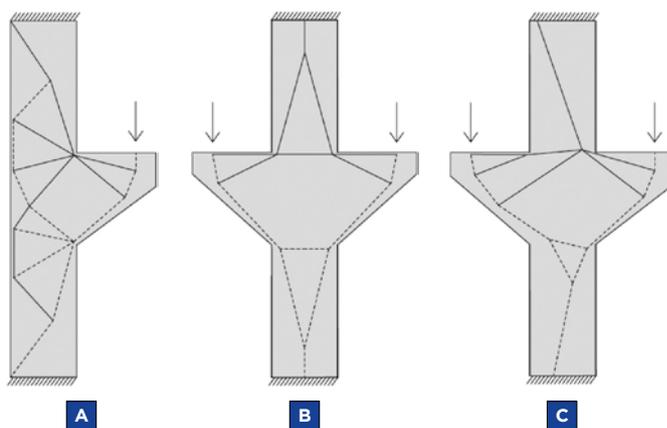


FIGURA 5
MODELOS SIMPLIFICADOS DE BIELAS E TIRANTES PARA O PILAR COM UM (A) E DOIS CONSOLOS, PARA FORÇAS SIMÉTRICAS (B) E ASSIMÉTRICAS (C). AS LINHAS CONTÍNUAS REPRESENTAM OS TIRANTES, E AS TRACEJADAS, AS BIELAS

FONTE: ELABORADO PELOS AUTORES

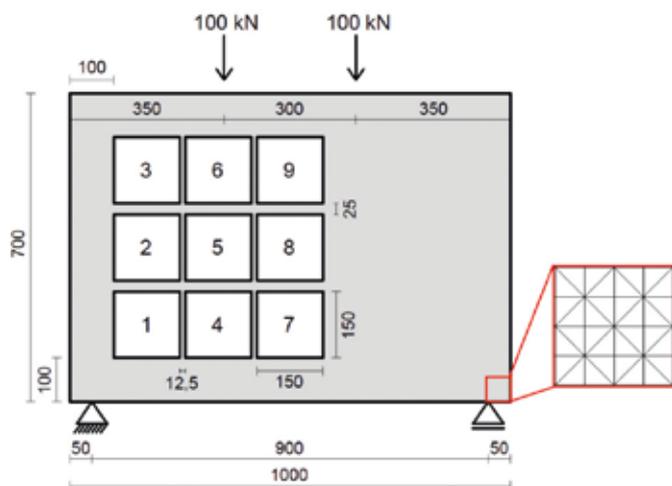


FIGURA 6

ESQUEMA DA VIGA-PAREDE COM NOVE POSSIBILIDADES DE ABERTURA E DETALHE DA MALHA UTILIZADA (DIMENSÕES EM CM)

FONTE: ELABORADO PELOS AUTORES

e tirantes mostrado na Figura 5(a). Destaca-se que esse modelo pode auxiliar o projetista na definição de um modelo final, mas deve ser adaptado para o dimensionamento. Por exemplo, observa-se que as barras não formam uma treliça isostática e sua disposição dificulta o posicionamento da armadura do ponto de vista prático. Além disso, é necessário verificar as tensões nas bielas e nos nós, bem como o comprimento de ancoragem da armadura.

Para verificar a influência da geometria e do carregamento sobre o modelo gerado, a análise topológica foi efetuada para um pilar com dois consolos, considerando carregamento simétrico e assimétrico. Para a segunda situação, a força aplicada no consolo esquerdo foi de 250 kN. Os resultados são mostrados na Figura 5(b-c), evidenciando a dependência da solução em relação às condições do problema. Logo, os modelos de bielas e tirantes devem ser estudados especificamente para cada situação de projeto.

Cabe destacar que nos modelos da Figura 5 removeu-se material da região menos solicitada dos consolos. Seria possível remover mais material do interior da estrutura, porém isso é dificultado por questões construtivas e pelo

comportamento não linear do concreto. Entretanto, para situações específicas de carregamento e usando concretos de alto desempenho, a fabricação de uma estrutura topologicamente otimizada é viabilizada por técnicas de manufatura aditiva. Portanto, a OT apresenta potencial para a concepção de elementos de geometria complexa em concreto com reduzido consumo de material.

arbitraram-se nove opções de aberturas quadradas com 1,5 m de lado. As malhas usadas são compostas por 8672 elementos T3, considerando estado plano de tensão e espessura de 20 cm. Para o método SIMP, adotou-se um volume final igual a 30% do inicial. Este exemplo é inspirado em painéis de fachada, largamente utilizados pela indústria de concreto pré-fabricado. Destaca-se que a industrialização da construção civil é outra estratégia para reduzir a pegada de carbono desse setor.

Os resultados da OT são apresentados na Figura 7, na qual as cores vermelho e azul denotam presença e ausência de material, respectivamente. Para as aberturas nas posições 4, 7, 8 e 9, não houve alteração em relação à estrutura maciça, sendo por isso omitidos os resultados. Observa-se que a presença das aberturas na direção do fluxo das tensões principais gerou uma modificação significativa na configuração das barras, principalmente para as posições 1, 2 e 6. Essas modificações são caracterizadas pelo aparecimento de tirantes transversais às bielas no entorno da abertura. Para as aberturas nas posições 3 e 5, o resultado é similar à estrutura maciça. Contudo, a presença da abertura gerou um estreitamento da

4.2 Viga-parede com abertura

Considera-se uma viga-parede de 10 m de comprimento e 7 m de altura submetida a duas forças concentradas de 100 kN na borda superior, conforme a Figura 6. Para verificar o efeito de diferentes posicionamentos de aberturas,

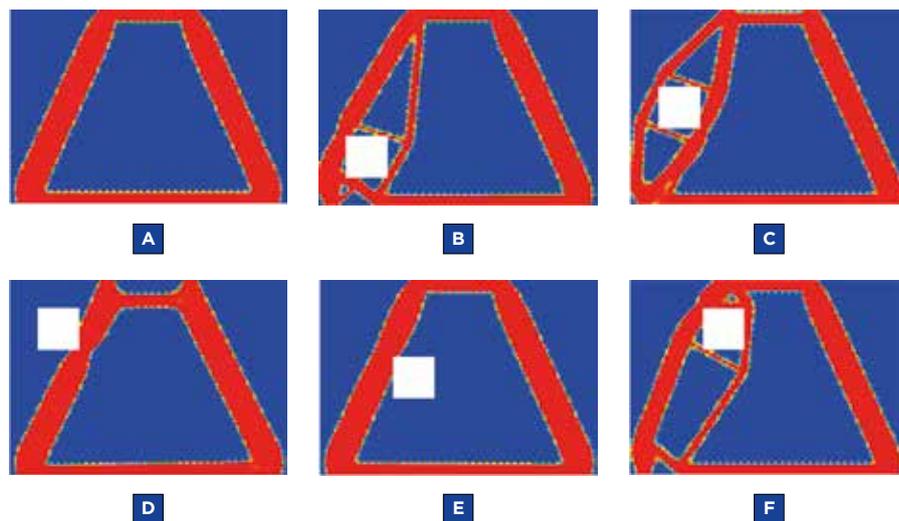


FIGURA 7

CONFIGURAÇÃO FINAL DA ESTRUTURA PARA OS CASOS SEM ABERTURA (A) E COM ABERTURA NAS POSIÇÕES 1 (B), 2 (C), 3 (D), 5 (E) E 6 (F)

FONTE: ELABORADO PELOS AUTORES

biela diagonal, levando a uma concentração de tensões que deve ser avaliada na etapa de verificação, possivelmente exigindo reforço.

A partir das soluções da Figura 7, construíram-se os modelos de bielas e tirantes apresentados na Figura 8. Mesmo com as simplificações dos modelos, fez-se uma estimativa da área de aço necessária para cada tirante, a partir da força de tração nas barras. Essa força, mostrada na Figura 8, foi calculada multiplicando o valor médio das tensões

principais de tração pela área da seção transversal obtida da OT. Assim, adotando aço CA-50, com valor de cálculo da tensão de escoamento (f_{yd}) igual a 43,5 kN/cm², foram calculadas as áreas necessárias para cada barra por meio da Equação 6, na qual A_s é a área de aço e F_{sd} é a força solicitante de cálculo.

$$[6] \quad A_s = \frac{F_{sd}}{f_{yd}}$$

A Tabela 1 apresenta a comparação

do volume total de aço para cada configuração, bem como a diferença relativa percentual em relação à viga maciça. Os maiores volumes correspondem às configurações 2 e 6, com aumento de consumo da ordem de 25%, indicando posições mais desfavoráveis para a localização de aberturas nesse modelo. Já as posições 1 e 3 levaram a aumentos de cerca de 11% e 15%, respectivamente. Dessa forma, com base nos resultados apresentados neste exemplo, a paginação de painéis de fachada pode ser alterada de forma inteligente em função do posicionamento de aberturas, como portas e janelas, para promover a redução do consumo de aço.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram apresentados dois exemplos de aplicação da otimização topológica à determinação de modelos de bielas e tirantes em estruturas de concreto armado. Utilizou-se o método SIMP juntamente com análise por meio do MEF, o que se mostrou eficaz na geração de modelos simplificados para auxiliar o dimensionamento.

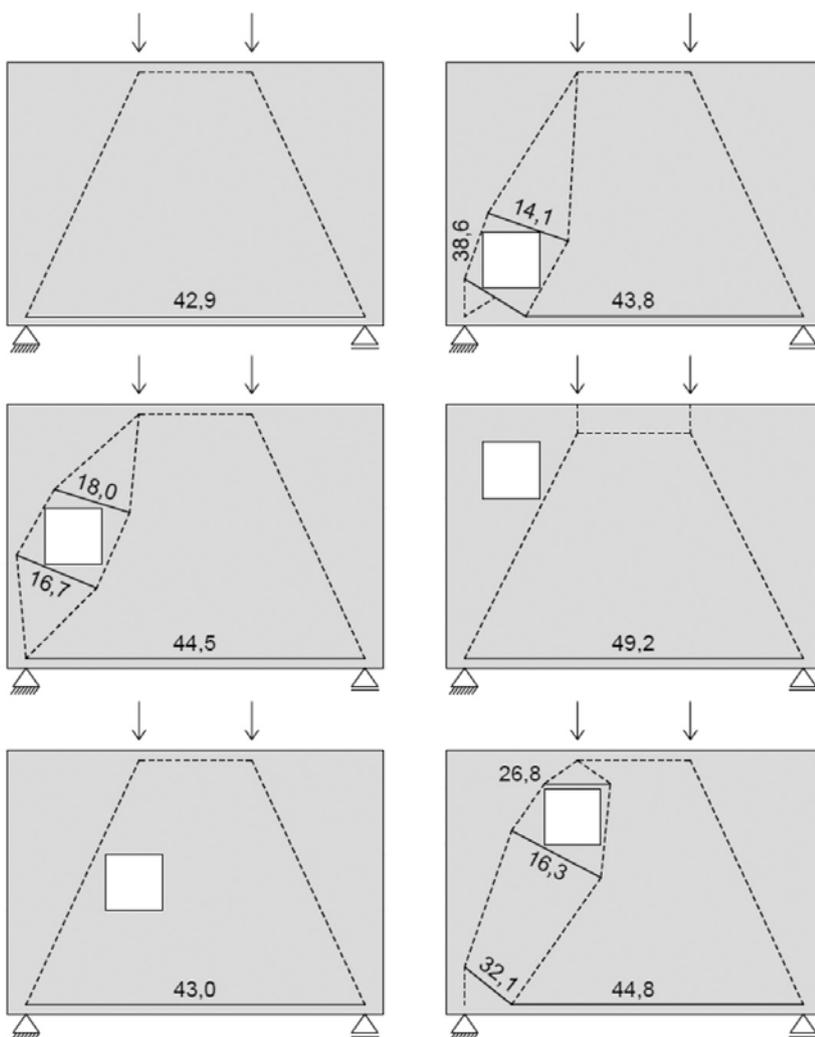


FIGURA 8

MODELOS SIMPLIFICADOS DE BIELAS E TIRANTES, COM OS VALORES DAS FORÇAS NOS TIRANTES EM kN. AS LINHAS CONTÍNUAS REPRESENTAM OS TIRANTES, E AS TRACEJADAS, AS BIELAS

FONTE: ELABORADO PELOS AUTORES

TABELA 1

VOLUME DE AÇO NECESSÁRIO PARA A VIGA-PAREDE COM ABERTURAS EM DIFERENTES POSIÇÕES E COMPARAÇÃO PERCENTUAL COM A ESTRUTURA MACIÇA

Posição	Volume de aço (cm ³)	Diferença relativa percentual (%)
Sem abertura	888	0,0
1	986	11,0
2	1097	23,5
3	1019	14,7
4	888	0,0
5	891	0,3
6	1126	26,8
7	888	0,0
8	888	0,0
9	888	0,0

FONTE: ELABORADO PELOS AUTORES

Os resultados demonstram a dependência dos modelos em relação às condições geométricas e de carregamento, evidenciando a necessidade de estudar um modelo particular para cada projeto. No exemplo da viga-parede, mostrou-se

o papel da OT na determinação de posições menos desfavoráveis de aberturas, o que é essencial para evitar o consumo desnecessário de armadura, e, conseqüentemente, ajudar a produzir estruturas com menor pegada de carbono.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. ☺

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALMEIDA, V. S.; SIMONETTI, H. L.; OLIVEIRA NETO, L. Comparative analysis of strut-and-tie models using Smooth Evolutionary Structural Optimization. *Engineering Structures*, v. 56, p. 1665-1675, 2013.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- [3] BENDSØE, M. P. Optimal shape design as a material distribution problem. *Structural Optimization*, v. 1, p. 193-202, 1989.
- [4] BENDSØE, M. P.; KIKUCHI, N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 71, p. 197-224, 1988.
- [5] BRUGGI, M. Generating strut-and-tie patterns for reinforced concrete structures using topology optimization. *Computers and Structures*, v. 87, p. 1483-1495, 2009.
- [6] LIANG, Q. Q.; XIE, Y. M.; STEVEN, G. P. Topology Optimization of Strut-and-Tie Models in Reinforced Concrete Structures Using an Evolutionary Procedure. *ACI Structural Journal*, v. 97, p. 322-332, 2000.
- [7] SIGMUND, O. A 99 line topology optimization code written in Matlab. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, v. 21, p. 120-127, 2001.
- [8] SORIANO, H. L. Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003.
- [9] STOIBER, N.; KROMOSER, B. Topology optimization in concrete construction: a systematic review on numerical and experimental investigations. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, v. 64, p. 1725-1749, 2021.
- [10] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. Global Status Report for Buildings and Construction 2024/2025: Not just another brick in the wall - The solutions exist. Scaling them will build on progress and cut emissions fats. Paris: UNEP, 2025, 94 p..

Sistemas de Fôrmas para Edifícios

Recomendações para a melhoria da qualidade e da produtividade com redução de custos



ANTONIO CARLOS ZORZI

SISTEMAS DE FÔRMAS PARA EDIFÍCIOS: RECOMENDAÇÕES PARA A MELHORIA DA QUALIDADE E DA PRODUTIVIDADE COM REDUÇÃO DE CUSTOS

Autor: Antonio Carlos Zorzi

O livro propõe diretrizes para a racionalização de sistemas de fôrmas empregados na execução de estruturas de concreto armado e que utilizam o molde em madeira

As propostas foram embasadas na vasta experiência do autor, diretor de engenharia da Cyrela, sendo retiradas de sua dissertação de mestrado sobre o tema.

DADOS TÉCNICOS

ISBN 9788598576237
Formato: 18,6 cm x 23,3 cm
Páginas: 195
Acabamento: Capa dura
Ano da publicação: 2015

Patrocínio



Aquisição:
www.ibracon.org.br
(Loja Virtual)

Avaliação comparativa das emissões de estruturas em concreto armado produzidas no sul do Brasil

MOACIR KRIPKA - DR. PROF. - <https://orcid.org/0000-0002-1997-3414> (mkripka@gmail.com) ;
PAULO CEZAR VITORIO JUNIOR - DR. PROF. - <https://orcid.org/0000-0003-4109-0834> – **UTFPR-PB**
JEFERSON JUNIOR ALIEVI - MESTRE/ENG. - <https://orcid.org/0000-0003-2139-7134> – **UPF**
JAIR FREDERICO SANTORO - DR. PROF. - <https://orcid.org/0000-0002-3396-2666> – **IFSul**

RESUMO

O ARTIGO APRESENTA UMA AVALIAÇÃO COMPARATIVA DAS EMISSÕES DE CO₂ ASSOCIADAS À PRODUÇÃO DE ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO NAS CIDADES DE CHAPECÓ-SC E PASSO FUNDO-RS, CONSIDERANDO A ABORDAGEM DO BERÇO AO PORTÃO. FORAM ANALISADOS DOIS TRAÇOS DE CONCRETO (20 MPa E 35 MPa) COM BASE EM DADOS REGIONAIS E SEUS IMPACTOS FORAM QUANTIFICADOS POR MEIO DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) COM O USO DO SOFTWARE SIMAPRO. RESULTADOS MOSTRAM QUE CONCRETOS COM MENOR RESISTÊNCIA GERAM MENOS EMISSÕES POR M³ DEVIDO AO MENOR TEOR DE CIMENTO. QUANDO CONSIDERADO O DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL, O CONCRETO DE 35 MPa SE MOSTRA MAIS VANTAJOSO PARA PILARES APÓS OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL. JÁ, PARA VIGAS, O TRAÇO DE 20 MPa APRESENTA MENOR IMPACTO. AS DIFERENÇAS REGIONAIS INFLUENCIAM OS RESULTADOS, ESPECIALMENTE, NOS INSUMOS E TRANSPORTE. CONCLUI-SE QUE A ESCOLHA ADEQUADA DO TRAÇO, ASSOCIADA À OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL, PODE

REDUZIR O IMPACTO AMBIENTAL DE ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO.

PALAVRAS-CHAVE: CONCRETO ARMADO, EMISSÕES DE CO₂, AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA, OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL, ESTRUTURAS, SUSTENTABILIDADE.

1. INTRODUÇÃO

As atividades ligadas à construção civil respondem por aproximadamente 21% das emissões globais de gases de efeito estufa e consomem cerca de 40% dos recursos

naturais do planeta, incluindo 15% da água doce disponível (Cabeza, L.F. *et al.*, 2023). Dentre os diversos materiais utilizados, ganha destaque o concreto armado, amplamente utilizado devido à sua versatilidade, resistência e baixo custo de execução, mas que apresenta elevado potencial de emissão de CO₂, principalmente pela produção de cimento Portland e pelo uso intensivo de agregados e aço para armaduras.

Devido ao esgotamento dos recursos naturais e às crescentes mudanças climáticas,

tem-se buscado a quantificação dos impactos ambientais produzidos pelos materiais e produtos a partir da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), através da qual se pode avaliar os diversos impactos desde a extração dos materiais até o fim de vida, passando pelas fases de produção e utilização. Paralelamente, técnicas de otimização estrutural podem ser empregadas para reduzir o consumo de materiais e custos, mantendo o atendimento às exigências normativas e promovendo

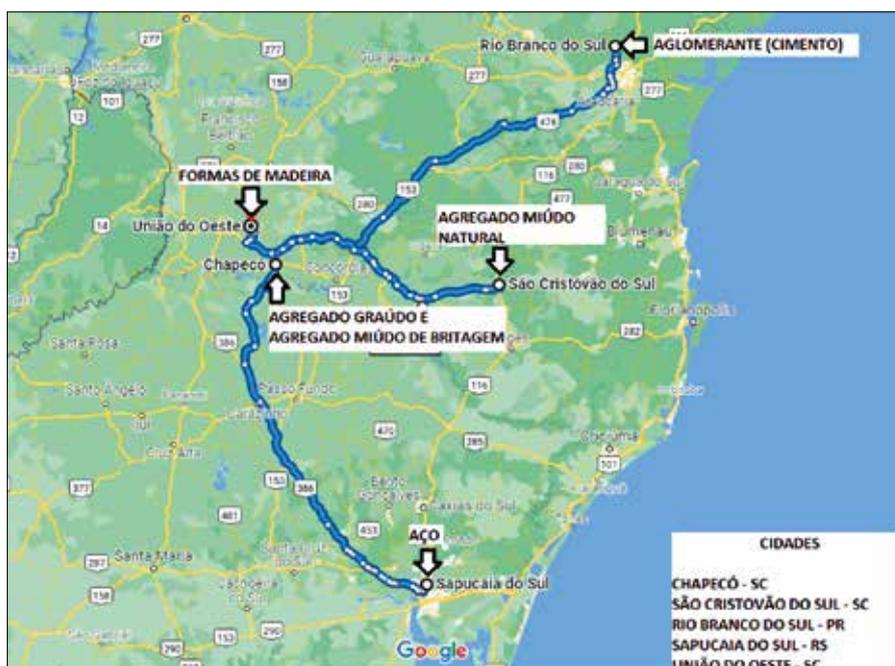


FIGURA 1
 LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DAS MATÉRIAS-PRIMAS
 FONTE: GOOGLE MAPS (2025)

estruturas mais sustentáveis. Estudos anteriores apresentam critérios e parâmetros otimizados para o projeto sustentável de estruturas como edificações (Santoro e Kripka, 2024) e pontes (Tres Junior *et al.*, 2023), entre outras. No entanto, as aplicações geralmente são específicas para um país ou região, o que pode gerar discrepâncias nos resultados ao não refletir as condições próprias à realidade local. Comparações entre diferentes regiões são escassas, mesmo sendo essenciais para compreender variações logísticas, de matriz energética, de processo construtivo e de mercado.

Este artigo objetiva investigar o impacto produzido pelos materiais envolvidos na produção de estruturas de concreto armado, considerando as fases de extração dos materiais, transporte e produção, numa abordagem conhecida como do berço ao portão. Inicialmente, são apresentados os resultados de emissões de dióxido de carbono (CO₂) relativos à produção de concreto armado para a cidade de Chapecó-SC, considerando dois traços distintos. Esses materiais foram aplicados no dimensionamento otimizado de vigas e pilares, com o objetivo de identificar formas efetivas de mitigação desses impactos. Na sequência, os valores obtidos são confrontados com os apresentados por Santoro (2021) para a cidade de Passo Fundo-RS, visando identificar tendências comuns e diferenças regionais, bem como parâmetros para o dimensionamento de estruturas de menor impacto.

2. IMPACTOS NA PRODUÇÃO DO CONCRETO EM CHAPECÓ-SC

Para a determinação dos impactos dos materiais estruturais desde a extração das matérias-primas até a produção das estruturas foram considerados os materiais concreto (20MPa e 35MPa), aço e fôrmas de madeira. Na fase de inventário, coletaram-se dados primários junto às empresas for-

TABELA 1

TRAÇOS DOS CONCRETOS ANALISADOS (EM KG/M³)

	20 MPa	35 MPa
Brita 01	625	730
Brita 00	315	290
Areia industrial	300	350
Areia média	670	550
Aglomerante	270	340

FONTE: OS AUTORES (2025)

necedoras de matérias-primas: cimento CP-V-ARI transportado de Rio Branco do Sul-PR (504 km), aço, proveniente de Sapucaia do Sul-RS (446 km); agregados graúdos (brita 00 e 01) e areia industrial produzidos na usina no próprio município; areia natural extraída a 294 km; madeira para fôrmas (Pinus, madeira serrada e seca em estufa) com origem a 60 km. A Fig. 1 apresenta um mapa com a cidade de Chapecó e a localização geográfica das fontes dos insumos.

Os traços considerados para a produção dos concretos foram obtidos a partir de informação de concreteira da região, apresentados na Tabela 1.

Para o cálculo das emissões de CO₂ foi considerada a categoria de impacto 'Potencial de Aquecimento Global' do método ReCiPe 2016, utilizando-se o software SimaPro 9.2.0.1 versão *Faculty* com a base de dados Ecoinvent 3.7.1. O Ecoinvent consiste em um banco de dados abrangente para análises de ciclo de vida, o qual contém dados sobre fluxos de materiais, energia, emissões e outros impactos ambientais, permitindo a avaliação do desempenho

ambiental de produtos e sistemas. No caso, os valores de entrada foram ajustados à realidade da região de Chapecó - SC, considerando os traços e as distâncias de transporte definidos na etapa inicial do estudo. Por exemplo, para a geração e transmissão de energia foi utilizada a matriz energética do Sul do Brasil, baseada em usina hidrelétrica. Já, para o transporte, foi considerado o uso de caminhões pesados movidos a diesel, com valores de emissão equivalentes à média mundial, excluindo Europa (designado como RoW, ou resto do mundo). Os resultados das emissões são apresentados na Tabela 2, com as unidades correspondentes. Para a emissão de CO₂ por metro quadrado de fôrma, considerou-se, para o estudo, o consumo de 0,0398 m³ de madeira para obtenção de um metro quadrado de forma. Não foram previstas reutilizações. Um maior detalhamento de como os valores da tabela foram obtidos pode ser visto em Alievi (2022).

A partir dos resultados da Tabela 2, observa-se que as emissões do concreto de maior resistência característica são quase 20% superiores às do de menor resistência. Isso se deve, principalmente, ao maior consumo de cimento, o qual corresponde a mais de 90% das emissões totais dos concretos. A areia correspondeu ao segundo maior impacto, devido, especialmente, ao volume e às maiores distâncias percorridas. Percebe-se que, de forma geral, os impactos devidos ao transporte variam de 1,14% a 6,37% do impacto total, sendo maiores no caso do aço. Um maior detalhamento pode ser obtido em Alievi (2022).

3. COMPARAÇÃO COM PASSO FUNDO-RS

Santoro (2021) aplicou metodologia análoga de ACV também considerando as fases do berço ao portão, mas com distâncias de transporte e traços específicos obtidos diretamente

TABELA 2

EMISSIONES DE CO₂ CALCULADAS PELO SOFTWARE SIMAPRO

	Extração/ Produção	Transporte	Emissões totais
Aço (kgCO ₂ /kg)	1,847109	0,125609	1,972718
Fôrmas de madeira (kgCO ₂ /m ²)	20,44	0,48	20,92
Concreto 20 MPa (kgCO ₂ /m ³)	330,174	8,786974	338,961
Concreto 35 MPa (kgCO ₂ /m ³)	401,4878	4,613494	406,1013

FONTE: OS AUTORES (2025)

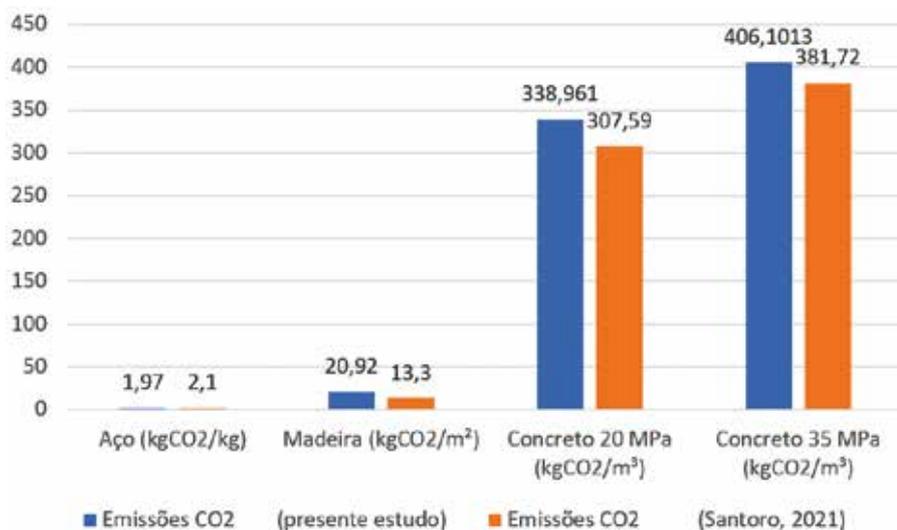


FIGURA 2
COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE CO₂ DAS MATÉRIAS-PRIMAS

FONTE: OS AUTORES (2025)

com concreteira da região de Passo Fundo-RS. Apesar da distância relativamente pequena entre os dois municípios estudados, de cerca de 180 km, diferenças significativas foram observadas (até 10,2% no concreto e 57,3% na madeira). Essas diferenças podem ser observadas com maior clareza na Fig. 2, que apresenta os resultados das emissões de CO₂ na extração/produção das matérias-primas componentes do concreto em kgCO₂/kg e kgCO₂/m³ para a madeira, obtidos pelo presente trabalho e por Santoro (2021). Com relação ao concreto, a maior variação das emissões de CO₂ de uma região para outra é devida à extração e produção do agregado graúdo. Para a madeira, o aumento das emissões de CO₂ decorre não apenas das distâncias maiores a percorrer no presente estudo (de 23 km para 60 km), mas sobretudo nos processos selecionados na base Ecoinvent. Ambos consideram madeira de Pinus serrada e seca em estufa. No entanto, o estudo de Santoro considera o uso de madeira reflorestada, o que por si só já impacta nos indicadores ambientais de forma mais positiva. Além disso, utiliza processos de abrangência global, o que inclui países de alto grau de desenvolvimento. Já o presente estudo emprega um processo mais conservador, no qual não há garantia quanto à certificação da madeira.

Adicionalmente, ao invés do processo de abrangência global, utiliza o designado RoW (resto do mundo), o qual exclui países da Europa e Estados Unidos, entre outros, e considera dados médios de países que não possuem processos específicos na base de dados. No entendimento dos autores, essa última alternativa representa de forma mais fiel a realidade brasileira. Outras diferenças

foram verificadas entre os processos empregados no presente estudo e no de Santoro (2021), como a capacidade do veículo empregado no transporte da madeira. No entanto, acredita-se que sua influência seja pouco significativa.

4. OTIMIZAÇÃO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Dos resultados anteriores, observa-se que os concretos de maior resistência (no caso 35MPa) produzem maior impacto que os de 20 MPa, uma vez que esse impacto está diretamente vinculado ao teor de cimento. No entanto, elementos estruturais dimensionados com concretos de maior resistência terão suas dimensões reduzidas, acarretando em menor consumo de material. Assim, uma comparação do impacto relativo entre dois materiais de diferentes características só pode ser realizada de maneira realista se considerado o dimensionamento dos elementos estruturais. Adicionalmente, caso sejam embasadas em elementos dimensionados com o emprego de técnicas de otimização, as comparações e conclusões decorrentes se tornam mais efetivas. A otimização matemática busca, através de um processo sistematizado, encontrar a melhor solução possível para cada situação

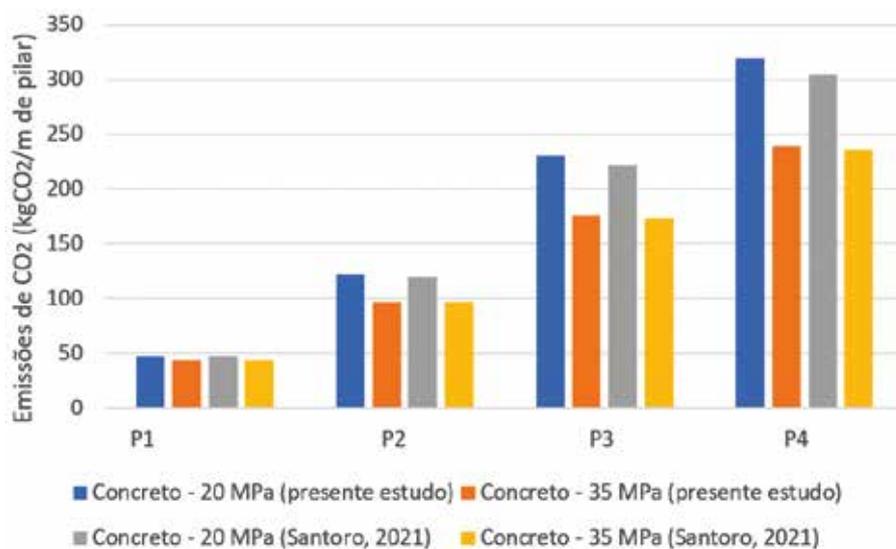


FIGURA 3
COMPARATIVO DOS RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DE PILARES COM ÊNFASE NAS EMISSÕES TOTAIS DE CO₂

FONTE: OS AUTORES (2025)

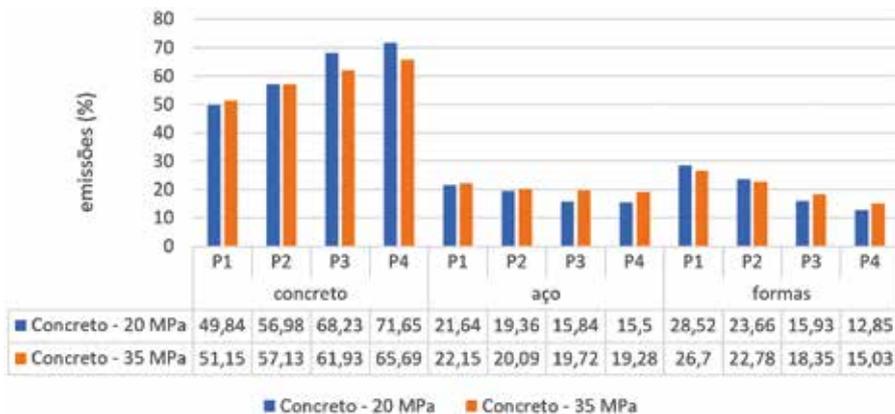


FIGURA 4

COMPARATIVO DOS RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DE PILARES COM ÊNFASE NAS EMISSÕES DE CADA MATERIAL, PARA CHAPECÓ

FONTE: OS AUTORES (2025)

analisada, e, portanto, torna o resultado menos dependente dos critérios específicos adotados pelo projetista.

Para quantificar o efetivo impacto das diferenças de emissão foram otimizadas seções transversais de pilares e vigas biapoiadas. Os pilares foram dimensionados à flexo-compressão reta, considerando as dimensões da seção e a quantidade e bitola das armaduras como variáveis de projeto. Foram considerados como objetivos a minimização do custo e do impacto por metro de comprimento de pilar, englobando os custos de concreto, aço e formas (Santoro, 2021). Para a otimização do impacto, foram utilizados os valores de emissões apresentados na Fig. 2.

A Figura 3 ilustra a análise comparativa dos resultados do dimensionamento otimizado de pilares com ênfase nas emissões de CO₂ para o presente estudo e para o de Santoro (2021). Os pilares P1 a P4 correspondem a diferentes combinações de momentos fletores e esforços axiais, idealizados com o intuito de cobrir situações diversificadas.

Com relação aos resultados apontados nessa apreciação comparativa, a análise mostra que o concreto de 35 MPa para pilares, emite em média 30% menos CO₂ que o concreto de 20 MPa para o presente estudo. Já, para Santoro (2021), a emissão de CO₂ é na média 26% menor ao utilizar o con-

creto de 35 MPa para os pilares. Apesar dos resultados serem distintos de um estudo para outro em termos de emissões unitárias, a análise de comparação aponta que os resultados seguem a mesma tendência para ambos os estudos. Assim, apesar dos impactos superiores apontados pelo presente estudo, comparativamente aos de Santoro (2021), as diferenças percentuais não chegam a ser significativas, uma vez que o processo de otimização efetua uma compensação ao utilizar

materiais de menor emissão relativa em maior quantidade.

A Figura 4 apresenta os impactos relativos de cada material para as seções otimizadas dos pilares obtidos para a cidade de Chapecó. Nela é possível perceber que o concreto é o responsável por grande parcela das emissões totais. Essa parcela variou entre 49,84% e 71,65% para 20 MPa e 51,15% e 65,69% para 35 MPa.

Na otimização das vigas, foram consideradas como variáveis a altura, a largura e as armaduras para elementos biapoiados com vão variando entre 3 a 10 m. Para as vigas otimizadas com base no presente estudo, vãos dimensionados com concreto de 20 MPa apresentaram melhor balanço entre emissões e custos, consumindo menos cimento por metro, apesar de gerarem seções transversais maiores. Isso se deve ao menor aproveitamento do concreto em seções submetidas predominantemente a esforços de flexão. Na Figura 5, apresenta-se o comparativo dos resultados do dimensionamento otimizado de vigas, com ênfase nas emissões de CO₂ para esse estudo, correlacionado ao estudo de Santoro (2021). De forma geral, observou-se que, em média, ao utilizar o concreto de 20 MPa para vigas, a emissão de CO₂ é aproximadamente

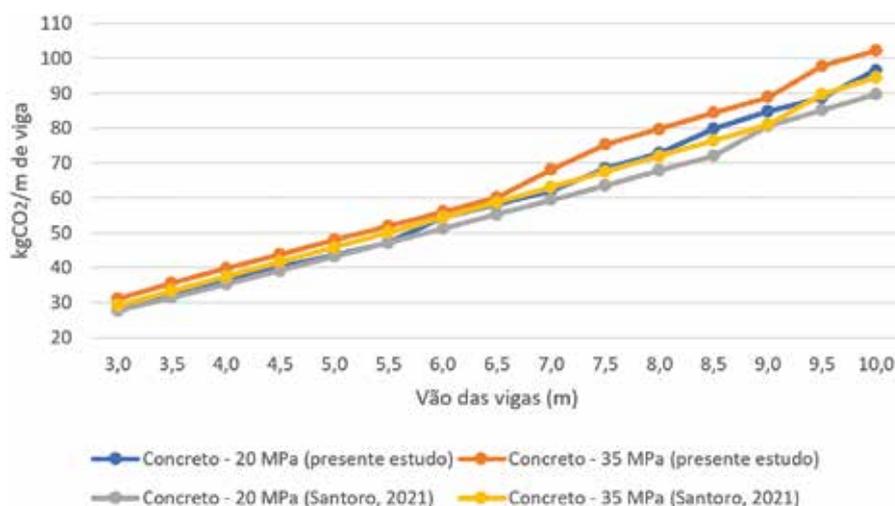


FIGURA 5

COMPARATIVO DO DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DE VIGAS COM ÊNFASE NAS EMISSÕES DE CO₂

FONTE: OS AUTORES (2025)

7,5% menor em relação a utilização do concreto de 35MPa.

A partir dos resultados obtidos, constatou-se que o dimensionamento otimizado das estruturas pode propiciar a efetiva redução nos impactos gerados, uma vez que permite não apenas determinar os quantitativos dos materiais estruturais, como também identificar a resistência mais adequada em função dos esforços atuantes. No entanto, essa redução pode ser ainda mais significativa se acompanhada de estudos que objetivem melhorar as propriedades dos concretos. Do ponto de vista da otimização, isso pode ser feito, por exemplo, pela dosagem dos materiais visando a minimização dos vazios, através de técnica conhecida com empacotamento de partículas, interferindo diretamente na resistência e na durabilidade do concreto. Adicionalmente, uma tendência tem sido o uso de rejeitos como materiais cimentícios suplementares, permitindo a substituição parcial do cimento com redução na extração de matérias-primas e menor disposição desses rejeitos em aterros.

Cabe destacar que, no dimensionamento estrutural (e, portanto, na otimização), a interação entre os diversos elementos deve ser adequadamente considerada. Assim, uma modelagem mais realista, na qual outros modelos sejam avaliados, poderia levar a resultados distintos e, portanto, também deve ser alvo de investigação.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo objetivou analisar as emissões de dióxido de carbono (CO₂) do concreto armado nas fases de extração/produção e transporte das matérias-primas, componentes do concreto

e na produção e transporte do concreto até a obra, buscando subsídios aos projetistas para minimizar os impactos ambientais das estruturas em concreto armado. Paralelamente, foram comparados os resultados obtidos neste estudo com os resultados atingidos no estudo de Santoro (2021).

A partir do dimensionamento otimizado de vigas e pilares, foi possível evidenciar a influência da resistência do concreto nas emissões. Dentre as conclusões do estudo, podem ser destacados os seguintes aspectos:

- ▶ Os impactos gerados pelos materiais são significativamente influenciados por aspectos regionais, com o traço utilizado e as distâncias dos insumos. Nesse sentido, maior destaque deve ser dado à obtenção de resultados mais afeitos à região. No caso de valores específicos para a região de estudo não estarem disponíveis, recomenda-se que processos retirados de bases como o Ecoinvent sejam selecionados de modo a refletir de forma mais fidedigna as características do país (como observado no caso das madeiras);
- ▶ As emissões de CO₂ são menores para os concretos de menor resistência a compressão, uma vez que envolvem menor volume de aglomerante (cimento), matéria-prima com maior contribuição nas emissões de CO₂ para a produção do concreto. No entanto, esses materiais necessitam ser usados em maior quantidade. Assim, em paralelo ao dimensionamento otimizado, deve-se incentivar estudos que visem a redução na quantidade de cimento (ou a substituição parcial

deste), sem a redução proporcional da resistência do concreto;

- ▶ De acordo com as análises efetuadas, é interessante utilizar concretos de maior resistência à compressão para os pilares e de menor resistência à compressão para vigas, obtendo nessa configuração estruturas em concreto armado menos poluentes. Destaca-se que esses resultados foram obtidos para elementos isolados e, portanto, podem divergir para a análise segundo modelos estruturais que considerem a efetiva interação entre os elementos;
- ▶ Apesar de não determinantes no presente estudo em relação às emissões totais, as distâncias percorridas pelos insumos também geram impactos que podem ser mitigados. Como sugestão é proposta a adoção de medidas como a seleção de fornecedores próximos ao destino final da matéria-prima, a utilização de veículos cujo consumo de combustíveis fósseis seja menor ou com capacidade de carga maior e a avaliação da possibilidade de uso de outros modais de transporte, quando disponíveis.

Apesar de aplicada ao município de Chapecó - SC, a metodologia apresentada pode ser adaptada para outras regiões. Como continuidade, sugere-se para estudos futuros a avaliação das demais categorias de impacto ambiental para o concreto armado, além das etapas de operação, manutenção e fim de vida dos materiais.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, pela Bolsa de Produtividade em Pesquisa concedida ao primeiro autor. ☺

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALIEVI, J. J. Avaliação de Impactos Ambientais Gerados por Estruturas de Concreto Armado na Cidade de Chapecó-SC. Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo, 2022.
- [2] CABEZA, L.F. et al. *Buildings. Em: Climate Change 2022 – Mitigation of Climate Change*. 1. ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2023. p. 953-1048.
- [3] SANTORO, J. F. Subsídios para a minimização do impacto ambiental de estruturas de edifícios em concreto armado. Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo, 2021.
- [4] SANTORO, J. F.; KRIPKA, M. *Evaluation of CO₂ emissions in RC structures considering local and global databases. Innovative Infrastructure Solutions*, v. 9, n. 2, p. 33, fev. 2024.
- [5] TRES JUNIOR, F. L. et al. *Multi-Objective Optimization Applied to the Design of Sustainable Pedestrian Bridges. International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 20, n. 4, p. 3190, 11 fev. 2023.

Produção de concreto sustentável para elementos pré-fabricados: aplicação de ultrassom de potência

RICARDO COUCEIRO BENTO - PROF. DR. - <https://orcid.org/0000-0002-6069-306X> (ricardobento@usp.br) – PUC MINAS/ FZEA-USP
JOÃO ADRIANO ROSSIGNOLO - PROF. DR. - <https://orcid.org/0000-0001-7246-7345> (rossignolo@usp.br) – FZEA-USP

RESUMO

PESQUISADORES ESTÃO CONTINUAMENTE INVESTIGANDO E IMPLEMENTANDO FORMAS DE REDUZIR AS EMISSÕES DE CO₂ DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL. UMA CONTRIBUIÇÃO PARA ATINGIR ESSE OBJETIVO É A REDUÇÃO DO CONSUMO DE CIMENTO PORTLAND DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO. A APLICAÇÃO DO ULTRASSOM DE POTÊNCIA PARA A PRODUÇÃO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS PRÉ-FABRICADOS SE APRESENTA COMO UMA TECNOLOGIA PROMISSORA PARA AUMENTAR A REATIVIDADE DO CIMENTO PORTLAND, ACELERANDO O GANHO DE RESISTÊNCIA EM IDADES INICIAIS E, COM ISSO, PARA OBTER A REDUÇÃO DO CONSUMO DE AGLOMERANTE E AUMENTAR AS TAXAS DE PRODUÇÃO. ESTE ARTIGO DESCREVE O CAMPO PROMISSOR E POUCO CONHECIDO SOBRE OS MECANISMOS PELOS QUAIS O ULTRASSOM ATUA EM SISTEMAS CIMENTÍCIOS E SEUS EFEITOS COMO UM MÉTODO PARA PROMOVER A ACELERAÇÃO NA CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND. TAMBÉM APRESENTA OS PRIMEIROS AVANÇOS EM PESQUISAS COM CIMENTO BRASILEIRO EFETUADAS PELO AUTOR NO BRASIL E EM RECENTE ESTÁGIO NA ALEMANHA COMO PARTE DE SEU PROJETO DE PÓS-DOUTORADO.

PALAVRAS-CHAVE: ULTRASSOM, CONCRETO, PRÉ-FABRICADOS, SUSTENTABILIDADE, GASES DE EFEITO ESTUFA.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Sustentabilidade na produção de elementos pré-fabricados

Nos últimos anos, a eficiência e a sustentabilidade entraram no foco

das indústrias devido às mudanças climáticas. No setor de construção não é diferente. A discussão internacional sobre recursos e clima leva, cada vez mais, ao desenvolvimento e teste de novos conceitos na produção de concreto e concreto. Atualmente, está ocorrendo uma intensa investigação e desenvolvimento na área de cimentos alternativos e mais sustentáveis. Para tanto, conceitos inovadores estão sendo testados na produção de concreto.

Devido aos requisitos de construção, qualidade e durabilidade dos edifícios, os elementos pré-fabricados de concreto apresentam, muitas vezes, vantagens em comparação com as estruturas de concreto convencionais. É necessário, porém, discutir o processo de produção de concreto na fábrica de elementos pré-fabricados, para possibilitar uma produção eficiente e sustentável. Especialmente na produção de concreto pré-fabricado é imprescindível uma alta resistência inicial para a manutenção dos ciclos de produção. Para garantir altas resistências iniciais, cimentos altamente reativos são usados em combinação com altos teores de cimento no concreto, além de tratamento térmico. Esses procedimentos contradizem o conceito de concreto sustentável [1].

Além das abordagens normalmente aplicadas para melhorar o processo de hidratação, o ultrassom de potência (UP) apresenta-se como uma alternativa mais sustentável para acelerar a hidratação do cimento [2] [3].

1.2 Mecanismos de hidratação do cimento Portland

Os mecanismos de hidratação do cimento são considerados de alta complexidade devido ao número de compostos presentes e, principalmente, pela interação entre os mesmos. Dentre os compostos encontrados no cimento, o silicato tricálcico (C3S) pode ser considerado o de maior relevância. Em concordância ao maior percentual de C3S na composição total do cimento, em geral na faixa de 50 a 70%, sua influência em propriedades como resistência e o calor de hidratação o qualificam como componente fundamental do cimento Portland.

Os produtos da hidratação são originados pela nucleação e crescimento de cristais dos óxidos hidratados na superfície dos grãos de clínquer, atendendo a certas condições de saturação dos compostos anidros em meio aquoso. O principal produto da hidratação do C3S são os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), em uma fase quase amorfa, seguido pela portlandita, etringita e o monossulfato. De acordo com a teoria da nucleação, a taxa de hidratação é condicionada pela nucleação e o crescimento do C-S-H formado nos estágios iniciais da hidratação. Nesse sistema, os processos de nucleação e crescimento dos cristais seguem leis fundamentais de termodinâmica e dependem de propriedades, como concentração, tamanho e forma dos cristais, presença de partículas, entre outras [4].

A ocorrência do fenômeno de cristalização depende da condição básica

de supersaturação do sistema. Contudo, a formação dos núcleos cristalinos é fundamental para o desencadeamento do processo de crescimento e das características como tamanho, propriedades físicas e pureza dos cristais formados [5]. A nucleação consiste na formação de novos cristais, enquanto o crescimento é o processo pelo qual os cristais já existentes se tornam maiores. A nucleação e o crescimento dos cristais são fenômenos competitivos, já que ambos consomem massa de soluto durante o processo de cristalização. A nucleação pode se dar por diferentes mecanismos: ela divide-se em nucleação primária, quando ocorre em uma solução totalmente isenta de cristais do soluto; e nucleação secundária, quando já existe em solução cristais do soluto.

Muitos fatores afetam a formação e o crescimento de cristais, incluindo a hidrodinâmica do cristizador, a temperatura e a presença de impurezas suspensas ou dissolvidas. Dois outros fenômenos podem se fazer presentes e, apesar de não consumirem massa de soluto da solução, alteram a distribuição de partículas nos diversos tamanhos: a aglomeração e a quebra de cristais.

1.3. Efeito do ultrassom de potência (UP) no cimento Portland

O UP é utilizado para produzir cavitação. A onda ultrassônica aplicada a um material é transmitida como uma onda sonora por meio de uma série de ciclos de compressão e rarefação para a produção de cavitação. A consequência da cavitação é a formação, crescimento e colapso de microbolhas de gases na fase líquida, o que resulta em efeitos químicos e físicos em um meio. “Ondas de choque” e “correntes de jato” são formadas devido a implosão das bolhas de cavitação, direcionando jatos de líquido às superfícies sólidas de material em suspensão, o que resulta na redução do tamanho, colisões e ativações das superfícies das partículas.

A aplicação de UP nas pastas de cimento não pode acelerar a formação das fases de C-S-H na ausência de partículas previamente formadas, mas quebra e remove parcialmente as primeiras fases de C-S-H cristalizadas nas super-

fícies de C₃S, produzindo novas regiões na solução para a posterior cristalização (nucleação secundária).

Estudos em pastas, utilizando microscopia de varredura, indicam um teor de C-S-H significativamente maior em pastas ultrassonificadas, principalmente no período de 2 a 6 horas, o que resulta em um aumento de resistência à compressão inicial. Após 24 horas, os resultados são semelhantes aos das pastas não ultrassonificadas. A resistência aos 28 dias do concreto ultrassonificado sofre uma redução, geralmente entre 5 - 10%, que se deve a um aumento do teor de vazios de ar decorrente do processo [6].

O tratamento por UP com o propósito de acelerar a hidratação do cimento, devido à indução de energia, resulta em aumento da temperatura, tal qual a incorporação de aditivos químicos, o tratamento térmico e os traços com alto consumo de cimento aplicados com o mesmo propósito. O curso do desenvolvimento da temperatura de pastas de cimento ultrassonificadas e não ultrassonificadas é encurtado como resultado do tratamento ultrassônico.

As elevadas temperaturas internas dos elementos de concreto durante a hidratação do cimento podem resultar na formação de etringita instável ou à

incorporação de sulfatos em outras fases. Após o endurecimento do concreto, isto pode levar à formação de etringita tardia (DEF sigla em inglês para *delayed ettringite formation*) dentro da fase C-S-H ou no contato entre a pasta e os agregados, levando à geração de pressões expansivas, causando a formação de fissuras e, conseqüentemente, a resistências inferiores aos 28 dias [7]. Devido a isso, as normas de produção de estruturas de concreto pré-fabricadas estabelecem que as temperaturas máximas do concreto devem ser limitadas entre 65°C e 70°C. O aumento de temperatura é resultado da entrada de energia específica, que depende da amplitude da onda e do período de tratamento, devendo, portanto, serem controlados.

2. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

A metodologia foi dividida em duas etapas de ensaios experimentais com a utilização de cimento nacional.

A primeira etapa foi executada no Brasil, na Universidade de São Paulo, nos laboratórios do Departamento de Engenharia de Biosistemas da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos e teve como objetivo a obtenção do conhecimento básico sobre a influência do UP na suspensão de cimentos em que parâmetros adequados do equipamento e comportamento da pasta precisaram ser identificados.

A segunda etapa foi conduzida na Alemanha, abrangendo um estágio em uma empresa desenvolvedora da tecnologia e uma visita técnica a uma planta de pré-fabricados que utiliza o ultrassom de potência (UP) em suas operações. Nesta fase, o foco principal foi a aplicação do UP em concretos. Complementarmente, a viagem técnica incluiu investigações em pastas realizadas na Faculdade de Engenharia Civil do Instituto F. A. Finger para Ciência dos Materiais de Construção da Universidade Bauhaus de Weimar.

2.1 Primeira etapa de investigações

2.1.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Foi utilizado Cimento Portland CPV-ARI de alta resistência inicial



FIGURA 1
ULTRASSOM COM A SONDA INSERIDA
NA AMOSTRA DENTRO DO BECKER

(ABNT NBR 16697:2018). A escolha deste tipo de cimento deve-se ao fato de ser constituído predominantemente por clínquer e, no máximo, 10% de material carbonático em sua composição, além de ser de uso comum em indústrias de pré-fabricados.

Foram preparadas dosagens de pastas de cimento com relação água/cimento fixa de 0,5 e avaliadas diferentes condições de aplicação do UP quanto às variações de tempo e amplitudes do equipamento ultrassônico. Os resultados da influência do ultrassom na configuração inicial da suspensão foram obtidos quanto ao calor liberado, efeito da velocidade ultrassônica e energia inserida.

Para aplicação do ultrassom nas pastas de cimento Portland no estado fresco foi utilizado um equipamento fabricado pela Sonics and Materials, modelo VC505, potência de 500 w e frequência constante de 20 KHz. O aumento de temperatura da suspensão de cimento devido à aplicação do UP foi limitado a 60°C.

O recipiente onde foi colocada a suspensão de cimento e água foi um becker com capacidade para 500 ml. O diâmetro de sonda utilizado na pesquisa foi de 19 mm conforme indicado pelo fabricante do equipamento para volumes de 100 ml a 500 ml. A amostra foi misturada em um equipamento IKA Eurostar 60 (200 rpm) por três minutos. Em seguida o material foi acondicionado em um becker com a quantidade de 300 ml e a sonda ultrassônica foi inserida até o meio da amostra juntamente com um medidor de temperatura (Figura 1).

2.1.2 RESULTADOS

Para o equipamento de UP disponível, a amplitude máxima produzida com a utilização de uma sonda de 19mm é de 60µm para volumes de 100 a 500ml segundo especificações do fabricante.

Por meio da leitura no visor do equipamento, durante o tratamento do UP, foi obtida a entrada de energia específica de 37.000 Joules para o limite de temperatura de 59°C, aproximadamente. Para os 300 ml da amostra, esta energia representa 123 J/ml.

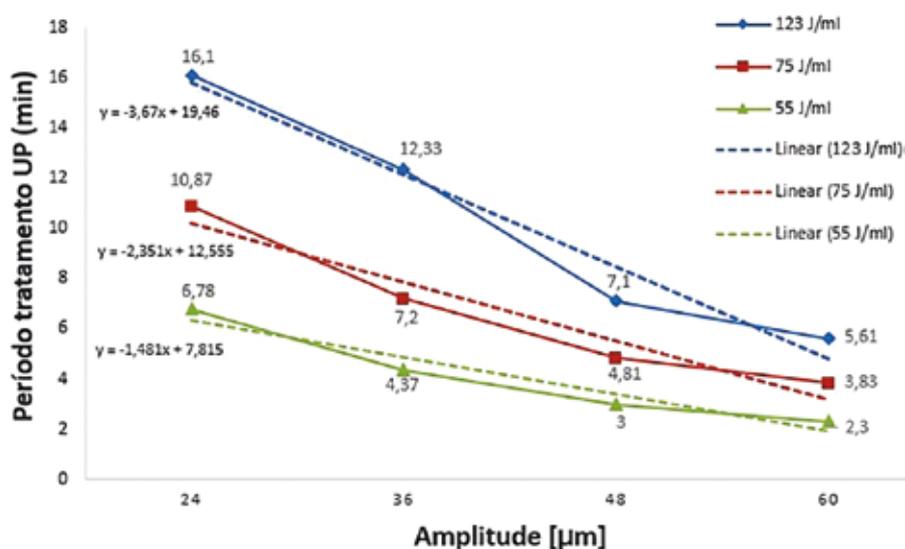


FIGURA 2

PERÍODO DE TRATAMENTO COM O UP NA SUSPENSÃO DE CIMENTO RELATIVO À AMPLITUDE E À ENTRADA DE ENERGIA ESPECÍFICA

À partir da amplitude máxima de 60µm, foram geradas várias amplitudes de 80%, 60% e 40% abaixo da amplitude máxima: 48µm, 36µm e 24µm, respectivamente, e entradas de energia de 75J/ml (26.500J) e 55J/ml (16500J) para execução dos testes e verificação dos resultados com o intuito de cobrir uma ampla faixa de verificação. Foi medido o período de tratamento com o UP na suspensão de cimento de 300ml

para atingir as três entradas de energia específicas (123J/ml, 75J/ml e 55J/ml) com as quatro amplitudes pré-selecionadas (24µm, 36µm, 48µm e 60µm). A partir da Figura 2, verifica-se que em amplitude do UP constante, o aumento da entrada de energia específica requer tempos de ultrassonificação mais longos. A comparação entre os tempos de ultrassonificação necessários para a entrada de energia específica

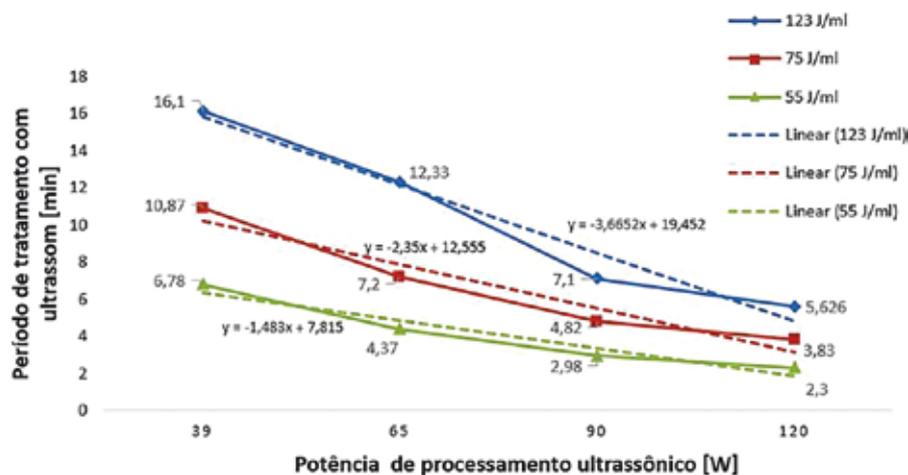


FIGURA 3

PERÍODO DE TRATAMENTO UP RELATIVO À POTÊNCIA EMITIDA E À ENTRADA DE ENERGIA ESPECÍFICA

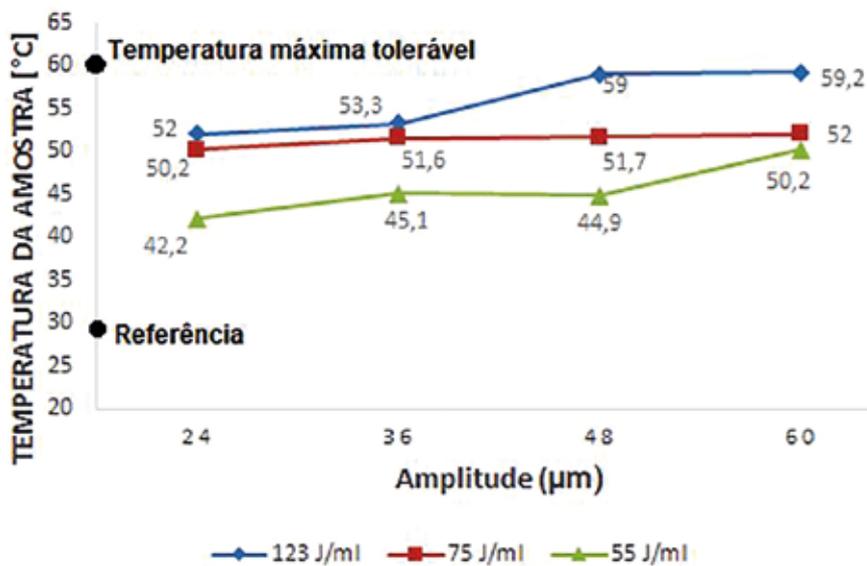


FIGURA 4

TEMPERATURA NA SUSPENSÃO DE CIMENTO DEVIDO À APLICAÇÃO DO UP RELATIVA À AMPLITUDE E À ENTRADA DE ENERGIA ESPECÍFICA



FIGURA 5

CONJUNTO DE DOIS CORPOS DE PROVA CÚBICOS DE 10 CM DE LADO, SENDO PESADOS

constante, para o mesmo diâmetro da face frontal da sonda ultrassônica para gerar diferentes amplitudes de UP, demonstra que uma amplitude maior reduz o tempo de ultrassonificação.

Para as amplitudes de 24μm, 36μm, 48μm e 60μm, a potência de processamento aplicada foi de 39W, 65W, 90W e 120W respectivamente. Na Figura 3, verifica-se que, considerada a potência acústica emitida, uma dependência quase linear da duração dos tempos de ultrassonificação é observada e quanto maior a potência emitida, menor foi o tempo necessário de tratamento.

A Figura 4 exibe o aumento de temperatura correspondente da suspensão de cimento induzida pela ultrassonificação. Os resultados demonstram que o aumento de temperatura é dependente da entrada de energia específica. Quanto maior a energia introduzida, maiores as temperaturas da amostra após a aplicação do UP.

2.2 Segunda etapa de investigações

2.2.1 MATERIAIS E MÉTODOS

A fase da pesquisa executada na Alemanha foi iniciada pelo autor com o envio do Brasil de 80kg de cimento CP-V à vácuo para a execução das investigações.

Para a execução de ensaios de progresso da resistência, foi produzido concreto para uma classe de 60 MPa com um consumo de cimento de 400kg/m³ de concreto, uma relação água/cimento de 0,42, agregados, aditivo plastificante e filler (Tabela 1).

Foram executados dois tipos de concreto: um de referência, sem tratamento de ultrassom e outro com o tratamento de UP.

O UP foi aplicado em uma parcela 20% da pasta após 2 horas da mistura de água e cimento. O diâmetro da sonda do ultrassom foi de 40mm, aplicada

entre 1 a 2 minutos a uma amplitude de 43μm e 75 J/ml de energia. Após o procedimento, a pasta ultrassonificada foi adicionada e misturada junto com o



FIGURA 6

INSTALAÇÃO DE SENSORES ALMEMO® 2590 PARA ACOMPANHAMENTO DA TEMPERATURA

TABELA 1

COMPOSIÇÃO DO CONCRETO (KG/M³)

Cimento	Água	Plastificante	Filler	Areia 0/2mm	Brita 2/8mm	Brita 8/16mm
400	165	1,3%	180	645,6	484,2	484,2



FIGURA 7

EQUIPAMENTO PARA EXECUÇÃO DE MICROSCÓPIA DE VARREDURA
INSTITUTO F. A. FINGER BAUHAUS — WEIMAR

restante dos componentes do concreto.

Foram moldados corpos de prova cúbicos de 10cm de lado e acondicionados no laboratório para posterior rompimento em diversas idades e instalados sensores Almemo® 2590 para acompanhamento da evolução da temperatura dos corpos de prova (Figuras 5 e 6).

Nos laboratórios da Faculdade de Engenharia Civil do Instituto F. A. Finger para Ciência dos Materiais de Construção da Universidade Bauhaus de Weimar, foi empregada, para exame da precipitação das fases CSH, a microscopia eletrônica de varredura de alta resolução por meio do equipamento Nova NanoSEM 230, FEI, Holanda (Figura 7).

2.2.2 RESULTADOS

A hidratação e ganho de resistência nas idades iniciais foram significativamente aceleradas como pode ser observado na Figura 8.

Com a idade de 8 horas, o concreto tratado com UP apresentou uma tensão à compressão 75,17% maior que o de referência. Após 10 horas, o aumento da tensão de compressão com UP foi de 27,84% em relação ao de referência e, em 24 horas, as duas tensões se equivaleram. A tensão à compressão aos 28 dias apresentou redução do concreto tratado com UP de 5,98% em relação ao de referência, o que vai ao encontro de outros estudos devido à incorporação de ar.

O curso do desenvolvimento da temperatura é encurtado como resultado do tratamento ultrassônico como mostra a Figura 9. O início da solidificação da amostra ultrassonificada ocorre significativamente mais cedo do que na amostra de referência. A amostra ultrassonificada (UP) atingiu uma temperatura de 33,2°C após 8,1 horas e a de referência temperatura semelhante de 32,7°C após 9,75 horas.

A Figura 10 mostra a microestrutura do C3S após 1 hora de hidratação: para a pasta de referência não ultrassonificada (esquerda) e a pasta ultrassonificada (direita). Uma impressionante diferença pode ser notada: na pasta de referência, estão presentes partículas de alita com alguma etringita em nanoescala e nenhum C-S-H; em contrapartida, na pasta ultrassonificada estão presentes partículas de alita, com presença de C-S-H em estágio inicial.

A Figura 11 mostra a microestrut-

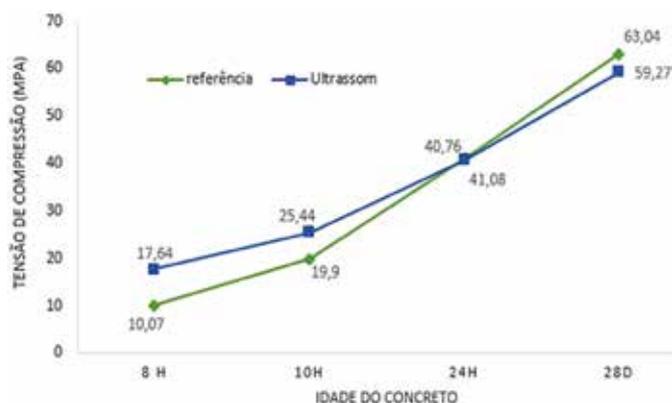


FIGURA 8

TENSÃO DE COMPRESSÃO NAS IDADES DE 8H, 10H, 24H
E AOS 28 DIAS

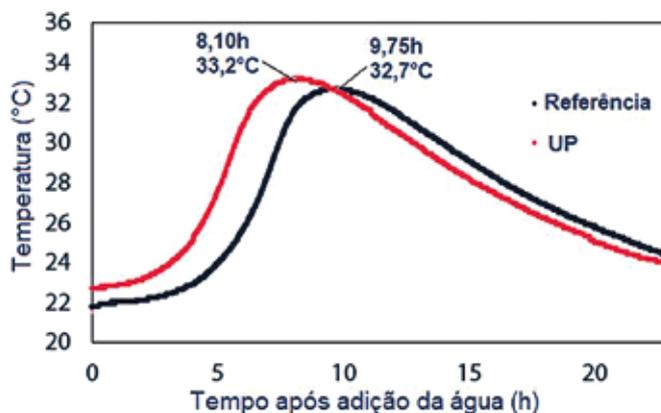


FIGURA 9

DESENVOLVIMENTO DA TEMPERATURA DOS CORPOS DE PROVA
DE REFERÊNCIA E ULTRASSONIFICADO (UP)

tura do C3S após 2 horas de hidratação: para a pasta de referência não ultrassonificada são notadas partículas de alita, com algumas fases de C-S-H e etringita em nanoescala. A pasta ultrassonificada, por outro lado, apresenta muitas fases C-S-H em estágio inicial e vazios de dissolução.

Em contraste com a referência, na pasta ultrassonificada podem ser vistos significativamente mais aglomerados de fases C-S-H e locais de crescimento. As fases C-S-H existentes aparecem distribuídas homogeneamente por toda a superfície do C3S.

3. CONCLUSÕES

A primeira etapa experimental deste estudo demonstrou que a aplicação do ultrassom de potência (UP) em suspensões cimentícias permite o controle preciso de variações operacionais críticas, como amplitude, entrada de energia específica, tempo de ultrassonificação e elevação de temperatura.

Na segunda etapa, os resultados evidenciaram o potencial do UP para antecipar a hidratação inicial do cimento Portland, criando condições para um ganho inicial de resistência mecânica do concreto, sem a necessidade de aditivos químicos ou tratamentos térmicos de alta energia.

A tecnologia permite a produção dos componentes de concreto pré-fabricados com uma quantidade significativamente menor de cimento e, conseqüente, redução do CO₂ incorporado e/ou aceleração do processo produtivo por meio do saque antecipado das fôrmas.

A produção de concreto pré-fabricado pode dar um grande passo em direção à sustentabilidade proporcionada pela aplicação da tecnologia, visando não só à redução de emissão de CO₂, como também à diminuição dos custos de produção.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a dois pesquisadores alemães que forneceram subsídios essenciais para a execução desta pesquisa: Dr. Ricardo Remus e Dr^a Christiane Röbler. ☺

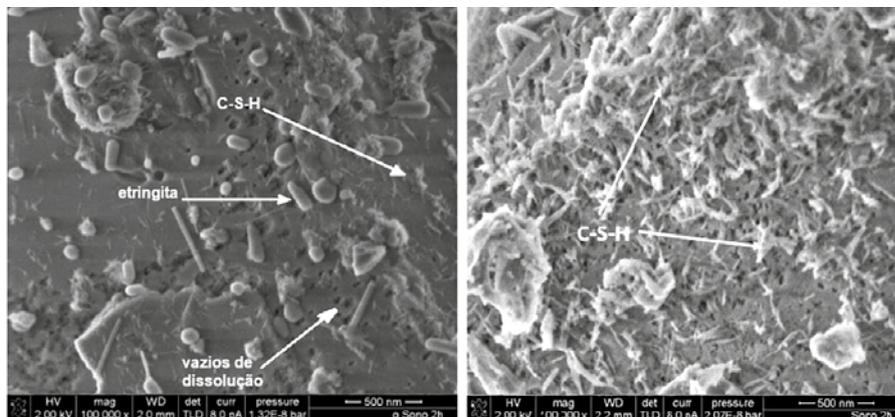


FIGURA 10

MICROESTRUTURAS DE C3S HIDRATADO OBTIDAS NO MEV APÓS 1 HORA DE HIDRATAÇÃO PARA A AMOSTRA DE REFERÊNCIA (ESQUERDA) E A AMOSTRA ULTRASSONIFICADA (DIREITA)

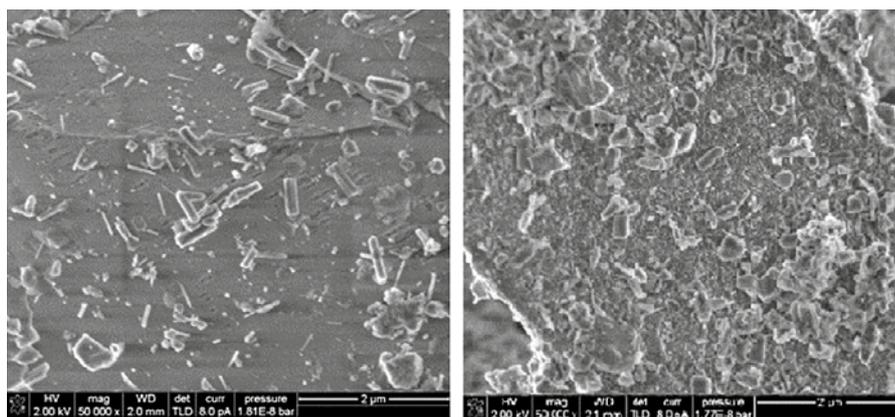


FIGURA 11

MICROESTRUTURAS DE C3S HIDRATADO OBTIDAS NO MEV APÓS 2 HORAS DE HIDRATAÇÃO PARA A AMOSTRA DE REFERÊNCIA (ESQUERDA) E A AMOSTRA ULTRASSONIFICADA (DIREITA)

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] REMUS, R.; RÖBLER, P.; HESSE, S.; NUNE, S.; LUDWIG, H-M. *Power ultrasound assisted production of sustainable concrete*. 16th International Congress on the Chemistry of cement - "Further Reduction of CO₂ - Emissions and Circularity in the Cement and Concrete Industry", 23rd - 26th September, Bangkok, Thailand, 2023.
- [2] RÖBLER, C., PETERS, S., LUDWIG, H. *Power Ultrasound: An Effective Method to Accelerate Strength Development of Cementitious Materials*. CPI - Concrete Plant International (2012).
- [3] PETERS, S. *The Influence of power ultrasound on setting and strength development of cement suspensions* Weimar: Bauhaus Universität, Weimar, 2016.
- [4] MULLIN, L. *Crystallization*. London, Butterworth-Heinemann, 2001. 610p.
- [5] COSTA, C. B. B.; GIULIETTI, M. *Introdução à cristalização: princípios e aplicações*. São Carlos. EdUFSCar, 2010. 91p.
- [6] REMUS, R. *Ultraschallgestützte Betonherstellung Konzept für eine ressourcenschonende Betonproduktion, Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Dr.-Ing. an der Fakultät Bauingenieurwesen der Bauhaus-Universität Weimar*, 2022.
- [7] TAYLOR, H.F.W. *Cement Chemistry*. 2nd Edition, Thomas Telford Publishing, London, 1997.

Estudo de desempenho de concretos estruturais produzidos com agregados reciclados mistos

JÚLIO CÉZAR DE MENDONÇA UCHÔA - DOUTORANDO - <https://orcid.org/0009-0004-1855-6928> (julio.uchoa@ctec.ufal.br)
KAROLINE ALVES DE MELO MORAES - PROF.^a DR.^a; WAYNE SANTOS DE ASSIS - PROF. DR.; JOÃO PEDRO DE ARAÚJO LIMA - GRADUANDO;
LETÍCIA SILVA DA COSTA CASTRO - GRADUANDA; DAIANA SANTOS PRIMO - GRADUANDA - UFAL

RESUMO

CONSIDERANDO O VOLUME SUBSTANCIAL DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) GERADOS PELO SETOR DA CONSTRUÇÃO, JUNTAMENTE COM O ESGOTAMENTO CRESCENTE DE AGREGADOS NATURAIS (AN), HÁ UMA URGÊNCIA DE ALTERNATIVAS SUSTENTÁVEIS. UMA POSSIBILIDADE É A UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS MISTOS (ARM) PROVENIENTES DE RCD. ESTE ARTIGO TEM COMO OBJETIVO AVALIAR A VIABILIDADE ESTRUTURAL DO CONCRETO INCORPORANDO ARM EM SEIS MISTURAS DE CONCRETO, SUBSTITUINDO 20% E 50% DO AN POR ARM E INCORPORANDO 20% DE METACAULIM (MK). AS PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO FORAM EXAMINADAS POR MEIO DE ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E ABSORÇÃO DE ÁGUA CAPILAR. OS RESULTADOS INDICARAM UMA REDUÇÃO NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO COM O AUMENTO DO TEOR DE ARM, EMBORA O MK TENHA AUMENTADO A RESISTÊNCIA E REDUZIDO A ABSORÇÃO DE ÁGUA CAPILAR, DEMONSTRANDO SEU PAPEL BENÉFICO NAS FORMULAÇÕES DE CONCRETO SUSTENTÁVEIS.

PALAVRAS-CHAVE: CONCRETO ESTRUTURAL, AGREGADO RECICLADO MISTO GRAÚDO, ESTATÍSTICA, METACAULIM, SUSTENTABILIDADE.

1. INTRODUÇÃO

Diante da crescente geração de resíduos de construção e demolição (RCD) e da escassez de agregados naturais, os agregados reciclados mistos (ARM) configuram-se como uma alternativa sustentável promissora para a construção civil, especialmente em concretos, onde contribuem para a redução dos impactos ambientais e o aproveitamento de materiais anterior-

mente descartados.

Os agregados reciclados mistos são naturalmente heterogêneos; suas principais características incluem maior porosidade, capacidade de absorção de água superior e maior teor de material pulverulento, o que, juntamente com sua forma irregular, reduz a trabalhabilidade e pode diminuir a resistência mecânica do concreto (1).

Os ARM apresentam alta porosidade, com isso absorvem mais água por capilaridade em comparação aos concretos convencionais, algo esperado em decorrência da elevada porosidade (2). O mesmo autor comenta que a utilização do ARM, no que tange à resistência à compressão em sua composição, demonstra um resultado satisfatório aos 28 dias, com um resultado mínimo de 20 MPa.

Ao incorporar o metacaulim no concreto com uso de ARM, observa-se um aumento na resistência à compressão, com valores próximos da referência, devido ao alto teor de finos deste material suplementar ao cimento (3). Em contrapartida, os mesmos autores comentam que a substituição parcial do cimento por metacaulim reduz o valor do abatimento.

Este estudo avalia o desempenho de concretos produzidos com agregado reciclado misto graúdo (ARM_g), verificando a influência do ARM_g no comportamento do concreto no estado endurecido, através dos ensaios de absorção de água por capilaridade e de resistência à compressão, trazendo uma abordagem estatística para a análise dos resultados.

Com relação às normativas brasileiras, a atualização da norma NBR 15116 (4) permitiu apenas o uso de agregados

reciclados de concreto (ARCO) para aplicações estruturais, entretanto alguns trabalhos verificaram a possibilidade de uso do ARM em aplicações estruturais (1)(2)(3). Porém, a heterogeneidade inerente desses, particularmente dos agregados reciclados mistos graúdos (ARM_g), continua sendo um desafio significativo. Por esse fator, mais pesquisas são necessárias para compreender a heterogeneidade do ARM_g, que apresenta desafios para a viabilidade estrutural. Dessa forma, este estudo foi impulsionado pela lacuna de pesquisa existente na temática da aplicação estrutural de ARM_g, tanto no Brasil quanto no mundo, abordando a necessidade de compreender suas diversas propriedades. Além disso, em regiões como os bairros de Maceió/AL, afetados pelo afundamento do solo, o aproveitamento dos resíduos de edificações demolidas para a construção sustentável poderá auxiliar na recuperação econômica e na revitalização dessas áreas. Consequentemente, a relevância deste estudo é ressaltada tanto por um imperativo global de práticas de construção sustentáveis quanto por necessidades locais específicas.

2. METODOLOGIA

O presente estudo é caracterizado como uma pesquisa experimental, inerentemente estruturada para avaliar hipóteses vinculadas às suposições dos pesquisadores, empregando grupos de controle, amostragem estocástica e manipulação de variáveis. Esta categoria de pesquisa visa extrair inferências gerais por meio de técnicas de amostragem específicas executadas durante a análise.

De acordo com os objetivos propostos no presente estudo, foi elaborado e desenvolvido um planejamento experimental, estabelecendo-se o fator de controle. Esse planejamento foi pensado considerando a disponibilidade dos recursos e seguindo um cronograma de execução.

Esta pesquisa aplicou as fases do método estatístico implementada por Montgomery (5), progredindo por quatro fases: definição do problema/objetivo; planejamento da coleta de dados qualitativos-quantitativos com métodos mistos; organização dos dados/análise estatística (identificação de padrões); e formulação de conclusões alinhadas aos objetivos, garantindo o rigor metodológico da investigação.

Em concordância com Montgomery (5), a execução e sucesso do planejamento de experimentos dependerão de como ele é estruturado e realizado. Para o presente estudo, foi utilizado o planejamento fatorial (Equação 1). A execução desse planejamento possibilitou a realização de análises estatísticas com maior significância.

$$[1] n^k$$

Onde:

n = número de níveis;

k = número de fatores.

As etapas experimentais desenvolvidas ao longo do trabalho foram:

- ▶ Seleção e caracterização dos materiais;
- ▶ Estudo de dosagem;
- ▶ Produção dos concretos e moldagem de corpos de prova;
- ▶ Avaliação dos concretos no estado endurecido em relação à absorção de água por capilaridade e resistência à compressão.

2.1 Fatores de controle: tipos de concreto x idade do concreto

Os ensaios realizados nessa categoria de fatores foram o ensaio de resistência à compressão e o ensaio de absorção de água por capilaridade.

Os fatores analisados são: tipos de concreto e idade do concreto. O fator “tipo de concreto” tem 6 níveis para todos os ensaios, sendo descritos no Quadro 1. O fator “idade do concreto” tem 2 níveis, sendo 7 dias e 28 dias para resistência à

compressão e 28 dias para absorção de água por capilaridade.

Quanto à variável resposta “ensaio de resistência à compressão”, utilizando a fórmula do planejamento fatorial (Equação 1), é observado 1 fator com 6 níveis e 1 fator com 2 níveis, além da consideração de 3 réplicas. Portanto, ao menos 36 espécimes foram necessários para realização das análises estatísticas, conforme o cálculo, mostrado na Equação 2.

$$[2] \text{Tamanho da amostra} = 6^1 * 2^1 * 3 = 36 \text{ unidades}$$

O Quadro 2 mostra o programa fatorial para o ensaio de resistência à compressão.

Quanto à variável resposta “ensaio de absorção de água por capilaridade”, utilizando a fórmula do planejamento fatorial, Equação 1, é observado 1 fator com 6 níveis e 1 fator com 1 nível, além da consideração de 3 réplicas, portanto ao menos 18 espécimes foram necessários para realização das análises estatísticas, conforme Equação 3.

$$[3] \text{Tamanho da amostra} = 6^1 * 1^1 * 3 = 18 \text{ unidades}$$

O Quadro 3 mostra o programa fatorial para o ensaio de absorção de água por capilaridade.

2.2 Caracterização dos materiais

O cimento utilizado foi o CP V-ARI, que possui massa específica de 3040 kg/m³ e resistência à compressão de 48,70 MPa aos 28 dias. Esse cimento foi utilizado para compensar a perda de resistência esperada devido ao emprego de AR.

Como agregados, foram utilizados: agregado natural miúdo (AN_m), agregado natural graúdo (AN_g) e agregado reciclado misto graúdo (ARM_g).

O agregado natural miúdo (AN_m) é uma areia grossa, com módulo de finura de 2,45, dimensão máxima de 4,75 mm, massa unitária no estado compactado de 1620 kg/m³, massa unitária no estado solto de 1500 kg/m³, massa específica de 2510 kg/m³, absorção de água de 0,60% e teor de material pulverulento de 2,68%.

O agregado natural graúdo (AN_g) tem módulo de finura de 4,71, dimensão máxima de 19 mm, massa unitária no estado compactado de 1530 kg/m³, massa unitária no estado solto de 1450 kg/m³, massa

específica de 2670 kg/m³ e absorção de água de 0,30%.

O agregado reciclado misto graúdo (ARM_g) tem dimensão máxima de 25 mm, massa unitária no estado compactado de 1160 kg/m³, massa unitária no estado solto de 1100 kg/m³, massa específica de

QUADRO 1
FATOR TIPOS DE CONCRETO

Sigla	Detalhamento
FC	Concreto convencional (CV)
FC2	CV + metacaulim (MK)
FC3	20% de Agregado Reciclado Misto Graúdo (ARM _g)
FC4	20% de ARMg + 20% de MK
FC5	50% de ARMg
FC6	50% de ARMg + 20% de MK

FONTE: AUTORES (2024)

QUADRO 2
PROGRAMA FATORIAL PARA O ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Tipos de concreto	Quantidade de espécimes por idade		Total de espécimes
	7 dias	28 dias	
FC	3	3	36
FC2	3	3	
FC3	3	3	
FC4	3	3	
FC5	3	3	
FC6	3	3	

FONTE: AUTORES (2024)

QUADRO 3
PROGRAMA FATORIAL PARA O ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Tipos de concreto	Quantidade de espécimes por idade	Total de espécimes
	28 dias	
FC	3	18
FC2	3	
FC3	3	
FC4	3	
FC5	3	
FC6	3	

FONTE: AUTORES (2024)

1910 kg/m³, absorção de água de 12,50%, teor de material pulverulento de 4,25% e composição por análise visual sendo: G1 (materiais cimentícios) com 42,34%, G2 (fragmentos de rochas naturais) com 10,34%, G3 (materiais cerâmicos) com 44,83% e G4 (contaminantes e impurezas) com 2,59%.

Como adição mineral, para contribuir para a resistência mecânica das misturas, foi utilizado um metacaulim com massa específica de 2560 kg/m³.

Foi utilizado também aditivo superplastificante, com massa específica de 1100 kg/m³ e teor de sólidos de 45%, com justificativa para garantia de trabalhabilidade.

2.3 Produção dos concretos

O método de dosagem escolhido no estudo foi o da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), especificando uma resistência característica à compressão (fck) de 40 MPa. O traço encontrado foi 1:1,33:2,37:0,45 (cimento:areia:brita:água). As composições das misturas estão detalhadas no Tabela 1.

Em todas as misturas foi incluído um aditivo superplastificante, em um teor de 0,4% da massa de cimento, sendo este percentual adotado em relação ao teor de sólidos. Para minimizar o efeito

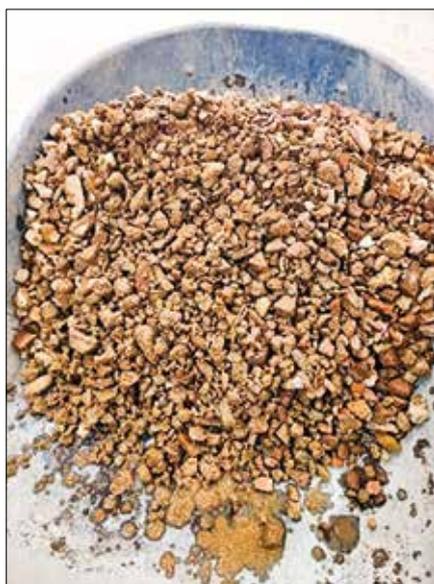


FIGURA 1
ARM_g APÓS A PRÉ-MOLHAGEM
FONTE: AUTORES (2024)



FIGURA 2
ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO
FONTE: AUTORES (2024)



FIGURA 3
ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE
FONTE: AUTORES (2024)

TABELA 1
CONSUMOS DOS MATERIAIS POR M³ DE CONCRETO

Legenda	Cimento (kg)	AN _m (kg)	AN _g (kg)	ARM _g (kg)	Metacaulim (kg)	Água total (kg)
FC	455,56	603,87	1078,80	—	—	205,00
FC2	364,45	603,87	1078,80	—	91,11	205,00
FC3	455,56	603,87	863,04	215,76	—	205,00
FC4	364,45	603,87	863,04	215,76	91,11	205,00
FC5	455,56	603,87	539,40	539,40	—	205,00
FC6	364,45	603,87	539,40	539,40	91,11	205,00

FONTE: AUTORES (2024)

da absorção de água do ARM_g, foi calculada a água de absorção e efetuado o processo de pré-molhagem, imergindo os agregados reciclados em água por 15 minutos conforme demonstrado na Figura 1. Foi utilizada 80% da água de absorção dos ARM durante este processo, em detrimento de seu melhor desempenho frente aos resultados mecânicos do concreto (6).

Os procedimentos de moldagem e adensamento foram executados de acordo com as orientações previstas na NBR 5738 (7). A avaliação da resistência à compressão (Figura 2), das amostras de concreto foi realizada de acordo com a norma brasileira NBR 5739 (8). A avaliação da ab-

sorção por capilaridade das amostras de concreto (Figura 3), foi realizada de acordo com a norma brasileira NBR 9779 (9).

3. RESULTADOS

3.1 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade foi avaliada aos 28 dias de cura nos tempos de 3 h, 6 h e 24 h de absorção. Os resultados médios são mostrados na Figura 4.

Observa-se que a incorporação de metacaulim (MK) reduziu a absorção de água, o que contribui para a durabilidade do concreto. Após 24 horas de imersão, as misturas modificadas com MK

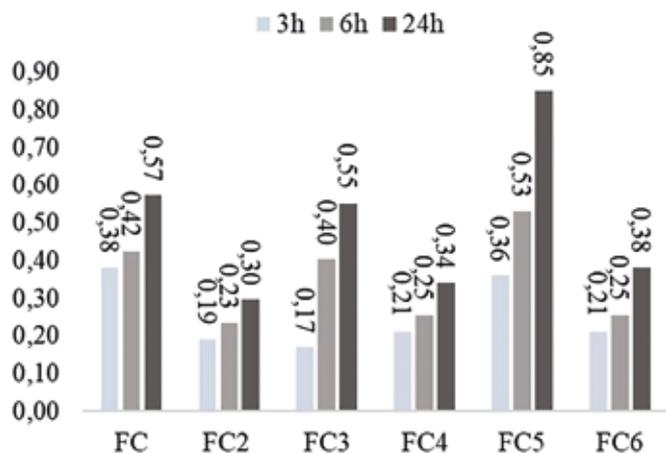


FIGURA 4

VALORES MÉDIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE (g/cm²)

FONTE: AUTORES (2024)

(FC2, FC4, FC6) apresentaram menores taxas de absorção (0,30 a 0,38 g/cm²) em comparação às misturas sem MK com agregados reciclados mistos (ARM) (FC3, FC5), que apresentaram o maior valor de absorção (0,85 g/cm²). A maior absorção nas misturas sem MK se deve às propriedades

inerentes do ARM, como alta porosidade, textura rugosa e formato angular, que promovem a penetração de água. Essa tendência foi consistente nos momentos anteriores (3h e 6h), enfatizando o efeito prejudicial da heterogeneidade do ARM na

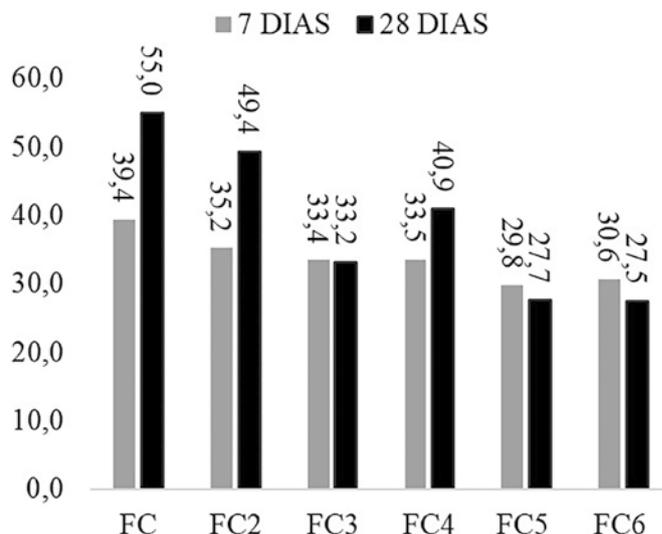


FIGURA 5

RESULTADOS MÉDIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM MPA

FONTE: AUTORES (2024)

absorção de água e a compensação promovida pelo metacaulim.

3.2 Resistência à compressão

Os resultados médios da resistência à compressão axial em intervalos de 7 e 28 dias são mostrados graficamente na Figura 5.

A princípio, foi executado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk em todas as composições (FC a FC6), com um nível de significância de 5% (Valor p de 0,05). A partir dessa análise, foi constatado que apenas FC2 aos 28 dias possuía dados não normais, como mostrado na Tabela 2.

O próximo passo foi a realização do teste de homocedasticidade de Bartlett para os dados normais e Levene para não

TABELA 2

TESTE DE NORMALIDADE DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Misturas	Resistência à compressão (MPa)			
	Dados			
	7 dias		28 dias	
	Estatística: Shapiro-Wilk	Valor p	Estatística: Shapiro-Wilk	Valor p
FC	0,9990	0,9388	0,9592	0,6116
FC2	0,9740	0,6907	0,7653	0,0341
FC3	0,9980	0,9152	0,9231	0,4633
FC4	0,8322	0,1939	0,9643	0,6369
FC5	0,8263	0,1790	0,9838	0,7563
FC6	0,8622	0,2738	0,8403	0,2148

FONTE: AUTORES (2024)

TABELA 3

RESULTADOS DA ANOVA (7 DIAS)

Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	Valor p
Fator	5	178,6250	35,7250	4,1205	0,0207
Resíduos	12	104,0400	8,6700	—	—

FONTE: AUTORES (2024)

TABELA 4

RESULTADOS DO TESTE DE TUKEY (7 DIAS)

Níveis	Valor p
FC2-FC	0,5296
FC3-FC	0,1998
FC4-FC	0,2082
FC5-FC	0,0168
FC6-FC	0,0315

FONTE: AUTORES (2024)

TABELA 5

RESULTADOS DO TESTE NÃO PARAMÉTRICO (28 DIAS)

Informação	Valor
Kruskal-Wallis qui-quadrado	15,8304
Graus de Liberdade	5
Valor p	0,0073

FONTE: AUTORES (2024)

normais, obtendo resultados de valor p de 0,4217 (7 dias) e 0,8290 (28 dias), respectivamente. Conforme esses resultados, foi utilizado a ANOVA (Tabela 3) através do teste paramétrico de Tukey (Tabela 4) para os dados de 7 dias e foi utilizado o teste não paramétrico Kruskal-Wallis para os dados de 28 dias (Tabela 5), junto das comparações múltiplas do teste (Tabela 6).

Quanto à análise das médias separadamente, com um nível de confiança de 95%, os grupos FC a FC4 possuem equivalência estatística entre si, respectivamente, conforme elucidado na Tabela 4. Esses resultados demonstram que a substituição de 20% de cimento por MK no concreto convencional (FC2) e no concreto com 20% de ARM_g (FC4), além de sua versão desprovida de MK (FC3), não produziram alterações nos valores médios equivalentes da resistência à compressão aos 7 dias em comparação ao seu não uso (FC), enquanto nos concretos com 50% de ARM_g com (FC5) e sem MK (FC6) houve redução nos valores médios frente à mesma comparação.

Quanto à análise das medianas separadamente, com um nível de confiança de 95%, os grupos FC a FC4, são considerados equivalentes entre si, como visto na Tabela 6. Esses resultados demonstram que a

TABELA 6

COMPARAÇÕES MÚLTIPLAS ENTRE OS GRUPOS (28 DIAS)

Fatores comparados	Diferença observada	Diferença crítica	Diferença
FC - FC2	3,0000	12,7942	Não
FC - FC3	9,3333	12,7942	Não
FC - FC4	6,0000	12,7942	Não
FC - FC5	13,0000	12,7942	Sim
FC - FC6	13,6667	12,7942	Sim

FONTE: AUTORES (2024)

substituição de 20% de cimento por MK no concreto convencional (FC2) e no concreto com 20% de ARM_g (FC4), além do uso isolado de 20% de ARM_g (FC3) não alteraram a mediana dos resultados de resistência à compressão aos 28 dias, enquanto nos concretos com 50% de ARM_g com (FC5) e sem MK (FC6) houve redução nas medianas frente ao concreto convencional sem MK (FC). Isso confirma o resultado anterior.

4. CONCLUSÕES

Em termos de absorção capilar de água, pode-se verificar a influência do metacaulim (MK) para melhoria da durabilidade, uma vez que as misturas de MK (FC2, FC4 e FC6) apresentaram as menores taxas, de 0,30 a 0,38 g/cm², após 24 horas. Em contraste, as misturas com ARM_g sem MK (FC3 e FC5) apresentaram a maior taxa, de 0,85 g/cm². Esse aumento na absorção é atribuído à alta porosidade e angularidade do ARM_g, que promovem a entrada de água, um padrão consistente nos tempos iniciais (3 h e 6 h). A presença do metacaulim contribuiu para a redução da absorção, evidenciando sua eficácia em melhorar a compactação da matriz e a interface pasta-agregado, que são fatores importantes

para o desempenho do concreto.

Em se tratando da resistência à compressão, nenhuma das misturas com ARM_g atingiu a meta de dosagem (f_{ci}) de 46,6 MPa (equivalente a f_{ck} de 40 MPa), sendo esse desempenho alcançado apenas pelos concretos convencionais (FC e FC2). No entanto, a mistura produzida com 20% de ARM_g e 20% de MK (FC4) apresentou o valor mais próximo da meta, evidenciando o efeito positivo do metacaulim no ganho de resistência.

Todas as formulações superaram 26,6 MPa aos 28 dias, valor mínimo exigido para uso estrutural conforme as normas brasileiras. A análise estatística aos 7 dias mostrou que as misturas com 20%, ARM_g com ou sem MK, não apresentaram diferenças significativas em relação ao concreto de referência, resultado esse repetido aos 28 dias. As misturas com 50% de ARM_g exibiram resistências inferiores, mesmo com a adição de MK (FC5 e FC6), confirmando que maiores teores de ARM_g tendem a comprometer a resistência mecânica, mas, de modo geral, o metacaulim mostrou-se eficaz em mitigar parte das perdas de resistência associadas ao uso de ARM_g. 

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SALLES, P. V.; GOMES, C. L.; POGGIALI, F. S. J.; RODRIGUES, C. S. A importância da segregação do agregado reciclado na resistência e na durabilidade do concreto estrutural. *Ambiente Construído*, v. 21, n. 3, p. 177-196, jul./set. 2021.
- [2] VINTIMILLA, Carla; ETXEBERRIA, Miren. Limiting the maximum fine and coarse recycled aggregates - Type B used in structural concrete. *Construction and Building Materials*, v. 459, n. 139791, p. 1-18, jan./2025.
- [3] GONZÁLEZ, M. D.; CABALLERO, P. P.; FERNANDEZ, D. B.; VIDAL, M. M. J.; DEL BOSQUE, I. F. S.; MARTINEZ, C. M. The Design and Development of Recycled Concretes in a Circular Economy Using Mixed Construction and Demolition Waste. *Materials (Basel, Switzerland)*, v. 14, n. 16, p. 1-22, ago./2021.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15116: Agregados reciclados para uso em argamassa e concretos de cimento Portland – Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2021.
- [5] MONTGOMERY, Douglas C. *Design and Analysis of Experiments*. Nova Jersey: Wiley, 2020.
- [6] LIMA, N. K. S. Análise da viabilidade do uso de agregado reciclado graúdo misto em concretos estruturais. 2024. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2024.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.
- [8] _____. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018a.
- [9] _____. NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2013.

Otimização topológica em estruturas de concreto: avanços tecnológicos e benefícios ambientais

MATHEUS BARBOSA MOREIRA CEDRIM - DR. PROF. - <https://orcid.org/0000-0002-4731-1549> (matheuscedrim@hotmail.com) – CESMAC

EDUARDO NOBRE LAGES - DR. PROF. - <https://orcid.org/0000-0001-6704-4057> – UFAL

ALINE DA SILVA RAMOS BARBOZA - DR^a. PROF^a. - <https://orcid.org/0000-0001-6296-927X> – UFAL

RESUMO

A OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA (OT) É UMA TÉCNICA NUMÉRICA QUE BUSCA DISTRIBUIR MATERIAL DE MANEIRA EFICIENTE PARA MAXIMIZAR O DESEMPENHO ESTRUTURAL. ESTE ESTUDO EXPLORA OS BENEFÍCIOS DA OT EM ELEMENTOS DE CONCRETO, CONSIDERANDO QUE O MATERIAL CONTRIBUI COM CERCA DE 8% DAS EMISSÕES GLOBAIS DE CO₂. UTILIZANDO O MÉTODO SIMP (*SOLID ISOTROPIC MATERIAL WITH PENALIZATION*), SÃO AVALIADAS NUMERICAMENTE VIGAS DE CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO. OS RESULTADOS APONTAM ATÉ 50% DE ECONOMIA NO VOLUME DE CONCRETO E GANHOS DE DESEMPENHO MECÂNICO E DUCTILIDADE DEVIDO ÀS FIBRAS, RESULTANDO EM MAIOR SUSTENTABILIDADE PELA REDUÇÃO DE CERCA DE 300 KG DE EMISSÕES INDIRETAS DE CARBONO POR METRO CÚBICO DE CONCRETO. DESTACA-SE O POTENCIAL DA INTEGRAÇÃO ENTRE OT E TECNOLOGIAS DIGITAIS, COMO IMPRESSÃO 3D E BIM, PARA VIABILIZAR O MATERIAL ESTUDADO EM GEOMETRIAS COMPLEXAS E INOVAÇÕES CONSTRUTIVAS. CONTUDO, RESSALTA-SE A NECESSIDADE DE NORMATIVAS ESPECÍFICAS E PROTOCOLOS DE VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL. CONCLUI-SE QUE A OT É UMA ABORDAGEM VIÁVEL PARA PROMOVER SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL.

PALAVRAS-CHAVE:

CONCRETO COM FIBRAS DE AÇO, SIMP, ECONOMIA CIRCULAR.

1. INTRODUÇÃO

O setor da construção civil é responsável por

aproximadamente 40% do consumo global de recursos naturais e por cerca de 30% das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂) [1]. Dentro desse contexto, o concreto, principal insumo utilizado na construção, representa cerca de 8% dessas emissões [2], sendo a etapa de produção do cimento Portland, principal componente para a produção de concreto, o maior fator contribuinte devido à intensa liberação de carbono inerente ao processo de calcinação do clínquer. Diante desse cenário, a busca por estratégias sustentáveis tornou-se urgente, especialmente aquelas que combinem eficiência estrutural e redução de impactos ambientais.

A otimização topológica (OT) é uma poderosa ferramenta computacional que auxilia os projetistas na determinação de configurações estruturais eficientes. Na engenharia civil, a maioria das aplicações da técnica ainda está limitada no campo da análise teórica/computacional e, geralmente, considera o comportamento elástico linear dos materiais. Esta limitação restringe o escopo e a aplicação dos conceitos de

otimização topológica para problemas práticos.

Apesar de o potencial da OT, sua aplicação em estruturas de concreto ainda enfrenta desafios, como a resistência cultural a geometrias não convencionais e à escassez de estudos que quantifiquem seus benefícios ambientais de forma sistêmica [3]. Grande parte das pesquisas existentes foca em desempenho mecânico [4, 5], deixando lacunas sobre como a técnica pode contribuir para metas de descarbonização e economia circular na construção, especialmente em países em desenvolvimento, onde o custo do concreto é baixo, mas seu impacto socioambiental é alto.

Nos últimos anos, houve um aumento no uso de materiais heterogêneos de alta performance, tais como: compósitos reforçados por fibras, materiais cimentícios e materiais com fabricação auxiliada pela impressão 3D (Figura 1) [6, 7]. As características físicas e mecânicas de materiais heterogêneos complexos podem ser determinadas pela composição dos seus constituintes;

entretanto, pode haver uma drástica mudança nas propriedades do compósito devido à fração volumétrica das inclusões, à sua forma geométrica e à presença de interfaces.

Com o objetivo de implementar



FIGURA 1

LONGARINA DE CONCRETO PRODUZIDA COM AUXÍLIO DA IMPRESSÃO 3D

FONTE: VANTYGHM *et al.* (2020)

estratégias mais eficientes, os avanços na tecnologia dos materiais e os processos de manufatura são alternativas para a sustentabilidade. Existem diversas estratégias para reduzir o uso de cimento em estruturas de concreto enquanto o desempenho mecânico é preservado [5]. Por exemplo, a otimização estrutural enquanto ferramenta matemática pode proporcionar projetos de estruturas mais leves e de elevada resistência.

Da literatura, observa-se que há uma extensa área de pesquisa que enfatiza a OT com material isotrópico e de comportamento elástico linear [4]. Entretanto, há poucos estudos que detalhem as comparações entre o comportamento linear e não linear do material, o que se torna uma lacuna para a análise de resultados e para o campo de aplicação em estruturas.

Nesse contexto, o presente trabalho explora os benefícios da OT, alinhados aos processos de manufatura e à descarbonização da indústria do cimento Portland, em análises numéricas para projetos de vigas de concreto reforçado com fibras de aço, por ser este elemento estrutural representativo para o estudo da flexão, ou seja, comportamento sob tensões normais de tração e compressão.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A OT representa uma mudança de paradigma no projeto de estruturas de concreto. Ao invés de partir de formas geométricas convencionais, utilizam-se algoritmos matemáticos para distribuir material apenas onde um comportamento estrutural é necessário. Essa abordagem, inspirada em processos naturais como o crescimento ósseo, permite economias de material que variam entre 25% e 50% [8]. O impacto ambiental dessas reduções é significativo, considerando que cada metro cúbico de concreto poupado representa cerca de 300 kg de CO₂ não emitidos na produção do cimento [9]. Adicionalmente, estruturas otimizadas exigem fundações com menores dimensões, cortando emissões indiretas de carbono.

Os avanços computacionais dos últimos anos foram cruciais para viabilizar a OT na prática. Algo-

ritmos como o SIMP (*Solid Isotropic Material with Penalization*) e o BESO (*Bidirectional Evolutionary Structural Optimization*) tornaram-se ferramentas poderosas para engenheiros estruturais [10]. Essa eficiência na distribuição de material tem implicações diretas na sustentabilidade, diminuindo não apenas o consumo de concreto, mas também a demanda por transporte e potência em equipamentos de construção.

Com o avanço das técnicas de impressão 3D e dos processos de manufatura aditiva, tornou-se possível fabricar diretamente materiais projetados a partir de um arquivo numérico, possibilitando a abertura de rotinas para novos projetos [6]. Não é exagero ressaltar que a manufatura aditiva e a otimização topológica são uma ótima combinação. No campo das pesquisas, ainda é necessário um estudo sistemático e compreensivo do projeto de estruturas com auxílio da otimização topológica para as aplicações de engenharia.

Além disso, a otimização está alinhada com os princípios do uso eficiente e responsável dos recursos, buscando minimizar o desperdício ao longo de todo o ciclo de vida das estruturas [5]. Estudos teóricos indicam que as técnicas de otimização podem contribuir significativamente para reduzir impactos desde a extração de matérias-primas até as etapas de operação e manutenção [11]. Isso demonstra que a OT não é apenas uma solução de engenharia, mas também uma estratégia de sustentabilidade aplicada à construção civil.

A aplicação da OT com materiais sustentáveis abre novas fronteiras para a construção ecológica [12]. Pesquisas recentes sugerem que

concretos com substituição parcial de cimento por pozolanas ou com agregados reciclados podem ser um bom caminho para associar modelos construtivos baseados no reaproveitamento de materiais e na redução de resíduos [13, 14].

A integração de tecnologias digitais, como o BIM, amplia o potencial sustentável do concreto ao permitir projetos com menor consumo de materiais e geometrias eficientes [15]. Quando combinadas a práticas de economia circular, essas abordagens podem transformar o concreto em um material alinhado aos princípios de neutralidade carbônica, conforme defendido por iniciativas como o *Roadmap Net Zero* da indústria do cimento [1, 2].

Nesse contexto de busca por soluções mais sustentáveis e eficientes para a construção civil, o concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) tem ganhado destaque por sua maior resistência à fissuração, tenacidade e ductilidade em comparação ao concreto convencional. As fibras atuam como armadura descontínua, distribuindo tensões e reduzindo a propagação de fissuras, o que é especialmente vantajoso em elementos estruturais sujeitos a cargas dinâmicas, como pisos industriais e túneis [16].

A combinação do CRFA com OT permite criar estruturas com geometrias leves e eficientes, onde as fibras



FIGURA 2

ENSAIO DE FLEXÃO PARA VIGA OTIMIZADA

FONTE: JAISHANKAR *et al.* (2021)

compensam a redução de massa sem perder resistência. Já a impressão 3D de concreto com fibras (3DCP) abre possibilidades para formas livres e personalizadas, eliminando a necessidade de fôrmas e reduzindo desperdícios. Com um maior controle de qualidade do compósito, um volume de 5% de fibras de aço lisas e retas dispostas na direção da solicitação de tração pode incrementar em até 130% a resistência, enquanto o mesmo volume na direção aleatória apresenta um ganho de 60% [17].

Em uma aplicação da otimização topológica para o projeto de uma viga “cabeça de martelo” (Figura 2) [18], concluiu-se que para o concreto com fibras, o teor de fibras influenciou consideravelmente o aumento da capacidade resistente à flexão. Este fenômeno é atribuído ao efeito de transferência de tensões proporcionado pelo reforço com as fibras, que também confere maior ductilidade. Para a fabricação dos elementos, com o pós-processamento verificado no processo de otimização, os autores consideraram a confecção das vigas por meio de duas etapas, considerando-se inicialmente a mistura de fibras e agregados graúdos, e, posteriormente, a adição de pasta com agregados miúdos.

O conceito do projeto auxiliado por otimização (PAO) é definido pelo projeto e dimensionamento de estruturas e elementos estruturais por meio de métodos de otimização [19]. Por exemplo, para o concreto armado, este conceito abrange a descoberta da melhor forma, a identificação da disposição das armaduras e o uso de seções transversais adequadas (Figura 3). Esta linha de pesquisa propõe uma metodologia de caráter geral, aplicável a distintas áreas de aplicação. Pode-se utilizar este recurso para qualquer tipo de concreto (de resistência normal a ultra alta resistência), além de tipos arbitrários de reforço (aço, carbono e fibras), bem como se pode estender para inúmeros campos da engenharia estrutural, como estruturas de aço, madeira e fundações.

O PAO utiliza o conceito da otimização matemática. Com isto, geralmente, o objetivo é minimizar a função objetivo

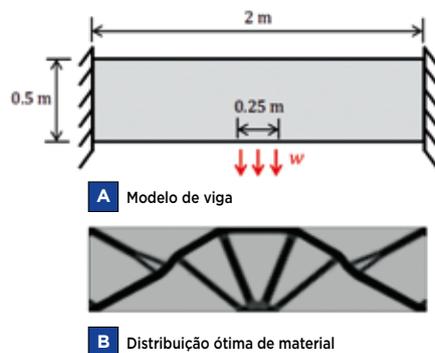


FIGURA 3

EXEMPLO DE OTIMIZAÇÃO DE UMA VIGA

FONTE: AUTORES (2025)

formulada. Esta pode ser relacionada ao peso da estrutura, à quantidade de reforço ou até mesmo à combinação de diversas funções [19]. Conceitualmente, tem-se a seguinte abordagem: buscar soluções de projeto em que se garante a utilização das tensões de forma eficiente e acumular material apenas onde ele é mais efetivo como mecanismo de transferência de carregamento.

A maioria das técnicas de otimização topológica baseia-se na hipótese do modelo constitutivo de material elástico linear. Entretanto, por exemplo, para as estruturas de concreto, identifica-se, em geral, um comportamento profundamente não linear, incluindo efeitos como fissuração, fluência e retração. Com isto, torna-se um desafio otimizar realisticamente este tipo de material [4].

Apesar de os avanços na OT e sua integração com materiais compósitos e técnicas de fabricação digital, ainda persistem lacunas significativas na literatura, sobretudo no que se refere a modelos não lineares e à validação experimental de geometrias otimizadas em escala real. Ademais, observa-se uma carência de estudos sistemáticos que quantifiquem os ganhos ambientais dessa abordagem ao longo de todo o ciclo de vida.

3. METODOLOGIA

O método numérico de otimização topológica baseado em elementos finitos mais conhecido é o método SIMP, que foi desenvolvido na década de 80 [20, 21].

O termo SIMP significa *Solid Isotropic Material with Penalization*. Algumas vezes, o método também é chamado de interpolação material, material artificial, lei de potência ou método da densidade, mas SIMP é a nomenclatura mais utilizada mundialmente. O software ABAQUS® 2019 foi utilizado neste trabalho por permitir uma análise integrada em elementos finitos e realização dos processos de otimização.

Na formulação discreta do problema, minimizando a energia de deformação, tem-se a equação 1:

$$\begin{aligned}
 \text{[1]} \quad & \min c(\mathbf{x}) = \mathbf{U}^T \mathbf{K} \mathbf{U} = \sum_{e=1}^N (x_e)^p \mathbf{u}_e^T \mathbf{k}_e \mathbf{u}_e \\
 & \text{s. t. } V(\mathbf{x}) = f V_0 \\
 & 0 < x_{\min} \leq x_e \leq 1
 \end{aligned}$$

Em que:

U e **F** são os vetores de deslocamento e força globais, respectivamente;

K é a matriz de rigidez global;

\mathbf{u}_e e \mathbf{k}_e são o vetor de deslocamento do elemento e a matriz de rigidez do elemento, respectivamente;

x é o vetor das variáveis de projeto;

x_{\min} é a mínima densidade relativa (diferente de zero para evitar singularidade);

N é o número de elementos utilizados para discretizar o domínio;

p é o fator de penalidade;

V(x) e **V₀** são o volume de material e o volume do domínio de projeto, respectivamente, e;

f é a fração volumétrica prescrita.

Com a formulação do método, as variáveis de projeto definidas no problema são as densidades relativas

TABELA 1

PARÂMETROS DA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

Parâmetros do método SIMP	Valor
Densidade mínima (ρ_{\min})	0,001
Densidade máxima (ρ_{\max})	1
Mudança máxima da densidade por ciclo de projeto	0,25
Fator de penalidade (p)	3
Tolerância máxima para a função objetivo	0,001
Tolerância máxima para a densidade do elemento	0,005

FONTE: AUTORES (2025)

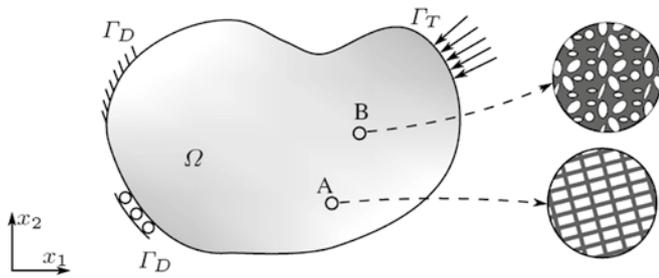


FIGURA 4
REPRESENTAÇÃO DE UMA ESTRUTURA MULTIESCALA
FONTE: WU, SIGMUND E GROEN (2021)

relacionadas com os elementos finitos ou nós da malha. O objetivo do problema de minimização da flexibilidade ou maximização da rigidez pode ser entendido, então, como um processo iterativo que busca uma melhor distribuição das variáveis de projeto pela malha definida.

Para o processo de otimização no ABAQUS®, a região de aplicação da carga não é considerada. A estratégia de atualização de densidade é do tipo normal. O algoritmo de solução é geral, o filtro de sensibilidade é definido automaticamente de acordo com a dimensão característica da malha, e a técnica de interpolação de material utilizada é o SIMP. Os demais detalhes estão listados na Tabela 1.

O fator de penalidade (p) é um parâmetro importante para evitar instabilidades numéricas. O valor de p pode ser aumentado gradualmente de 1 até 4, o que auxilia na convergência [21]. No entanto, nesse estudo, esta variável é considerada constante durante todo o procedimento de otimização.

O método SIMP, apesar de considerar em sua formulação um material homogêneo e isotrópico, pode ser interpretado como uma aproximação

multiescala [22]. Baseado nisto, uma distribuição de material heterogêneo dentro do domínio do elemento pode ser encontrada para densidades intermediárias.

Com um parâmetro do fator de penalidade (p) maior que 3, pode-se convergir

para soluções do tipo 0-1, que representam as estruturas monoescala. Todavia, em um número de abordagem multiescala, quanto menor o p , maior será a quantidade de soluções contendo uma porção de densidades intermediárias, o que propicia uma base para as microestruturas porosas (Figura 4).

Diversos estudos foram desenvolvidos para a elaboração de códigos educacionais para resolver problemas específicos de projeto, tais como: a consideração de múltiplas escalas, problemas multifísicos, abordagem com múltiplos materiais, análise de confiabilidade, critérios de flambagem, restrição em tensões (ou definição como função objetivo), não linearidades físicas e/ou geométricas, controle geométrico local e análise dinâmica [10].

Destaca-se que há um esforço recente para a pesquisa e desenvolvimento de aplicações da otimização topológica para multimateriais (mais de um material considerado no domínio, podendo ter comportamentos mecânicos distintos), o que torna um caminho aberto para projetos aplicáveis para problemas práticos de engenharia [10].

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em um estudo numérico com o modelo de Drucker-Prager, que considera o comportamento elastoplástico do material para diferentes teores de fibra (v_f), a otimização topológica foi aplicada a vigas biengastadas de concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) utilizando o método SIMP, com restrição de 50% da fração volumétrica, com o objetivo de avaliar seu comportamento estrutural após o processo de otimização [23]. As vigas possuem comprimento de 5,0 m e seção transversal com largura de 20 cm e altura de 50 cm. O carregamento aplicado é de 60 kN/m uniformemente distribuído no topo. Propriedades como a resistência média à compressão (f_{cm}), o módulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson (ν), coesão (c), ângulo de atrito (ϕ) e as relações entre as resistências para aplicações estruturais [24] são apresentadas na Tabela 2.

A dimensão característica da malha de elementos em estado plano de tensão é de 60 mm. Com as superfícies extraídas na etapa de pós-processamento, considerando valores de densidade acima de e utilizando uma técnica de filtragem moderada, procede-se à análise do comportamento estrutural das topologias ótimas.

As etapas dos ciclos de otimização são observadas na Figura 5. Com o

TABELA 2
PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CRFA

Características do CRFA							
f_{cm} (MPa)	v_f	E (MPa)	ν	c (MPa)	ϕ (°)	f_{r1k}/f_{1k} (MPa)	f_{r3k}/f_{r1k} (MPa)
30	0,5%	30832,63	0,2	5,18	56,15	0,82	1,70
50	1,5%	39300,04	0,2	8,54	59,22	1,50	1,41

FONTE: AUTORES (2025)

TABELA 3
PARÂMETROS QUANTITATIVOS POR CICLO DE OTIMIZAÇÃO

Etapa	Volume da viga (m³)	Redução na emissão de CO ₂ (kg)
Ciclo de otimização 0	0,500	-
Ciclo de otimização 5	0,431	20,78
Ciclo de otimização 10	0,413	26,20
Ciclo de otimização 15	0,365	40,44
Ciclo de otimização 20	0,322	47,67
Ciclo de otimização 25	0,322	53,54
Ciclo de otimização 30	0,320	54,00

FONTE: AUTORES (2025)

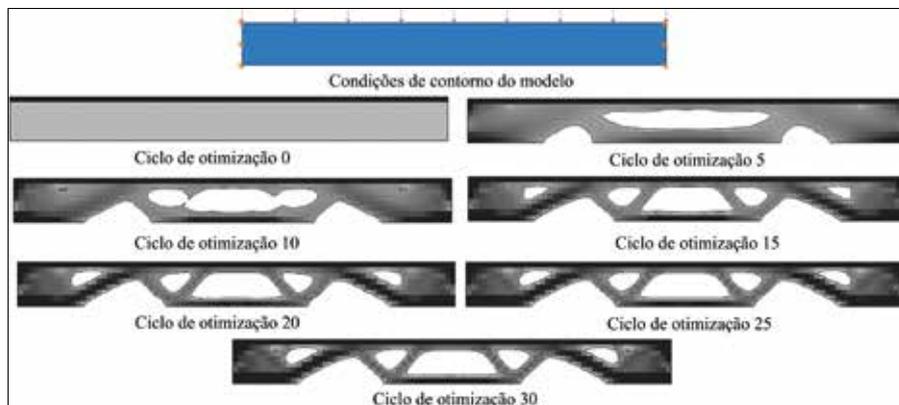


FIGURA 5

RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

Fonte: Autores (2025)

modelo original, antes do procedimento de otimização, a viga possuía um volume de $0,5 \text{ m}^3$. A Tabela 3 sintetiza a redução das emissões de dióxido de carbono, em kg, para cada ciclo de otimização. Os volumes foram calculados, por etapa, em relação à distribuição de material ($\rho > 0,25$) nos centroides dos elementos da malha. A diminuição dos volumes observada é um resultado direto da economia de concreto, demonstrando um impacto positivo direto e mensurável na pegada de carbono do projeto.

Após a extração das superfícies, encontram-se os novos volumes em

função da resistência do CRFA, que variam de 70% a 75% do volume de referência, em função dos valores de densidade e filtragem adotados [23]. As simulações computacionais permitiram uma análise das deformações plásticas e dos deslocamentos verticais, com o intuito de validar as hipóteses numéricas para as referências de projeto.

O panorama das deformações plásticas pode ser descrito por meio da Figura 6, em que as regiões em azul indicam deformação nula, e, em progressão para o vermelho, identificam-se as maiores deformações. Para concretos de menor

resistência (b) $f_{cm} = 50 \text{ MPa}$ e $v_f = 1,5\%$, as deformações máximas deslocaram-se para as proximidades dos apoios. Em todos os casos, garante-se que as deformações máximas são menores que a deformação última do CRFA de 10%.

Os dados obtidos para os deslocamentos verticais ($f_{cm} = 30 \text{ MPa}$ e $v_f = 0,5\%$) fornecem subsídios relevantes para a compreensão dos efeitos da redistribuição de material em elementos de CRFA, além de servir como indicador de potenciais melhorias no desempenho estrutural e na eficiência do uso de materiais (Figura 7). Na escala de cores, verifica-se o maior deslocamento na região em azul.

As respostas numéricas encontradas por meio da abordagem apresentada podem auxiliar os projetistas no processo de decisão para soluções otimizadas, visto que a distribuição de material é encontrada por um critério matemático rigoroso, possibilitando uma redução de tempo em relação a testes físicos [23]. Na análise específica para o CRFA, as propostas de superfícies otimizadas podem servir como um indicativo de regiões preferenciais de distribuição das fibras.

Apesar de a otimização topológica ser uma ferramenta de apoio ao processo de decisão em projetos de concreto reforçado com fibras de aço, é recomendado que as verificações normativas sejam efetuadas, pois o modelo numérico deve refletir a realidade. Como se constata, apesar de garantir a ductilidade, faz-se necessária a validação do projeto.

De acordo com as diretrizes técnicas para projeto de CRFA [24], deve-se

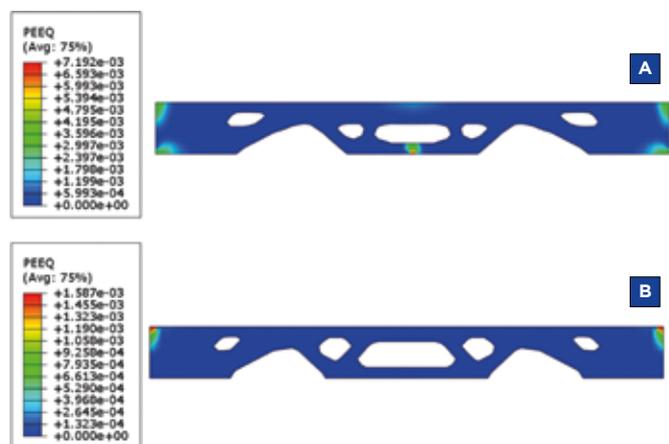


FIGURA 6

DEFORMAÇÕES PLÁSTICAS EM VIGAS OTIMIZADAS DE CRFA (A) $f_{cm} = 30 \text{ MPa}$ E $v_f = 0,5\%$; (B) $f_{cm} = 50 \text{ MPa}$ E $v_f = 1,5\%$

Fonte: CEDRIM (2024)



FIGURA 7

DESLOCAMENTOS EM VIGAS OTIMIZADAS DE CRFA

Fonte: CEDRIM (2024)

definir os parâmetros de caracterização mecânica, que são utilizados para a classificação do material e o comportamento constitutivo adotado para representar o estágio pós-fissuração.

Uma vez que a relação tensão-deformação é definida, o projeto deve satisfazer simultaneamente as condições de Estado Limite Último (ELU) e Estado Limite de Serviço (ELS), observando-se, necessariamente, os critérios de segurança baseados na abordagem semiprobabilística, para o atendimento dos requisitos de flexão e cisalhamento no ELU e os limites máximos para o estado de fissuração e deslocamentos no ELS [24].

4.1 Benefícios ambientais

A solução obtida por meio de técnicas de otimização permite que a eficiência do dimensionamento independa do processo convencional de tentativa e erro [25]. O presente trabalho priorizou a utilização de um concreto de resistência superior à convencional, incorporando fibras para conferir maior ductilidade ao material. Essa opção demandou, como requisito para a otimização estrutural, a avaliação dos efeitos decorrentes do comportamento não linear do CRFA. Observou-se, contudo, que os princípios fundamentais da OT foram mantidos, particularmente no que tange aos aspectos ambientais citados na literatura [26], os quais consideraram a redução do volume de material associada à métrica de $\text{kg de CO}_2/\text{m}^3$.

Para além do objetivo de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, a estratégia de otimização topológica promove um alívio direto na pressão por recursos naturais não renováveis. A minimização do volume de concreto implica uma diminuição proporcional na extração de areia e brita, bem como na produção do cimento. Essas atividades estão associadas a intensos processos de mineração, com significativos passivos ambientais, como erosão, assoreamento de corpos hídricos e perda de biodiversidade.

Adicionalmente, a geração de resíduos de construção e demolição pode

ser reduzida drasticamente. Dessa forma, a otimização não apenas mitiga impactos relacionados à emissão de dióxido de carbono, como também atua de modo preventivo em toda a cadeia produtiva, conservando recursos naturais e minimizando a degradação ambiental inerente à sua exploração, alinhando-se, portanto, aos princípios de economia circular.

A adoção em larga escala de estratégias de otimização topológica configura-se como uma contribuição ainda pouco explorada para a meta de descarbonização do setor da construção, um dos principais emissores globais de CO_2 [25]. Pesquisas futuras poderiam integrar bancos de dados ambientais mais abrangentes e parâmetros de durabilidade associados aos algoritmos de otimização, permitindo uma tomada de decisão multicritério que equilibre o desempenho mecânico e a mitigação de impactos ambientais.

5. CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho demonstram que a otimização topológica (OT) aplicada a vigas de concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) permite alcançar configurações estruturais mais eficientes, com reduções significativas no volume de material, sem comprometer a capacidade resistente. A análise numérica baseada no método SIMP mostrou que é possível redistribuir o material de forma a concentrar resistência nas regiões críticas, como zonas de elevadas tensões de flexão e cisalhamento. Essa configuração pode levar a uma economia de até 50% no uso de concreto, o que, considerando as emissões associadas à produção de cimento, representa uma redução direta na pegada de carbono das estruturas.

Com uma diminuição de 25% no volume unitário de concreto de uma viga, por meio do processo de otimização, pode-se reduzir cerca de 75 kg de emissão de CO_2 por elemento estrutural. Isto enfatiza que há uma conseqüente atenuação dos impactos ambientais. Além disso, a introdução de fibras de aço contribui para melhorar a ductilidade e a resistência à fissuração, ampliando

a vida útil das estruturas e reduzindo a necessidade de reparos. Com estruturas mais duráveis e com menos manutenções para garantir o desempenho requerido, reduz-se o consumo de recursos naturais e há redução na geração de resíduos associados a processos de construção.

A aplicação apresentada levou em consideração o comportamento elasto-plástico do material, de modo a representar os efeitos da interação das fibras com a matriz cimentícia. Os resultados indicaram que as vigas otimizadas mantêm deformações plásticas dentro dos limites seguros (inferiores a 10‰), validando a eficácia do método SIMP mesmo em cenários complexos. Observou-se ainda que a distribuição de deformações varia conforme a resistência do concreto e o teor de fibras, com concentrações distintas próximas aos apoios ou no vão central, dependendo da configuração.

A combinação entre OT e CRFA alinha-se com as demandas por construções mais sustentáveis, pois reduz o consumo de recursos naturais e minimiza resíduos. A técnica mostra-se particularmente promissora quando associada a métodos de fabricação digital, como a impressão 3D de concreto, que permite materializar geometrias complexas, sem o uso de fôrmas convencionais. Além disso, ao substituir o uso de madeira nas fôrmas tradicionais por soluções mais eficientes, é possível reduzir ainda mais o impacto ambiental, promovendo uma construção mais limpa e eficiente. No entanto, para que essa abordagem seja amplamente adotada, é necessário superar barreiras culturais e normativas, além de desenvolver diretrizes específicas para validação de projetos otimizados.

Apesar de os avanços, a aplicação prática da OT em estruturas de concreto ainda enfrenta desafios, como a necessidade de validação experimental em larga escala e a adaptação de normas técnicas para incorporar soluções não convencionais. Futuros estudos devem explorar a integração da OT com análises de ciclo de vida (ACV) para

quantificar seus benefícios ambientais de forma sistêmica e abrangente, incluindo a quantificação das reduções nos custos de materiais, mão de obra e transporte.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o Laboratório de Computação Científica e Visualização (LCCV) do Centro de Tecnologia (CTEC), da Universidade Federal de Alagoas

(UFAL), pelo suporte fornecido nesta pesquisa. O segundo autor agradece o suporte do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) para desenvolver este trabalho. ☹

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] WORLD GREEN BUILDING COUNCIL. Global Status Report. Londres: WGBC, 2023, p. 45.
- [2] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Cement Technology Roadmap. Paris: IEA, 2022, p. 12-15.
- [3] SIGMUND, O. On benchmarking and good scientific practice in topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, v. 65, n. 11, p. 315, 2022.
- [4] STOIBER, N.; KROMOSER, B. Topology optimization in concrete construction: a systematic review on numerical and experimental investigations. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, v. 64, n. 4, p. 1725-1749, 2021.
- [5] PRESSMAIR, N.; XIA, Y.; WU, H.; LANGELAAR, M.; HENDRICKS, M. A. N.; MAJDOUBA, A.; MOGRA, M.; GRISARO, H.; AMIR, O.; KROMOSER, B. Bridging the gap between mathematical optimization and structural engineering: Design, experiments and numerical simulation of optimized concrete girders. *Structural Concrete*, v. 4, p. 5314-5330, 2023.
- [6] DA, D. Topology optimization design of heterogeneous materials and structures. Reino Unido: Wiley, 2019.
- [7] VANTYGHM, G.; BOEL, V.; CORTE, W.; STEEMAN, M. 3D printing of a post-tensioned concrete girder designed by topology optimization. *Automation in Construction*, v. 112, p. 103084, 2020.
- [8] ZHANG, W.; WANG, Y.; DU, Z.; LIU, C.; YOUN, S.; GUO, X. Machine-learning assisted topology optimization for architectural design with artistic flavor. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 413, p. 116041, 2023.
- [9] PLEVRIS, V.; ALMUTAIRI, A.; RIOS, A. J. Advancing sustainability through structural optimization: Innovations in material efficiency and environmental impact reduction. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NET-ZERO CIVIL INFRASTRUCTURES: INNOVATIONS IN MATERIALS, STRUCTURES, AND MANAGEMENT PRACTICES (NTZR), 2024, Cham. Anais do evento. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, p. 1611-1623.
- [10] WANG, C.; ZHAO, Z.; ZHOU, M.; SIGMUND, O.; ZHANG, X. S. A comprehensive review of educational articles on structural and multidisciplinary optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, v. 64, n. 5, p. 2827-2880, 2021.
- [11] AGRAWAL, A.; TAMSEN, E.; UNGER, J. F.; KOUTSOURELAKIS, P. S. From concrete mixture to structural design - a holistic optimization procedure in the presence of uncertainties. *Data-Centric Engineering*, v. 5, p. e20, 2024.
- [12] ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Circular economy in construction. Cowes: EMF, 2022.
- [13] WU, L.; SUN, Z.; CAO, Y. Modification of recycled aggregate and conservation and application of recycled aggregate concrete: A review. *Construction and Building Materials*, v. 431, p. 136567, 2024.
- [14] GURSEL, A. P.; MASANET, E.; HORVATH, A.; STADEL, A. Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review. *Cement and Concrete Composites*, v. 51, p. 38-48, 2014.
- [15] AHMED, G. H. A review of "3D concrete printing": Materials and process characterization, economic considerations and environmental sustainability. *Journal of Building Engineering*, v. 66, p. 105863, 2023.
- [16] SINGH, H. Steel fiber reinforced concrete: Behavior, modelling and design. Singapura: Springer, 2017.
- [17] BENTUR, A.; MINDESS, S. Fibre reinforced cementitious composites. 2. ed. Reino Unido: Taylor and Francis, 2007.
- [18] JAISHANKAR, P.; MURALI, G.; SALAIMANIMAGUDAM, M. P.; AMRAN, Y. H. M.; FEDIUK, R.; KARTHIKEYAN, K. Study of topology optimized hammerhead pier beam made with novel preplaced aggregate fibrous concrete. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, v. 65, n. 1, p. 287-298, 2021.
- [19] GAGANELIS, G.; MARK, P.; FORMAN, P. Optimization aided design: Reinforced concrete. Alemanha: John Wiley & Sons, 2022.
- [20] BENDSØE, M. P.; KIKUCHI, N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 71, n. 2, p. 197-224, 1988.
- [21] CHRISTENSEN, P. W.; KLARBRING, A. An introduction to structural optimization. Suécia: Springer, 2009.
- [22] WU, J.; SIGMUND, O.; GROEN, J. P. Topology optimization of multi-scale structures: A review. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, v. 63, p. 1455-1480, 2021.
- [23] CEDRIM, M. B. M. Fundamentos para o projeto de vigas de concreto reforçado com fibras de aço com suporte de técnicas de otimização topológica. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Alagoas, Brasil, 2024.
- [24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16935: Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras - Procedimento. Rio de Janeiro, 2021.
- [25] ERLACHER, G.; CALENZANI, A. F. G.; ALVES, E. C. Topological optimization of composite trusses considering CO₂ emission via metaheuristic algorithms. *IBRACON Structures and Materials Journal*. v. 16, n. 6, e16606, 2023.
- [26] SANTORO, J. F.; KRIPKA, M. Minimizing environmental impact from optimized sizing of reinforced concrete structures. *Computers and Concrete*. v. 25, n. 2, p. 111-118, 2020.

Quantificação das emissões de CO₂ na PRC 280

LIDIANE OLIVEIRA BLANK - GERENTE - <https://orcid.org/0009-0001-9093-9913> (lidiane.blank@vcimentos.com) – Votorantim Cimentos

MOHAMED KASEM - DIRETOR – DER - PR

SANDRA PATRICIA ECHEVERRIA FERNANDEZ - SUPERINTENDENTE ADJUNTA – FGV IBRE

RESUMO

ESTE ESTUDO VISA COMPARAR O DESEMPENHO AMBIENTAL EM TERMOS DE EMISSÕES DE CO₂ ENTRE O PAVIMENTO RÍGIDO (CONCRETO) E SEMIRRÍGIDO (CAMADA DE ASFALTO COM INCREMENTO DE CIMENTO NA BASE), POR MEIO DO MÉTODO DA ANÁLISE DE ECOEFICIÊNCIA® DESENVOLVIDO PELA FUNDAÇÃO ESPAÇO ECO® PARA UM ESTUDO DA VOTORANTIM CIMENTOS, CONSIDERANDO A UNIDADE FABRIL RIO BRANCO DO SUL, PRODUTORA DE CIMENTO.

PALAVRAS-CHAVE: PAVIMENTO, CONCRETO, ECOEFICIÊNCIA, ACV, SUSTENTABILIDADE.

1. INTRODUÇÃO

A sustentabilidade é a capacidade de algo se sustentar, conservar e permanecer ao longo das gerações. O termo, definido no Relatório Brundtland da Organização das Nações Unidas, estabeleceu que o desenvolvimento sustentável é aquele que “satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades” (Figura 1).

O contexto global, em volta da temática de mitigação dos GEE (Gases do Efeito Estufa), tem sido marcado por diversos acordos nacionais e internacionais que vêm fortalecendo o discurso do combate às mudanças do clima, definindo compromissos a serem seguidos.

As mudanças climáticas já são uma realidade e estão causando impactos generalizados em todas as partes do mundo. Secas, incêndios, inundações e eventos climáticos extremos estão cada vez mais frequentes e ameaçam o



FIGURA 1

PILARES DA SUSTENTABILIDADE

FONTE: ADAPTADO DA COMISSÃO MUNDIAL SOBRE O MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO, 1991

fornecimento de alimentos, a segurança alimentar e os meios de subsistência no planeta, uma vez que a crise climática também representa, de várias maneiras, uma crise econômica e social. De acordo com o último relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, na sigla em inglês), a temperatura média do planeta já aumentou 1,1°C em relação à era pré-industrial e segue em uma rota de aquecimento de mais de 4°C, se falharmos

como sociedade em transformar nosso estilo de vida e trazer a ação climática para o centro das decisões políticas e empresariais.

Quando se fala em rodovias, o cenário não é diferente. Tem-se a responsabilidade de buscar alternativas mais ecoeficientes e sustentáveis, tendo em vista que se trata de um modal relevante para o Brasil, de acordo com o PNL 2035 - Plano Nacional de Logística 2035 - um instrumento de planejamento estratégico do governo brasileiro que visa traçar uma visão futura para a rede de transportes do país.

O estudo em questão buscou avaliar, apurar e mensurar, em um trecho de rodovia em operação na PRC 280, as emissões de CO₂ desde a extração da matéria-prima, passando pela construção, considerando a manutenção e uso da rodovia ao longo de 20 anos.

2. CÁLCULO DO CONSUMO ENERGÉTICO E EMISSÃO DE CO₂

O Método de ACV propõe uma sistemática que facilite e impulse avaliações de parâmetros relacionados à sustentabilidade para tomada de decisão entre soluções construtivas em obras de infraestrutura, utilizando



FIGURA 2

FASES DO CICLO DE VIDA DO PAVIMENTO

FONTE: TELES *et al*, 2023

dados disponíveis e já apropriados nos projetos. Envolve a compilação e quantificação de entradas e saídas do sistema de um produto, com a consequente análise de aspectos e de potenciais impactos ambientais ao longo de todo o seu ciclo de vida (Figura 2), desde a aquisição das matérias-primas até a disposição final (ABNT, 2009).

O cálculo do consumo energético e emissão de CO₂ consiste na análise de ciclo de vida considerando a produção dos materiais, operações de transporte e atividade executiva dos equipamentos.

2.1 Produção de materiais

O consumo energético e a emissão de CO₂ resultantes da produção dos materiais são obtidos pelo somatório dos produtos entre as massas dos materiais (por unidade do serviço) e os fatores de energia embutida e de emissão de CO₂, conforme demonstrado nas Equações 1 e 2, respectivamente.

$$[1] \quad CE_{pro} = \sum EE_{pro,i} \times m_i$$

$$[2] \quad ECO_{2\ pro} = \sum FCO_{2\ pro,i} \times m_i$$

Onde:

CE_{pro} representa o consumo energético do serviço na produção dos materiais [MJ/UF];

EE_{pro} representa a energia embutida na produção do material [MJ/t];

m representa a massa do material no serviço [t/UF];

ECO_{2 pro} representa a emissão de CO₂ do serviço na produção dos materiais [kgCO₂/UF];



FCO_{2 pro} representa o fator de emissão de CO₂ na produção do material [kgCO₂/t].

2.2 Atividade executiva dos equipamentos

Além das etapas de produção dos materiais e operações de transporte, as atividades executivas dos equipamentos também contribuem para o consumo energético e para a emissão de CO₂. De forma análoga à apresentada para as operações de transporte, o consumo energético e a emissão de CO₂ dependem do consumo de combustível dos equipamentos em suas atividades executivas, o qual pode ser obtido pelas Equações 3 e 4.

$$[3] \quad CE_{exe} = \sum FC_{equ,i} \times P_{equ,i} \times \frac{Q_{equ,i}}{P_{ser,i}} \times UO_{equ,i} \times EE_{com,i}$$

$$[4] \quad ECO_{2\ exe} = \sum FC_{equ,i} \times P_{equ,i} \times \frac{Q_{equ,i}}{P_{ser,i}} \times UO_{equ,i} \times FCO_{2\ com,i}$$

Onde:

CE_{exe} representa o consumo energético nas atividades executivas dos equipamentos [MJ/UF];

FC_{equ} representa o coeficiente de consumo do equipamento [l/kWh];

P_{equ} representa a potência do equipamento [kW];

Q_{equ} representa a quantidade do equipamento no serviço;

P_{ser} representa a produção de equipe do serviço [UF/h];



UO_{equ} representa a utilização operativa do equipamento no serviço;

EE_{com} representa a energia embutida do combustível [MJ/l];

ECO_{2 exe} representa a emissão de CO₂ nas atividades executivas dos equipamentos [kgCO₂/UF];

FCO_{2 com} representa o fator de emissão de CO₂ do combustível [kgCO₂/l].

2.3 Operações de transporte

O consumo energético e as emissões oriundas das operações de transporte necessárias para o deslocamento dos materiais são calculados por meio das equações 5 e 6:

$$[5] \quad CE_{tra} = \sum FC_{equ,i} \times P_{equ,i} \times \frac{2 \times DMT_{equ,i}}{V_{equ,i}} \times \frac{m_{tra,i}}{Cap_{equ,i}} \times EE_{com,i}$$

$$[6] \quad ECO_{2\ tra} = \sum FC_{equ,i} \times P_{equ,i} \times \frac{2 \times DMT_{equ,i}}{V_{equ,i}} \times \frac{m_{tra,i}}{Cap_{equ,i}} \times FCO_{2\ com,i}$$

onde:

CE_{tra} representa o consumo energético do serviço nas operações de transporte [MJ/UF];

DMT_{equ} representa a distância média de transporte [km];

V_{equ} representa a velocidade média do equipamento no transporte [km/h];

m_{tra} representa a massa de transporte do item no serviço [t/UF];

Cap_{equ} capacidade de carga do equipamento por viagem [t];

ECO_{2 tra} representa a emissão de CO₂ do serviço nas operações de transporte [kgCO₂/UF].

2.4 Total

Por fim, o consumo energético e a emissão de CO₂ totais consistem na soma das parcelas de produção dos materiais, atividade executiva dos equipamentos e operações de transporte, conforme equações 7 e 8:

$$[7] \quad CE_{tot} = CE_{pro} + CE_{exe} + CE_{tra}$$

FIGURA 3

FOTOS DA PRC 280

FONTE: FOTO CEDIDA POR TRIPOLONI, 2024

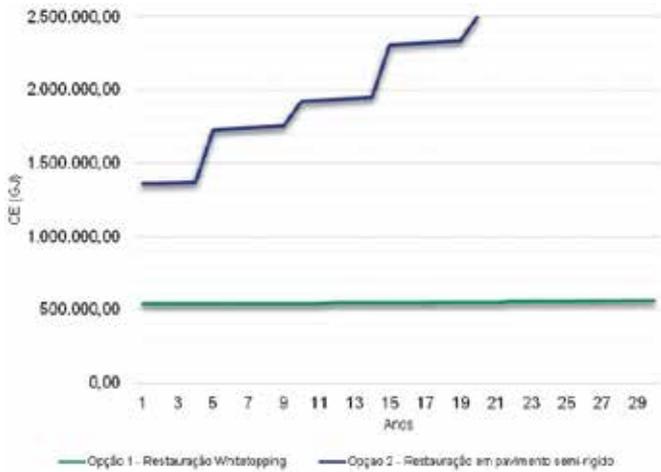


GRÁFICO 1

CONSUMO ENERGÉTICO EM 20 ANOS

FONTE: AUTORES

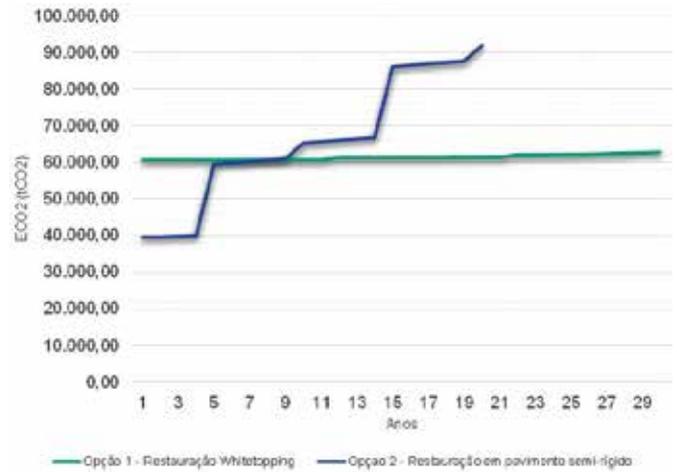


GRÁFICO 2

EMIÇÃO DE CO₂ EM 20 ANOS

FONTE: AUTORES

[8]

$$ECO_2_{tot} = ECO_2_{pro} + ECO_2_{exe} + ECO_2_{tra}$$

Onde:

CE_{tot} representa o consumo energético total do serviço [MJ/UF];

ECO_{2 tot} representa a emissão de CO₂ total do serviço [kgCO₂/UF].

Estes conceitos foram aplicados na obra de infraestrutura rodoviária de restauração de Whitetopping na rodovia PRC 280 (1º Lote), entregue em 2023, ilustrado na Figura 3.

3. DESENVOLVIMENTO

Com base no estudo desenvolvido pela Fundação Espaço ECO® e pesquisa desenvolvida pelo Centre for Surface Transportation Technology (CSTT) e National Research Council of Canada (NRC), foi possível estruturar uma correlação importante quanto à sustentabilidade de pavimentos, considerando a análise de Ciclo de Vida da solução de engenharia adotada para o pavimento da rodovia.

Em conjunto com a FGV IBRE, adotando-se a metodologia de ACV e considerando-se como dados

de entrada os serviços e dados do SI-CRO, (Sistema de Custos Referenciais de Obras), uma ferramenta do DNIT que define e calcula os custos de insumos e serviços para obras de infraestrutura de transportes no Brasil, e que considera fatores regionais, como chuvas (FIC) e tráfego (FIT), para ajustar a produtividade e o custo dos serviços, e parâmetros de transporte (DMT e velocidade dos equipamentos transporta-

dores), foi possível calcular as emissões reais do trecho em questão (energia embutida e fator de emissão).

4. CONCLUSÕES

Com base nas análises realizadas, foi possível avaliar tanto o consumo energético quanto as emissões de CO₂ para um trecho da PRC 280.

Os Gráficos 1 e 2 apresentam, respectivamente, o consumo energético e as emissões de CO₂ ao longo de 20 anos de vida útil do projeto, comparando duas soluções distintas. O Gráfico 1 revela que a Opção 2, representada pela restauração em pavimento semirrígido, apresenta um consumo energético significativamente maior, especialmente a partir do 10º ano, com elevações consideráveis. Em contraste, a Opção 1, referente à restauração em pavimento Whitetopping, mantém um consumo energético constante e consideravelmente inferior ao da Opção 2.

No que diz respeito às emissões de CO₂, ilustradas no Gráfico 2, observa-se que a Opção 2 registra um aumento expressivo nas emissões após o 10º ano,

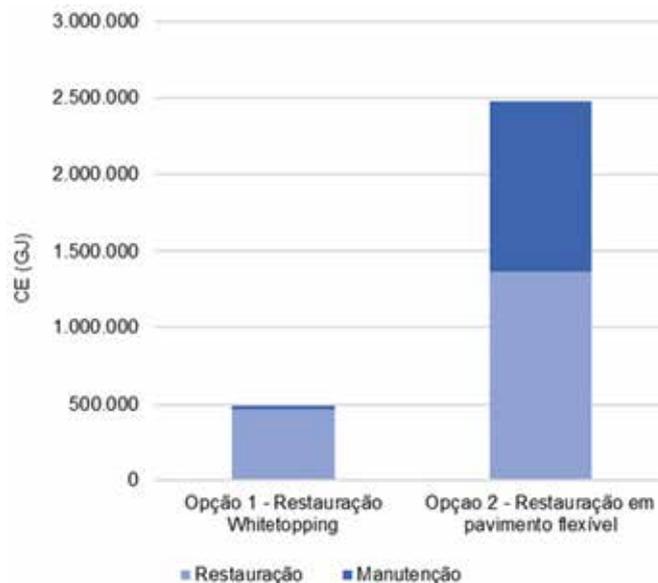


FIGURA 4

CONSUMO ENERGÉTICO

FONTE: AUTORES

TABELA 1
EMIÇÃO DE CO₂

Opção	Consumo energético (GJ)			Emissão de CO ₂ (tCO ₂)		
	Restauração	Manutenção	Total	Restauração	Manutenção	Total
Opção 1 – Restauração Whitetopping	541.877,38	22.553,33	564.430,71	60.552,43	2.174,59	62.727,01
Opção 2 – Restauração em pavimento semi-rígido	1.359.120,66	1.114.118,17	2.473.238,83	39.647,36	49.690,75	89.338,10

FONTE: AUTORES

com incrementos mais acentuados ao longo do tempo. Por outro lado, a Opção 1 apresenta estabilidade nas emissões, permanecendo em um nível consistentemente inferior em relação à Opção 2, o que sugere uma alternativa mais sustentável, com menor impacto ambiental.

De forma geral, a análise indica que a Opção 1 oferece uma abordagem mais ecológica e mais alinhada à sustentabilidade a longo prazo.

A Tabela 1 e a Figura 4 comparam as emissões de carbono ao longo da vida útil de dois tipos de restauração: a Opção 1, *Whitetopping*, e a Opção 2, pavimento flexível, incluindo também os componentes de manutenção. Verifica-se que as emissões totais de CO₂ da Opção 2 são significativamente maiores que as da Opção 1. Isso ocorre devido ao peso maior das emissões relacionadas à fase de manutenção na solução de pavimento flexível, que se evidencia no gráfico pelo volume expressivo de emissões nesta fase.

Por outro lado, a Opção 1 apresenta uma quantidade consideravelmente menor de emissões de CO₂, indicando



FIGURA 5

COMPARATIVO DE CONSUMO ENERGÉTICO & EMISSÕES DE CO₂

FONTE: AUTORES

uma pegada de carbono menor ao longo do ciclo de vida.

De forma prática, as análises e apurações reais realizadas para este trecho da PRC 280 verificaram que, considerando a análise de ciclo de vida previamente definida e as mesmas condições de contorno, o consumo energético foi 4,4 vezes maior e a emissão de CO₂ 40% superior para o pavimento flexível, como ilustrado na Figura 5.

Sendo assim, pode-se observar que, além de necessário, é também possível inserir, nas análises de viabilidade técnico-econômica, a ecoeficiência mediante a quantificação das emissões de CO₂.

Cabe destacar que a durabilidade do pavimento rodoviário bem como sua performance são fundamentais para o atingimento dos resultados. E, por este motivo, adicionalmente à quantificação das emissões de CO₂, foi também possível aferir a performance deste trecho de rodovia via tecnologia inovadora, FALKORR, apurando os parâmetros de desempenho IRI, transferência de cargas entre placas, ICP.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer a todos os profissionais do DER PR, FGV IBRE e Votorantim Cimentos que participaram do estudo, empenhando e envidando esforços para que fosse possível termos a primeira Rodovia do País com as emissões de CO₂ mensuradas e aferidas dentro de uma metodologia aplicável e principalmente replicável. ☺

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14044: Gestão ambiental: Avaliação do ciclo de vida: Requisitos e Orientações. Rio de Janeiro, 2009.
- [3] COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. Nosso futuro comum. 2. ed. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1991.
- [4] DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 031/2024 - ES - Pavimentação – Concreto asfáltico - Especificação de serviço. Brasília, 2024.
- [5] TELES, A. A.; et al. Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) e Avaliação do Custo do Ciclo de Vida (ACCV) de Pavimentos Asfáltico e de Concreto de Cimento Portland por meio da Quantificação do Consumo Energético e Emissão de CO₂: Análise Comparativa. 25ª Enacor/47ª RAPv, p. 822 - 833, 2023.
- [6] THACKER, A.; et al. Climate risk and response: Physical hazards and socioeconomic impacts. New York: McKinsey Global Institute, 2021. VOTORANTIM CIMENTOS & FUNDAÇÃO ESPAÇO ECO. Análise de ecoeficiência da construção e manutenção de pavimentos; São Paulo, 2016.

Avaliação da ecoeficiência do aço CA-70 em blocos de fundação de edifícios altos

PAULO MARTINS - ENG. - (paulo.martins@pedreiratopazio.eng.br);
GUSTAVO LOPES DA ROCHA - ENG. DOUTORANDO - <https://orcid.org/0000-0002-2413-0892> ;
OTÁVIO PEDREIRA DE FREITAS - ENG. — Pedreira Topázio

RESUMO

A INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL É UMA DAS MAIORES CONSUMIDORAS DE RECURSOS NATURAIS E GERADORA DE IMPACTOS AMBIENTAIS. NESSE CONTEXTO, A DESMATERIALIZAÇÃO, DEFINIDA COMO A REDUÇÃO DE MATERIAL MANTENDO A FUNCIONALIDADE, EMERGE COMO UMA ESTRATÉGIA CENTRAL PARA A SUSTENTABILIDADE. ESTE TRABALHO APRESENTA UM ESTUDO DE CASO COMPARATIVO DA APLICAÇÃO DESSE CONCEITO E ESTRATÉGIA EM PROJETOS DE FUNDAÇÕES DE EDIFÍCIOS ALTOS DE CONCRETO ARMADO, COM BASE NAS NORMAS ABNT NBR 6118:2023 E EC2. DUAS ALTERNATIVAS FORAM ANALISADAS, A PRIMEIRA UTILIZANDO AÇO CA-50 E A SEGUNDA COM SUBSTITUIÇÃO DO AÇO CA-50 PELO AÇO CA-70 NOS TIRANTES PRINCIPAIS. A ADOÇÃO DO AÇO CA-70 REDUZIU SIGNIFICATIVAMENTE A ÁREA E PESO TOTAL DE AÇO, COM REDUÇÃO DE CUSTOS NOS BLOCOS DE FUNDAÇÃO. AINDA, O REFINAMENTO DO CÁLCULO DO COMPRIMENTO DE ANCORAGEM POSSIBILITOU A MANUTENÇÃO DAS FORMAS E DO VOLUME DE CONCRETO UTILIZADO. OS RESULTADOS DEMONSTRAM A VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DO USO DO CA-70 EM FUNDAÇÕES PROFUNDAS, CONTRIBUINDO PARA PRÁTICAS MAIS SUSTENTÁVEIS NO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL.

PALAVRAS-CHAVE: BLOCOS DE FUNDAÇÃO, AÇO CA-70, SUSTENTABILIDADE, DESMATERIALIZAÇÃO, ANCORAGEM.

1. INTRODUÇÃO

A construção civil é essencial para o desenvolvimento econômico, mas também uma das maiores responsáveis por impactos ambientais, como a extração intensiva de recursos, emissões de gases de efeito estufa e geração de resíduos. Tornar o

setor mais sustentável é uma necessidade urgente. Uma estratégia promissora é a desmaterialização, que busca reduzir o uso de materiais sem comprometer o desempenho estrutural. Em estruturas de concreto armado, isso pode ser alcançado por meio da otimização do projeto, uso de materiais mais eficientes e redução de desperdícios:

► **Otimização do Projeto:** consiste em aprimorar o dimensionamento estrutural para reduzir o uso de materiais.

No caso de fundações, isso inclui o uso de métodos de cálculo mais precisos, como o refinamento do comprimento de ancoragem e o modelo de bielas e tirantes, além da adoção de geometrias estruturais mais eficientes;

► **Eficiência dos Materiais:** refere-se ao uso de insumos com melhor desempenho mecânico, permitindo reduzir quantidades totais. Em blocos de fundação, isso inclui a substituição do aço



FIGURA 1

MODELO DIGITAL 3D DO OBJETO DE ESTUDO

FONTE: OS AUTORES (2025)

CA-50 por CA-70 em tirantes principais, o que possibilita menor área de armadura para as mesmas cargas. Estratégias complementares incluem o uso de concretos com maior resistência ou menor teor de clínquer para contribuir na redução de dimensões e emissões associadas aos materiais;

► **Redução de desperdícios:** consiste em minimizar perdas no canteiro, como cortes excessivos, sobras de material e retrabalhos. No caso de fundações, o uso de detalhamentos mais precisos e de ferramentas com base em BIM permite visualizar interferências antecipadamente e otimizar o corte e posicionamento das armaduras. Assim, ocorre a redução de erros de execução e desperdícios.

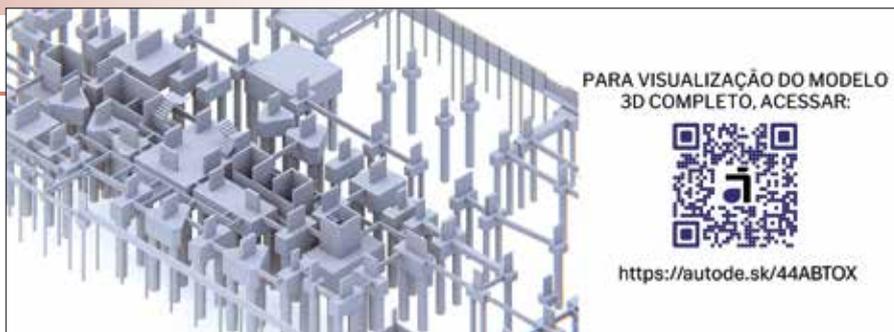
Essas três frentes, combinadas, oferecem uma estrutura para reduzir o uso de materiais na construção civil. Sendo complementares, quando aplicadas juntas geram sinergias significativas, traduzindo em benefícios técnicos, econômicos e ambientais.

Apesar do crescente interesse por eficiência no uso de recursos, a desmaterialização ainda é pouco explorada de forma direta tanto no ensino da engenharia quanto na prática profissional. A otimização estrutural, muitas vezes, é realizada com base na experiência e/ou em custos, sem um embasamento teórico que avalie os ganhos sob a ótica da sustentabilidade. Este trabalho busca contribuir para a superação dessa lacuna, apresentando um estudo de caso nacional que aplica estratégias de desmaterialização no sistema de fundações de dois edifícios altos em concreto armado. A substituição parcial de aço CA-50 por CA-70, o uso do modelo de bielas e tirantes, e o refinamento do cálculo de ancoragem resultam em expressiva redução de massa de aço e custos, mantendo o volume de concreto utilizado. O estudo reforça o potencial de abordagens estruturadas para integrar eficiência técnica e sustentabilidade em projetos reais.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Caracterização da obra e solução de fundação

As estruturas em estudo são compostas por duas torres situadas em São Paulo. O projeto estrutural foi desenvolvido pelo escritório Pedreira Topázio, enquanto a



PARA VISUALIZAÇÃO DO MODELO 3D COMPLETO, ACESSAR:



<https://autode.sk/44ABTOX>

FIGURA 2

VISTA PARCIAL DAS FUNDAÇÕES EM BLOCOS SOBRE ESTACAS

FONTE: OS AUTORES (2025)

execução da obra é de responsabilidade da construtora Econ.

A Torre A possui 110 metros de altura, com 35 pavimentos habitáveis, além dos pavimentos técnicos e de embasamento. A Torre B possui 85 metros de altura, com 27 pavimentos habitáveis e conta com pavimentos técnicos e de embasamento. Ambas as estruturas são executadas em concreto armado, conforme exemplificado na Figura 1.

Dadas as características do solo, optou-se por fundações profundas compostas por blocos de coroamento. Conforme definido na ABNT NBR 6118:2023, “*blocos são estruturas de volume usadas para transmitir às estacas e às tubulações as cargas de fundação, podendo ser considerados rígidos ou flexíveis por critérios análogos ao definido para sapatas*” (ABNT, 2023). Neste caso, foram adotados blocos rígidos, o que implica a inexistência de flexão significativa ou deformações diferenciais na base dos blocos. A vista parcial dos blocos é apresentada na Figura 2.

2.2 Metodologia de cálculo adotada

Para estruturas de muitos pavimentos, como a Torre A com 110 metros de altura, as cargas transmitidas aos blocos de fundação são elevadas, resultando em grandes quantidades de aço. Com o objetivo de reduzir o peso de aço utilizado nos blocos de fundação, foi proposta pela fornecedora de aço do empreendimento, Gerdau, a substituição do aço CA-50 pelo aço CA-70.

A metodologia de cálculo adotada para os blocos seguiu o modelo de bielas e tirantes descrito por Blévyot e Frémy (1967, *apud*. ABECE, 2020), com base nas prescrições normativas da ABNT NBR 6118:2023. Foram consideradas as verificações dos estados limites últimos (ELU) nas zonas de compressão (nós CCC e CCT), bem como a definição das áreas de aço dos tirantes, adotando um coeficiente de redução β de 0,76 para controle das fissuras em serviço, que foi adotado com base em referências empíricas provenientes da prática profissional do escritório de cálculo Pedreira Topázio.

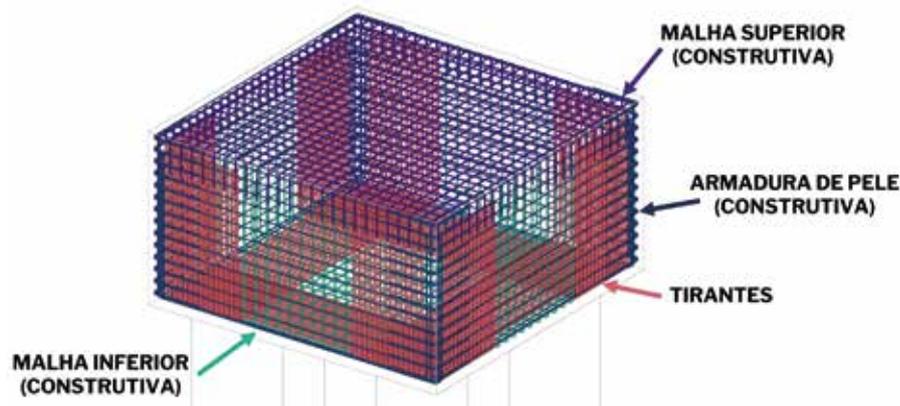


FIGURA 3

REPRESENTAÇÃO 3D DAS ARMADURAS PRESENTES EM UM BLOCO SOBRE ESTACAS

FONTE: OS AUTORES (2025)

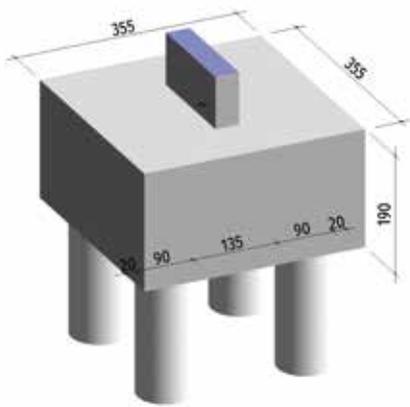


FIGURA 4
REPRESENTAÇÃO 3D DE UM BLOCO GENÉRICO SOBRE ESTACAS
FONTE: OS AUTORES (2025)

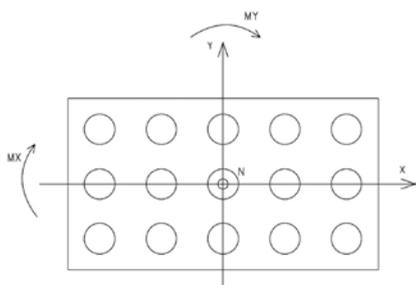


FIGURA 5
ESQUEMA DE ESFORÇOS DE UM BLOCO SOBRE ESTACAS
FONTE: OS AUTORES (2025)

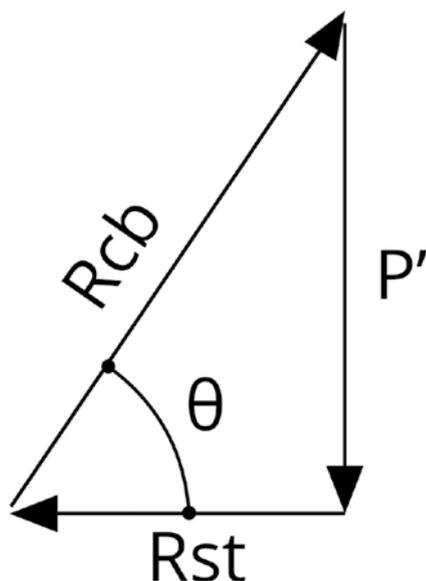


FIGURA 6
ESQUEMA DE ESFORÇOS UTILIZADO BASEADO NA SIMPLIFICAÇÃO POR TRELIÇA
FONTE: OS AUTORES (2025)

2.3 Estratégia comparativa CA-50 x CA-70

Para avaliar a viabilidade econômica e técnica da substituição do aço CA-50 pelo CA-70, foram consideradas duas configurações distintas. Na Figura 3, são destacadas as funções das armaduras presentes nos blocos.

- ▶ **Situação A:** Todas as armaduras dos blocos compostas por aço CA-50;
- ▶ **Situação B:** Armaduras construtivas (malhas superior e inferior, armadura lateral) em CA-50 e tirantes principais em CA-70.

2.4 Diretrizes dimensionais dos blocos

O dimensionamento dos blocos se inicia a partir dos dados geotécnicos com o posicionamento e diâmetro das estacas. A forma final do bloco é definida pelo engenheiro estrutural, onde foi considerado 20 cm de afastamento entre a face da estaca e a face do bloco (Figura 4). Essa margem facilita a montagem, garante comprimento de ancoragem e acomoda possíveis excentricidades de execução.

Em todos os casos, garantiu-se que as inclinações das bielas fossem superiores a 45°, atendendo aos critérios indicados no presente artigo.

2.5 Cálculo das reações e forças nos tirantes

A determinação das reações nas estacas é o ponto de partida para o detalhamento do bloco sobre estacas e a solução para a obtenção desses esforços é análogo ao da flexão composta oblíqua, partindo do princípio de que o bloco é rígido e as

estacas têm o mesmo diâmetro. O cálculo das tensões é realizado conforme Equação 1 e o esquema de esforços solicitantes é representado na Figura 5.

$$[1] \quad \sigma_i = \frac{N}{n \cdot A} \pm \frac{M_x \cdot y_i}{A \sum y_i^2} \pm \frac{M_y \cdot x_i}{A \sum x_i^2}$$

Sendo:

σ_i : a tensão atuante (kN/m²);

N: a força normal (kN);

A: a área da estaca (m²);

M_x e M_y : o momento em x e em y, respectivamente (kN · m);

x_i e y_i : distância no plano cartesiano entre o eixo da estaca e o centro geométrico (m).

Multiplicando-se ambos os lados da Equação 1 pela área da estaca, temos o apresentado na Equação 2:

$$[2] \quad R_i = \frac{N}{n} \pm \frac{M_x \cdot y_i}{\sum y_i^2} \pm \frac{M_y \cdot x_i}{\sum x_i^2}$$

Sendo R_i referente à reação resultante na estaca, em kN e o restante das variáveis as mesmas apresentadas para a Equação 1.

Para o cálculo da armadura de tirantes, adotou-se o modelo de treliça baseado em Blévet e Frémy (1967, *apud*. ABECE, 2020). Por conta da hipótese de bloco rígido, a teoria de bielas e tirantes que se aplica constituiu uma treliça representada pela reação

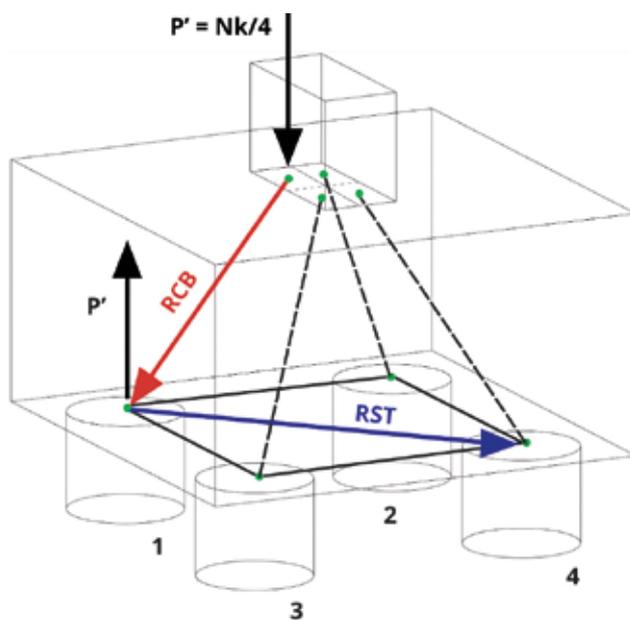


FIGURA 7
DESENHO 3D DA PROJEÇÃO DO TIRANTE ENTRE ESTACAS
FONTE: OS AUTORES (2025)

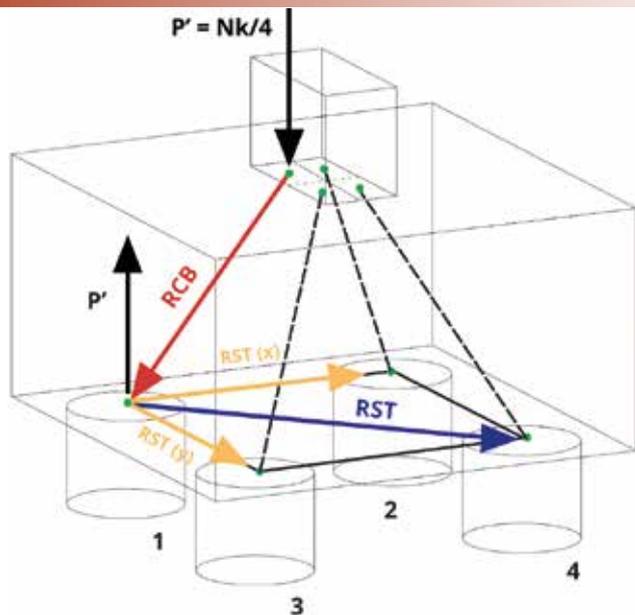


FIGURA 8
DESENHO 3D DA DECOMPOSIÇÃO DO TIRANTE
ENTRE ESTACAS
FONTE: OS AUTORES (2025)

da estaca (P'), biela de compressão (R_{cb}) até à estaca de apoio e, por fim, surge um tirante de equilíbrio (R_{st}) sobre a projeção da biela que atua acima do arrasamento das estacas. É exemplificado na Figura 6 o esquema de treliça descrito.

Exemplificando, para um bloco sobre 4 estacas, o equilíbrio se dá pelo tirante que surge na projeção da biela, como mostra a Figura 7, entre a estaca 1 e 4, ou seja, uma região armada para a tração. Contudo, para que o detalhamento seja mais econômico, o tirante é decomposto em duas direções e armado entre duas estacas, como, no exemplo, apresentado na Figura 8. A vista em planta é apresentada na Figura 9.

De acordo com o observado na Figura 9, podemos decompor o tirante R_{st} em:

$$[3] \quad R_{st}(x) = R_{st} \cdot \cos(\theta)$$

$$[4] \quad R_{st}(y) = R_{st} \cdot \cos(\alpha)$$

Desta forma, a área de aço para o tirante projetado sobre a biela pode ser obtida a partir da Equação 5.

$$[5] \quad A_s = \frac{1,4 \cdot R_{st}(i)}{\beta \cdot F_{yd}}$$

Onde:

F_{yd} : é a tensão de escoamento de cálculo do aço (kN/m^2);

β : é um coeficiente de minoração da resistência do aço, a fim de evitar fissuração do bloco durante o estado limite de serviço (ELS).

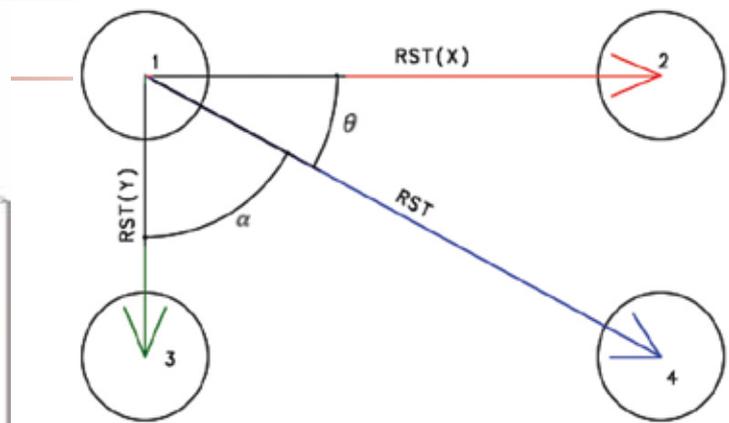


FIGURA 9
VISTA EM PLANTA DA DECOMPOSIÇÃO DO TIRANTE
ENTRE ESTACAS
FONTE: OS AUTORES (2025)

2.6 Verificação das tensões de compressão

Para a verificação do esmagamento, as

prescrições da ABNT NBR 6118:2023 foram utilizadas. Por se tratar do modelo de bielas e tirantes, se faz necessário limitar a tensão de compressão no nó da saída do pilar e na entrada da cabeça da estaca. Para a saída do pilar, temos um nó (CCC), ou seja, todas as forças do nó são de compressão e sua tensão precisa ser inferior à Equação 6, onde suas variáveis são definidas nas Equações 7 e 8.

$$[6] \quad f_{cd1} = 0,85 \cdot \alpha_{v2} \cdot f_{cd}$$

$$[7] \quad \alpha_{v2} = 1 - \frac{f_{ck}(\text{MPa})}{250}$$

$$[8] \quad f_{cd} = \frac{f_{ck}}{1,4}$$

Para a entrada da biela na cabeça da estaca, temos um nó (CCT), onde duas forças do nó são de compressão e uma de tração. A tensão de compressão precisa ser inferior a:

$$[9] \quad f_{cd3} = 0,72 \cdot \alpha_{v2} \cdot f_{cd}$$

Sendo:

f_{cd1} : a tensão de cálculo de compressão na saída do pilar (MPa);

α_{v2} : o coeficiente redutor de tensões de compressão;

f_{cd} : a tensão de cálculo à compressão do concreto (MPa);

f_{cd3} : a tensão de cálculo de compressão na cabeça da estaca (MPa).

Vale salientar que todos os blocos que utilizaram do aço CA-70 são de 2 estacas ou mais.

2.7 Ancoragem das armaduras

Apesar da redução da área de aço obtida pela substituição do aço CA-50 por CA-70, se faz necessário maiores comprimentos de ancoragem devido ao acúmulo maior de tensões na barra que culminam em maior fissuração na região de entorno do concreto e da barra de aço. Com isso, o volume total de concreto nos blocos aumentou com a alteração de suas dimensões. Como o aumento foi devido ao comprimento de ancoragem, buscou-se o aprofundamento teórico para entender sua real necessidade. O cálculo da ancoragem das barras parte das equações preconizadas na ABNT NBR 6118:2023, onde é possível calcular a resistência de aderência entre aço e concreto (f_{bd} , em MPa) a partir da Equação 10.

$$[10] \quad f_{bd} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot f_{ctd}$$

onde:

$\eta_1 = 2,25$ para barras nervuradas;

$\eta_2 = 1$ para situações de boa aderência;

$\eta_3 = 1$ para $\varnothing < 32$ mm;

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c}$$

No entanto, recomendações técnicas da ABECE (Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural), com base no *fib* Model Code 2010, indicam que, para o aço CA-70 em blocos de fundação, deve-se considerar a introdução de um fator adicional para representar o efeito da fissuração no concreto em torno das barras submetidas a maiores níveis de tensão (ABECE, 2024).

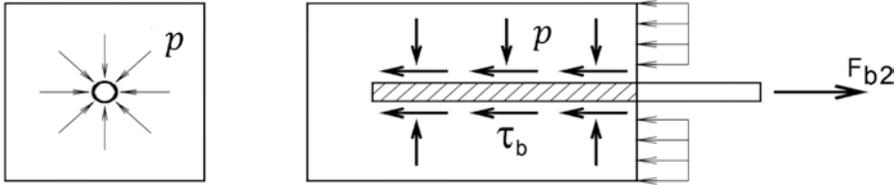


FIGURA 10

TENSÕES TRANSVERSAIS À ARMADURA

FONTE: ADAPTADO DE LEONHARDT E MÖNNING (1977)

Esse fator é o $\eta_4 = 0,76$. A partir do novo coeficiente, a equação para a resistência de aderência pode ser reescrita (Equação 11).

$$[11] \quad f_{bd} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 \cdot f_{ctd}$$

Além disso, a norma brasileira apresenta o comprimento básico de ancoragem que é o comprimento necessário para ancorar a força-limite da barra, admitindo a resistência de aderência conforme f_{bd} (ABNT, 2023). A Equação 12 indica o valor a ser respeitado, sendo \emptyset é o diâmetro da barra em questão.

$$[12] \quad l_b = \frac{\emptyset}{4} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{bd}} \geq 25\emptyset$$

Sendo:

l_b : o comprimento de ancoragem básico (m).

Dado o comprimento básico, é possível calcular o comprimento necessário $l_{b,nec}$ em metros, a partir da Equação 13) conforme a ABNT NBR 6118:2023. Onde

$\alpha = 0,7$ para barras com ganchos e $l_{b,min}$ é o maior valor entre $0,3 \cdot l_b$, $10\emptyset$ ou 100 mm.

$$[13] \quad l_{b,nec} = \alpha \cdot l_b \cdot \frac{A_{s,c\acute{a}lculo}}{A_{s,existente}} \geq l_{b,min}$$

Devido a presença de compressão transversal à barra dos tirantes (Figura 10), é possível adotar um redutor adicional do comprimento de ancoragem, conforme o capítulo 9 da ABNT NBR 6118:2023. Esse redutor pode ser calculado a partir do disposto na norma europeia EC2:2004 e apresentado em ABECE (2024), que considera um efeito η_5 conforme apresentado na Equação 14, sendo seu valor maior que 0,7. Portanto, para o cálculo de p (Figura 10) foi adotada a carga de compressão oriunda das ações permanentes e acidentais do pilar para uma área A (Equação 15), onde \emptyset_{est} é o diâmetro da estaca.

$$[14] \quad \eta_5 = 1 - 0,04 \cdot p$$

$$[15] \quad A = 2 \cdot \emptyset_{est}$$

Portanto, para viabilizar o uso do aço CA-70 sem alterar o afastamento padrão de 20 cm entre a face da estaca e a face do bloco, adotado na Situação A, foi necessária a consideração da compressão transversal. A compressão transversal contribui para diminuir o comprimento de ancoragem necessário, permitindo que a ancoragem seja realizada com segurança dentro do espaço disponível. É apresentada, na Figura 11, uma vista inferior dos blocos a partir do modelo 3D, em que pode ser observado o espaço disponível para ancoragem das armaduras entre a estaca e a face do bloco.

2.8 Análise dos resultados

Utilizando o detalhamento das soluções para obtenção dos quantitativos finais e adotando preços unitários médios para a cidade de São Paulo, é possível a economia gerada através do estudo apresentado. Na Situação A, com armaduras compostas exclusivamente por aço CA-50, o custo total do aço nos blocos de fundação foi de R\$ 712.934,68. Na Situação B, com substituição das barras de 25 mm e 32 mm por aço CA-70 nos tirantes principais, o custo foi reduzido para R\$ 617.784,62, representando uma economia de R\$ 95.150,06, ou seja, 13,3% de redução em relação ao custo original, com dados orçamentais reais para a cidade de São Paulo - SP no ano de 2024.

Além da economia financeira, observou-se uma significativa redução na massa total de aço utilizada, que passou de 111.540 kg para 91.469 kg, uma diferença de 20.071 kg, equivalente a uma economia de 18%. Isso evidencia o potencial de desmaterialização viabilizado pelo uso de um material de maior resistência, como o CA-70, que permite reduzir a seção das armaduras mantendo o desempenho estrutural. Com base nos fatores médios de emissão de CO_2 associados à produção de aço disponibilizados pela base de dados SIDAC (2025), a economia de aço representa a redução de aproximadamente 14,9 toneladas de emissões de CO_2 .

Além disso, em uma análise preliminar, a Situação B demandaria o aumento do comprimento de ancoragem, o que



FIGURA 11

MODELO 3D DOS BLOCOS DE FUNDAÇÃO

FONTE: OS AUTORES (2025)



FIGURA 12

GAIOLA CONFECCIONADA

FONTE: OS AUTORES (2025)



FIGURA 13

BLOCOS CONCRETADOS
E IMPERMEABILIZADOS

FONTE: OS AUTORES (2025)

implicaria no aumento do volume dos blocos. O volume total de concreto previsto passaria de 1327,7 m³ para 1528,6 m³, representando um aumento de 15%. No entanto, com o refinamento do cálculo de ancoragem, incluindo a consideração da compressão transversal, foi possível evitar o uso de 200,9 m³ de concreto adicional. Essa otimização proporcionou uma economia estimada de R\$ 100.450,00 e evitou a emissão adicional de cerca de 68,2 toneladas de CO₂, de acordo com os dados obtidos na base de dados SIDAC (2025).

Portanto, a economia total apresentada neste trabalho foi cerca de R\$ 195.600,06 e foram evitadas aproximadamente 83,1 toneladas de emissões de CO₂, resultado de uma análise dos materiais disponíveis aliada ao uso de critérios de cálculo refinados e o uso dos conceitos de desmaterialização aplicados à construção civil.

Na Figura 12 a armação de um dos blocos de coroamento de 2 estacas presentes no projeto e, na Figura 13, blocos concretados com o aço em questão.

3. CONCLUSÕES

Este estudo demonstrou que a substi-

tuição estratégica do aço CA-50 por CA-70 nos tirantes principais de blocos de fundação pode gerar benefícios técnicos, econômicos e ambientais. Utilizando os quantitativos extraídos do detalhamento estrutural e preços unitários médios para a cidade de São Paulo - SP, foi possível mensurar os impactos da solução proposta. A estratégia de desmaterialização resultou em uma economia direta de R\$ 95.150,06, com uma redução de 18% na massa de aço consumida (de 111.540 kg para 91.469 kg). Além da economia com o aço, a adoção de cálculos refinados para o comprimento de ancoragem evitou o acréscimo de 200,9 m³ de concreto, reduzindo o volume projetado de 1528,6 m³ para 1327,7 m³. Essa otimização representou uma economia adicional de R\$ 100.450,00, totalizando R\$ 195.600,05 em economia para as fundações. Portanto, a adoção de critérios de cálculo mais refinados por parte do projetista estrutural foi essencial para evitar que a substituição do aço CA-50 pelo CA-70 resultasse em um acréscimo de custo, visto que o que seria gasto com o acréscimo em volume de concreto supera a economia de aço gerada.

Do ponto de vista ambiental, as reduções de materiais proporcionaram também uma queda significativa nas emissões incorporadas. A economia de aço evitou a emissão de aproximadamente 14,9 toneladas de CO₂, enquanto a redução de concreto evitou mais 68,2 toneladas de CO₂, totalizando cerca de 83,1 toneladas de emissões evitadas, segundo dados da base SIDAC (2025). Além da viabilidade técnica e econômica, o estudo contribui para desfazer a percepção comum de que práticas sustentáveis implicam custos adicionais. Quando aplicadas de forma criteriosa, estratégias como a desmaterialização promovem a

racionalização do uso de recursos, reduzem desperdícios e aumentam a competitividade do projeto. Essas vantagens, quando bem comunicadas e quantificadas, também podem gerar valor agregado para os empreendimentos, por meio de certificações, imagem institucional ou atração de investimentos.

Este estudo de caso apresenta uma aplicação prática e viável de estratégias de desmaterialização no contexto brasileiro, com base em dados reais de projeto e obra. Os resultados reforçam que a redução de materiais pode ser alcançada, sem comprometer o desempenho estrutural e com benefícios evidentes em custo e sustentabilidade. O uso de abordagens semelhantes em outros projetos pode contribuir para uma construção civil mais eficiente e alinhada com os desafios ambientais atuais. Por fim, sugere-se a condução de estudos em diferentes regiões do Brasil e com distintas tipologias de fundações, visando ampliar a base de dados reais e fortalecer o entendimento técnico sobre essa solução. ☺

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA E CONSULTORIA ESTRUTURAL (ABECE). Recomendação ABECE 008:2024. barras de aço com 700 MPa de resistência característica ao escoamento (CA-70): Projeto de blocos de fundação. ABECE. São Paulo, 2024.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6118:2023. Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2023.
- [3] LEONHARDT, F. MÖNNING, E. (1977). Construções de concreto. 6v. Rio de Janeiro, Interciência.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA E CONSULTORIA ESTRUTURAL (ABECE). Bloco sobre estacas, de Blévet & Frémy (1967) - tradução para português Revista Estrutura - ABECE, v. 9, p. 46-48, 2020. Disponível em: http://www.abece.com.br/pdf/1967_Blevot_e_Fremy.pdf.
- [5] Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (SIDAC). Brasil, 2025. Disponível em: <https://sidac.org.br/>.

Entidades da cadeia do concreto entregam a nova sede dos artesãos de Barra Nova

A nova sede da Cooperativa dos Artesãos de Barra Nova, na cidade de Marechal Deodoro, em Alagoas, foi entregue no último dia 29 de agosto, com a presença de autoridades, parceiros, patrocinadores e artistas. O espaço foi revitalizado para oferecer melhores condições de trabalho, formação e exposição aos artesãos de um dos berços históricos e culturais de Alagoas. Capitaneado pelo Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e Instituto Nós por Elas, a pedra fundamental do projeto foi lançada no 65º Congresso Brasileiro do Concreto, evento de disseminação técnico-científicas sobre o concreto e seus sistemas construtivos, ocorrido em Maceió, em 2024. O projeto contemplou as fases de demolição da antiga sede, que apresentava problemas estruturais e condições de

insalubridade, limpeza do terreno, implantação da fundação e construção da obra, sendo realizado de outubro de 2024 a agosto de 2025, antes do prazo previsto de doze meses para entrega da obra pronta. Emocionado, o presidente do IBRACON, Eng. Júlio Timerman, ressaltou que as mulheres da cooperativa seguiram firmes lutando pela nova sede. “Ficamos bastante impactados com a situação de insalubridade em que estava a associação. Chamamos parceiros para realizar esse projeto e ficamos muito felizes em dar uma nova vida para essa comunidade de Marechal Deodoro. É uma realização para várias famílias que, agora, veem seu sonho se concretizar”, declarou. As responsáveis pela execução da obra foram a engenheira Jéssika



Autoridades presentes na cerimônia de inauguração da nova sede



Artesãs reunidas na inauguração da nova sede com o presidente do IBRACON, Julio Timerman, e as responsáveis pela execução, Jéssika Pacheco e Daiana Schuch

Pacheco, diretora de cursos do IBRACON, e a arquiteta Daiana Schuch. A presidente da Cooperartban, Lindinalva Oliveira, agradeceu aos parceiros e doadores de materiais para a obra, enfatizando que a sede servirá como canal cultural e turístico, onde será passado o saber-fazer para as próximas gerações. “Esse empreendimento servirá de modelo para outras instituições do país e será âncora na cultura de Alagoas”, celebrou. Na ocasião, cada parceiro recebeu um quadro em formato de renda de filé com seus logotipos e os presentes, com o descerramento da placa e corte da fita puderam conhecer a nova sede e apreciar os produtos fabricados pelas artesãs de Nova Barra.



Parceiros posam com seus quadros de renda de filé



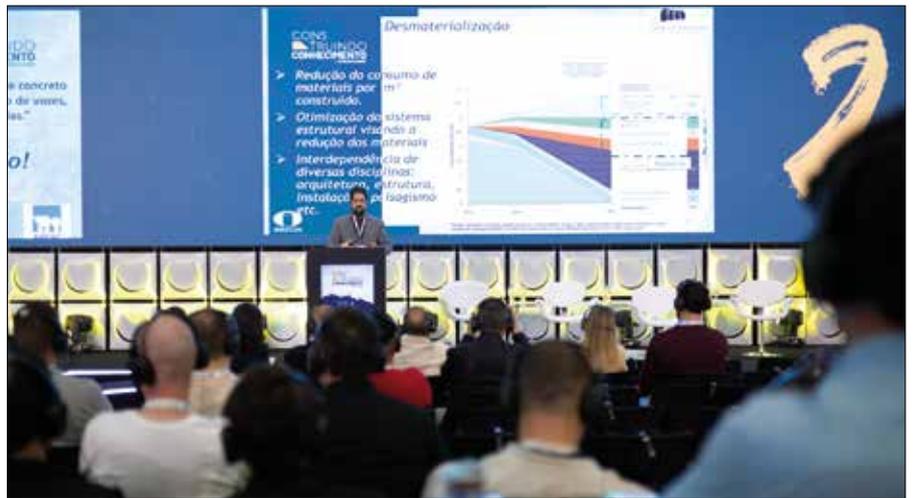
Convidados para a inauguração prestigiam nova sede

IBRACON promove painel sobre tendências inovadoras no setor construtivo

O Congresso Construindo Conhecimento reuniu autoridades, pesquisadores e profissionais do setor da construção para debater o papel transformador das soluções em concreto para o desenvolvimento econômico e social das cidades. Ele fez parte da programação da 16ª Concrete Show South America, que aconteceu no São Paulo Expo, de 19 a 21 de agosto.

Contribuindo com a temática, o IBRACON organizou um painel no Congresso que mostrou as vantagens e desafios de novas tendências no setor construtivo, como a impressão 3D, o monitoramento da saúde estrutural de obras de infraestrutura, a desmaterialização e o uso do método a maturidade.

O projetista do escritório França e Associados, Eng. Gustavo Bahia, apresentou um estudo de caso de desmaterialização do projeto estrutural de edificações reais, compartilhando alguns dos seus achados, tais como: tipologias com maiores vãos entre pilares ou soluções sem vigas têm maiores emissões de CO₂ na fase executiva, o que ele denominou carbono incorporado, bem como custos maiores; a escolha de fornecedores pode anular a escolha por uma tipologia com menor carbono incorporado; maior número de pavimentos numa edificação leva ao maior consumo de concreto nos pilares e, por conseguinte, a maiores emissões. Sua conclusão foi que soluções com vigas e de menores custos consomem, em geral, menos concreto e, portanto, têm menos carbono incorporado.



Gustavo Bahia em momento de sua apresentação no painel

O diretor da ABECE, Álvaro Barbosa, atualizou os presentes quanto aos trabalhos desenvolvidos no âmbito do Comitê Técnico IBRACON de Ensaios de Concreto (CT 401) para a elaboração da Prática Recomendada de Ensaio de Maturidade. O uso deste método é previsto nas normas brasileiras ABNT NBR 16055 e 9062, para desforma de paredes de concreto moldadas no local e de projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado, respectivamente.

O CT 401 está elaborando um texto para uso geral do método da maturidade para estimar a resistência à compressão do concreto até sete dias com base na medição contínua de temperatura do concreto por meio de termopares. Esta aplicação deve: reduzir o tempo para desforma de elementos

estruturais ou o consumo de cimento quando mantido o prazo de desforma; reduzir o tempo para a protensão; e reduzir a variabilidade dos resultados de ensaios de controle tecnológico do concreto.

O professor da Universidade Federal de Minas Gerais, Aécio Lira, descortinou um novo cenário para o controle da qualidade de obras civis - o monitoramento 24/7 baseado em telemetria, ciência de dados, internet das coisas e inteligência artificial. Com a facilidade atual de importação de sensores para medir deslocamento, velocidade, inclinação e aceleração e seu cadastramento em plataformas de serviço de telecomunicação do tipo "Long Range Wide Area Network", que cobre atualmente cerca de 300 cidades brasileiras, tornou-se possível acompanhar remotamente, de duas em duas horas, o comportamento de uma obra e, assim, dizer se tudo está ou não conforme o projetado.

Com base numa prova de conceito de implantação de três sensores em três viadutos de Belo Horizonte, a prefeitura lançou recentemente um edital para monitorar 20 viadutos na cidade.

Por sua vez, o engenheiro da Sika, Fernando Brazão Ozéias, explicou os principais conceitos e metodologias por trás da impressão 3D de estruturas de concreto, suas vantagens e desafios. Ele projetou uma economia de até 30% no custo final da obra com a impressão 3D ao ser questionado por participante no debate final com os palestrantes, mediado pelo presidente do IBRACON, Eng. Julio Timerman.



Momento de debates com os palestrantes, mediado pelo presidente do IBRACON, Júlio Timerman

HACBAC 2025

O 6º Congresso Ibero-Americano de Betões Especiais vai ocorrer nos dias 18 e 19 de setembro, no Instituto Superior de Engenharia da Universidade do Algarve, em Faro, Portugal.

Organizado pela Universidade do Algarve, Laboratório Nacional de Engenharia de Portugal (LNEC), Universidade Politécnica da Valência e Universidade de Cádiz, o evento vai abordar os concretos

especiais, suas aplicações, sua normalização e o uso de inteligência artificial, entre outros temas.

Mais informações:

<https://hacbac2025.ualg.pt/>

Conpat 2025

O XVIII Congresso Iberoamericano de Patologia da Construção e o XX Congresso de Controle da Qualidade da Construção será realizados em Madri, na Espanha, de 24 a 26 de setembro.

Organizados pela Associação Latinoamericana de Controle da Qualidade, Patologia e Recuperação da Construção (Alconpat International), os eventos vão abordar as melhores estratégias e tecnologias para o setor construtivo,

apresentando conferências e estudos de caso.

Inscrições estão abertas.

Mais informações:

<https://www.ietcc.csic.es/conpat-2025/>

Degrada 2025

O 6º Encontro Luso-Brasileiro de Degradação em Estruturas de Concreto, para debater os mecanismos, a prevenção, a mitigação e o

monitoramento da degradação de estruturas de concreto, vai acontecer na Universidade de Aveiro, Portugal, de 1 a 3 de outubro.

As inscrições para o evento estão abertas.

Acesse:

<https://degrada2025.web.ua.pt/>

PRÁTICA RECOMENDADA IBRACON
CONCRETO AUTOADENSÁVEL

COMITÊ TÉCNICO CT-202



Prática Recomendada IBRACON Concreto Autoadensável

COORDENADOR Bernardo Fonseca Tutikian
SECRETÁRIO Roberto Christ

Traz para a comunidade técnica os conceitos relacionados ao concreto autoadensável, as recomendações para seleção de materiais, os métodos de dosagem, os procedimentos de mistura, as recomendações para a aceitação do concreto no estado fresco e para seu transporte, lançamento e rastreamento

A obra é resultado do trabalho do Comitê Técnico IBRACON sobre Concreto Autoadensável (CT 202), voltando-se aos profissionais que lidam com a tecnologia do concreto autoadensável nos canteiros de obras, nas indústrias de pré-fabricados, nos laboratórios de controle tecnológico e nas universidades.

DADOS TÉCNICOS

ISBN / ISSN: 978-85-98576-25-1

Edição: 1ª edição

Formato: Eletrônico

Páginas: 78

Acabamento: Digital

Ano da publicação: 2015

Patrocínio

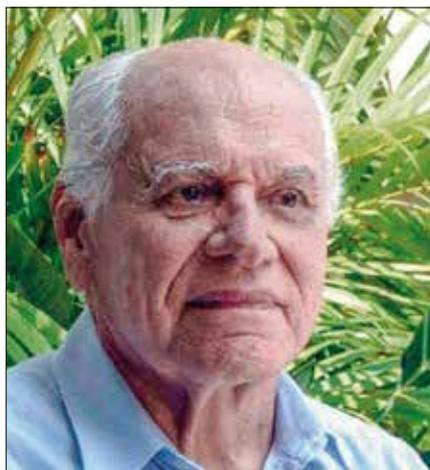


Augusto Carlos de Vasconcelos é nomeado para a **Láurea ao Mérito do Sistema Confea/Crea**

O Instituto de Engenharia indicou o nome do Engenheiro Civil Augusto Carlos de Vasconcelos para ser homenageado com a Láurea ao Mérito do Sistema Confea/Crea, com inscrição no Livro do Mérito. A proposta partiu do presidente José Eduardo Jardim e foi encaminhada ao CREA-SP pelo conselheiro Vinicius Caruso, representante do Instituto na Câmara Especializada de Engenharia Civil.

O nome de Vasconcelos foi aprovado em mais quatro instâncias: a Comissão do Mérito Paulista, o Plenário do CREA-SP, a Comissão Federal do Mérito e o Plenário do CONFEA, estes dois últimos sediados em Brasília (DF).

Associado ao Instituto de Engenharia desde 1948, Vasconcelos formou-se em Engenharia Civil pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo nesse mesmo ano. Foi professor do Departamento de Estruturas da Poli-USP e da Escola de Engenharia Mackenzie. Atuou de forma



pioneira na implantação do sistema de concreto pré-moldado no Brasil. Manteve, por mais de três décadas, um escritório de cálculo estrutural que serviu de escola para diversos engenheiros.

Em 1993, recebeu do Instituto de Engenharia o título de Eminent Engen-

heiro do Ano. Vasconcelos faleceu em 25 de dezembro de 2020, aos 98 anos, deixando relevante contribuição ao campo da engenharia estrutural. Mesmo em idade avançada, seguia atuando como engenheiro consultor. Foi sócio ativo do Instituto e um dos principais membros da Divisão Técnica de Estruturas.

A Láurea ao Mérito do Sistema Confea/Crea é uma homenagem póstuma concedida a engenheiros que tenham contribuído de maneira significativa para a valorização profissional e o desenvolvimento socioeconômico, tecnológico e sustentável do País.

A cerimônia de inscrição do nome do Prof. Augusto Carlos de Vasconcelos ocorrerá durante a 80ª Semana Oficial da Engenharia e da Agronomia (SOEA), que será realizada entre os dias 6 e 9 de outubro de 2025, em Vitória (ES).

*COM INFORMAÇÕES DE VINICIUS CARUSO



GUIA DE PREVENÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO PRÁTICA RECOMENDADA IBRACON



COMITÊ TÉCNICO - CT-201
Coordenador: Cláudio Sbrighi Neto
Secretário: Eduardo Brandau Quitete

Guia de Prevenção da Reação Álcali-Agregado

COORDENADORES

Cláudio Sbrighi Neto, Eduardo Brandau Quitete
e Arnaldo Forti Battagin

Apresenta de forma didática a sequência de ações necessárias para a prevenção da reação álcali-agregado (RAA). São abordadas generalidades da RAA, avaliação de risco de sua ocorrência, medidas preventivas, classificação da ação preventiva, ensaios laboratoriais, medidas de mitigação e a tomada de decisão.

O trabalho é resultado das discussões ocorridas no **Comitê Técnico de Reação Álcali-Agregado do IBRACON (CT-201)** e seu lançamento segue a recente publicação das sete partes da norma **ABNT NBR 15577 Agregados – Reatividade álcali-agregado**.

DADOS TÉCNICOS

ISBN: 978-85-98576-31-2
Formato: 18,6 x 23,3cm
Páginas: 32

PATROCÍNIO



Aquisição: Acesse a Loja Virtual do IBRACON.

www.ibracon.org.br

Pavimento Urbano de Concreto

O curso apresenta os procedimentos de projeto, orçamento, escolha e dosagem de materiais, execução e avaliação do Pavimento Urbano de Concreto (PUC).

Voltado para engenheiros, arquitetos e estudantes, o curso será ministrado pelo diretor técnico da Mixdesign,

Eng. Eduardo Tartuce, e pelo coordenador técnico da Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem (Abesc), Eng. Álvaro Sérgio Barbosa Júnior.

O curso será realizado em diferentes cidades e datas, e conta com 15 créditos do Programa MasterPEC:

- ▶ 16 e 17 de setembro - Balneário Camboriú
- ▶ 28 e 29 de outubro - Curitiba (66º Congresso Brasileiro do Concreto)
- ▶ 18 e 19 de novembro - Goiânia

Mais informações:

<https://site.ibracon.org.br/educacao-continuada/calendario-de-cursos-2025/>

Monitoramento da Saúde Estrutural

O curso vai apresentar o paradigma de reconhecimento de padrões estatísticos no monitoramento do estado de conservação de estruturas, que auxilia na identificação de processos de deterioração e no gerenciamento da integridade estrutural com base em riscos.

Com carga de 20 horas, o curso terá aulas remotas e presenciais. As aulas remotas, que ocorrerão nos dias 21 e 23 de outubro, e 4 de novembro, vão in-

troduzir os conceitos de monitoramento da saúde estrutural. Já, as aulas presenciais, que acontecerão nos dias 27 e 28 de outubro, em Curitiba, focarão em trazer a teoria para a prática profissional. Os instrutores são: Eloi Figueiredo, professor de monitoramento da saúde estrutural na Lusófona University; Ionut Moldovan, pesquisador do projeto INTENT, financiada pela Fundação Portuguesa de Ciência; Samuel da Silva, professor da UNESP-Ilha Solteira, com

trabalhos na área de monitoramento de saúde estrutural; Michael Faber, professor de gerenciamento de riscos, resiliência e sustentabilidade no ambiente construído na Lusófona University; e Túlio Bittencourt, professor da Escola Politécnica da USP, com trabalhos na área de análise experimental e monitoramento de estruturas.

Mais informações:

<https://site.ibracon.org.br/educacao-continuada>

PRÁTICA RECOMENDADA IBRACON/ABECE
CONTROLE DA QUALIDADE DO
CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS



COMITÊ 303: Materiais não convencionais para Estruturas de Concreto, Fibras e Concreto Reforçado com Fibras

GT4: Caracterização de materiais não convencionais e fibras para reforço estrutural

Coordenador: Eng. Marco Antonio Carnio
 Representante CTA: Sofia Maria Camato Dias

ABECE **IBRACON**

PRÁTICA RECOMENDADA IBRACON/ABECE

Controle da qualidade do concreto reforçado com fibras

Elaborada pelo *CT 303 – Comitê Técnico IBRACON/ABECE sobre Uso de Materiais não Convencionais para Estruturas de Concreto, Fibras e Concreto Reforçado com Fibras*, a Prática Recomendada “Controle da qualidade do concreto reforçado com fibras” indica métodos de ensaios para o controle da qualidade do CRF utilizado em estruturas de concreto reforçado com fibras e estruturas de concreto reforçado com fibras em conjunto com armaduras.

A Prática Recomendada aplica-se tanto a estruturas de placas apoiadas em meio elástico quanto a estruturas sem interação com o meio elástico.

AQUISIÇÃO

www.ibracon.org.br (Loja Virtual)

DADOS TÉCNICOS

ISBN: 978-85-98576-30-5

Edição: 1ª edição

Formato: eletrônico

Páginas: 31

Acabamento: digital

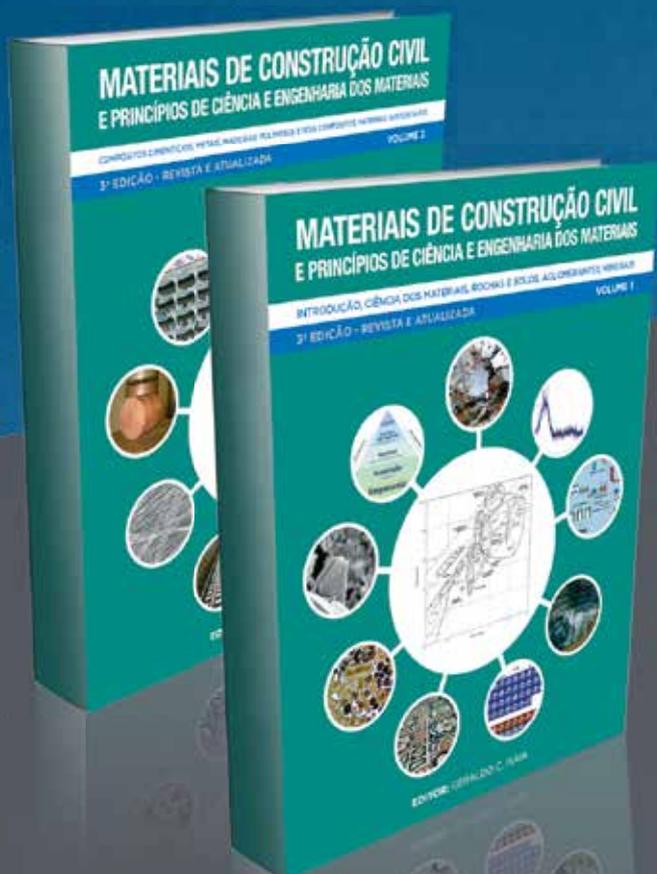
Ano da publicação: 2017

Coordenador: Eng. Marco Antonio Carnio

Patrocínio



O *best seller* da engenharia de materiais de construção não pode faltar na sua biblioteca!



Ficha Técnica
ISBN / ISSN: 978-85-98576-27-5
Edição: 3ª edição
Páginas: 1760
Formato: 18,6 x 23,3 cm
Acabamento: Capa Dura
Ano de Publicação: 2017
Peso: 6,5 Kg

O livro “Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais” é a mais completa fonte de consulta para estudantes, professores e profissionais da engenharia.

Dividido em dois volumes, o livro é composto por 52 capítulos escritos por 86 reconhecidos especialistas brasileiros, totalmente referenciado nas normas brasileiras vigentes e de acordo com as práticas nacionais da mais alta qualidade da engenharia civil em vigor.

Garanta seus exemplares!
Acesse a Loja Virtual do IBRACON
www.ibracon.org.br

Regional de Minas Gerais realiza encontro

A Regional de Minas Gerais, sob nova direção, realizou o Primeiro Encontro de Tecnologia do Concreto, no último 5 de agosto, em Poços de Caldas, com a participação do presidente do IBRACON, Eng. Julio Timerman, que nomeou oficialmente os novos diretores regionais: Ricardo Bento, professor da PU-C-MG; Lucca Grandinetti, diretor da Verti Consultoria; e Allyson Schiavinato, superintendente técnico da Supermix.

O I Encontro de Tecnologia do Concreto contou com a presença de 85 profissionais. O Prof. Ricardo Bento abordou o tema da sustentabilidade na construção civil, com foco na análise do ciclo de vida. O Eng. Lucca Grandinetti

discorreu sobre processos e metodologias para o desenvolvimento de produtos sustentáveis na construção. O Prof. Paulo Helene, vice-presidente do IBRACON, mostrou tratou do controle tecnológico do concreto. Já, Silvir Vital, CEO da Concrelongo, empresa de serviços de concretagem que foi patrocinadora do Encontro,

abordou a gestão de concreteiras ao longo de 25 anos da empresa.

As palestras buscaram abordar as inovações tecnológicas, a importância do controle tecnológico do concreto e os desafios para o concreto para construção de um mundo sustentável e resiliente.



Julio Timerman nomeia os diretores regionais de Minas Gerais, Ricardo Bento (à sua esquerda) e Lucca Grandinetti, acompanhado pelo vice-presidente, Paulo Helene

Regional do Rio Grande do Sul na Fenadoce

No último dia 16 de julho, a Regional do IBRACON no Rio Grande do Sul participou do Dia da Construção na Fenadoce, juntamente com a Associação dos Engenheiros e Arquitetos de Pelotas-RS, compartilhando experiências, cases e soluções que estão transformando a engenharia no Brasil.

A Fenadoce é organizada pela Câmara de Dirigentes Lojistas de



Eng. Jonathan Kebhard representando a Diretoria Regional RS no evento

Pelotas desde 1986 e recebe expositores de todo o estado.

A Regional promoveu mais um evento técnico do IBRACON na Estrada Gaúcha, em 27 de agosto, em Caxias do Sul, com palestras trazendo as novidades na execução de pisos industriais, que contou com patrocínio da Belgo Arames, MC e Votorantim Cimentos, e apoio da Universidade de Caxias do Sul e da ABESC.

Livro

CONCRETO: Ciência e Tecnologia



A publicação aborda os **componentes do concreto**, seu **comportamento no estado fresco e endurecido**, e abrange as **inovações na ciência do concreto**, como **dosagem, confecção e durabilidade**.

Com **2055 páginas**, divididas em **dois volumes**, o compêndio foi escrito por **65 especialistas brasileiros**, sendo voltado para pesquisadores, estudantes de engenharia civil, arquitetura e urbanismo, profissionais que atuam no setor de construção civil.

ISBN / ISSN: 978-65-89675-00-6

Edição: 3ª edição

Páginas: 2055

Formato: 15,7 x 23cm

Acabamento: capa dura

Ano de Publicação: 2022

Coordenadores:

Bernardo Tutikian

Fernanda Pacheco

Geraldo Isaia e

Inês Battagin



Instituto Brasileiro do Concreto

Organização técnico-científica nacional de defesa e valorização da engenharia civil

Fundado em 1972, seu objetivo é **promover e divulgar conhecimento sobre a tecnologia do concreto e de seus sistemas construtivos para a cadeia produtiva do concreto**, por meio de publicações técnicas, eventos técnico-científicos, cursos de atualização profissional, certificação de pessoal, reuniões técnicas e premiações.

Associe-se ao IBRACON! Mantenha-se atualizado!

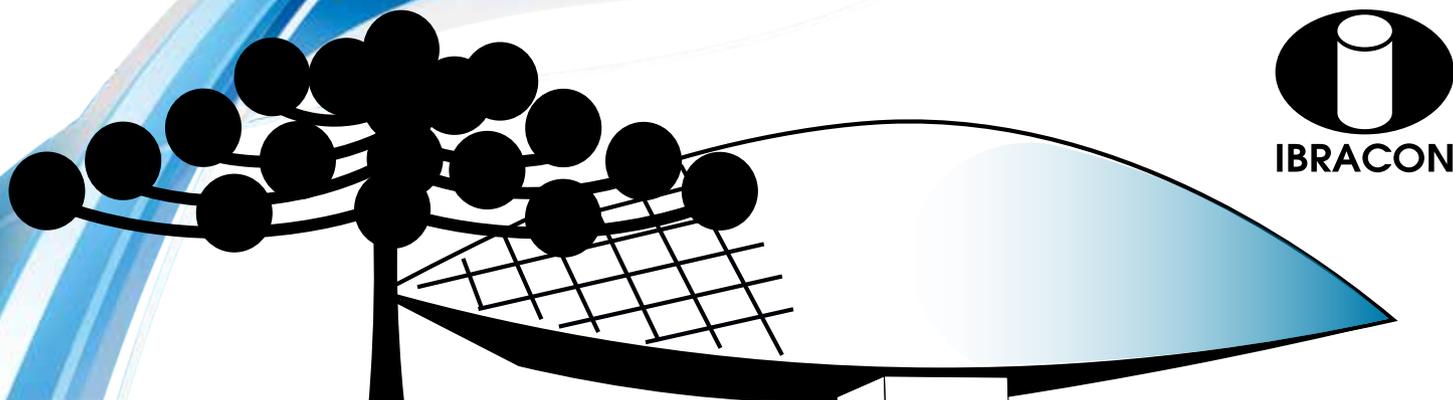
- Receba gratuitamente as quatro edições anuais da revista **CONCRETO & Construções**
- Tenha descontos de até **50%** nas **publicações técnicas do IBRACON** e de até **20%** nas **publicações do American Concrete Institute (ACI)**
- Descontos nos eventos promovidos e apoiados pelo **IBRACON**, inclusive o **Congresso Brasileiro do Concreto**
- Oportunidade de participar de **Comitês Técnicos**, intercambiando conhecimentos e fazendo valer suas **opiniões técnicas**

Fique bem informado!

 www.ibracon.org.br

 facebook.com/ibraconOffice

 twitter.com/ibraconOffice



66^o CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO

CURITIBA 2025

28 a 31 de Outubro

**Concreto: o material do passado,
do presente e do futuro**

PATROCÍNIO E EXPOSIÇÃO

- Estreite relacionamentos na Feira Brasileira da Construção em Concreto
- Associe sua marca ao maior evento técnico-científico sobre o concreto no país
- Apresente o que sua empresa vem fazendo em P&D&I no Seminário de Novas Tecnologias

PROGRAMAÇÃO

- Conferências com especialistas internacionais
- Seminários sobre temas emergentes
- Sessões técnico-científicas
- Cursos de qualificação profissional
- Concursos estudantis