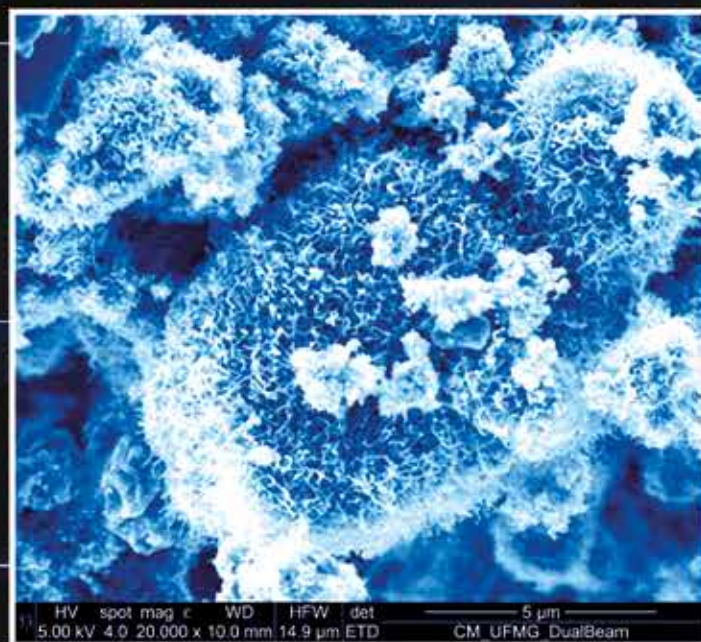
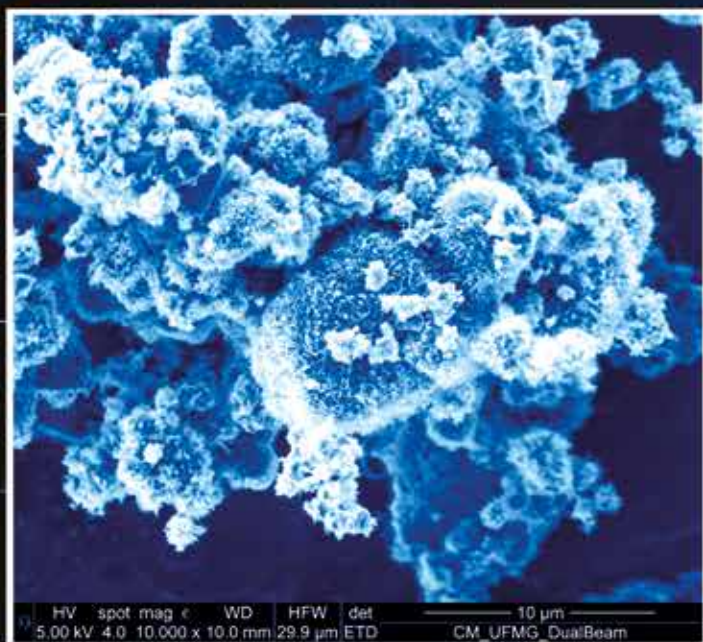




CONCRETOS COM LIGANTES ALTERNATIVOS

RESULTADOS PROMISSORES DE PESQUISAS SOBRE CONCRETOS COM CIMENTOS ÁLCALI-ATIVADOS, RESÍDUOS CIMENTÍCIOS E CLÍNQUER NANOESTRUTURADO



PERSONALIDADE ENTREVISTADA

MARISTELA GOMES: CONCILIANDO
SUSTENTABILIDADE E
DURABILIDADE DO CONCRETO

NORMALIZAÇÃO TÉCNICA

GESTÃO DE CICLO
DE VIDA NO
fib MODEL CODE 2020

MANTENEDOR

EFC: EARTH
FRIENDLY CONCRETE

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

ADITIVOS



BUILDING TRUST



QUÍMICA INDUSTRIAL

ARMADURA



ADIÇÕES



EQUIPAMENTOS



ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO



Instituto de Pesquisas Tecnológicas



ESCRITÓRIOS DE PROJETOS



PROTENSÃO



JUNTE-SE A ELAS

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

PRE-FABRICADOS



CONTROLE TECNOLÓGICO



CONCRETO



FIBRAS



HAIZER



FÓRMAS



GOVERNO



EVENTOS



CIMENTO



PESQUISA E DESENVOLVIMENTO

17 Retração, fluência e propriedades mecânicas de concretos produzidos com nanotubos de carbono sintetizados diretamente sobre clínquer

26 Resíduos Cimentícios Carbonatados: Aplicações como Adições

32 Reação álcali-agregado em cimentos álcali-ativados: avaliação por métodos tradicionais e alternativos



37 Blocos leves de vedação em material álcali-ativado com EPS: avaliação física, mecânica e viabilidade técnica

NORMALIZAÇÃO TÉCNICA

49 Estratégias de projeto para concretos com adições minerais: A ruptura do controle da resistência à compressão aos 28 dias e a Gestão de Ciclo de Vida no fib Model Code 2020



ENTENDENDO O CONCRETO

61 Agentes Ligantes Para Concretos Refratários: uma breve revisão da literatura



CAPA

MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DO CLÍNQUER NANOESTRUTURADO.

CRÉDITO: RODRIGUES *et al.* (2026)

Seções

- 5** EDITORIAL
- 7** COLUNA INSTITUCIONAL
- 8** CONVERSE COM O IBRACON
- 10** PERSONALIDADE ENTREVISTADA: MARISTELA GOMES
- 44** MANTENEDOR
- 56** ENTIDADES DA CADEIA
- 66** ENCONTROS E NOTÍCIAS
- 70** 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. Bernardo Fonseca Tutikian

JORNALISTA RESPONSÁVEL

→ Fábio Luís 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



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

CÉSAR HENRIQUE SATO DAHER
DIRETOR 2º SECRETÁRIO

NELSON COVAS
DIRETOR 1º TESOUREIRO

PAULA LACERDA BAILLOT
DIRETORA 2ª TESOUREIRA

CARLOS AMADO BRITZ
DIRETOR TÉCNICO

MAURÍCIO BIANCHINI
DIRETOR DE RELAÇÕES INSTITUCIONAIS

ELYSON ANDREW POZO LIBERATI
DIRETOR DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO

BERNARDO FONSECA TUTIKIAN
DIRETOR DE PUBLICAÇÕES

TÚLIO NOGUEIRA BITTENCOURT
DIRETOR DE EVENTOS

JÉSSICA MARIANA PACHECO MISKO
DIRETORA DE CURSOS

PATRICIA FALCÃO BAUER LOURENÇO GASPARIAN
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 — Villa Lobos Office Park
05319-000 - Vila Hamburguesa — São Paulo - SP — Tel. (11) 3735-0202

PRESIDENTE DO COMITÊ EDITORIAL

Fernanda Pacheco

COMITÊ EDITORIAL MEMBROS

- Elyson Liberaty (Estruturas e Materiais Não Convencionais)
- Fabiano Ferreira Chotoli (Qualidade e Desempenho)
- Geilma Vieira (Concreto e Durabilidade)
- Hinoel Zamis Ehrenbring (Concreto e Durabilidade)
- Manfredo Belohuby (Cimentos e Aditivos)
- Paulo Helene (Estruturas de Concreto)

→ Raduan Krause Lopes (Cimentos e Aditivos)

→ Ricardo Couceiro Bento (Projeto Estrutural)

→ Sandra Bertocini (Concreto e Durabilidade)

→ Vinicius Kayser Ortolan (Estruturas e Materiais Não Convencionais)

PRESIDENTE DO COMITÊ CIENTÍFICO

Elaine Pavei

COMITÊ CIENTÍFICO MEMBROS

- Angélica Koppe (IPOG)
- Bárbara Jordani (UNIAVAN)

→ Bruna Manica Lazzari (PUCRS)

→ Edna Possan (UNILA)

→ Fernanda Lamego Guerra (UFRGS)

→ Gláucia Dalfré (UFSCAR)

→ Marcelo H. F. de Medeiros (UFPR)

→ Margot Fabiana Pereira (UFSCAR)

→ Mariana Posterli (UFMT)

→ Roberto Christ (UNISINOS)

Descarbonização na construção civil: a revolução dos ligantes alternativos

Caro leitor,



S seja bem-vindo à edição número 122 da Revista CONCRETO & Construções, dedicada aos avanços em ligantes alternativos. Este volume reúne uma cuidadosa seleção de artigos que representam o estado da arte das pesquisas brasileiras, investigando desde a microestrutura de matrizes álcali-ativadas, passando pelos aspectos relacionados com a durabilidade de novos materiais, até a aplicação de ligantes

alternativos na produção de componentes construtivos especiais.

Nas diversas seções da edição, apresentam-se diferentes visões e perspectivas sobre a viabilidade técnica da substituição do cimento Portland por materiais alternativos. Desde a necessidade de redução de emissões de CO₂ na construção civil, passando pelo aproveitamento dos resíduos como uma estratégia para minimizar os impactos ambientais, até a normatização de parâmetros que preconiza que o valor de uma estrutura é medido pela sua capacidade de manter seu desempenho funcional com o menor impacto possível.

Na seção “Personalidade Entrevistada”, a renomada pesquisadora, professora doutora Maristela Gomes da Silva, aponta questões importantes sobre o avanço da aplicação desses materiais, principalmente no que diz respeito ao controle de qualidade dessas misturas em canteiro de obra.

Na seção “Entendendo o Concreto”, um artigo de pesquisadores da Escola de Engenharia de São Carlos, faz um levantamento das principais vantagens de uso da sílica coloidal e dos cimentos de aluminato de cálcio nas propriedades dos concretos para aplicação em altas temperaturas.

Na seção “Mantenedor”, os representantes da indústria de químicos para concreto apresentam resultados de desempenho mecânico e durabilidade dos concretos alcalinamente ativadas - “*Earth Friendly Concrete* (EFC)” -, compatíveis com os das misturas convencionais.

Na seção “Normalização Técnica”, o pesquisador da Universidade Federal de Juiz de Fora professor doutor Ricardo Bento, nos mostrou quais são as estratégias do *fib Model Code 2020* para o projeto e gestão de estruturas de concreto, integrando sustentabilidade e desempenho ao longo da vida útil ao preconizar controle da resistência em idades maiores que 28 dias. Uma leitura imperdível sobre os novos paradigmas internacionais de aspectos de projeto em consonância com parâmetros ambientais.

Na seção “Pesquisa e Desenvolvimento”, artigos científicos de diferentes regiões do país apresentam análises técnicas de reaproveitamento de resíduos industriais, avaliação de RAA em cimentos álcali-ativados, comportamento de clínquer nanoestruturado, e viabilidade técnica de utilização de agregados leves e cimentos com ligantes alternativos na produção de blocos de concreto para vedação. Esses artigos ajudam a consolidar um arcabouço de referências teóricas robustas, que servem de exemplo para o avanço da pesquisa e o desenvolvimento de novas patentes no cenário nacional.

Diante desse panorama apresentado para esta edição, observa-se que o cenário das pesquisas brasileiras sobre ligantes alternativos é altamente dinâmico, cientificamente maduro e com potencial para ser impulsionado pela economia circular, embora enfrentem o desafio da transição dos laboratórios de pesquisa para uma escala comercial. O país exerce um papel de protagonismo quando o assunto é descarbonização, dado seu papel de relevância nos debates climáticos globais (como a COP30, por exemplo). Com isso, o desenvolvimento de materiais cimentícios de baixa emissão de carbono ganha relevância.

A indústria da construção civil enfrenta seu maior dilema histórico: continuar crescendo para atender à urbanização ou reduzir drasticamente sua pegada ecológica. O cimento Portland, embora seja um grande protagonista do mundo moderno, responde por cerca de 8% das emissões globais de CO₂. Diante da inegável existência de fenômenos climáticos extremos, a transição para ligantes alternativos não é mais uma escolha ecológica; mas sim, uma necessidade de sobrevivência.

Os cimentos álcali-ativados (CAAs) lideram essa transformação. Ao substituir o clínquer por precursores como escórias de alto-forno, cinzas da casca de arroz, cinzas do bagaço de cana, metacaulim, entre outros resíduos industriais, esse processo fecha o ciclo da economia circular. Pois transforma

passivos ambientais industriais em infraestrutura de alta performance e alto valor agregado. O resultado é um material que possibilita a redução de até 80% nas emissões de carbono, com alta resistência mecânica, superior durabilidade e uma excelente barreira aos ataques químicos como sulfatos e ácidos.

Apesar do potencial apresentado, de forma disruptiva e de vanguarda, a transição para essa matriz de baixo impacto esbarra em barreiras práticas e alguns desafios. Os ativadores químicos utilizados nas misturas são substâncias concentradas que exigem cuidados rigorosos no manuseio. Isso eleva os condicionantes de segurança no canteiro de obras e os aspectos de logística, fiscalização e controle de qualidade tecnológica são elevados ao grau máximo de planejamento e logística. Além disso, a variabilidade da composição química dos resíduos industriais torna mais difícil o controle de padronização dos produtos para comercialização em larga escala. As normas técnicas atualmente existentes, pensadas para o cimento Portland convencional, também representam um fator complicador no registro de novas patentes do produto, pois são baseadas no desempenho e composição química do cimento tradicional, dificultando a homologação de ligantes 100% livres de clínquer.

Contudo, o caminho para o sucesso da utilização dos ligantes alternativos depende da sinergia entre academia, que desenvolve

pesquisas avançadas e respondem pela viabilidade técnica do produto com rigor científico; da indústria química, que precisa popularizar o uso dos ativadores e viabilizar produtos menos agressivos e com preços mais acessíveis (produtos como silicato e hidróxido de sódio e potássio, por exemplo, ainda pesam na composição orçamentária quando comparados com o cimento Portland); dos governos e órgãos regulamentadores, no sentido de criar políticas públicas de incentivos fiscais para materiais de baixo carbono. A descarbonização já é uma realidade nos laboratórios e centros de pesquisa do Brasil, haja vista a qualidade técnica e científica dos artigos publicados nesta edição 122. O próximo passo é consolidá-la como especificações técnicas de projetos de engenharia em nossas cidades.

Esperamos que este volume possa trazer reflexões para o setor com a temática apresentada. Os estudos e conteúdos trazidos nesta edição não apenas elevam o rigor científico do setor, mas propõem soluções práticas para uma transição escalada para a descarbonização da indústria. Trata-se de uma leitura indispensável para pesquisadores, empresas, poder público e tomadores de decisões que buscam liderar a transição sustentável no país.

GEILMA LIMA VIEIRA
EDITORA ASSOCIADA

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://lojaibracon.org.br>

Publicações técnicas: disseminando soluções para os desafios do nosso tempo

Prezados colegas do IBRACON,



É com grande honra e senso de responsabilidade que assumi a Diretoria de Publicações do Instituto Brasileiro do Concreto para este ano. Agradeço sinceramente a confiança depositada em meu nome para exercer esta função, um convite direto do Prof. Júlio Timerman, nosso Diretor Presidente, e estou

ciente da importância estratégica que as publicações do IBRACON possuem para a disseminação do conhecimento técnico e científico, para a valorização da engenharia nacional e para o fortalecimento da comunidade do concreto.

Ao longo deste período, pretendo dedicar esforços para ampliar a visibilidade, o alcance e o impacto das publicações do Instituto, fortalecendo ainda mais sua relevância junto à academia, aos profissionais da indústria - projetistas, tecnólogos, construtores e gestores públicos. Entre as principais diretrizes de trabalho para o ano corrente, destacam-se:

- ▶ Consolidar a excelência técnica e científica das publicações do IBRACON, mantendo elevados padrões de qualidade editorial e de avaliação por pares;
- ▶ Ampliar a internacionalização das revistas e publicações técnicas, buscando maior inserção em bases de dados e índices de relevância mundial;
- ▶ Incentivar a submissão de trabalhos inovadores relacionados à sustentabilidade, descarbonização,

durabilidade, digitalização, inteligência artificial aplicada à construção e novos materiais;

- ▶ Aproximar ainda mais a produção científica das demandas da prática profissional, promovendo a transferência de conhecimento entre universidades, centros de pesquisa e setor produtivo;
- ▶ Valorizar o trabalho dos editores, revisores e colaboradores, cuja dedicação voluntária é essencial para o sucesso das publicações do Instituto;
- ▶ Explorar novas estratégias de divulgação e comunicação, ampliando o acesso ao conhecimento produzido e publicado pelo IBRACON.

Vivemos um momento de grandes transformações para a engenharia e para a construção civil. Temas como sustentabilidade, economia circular, resiliência das estruturas e redução das emissões de carbono exigem respostas técnicas robustas e baseadas em evidências. Nesse contexto, as publicações do IBRACON têm papel fundamental na disseminação de soluções, boas práticas e avanços científicos que contribuam para o desenvolvimento do setor.

Reitero meu agradecimento à Diretoria e aos associados pela confiança recebida. Conto com o apoio de todos para que possamos, juntos, fortalecer ainda mais o papel do IBRACON como referência nacional e internacional na produção e difusão do conhecimento sobre concreto e construção.

Atenciosamente,

PROF. BERNARDO TUTIKIAN, UNISINOS
DIRETOR DE PUBLICAÇÕES - IBRACON

PERGUNTAS TÉCNICAS

ENVIE SUA PERGUNTA PARA O E-MAIL:

fabio@ibracon.org.br

CONTROVÉRSIAS SOBRE O MÓDULO DE ELASTICIDADE

Um dado que tem me preocupado muito é a utilização de módulo de elasticidade, utilizando a equação da NBR 6118: $5600 \cdot f_{ck}$. Ocorre que este é o parâmetro indexado nos programas de cálculo que utilizamos no Brasil, mas, na prática, não se consegue esta correlação com os concretos de mercado. Como as características dos materiais na composição do concreto influenciam muito e existe uma grande variação regional, o ideal seria fazer um movimento para, em cada região, as concreteiras testarem e divulgarem para os projetistas qual o valor confiável, com o qual poderíamos contar para avaliação das deformações.

Estamos sofrendo bastante com o comportamento, diferente do calculado, para estruturas com balanços de até 5 m. Acredito que parte do mau desempenho se deva às condições de execução e cura mal feita, variação climática, posição da armadura, etc. Quando enfatizada a questão do módulo, o preço aumenta e aparecem dificuldades no fornecimento, sinal de que não é dada a devida atenção a esta característica nas concreteiras. E só para finalizar, em Camboriú, na construção dos edifícios altos que estão sendo executados lá, apenas uma pedreira da região consegue fornecer o agregado com as características exigidas em projeto.

JORGE LUIZ SCHREIBEIR

SCHREIBEIR ENGENHARIA

O Jorge levantou um problema bem interessante e atual. A norma ABNT NBR 6118 sugere um modelo simplificado para o cálculo do módulo quando não se dispõem de ensaios e resultados daquele concreto. A norma também prescreve coeficientes minoradores (0,7 a 1,0), ou seja, dependendo da natureza petrográfica do agregado e lembrando que quanto mais fluido o concreto, quanto mais argamassado, quanto menor a dimensão máxima do agregado graúdo, ou seja, quanto mais “gostoso/fácil” de trabalhar com o concreto, menor será o módulo para um mesmo f_{ck} .

Minha sugestão pessoal, na ausência de resultados de ensaio, o projetista deve ser pragmático e adotar sempre o coeficiente 0,85, pois assim vai acertar na maioria dos casos.

A controvérsia não é nova. Em 2007, o IBRACON organizou o Painel de Assuntos Controversos — Módulo de Elasticidade: mitos e realidades — no 49º Congresso Brasileiro do Concreto, em Bento Gonçalves. A principal polêmica levantada e discutida foi se as equações empíricas da ABNT NBR 6118 são adequadas para refletir o comportamento do concreto feito com os materiais disponíveis nas diferentes regiões do país.

Apesar das alegações de discrepância, a norma ABNT NBR 6118 acabou de ser revisada e manteve as estimativas para os valores de módulo de elasticidade, preservando os mesmos coeficientes da versão de 2014. Pode-se concluir que, para os profissionais que colaboraram com a revisão de 2023, as equações de estimativa do módulo de elasticidade espelham bem e com segurança o comportamento dos concretos do Brasil.

A ABNT NBR 6118 e a ABNT NBR 8522 admitem o comportamento elástico-linear do concreto, a despeito desse comportamento não ser observado na realidade. A elasticidade do concreto pode ser grosseiramente admitida, até o limite de 30% da sua tensão de ruptura (f_{cj}).

A explicação do comportamento elástico, viscoelástico e plástico do concreto está na sua microfissuração progressiva sob cargas. As microfissuras causadas na interface entre o agregado e a pasta permanecem estáveis somente até cerca de 30% da tensão de ruptura dos concretos usuais e podem ser mais estáveis com o aumento do f_{ck} do concreto.

Por conseguinte, o diagrama que relaciona a tensão e a deformação é quase linear até cerca de 30% e, por essa razão, define-se, para fins de ensaio o módulo tangente inicial E_{ci} como aquele correspondente a uma carga de $0,3 \cdot f_{ck}$ (ABNT NBR 8522).

É por meio dessa “simplificação” que se torna possível associar facilmente cargas a deformações de elementos estruturais de concreto e, assim, determinar a rigidez das peças (deformação lenta e flechas em vigas e lajes) e a estabilidade global da estrutura.

Concluindo, nem a curva tensão-deformação nem o módulo de elasticidade do concreto refletem o comportamento real da estrutura ou do elemento estrutural, pois assumem não haver armadura nem fissuração, no entanto, essas abstrações são consentidas e praticadas como seguras para o dimensionamento e previsão do comportamento da estrutura.

É inerente ao ensaio estático do módulo prescrito na norma ABNT NBR 8522 apresentar uma grande variabilidade intrínseca de ensaio no mesmo laboratório e entre laboratórios. Pragmaticamente, devido à complexidade e dificuldade do ensaio que acarreta variabilidades grandes nos resultados, este autor, defende que resultados de ensaio dentro de uma margem de mais ou menos 20% do valor especificado no projeto estrutural, devem ser aceitos como normais e conformes. Essa é também a posição dos americanos conforme consta no texto da norma ACI 318.

Resumindo, o ensaio estático normatizado é limitado pela complexidade, custo e baixa exatidão. As dificuldades do ensaio estático causam prejuízos e inibem o controle rotineiro dessa propriedade. Por essa razão, hoje já é possível medir o módulo de elasticidade por ensaio não destrutivo,

método dinâmico (ABNT NBR 8522-2), que consiste em obter frequências naturais de vibração do concreto a partir da resposta acústica do corpo de prova ao impacto de um pulsador.

“Este ensaio é não destrutivo, possibilita o uso de corpos de prova de menor dimensão e apresenta baixa dispersão dos resultados”, segundo Pedro Bilesky que realizou mestrado no tema no IPT. Os resultados indicaram que o método das frequências naturais de vibração permite estimar o módulo estático com erro médio da ordem de 7%, menor que a variabilidade dos Interlaboratoriais (12%) e que o tolerável pelo ACI-318 de 20%. Conclui-se que estimar o módulo de elasticidade estático a partir do dinâmico é tão exato quanto medir diretamente o estático.

Por outro lado, este autor considera desprezível a diferença no comportamento ELU e ELS e nos quantitativos (volumes de concreto, massa de aço, área de forma) de uma estrutura de concreto convencional de edificação até 150 m de altura.

A experiência e expectativa é de que tanto faz o módulo ser, por exemplo, 30 GPa, ou ser 24 GPa, pois o comportamento da estrutura em 50 anos de vida útil pouco se altera, até porque o módulo é medido aos 28 ou 63 ou 91 dias, e a estrutura vai ser carregada muito depois, quando o módulo já é bem maior.

Evidentemente em edifícios altos acima de 250 m, como é o caso de Camboriú corretamente citado pelo Jorge, e em obras especiais, protensão, balanços especiais, vai ocorrer alguma diferença, mas em 95% das estruturas, tanto faz como tanto fez.

Mas, em balanços, o mais comum é os operários e o engenheiro de obra que os lidera errarem na posição da armadura tracionada que deve ficar bem próxima da superfície superior da viga ou da laje e... dificilmente fica na posição correta.

Além disso, o balanço deve ser projetado e construído com redundância, ou seja, com abertura de fissura, w_k , abaixo de 0,1 mm e estágio 2 (ELS), além da armadura positiva de suspensão do peso do balanço por questões de eventual colapso.

Se projetar um balanço grande para $w_k > 0,1$ mm (ELS), adotar um módulo impossível para os agregados da região e ainda errar no detalhamento e posicionamento da armadura.... pode esperar o pior.

PAULO HELENE

PHD ENGENHARIA E VICE-PRESIDENTE DO IBRACON

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 ao 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





Maristela Gomes da Silva

Maristela Gomes da Silva é engenheira civil pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), mestre e doutora em Engenharia Civil pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), com pós-doutorado na UNICAMP, na University of Pittsburgh e na Graz University of Technology.

Com ampla formação e atuação internacional, é diretora regional do Ibracon no Espírito Santo e professora titular da UFES, onde desenvolveu e liderou pesquisas sobre o uso de resíduos industriais no concreto e em outros produtos cimentícios. Seu projeto sobre concretos e tijolos produzidos com resíduos da siderurgia ganhou o Prêmio Ecologia, em 2005.

Foi consultora e colaborou com roadmaps brasileiros para redução e neutralização das emissões de carbono pelas indústrias do cimento e do concreto.

É representante brasileira, por indicação do Ministério de Minas e Energia, em anexos da Agência Internacional

de Energia (IEA), voltados à avaliação de impactos ambientais e à implementação de edifícios com emissões zero carbono ao longo do ciclo de vida.

Atua como consultora técnica, com ênfase em tecnologia de cimento e concreto, avaliação do ciclo de vida e redução de impactos ambientais de materiais e componentes de construção.

Nesta entrevista, ela conta um pouco de sua história e avalia os caminhos para redução de impactos ambientais e emissões de carbono na cadeia do concreto.

IBRACON QUAIS FORAM SUAS MOTIVAÇÕES PARA ESCOLHER ENGENHARIA CIVIL E FAZER A PÓS-GRADUAÇÃO NA ÁREA DE MATERIAIS?

| **MARISTELA GOMES DA SILVA** | Quando se tem 17 anos, idade que tinha quando fiz minha inscrição no vestibular, em 1982, não sabia muito o que queria fazer. Sou de Cachoeiro de Itapemirim, cidade onde nasceu o Roberto Carlos, no sul do estado do Espírito Santo. Quando meu irmão mais velho entrou no curso de medicina, mudamos para Vitória. Com isso, terminei o antigo ginásio no Colégio Salesiano. Meu pai intencionava que fizesse medicina ou odontologia, apesar

de não influenciar em nenhum momento na minha escolha. Como gostava de matemática e física, entrei no curso de edificações da Escola Técnica Federal do Espírito Santo, começando minha relação com a área da Engenharia Civil, por meio das disciplinas de construção, materiais, aulas de laboratório e visitas a obras, o que determinou minha escolha pelo curso de engenharia civil, na Universidade Federal do Espírito Santo.

Naquela época, a participação das mulheres na engenharia era muito baixa. Da minha turma original, havia apenas

“

O OBJETIVO DOS ANEXOS DA IEA É
CRIAR PLATAFORMAS HARMONIZADAS
METODOLOGICAMENTE PARA REDUÇÃO DE
IMPACTOS AMBIENTAIS E PARA IMPLEMENTAÇÃO
DE EDIFÍCIOS ZERO CARBONO.

”



Pesquisas em concreto projetado realizadas na Graz University of Technology.

duas mulheres num grupo de quarenta na turma em que me formei, em 1988. Esta desigualdade se manteve quando fui exercer engenharia, quando fiz pós-graduação e quando me tornei professora, com 24 anos, na UFES. Em 2000, fui eleita a primeira diretora do Centro Tecnológico da UFES, que congrega os cursos de Engenharia e ciência da computação, cargo que exerci até 2008, em dois mandatos. Até hoje, nenhuma outra mulher foi eleita para esta função, o que reforça que ainda temos um longo caminho a trilhar para aumentar nossa

de construção, professor Fernando Lordello dos Santos Souza, teve muita influência na minha escolha, pois era meu orientador em pesquisas na UFES e iniciou o mestrado comigo na USP. Quando cheguei na USP, queria trabalhar na área de patologia e recuperação de estruturas de concreto, porque tinha uma interface com o projeto estrutural e com as pesquisas que desenvolvi na UFES no final do meu curso. Fiz uma entrevista com o professor Paulo Helene, que sugeriu que eu abraçasse o tema do concreto projetado com adição de sílica ativa, pois havia um projeto USP-CBPO sobre revestimento de túneis, no qual participaram os pesquisadores Antonio Domingues de Figueiredo, Hugo Armelin e Luiz Roberto Prudêncio Jr. Este foi o tema do meu mestrado. No doutorado, na USP, fui trabalhar no projeto coordenado pelo professor Vahan Agopyan, com participação das empresas Método Engenharia, Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST), hoje ArcelorMittal Tubarão, e Owens Corning, sobre produção de painéis de cimento sem clínquer, com escória de alto-forno com ativação química, e fibra de vidro, que foi um marco importante na minha pesquisa na área de redução de impacto ambiental e sustentabilidade na construção.

IBRACON SEU GRUPO DE PESQUISA
GANHOU O PRÊMIO ECOLOGIA 2005. CONTE
SOBRE A PREMIAÇÃO.

| **MARISTELA GOMES DA SILVA** |

Quando terminei o doutorado, em 1998, e retomei minhas atividades na UFES, coordenei um projeto sobre painéis de vedação verticais para estruturas

participação no processo decisório. Nas salas de aula do curso de engenharia civil, porém, percebo um aumento no número de mulheres e, no departamento de Engenharia Civil da UFES, hoje temos mais mulheres do que homens, o que pode indicar uma mudança de cenário nos próximos anos.

No curso de engenharia civil, eu gostava tanto da área de materiais de construção quanto da área estruturas. Assim, quando fui fazer minha inscrição na pós-graduação em 1988, fiquei em dúvida. Tanto que, quando fui admitida na pós-graduação na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo na área de engenharia de construção civil e urbana (linha de pesquisa materiais e componentes de construção), após o fim da greve em 1989, já havia sido admitida na Universidade Federal do Rio de Janeiro e na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro na área de estruturas. O professor Regner Reine Castello, meu professor e chefe do escritório de estruturas onde era estagiária, me incentivou a fazer pós-graduação em estruturas. Mas, seu irmão, e meu professor na UFES, Reno Reine Castello, me aconselhou a ir para linha de pesquisa de materiais na USP, porque viu um caminho melhor de ser explorado no futuro, o que acabou pesando muito na minha decisão. Por sua vez, o chefe do laboratório de materiais

de aço, com a CST e, no ano seguinte, preparei cinco projetos de pesquisa sobre escórias de alto-forno e escórias de aciaria, com participação de siderúrgicas e do Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), que, por meio do Fundo Verde Amarelo, administrado pela Financiadora de Estudos e Projeto (FINEP), destinava um real a fundo perdido a cada um real investido pelas empresas. Com esses projetos, desenvolvemos uma base de conhecimento científico e tecnológico para uso de escórias de alto-forno em produtos de cimento e concreto, e de escórias de aciaria para base e sub-base de estradas, tendo, inclusive, entrado com solicitação de patentes para alguns deles. Ganhamos o Prêmio Ecologia 2005 em razão do desenvolvimento do projeto de estruturas de contenção de ondas (quebra-mares) com uso de escórias de alto-forno, tanto para o aglomerante quanto para os agregados, bem como de um tijolo com resíduos de siderurgia para habitação de interesse social.

IBRACON POR QUE ESTE E OUTROS PRODUTOS DESENVOLVIDOS EM SUAS PESQUISAS NÃO GANHARAM ESCALA NO MERCADO DA CONSTRUÇÃO?

| **MARISTELA GOMES DA SILVA** | Segundo as siderúrgicas, as pesquisas desenvolvidas foram muito importantes para ampliação do mercado e aplicação da escória de alto-forno e escória de aciaria na construção civil. Pensando no avanço do conhecimento e nos interesses da sociedade, elas também contribuíram para esclarecer questões técnicas importantes e investigar alguns aspectos relacionados com os impactos ambientais, que são imprescindíveis para utilização de resíduos industriais.



Quebra-mares com uso de escórias de alto-forno desenvolvido na UFES

Mas, é inegável que o mercado de construção é conservador, particularmente quanto ao uso de resíduos industriais e urbanos. Entendo que algumas questões culturais não podem ser mudadas de um dia para outro. Acho que falta no mercado uma estratégia com marketing técnico por parte da indústria e das empresas para difusão do conhecimento e orientação/estímulo à aplicação, fundamentada em pesquisa, documentação técnica e desempenho.

IBRACON CONTE-NOS AGORA SOBRE SUAS ATIVIDADES NOS ANEXOS 57, 72 E 89 DA AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA).

| **MARISTELA GOMES DA SILVA** | Estes anexos são grupos temáticos do Programa de Energia em Edifícios e Comunidades (EBC) da Agência Internacional de Energia (IEA), constituídos por profissionais de mercado, da academia e de governos para discutirem metodologias para medir impactos ambientais de edifícios e para estimular a implementação de edifícios zero carbono: o Anexo 57 foi focado na avaliação da energia incorporada e das emissões de gases de efeito estufa na construção de edifícios; o Anexo 72 em avaliação de impactos ambientais no ciclo de vida do edifício; e o Anexo 89, por sua vez, na implementação de edifícios com emissões líquidas zero carbono em todo ciclo de vida. Seu objetivo é criar plataformas harmonizadas metodologicamente para projetistas, consultores e universidades, com diretrizes, recomendações e ações voltadas para redução de impactos ambientais de edifícios e para implementação de edifícios zero carbono. O Brasil era observador, com poder de fala, mas não de voto. Em 2022, o Ministério de Minas e Energia entendeu que era importante oficializar a participação do país na Agência Internacional de Energia e participar efetivamente dos anexos. Fui uma das indicadas para representar o Brasil nos grupos temáticos dos anexos 72 e 89. Como representante brasileira, único país da América Latina participante, busco levar as questões regionais para esses anexos, fazendo frente à visão europeia, norte-americana e asiática, que imperam nesses grupos. Alguns países europeus consideram a redução progressiva do uso do concreto em seus sistemas estruturais, substituindo-o pela madeira e pelo aço, ou pelo uso de estruturas mistas. Minha contribuição e da equipe brasileira é exatamente levar experiências de redução de emissões de carbono na indústria de cimento e do concreto no Brasil para este fórum importante de discussão, e também buscar outras alternativas.



NOSSA CONTRIBUIÇÃO NOS ANEXOS DA IEA É LEVAR EXPERIÊNCIAS BRASILEIRAS DE REDUÇÃO DE EMISSÕES DE CARBONO NA CONSTRUÇÃO CIVIL, PARTICULARMENTE NA INDÚSTRIA DE CIMENTO E CONCRETO.



“

NÃO ADIANTA FOCAR EM SUSTENTABILIDADE SEM CONSIDERAR A DURABILIDADE E VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO. NÃO ADIANTA SIMPLEMENTE REDUZIR AS EMISSÕES DE CARBONO DO CIMENTO SEM OLHAR PARA O CONCRETO DA ESTRUTURA

”

IBRACON COMO VOCÊ AVALIA O ROADMAP DA INDÚSTRIA DE CIMENTO BRASILEIRA?

| **MARISTELA GOMES DA SILVA** | Entre as rotas tecnológicas estabelecidas nesse *roadmap*, como o uso de combustíveis alternativos, a eficiência energética e a captura/uso/armazenamento de carbono, o uso de adições minerais como substitutos parciais do clínquer apresenta o maior potencial de redução de emissão de carbono, que, apesar de imprescindível, tem algumas limitações. Além disso, o *roadmap* indicou que a geração de escória de alto-forno e cinza volante não serão suficientes para atender à demanda da indústria, o que deve favorecer o crescimento do uso de filer calcário e de argila calcinada na produção de cimento. Este cenário abre espaço para prospecção de outros substitutos do clínquer, o que certamente exigirá investimentos em pesquisa e desenvolvimento, com resultados obtidos em médio e longo prazos, e que precisam considerar o concreto feito com estes cimentos.

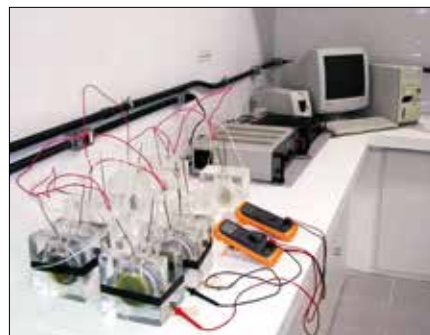
Mas, não adianta focar em sustentabilidade sem considerar a durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. Não adianta simplesmente reduzir as emissões de carbono do cimento sem olhar para o concreto da estrutura. Da mesma forma, não adianta substituir clínquer por adição mineral, sem avaliar o impacto desta substituição no desempenho, particularmente na durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. Nas regiões urbanas,

por exemplo, a carbonatação é um mecanismo de deterioração a ser considerado. Nas regiões marinhas, é importante considerar o ataque de cloretos. Um dos indicadores de eficiência ambiental é exatamente o impacto ambiental por ano de vida útil, que pode piorar com eventuais reduções na durabilidade. Ou seja, o desempenho precisa ser considerado nesta abordagem de sustentabilidade das estruturas de concreto armado e protendido. Por outro lado, ao utilizar adições minerais como substitutos do clínquer, algumas características técnicas do cimento são alteradas, o que pode dificultar o emprego e a aceitação pelo mercado. Por exemplo, dentro do cenário de mudanças climáticas, o CP III, com até 75% de escória de alto-forno em substituição ao clínquer, é o cimento com menor emissão de carbono por tonelada. Este não é, porém, o cimento mais vendido no Brasil, mas sim os cimentos compostos, com maiores teores de clínquer, ou seja, com maiores emissões específicas de carbono. Em alguns estados, inclusive, o cimento mais comercializado é o CP II F, com até 25% de filer calcário, em função da possibilidade de obtenção de maiores resistências iniciais dos concretos produzidos com estes cimentos e do elevado valor do frete das matérias-primas de outras indústrias (escória de alto-forno e cinza volante, por exemplo), que chegam na fábrica de cimento em um valor muitas vezes superior ao do clínquer.

O uso de adições minerais como substitutos do clínquer é, sem



Processo de produção de tijolo com resíduos de siderurgia para habitação de interesse social



Alguns ensaios realizados em pesquisas coordenadas pela Profª Maristela Gomes da Silva sobre concretos com elevados teores de adições minerais.

dúvida, um dos caminhos para redução do impacto ambiental da indústria de cimento e do concreto, mas a redução do teor de clínquer no cimento ainda não é aceita plenamente pelo mercado. Estas questões precisam ser exploradas nos *roadmaps* das indústrias de cimento e de concreto para uma maior eficiência das diretrizes propostas e para elaboração de planos de ações específicos que considerem toda a cadeia.

IBRACON As AVALIAÇÕES MAIS POSITIVAS DÃO CONTA QUE COM AS TECNOLOGIAS ATUALMENTE DISPONÍVEIS JÁ É POSSÍVEL ABATER QUASE 80% DAS EMISSÕES DE CARBONO NA CADEIA DO CONCRETO, ESPECIALMENTE POR CONTA DO

DESENVOLVIMENTO DE CIMENTOS COM FÍLER E ARGILA CALCINADA, COMO O LC3. VOCÊ NÃO CONCORDA COM ESTA AVALIAÇÃO?

| **MARISTELA GOMES DA SILVA** | O *roadmap* liderado pela GCCA (*Global Cement and Concrete Association*) estabelece algumas estratégias que apontam um potencial de redução de até 64% das emissões de carbono do concreto, sem fazer uso de captura/uso/armazenamento de carbono.

O potencial de redução das emissões de carbono a partir da otimização da produção do clínquer, otimização na produção de concreto com redução do consumo de cimento e utilização de outros ligantes no concreto, de forma integrada, é estimado em até 31%. Por sua vez, considerando esse *roadmap*, em torno de 36% das emissões de carbono do concreto não serão resolvidas sem o emprego de tecnologias de captura/uso/armazenamento de carbono, que ainda são muito onerosas. O *roadmap* da indústria brasileira de cimento considera o potencial de redução de até 9% das emissões com a adoção de técnicas emergentes de captura/uso/armazenamento de carbono, mas este cenário poderá dobrar o preço do cimento. Por isso, a indústria nacional de cimento aposta no uso de créditos de carbono, mais do que na captura/uso/armazenamento de carbono. Há outras variáveis a serem consideradas, como as diferenças de dosagem entre centrais de concreto e de composição e produção dos cimentos entre fabricantes. Essas diferenças fazem com que, por exemplo, o potencial de aquecimento



A INDÚSTRIA NACIONAL DE CIMENTO APOSTA NO USO DE CRÉDITOS DE CARBONO, MAIS DO QUE NA CAPTURA/USO/ARMAZENAMENTO DE CARBONO





O CIMENTO CP III TEM UM MENOR TEOR DE CLÍNQUER E UMA MENOR EMISSÃO ESPECÍFICA DE CARBONO, MAS NÃO É O CIMENTO MAIS VENDIDO NO BRASIL.



global de um concreto de 30 MPa possa variar entre 128 e 348 kg CO_{2eq}/m³, que corresponde a 1,76 t CO_{2eq} em um caminhão betoneira com 8 m³ de concreto. Esses resultados mostram a importância de considerar as variações de impacto ambiental entre fabricantes e concreteiras.

IBRACON SEU GRUPO DE PESQUISA OBTVE CIMENTOS BINÁRIOS, TERNÁRIOS E QUARTENÁRIOS COM DESEMPENHO SEMELHANTE AO LC3?

| **MARISTELA GOMES DA SILVA** | Em alguns casos, os resultados foram melhores tanto em termos de indicadores técnicos quanto ambientais. Utilizando a combinação de escória de alto-forno, argila calcinada e filer calcário, por exemplo, chegamos, em algumas situações, em cimentos com redução clínquer, mas que ainda carecem de estudos de durabilidade de longo prazo. Um estudo importante foi feito pelo professor Oswaldo Cascudo em concretos com adições minerais submetidos a envelhecimento natural por mais de 25 anos. Evidentemente, são concretos produzidos com cimentos normalizados e vendidos no mercado. No Brasil, não temos ainda nem cimentos nem normalização de cimentos ternários e quaternários, diferente da normalização europeia.

Fazer concreto com teores muito elevados de adições minerais envolve uma mudança da tecnologia de concreto, que vai desde o aditivo a ser empregado até o equipamento de mistura, que precisa ser mais eficiente, por exemplo. Isto passa também pela aceitação pelo consumidor. Por exemplo, se houver necessidade de aumento do tempo desforma pelo fato do cimento com menor teor de clínquer endurecer mais lentamente, este cimento dificilmente será empregado, a menos que o consumidor não tenha uma alternativa. Não adianta, portanto, olhar o cimento desconectado do concreto. Os benefícios da redução de emissões de carbono com o uso de adições minerais, principalmente daquelas que são resíduos e que entram apenas com os impactos ambientais decorrentes do processamento, precisam ser avaliados no contexto do concreto: de sua tecnologia, de sua aplicação e de seu comportamento em serviço.

Particularmente com relação ao LC3, o cimento CP III tem um menor teor de clínquer e uma menor emissão específica de carbono. Este cimento começou a ser fabricado no Brasil na década de 1940, sendo usado e pesquisado há mais de 80 anos, e, ainda assim, fica nas prateleiras em relação ao cimento CP II. Existe tecnologia para resolver o menor ganho de resistência inicial do CP III, que é uma das barreiras ao seu maior emprego, mas que pode encarecer o produto. O consumidor pode não querer pagar este preço até que os impactos decorrentes das mudanças climáticas sejam também considerados nesta conta.

IBRACON COMO VOCÊ AVALIA O PAPEL DOS LIGANTES ALTERNATIVOS AO CIMENTO PORTLAND PARA REDUZIR AS EMISSÕES DO SETOR CONSTRUTIVO?

| **MARISTELA GOMES DA SILVA** | Na minha tese de doutorado, pesquisei cimentos sem clínquer a partir do emprego de escória de alto-forno e um ativador químico.

Em termos de impacto ambiental, o resíduo apresenta apenas o impacto decorrente do seu processamento, já o ativador químico, empregado em pequena quantidade, tem impacto relativamente alto, que vem sendo melhorado. No entanto, o concreto com este ligante não é fácil de ser aplicado no canteiro de obras: requer misturadora de maior eficiência; o tempo de pega é diferente do concreto com cimento Portland; as reações químicas e o endurecimento podem ocasionar retração; enfim, a tecnologia do concreto é outra! Nos Estados Unidos, há alguns exemplos de aplicação em obras de infraestrutura. Novamente, insisto que o estudo do cimento não pode estar desconectado do concreto aplicado na estrutura. Ou seja, a escala de avaliação deve avançar do material cimento para o sistema estrutural em concreto armado e/ou protendido. Reduzir o impacto ambiental pode tornar o concreto um pouco mais caro por metro cúbico, mas o custo das mudanças do clima precisa entrar também na conta, bem como os custos de manutenção no ciclo de vida dos edifícios e demais construções.

IBRACON COMO VOCÊ AVALIA A CURA POR CARBONATAÇÃO NAS FASES INICIAIS DE PEGA DO CONCRETO?

| **MARISTELA GOMES DA SILVA** | No concreto não armado, a carbonatação é benéfica, porque aumenta a dureza superficial e diminui a porosidade. Já, no concreto armado, dependendo das condições de exposição, pode ser que não. Existem muitos defensores e não defensores do uso de injeção de CO₂ no concreto no mundo inteiro. Eu não tenho uma opinião consolidada,

porque não é minha área principal de pesquisa. Defendo que há várias trajetórias que podem ser exploradas para redução das emissões de carbono no concreto aplicado em edifícios e em obras de infraestrutura. No cenário de mudanças climáticas, não podemos nos dar ao luxo de esquecer nenhuma possibilidade, tomando o cuidado de investigá-la com rigor científico e transparência.

IBRACON COMO ENTIDADES TÉCNICAS, COMO O **IBRACON**, PODEM CONTRIBUIR COM A DISSEMINAÇÃO DE TECNOLOGIAS QUE TRAGAM REDUÇÕES DE EMISSÕES NA CADEIA DO CONCRETO?

| **MARISTELA GOMES DA SILVA** | O IBRACON tem papel fundamental porque é uma instituição com reconhecida competência e credibilidade. A área de Engenharia Civil tem muitos aventureiros, isto é, pessoas que não têm boa base técnica, mas que se aventuram em desenvolver tecnologia supostamente inovadora. Neste contexto, o IBRACON publica documentos técnicos que ajudam a normalização brasileira. Eu vejo o IBRACON assumindo papel de liderança, em várias situações, como quando acontecem acidentes com obras, buscando discutir suas causas e como podemos aprender com eles para que não se repitam.

IBRACON COMO VOCÊ IMAGINA O CONCRETO NO FUTURO?

| **MARISTELA GOMES DA SILVA** | Os impactos ambientais da cadeia do concreto são significativos e precisam ser considerados. A *Global Cement and Concrete Association* (GCCA) indica algumas trajetórias para a redução da emissão de

carbono do concreto, que incluem otimização da produção de clínquer, otimização do uso de outros ligantes, otimização do uso do concreto, otimização do projeto, descarbonização da eletricidade, sequestro de carbono decorrente da carbonatação natural e captura/uso/armazenamento de carbono. Na minha opinião, o futuro do concreto depende de ações alinhadas com estas trajetórias e o concreto do futuro será aquele em que estas ações resultem em sistemas estruturais mais otimizados e com menores emissões de carbono no ciclo de vida.

Acho que, no Brasil, vamos usar concreto por muito tempo, até porque algumas vantagens do concreto são inegáveis. Porém, as indústrias produtoras de aço e madeira estão trabalhando para reduzir seus impactos ambientais e seus custos de modo a se tornarem mais competitivas em relação ao concreto. No cenário europeu, há um esforço para redução das emissões de carbono da cadeia do concreto, com previsão de redução do uso de concreto para os próximos anos, ainda que isto ainda esteja nas mesas de discussão.

Acredito que no Brasil a tendência será de uso de concretos com f_{cks} maiores do que 50 MPa, quando se considera os benefícios em termos de impactos ambientais por vida útil. Para mim, o concreto de 20 ou 30 MPa não faz mais sentido neste cenário de mudanças climática. Por outro lado, o Brasil precisa melhorar a produção do clínquer para possibilitar o aumento do teor de adições minerais no cimento.

Os aditivos químicos continuarão fundamentais para a produção de concretos mais trabalháveis e com teores mais elevados de adições minerais, para otimizar as dimensões dos elementos estruturais e para reduzir o consumo de materiais. O aço para estruturas de concreto deve melhorar seu desempenho à corrosão, aumentar sua resistência mecânica e reduzir suas emissões de carbono, o que deve resultar em redução da oferta de escória de alto-forno, exigir o emprego de outras adições minerais nos cimentos, bem como estimular a produção de cimentos ternários e quaternários.

A otimização do projeto é de extrema importância para redução do consumo de materiais e do carbono incorporado na estrutura. As técnicas de captura/uso e armazenamento de carbono precisam evoluir tanto em termos de custo quanto em questões técnicas e operacionais, mas elas têm um papel fundamental em direção a sistemas estruturais de concreto zero carbono.

Entendo que esses benefícios para o concreto do futuro irão acontecer quando toda a cadeia trabalhar em conjunto para a produção de sistemas estruturais para edifícios com menos emissão de carbono ou mesmo zero carbono.

IBRACON UMA ÚLTIMA PERGUNTA: O QUE VOCÊ FAZ EM SEU TEMPO LIVRE?

| **MARISTELA GOMES DA SILVA** | Gosto de estudar, ler, pintar, cozinhar, viajar, ir ao teatro e ao cinema, e encontrar amigos e amigas para uma conversa sem pressa em um dos cafés de Vitória. Faço minhas atividades físicas pela manhã, realizo minhas consultorias e complemento com atividades que me dão prazer. Recentemente, me aposentei, após mais de 36 anos de docência na UFES e tenho um pouco mais tempo para fazer tudo isso. ☺

“

PARA MIM, O CONCRETO DE 20 OU 30 MPa NÃO FAZ MAIS SENTIDO NESTE CENÁRIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

”

Retração, fluência e propriedades mecânicas de concretos produzidos com nanotubos de carbono sintetizados diretamente sobre clínquer

LUÍSA ARAÚJO RODRIGUES - MESTRA - <https://orcid.org/0000-0002-7474-2811> - (luisaaraujorodrigues@gmail.com) – CTNano/UFMG

JOSÉ MÁRCIO FONSECA CALIXTO - DOUTOR - <https://orcid.org/0000-0003-2828-0967> ;

LUIZ ORLANDO LADEIRA - DOUTOR - <https://orcid.org/0000-0002-4935-6070> ;

TARCIZO DA CRUZ C. DE SOUZA - DOUTOR - <https://orcid.org/0000-0001-6437-0009> – CTNano/UFMG – EcoCarbono Consultoria e Desenvolvimento

ADRIANA GUERRA GUMIERI - DOUTORA, PROFª – UFMG

RESUMO

O CONCRETO É UM COMPÓSITO TRIFÁSICO E SE APRESENTA NANOESTRUTURADO. OS PROCESSOS QUE OCORREM EM NANOESCALA INTERFEREM DIRETAMENTE EM SEU DESEMPENHO. NESTE TRABALHO FOI AVALIADO O COMPORTAMENTO DE CONCRETOS DO TIPO BOMBEADO PRODUZIDOS COM NANOTUBOS DE CARBONO (NTC) SINTETIZADOS DIRETAMENTE SOBRE O CLÍNQUER. O CIMENTO CP V - ARI FOI SUBSTITUÍDO EM PARTE PELO CLÍNQUER NANOESTRUTURADO, RESULTANDO EM 0,2% E 0,4% DE NTC EM RELAÇÃO À MASSA DE CIMENTO ANIDRO. OS DESEMPENHOS DESSES CONCRETOS FORAM COMPARADOS COM UM CONCRETO DE REFERÊNCIA, SEM A INCORPORAÇÃO DO CLÍNQUER NANOESTRUTURADO. À AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS MOSTROU QUE OS MELHORES DESEMPENHOS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS FORAM OBTIDOS NOS CONCRETOS CONTENDO 0,2% DE NTC. NOS ENSAIOS DE RETRAÇÃO POR SECAGEM E FLUÊNCIA BÁSICA, A INCORPORAÇÃO DE NTC MOSTROU-SE PROMISSORA RESULTANDO EM VALORES DE 9% E 14% MENORES

-aos 90 dias, respectivamente, para o teor de 0,4% de NTC.

PALAVRAS-CHAVE: CONCRETO, CLÍNQUER NANOESTRUTURADO, NANOTUBOS DE CARBONO, DESEMPENHO MECÂNICO, RETRAÇÃO.

1. INTRODUÇÃO

A nanotecnologia já era apontada, desde 2005, como a próxima revolução industrial por Sanchez e Sobolev (2010). Nesse contexto, o concreto pode ser compreendido como um compósito nanoestruturado, cujos desempenhos re-

sultam de processos que se estendem da nano à macroescala.

Nanotubos de carbono (NTC) vêm sendo investigados por suas propriedades mecânicas, elétricas e térmicas, inclusive no setor da construção. Embora estudos sobre NTC em pastas e argamassas sejam numerosos, suas aplicações em concretos são incipientes, em parte pela problemática da dispersão. Para contornar esse problema, pesquisadores do CTNano/UFMG desenvolveram NTC sintetizados diretamente sobre o clínquer, produzindo um clínquer nanoestruturado (Ladeira *et al.*, 2016).

Este trabalho avalia o comportamento de concretos nos quais parte do cimento foi substituída por um ligante alternativo, o clínquer nanoestruturado com NTC, usando duas proporções e comparando-as a um concreto de referência.

2. MATERIAIS

Os materiais utilizados (areia, agregado graúdo, cimento e aditivo) foram adquiridos em Goiânia e caracterizados no

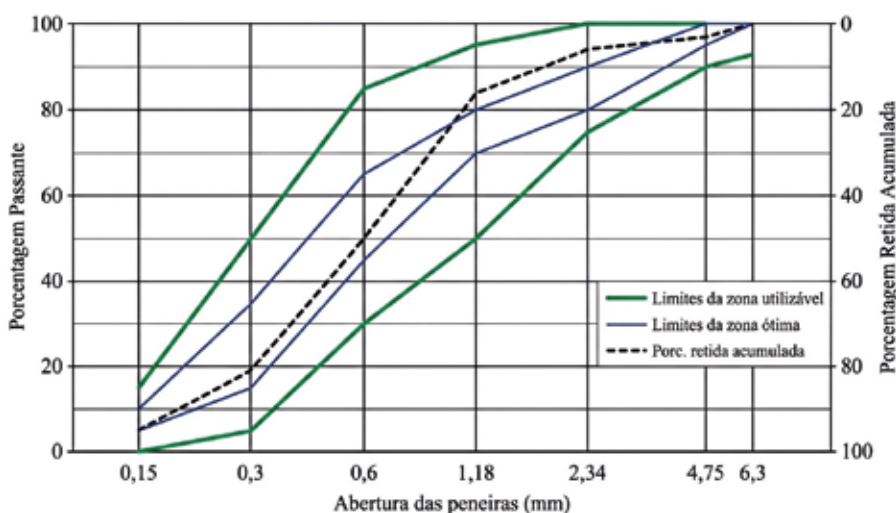


FIGURA 1

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA AREIA MÉDIA UTILIZADA NO ESTUDO

FONTE: DADOS DA PESQUISA

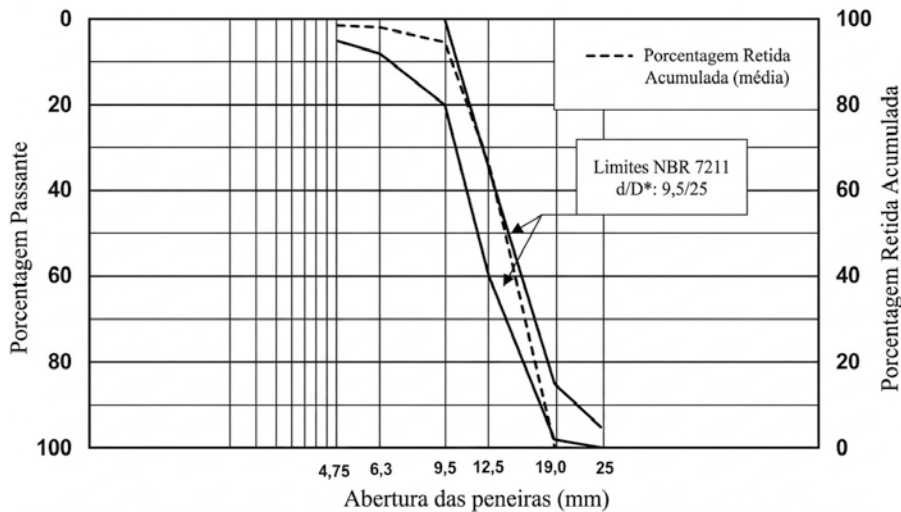


FIGURA 2

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO GRAÚDO UTILIZADO NO ESTUDO

FONTE: DADOS DA PESQUISA

Laboratório da ELETROBRAS Furnas, de acordo com as normas da ABNT.

Uma areia natural quartzosa (originada na região de Goiânia), classificada como média e distribuição granulométrica representada pela Figura 1, foi utilizada como agregado miúdo.

O agregado graúdo utilizado, cuja curva granulométrica é apresentada na Figura 2, foi a brita de origem litológica granítica, proveniente da região de Goiânia.

O cimento Portland utilizado foi do tipo CPV-ARI (marca Cauê - InterCement) com finura Blaine de 4.710 cm²/g e massa específica de 3,05 g/cm³. Considerando os óxidos presentes, as fases cristalinas presentes

(considerando o método de Bogue) foram, aproximadamente: C₃S: 61%; C₂S: 11%; C₃A: 7% e C₄AF: 8%. A perda ao fogo foi de aproximadamente 6,8% e os teores de SO₃, MgO foram de 2,8% e 1,2%, respectivamente.

Como aditivo plastificante, utilizou-se o superplastificante ViscoCrete®-6900 (Sika®).

O clínquer nanoestruturado foi produzido no Centro de Nanomateriais e Grafeno - CTNano/UFGM, utilizando a metodologia patenteada por Ladeira et al. (2016). As características do material são apresentadas na Tabela 1.

A microscopia eletrônica de varredura

(MEV), mostrada na Figura 3, revela que as partículas de clínquer estão recobertas pelas nanoestruturas. Avaliando as estruturas de carbono pela técnica de microscopia eletrônica de transmissão (MET), verificaram-se nanotubos e nanofibras de carbono, com diâmetro médio de 26 nm.

3. MÉTODOS

3.1 Dosagens avaliadas

A dosagem dos concretos foi realizada objetivando um concreto de classe S160 e resistência média à compressão de 40 MPa aos 28 dias. Considerando a relação a/c de 0,45, o traço em massa em 1:4,514 e a quantidade de aditivo (superplastificante) em 0,4% em relação à massa total de material cimentício (cimento + clínquer nanoestruturado), foi definido o concreto de referência (CREF). A partir dele, foram produzidos dois traços contendo NTC, com a quantidade de aditivo e de agregado ajustadas em função das umidades dos agregados.

Os teores de NTC em relação à massa total de ligantes anidros foram de 0,2% e 0,4%, sendo respectivamente os traços (CNTC0,2) e (CNTC0,4). Nestes últimos, as quantidades de aditivo superplastificante e de agregados foram ajustadas em função da umidade desses últimos.

Na Tabela 2, estão apresentadas as composições dos traços utilizados no estudo, bem como os resultados das avaliações no estado fresco.

TABELA 1

CARACTERÍSTICAS DO CLÍNQUER NANOESTRUTURADO PRODUZIDO NO CTNANO/UFGM

Ficha técnica do clínquer nanoestruturado	
Lote	CNT00120
Forma	Pó
Diâmetro dos NTC	16 - 85 nm
Teor de NTC	15 ± 2 %
Processo de síntese	Batelada - rotativo por CVD
Morfologia dos NTC	Paredes múltiplas e nanofibras

FONTE: DADOS DA PESQUISA

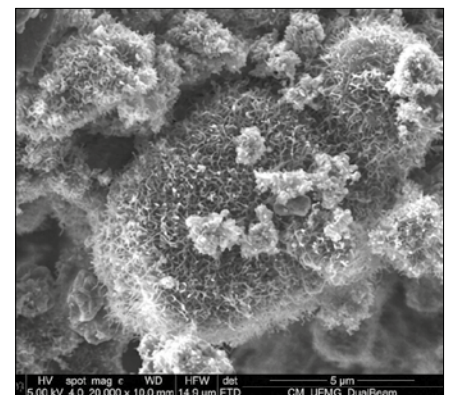
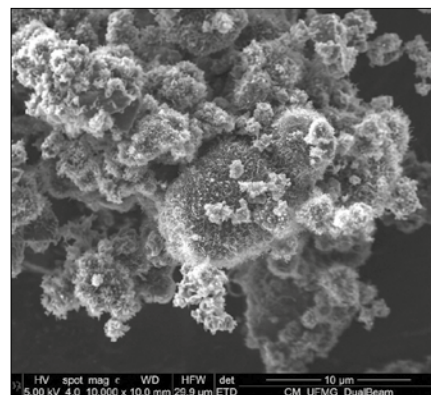


FIGURA 3

IMAGENS DE MEV DO CLÍNQUER NANOESTRUTURADO UTILIZADO NO ESTUDO

FONTE: DADOS DA PESQUISA

TABELA 2

COMPOSIÇÕES DOS TRAÇOS FABRICADOS E PROPRIEDADES DOS CONCRETOS NO ESTADO FRESCO

Concreto	CREF	CNTCO,2	CNTCO,4
Porcentagem de NTC em massa (%)	0	0,2	0,4
Dados de composição (Kg/m ³)	Cimento	400	394,67
	Clínquer nanoestruturado	0	5,33
	NTC	0	0,8
	Água	180	181
	Areia Natural	738	745
	Brita 19 mm	1066	1076
	Aditivo superplastificante	1,6	1,613
Propriedades do concreto	Abatimento (cm)	21	21
	Ar incorporado (%)	2,85	2,34
	Massa unitária (Kg/m ³)	2395	2426

FONTE: DADOS DA PESQUISA

3.2 Produção dos concretos

Para cada traço, inicialmente foi realizada a mistura do cimento com a respectiva quantidade de clínquer nanoestruturado durante 10 minutos, em betoneira. Após, foram produzidos os concretos de referência e os concretos contendo 0,2% e 0,4% de NTC, empregados nos ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência à tração por compressão diametral e resistência à tração na flexão. As bateladas dos concretos para os ensaios de retração, fluência e teste de dano de rigidez foram produzidos posteriormente. As produções foram realizadas utilizando betoneira com capacidade de 600 litros.

3.3 Moldagem dos corpos de prova

Os corpos de prova para os ensaios no estado endurecido foram moldados

conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015), utilizando vibrador de imersão para adensamento. Após 24 horas sob cobertura plástica na sala de dosagem, foram transferidos para cura em câmara úmida (23,5 °C e 97% de umidade), permanecendo até a data dos ensaios, sendo a quantidade apresentada na Tabela 3. Para os ensaios, os corpos de prova foram identificados, retificados e embalados com plástico para evitar perda de umidade.

Para a determinação das resistências à compressão, foram ensaiados seis corpos de prova para cada idade e traço: três oriundos exclusivamente para o ensaio de compressão e três do ensaio de módulo de elasticidade. A avaliação da resistência à compressão foi realizada conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018), utilizando prensa servo hidráulica EMIC DL 100000. A avaliação para obtenção do módulo de elasticidade

foi realizada conforme a NBR 8522 (ABNT, 2021), utilizando o mesmo equipamento.

A avaliação da resistência à tração por compressão diametral foi realizada conforme a NBR 7222 (ABNT, 2011). Já a avaliação da resistência à tração na flexão foi avaliada conforme o prescrito na 12142 (ABNT, 2010). Estas duas avaliações também foram realizadas utilizando a mesma prensa servo hidráulica, com as adaptações necessárias.

3.4 Retração autógena e por secagem

A retração em pastas de cimento, argamassas e concretos ocorre sem aplicação de carga e está principalmente relacionada à perda de água. A retração por secagem é uma contração irreversível causada pela variação de umidade, podendo ocorrer no estado fresco ou após o início do endurecimento (Equipe de Furnas, 1997). Como não há norma brasileira específica para ensaios de retração, adotou-se o procedimento descrito na Instrução de Trabalho de Furnas (FURNAS, 2015).

Para a preparação, foram posicionados extensômetros de corda vibrante alinhados ao eixo vertical dos moldes (Figura 4) dos corpos de prova. No ensaio de retração autógena, os corpos de prova foram desmoldados após 24 horas, embalados com plástico filme e manta de borracha, e mantidos em ambiente a 23 ± 2 °C por 24 horas para estabilização térmica, momento da leitura inicial. Em seguida, registraram-se leituras diárias por sete dias e, posteriormente, pelo menos duas vezes por semana até 85 dias.

As medições foram realizadas em quatro momentos: (1) Após 24 horas (desforma e medida do comprimento inicial); (2) Imediatamente antes da data de início do ensaio, ainda na câmara úmida; (3) Imediatamente

TABELA 3

QUANTIDADE DE CORPOS DE PROVA MOLDADOS PARA OS RESPECTIVOS ENSAIOS REALIZADOS

Idade (dias)	Res. à compressão ¹	Módulo de elasticidade ¹	Res. à tração por comp. diametral ¹	Res. à tração na flexão ²	Retração autógena ²	Retração por secagem ³	Fluência ⁴	Dado de rigidez ¹
3	3	3	3	3	2	2	—	—
7	3	3	3	3	—	—	2	—
28	3	3	3	3	—	—	—	3

¹ CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS 100 x 200 MM; ² CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS 150 x 150 x 600 MM; ³ CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS 75 x 75 x 285 MM; ⁴ CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS 150 x 450 MM

FONTE: DADOS DA PESQUISA

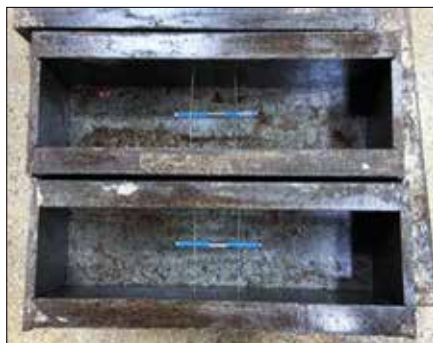


FIGURA 4

INDICAÇÃO DO POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS NO MOLDE PARA OS CORPOS DE PROVA UTILIZADOS NO ENSAIO DE RETRAÇÃO AUTÓGENA

FONTE: ELABORADO PELOS AUTORES

após a estocagem no ar, na câmara com umidade relativa de $50 \pm 4\%$; (4) Diariamente, até a estabilização das deformações.

Após as medições, as deformações de retração por secagem foram calculadas pela Equação 1. Nessa equação, ϵ representa a deformação de retração por secagem, corresponde à leitura do comprimento das barras após a desforma e imersão em água por 30 minutos, e ϵ_t à leitura obtida ao final



FIGURA 5

INDICAÇÃO DO POSICIONAMENTO DO EXTENSÔMETRO NO MOLDE PARA OS CORPOS DE PROVA UTILIZADOS NO ENSAIO DE FLUÊNCIA

FONTE: ELABORADO PELOS AUTORES

da cura úmida e dos períodos de armazenagem em câmara com $50 \pm 4\%$ de umidade relativa do ar.

$$[1] \quad \epsilon = \frac{L_1 - L_2}{L_1} \times 100$$

3.5 Fluência básica

O ensaio de fluência foi realizado conforme os procedimentos da NBR 8224 (ABNT, 2012), utilizando extensômetros elétricos instalados no eixo vertical dos corpos de prova, como ilustrado na Figura 5.

O cálculo da deformação por fluência básica foi realizado por meio da Equação 2. Nessa equação, representa a deformação por fluência, a deformação total dos corpos de prova carregados na idade considerada, a deformação imediata medida na aplicação da carga e a deformação média dos corpos de prova não carregados, correspondente à deformação autóloga.

$$[2] \quad \epsilon_{cc} = \epsilon_t - \epsilon_i - \epsilon_s$$

3.6 Teste de dano de rigidez

O teste de dano de rigidez ou *Stiffness Damage Test (SDT)*, foi utilizado para avaliar a integridade dos concretos na idade de 28 dias. Para o ensaio os corpos de prova, foram posicionados no equipamento e submetidos a cinco carregamentos cíclicos, com taxa de $0,10 \text{ MPa/s}$. A carga máxima aplicada foi o valor de 40% da resistência à compressão do concreto aos 28 dias (Hasparyk e Sanchez, 2021).

A partir do ensaio foram determinados: dano de rigidez (SDI) e deformação plástica (PDI), que foram calculados pelas Equações 3 e 4 (Sanchez *et al.*, 2014). Nessas

equações, SI é a energia de deformação irreversível (área do primeiro ciclo de carregamento), SII é a energia de deformação elástica, DI é a deformação plástica no primeiro ciclo de carregamento e DII é a deformação plástica nos demais ciclos.

$$[3] \quad SDI = \frac{SI}{SI + SII}$$

$$[4] \quad DI = \frac{DI}{DI + DII}$$

Os resultados são apresentados em gráfico, como ilustrado na Figura 6.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resistência à compressão

Com relação ao comportamento mecânico na resistência à compressão, a Figura 7 apresenta os valores médios (com os respectivos desvios) de resistência dos concretos nas idades de 3, 7 e 28 dias. Observa-se aumento progressivo da resistência à compressão com o avanço da idade para todas as composições analisadas. Aos 28 dias, o traço CNTCO,2 apresentou a maior resistência média ($46,38 \text{ MPa}$), correspondente a um incremento de $9,86\%$ em relação ao concreto de referência (CREF), enquanto o traço CNTCO,4 apresentou resistência

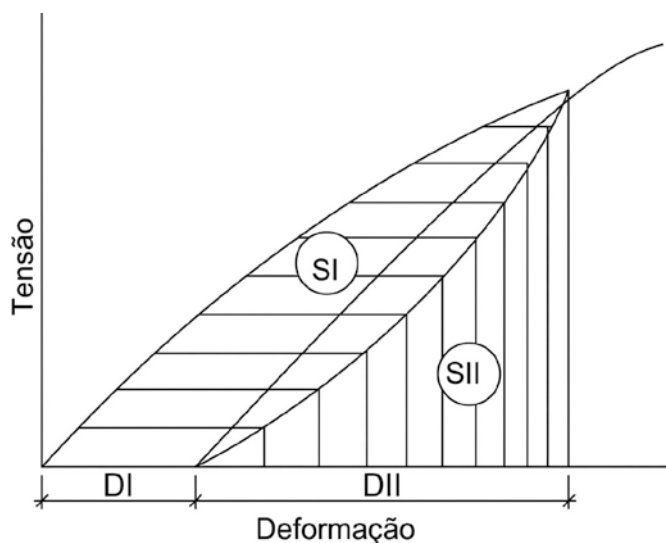


FIGURA 6

REPRESENTAÇÃO DAS CURVAS UTILIZADAS NA OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS PARA O CÁLCULO DO ÍNDICE DE RIGIDEZ

FONTE: SANCHEZ ET AL. (2017)

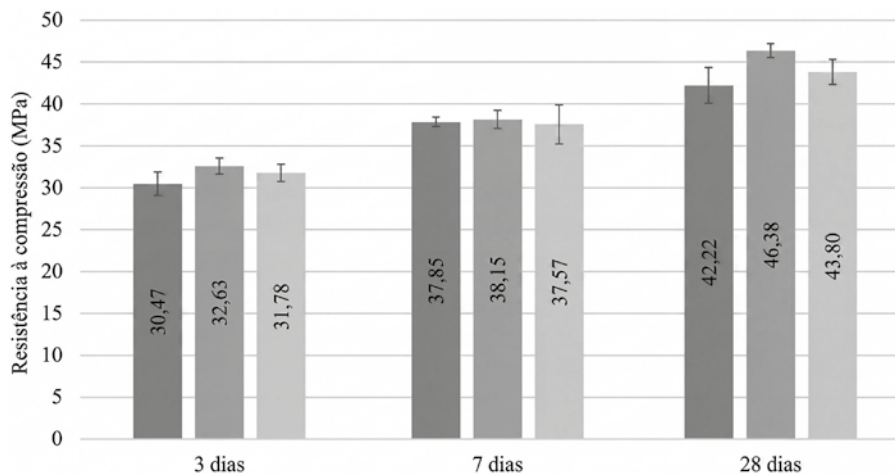


FIGURA 7

RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS, POR IDADE

FONTE: RESULTADOS DA PESQUISA

média de 43,80 MPa, representando aumento de 3,42% em relação ao CREF. Em relação à variabilidade dos resultados, os desvios padrão variaram entre 0,45 e 2,12 MPa, e os coeficientes de variação permaneceram inferiores a 6% em todas as idades analisadas, indicando adequada uniformidade e repetibilidade experimental.

A resistência média à compressão especificada de 40 MPa aos 28 dias foi obtida em todos os concretos. Análise estatística foi realizada por meio de ANOVA, considerando idade e concentração de

NTC como fatores. Os resultados indicaram efeito de ambos e da interação entre eles ($p < 0,05$), mostrando que a resistência aumentou com a idade e que o traço CNTCO,2 apresentou desempenho superior, enquanto o CNTCO,4 não diferiu do concreto de CREF. O aumento de resistência à compressão nos concretos contendo NTC pode ser atribuído ao preenchimento de vazios ou à diminuição da zona de transição entre o concreto e o agregado (Madhavi *et al.*, 2013; Tonder e Mafokoane, 2014).

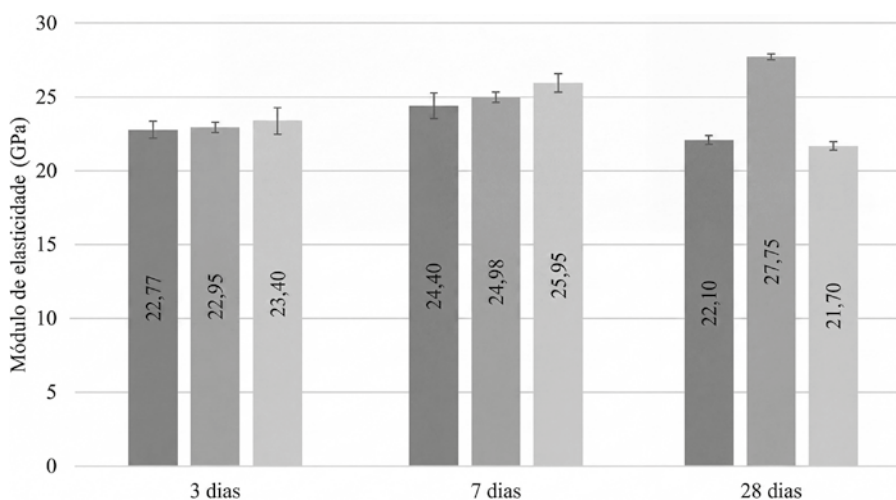


FIGURA 8

RESULTADOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DOS CONCRETOS, POR IDADE

FONTE: RESULTADOS DA PESQUISA

4.3 Módulo de elasticidade

A Figura 8 apresenta os valores médios (com os respectivos desvios) do módulo de elasticidade dos concretos analisados, nas idades de 3, 7 e 28 dias. Observa-se tendência de aumento dos valores médios entre 3 e 7 dias para todos os concretos avaliados. Aos 28 dias, o traço CNTCO,2 apresentou o maior módulo de elasticidade médio (27,75 GPa), representando incremento de 25,57% em relação ao concreto de referência (CREF). Por outro lado, o traço CNTCO,4 apresentou valor médio de 21,70 GPa, correspondente a uma redução de 1,81% em relação ao CREF. Em relação à dispersão dos resultados, os desvios padrão variaram entre 0,21 e 0,89 GPa, enquanto os coeficientes de variação permaneceram inferiores a 4% em todas as idades analisadas, indicando adequada repetibilidade experimental.

Com base em análise estatística ANOVA, pôde-se concluir que não ocorreram ganhos significativos para o módulo de elasticidade. Esse comportamento foi esperado, já que o principal fator que influencia esta propriedade é o agregado (Hawreen e Bogas, 2019; Jung *et al.*, 2022).

4.4 Resistência à tração por compressão diametral

A Figura 9 apresenta os valores médios (com os respectivos desvios) de resistência à tração por compressão diametral dos concretos avaliados nas idades de 3, 7 e 28 dias. De maneira geral, observou-se aumento da resistência com o avanço da idade para todas as composições analisadas. Aos 7 dias, o traço CNTCO,2 apresentou o maior valor médio (3,95 MPa), correspondente a um incremento de 13,53% em relação ao concreto de referência (CREF). Entretanto, aos 28 dias, os traços com adição apresentaram valores inferiores ao CREF, com reduções de 1,54% para o CNTCO,2 e 5,58% para o CNTCO,4. Em relação à dispersão dos resultados, os desvios padrão variaram entre 0,01 e 0,13 MPa, enquanto os coeficientes de variação permaneceram inferiores a 4% em todas as idades analisadas, indicando boa uniformidade e adequada repetibilidade experimental.

A análise estatística por ANOVA indicou que a incorporação do clínquer nanoestruturado não promoveu efeito significativo sobre a resistência à tração por compressão diametral, sendo observada influência estatisticamente relevante apenas do fator idade do concreto.

4.5 Resistência à tração na flexão

A Figura 10 apresenta os valores médios (com os respectivos desvios) de resistência à tração na flexão dos concretos avaliados nas idades de 3, 7 e 28 dias. Observa-se aumento da resistência à tração com o avanço da idade para todas as composições analisadas. O traço CNTC0,2 apresentou os maiores valores médios em todas as idades, destacando-se aos 3 dias, com incremento de 20,42% em relação ao concreto de referência (CREF), e aos 28 dias, com aumento de 8,97%. O traço CNTC0,4 apresentou comportamento semelhante ao CREF, com pequeno incremento aos 3 e 28 dias e redução de 9,34% aos 7 dias. Em relação à variabilidade dos resultados, os desvios padrão variaram entre 0,05 e 0,18 MPa, enquanto os coeficientes de variação permaneceram inferiores a 6% em todas as idades analisadas, indicando adequada uniformidade e repetibilidade experimental.

A análise estatística, realizada por meio do teste de Kruskal-Wallis, em função da não homogeneidade das variâncias entre os grupos, evidenciou que a concentração de NTC não exerceu influência significativa sobre o parâmetro, sendo diferença estatisticamente relevante apenas em função da idade do concreto.

4.6 Retração autógena

O gráfico da Figura 11 mostra o comparativo das curvas das médias de retração autógena dos concretos CREF, CNTC0,2 e CNTC0,4. A maior deformação autógena ocorreu no CNTC0,2 e a menor no CREF. Porém, até a idade de 22 dias, a deformação para o concreto CREF foi maior do que a deformação para CNTC0,4. Após esta data, a deformação passa a se estabilizar e CREF passa a ter os menores valores. Ao final do ensaio, o CNTC0,2 e o CNTC0,4 tiveram aumentos

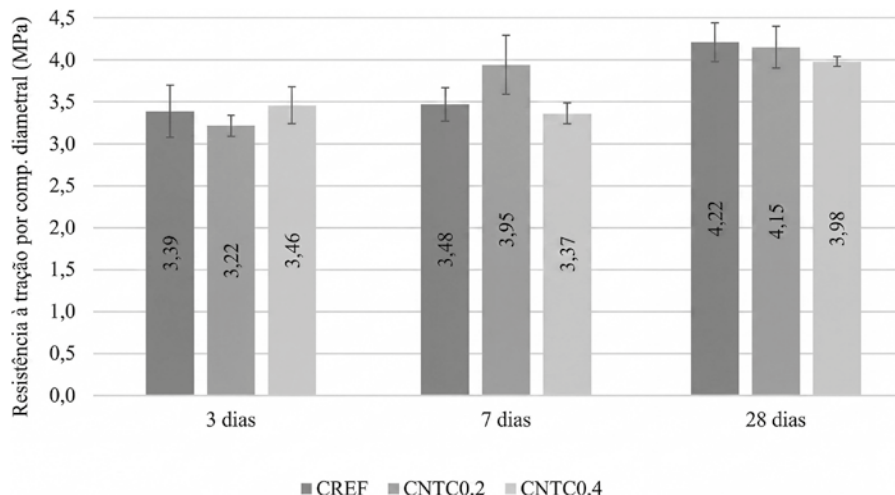


FIGURA 9

RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DOS CONCRETOS, POR IDADE

FONTE: RESULTADOS DA PESQUISA

de 20,2% e 9,2%, respectivamente, em relação ao CREF.

O aumento pode ser atribuído ao efeito de nucleação causado pela incorporação de NTC. A nucleação possibilita a formação de um maior número de produtos de hidratação cujo volume total é menor do que a soma dos volumes das moléculas constituintes, causando a retração (Jung et al.,2022).

4.7 Retração por secagem

A Figura 12 mostra o gráfico comparativo das retrações por secagem dos concretos. As curvas estão apresentadas com as deformações médias das equações logarítmicas. O ensaio iniciou 28 dias após a fabricação dos concretos, sendo então a idade zero correspondente a esta idade. As magnitudes das deformações de

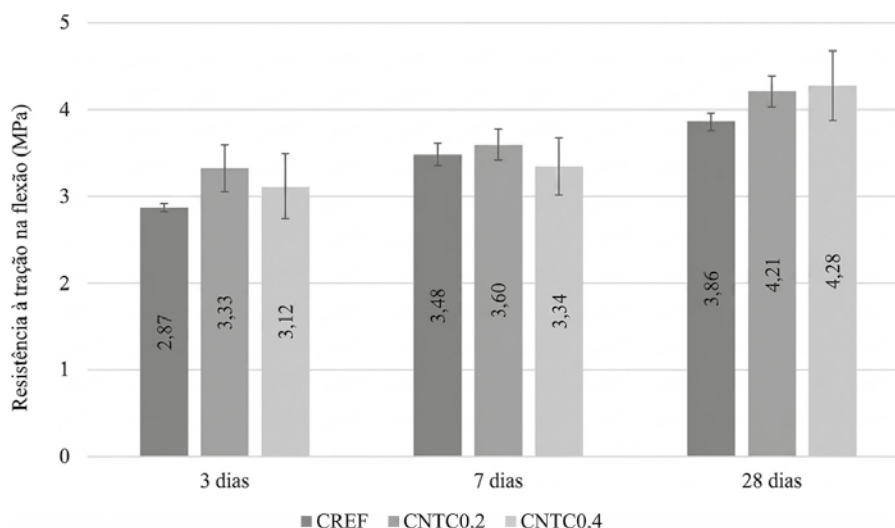


FIGURA 10

RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DOS CONCRETOS, POR IDADE

FONTE: RESULTADOS DA PESQUISA

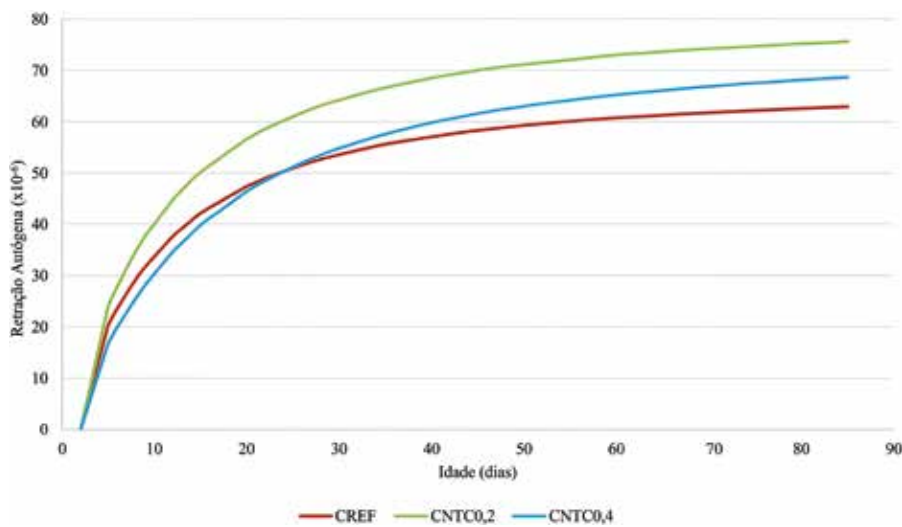


FIGURA 11

RESULTADOS DO ENSAIO DE RETRAÇÃO AUTÓGENA REALIZADOS NOS CONCRETOS, EM FUNÇÃO DO TEMPO

FONTE: RESULTADOS DA PESQUISA

retração por secagem foram maiores que a das deformações por retração autóloga, independentemente da presença dos NTC.

A maior deformação ocorreu no CREF, enquanto as deformações de CNTC0,2 e CNTC0,4 atingiram valores de aproximadamente 10% menores.

A redução da retração pode ocorrer

pelo preenchimento de vazios e efeitos de nucleação e de ponte causados pelo NTC. Além disso, estes efeitos causados pelos NTC podem funcionar como barreiras para a água dentro do concreto, impedindo sua movimentação e, conseqüentemente, reduzindo a retração por secagem do concreto (Hawreen e Bogas, 2019).

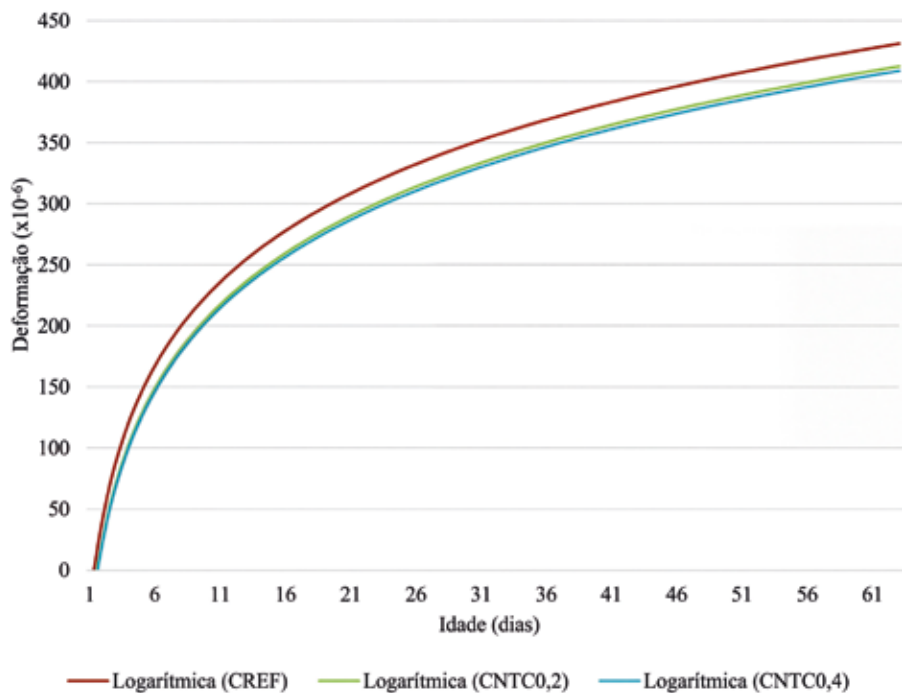


FIGURA 12

RESULTADOS DO ENSAIO DE RETRAÇÃO POR SECAGEM REALIZADOS NOS CONCRETOS, EM FUNÇÃO DO TEMPO (COMPARATIVO DAS CURVAS LOGARÍTMICAS)

FONTE: RESULTADOS DA PESQUISA

4.8 Fluência básica

A Figura 13 mostra o gráfico comparativo da fluência básica ao longo do tempo para os concretos. A idade zero apresentada no gráfico corresponde à idade em que foi aplicado o carregamento de longa duração (7 dias após a fabricação).

Pelos valores, foi possível calcular o coeficiente de fluência através da Equação 10 e prever o valor desse coeficiente ao longo do tempo, onde ϵ_c é a deformação total do concreto no tempo t , ϵ_{c0} é o coeficiente de fluência básica e ϵ_{c0} é a deformação inicial quando da aplicação da carga. A Tabela 4 apresenta valores do coeficiente de fluência básica para os concretos estudados em função do tempo.

$$[5] \quad \varphi(t) = \frac{\epsilon_c \text{ total } (t)}{\epsilon_c \text{ inicial}} - 1$$

A análise dos dados demonstra que a incorporação do clínquer nanoestruturado ao concreto reduziu, comparado com CREF, significativamente o coeficiente de fluência a longo prazo, com diminuições de 20% e 25% para os teores de 0,2% e 0,4% de NTC, respectivamente. Essa redução implica menor acréscimo das deformações de fluência, o que pode trazer melhorias importantes como menores deformações. No concreto protendido, por exemplo, a menor deformação resulta em maior força residual de protensão, reduzindo a necessidade de cabos ou cordoalhas.

Do ponto de vista do comportamento mecânico na microestrutura, a retração e a fluência estão relacionadas à deformação da pasta de cimento, enquanto os agregados limitam essas variações dimensionais. A incorporação do clínquer nanoestruturado modifica essa dinâmica, melhorando a estrutura interna da matriz cimentícia e reduzindo a propagação de microfissuras.

Estudos anteriores (Ahmad e Zhou, 2023; Hawreen e Bogas, 2019) corroboram esses efeitos, apontando a ação dos NTC tanto como elementos de preenchimento quanto como pontes que restringem fissuras.

4.9 Teste de dano de rigidez

A Tabela 5 mostra o resumo dos resultados obtidos para as avaliações de PDI e SDI. O nível de dano em um concreto frente

a reações expansivas, de acordo com valores de SDI e PDI, pode ser classificado conforme mostra a Tabela 6, que foi adaptada de Sanchez *et al.* (2017).

Os valores de PDI e SDI não variaram significativamente com a incorporação de NTC, mostrando que o clínquer nanoestruturado não causou impactos significativos na rigidez dos concretos, ficando os concretos classificados como minimamente danificados.

Segundo o índice de não linearidade na curva tensão-deformação, quando as curvaturas se mostram mais retilíneas, os concretos tendem a ser mais íntegros. Curvas com formatos mais côncavos tendem a demonstrar algum dano interno ou menor qualidade interna da matriz do concreto (Chrip *et al.*,1993).

A Figura 14 mostra os resultados do teste de dano de rigidez para os concretos aos 28 dias. Não foi observado em nenhum dos concretos, curva de carregamento/descarregamento com formato côncavo que indicasse dano.

Analisando os gráficos, foi possível observar que em todos os ciclos a menor deformação ocorreu no concreto CNTC0,2. Também foi possível observar que o concreto contendo 0,4% de NTC apresentou maior deformação em todos os ciclos.

5. CONCLUSÕES

Na bibliografia sempre é mencionada a dificuldade na dispersão de nanotubos de carbono (NTC) no concreto, prejudicando o desempenho no estado fresco e endurecido. O presente trabalho mostrou que o efeito pode ser minimizado ou eliminado através da utilização do ligante alternativo, o clínquer nanoestruturado com NTC. As avaliações permitiram atestar que a trabalhabilidade dos concretos com NTC nos teores de 0,2% e 0,4% não foi afetada com os materiais empregados e dosagens adotadas.

Com o teor de 0,2% de NTC, ocorreu ligeiro aumento da resistência à compres-

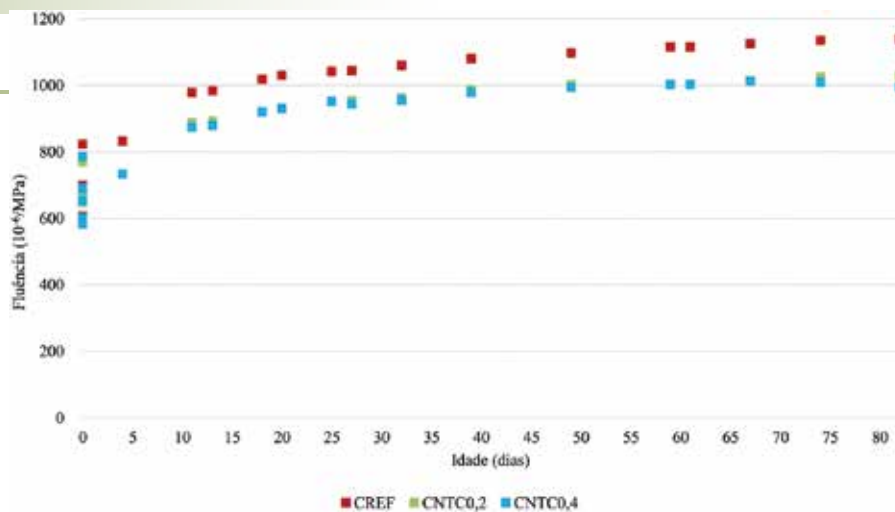


FIGURA 13

RESULTADOS DO ENSAIO DE FLUÊNCIA BÁSICA DOS CONCRETOS EM FUNÇÃO DO TEMPO (COMPARATIVO DE MÉDIAS)

FONTE: RESULTADOS DA PESQUISA

TABELA 4

VALORES DO COEFICIENTE DE FLUÊNCIA BÁSICA DOS CONCRETOS ESTUDADOS AO LONGO DO TEMPO

Concretos	Idades				
	1 ano	3 anos	5 anos	10 anos	20 anos
CREF	0,930	1,069	1,133	1,220	1,308
CNTC0,2	0,755	0,876	0,933	1,010	1,086
CNTC0,4	0,723	0,839	0,893	0,966	1,040

FONTE: RESULTADOS DA PESQUISA

são em relação ao concreto de referência, em todas as idades. Para o módulo de elasticidade, ocorreram aumentos dos valores com o a idade e da quantidade de NTC, com exceção dos 28 dias, que apresentou uma discrepância no resultado. Na avaliação de resistência à tração por compressão diametral, foi possível verificar que o clínquer com NTC melhorou a propriedade. Enquanto aos 7 dias, o CNTC0,2 apresentou resultado melhor que o CREF, aos 3 e aos 28 dias, o concreto CNTC0,2 apresentou valor menor para a resistência à tração por compressão diametral em rela-

ção ao CREF. Na avaliação de resistência à tração na flexão, verificou-se que, aos 3 e aos 28 dias, a adição do clínquer com NTC apresentou melhores resultados. Aos 7 dias, a melhoria aconteceu apenas para o CNTC0,2. Com a adição do clínquer nanoestruturado, ocorreram reduções significativas na retração por secagem e fluência. Na retração por secagem, a redução foi de 12% nas primeiras idades e 5% nas idades finais e, na fluência, a redução foi de 12% nas primeiras idades e até 13% nas idades finais,

TABELA 5

RESUMO DOS RESULTADOS DE PDI E SDI DOS CONCRETOS AOS 28 DIAS

Parâmetros	CREF	CNTC0,2	CNTC0,4
PDI médio	0,09	0,09	0,10
SDI médio	0,21	0,21	0,23

FONTE: RESULTADOS DA PESQUISA

TABELA 6

CLASSIFICAÇÃO DO NÍVEL DE DANO DO CONCRETO

Classificação do nível de dano do concreto	SDI	PDI
Insignificante	0,06 - 0,16	0,03 - 0,12
Mínimo	0,11 - 0,25	0,10 - 0,23
Moderado	0,15 - 0,31	0,13 - 0,27
Alto	0,19 - 0,32	0,17 - 0,29
Muito alto	0,22 - 0,36	0,21 - 0,31

FONTE: ADAPTADO DE SANCHEZ *et al.* (2017)

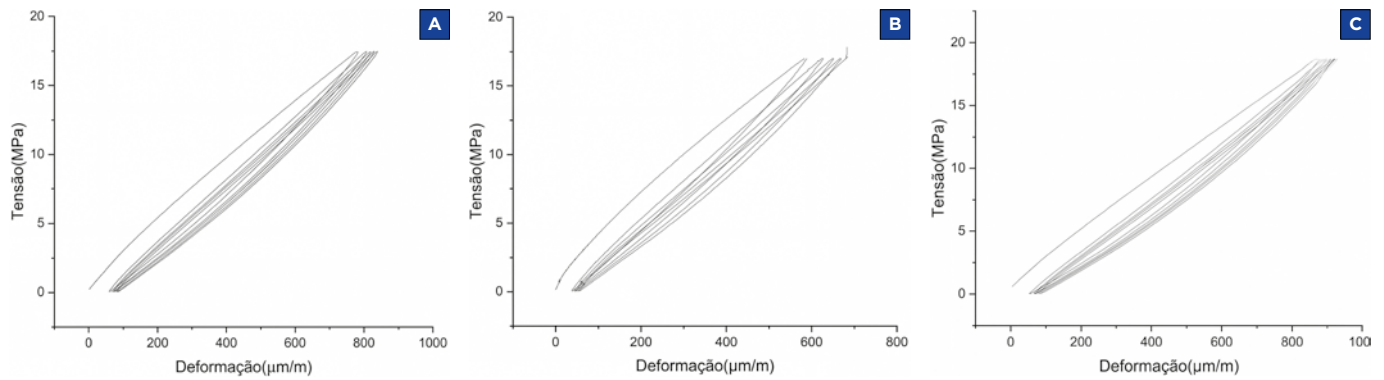


FIGURA 14

RESULTADO DO TESTE DE DANO DE RIGIDEZ (SDT) AOS 28 DIAS PARA: A) CREF; B) CNTCO,2; C) CNTCO,4

FONTE: RESULTADOS DA PESQUISA

ambas comparando o CREF com o CNTCO,4.

A análise do coeficiente de fluência confirma que o clínquer nanoestruturado com NTC propiciou redução da deformação

devido à fluência. Esses resultados revelam que a incorporação deste ligante alternativo pode ser capaz de melhorar a microestrutura da pasta através do efeito filer e de nucleação. Através do efeito ponte, os ma-

teriais nanométricos controlam a propagação e o desenvolvimento de microfissuras. O teste de dano de rigidez mostrou que a incorporação do ligante não prejudicou o desempenho frente a esta análise. ©

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2021.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12142: Concreto - Determinação da resistência á tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010
- [6] AHMAD, J.; ZHOU, Z. Properties of concrete with addition carbon nanotubes: A review. *Construction and Building Materials*, v.393, 2023.
- [7] CHRISP, T. M.; WALDRON, P.; WOOD, J. G. M. Development of a non-destructive test to quantify damage in deteriorated concrete. *Magazine of Concrete Research*, Sheffield, v. 45, p. 247-256, dez. 1993.
- [8] EQUIPE DE FURNAS, Laboratório de Concreto, Departamento de Apoio e Controle Técnico; Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades. São Paulo, Pini, 1997.
- [9] FURNAS. Instrução de Trabalho - MC - Métodos Construtivos: concreto - determinação da variação autóloga. IT.MC.201, Revisão 00. Gerência de Pesquisa, Serviços e Inovação Tecnológica. Rio de Janeiro, 2015. 7 p.
- [10] HASPARYK, N. P.; SANCHEZ, L. SDT - Método de ensaio para a determinação do índice de dano de rigidez (SDI) e índice de deformação plástica (PDI) em concretos: instrução técnica ITDSBE001. Furnas, Goiânia, 2021.
- [11] HAWREEN, A.; BOGAS, J.A. Creep, shrinkage and mechanical properties of concrete reinforced with different types of carbon nanotubes. *Construction and Building Materials*, v. 198, p. 70-81, 2019.
- [12] JUNG, M.; PARK, J.; HONG, S.; MOON, J. The critical incorporation concentration (CIC) of dispersed carbon nanotubes for tailoring multifunctional properties of ultra-high performance concrete (UHPC). *Journal of Materials Research and Technology*, v. 17, p. 3361-3370, 2022.
- [13] LADEIRA, L. O.; SILVA, E. E.; OLIVEIRA, S.; LACERDA, R. G.; FERLAUTO, A. S.; ÁVILA, E. S.; LORENÇON, E. 2016. Large scale production of carbon nanotubes in Portland cement. US Patent, 9085487 B2.
- [14] MADHAVI, T. C.; PAVITHRA, P.; SINGH, S. B.; RAJ, S. B. V.; PAUL, S. Effect of multiwalled carbon nanotubes on mechanical properties of concrete. *International Journal of Scientific Research*, v. 2, p. 166-168, 2013.
- [15] SANCHEZ, F.; SOBOLEV, K. Nanotechnology in concrete - A review, *Construction and Building Materials*, v. 24, p. 2060-2071, 2010.
- [16] SANCHEZ, L. F. M.; FOURNIER, B.; JOLIN, M.; MITCHELL, D.; BASTIEN, J. Overall assessment of Alkali-Aggregate Reaction (AAR) in concretes presenting different strengths and incorporating a wide range of reactive aggregate types and natures. *Cement and Concrete Research*. v. 93, p.17-31, 2017.
- [17] TONDER, P. e MAFOKOANE, T. Effects of multi-walled carbon nanotubes on strength and interfacial transition zone of concrete. *Construction Materials and Structures*, p. 718-727, 2014.

Resíduos cimentícios carbonatados: aplicações como adições

ERIC JOSEPH GALLI MARKUS - TÉCNICO - <https://orcid.org/0009-0008-8748-279X> - (eric.markus@maua.br) ;
GIOVANA ATAMANTCHUK - ESTUDANTE - <https://orcid.org/0009-0006-6635-3935> - (giatamantchuk@gmail.com) ;
MATEUS ZANOVELLO - PROFESSOR - <https://orcid.org/0000-0003-0479-6045> - (mateus.oliveira@maua.br) – IMT

RESUMO

TECNOLOGIAS DE CAPTURA, ARMAZENAMENTO E UTILIZAÇÃO DE CARBONO (CCUS) TÊM SIDO INVESTIGADAS COMO ESTRATÉGIAS PARA REDUZIR AS EMISSÕES DA INDÚSTRIA CIMENTEIRA, DESTACANDO-SE A CARBONATAÇÃO DE RESÍDUOS CIMENTÍCIOS PELA CAPACIDADE DE MINERALIZAR CO₂ NA FORMA DE CARBONATOS ESTÁVEIS. ESTE ESTUDO AVALIOU TRÊS MÉTODOS DE CARBONATAÇÃO APLICADOS A RESÍDUOS DE PASTA CIMENTÍCIA: NATURAL ACELERADA, FORÇADA EM MEIO AQUOSO E FORÇADA EM MEIO AQUOSO SOB PRESSÃO E CONTROLE DE PH. OS MATERIAIS CARBONATADOS FORAM MOÍDOS E UTILIZADOS COMO MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES (MCSs), SUBSTITUINDO 20% DO CLÍNQUER. O DESEMPENHO FOI AVALIADO POR RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM PASTAS, COM ESTIMATIVAS PARA ARGAMASSA, E CÁLCULO DAS EMISSÕES E INTENSI-

DADE DE CARBONO. OS RESULTADOS DEMONSTRAM QUE RESÍDUOS CIMENTÍCIOS CARBONATADOS SÃO VIÁVEIS COMO MCSs, COM DESEMPENHO MECÂNICO COMPARÁVEL AO DE CIMENTOS COMERCIAIS E MENOR INTENSIDADE DE CO₂, DESTACANDO-SE ESPECIALMENTE COMO ALTERNATIVA MAIS SUSTENTÁVEL AO FÍLER CALCÁRIO.

PALAVRAS-CHAVE: CCUS, MCS, CARBONATAÇÃO, ECONOMIA CIRCULAR.

1. INTRODUÇÃO

A captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS) apresenta-se como a principal estratégia para mitigação das emissões de CO₂ na construção civil (GCCA, 2024). Nesse contexto, a carbonatação de resíduos cimentícios destaca-se como um processo capaz de

mineralizar CO₂ por meio da formação de carbonato de cálcio (CaCO₃) e gel sílico-aluminoso, resultantes da reação entre CaO e CO₂ (WINNEFELD *et al.*, 2022). Diferentes rotas têm sido exploradas, incluindo carbonatação natural, natural-acelerada, em meio aquoso com injeção de CO₂ - sendo esta última caracterizada por maior reatividade e grau de carbonatação (TEUNE *et al.*, 2023; ZAJAC *et al.*, 2023).

A carbonatação de resíduos cimentícios gera produtos com potencial como materiais cimentícios suplementares (MCSs), combinando efeito fíler (CaCO₃) e atividade pozolânica (gel sílico-aluminoso), contribuindo para a redução do teor de clínquer e para uma economia circular na construção (MAO *et al.*, 2024). No entanto, o aumento da área superficial desses materiais pode impactar a demanda de água, aspecto pouco explorado e compreendido na literatura, porém muito relevante para sua aplicação.

Este estudo avalia o uso de subprodutos carbonatados de pasta de cimento como MCSs em cimentos compostos com 20% de substituição de clínquer, comparáveis ao CP II-F. Foram investigados processos de carbonatação natural e aquosa (pressurizada e não pressurizada). O desempenho foi analisado por resistência à compressão e intensidade de CO₂, permitindo correlacionar desempenho e impacto ambiental, em comparação com cimentos comerciais (CP II-Z e CP IV) (ABRÃO; CARDOSO; JOHN, 2020).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foi utilizado cimento Portland do tipo CPV-ARI (CPV), devido ao seu elevado teor de clínquer (>90%).

Os subprodutos carbonatados foram

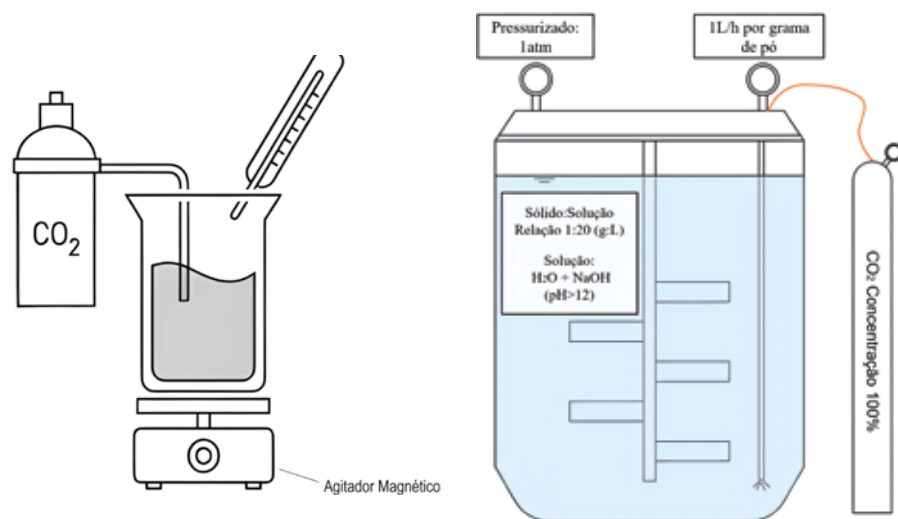


FIGURA 1

RASCUNHO DOS PROCEDIMENTOS DE CARBONATAÇÃO cPCH_A (ESQUERDA) E cPCH_P (DIREITA)

FONTE: AUTORES PRÓPRIOS (2026)

obtidos a partir de uma pasta de CPV com relação água/cimento (a/c) de 0,50, curada por 28 dias e, posteriormente, moída abaixo de 150µm, resultando no material denominado pasta de cimento hidratada (PCH). Esse material foi submetido a três métodos de carbonatação.

O primeiro método, carbonatação natural acelerada, foi realizado em câmara climática a 20°C, umidade relativa de 70-80% e concentração de CO₂ de 10%, até estabilização da absorção (-30 dias), conforme Neves, Branco e De Brito (2013). O material obtido foi denominado cPCH_n.

O segundo método consistiu na carbonatação em meio aquoso (cPCH_a), por meio da dispersão do pó de PCH em água (relação sólido/líquido de 1:20), com injeção contínua de CO₂ (100%) sob agitação constante em agitador magnético.

O terceiro método, também em meio aquoso, foi conduzido em sistema pressurizado (cPCH_p). O PCH foi disperso em solução de água e NaOH (1:20), com controle de pH entre 12 e 14, seguido da injeção de CO₂ (100%) a uma vazão de 1 L/h por grama de material, durante 6 horas, com agitação contínua.

Após os processos, os materiais carbonatados foram secos à temperatura ambiente por 48 h. A Figura 1 apresenta os sistemas utilizados para obtenção de cPCH_a (à esquerda) e cPCH_p (à direita).

2.1 Caracterização de materiais

A massa específica das partículas (ρ) foi obtida por picnômetro de hélio (FAPESP EMU 2021/04848-0). A área superficial específica dos materiais (SSA_{BET}) foi determinada por adsorção de N₂ (método BET). A porosidade dos grãos foi determinada por porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP).

O teor de saturação de superplastificante (SP) foi determinado experimentalmente a partir da definição da água de ponto de virada (relação a/s) e da avaliação do espalhamento em ensaio de mini-slump. Diferentes teores de SP foram testados até a obtenção de espalhamento máximo e estável, sendo o teor mínimo correspondente definido como teor de saturação. Os resultados de caracterização são apresentados na Tabela 1.

As análises termogravimétricas (TG)

TABELA 1

PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS

Parâmetros	CPV	cPCH_n	cPCH_a	cPCH_p	FC
ρ (g/cm ³)	3.06	2.57	2.59	2.64	2.73
SSABET (m ² /g)	1.64	26.06	39.54	60.12	5.85
Porosidade do grão - MIP (%)	—	37.02	47.89	67.05	—
Água de ponto de virada (a/s)	0.27	0.40	0.40	0.40	0.30
Saturação de SP (%)	0.55	0.45	0.45	0.45	0.20

FONTE: AUTORES PRÓPRIOS (2026)

TABELA 2

PF E COMPOSIÇÃO DE ÓXIDOS DA PASTA DE CIMENTO ENDURECIDA (PCH)

XRF (%)	PF	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	Outros
PCH	31.57	51.76	9.05	2.04	0.24	1.75	2.87	0.72

FONTE: AUTORES PRÓPRIOS (2026)

foram realizadas em equipamento TGA Q50 (TA Instruments), na faixa de 20 a 1000 °C, com taxa de 10°C/min.

A composição química do PCH foi determinada por fluorescência de raios X (XRF), sem padrão. As amostras foram previamente submetidas à perda ao fogo (PF) a 1000 °C por 12 h. Resultados são exibidos na Tabela 2.

2.2 Grau de carbonatação

A eficiência dos processos de carbonatação (grau de carbonatação) foi estimada a partir das Equações 1-2. O teor de CaCO₃ (M_{CaCO₃}, % em massa) foi determinado por análise termogravimétrica (TGA) do PCH (TEUNE *et al.*, 2023). As massas molares adotadas foram 100,09 g/mol para CaCO₃ e 56,08 g/mol para CaO, enquanto o teor de CaO na pasta hidratada (M_{CaO^{HCP}}) foi obtido por XRF (Tabela 2).

[1]

$$\text{Grau de Carbonatação (\%)} = \frac{M_{CaCO_3 \text{ amostra}}}{M_{CaCO_3 \text{ calculado}}} \cdot 100\%$$

[2]

$$CaCO_3 \text{ calculado} = \frac{M_{CaO^{HCP}} \cdot Mm_{CaCO_3}}{Mm_{CaO}}$$

2.3 Caracterização de pastas

As pastas experimentais foram formuladas com 20% de substituição de clínquer, utilizando o teor de saturação de superplastificante (SP) e a quantidade mínima de água necessária para atingir consistência de 100 mm no ensaio de mini-slump. A composição das misturas é apresentada na Tabela 3. O aditivo utilizado nas pastas foi um superplastificante tipo II.

A resistência à compressão foi avaliada em corpos de prova cúbicos (25 mm

TABELA 3

COMPOSIÇÃO DE PASTAS EXPERIMENTAIS

Pastas	Ligantes	a/s (g/g)	SP (%)
CPV	100% CPV	0.29	0.26
20c n	80% CPV + 20% cPCH_n	0.29	0.36
20c a	80% CPV + 20% cPCH_a	0.29	0.36
20c p	80% CPV + 20% cPCH_p	0.29	0.36
20FC	80% CPV + 20% FC	0.29	0.29

FONTE: AUTORES PRÓPRIOS (2026)

de aresta) aos 7 e 28 dias, utilizando máquina Instron EMIC 23-50, com velocidade de carregamento de 0,02 mm/s. Para cada mistura, foram ensaiados quatro corpos de prova. Os resultados foram correlacionados com ensaios em cilindros de argamassa (50 × 100 mm), preparados com pasta e argamassa padrão de CPV (a/c = 0,48), avaliados aos 7, 28, 49 e 91 dias.

As análises termogravimétricas (TG) foram realizadas aos 1 e 7 dias. As amostras foram previamente submetidas à troca de solvente para interrupção da hidratação, conforme Snellings *et al.* (2018).

2.4 Análise ambiental

A pegada de CO₂ das matérias-primas e sua origem são apresentadas na Tabela 4. Para os materiais carbonatados, considerou-se a capacidade de captura de até 400 kgCO₂/t de PCH a 100% de carbonatação (HUNTZINGER *et al.*, 2009), sendo a pegada de CO₂ calculada conforme a Equação 3 (Tabela 4). As emissões associadas aos agregados foram desprezadas. Para o aditivo superplastificante, utilizou-se a relação 2 kgCO₂/kg de aditivo.

$$[3] \quad cHPC \text{ CO}_2 \text{ emissões} = 400 \cdot \text{Grau de carbonatação (\%)}$$

As emissões de CO₂ de 1 m³ de argamassa padrão foram determinadas conforme a Equação 4, considerando as contribuições do clínquer (CPV), dos materiais cimentícios suplementares (MSCs) e superplastificante (SP).

$$[4] \quad CO_{2argamassa} = CO_{2CPV} + CO_{2MSCs} + CO_{2SP} + CO_{2areia}$$

TABELA 4

COMPOSIÇÃO DE PASTAS EXPERIMENTAIS

Material	Emissões de CO ₂ (kgCO ₂ /ton)	Referência
CPV	863	(MILLER <i>et al.</i> , 2018)
FC	8	(MILLER <i>et al.</i> , 2018)
cPCH_n	-198	Equação 5 e Tabela 5
cPCH_a	-265	Equação 5 e Tabela 5
cPCH_p	-302	Equação 5 e Tabela 5

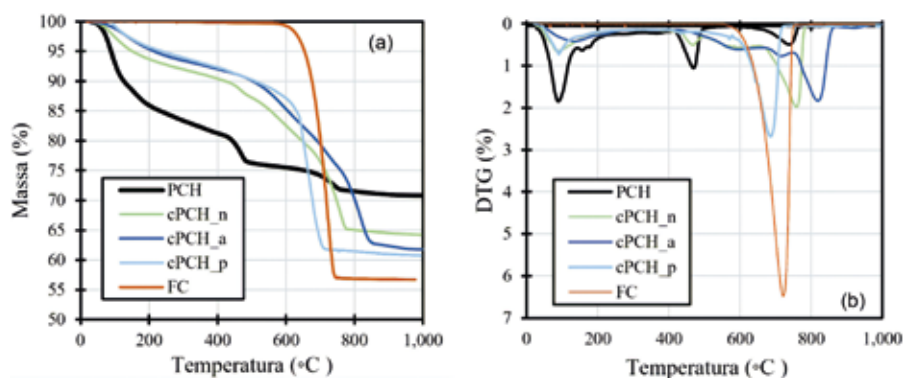


FIGURA 2

TG (A) E DTG (B) DE PCH, LF E cPCHs EXPERIMENTAIS

FONTE: AUTORES PRÓPRIOS (2026)

A eficiência ambiental foi avaliada por meio do índice de intensidade de CO₂ (Equação 5), expresso em kgCO₂ · m⁻³ · MPa⁻¹, que relaciona as emissões totais da argamassa padrão (1:3) por resistência à compressão estimada. Esse indicador permite integrar desempenho mecânico e impacto ambiental em uma mesma métrica, sendo particularmente relevante para comparação entre sistemas com diferentes teores de substituição de clínquer. Para os cálculos, foi adotada massa específica do agregado igual a 2,65 g/cm³.

$$[5] \quad CO_{2intensidade} = \frac{CO_{2argamassa}}{f_{argamassa}}$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Grau de carbonatação

As curvas de TG (a) e DTG (b) apresentadas na Figura 2 evidenciam perdas de massa significativas na faixa de 600–800 °C, atribuídas à decomposição de carbonato de cálcio (CaCO₃) formado durante o processo de carbonatação. A análise da DTG indica que a amostra cPCH_p apresenta ausência de portlandita (Ca(OH)₂), evidenciando conversão praticamente completa dessa fase em CaCO₃ no processo de carbonatação aquosa pressurizada, enquanto pequenas frações de C-S-H permanecem não carbonatadas. Em contraste, as amostras cPCH_n e cPCH_a apresentam picos residuais de portlandita

e C-S-H, indicando carbonatação parcial e potencial de evolução sob condições mais severas.

Os graus de carbonatação (Tabela 5), determinados conforme a Equação 5, corroboram esses resultados, evidenciando maior eficiência do método aquoso pressurizado (75,53%), seguido do método aquoso (66,15%) e da carbonatação natural acelerada (49,45%). A Figura 3 apresenta a relação entre a área superficial específica (BET) e o grau de carbonatação, revelando uma tendência exponencial consistente com as transformações químicas envolvidas na carbonatação de PCH (TEUNE *et al.*, 2023). Esse comportamento está atrelado à dissolução das fases de portlandita (CH) e silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) na formação de carbonato de cálcio (CaCO₃) durante o processo de carbonatação. Logo, maiores graus de carbonatação estão associados ao aumento da área superficial, o que pode elevar a demanda de água quando esses materiais são utilizados como MCSs.

TABELA 5

GRAUS DE CARBONATAÇÃO DOS cPCHs EXPERIMENTAIS

Carbonatado	Grau de carbonatação (%)
cPCH_n	49,45
cPCH_a	66,15
cPCH_p	75,53

FONTE: AUTORES PRÓPRIOS (2026)

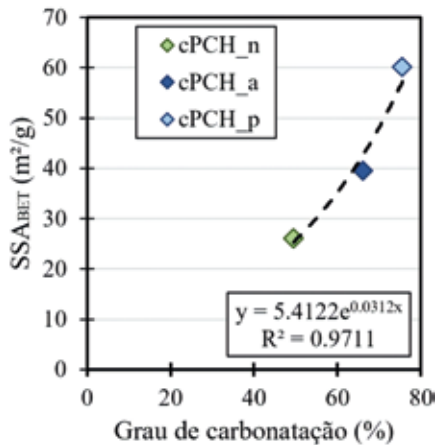


FIGURA 3

ÁREA SUPERFICIAL ESPECÍFICA (SSABET) PELO GRAU DE CARBONATAÇÃO

FONTE: AUTORES PRÓPRIOS (2026)

3.2 Resistência à compressão

A Figura 4 apresenta a relação entre a resistência à compressão de pastas e argamassas de CPV. Os valores convertidos são apresentados na Figura 5, que reúne as resistências das pastas cúbicas, sua conversão para argamassa padrão e a comparação com dados da literatura (ABRÃO; CARDOSO; JOHN, 2020).

As misturas 20c_a e 20FC apresentaram resistências equivalentes ao CPV, enquanto 20c_n e 20c_p exibiram desempenho ligeiramente inferior, evidenciando que os parâmetros de carbonatação influenciam diretamente a reatividade residual dos materiais. Esse comportamento indica que a conversão das fases cimentícias durante a carbonatação, embora favoreça a formação de carbonatos estáveis, pode reduzir a disponibilidade de espécies reativas para reações posteriores de hidratação, limitando a formação adicional de produtos como C-(A)-S-H e, consequentemente, o desenvolvimento da resistência.

Apesar disso, os ligantes contendo finos carbonatados apresentaram desempenho comparável ao de cimentos comerciais brasileiros, indicando comportamento típico de sistemas governados pelo efeito filler, associado a contribuição reativa moderada. Considerando o nível de substituição de 20%, equivalente ao cimento

CP II-F, os resultados demonstram que os cPCHs podem atuar como MCSs viáveis e, devido à captura de carbono durante o processo de carbonatação, configuram uma alternativa com menor pegada ambiental em comparação ao filler calcário.

3.3 Análise ambiental

A Figura 6 apresenta as emissões de CO₂ por tonelada de ligante e por metro cúbico de argamassa padrão, incluindo a fração de CO₂ capturada pelos materiais carbonatados em função do grau de carbonatação. Todos os cimentos compostos apresentaram emissões inferiores às do CPV, refletindo a redução do teor de clínquer. No entanto, as misturas contendo cPCH destacam-se pela presença de emissões

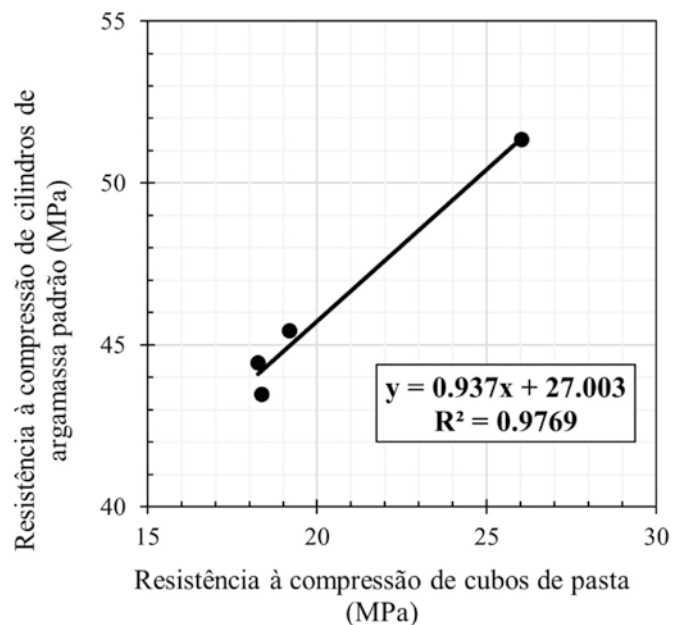


FIGURA 4

CORRELAÇÃO ENTRE CUBOS DE PASTA (25 MM) E CILINDROS DE ARGAMASSA (50×100 MM)

FONTE: AUTORES PRÓPRIOS (2026)

negativas associadas à captura de CO₂ durante a carbonatação. Esse efeito resulta em emissões líquidas inferiores à da mistura com filler calcário (20FC), com reduções de 6-9% das emissões de CO₂ por tonelada de ligante, variando de acordo com o grau de carbonatação

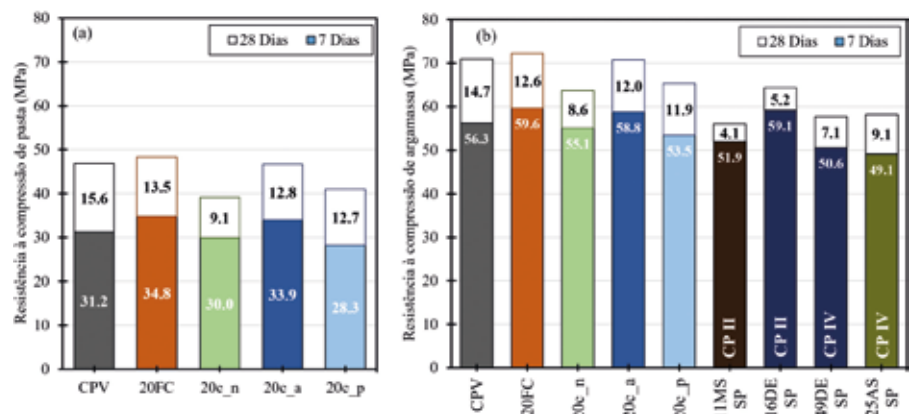


FIGURA 5

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CUBOS DE PASTA (25 MM) (A) E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO ESTIMADA DE CILINDROS DE ARGAMASSA (50 × 100 MM) (B), AOS 7 E 28 DIAS. DADOS NÃO EXPERIMENTAIS RETIRADOS DE ABRÃO; CARDOSO; JOHN (2020)

FONTE: AUTORES PRÓPRIOS (2026)

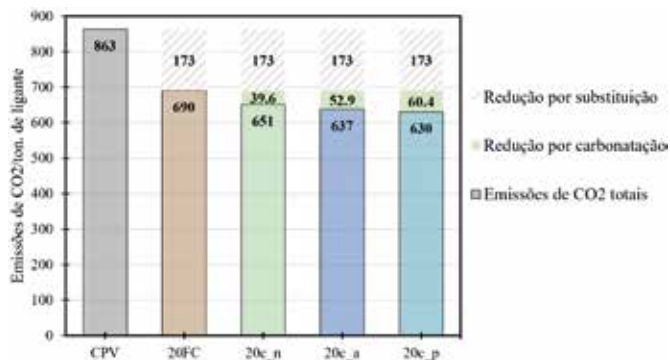


FIGURA 6

EMISSIONES DE CO₂ POR TONELADA DE LIGANTE UTILIZADA NA MISTURA, DIFERENÇA ENTRE AS EMISSIONES DAS MISTURAS COM CPV E A PARCELA DE CO₂ POR TONELADA DE LIGANTE CAPTURADA NOS PROCESSOS DE CARBONATAÇÃO

FONTE: AUTORES PRÓPRIOS (2026)

atingido. Esses resultados evidenciam o potencial dos materiais carbonatados como MCSs para ampliar a redução de emissões além da substituição do clínquer, destacando também a necessidade de otimizar os processos de carbonatação para alcançar maiores graus de carbonatação.

A Figura 7 apresenta as emissões de CO₂ por tonelada de ligante em conjunto com a intensidade de CO₂ (CI), em função da resistência à compressão estimada aos 28 dias, incluindo dados da literatura (ABRÃO; CARDOSO; JOHN, 2020). Entre as misturas de carbonatados, a mistura 20c_a apresentou menor CI que todos os cimentos compostos em análise, somente com exceção ao 49DE SP devido seu maior grau de substituição. As misturas contendo cPCH estão entre os menores valores de CI, demonstrando a eficiência ambiental desse material como MCS. Em comparação ao filer calcário (20FC), todos os carbonatados atingiram menores valores de CI com desempenho mecânico semelhante. Isso implica que o cPCH é um MCS mais ambientalmente eficiente que o filer calcário, possivelmente servindo como uma alternativa mais sustentável ao filer calcário.

4. CONCLUSÕES

Este estudo avaliou o desempenho mecânico e ambiental de cimentos

compostos com 20% de substituição por materiais cimentícios suplementares (MCSs), utilizando

subprodutos carbonatados de pasta de cimento hidratada (cPCH). Os resultados foram comparados ao CPV-ARI, ao cimento com filer calcário (CP II-F) e a dados da literatura para cimentos compostos comerciais (CP II-Z e CP IV). Todas as misturas foram formuladas com teor de água constante e ajuste do superplastificante para atingir consistência equivalente. Observou-se que misturas contendo cPCH obtido por carbonatação em meio aquoso apresentaram desempenho mecânico comparável ao CPV-ARI e ao CP II-F, ao mesmo tempo em que demonstraram menores emissões de CO₂. A partir dos resultados, destacam-se as seguintes conclusões:

► **Desempenho mecânico e reatividade:** Os cPCHs obtidos por carbonatação em meio aquoso apresentaram resistência à compressão aos 28 dias semelhante ao CP II-F (diferença ~2%), indicando que esses materiais podem atuar como MCSs viáveis. No entanto, o desempenho está diretamente associado ao grau de carbonatação e à preservação de fases potencialmente reativas, indicando a necessidade de otimização dos

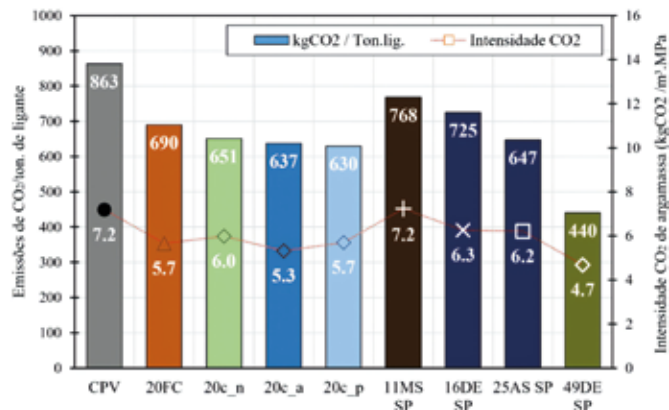


FIGURA 7

EMISSIONE DE CO₂ POR TONELADA DE LIGANTE EM CONJUNTO COM INTENSIDADE DE CO₂ EM FUNÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO ESTIMADA DE CILINDROS DE ARGAMASSA (50 × 100 MM) AOS 28 DIAS DE IDADE. DADOS DA LITERATURA DAS ARGAMASSAS 11MS SP, 25AS SP, 16DE SP E 49DE SP DE ABRÃO; CARDOSO; JOHN (2020). MS CORRESPONDE À ESCÓRIA DE MANGANÊS, AS À ESCÓRIA ÁCIDA E DE À TERRA DIATOMÁCEA

FONTE: AUTORES PRÓPRIOS (2026)

parâmetros de carbonatação para maximizar a eficiência reativa.

- **Relação entre carbonatação e propriedades físicas:** Observou-se uma correlação exponencial entre o grau de carbonatação e a área superficial dos cPCHs, devido a dissolução de fases de portlandita (CH) e silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) na formação de carbonato de cálcio (CaCO₃). Isso implica um aumento na demanda de água ao utilizar este material como MCS. Esse efeito pode ser mitigado pelo uso de superplastificantes, cujas emissões associadas são desprezíveis em comparação ao CO₂ capturado, preservando a viabilidade ambiental do sistema.
- **Eficiência ambiental:** As misturas com cPCH alcançam reduções de 6% a 9% nas emissões de CO₂ em relação ao CP II-F, variando conforme o grau de carbonatação de cada material. Considerando o desempenho mecânico semelhante entre eles, a menor pegada ambiental dos cPCHs evidencia o potencial dos carbonatados como alternativa superior ao filer calcário como MCS. ☺

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABRÃO, Pedro Cesar R.A.; CARDOSO, Fábio A.; JOHN, Vanderley M. Efficiency of Portland-pozzolana cements: Water demand, chemical reactivity and environmental impact. *Construction and Building Materials*, vol. 247, 30 Jun. 2020.
- [2] GLOBAL CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION (GCCA). *Cement and Concrete Industry Net Zero Progress Report 2024/25*. London: GCCA, 2024.
- [3] HUNTZINGER, Deborah N.; GIERKE, John S.; KAWATRA, S. Komar; EISELE, Timothy C.; SUTTER, Lawrence L. Carbon Dioxide Sequestration in Cement Kiln Dust through Mineral Carbonation. *Environmental Science & Technology*, vol. 43, no. 6, p. 1986-1992, 15 Mar. 2009.
- [4] MAO, Yuguang et al. Quantifying the effects of wet carbonated recycled cement paste powder on the properties of cement paste. *Cement and Concrete Research*, v. 175, p. 107381, 2024.
- [5] MILLER, Sabbie A.; JOHN, Vanderley M.; PACCA, Sergio A.; HORVATH, Arpad. Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050. *Cement and Concrete Research*, vol. 114, p. 115-124, 1 Dec. 2018.
- [6] NEVES, R.; BRANCO, F.; DE BRITO, J. Field assessment of the relationship between natural and accelerated concrete carbonation resistance. *Cement and Concrete Composites*, vol. 41, p. 9-15, 2013.
- [7] SNELLINGS, Ruben; et al. RILEM TC-238 SCM recommendation on hydration stoppage by solvent exchange for the study of hydrate assemblages. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 51, no. 6, 1 Dec. 2018.
- [8] TEUNE, I.E.; SCHOLLBACH, K.; FLOREA, M.V.A.; BROUWERS, H.J.H. Carbonation of hydrated cement: The impact of carbonation conditions on CO₂ sequestration, phase formation, and reactivity. *Journal of Building Engineering*, vol. 79, p. 107785, Nov. 2023b.
- [9] WINNEFELD, Frank; LEEMANN, Andreas; GERMAN, Alexander; LOTHENBACH, Barbara. CO₂ storage in cement and concrete by mineral carbonation. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, vol. 38, p. 100672, Dec. 2022.
- [10] ZAJAC, Maciej et al. Enforced carbonation of cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, v. 174, p. 107285, 2023.

O FUTURO DA CONSTRUÇÃO JÁ ESTÁ EM OBRA

Enquanto o mercado fala sobre inovação, a Apodi Expert desenvolve tecnologias que já estão transformando a engenharia do Brasil.

 **Concreto 100 MPa**

 **Desenvolvimento Contínuo**

 **Alta Performance**

 **Engenharia Especializada**

 **Soluções Técnicas**

 **Pesquisa Aplicada**

Accesse o nosso site



@apodiexpert



@agenciaplug

apodi CIMENTO | expert

Reação álcali-agregado em cimentos álcali-ativados: avaliação por métodos tradicionais e alternativos

ANDREZA FRARE - DOUTORA - (andreza.frare@ifsc.edu.br) – IFSC; **ELOISE APARECIDA LANGARO** - DOUTORA – UEPG; **CAROLINE ANGULSKI DA LUZ** - DOUTORA – UTFPR; **MARCELO HENRIQUE FARIAS DE MEDEIROS** - DOUTOR – UFPR

RESUMO

ESTE ESTUDO AVALIOU O COMPORTAMENTO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO (RAA) EM UM CIMENTO ÁLCALI-ATIVADO (CAA) À BASE DE ESCÓRIA, COMPARANDO-O COM UM CIMENTO PORTLAND (CPV) POR MEIO DE MÉTODOS TRADICIONAIS E ALTERNATIVOS DE ANÁLISE. FORAM UTILIZADOS ENSAIOS DE EXPANSÃO (AMBT, CPT, ACPT E ABCPT), ALÉM DE TÉCNICAS COMPLEMENTARES DE AVALIAÇÃO DE DANOS, COMO O DAMAGE RATING INDEX (DRI) E O STIFFNESS DAMAGE TEST (SDT). OS RESULTADOS INDICARAM QUE O CAA APRESENTOU MENOR EXPANSÃO E MENOR EVOLUÇÃO DE DANOS AO LONGO DO TEMPO, EM COMPARAÇÃO AO CPV. OBSERVOU-SE TAMBÉM AUSÊNCIA DE CORRELAÇÃO SIGNIFICATIVA ENTRE EXPANSÃO E PERDA DE RIGIDEZ NO CAA, SUGERINDO MECANISMOS DISTINTOS DE DETERIORAÇÃO. OS RESULTADOS EVIDENCIAM QUE MÉTODOS NORMATIZADOS PODEM NÃO SER SUFICIENTES PARA AVALIAR ADEQUADAMENTE ESSES MATERIAIS. CONCLUINDO, PORTANTO, QUE OS CAA APRESENTAM POTENCIAL PARA SISTEMAS SUSCETÍVEIS À RAA. CONTUDO, SEUS MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO DIFEREM DOS CIMENTOS PORTLAND, REQUERENDO AVALIAÇÃO BASEADA NA CORRELAÇÃO ENTRE MÚLTIPLAS TÉCNICAS.

PALAVRAS-CHAVE: REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO, CIMENTOS ÁLCALI-ATIVADOS, ENSAIOS DE EXPANSÃO, DRI, SDT.

1. INTRODUÇÃO

O concreto produzido com cimento Portland (CP) permanece como o material mais utilizado na construção civil, devido à sua versatilidade, custo acessí-

vel e desempenho mecânico consolidado. Entretanto, a durabilidade das estruturas tem recebido crescente atenção, pois sua resistência às condições ambientais ao longo do tempo é essencial para garantir a vida útil das construções.

Além disso, a produção de cimento Portland está associada ao elevado consumo energético e à emissão de gases de efeito estufa, impulsionando a busca por materiais alternativos. Nesse contexto, os cimentos álcali-ativados (CAA) surgem como uma alternativa promissora, por possibilitarem o aproveitamento de resíduos industriais e apresentarem menor impacto ambiental.

Do ponto de vista do desempenho, os CAA podem apresentar elevada resistência química e boa estabilidade microestrutural, especialmente quando produzidos com escória como precursor (WONGSA *et al.*, 2018). Contudo, ainda possuem limitações, como retração elevada e eflorescência, o que reforça a necessidade de estudos mais aprofundados, principalmente quanto à durabilidade (AWOYERA; ADESINA, 2021).

Entre os mecanismos de deterioração mais preocupantes está a reação álcali-agregado (RAA), responsável por processos expansivos que levam à fissuração e à perda de desempenho das estruturas. Essa reação ocorre pela interação entre álcalis do sistema e sílica reativa dos agregados, na presença de umidade, formando produtos expansivos no interior do concreto

(HASPARYK; SANCHEZ, 2021). Embora a RAA seja amplamente estudada em concretos de cimento Portland, ainda há lacunas relevantes quanto ao seu entendimento em CAA, especialmente em relação à aplicabilidade dos métodos de avaliação existentes.

Os métodos normatizados para avaliação da RAA foram desenvolvidos para sistemas convencionais e podem não representar adequadamente o comportamento dos CAA, devido às suas particularidades químicas e microestruturais. Além disso, técnicas complementares, como o *Damage Rating Index* (DRI) e o *Stiffness Damage Test* (SDT), ainda são pouco exploradas nesses materiais.

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo avaliar a suscetibilidade à reação álcali-agregado em cimentos álcali-ativados à base de escória, utilizando métodos tradicionais e complementares de análise. Busca-se contribuir para o entendimento dos mecanismos envolvidos e para a definição de estratégias mais adequadas de avaliação da durabilidade desses materiais, favorecendo sua aplicação segura na engenharia civil.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Neste estudo, comparou-se o desempenho de um cimento álcali-ativado (CAA) à base de escória granulada de alto-forno com um cimento Portland

CP V. O CAA foi desenvolvido em laboratório, a partir da ativação da escória com 5% de hidróxido de sódio (NaOH) de alta pureza, sendo selecionado devido ao seu desempenho mecânico e à sua representatividade como alternativa ao cimento Portland.

As propriedades físico-químicas dos ligantes foram determinadas por ensaios usuais de caracterização. O CAA apresentou massa específica de 2,9 g/cm³ e superfície específica de 431,1 m²/kg, enquanto o CP V apresentou massa específica de 3,1 g/cm³ e superfície específica de 440 m²/kg. A escória utilizada apresentou elevados teores de sílica e alumina, favorecendo a formação de produtos cimentantes do tipo C-(A)-S-H, enquanto o CP V apresentou maior teor de CaO e comportamento já documentado frente à reação álcali-agregado (RAA).

O agregado graúdo utilizado foi um gnaiss proveniente de São José dos Pinhais (PR), previamente classificado como potencialmente reativo por ensaios acelerados e de longo prazo, conforme apresentado na Figura 1a. A análise petrográfica indicou características típicas de agregados reativos, como recristalização do quartzo, presença de minerais alterados e fraturas preenchidas por produtos secundários (Figura 1b).

A composição granulométrica do agregado graúdo foi ajustada pela combinação de brita 1 e brita 0, nas proporções de 60% e 40%, respectivamente, atendendo aos requisitos da

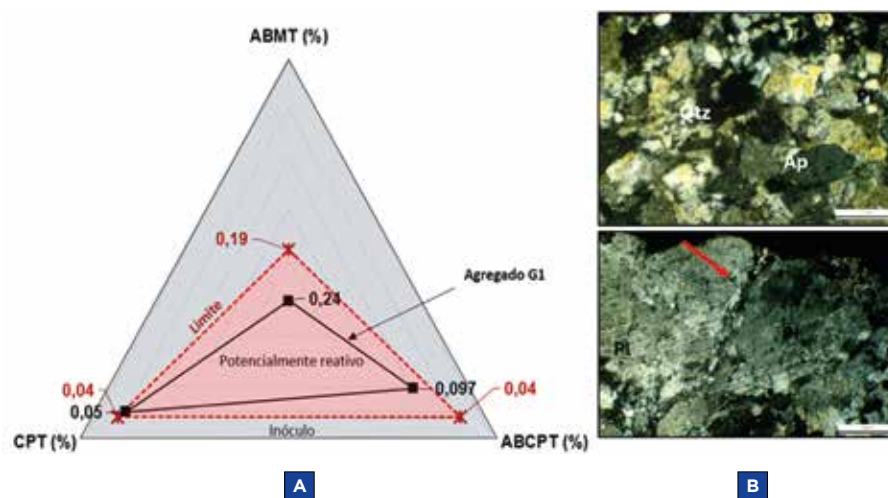


FIGURA 1

(A) CLASSIFICAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO QUANTO A REATIVIDADE A PARTIR DOS ENSAIOS DE ABMT, ABCPT E CPT. (B) AMOSTRA DE ROCHA EM LÂMINA APRESENTANDO CRISTAIS DE QUARTZO RECRISTALIZADOS INTENSA ALTERAÇÃO DO PLAGIOCLÁSIO. NA INDICAÇÃO EM VERMELHO, TEM-SE FRATURAS PREENCHIDAS

NBR 15577:2018 para ensaios de avaliação da reatividade. O agregado miúdo empregado foi uma areia natural classificada como inócua, utilizada em todas as misturas, com massa específica de 2,60 g/cm³ e módulo de finura de 2,27.

2.2 Métodos

A suscetibilidade à reação álcali-agregado (RAA) foi avaliada por ensaios de expansão (AMBT, CPT, ACPT e ABCPT) e de caracterização de danos (SDT e DRI), conforme a Tabela 1, permitindo comparar o comportamento

dos materiais sob diferentes condições de exposição e severidade.

Nos ensaios em concreto, o Na₂O_{eq} foi ajustado para 1,25% no cimento Portland, enquanto o CAA apresentou Na₂O_{eq} de 3,85%, sem adição externa de álcalis. A combinação dos ensaios de expansão e avaliação de danos permitiu uma análise mais abrangente da RAA nos materiais.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Ensaios de expansão

A comparação entre CPV e CAA

TABELA 1

RESUMO DOS MÉTODOS EMPREGADOS PARA AVALIAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO E DETERIORAÇÃO DOS CONCRETOS

Ensaio	Objetivo	Condições de exposição	Duração	Norma / Referência
AMBT	Reatividade em argamassa	Barras em NaOH 1N a 80 °C	28 dias	ABNT NBR 15577-4:2018
CPT	Expansão em longo prazo	Prismas a 38 °C e UR >95%	Até 24 meses	ABNT NBR 15577-5:2018
CPT - cilíndricos	Correlação entre expansão, DRI e SDT	Corpos cilíndricos a 38 °C e UR >95%	Até 24 meses	Adaptado da ABNT NBR 15577-5:2018
ACPT	Expansão acelerada em concreto	Prismas a 60 °C e UR >95%	Até 6 meses	ABNT NBR 15577-7:2018
ABCPT	Expansão acelerada com equilíbrio alcalino	Prismas em solução alcalina a 80 °C	30 dias	Sanchez (2008); Sanchez, Kuperman e Helene (2011)
SDT	Perda de rigidez	Ciclos de carregamento em corpos cilíndricos	Conforme idade	Sanchez et al., (2014)
DRI	Danos microestruturais	Análise microscópica em corpos cilíndricos	Conforme idade	Villeneuve (2011); Sanchez et al., (2015)

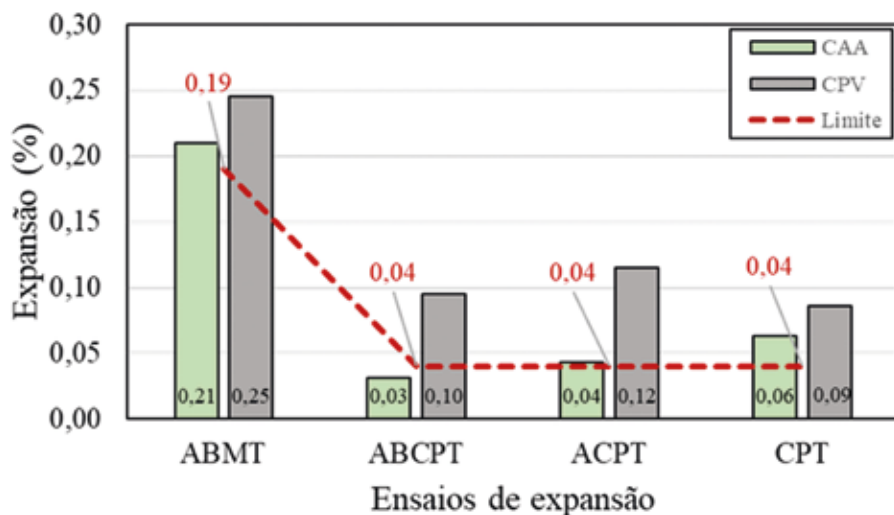


FIGURA 2

RESULTADO DOS ENSAIOS DE EXPANSÃO AO FINAL DO PERÍODO DE AVALIAÇÃO: ABMT, ACPT, ABCPT E CPT

nos ensaios de expansão evidenciou diferenças no comportamento frente à RAA, conforme apresentado na Figura 2.

No AMBT (Figura 2), ambos os ligantes apresentaram expansão superior ao limite normativo de 0,19%, com valores mais elevados para o CPV, indicando maior suscetibilidade à RAA. Esse comportamento está alinhado à literatura, que aponta expansões geralmente menores em sistemas à base de escória ativada, embora ainda acima dos limites (ANGULO-RAMÍREZ *et al.*, 2018). Ressalta-se que as condições severas do AMBT, com 80 °C e solução de NaOH 1N, podem superestimar a expansão e interferir nos mecanismos reacionais dos CAA (GOLMAKANI; HOOTON, 2019).

No ACPT (Figura 2), o CPV atingiu cerca de 0,10% de expansão, enquanto o CAA apresentou aproximadamente 0,03%, com comportamento mais estável e crescimento mais lento, ultrapassando marginalmente o limite normativo. Resultados semelhantes são relatados na literatura e variam conforme o agregado (MORAES *et al.*, 2021), sendo que o uso do gnaíse pode ter influenciado os resultados.

No ABCPT (Figura 2), o CPV novamente superou o limite, com aproximadamente 0,12%, enquanto o CAA permaneceu abaixo de 0,04%, sendo classificado como inócuo. Esse desempenho pode estar associado ao equilíbrio entre a alcalinidade interna e externa do sistema, reduzindo efeitos como lixiviação (SANCHEZ, 2008;

SANCHEZ; KUPERMAN; HELENE, 2011).

No CPT, ambos os materiais ultrapassaram o limite de 0,04%, porém o CPV apresentou expansão mais rápida e intensa, em torno de 0,09%, enquanto o CAA mostrou evolução mais lenta, atingindo cerca de 0,06% em idades avançadas. Esse comportamento pode estar relacionado à formação de géis menos expansivos e à maior estabilidade química da matriz nos sistemas ativados por escória (ANGULO-RAMÍREZ *et al.*, 2018).

A Tabela 2 resume o desempenho dos materiais nos diferentes métodos, permitindo uma comparação direta dos resultados obtidos.

De forma geral, o CAA apresentou expansão menor e mais tardia em relação ao CPV, sugerindo cinética mais lenta e possíveis diferenças nos mecanismos de deterioração associados à RAA. Embora este estudo tenha avaliado apenas uma formulação de cimento álcali-ativado, os resultados estão alinhados com a literatura, que aponta comportamento mais controlado desses sistemas frente à RAA, ainda que não completamente isentos do fenômeno (MORAES *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2025).

3.2 Análise da deterioração dos corpos de prova

A Figura 3 apresenta os resultados do índice de dano (DRI) ao longo de 365 dias (1, 6 e 12 meses), bem como exemplos das principais manifestações observadas.

Os resultados indicaram que o CPV apresentou valores de DRI mais elevados e crescentes ao longo do tempo, com fissuras no agregado (CCA e OCA) e na pasta (CCP), evidenciando maior evolução dos danos associados à RAA. Essa tendência é compatível com estudos que relatam níveis elevados de deterioração em concretos com cimento Portland e agregados reativos (HASPARYK; SANCHEZ, 2021).

No CAA, o aumento do DRI ocorreu de forma mais lenta, indicando deterioração menos intensa e influenciada pelas características microestruturais

TABELA 2

RESUMO DO DESEMPENHO DO CPV E CAA FRENTE AOS ENSAIOS DE EXPANSÃO ABMT, ACPT, ABCPT E CPT

Ensaio	CPV	CAA	Classificação CPV	Classificação CAA
AMBT	> 0,19%	> 0,19%	Expansão maior que o limite	Expansão maior que o limite
ABCPT	0,10%	< 0,04%	Expansão maior que o limite	Inócuo
ACPT	0,10%	0,04%	Expansão maior que o limite	Límitrofe
CPT	> 0,04%	> 0,04%	Expansão maior que o limite	Expansão maior que o limite, porém, mais tardio

desse sistema. Observou-se predominância de fissuras no agregado com presença de produtos de reação, sugerindo que, embora haja formação de produtos associados à RAA, estes podem apresentar menor caráter expansivo. Parte dos danos iniciais também pode estar relacionada à retração autôgena e à própria natureza do material (BAKHAREV; SANJAYAN; CHENG, 2001).

As análises por MEV-EDS complementaram a identificação dos produtos observados no CAA. As imagens indicaram produtos amorfos preenchendo fissuras no agregado e na interface pasta-agregado, com composição rica em Si, Ca e álcalis, especialmente Na e K, compatível com géis de RAA. Esses resultados, associados às expansões medidas e aos ensaios DRI e SDT, reforçam a ocorrência da RAA no CAA.

A presença de Al nos produtos formados em sistemas ativados pode modificar a estrutura do gel, tornando-o menos expansivo e contribuindo para a menor degradação observada no CAA (SHI *et al.*, 2019). Além disso, os produtos identificados não apresentaram teor significativo de S, diferenciando-se daqueles típicos de DEF e indicando maior compatibilidade com gel de RAA. Ressalta-se ainda que fissuras pré-existentes no agregado podem influenciar os valores iniciais de DRI.

De modo geral, as diferenças entre CPV e CAA indicam que a natureza do ligante influencia significativamente a deterioração associada à RAA, afetando a evolução das expansões e os mecanismos de fissuração. Assim, o CPV apresentou maior nível de deterioração, enquanto o CAA demonstrou evolução de danos mais lenta e menos intensa.

A Figura 4 apresenta os resultados do SDT para os corpos de prova de CPV e CAA ao longo de 1, 6 e 12 meses.

Os resultados do ensaio de Stiffness Damage Test (SDT) indicam respostas distintas entre os concretos com cimento Portland (CPV) e cimento álcali-ativado (CAA). O CPV apresentou aumento progressivo dos índices de dano ao longo do tempo (SDI e PDI), indicando

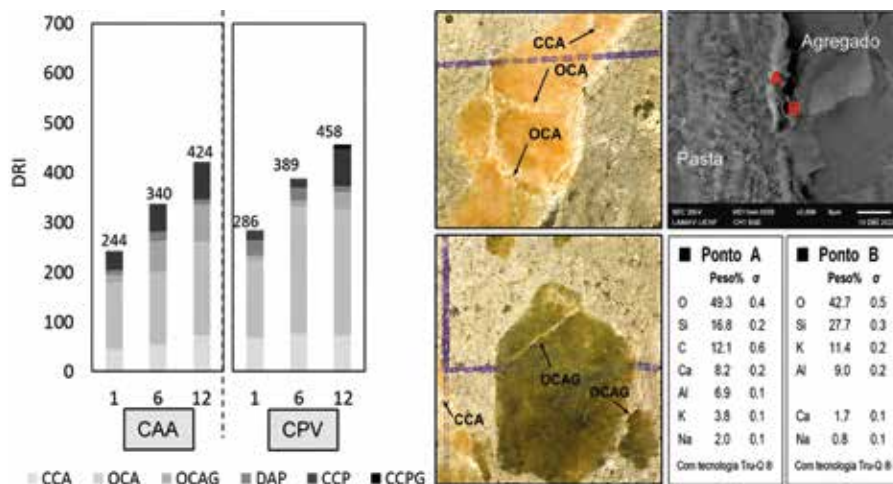


FIGURA 3

RESULTADO DA ANÁLISE DE DRI E CLASSIFICAÇÃO DAS FISSURAS NAS AMOSTRAS, MEV/EDS – CCA: FISSURAS FECHADAS NO AGREGADO; OCA: FISSURAS ABERTAS NO AGREGADO; OCAG: FISSURAS ABERTAS NO AGREGADO COM PRODUTO DE REAÇÃO; DAP: PARTÍCULA DE AGREGADO DESAGREGADA; CCP: FISSURAS NA PASTA DE CIMENTO; CCPG: FISSURAS NA PASTA DE CIMENTO COM PRODUTO DE REAÇÃO

perda da capacidade de recuperação elástica associada à evolução da reação álcali-agregado (RAA) e maior dissipação de energia sob carregamento cíclico, conforme já documentado na literatura (SANCHEZ *et al.*, 2014, 2015, 2017).

Por outro lado, o CAA apresentou resposta mais estável, com valores de PDI decrescentes, sugerindo estabilização das microfissuras e menor degradação estrutural. A menor área de

histerese observada para o CAA reforça esse desempenho, indicando maior capacidade de recuperação elástica, possivelmente associada à formação de géis menos expansivos (C-A-S-H e N-A-S-H) e à maior densificação da matriz (LEEMANN *et al.*, 2020), tornando o material menos suscetível à degradação irreversível.

Do ponto de vista estatístico, o CPV apresentou forte correlação entre

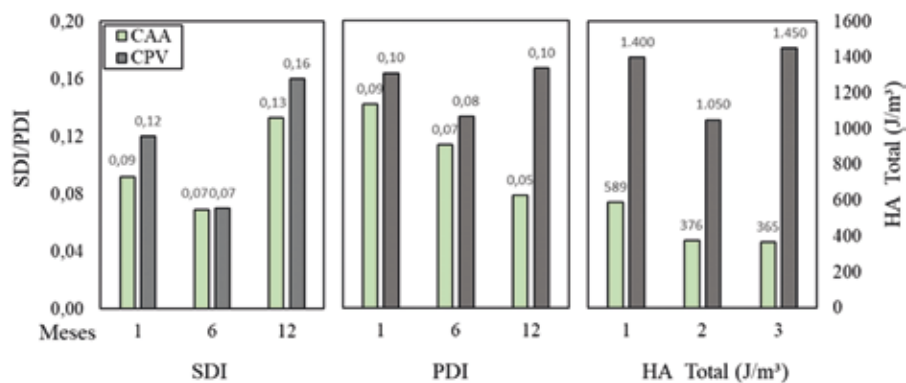


FIGURA 4

RESULTADOS DO ENSAIO DE SDT: SDI (ÍNDICE DE DANO DA RIGIDEZ), PDI (ÍNDICE DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA) E ÁREA DE HISTERESE

expansão e dano ($R^2 = 0,99$; $r_s = 1,00$; $p = 0,000$), enquanto o CAA não apresentou correlação significativa ($R^2 = 0,03$; $r_s = 0,31$; $p = 0,188$). O teste de Kruskal-Wallis não indicou diferenças estatísticas entre os materiais ($p = 0,121$), apesar das tendências distintas observadas. Esses dados sugerem que, nos CAA, a degradação estrutural não está diretamente associada apenas à expansão, sendo influenciada também por fatores relacionados à composição e à evolução da matriz cimentícia.

De forma geral, os resultados confirmam que os mecanismos de deterioração em sistemas álcali-ativados diferem daqueles observados em concretos convencionais, reforçando a necessidade de métodos complementares para avaliação da durabili-

dade desses materiais frente à reação álcali-agregado.

5. CONCLUSÕES

Os resultados evidenciam que o cimento álcali-ativado (CAA) à base de escória apresenta comportamento mais estável frente à reação álcali-agregado (RAA) em comparação ao cimento Portland (CPV), com menores expansões e menor intensidade de danos ao longo do tempo. Esse desempenho foi confirmado tanto pelos ensaios de expansão quanto pelas análises de deterioração (DRI e SDT).

Observou-se que o CPV apresentou maior evolução da fissuração e perda de rigidez associadas à RAA, enquanto o CAA mostrou comportamento mais controlado, com menor progressão

dos danos e ausência de correlação significativa entre expansão e degradação estrutural, indicando mecanismos distintos de deterioração.

Os resultados reforçam a importância do uso de métodos complementares aos normativos na avaliação da RAA em cimentos álcali-ativados, uma vez que os ensaios tradicionais para cimento Portland podem não representar adequadamente seu comportamento.

Do ponto de vista prático, os cimentos álcali-ativados apresentam potencial como alternativa ao cimento Portland, especialmente em aplicações que exigem maior durabilidade, desde que sejam adotados critérios específicos de avaliação considerando suas particularidades químicas e microestruturais. ●

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15577-4:2018. Reação álcali-agregado - Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- [2] _____. ABNT NBR 15577-7:2018. Reação álcali-agregado - Parte 7: Método acelerado brasileiro de prismas de concreto (ABCPT). Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- [3] ANGULO-RAMÍREZ, D. E.; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R.; MEDEIROS, M. Alkali-activated Portland blast furnace slag cement mortars: Performance to alkali-aggregate reaction. *Construction and Building Materials*, 2018.
- [4] AWOYERA, P. O.; ADESINA, A. A critical review on application of alkali activated slag as a sustainable composite binder. *Case Studies in Construction Materials*, v. 11, 2019.
- [5] BAKHAREV, T.; SANJAYAN, J. G.; CHENG, Y. B. Resistance of alkali-activated slag concrete to alkali-aggregate reaction. *Cement and Concrete Research*, p. 331-334, 2001.
- [6] GOLMAKANI, F.; HOOTON, R. Comparison of laboratory performance tests used to assess alkali-silica reactivity. In: *Annual Conference - Canadian Society for Civil Engineering*, 2019.
- [7] HASPARYK, N. P.; SANCHEZ, L. Reação álcali-agregado no concreto. In: ISAlA, G. C. (coord.). *Concreto: Ciência e Tecnologia*. São Paulo: IBRACON, 2022.
- [8] LEEMANN, A.; SHI, Z.; LINDGÅRD, J. Characterization of amorphous and crystalline ASR products formed in concrete aggregates. *Cement and Concrete Research*, v. 137, 2020.
- [9] MORAES, M. C. et al., Alkali-Activated Cement Subject to Alkali-Aggregate Reaction. *ACI Materials Journal*, v. 118, n. 5, 2021.
- [10] SANCHEZ, L. F. Contribuição ao estudo dos métodos de ensaio na avaliação das reações álcali-agregado em concretos. 2008. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- [11] SANCHEZ, L. F. M.; KUPERMAN, S. C.; HELENE, P. Uso do método acelerado brasileiro de prismas de concreto (ABCPT) para avaliação da reação álcali-agregado (RAA). *IBRACON Structures and Materials Journal*, p. 575-581, 2011.
- [12] SANCHEZ, L. F. M. et al., Evaluation of the stiffness damage test (SDT) as a tool for assessing damage in concrete due to ASR. *Cement and Concrete Research*, 2014.
- [13] SANCHEZ, L. F. M. et al., Reliable quantification of AAR damage through assessment of the Damage Rating Index (DRI). *Cement and Concrete Research*, 2015.
- [14] SANCHEZ, L. F. M. et al., Tools for assessing damage in concrete affected by AAR. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 10, n. 1, p. 84-91, 2017.
- [15] SHI, Z. et al., Role of aluminum in ASR gel formation. *Cement and Concrete Research*, 2019.
- [16] VILLENEUVE, V. Veronique Villeneuve Determination De L' Endommagement Du Béton Par Méthode Pétrographique. 2011. Tese (Doutorado) - Département de Géologie et Génie Géologique, Faculté de Sciences et Génie, Université Laval, Québec.
- [17] WANG, W.; ZHANG, S.; ZHANG, Y.; NOGUCHI, T.; MARUYAMA, I. Understanding the influence of slag fineness and water-to-binder ratio on the alkali-silica reaction in alkali-activated slag mortars. *Cement and Concrete Composites*, v. 157, p. 105907, 2025.
- [18] WONGSA, A. et al., Mechanical and thermal properties of lightweight geopolymer mortar incorporating crumb rubber. *Journal of Cleaner Production*, v. 195, p. 1069-1080, 2018.

Blocos leves de vedação em material álcali-ativado com EPS: avaliação física, mecânica e viabilidade técnica

TIMÓTEO XIMENES CUNHA - ENG. - <https://orcid.org/0009-0004-5416-0939> - (timoteoximenes@alu.ufc.br) ;
MARIA MONIQUE RIBEIRO FARIAS - ENG^a. - <https://orcid.org/0009-0006-5297-2487> ;
NAYRA ROCHA DE SOUSA - MESTRANDA - <https://orcid.org/0009-0004-8209-2240> ;
ANTONIO LUCAS BRAGA MOREIRA - MESTRANDO - <https://orcid.org/0009-0003-5883-2272> ;
ANTONIO EDUARDO BEZERRA CABRAL - PROF. DR. - <https://orcid.org/0000-0001-6394-1164> ;
HELOINA NOGUEIRA DA COSTA - PROF^a. DR^a. - <https://orcid.org/0000-0001-9960-2383> – UFC

RESUMO

A NECESSIDADE DE REDUZIR O IMPACTO AMBIENTAL DA CONSTRUÇÃO CIVIL IMPULSIONA O USO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS AO CIMENTO PORTLAND, COMO OS ÁLCALI-ATIVADOS. ESTE ESTUDO AVALIOU A VIABILIDADE TÉCNICA DE BLOCOS DE VEDAÇÃO PRODUZIDOS COM LIGANTE ÁLCALI-ATIVADO E POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS). FORAM PRODUZIDOS CONCRETOS COM SUBSTITUIÇÃO DE 40%, 60% E 80% DA AREIA POR EPS. OS RESULTADOS INDICARAM ADEQUADA TRABALHABILIDADE DAS MISTURAS E FORMAÇÃO DE GÉIS CARACTERÍSTICOS DA ATIVAÇÃO ALCALINA. OS BLOCOS APRESENTARAM RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO ENTRE 2,17 MPa E 4,01 MPa, COMPATÍVEL COM APLICAÇÕES DE VEDAÇÃO NÃO ESTRUTURAL. PORTANTO, A PRODUÇÃO DE CONCRETOS LEVES A BASE DE MATERIAIS ÁLCALI-ATIVADOS E EPS É VIÁVEL PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL E PARA A REDUÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS.

PALAVRAS-CHAVE: MATERIAL ÁLCALI-ATIVADO, EPS, CONSTRUÇÃO CIVIL, SUSTENTABILIDADE.

1. INTRODUÇÃO

A construção civil desempenha papel relevante na economia, destacando o uso do cimento Portland (CP) devido à sua trabalhabilidade, resistência mecânica e viabilidade econômica (LOPES; PEÇANHA; CASTRO, 2020). Contudo, sua produção está associada a elevadas emissões de CO₂, cerca de 580 kg

TABELA 1

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E FÍSICAS DA CINZA VOLANTE

Composição química		Características físicas	
Óxidos	%		
SiO ₂	41,49	D10%	1,61 µm
Al ₂ O ₃	14,49	D50%	7,38 µm
CaO	9,54	Distribuição granulométrica	D90%
Fe ₂ O ₃	24,95		30,50 µm
K ₂ O	4,54		D _{médio}
TiO ₂	3,26		13,16 µm
		Massa específica (g/cm ³)	2,18
		Área de superfície específica (m ² /g)	4790

FONTE: AUTOR (2026)

por tonelada produzida no Brasil, além de alto consumo de recursos naturais e energia (SNIC, 2024).

Nesse contexto, os materiais álcali-ativados (MAA) têm sido investigados como alternativas ao CP, devido à possibilidade de utilização de subprodutos industriais ricos em aluminossilicatos, como cinzas volantes, escórias e metacaulim. Esses materiais resultam da reação entre precursores aluminossilicatos e ativadores alcalinos, formando géis responsáveis pelas propriedades mecânicas. Dependendo da composição do sistema, os MAA podem apresentar menor impacto ambiental, elevada resistência química e térmica e menor retração (MARVILA; AZEVEDO; VIEIRA, 2021).

Outra estratégia voltada à sustentabilidade na construção civil consiste na

utilização de agregados leves, como o poliestireno expandido (EPS), visando à redução da densidade dos elementos construtivos. Estudos indicam que a incorporação de EPS pode reduzir o peso do concreto, mantendo propriedades mecânicas compatíveis com aplicações

TABELA 2

PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO CIMENTO

Parâmetros	
Massa específica (g/cm ³)	2,8 ≤ γ ≤ 3,2
Solubilidade em água	até 1,5 g/l (temperatura a 20 °C)
pH	12 a 14

FONTE: FABRICANTE (2026)

TABELA 3

CARACTERÍSTICAS, COMPOSIÇÕES E RAZÕES MOLARES DOS ATIVADORES

Propriedades	NaOH (8 mol/L)	Na ₂ SiO ₃
Sólidos totais (%)	25,24	46,21
Relação H ₂ O/NaOH	2,96	—
Módulo de sílica (SiO ₂ /Na ₂ O)	—	2,21
Densidade (g/cm ³)	1,035	1,583
Viscosidade (cp)	—	1,074

FONTE: AUTOR (2026)

TABELA 4COMPONENTES DO CONCRETO EM KG/M³

Material	C80EPS	C60EPS	C40EPS
Cinza volante	503,24 kg/m ³	503,24 kg/m ³	503,24 kg/m ³
CP	55,91 kg/m ³	55,91 kg/m ³	55,91 kg/m ³
EPS	7,13 kg/m ³	5,34 kg/m ³	3,5 kg/m ³
Areia	219,61 kg/m ³	440,03 kg/m ³	659,64 kg/m ³
NaOH	139,38 kg/m ³	139,38 kg/m ³	139,38 kg/m ³
Na ₂ SiO ₃	139,38 kg/m ³	139,38 kg/m ³	139,38 kg/m ³

FONTE: AUTOR (2026)

não estruturais (SOUZA *et al.*, 2021). No entanto, ainda são limitados os estudos voltados à produção de blocos de vedação à base de MAA com incorporação de EPS.

Sob esse viés, este trabalho avalia a viabilidade técnica da produção de blocos leves de vedação à base de MAA, com substituição parcial da areia

por EPS (40%, 60% e 80%), considerando propriedades nos estados fresco e endurecido. A investigação busca ampliar o conhecimento sobre a aplicação conjunta de materiais álcali-ativados e agregados leves em sistemas de vedação, contribuindo para a avaliação da viabilidade técnica desses materiais em blocos leves.

**FIGURA 1**

ENSAIOS REALIZADOS NO ESTADO FRESCO: A) MINI SLUMP; B) DENSIDADE; C) ÍNDICE DE FLUIDEZ

FONTE: AUTOR (2026)

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

2.1.1 COMPONENTES DA PASTA

Os materiais utilizados foram: cinza volante, cimento Portland (CP), hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio (Na₂SiO₃). A cinza volante foi fornecida pela Usina Termelétrica Energia Pecém-CE.

Na Tabela 1, é apresentada a caracterização da cinza volante. A composição química foi determinada por Fluorescência de Raios X (FRX), sendo apresentados os principais óxidos. A distribuição granulométrica foi obtida por granulometria a laser, a massa específica foi determinada de acordo com os procedimentos da ABNT NBR 16605:2017, e a área de superfície específica foi obtida conforme a ABNT NBR 16372:2015, pelo método de Blaine.

O cimento foi adquirido em comércio local, sendo do tipo CP II-32, da marca Apodi. Foi utilizado em 10% como adição suplementar, visando acelerar a pega e dispensar a cura térmica. A caracterização do cimento é apresentada na Tabela 2.

A solução ativadora foi composta por silicato de sódio (Na₂SiO₃) e hidróxido de sódio (NaOH), fornecidos pela empresa Gota Química. O Na₂SiO₃ foi utilizado na forma líquida, enquanto o NaOH, em escamas com pureza de 97,9%, sendo dissolvido em água para obtenção de uma solução de 8 mol/L. Devido ao caráter exotérmico da reação, a solução foi mantida em repouso por 24 horas. As composições dos ativadores estão na Tabela 3.

2.1.2 AGREGADOS

Utilizou-se areia natural, caracterizada quanto à granulometria, apresentando diâmetro máximo característico (DMC) de 2,36 mm e módulo de finura de 3,70. A massa específica foi de 2,62 g/cm³, determinada segundo o método DNER-ME 194 (1998).

As pérolas de poliestireno expandido (EPS), adquiridas no comércio local,

foram caracterizadas quanto à granulometria por peneiramento em malha de 4,75 mm. O material apresentou diâmetros médios de 5,96 mm e 4,17 mm, além de massa específica de 0,11 g/cm³.

2.2 Método de pesquisa

Para a produção dos concretos, utilizou-se uma matriz aglomerante composta por 90% de cinza volante e 10% de CP. A relação entre os ativadores alcalinos foi de 1:1 (NaOH: Na₂SiO₃).

O teor de agregados foi variado por meio da substituição volumétrica da areia por EPS nos percentuais de 80%, 60% e 40%, originando as misturas denominadas C80EPS, C60EPS e C40EPS, conforme apresentado na Tabela 4.

2.2.1 PRODUÇÃO DA PASTA

Os componentes da pasta álcali-ativada foram misturados em argamassadeira planetária. O procedimento iniciou-se com um período de pré-homogeneização dos precursores e ativadores por 60 segundos, manualmente. Em seguida, a mistura foi submetida à rotação de 62 ± 5 rpm durante 1 minuto e 30 segundos. Por conseguinte, realizou-se uma pausa para raspagem das paredes do recipiente por 60 segundos. Por fim, a argamassadeira foi ligada novamente na mesma rotação por mais 1 minuto e 30 segundos, totalizando 5 minutos de mistura.

Com isso, foram avaliadas as propriedades de trabalhabilidade, massa específica e fluidez no estado fresco, conforme apresentado na Figura 1.

A determinação da massa específica aparente é dada conforme apresentado na Equação 1. Por sua vez, a tensão de escoamento foi determinada de acordo com a Equação 2.

$$[1] \quad \rho = \frac{m}{v}$$

$$[2] \quad \tau (Pa) = \frac{225\rho g \Omega^2}{185\pi^2 R^5}$$

Em que ρ = densidade aparente (g/cm³ ou kg/m³), m = massa da pasta (g ou kg) e V = volume total da pasta, incluindo vazios (cm³ ou m³), Ω = volume

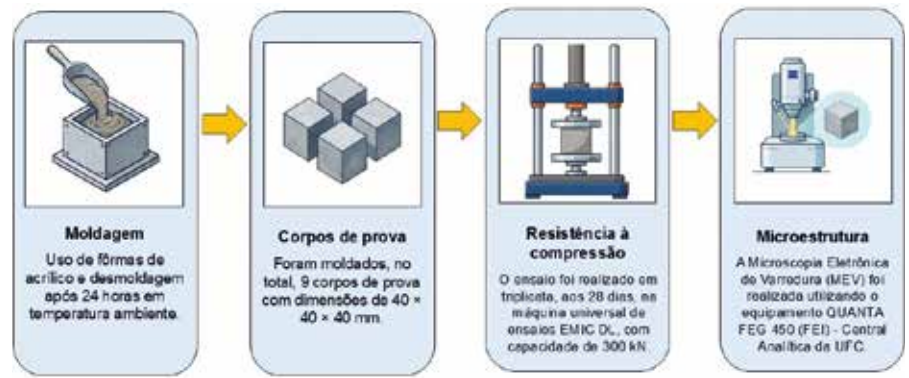


FIGURA 2
ETAPAS EXPERIMENTAIS
FONTE: AUTOR (2026)

do mini cone de abatimento em m³ e R = raio de espalhamento do mini abatimento em metros.

Em seguida, foram moldados os corpos de prova e realizados os ensaios no estado endurecido, conforme ilustrado na Figura 2.

2.2.2 PRODUÇÃO DO CONCRETO

O processo experimental adotado

para a produção do concreto está ilustrado na Figura 3.

A realização da mistura se iniciou pela adição do EPS e de parte da solução ativadora. Em seguida, foram incorporados a cinza volante e o CP, seguidos da areia e do restante da solução ativadora. Após isso, realizou-se à moldagem dos blocos (30 x 15 x 8 cm), dos corpos de prova cilíndricos (10 x 20 cm) e dos



FIGURA 3
ETAPAS EXPERIMENTAIS DO CONCRETO
FONTE: AUTOR (2026)

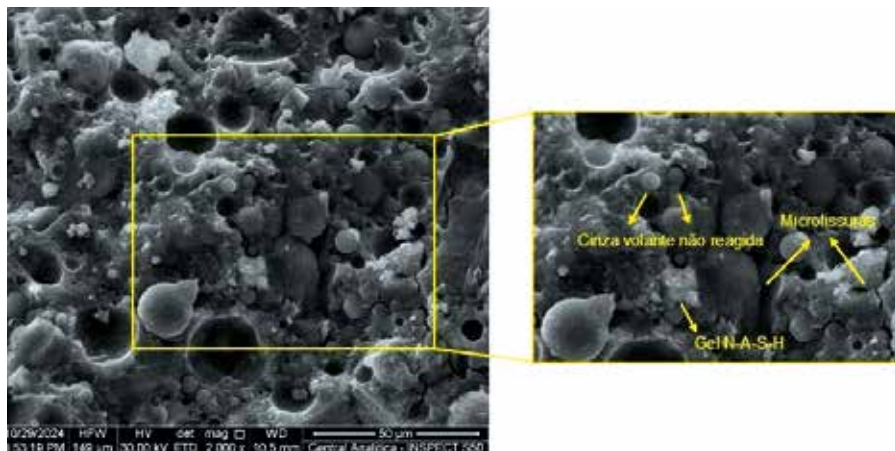


FIGURA 4
MICROSCÓPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DA PASTA COM CINZA VOLANTE
FONTE: AUTOR (2026)

corpos de prova cúbicos ($10 \times 10 \times 10$ cm), sendo produzidas em duplicata. A cura ocorreu em temperatura ambiente, com desmoldagem após 24 horas.

Os corpos de prova cilíndricos e os blocos foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias, enquanto os corpos de prova cúbicos foram utilizados para a determinação da densidade aparente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Propriedades da pasta

A pasta apresentou espalhamento de 123,6 mm no ensaio de mini *slump*, indicando adequada fluidez. Esse

comportamento também foi corroborado pela baixa tensão de escoamento, estimada em 4,6 Pa, e pelo tempo de escoamento no viscosímetro tipo copo Ford, de 184 segundos, evidenciando uma mistura com boa coesão, característica típica dos MAA (PALACIOS *et al.*, 2009).

A massa específica aparente da pasta foi de $1,6738 \text{ g/cm}^3$, indicando adequado nível de compactidade e homogeneidade da mistura, fatores importantes para o desempenho mecânico do material no estado endurecido (MINDESS; YOUNG; DARWIN, 2003).

A resistência à compressão média da pasta aos 28 dias foi de 55,4 MPa, indicando desempenho mecânico satis-

fatório. Em estudo realizado por Costa, Cabral e Nogueira (2024), pastas alcali-ativadas compostas por 100% de cinza volante apresentaram resistência à compressão de 53,7 MPa no mesmo período, evidenciando concordância com os resultados obtidos.

A microestrutura da pasta, apresentada na Figura 4, evidencia a presença de regiões densificadas associadas à formação de géis aglomerantes, bem como descontinuidades relacionadas à presença de partículas de cinza volante não reagidas e à incorporação de vazios, características típicas de MAA.

As partículas de cinza volante não reagidas, mesmo após o processo de ativação alcalina, preservam sua morfologia original, sendo constituídas predominantemente por fases cristalinas mais estáveis e de baixa reatividade, em contraste com as frações amorfas, que são as principais responsáveis pelas reações de ativação (CRIADO *et al.*, 2005).

Observa-se a incorporação parcial das partículas de cinza volante à matriz, evidenciando a ocorrência das reações de ativação alcalina. Os resultados de FRX apresentado na Tabela 1 indicam que o sistema apresenta elevado teor de SiO_2 e Al_2O_3 e baixo teor de CaO . Nessas condições, é favorecida a formação de gel do tipo N-A-S-H, considerado o principal produto de reação em ligantes alcali-ativados de baixo teor de cálcio (PROVIS, 2014). Essa combinação de fases contribui para a densificação da microestrutura, refletindo positivamente no desempenho mecânico do material.

A análise da porosidade foi realizada a partir das imagens do MEV, apresentada na Figura 5, a qual foi processada por meio do software *ImageJ*, permitindo a distinção entre vazios (regiões claras) e matriz sólida (regiões escuras). A área analisada gerou os dados quantitativos de distribuição de poros, apresentados na Figura 6.

Observa-se predominância de poros com áreas compreendidas entre $0,02$ e $0,10 \mu\text{m}^2$, enquanto apenas 7,76% dos poros apresentam áreas superiores a $0,10 \mu\text{m}^2$. Por outro lado, uma fração reduzida, correspondente a 1,60%, apresenta áreas em torno de $0,01 \mu\text{m}^2$.

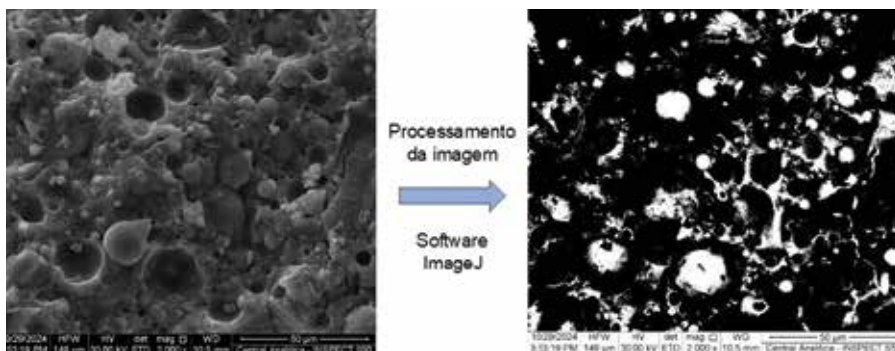


FIGURA 5
POROS PRESENTE EM UMA AMOSTRA DA PASTA
FONTE: AUTOR (2026)

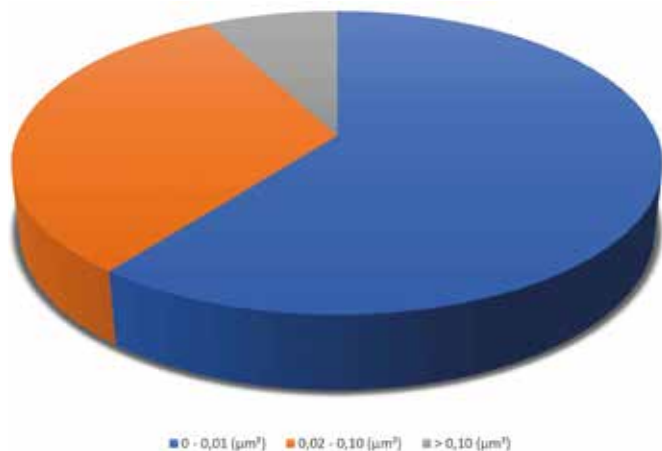


FIGURA 6
PERCENTUAL DE POROS POR INTERVALO DE ÁREA
FONTE: AUTOR (2026)

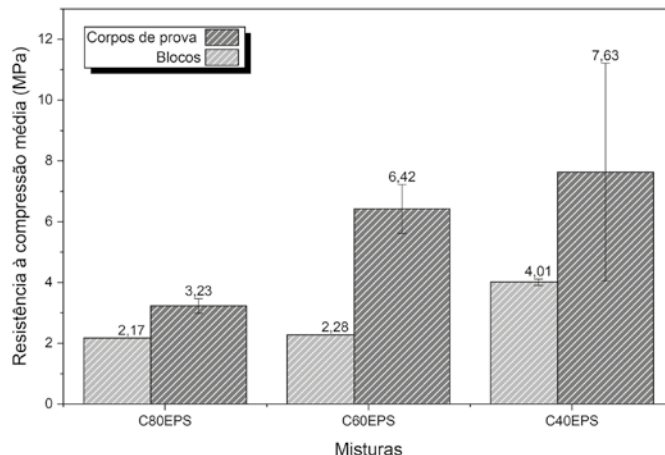


FIGURA 7
RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO
FONTE: AUTOR (2026)

A predominância de poros finos e a baixa fração de poros maiores indicam microestrutura densa e baixa conectividade de vazios, compatível com a resistência à compressão da pasta de 55,4 MPa.

3.2 Desempenho dos concretos e dos blocos

A Tabela 5 apresenta os resultados do abatimento de tronco no estado fresco e da massa específica aparente do concreto no estado endurecido.

Os valores de abatimento variaram entre 246 mm e 254 mm. De acordo com a NBR 8953:2015, os concretos produzidos enquadram-se na classe S220, por apresentarem abatimento superior a 220 mm, sendo classificados como fluidos e de elevada trabalhabilidade. Entretanto, não é indicado para aplicações estruturais, sendo mais adequado para produção de elementos construtivos como blocos de vedações

ou para enchimentos de contrapisos.

A massa específica aparente variou de 0,894 g/cm³ a 1,454 g/cm³, evidenciando a influência direta do aumento do teor de EPS na redução da densidade do material. Esse comportamento está associado à baixa densidade e ao caráter hidrofóbico do EPS, que tendem a reduzir a coesão da mistura. Embora seja desejável para a produção de blocos de vedação por diminuir o peso próprio dos elementos, a redução da densidade pode comprometer o desempenho mecânico, exigindo um equilíbrio entre leveza e resistência (SOUZA *et al.*, 2021; ANDRADE *et al.*, 2022).

Os resultados de resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos e blocos aos 28 dias são apresentados na Figura 7.

A resistência à compressão diminuiu com o aumento do teor de EPS, variando de 3,23 MPa (C80EPS) a 7,63 MPa (C40EPS), com redução de aproximadamente 58%. Esses resultados

corroboram estudos prévios que apontam o efeito da incorporação de EPS na redução da densidade e da resistência mecânica, limitando sua aplicação em elementos estruturais (SOUZA *et al.*, 2021).

Nos blocos, a resistência máxima foi de 4,01 MPa (C40EPS), valor compatível com aplicações não estruturais, como elementos de vedação. A redução da resistência está associada à menor massa específica, que promove maior leveza, porém com impacto no desempenho mecânico (AHMMED *et al.*, 2023).

O desempenho dos blocos é influenciado pela microestrutura do concreto, em especial pela interação entre a matriz, os agregados e as zonas de transição interfacial (ZTI). Embora a pasta apresente uma matriz densa, a presença de EPS e as características da ZTI exercem papel determinante na resistência do material. As ZTI são regiões críticas da microestrutura, influenciando diretamente a propagação de fissuras e a capacidade resistente do compósito (ROSSIGNOLO, 2007).

A superfície lisa das pérolas de EPS reduz a aderência à matriz, enquanto sua distribuição granulométrica relativamente uniforme favorece a formação de vazios, resultando em maior porosidade do concreto. Esses fatores contribuem para a redução da resistência mecânica dos blocos de vedação.

TABELA 5
ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE E MASSA ESPECÍFICA

	C80EPS	C60EPS	C40EPS
Abatimento (mm)	246 mm	247 mm	254 mm
Massa específica (g/cm ³)	0,968	0,894	1,454

FONTE: AUTOR (2026)

Nas Figuras 8a e 8b, podem-se observar as faces de acabamento do bloco e na Figura 8c, o estado do material após o ensaio de resistência à compressão.

Observa-se ainda que os blocos apresentaram fissuração sem ruptura completa, indicando comportamento de falha progressiva, com dissipação gradual de energia. Esse comportamento está associado à presença do EPS na matriz, que contribui para a redução da rigidez e favorece a redistribuição de tensões, retardando a ruptura abrupta.

A propagação de fissuras ao redor dos vazios evidencia a influência da interface matriz-agregado leve no mecanismo de ruptura, típica de concretos leves. Embora o aumento do teor de EPS reduza a resistência mecânica, os blocos mantêm desempenho adequado para vedação não estrutural, combinando menor densidade e ruptura gradual.

4. CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou a viabilidade técnica da produção de blocos leves com a combinação de MAA e EPS. A



FIGURA 8

CORPOS DE PROVA DE CONCRETO LEVE ÁLCALI-ATIVADO: A) FACE LISA; B) FACE IRREGULAR; C) APÓS A RUPTURA

FONTE: AUTOR (2026)

avaliação da pasta apresentou adequada trabalhabilidade, com espalhamento de 123,6 mm, e elevada resistência à compressão, atingindo 55,4 MPa aos 28 dias. O MEV evidenciou a formação de géis cimentantes por meio da ativação da cinza volante.

Nos concretos, a substituição parcial da areia por EPS promoveu a redução da

massa específica, favorecendo a produção de elementos leves. As resistências à compressão, variando de 2,17 a 4,01 MPa, atenderam às exigências normativas para elementos de vedação, demonstrando que o uso combinado desses materiais constitui uma alternativa técnica e ambiental promissora para a fabricação de componentes leves. ☺

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AHMMED, Moudud; ABEDIN, Zainul; PAUL, Subrata; BHUIYAN, Golam Kibria; RAHAMAN, Hafijur; HOSSAIN, Mohammad Afzal; ISLAM, Monirul; KHAN, Arifat Ullah. Development of lightweight building blocks using expanded polystyrene. *Gsc Advanced Research And Reviews*, [S.L.], v. 17, n. 2, p. 047-059, 30 nov. 2023. GSC Online Press. <http://dx.doi.org/10.30574/gscarr.2023.17.2.0402>.
- [2] ANDRADE, Matheus Alves; DIAS, Paulo Roberto; XAVIER, Yuri Schneider; SARMENTO JUNIOR, Rogério Gonçalves. A utilização de Poliestireno Expandido (EPS) como agregado no concreto. *M-SR: Multi-Science Research*, Vitória, Multivix, v. 5, n. 1, p. 53-66, jan./jun. 2022. ISSN 2595-7252.
- [3] CRIADO, M.; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products. *Fuel*, v. 84, n. 16, p. 2048-2054, 2005.
- [4] COSTA, Heloína Nogueira da; CABRAL, Antônio Eduardo Bezerra; NOGUEIRA, Ricardo
- [5] Emílio Ferreira Quevedo. Alkali-activated pastes by Basic Oxygen Furnace slag and fly ash: Mechanical and microstructural analysis. *Case Studies in Construction Materials*, v. 22, e04128, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e04128>.
- [6] LOPES, H. M. T.; PEÇANHA, A. C. C.; CASTRO, A. L. DE. Considerações sobre a eficiência de misturas de concreto de cimento Portland com base no conceito de empacotamento de partículas. *Revista Matéria*, v.25, n.1, 2020.
- [7] MARVILA, Markssuel Teixeira; AZEVEDO, Afonso Rangel Garcez de; VIEIRA, Carlos Maurício Fontes. Reaction mechanisms of alkali-activated materials. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 14, n. 3, e14309, 2021.
- [8] MINDESS, Sidney; YOUNG, J. Francis; DARWIN, David. *Concrete*. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2003.
- [9] PALACIOS, M. et al. Adsorption of superplasticizer admixtures on alkali-activated slag pastes. *Cement and Concrete Research*, v. 39, n. 8, p. 708-718, 2009.
- [10] PROVIS, J. L. Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what?. *Materials and Structures*, [S.L.], v. 47, n. 1-2, p. 11-25, 2014. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-013-0211-5>.
- [11] ROSSIGNOLO, J.A.. Avaliação da zona de transição interfacial pasta-agregado leve em concretos com sílica ativa e látex SBR. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 12, n. 3, pp. 532 - 540, 2007. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-70762007000300015>.
- [12] SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). Relatório Anual 2024. Rio de Janeiro: SNIC, 2025. Disponível em: <http://snic.org.br>. Acesso em: maio 2026.
- [13] SOUZA, T. B.; LIMA, V. M. E.; ARAÚJO, F. W. C.; MIRANDA, L. F. R.; MELO NETO, A. A. Alkali-activated slag cellular concrete with expanded polystyrene (EPS). *Journal of Sustainable Building Materials*, v. 45, n. 2, p. 123-134, 2021.

Acesse
nosso site!



Soluções da fundação ao acabamento!



 **VOTORANTIM**
cimentos

É bom demais!

Earth Friendly Concrete (EFC): ligantes alcalinamente ativados para aplicações estruturais e pré-fabricadas

HOLGER SCHMIDT - ENG. DR. — MC-Bauchemie
KAI MARKIEFKA - M.Sc. — MC-Bauchemie

RESUMO

A NECESSIDADE DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO NA CONSTRUÇÃO CIVIL TEM IMPULSIONADO O DESENVOLVIMENTO DE LIGANTES ALTERNATIVOS AO CIMENTO PORTLAND, DESTACANDO-SE OS CONCRETOS À BASE DE ATIVAÇÃO ALCALINA. NESTE CONTEXTO, O *EARTH FRIENDLY CONCRETE* (EFC) UTILIZA MATERIAIS DE ORIGEM INDUSTRIAL, COMO ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO-FORNO E CINZAS VOLANTES, ATIVADOS QUIMICAMENTE PARA FORMAR UMA MATRIZ LIGANTE COM PROPRIEDADES DISTINTAS DO CONCRETO CONVENCIONAL. O PRESENTE ARTIGO TEM COMO OBJETIVO APRESENTAR OS FUNDAMENTOS TÉCNICOS DO EFC E DISCUTIR SUA APLICABILIDADE EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS E PRÉ-FABRICADOS, COM BASE NA ANÁLISE DE LITERATURA TÉCNICA, EXPERIÊNCIAS INDUSTRIAIS E EVIDÊNCIAS NORMATIVAS. OS RESULTADOS INDICAM QUE O EFC PODE ATINGIR CLASSES DE RESISTÊNCIA EQUIVALENTES ÀS DO CONCRETO CONVENCIONAL COM RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO SUPERIORES A 40 MPa, ALÉM DE APRESENTAR ELEVADA DURABILIDADE EM AMBIENTES AGRESSIVOS, ESPECIALMENTE EM SISTEMAS DE SANEAMENTO. EVIDÊNCIAS NORMATIVAS RECENTES CORROBORAM A VIABILIDADE DE

SUA APLICAÇÃO EM CONDIÇÕES REAIS. CONCLUI-SE QUE O EFC REPRESENTA UMA ALTERNATIVA TÉCNICAMENTE VIÁVEL PARA A DESCARBONIZAÇÃO DA CONSTRUÇÃO CIVIL, CONDICIONADA À EVOLUÇÃO NORMATIVA E AO CONTROLE TECNOLÓGICO ADEQUADO.

PALAVRAS-CHAVE: LIGANTES ALTERNATIVOS, CONCRETO GEOPOLIMÉRICO, ATIVAÇÃO ALCALINA, DURABILIDADE, EARTH FRIENDLY CONCRETE (EFC), PRÉ-FABRICADO.

1. INTRODUÇÃO

A produção de cimento Portland é amplamente reconhecida como uma das principais fontes de emissões de dióxido de

carbono da construção civil. Esse impacto decorre tanto da calcinação do calcário, processo intrinsecamente emissor de CO₂, quanto do elevado consumo energético associado à produção do clínquer. Estimase-se que a indústria cimenteira seja responsável por aproximadamente 5 a 8 % das emissões globais de CO₂, o que confere ao setor papel central nas estratégias globais de mitigação das mudanças climáticas.

Nas últimas décadas, diferentes abordagens têm sido adotadas para reduzir o impacto ambiental do concreto, incluindo a substituição parcial do clínquer por adições minerais, o aumento da eficiência energética dos fornos e a otimização das formulações de concreto. Embora essas estratégias tenham proporcionado avanços relevantes, elas apresentam limites técnicos claros, uma vez que não eliminam a dependência do clínquer como principal responsável pelas emissões. Nesse cenário, os ligantes alternativos surgem como uma rota tecnológica complementar, com potencial de redução significativamente

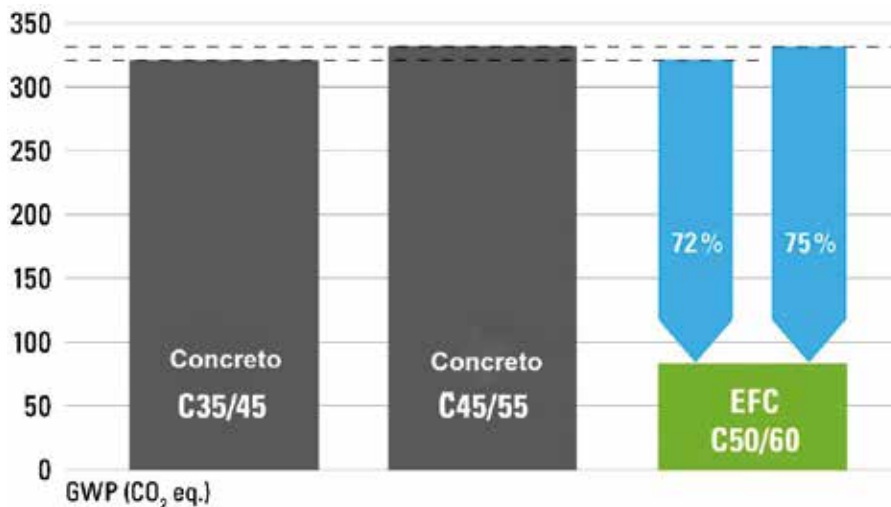


FIGURA 1

COMPARAÇÃO DO POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL (GWP) ENTRE DIFERENTES MISTURAS DE CONCRETO

FONTE: BFT - INTERNATIONAL (2023)

mais elevado da pegada de carbono.

Os concretos à base de ativação alcalina constituem uma das alternativas mais discutidas nesse contexto. Diferentemente do concreto convencional, no qual a resistência mecânica é obtida por meio da hidratação do cimento Portland, os sistemas alcalinamente ativados utilizam materiais ricos em silício e alumínio, ativados por soluções alcalinas, para formar uma matriz ligante com características químicas e microestruturais distintas. O *Earth Friendly Concrete* (EFC) representa uma abordagem industrialmente estruturada dessa tecnologia, concebida para atender às exigências da prática da engenharia estrutural e da produção em escala industrial. (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014; PROVIS, 2020).

Além disso, o EFC contribui de forma significativa para a redução de *Global Warming Potential* (CO₂ equivalente) conforme mostra a Figura 1.

Embora os concretos alcalinamente ativados e sistemas do tipo EFC apresentem avanços relevantes em aplicações internacionais, especialmente na Europa e Austrália, sua utilização no Brasil ainda é limitada e predominantemente restrita ao meio acadêmico e a estudos experimentais. Aspectos relacionados à normalização, disponibilidade de matérias-primas, adaptação tecnológica, custos logísticos e consolidação da cadeia produtiva ainda representam desafios para a ampla inserção desses sistemas no mercado nacional.

2. FUNDAMENTOS DO EARTH FRIENDLY CONCRETE (EFC)

O endurecimento do EFC baseia-se em mecanismos de ativação alcalina de materiais latentemente hidráulicos e pozolânicos, como a escória granulada de alto-forno e as cinzas volantes. Esses materiais, quando submetidos a um ambiente altamente alcalino, sofrem processos de dissolução das fases vítreas, liberando espécies ricas em silício, alumínio e cálcio.



FIGURA 2

MATERIAIS PARA EFC - MC-POWERFLOW 4104,
LIGANTE COMPOSTO POR ESCÓRIA + CINZA VOLANTE
E ATIVADOR

FONTE: MC - BAUCHEMIE (2022)

Essas espécies se reorganizam progressivamente, formando uma matriz ligante de natureza alumino-silicática, distinta dos produtos de hidratação típicos do cimento Portland. (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014; PROVIS, 2020). Como mostrado na Figura 2, os principais materiais necessários para o EFC: aditivo redutor de água tipo 2 com funcionamento em ambientes altamente alcalinos, escória de alto-forno, cinza volante e o ativador alcalino.

Enquanto no concreto convencional a resistência mecânica está associada majoritariamente à formação do silicato de cálcio hidratado e à presença de hidróxido de cálcio livre, no EFC a matriz resultante apresenta menor teor de hidróxidos livres e maior estabilidade química. Essa diferença fundamental explica, em grande medida, o comportamento diferenciado do EFC em ambientes agressivos, bem como sua boa resistência a ataques químicos e microbiológicos.

A cinética das reações de ativação alcalina é influenciada por diversos fatores, incluindo a composição química dos precursores, sua finura, a natureza e a concentração do ativador alcalino e a

relação água/ligante. O controle adequado desses parâmetros é essencial para garantir desempenho mecânico previsível, trabalhabilidade adequada no estado fresco e estabilidade volumétrica ao longo do tempo. Em aplicações industriais, a padronização desses fatores é condição indispensável para a repetitividade dos resultados e a confiabilidade do material. (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014; PROVIS, 2020).

3. DESEMPENHO MECÂNICO E DURABILIDADE

Do ponto de vista da engenharia estrutural, o *Earth Friendly Concrete* (EFC) apresenta propriedades mecânicas compatíveis com aplicações estruturais correntes. Ensaios experimentais e experiências industriais demonstram que o EFC pode atingir classes de re-

sistências à compressão compatíveis com aplicações estruturais correntes, frequentemente superiores a 40 MPa, mediante formulações adequadas e controle rigoroso do processo produtivo.

A viabilidade estrutural de concretos à base de ativação alcalina é corroborada por aprovações técnicas oficiais, como a autorização do *Deutsches Institut für Bautechnik* (DIBt) para tubos de concreto geopolimérico com resistências à compressão superiores a 45 MPa, aplicáveis em sistemas de saneamento e dimensionados conforme normas estruturais europeias (DIBt, 2024a; 2024b).

Além da resistência à compressão, valores de módulo de elasticidade e resistência à tração compatíveis com o dimensionamento estrutural são observados, permitindo a aplicação de modelos de cálculo já consolidados. É importante destacar, contudo, que a evolução da resistência ao longo do tempo pode apresentar características distintas daquelas observadas no concreto Portland, especialmente em idades iniciais, o que reforça a necessidade de critérios específicos de controle tecnológico e de liberação de peças em processos industriais.

Um aspecto particularmente relevante do EFC é o seu baixo calor de reação. Essa característica reduz significativamente a probabilidade de fissuração térmica em elementos de grande volume, como fundações, blocos de coroamento e paredes estruturais espessas. Em estruturas maciças, nas quais os gradientes térmicos internos podem comprometer a durabilidade e a integridade estrutural, o uso do EFC representa uma vantagem técnica significativa.

A durabilidade constitui uma característica técnica relevante do EFC. A matriz alumino-silicática formada no processo de ativação alcalina apresenta elevada resistência à ação de sulfatos, ácidos e ambientes microbiologicamente agressivos. A reduzida presença de hidróxidos de cálcio livres limita a formação de produtos expansivos e reduz a suscetibilidade a processos de degradação química. (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014; PROVIS, 2020).

Em sistemas de saneamento, a corrosão biogênica é uma das principais causas de deterioração prematura de estruturas de concreto. Nesse contexto, o EFC apresenta desempenho particularmente favorável, uma vez que sua matriz química é menos suscetível à ação de ácidos formados por processos microbiológicos. Essa característica contribui diretamente para o aumento da vida útil de tubos de concreto, galerias e estações de tratamento, reduzindo custos de manutenção e intervenção ao longo do ciclo de vida.

A existência de aprovações normativas para aplicações estruturais demonstra que esses materiais já atingiram nível de maturidade tecnológica

compatível com o uso em infraestrutura, incluindo exigências de desempenho mecânico, durabilidade e controle de produção (DIBt, 2024a).



FIGURA 3
APLICAÇÃO EFC EM 4HÖFE

Fonte: MC - BAUCHEMIE (2024)



FIGURA 4
APLICAÇÃO EFC EM 4HÖFE

Fonte: MC - BAUCHEMIE (2025)

4. APLICAÇÕES EM EDIFICAÇÕES E ELEMENTOS PRÉ-FABRICADOS

A aplicação do EFC em sistemas construtivos reais tem evoluído de forma consistente, com destaque para edificações estruturais e elementos pré-fabricados de infraestrutura. Em ambos os contextos, o material tem demonstrado capacidade de atender aos requisitos de desempenho mecânico, durabilidade e viabilidade de produção, mantendo compatibilidade com os métodos executivos convencionais da construção civil.

Em edificações, o EFC tem sido aplicado em fundações, lajes e paredes estruturais moldadas in loco, sem necessidade de alterações significativas nos processos de lançamento, adensamento e acabamento. Experiências de obra indicam comportamento reológico adequado, com boa trabalhabilidade e acabamento superficial compatível com exigências arquitetônicas correntes. Projetos realizados com EFC também evidenciam reduções expressivas no potencial de aquecimento global, decorrentes principalmente da eliminação do clínquer na composição do ligante.

Em aplicações de maior escala, experiências industriais internacionais demonstram a viabilidade do uso do EFC em volumes elevados de produção, como no

empreendimento West Wellcamp, na Austrália, no qual concretos alcalinamente ativado foram utilizados em larga escala em projetos de infraestrutura e edificações de grande porte (PROVIS, 2020; IEA, 2023; GCCA, 2023).

Entre os casos de aplicação em edificações, destaca-se o empreendimento residencial 4Höfe, em Norderstedt, Alemanha, no qual o EFC foi empregado em elementos estruturais moldados in loco, incluindo



FIGURA 5
APLICAÇÃO EFC EM PRÉ-FABRICADO
FONTE: MC - BAUCHEMIE (2022)

fundações e paredes estruturais, totalizando aproximadamente 3.000 m³ de concreto. A adoção do EFC permitiu uma redução estimada de cerca de 600 toneladas de CO₂, mantendo os requisitos estruturais



FIGURA 6
INSTALAÇÃO DE PEÇAS PRÉ-FABRICADAS
FONTE: BFT - INTERNATIONAL (2023)

repetitividade do desempenho mecânico, fatores essenciais para sistemas alcalinamente ativados. Nesse contexto, plantas de pré-fabricação têm operado com volumes diários superiores a 100 m³ de EFC, sem prejuízo da estabilidade do processo produtivo e da qualidade final dos elementos produzidos. Na Figura 5, pode ser observado o lançamento do EFC em moldes para os painéis estruturais e, na Figura 6, a instalação destes painéis.

No segmento de infraestrutura, destacam-se aplicações do EFC na produção de tubos de concreto para sistemas de saneamento. Em plantas industriais, a utilização do material tem permitido a fabricação de tubos com diâmetros variando de DN 300 a DN 2400, mantendo desempenho mecânico compatível com as exigências normativas e elevada

e de durabilidade previstos em projeto, além de compatibilidade com os processos construtivos convencionais conforme pode ser visto na Figura 3 e na Figura 4.

Os elementos pré-fabricados representam um campo particularmente favorável à aplicação do EFC, em função do elevado grau de controle do processo produtivo. A produção industrial permite maior padronização das matérias-primas, controle das variáveis de dosagem e

resistência à corrosão biogênica. A eliminação de revestimentos internos poliméricos, frequentemente necessários em soluções convencionais, resulta em simplificação do sistema construtivo, redução de custos e ganhos ambientais ao longo do ciclo de vida (DIBt, 2024b). Um exemplo dos tubos em EFC é mostrado na Figura 7.

De forma geral, a aplicação do EFC evidencia que a tecnologia já atingiu um nível de maturidade compatível com a prática da engenharia, permitindo sua utilização tanto em elementos moldados *in loco* quanto em sistemas pré-fabricados, com desempenho técnico adequado e benefícios ambientais relevantes.

5. CONTROLE TECNOLÓGICO, ADITIVOS E ENQUADRAMENTO NORMATIVO

O controle tecnológico do EFC exige abordagens distintas daquelas tradicionalmente aplicadas ao concreto à base de cimento Portland, uma vez que o desempenho do sistema alcalinamente ativado depende fortemente da composição química dos precursores, da dosagem e da estabilidade do ativador, do controle reológico e das condições de cura. Esses fatores tornam o processo mais sensível a variações de matéria-prima e de produção, exigindo maior rigor no controle dos parâmetros de dosagem e execução.

Embora ensaios convencionais de consistência, resistência mecânica e durabilidade permaneçam aplicáveis, a interpretação



FIGURA 7
TUBOS EM EFC NA NEXT-BETON
FONTE: BFT - INTERNATIONAL (2023)

dos resultados deve considerar as particularidades do sistema alcalinamente ativado. A compatibilidade com aditivos químicos constitui um aspecto crítico, uma vez que produtos desenvolvidos para matrizes cimentícias convencionais apresentam eficácia limitada nesse contexto, sendo necessária a utilização de soluções especificamente adaptadas a ambientes de elevada alcalinidade (RILEM, 2021-2024).

A maturidade tecnológica desses sistemas é evidenciada por aprovações técnicas oficiais que abrangem não apenas aplicações específicas, mas também o próprio sistema ligante. Destaca-se a aprovação do *Deutsches Institut für Bautechnik* (DIBt) para o ligante geopolimérico "*Wagners EFC Binder*", cuja utilização é permitida em concretos submetidos a diferentes classes de exposição, incluindo ambientes agressivos até XA3, com comportamento equivalente a cimentos de alta resistência a sulfatos, conforme normas europeias (DIBt, 2024a).

Nesse contexto, o sistema requer controle tecnológico específico, incluindo a formulação da solução ativadora, a sequência de mistura e as condições de cura, evidenciando que o desempenho do EFC está diretamente associado ao rigor do processo produtivo, diferentemente do concreto Portland convencional.

Do ponto de vista normativo, embora os concretos alcalinamente ativados ainda não sejam plenamente contemplados por normas prescritivas tradicionais, sua aplicação tem sido viabilizada por meio de

aprovações técnicas específicas e abordagens baseadas em desempenho. Aprovações oficiais, como as emitidas pelo *Deutsches Institut für Bautechnik* (DIBt), demonstram que esses materiais já atendem aos requisitos estruturais e de durabilidade exigidos para aplicações reais. A evolução das normas, com maior ênfase em critérios de desempenho e sustentabilidade, tende a ampliar o espaço para a consolidação desses materiais na prática da engenharia.

Apesar dos avanços observados nas aplicações internacionais, os sistemas baseados em ativação alcalina ainda enfrentam desafios técnicos e mercadológicos importantes. A variabilidade química dos precursores industriais, a sensibilidade do sistema às condições de cura e à composição dos ativadores, bem como a limitada padronização normativa, representam fatores que dificultam a ampla disseminação da tecnologia. Adicionalmente, a disponibilidade regional e a variabilidade de matérias-primas, como escória granulada de alto-forno, cinzas volantes e outras pozolanas industriais, podem limitar a escalabilidade desses sistemas em determinados mercados, especialmente diante das transformações industriais e energéticas em curso.

Aspectos relacionados à compatibilidade com aditivos químicos convencionais, à estabilidade reológica, ao controle da retração e à variabilidade de desempenho em diferentes condições de produção ainda demandam aprofundamento técnico

e maior consolidação experimental em determinadas aplicações estruturais.

Do ponto de vista de mercado, a limitada familiaridade dos profissionais da construção civil com sistemas alcalinamente ativados, associada à ausência de normas prescritivas específicas em diversos países, incluindo o Brasil, ainda constitui uma barreira relevante para sua adoção em larga escala.

Nesse contexto, embora o EFC apresente elevado potencial para aplicações sustentáveis e de alto desempenho, a consolidação da tecnologia depende da continuidade de pesquisas, da evolução normativa e do desenvolvimento de cadeias produtivas adaptadas às condições regionais.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O EFC apresenta potencial relevante como solução técnica complementar no contexto dos ligantes alternativos, apresentando desempenho mecânico, durabilidade e viabilidade industrial compatíveis com as exigências da engenharia estrutural contemporânea. Embora desafios normativos e de padronização ainda persistam, os avanços tecnológicos e as experiências industriais já acumuladas indicam que o EFC pode desempenhar papel relevante na descarbonização da construção civil, atuando como solução complementar ao concreto Portland e contribuindo de forma efetiva para a transição do setor rumo a sistemas construtivos de menor impacto ambiental (AİTCIN, 2019; IEA, 2023; GCCA, 2023). ●

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. *Alkali Activated Materials*. Springer, 2014.
- [2] PROVIS, J. L. (Ed.). *Recent Advances in Alkali-Activated Materials*. Springer, 2020.
- [3] AİTCIN, P.-C. *Cements of Tomorrow*. CRC Press, 2019.
- [4] IEA - International Energy Agency. *Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry*. Paris, 2023.
- [5] GCCA - Global Cement and Concrete Association. *Cement and Concrete Roadmap to Net Zero Concrete*. London, 2023.
- [6] RILEM TC 247-DTA; TC 281-CCC. *Performance-based specifications for alternative binders*. 2021-2024.
- [7] MC-BAUCHEMIE. *Geopolymer - Was ist das?* Bottrop, 2022.
- [8] MC-BAUCHEMIE. *Klimafreundlicher Beton - Ein wichtiger Baustein für die Dekarbonisierung*. Bottrop, 2023.
- [9] BFT-INTERNATIONAL. *Klimafreundliches Bauen mit Beton - Betonwerk Fertigteiltbau*. Gütersloh, 2023.
- [10] MC-BAUCHEMIE. *MC aktiv - Earth Friendly Concrete*. Bottrop, 2024.
- [11] MC-BAUCHEMIE. *Geopolymerbeton für klimaschonenden Wohnungsbau*. Bottrop, 2025.
- [12] DIBt. *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-3.15-2157 - Komponenten für Geopolymer 'Wagners EFC Binder' für Beton*. Deutsches Institut für Bautechnik, 2024a.
- [13] DIBt. *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-42.1-606 - Geopolymerbetonrohre für Abwasserleitungen und -kanäle in mit der Bezeichnung „next.beton“*. Deutsches Institut für Bautechnik, 2024b.

Estratégias de projeto para concretos com adições minerais: a ruptura do controle da **resistência à compressão aos 28 dias** e a gestão de ciclo de vida no *fib Model Code 2020*

RICARDO COUCEIRO BENTO - PROF. DR. - <https://orcid.org/0000-0002-6069-306X> - (bento@pucpcaldas.br) – PUC MINAS

RESUMO

O *fib Model Code 2020 (MC 2020)* ESTABELECE UM NOVO MARCO GLOBAL PARA O PROJETO E GESTÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO, INTEGRANDO SUSTENTABILIDADE E DESEMPENHO AO LONGO DE TODA A VIDA ÚTIL. AO ROMPER COM O PARADIGMA TRADICIONAL DE CONTROLE DE RESISTÊNCIA AOS 28 DIAS E PERMITIR IDADES DE REFERÊNCIA ESTENDIDAS (56 OU 91 DIAS), O CÓDIGO VIABILIZA O USO DE CONCRETOS DE BAIXO TEOR DE CLÍNQUER E ELEVADOS TEORES DE LIGANTES ALTERNATIVOS COMO AS ADIÇÕES MINERAIS. EMBORA APRESENTEM DESENVOLVIMENTO INICIAL DE RESISTÊNCIA MAIS LENTO, TAIS MATERIAIS OFERECEM DURABILIDADE SUPERIOR E REDUÇÃO SIGNIFICATIVA DA PEGADA DE CARBONO. ESTE ARTIGO ANALISA A APLICAÇÃO DESSES PROCEDIMENTOS SOB A ÓTICA DO *LIFE CYCLE MANAGEMENT (LCM)*, EXPLORANDO A IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA DOS PRINCÍPIOS DE *QUALITY & INFORMATION MANAGEMENT (Q&IM)*. O EIXO CENTRAL DA ABORDAGEM É O DESENVOLVIMENTO DO *BIRTH CERTIFICATE* (CERTIDÃO DE NASCIMENTO) ESTRUTURAL, INSTRUMENTO QUE ASSEGURA A RASTREABILIDADE E A CAPTURA DE DADOS DE DESEMPENHO DESDE A CONCEPÇÃO. O ESTUDO DEMONSTRA COMO ESSA VALIDAÇÃO PRECOZE PERMITE EQUILIBRAR METAS DE DESCARBONIZAÇÃO COM A INTEGRIDADE ESTRUTURAL E OS CRONOGRAMAS EXECUTIVOS, GARANTINDO CONFORMIDADE COM O MC 2020 E A NORMATIZAÇÃO NACIONAL. CONCLUI-SE QUE A TRANSIÇÃO PARA IDADES DE CONTROLE ESTENDIDAS É A ESTRATÉGIA TÉCNICA IMPORTANTE PARA A VIABILIZAÇÃO DE CONCRETOS DE BAIXO IMPACTO AMBIENTAL. A IMPLEMENTAÇÃO DO MONITORAMENTO VIA *BIRTH CERTIFICATE* E A GESTÃO Q&IM ATUAM COMO O ELO DE SEGURANÇA

MANDATÓRIO, CONVERTENDO O HIATO INFORMATIVO DA CURA LENTA EM UMA TRAJETÓRIA DE DESEMPENHO PREVISÍVEL, AUDITÁVEL E TÉCNICAMENTE SEGURA AO LONGO DE TODA A VIDA ÚTIL DA ESTRUTURA.

PALAVRAS-CHAVE: MC 2020, SUSTENTABILIDADE, ADIÇÕES MINERAIS, CERTIDÃO DE NASCIMENTO ESTRUTURAL, GESTÃO DO CICLO DE VIDA.

1. INTRODUÇÃO

O *fib Model Code 2020 (MC 2020)* estabelece-se como o referencial pré-normativo de vanguarda para o concreto estrutural contemporâneo. Transcendendo as abordagens tradicionais, o documento consolida o estado da arte para ativos novos e existentes, integrando de forma holística, desde a concepção e execução até a desconstrução. A principal inovação reside na fusão de requisitos de segurança e resiliência com metas explícitas de preservação ambiental e eficiência de recursos [1].

Ao contrário do modelo convencional, centrado na conformidade pontual do material, o MC2020 adota o *Life Cycle Management - LCM* (Gerenciamento do Ciclo de Vida). Sob essa ótica, o valor de uma estrutura é medido por sua capacidade de manter o desempenho funcional com o menor impacto ambiental. Essa filosofia viabiliza a transição das idades de controle de 28 para 56 ou 91 dias. Tal flexibilidade é o catalisador para o uso de cimentos de baixo teor de clínquer e elevados volumes de adições minerais — como escórias e

cinzas volantes — reduzindo severamente a pegada de carbono do setor.

Essa mudança exige uma governança de dados rigorosa e nesse contexto, o *Quality & Information Management - Q&IM* (Gestão de Qualidade da Informação) emerge como o pilar de segurança, partindo do princípio que a confiabilidade estrutural não advém apenas de coeficientes parciais, mas da mitigação de incertezas via captura estruturada de dados. A gestão deixa de ser fragmentada para tornar-se um processo contínuo.

De acordo com as diretrizes do MC2020, a gestão estrutural deve ser compreendida não como uma sucessão de intervenções isoladas, mas como um processo contínuo e integrado. Essa abordagem inicia-se na Fase de Projeto, onde são estabelecidas as estratégias de durabilidade e os modelos de deterioração que regerão a vida útil da obra. Ao avançar para a Fase de Execução, o foco recai sobre a coleta de dados reais de construção, culminando na elaboração do *Birth Certificate* (Certidão de Nascimento) — documento essencial que formaliza o estado técnico da estrutura no momento de sua entrega. Por fim, durante a Fase de Manutenção a gestão consolida-se por meio do monitoramento sistemático e da recalibração constante das previsões de vida útil, garantindo que o desempenho real esteja alinhado às expectativas planejadas.

Embora o *fib Model Code 2010* já sinalizasse o uso de idades avançadas, suas

formulações ainda eram fortemente atreladas ao marco dos 28 dias. O MC2020 rompe definitivamente esse vínculo ao permitir idades de controle longevas (56 e 91 dias), institucionalizando a sustentabilidade no âmago do cálculo estrutural.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O Birth Certificate e o Digital Twin na gestão de riscos do MC 2020

Uma das inovações mais pragmáticas do MC2020 (Capítulos 6 e 10) é o conceito de *Birth Certificate* (BC), cujas diretrizes fundamentam-se no *fib Bulletin 93* [2]. Longe de ser um simples relatório de ensaios de compressão, o BC constitui o “DNA digital” do elemento estrutural, consolidando dados físicos e digitais que definem sua identidade e potencial de desempenho no ato da entrega. Este registro abrange a dosagem real executada, a procedência granulométrica dos materiais, gradientes térmicos de lançamento, protocolos de cura e, essencialmente, a correlação das resistências iniciais (3, 7 e 28 dias) com o desempenho alvo de longo prazo. O BC estabelece a *baseline* (linha de base) que alimenta o *Digital Twin* (Gêmeo Digital) da estrutura, servindo de alicerce para a Gestão do Ciclo de Vida. Diferente de modelos BIM estáticos, o *Digital Twin* no contexto do MC2020 é um sistema dinâmico. Ele integra dados de monitoramento em tempo real para simular o comportamento futuro, calibrar parâmetros de segurança e viabilizar intervenções de manutenção proativas, garantindo que a estrutura cumpra sua função com máxima eficiência e mínima incerteza.

2.2 Protocolos de Life Cycle Management - LCM (Gerenciamento do Ciclo de Vida)

O *Life Cycle Management* - LCM (Gerenciamento do Ciclo de Vida), conforme estruturado no Capítulo 10 - *Implementation of Q&IM during LCM* do MC2020, estabelece um fluxo operacional projetado para mitigar os riscos inerentes à aceitação tardia do material. Este processo é segmentado em três etapas fundamentais:

FASE DE CONCEPÇÃO DA INFORMAÇÃO

Durante a etapa de projeto, estabelece-se a conformidade aos j dias como

marco de referência. Em consonância com o Capítulo 6 do MC2020, definem-se os indicadores de dados que comporão o BC, garantindo que os critérios de segurança e sustentabilidade sejam tecnicamente auditáveis.

EXECUÇÃO E CAPTURA ESTRUTURADA DE DADOS

No ato da concretagem, a integração de sensores *in situ* e a coleta de espécimes geram um fluxo de dados em tempo real para o BC. A robustez desse registro — incluindo o histórico térmico de cura e o desempenho mecânico em idades precoces — permite uma inferência estatística de alta confiabilidade sobre a resistência aos j dias, elevando o grau de previsibilidade do comportamento estrutural.

MONITORAMENTO DE DESEMPENHO (PERFORMANCE MONITORING)

O LCM utiliza o BC como ferramenta de manutenção preditiva. Em vez de uma postura reativa, aguardando o marco cronológico de j dias, o engenheiro valida continuamente a curva de maturação do concreto, assegurando que o elemento “nasça” em conformidade com as premissas de projeto.

Dessa forma, o BC atua como um instrumento de conformidade antecipada. Caso o BC apresente densidade de dados suficiente e correlação precoce positiva, o MC2020 permite o carregamen-

to progressivo da estrutura com base na resistência estimada, relegando o ensaio de j dias à função de auditoria final. Por outro lado, a detecção de anomalias no BC (como desvios na resistência em idades iniciais ou picos térmicos inadequados) confere ao gestor a autoridade técnica para intervir ou suspender o cronograma executivo de forma imediata e fundamentada.

O fluxo procedimental de implantação da Gestão da Qualidade da Informação durante o Gerenciamento do Ciclo de Vida (Q&IM durante o LCM) está exposto na Figura 1.

2.3 Modelos do fib Model Code 2020 e Eurocode 2:2023

A convergência normativa entre o MC 2020 e o *Eurocode 2:2023* consolidou uma abordagem avançada para a cinética de endurecimento do concreto. A metodologia fundamenta-se na interação de dois coeficientes críticos: $\beta_{cc}(t)$, que descreve a evolução da resistência à compressão no tempo, $\beta_{c,sus}(t, t_0)$, que pondera os efeitos da carga mantida e deve ser ajustado conforme a idade de carregamento. A metodologia foi detalhadamente demonstrada por BONI & HELENE [3].

A expressão unificada para o crescimento da resistência à compressão em função do tempo é apresentada na Equação 1.

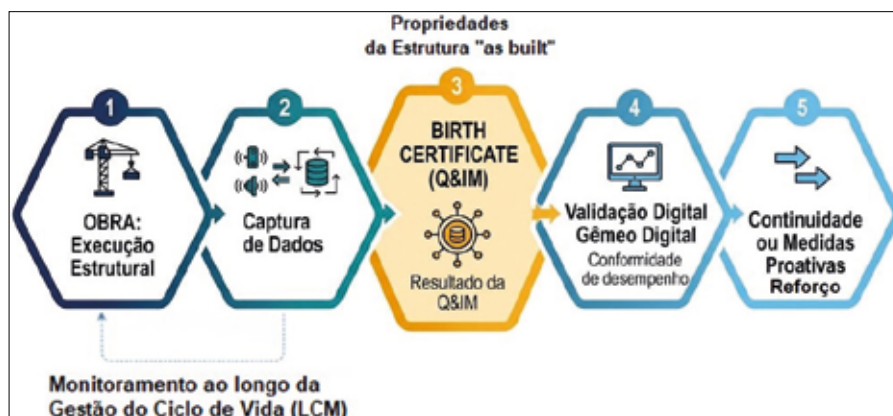


FIGURA 1

FLUXO PROCEDIMENTAL DE IMPLANTAÇÃO DA GESTÃO DA QUALIDADE DA INFORMAÇÃO DURANTE O GERENCIAMENTO DO CICLO DE VIDA (Q&IM DURANTE O LCM)

FONTE: O AUTOR (2026)

$$[1] \quad f_c(t) = \beta_{cc}(t) * f_c(t_{ref}) \rightarrow \frac{f_c(t)}{f_c(t_{ref})} = e^{\left\{ s_c * \left[1 - \sqrt{\frac{t_{ref}}{t}} \right] * \left(\sqrt{\frac{28}{t_{ref}}} \right) \right\}}$$

Onde:

$\beta_{cc}(t)$: função que representa o crescimento da resistência à compressão com o tempo, adimensional;

$f_c(t)$: resistência à compressão na idade t , dada em MPa;

t_{ref} : idade de controle e referência, em dias;

$f_{c(t_{ref})}$: resistência à compressão na idade t_{ref} , dada em MPa;

t : idade do concreto, em dias, que pode ser ajustada em função da temperatura.

S_c : coeficiente adimensional relacionado ao desenvolvimento da resistência do concreto variando de 0,1 a 0,6 e dependente do tipo de cimento e da resistência à compressão do concreto, conforme a Tabela 1.

A expressão trata do desenvolvimento da resistência do concreto em estado descarregado, governado puramente pela maturação da matriz. Entretanto, a imposição de tensões mantidas elevadas desencadeia fenômenos cinéticos distintos: ocorre uma redução da resistência à compressão ao longo do tempo devido ao efeito de longa duração. O MC 2020 considera esses efeitos por meio do coeficiente $\beta_{c,sus}$ apresentado na Equação 2.

$$[2] \quad \beta_{c,sus}(t, t_0) = \beta_{t_0}(t_0) + [1 - \beta_{t_0}(t_0)] * \left[1 + 10^4 \frac{(t - t_0)}{t_0} \right]^{-0,1}$$

Onde:

$\beta_{c,sus}(t, t_0)$: função que representa a

TABELA 1

VALORES DE S_c SEGUNDO MC 2020 E EUROCODE 2: 2023

Resistência à compressão do concreto (MPa)	S_c		
	Classe CS	Classe CN	Classe CR
$f_c \leq 35$	0,6	0,5	0,3
$35 < f_c < 60$	0,5	0,4	0,2
$f_c \geq 60$	0,4	0,3	0,1

Nota: As classes CS, CN e CR são determinadas em função do tipo e da classe de resistência do cimento. PODE-SE ADMITIR, PARA EFEITOS DE EQUIVALÊNCIA COM OS CIMENTOS NACIONAIS: CS (CP III ou CP IV), CN (CP I ou CP II) e CR (CP V). PARA DETERMINAÇÃO DAS CLASSES CS, CN e CR, CONSULTAR TABELA 14.6.8 "STRENGTH DEVELOPMENT CLASSES OF CONCRETE" DO *fib MODEL CODE 2020* OU A TABLE B1 "STRENGTH DEVELOPMENT CLASSES OF CONCRETE" DO *EUROCODE 2:2023* E A NORMA EN 197-1 "CEMENT - PART 1: COMPOSITION, SPECIFICATIONS AND CONFORMITY CRITERIA FOR COMMON CEMENTS".



FIGURA 2

FLUXOGRAMA DOS CÁLCULOS DA CONCEPÇÃO SEGUNDO O MC2020 AO *BIRTH CERTIFICATE*

FONTE: O AUTOR (2026)

diminuição da resistência ao longo do tempo em decorrência da carga mantida. Válida para $(t - t_0) > 0,015$ dias ~ 20 minutos.

$\beta_{t_0}(t_0)$: parâmetro que considera a maturidade do concreto: $\beta_{t_0}(t_0) = 0,64 + 0,01 \cdot i_n(t_0)$.

t_0 : idade de carregamento do concreto, em dias. $t_0 \geq 7$ dias.

$(t - t_0)$: tempo de carga mantida, em dias. Para $(t - t_0) > 10$ anos, adotar $(t - t_0) = 3650$ dias.

Para representar simultaneamente os efeitos de crescimento (hidratação) e decréscimo (carga mantida) da resistência à compressão, é necessário que efetuemos a integração das Equações 1 e 2. Esta abordagem associativa descreve a evolução líquida da capacidade resistente do material ao longo do tempo, conforme expresso na Equação 3:

$$[3] \quad f_c(t) = \beta_{cc}(t) * \beta_{c,sus}(t, t_0) * f_c(t_{ref})$$

Quanto ao módulo de elasticidade, o MC2020 estima o desenvolvimento do módulo de elasticidade do concreto segundo a seguinte formulação:

$$[4] \quad E_{ci}(t) = \beta_E(t) * E_{ci}$$

Com:

$$\beta_E(t) = [\beta_{cc}(t)]^{0,33}$$

Onde:

$E_{ci}(t)$: módulo de elasticidade em MPa na idade de t dias

E_{ci} : módulo de elasticidade em MPa na idade de referência t_{ref}

$\beta_E(t)$: coeficiente dependente da idade do concreto em dias

$\beta_{cc}(t)$: é o coeficiente de acordo com a equação (1)

Na Figura 2 é apresentado um fluxograma dos cálculos que ilustra da concepção segundo o MC2020 ao *Birth Certificate*.

2.4 Influência dos cimentos com adições minerais no desempenho de concretos e justificativas para a adoção de idades avançadas

2.4.1 SINCRONIA COM A CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO DE LIGANTES DE BAIXO CARBONO

A substituição do clínquer por adições minerais altera fundamentalmente a termodinâmica do endurecimento. Diferente do Cimento Portland sem adições minerais, a reação pozolânica e a formação de produtos de hidratação secundários possuem uma cinética mais lenta. Portanto, a avaliação aos 28 dias é tecnicamente precoce para esses ligantes, pois subestima o desenvolvimento da resistência mecânica que atinge seu platô de estabilidade apenas entre 56 e 91 dias.

2.4.2 MATURIDADE DA MICROESTRUTURA E PARÂMETROS DE DURABILIDADE

O refinamento poroso e a densificação da matriz, essenciais para a mitigação do ingresso de agentes agressivos, consolidam-se de forma mais expressiva em idades tardias em concretos com ligantes alternativos. Ao deslocar o controle para 56 ou 91 dias, os modelos de previsão de vida útil (por exemplo, difusão de cloretos) passam a utilizar dados que refletem a microestrutura em seu estado de maturidade real, fornecendo indicadores de

durabilidade superiores aos obtidos em idades iniciais.

2.4.3 ALINHAMENTO COM O EUROCODE 2:2023 E O fib MODEL CODE 2020

As novas diretrizes internacionais desvinculam a resistência de projeto aos 28 dias para favorecer a eficiência estrutural. Ao estabelecer a resistência em idades tardias, o projetista permite que o *Birth Certificate* da estrutura registre uma capacidade portante otimizada e condizente com o comportamento de longo prazo. Isso assegura que os modelos de *Quality & Information Management* (Q&IM) operem com margens de incerteza reduzidas, fundamentadas na capacidade real do material.

2.4.4 REALISMO QUANTITATIVO E DESEMPENHO AMBIENTAL

A calibração dos indicadores de desempenho ambiental (como o CO_2/MPa) torna-se mais fidedigna em idades tardias. Nestas idades, a eficiência das adições é maximizada, permitindo que o projeto alcance metas de sustentabilidade mais ambiciosas, sem comprometer a segurança. A escolha de idades tardias converte o “ganho lento” em uma vantagem estratégica para a redução da pegada de carbono por unidade de resistência alcançada.

3. METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS PROPOSTOS

A metodologia deste estudo baseia-se nas diretrizes do *fib Model Code 2020* (MC 2020) para a flexibilização das idades de controle da resistência à compressão para 91 dias. O capítulo detalha o desenvolvimento de medidas proativas de projeto estrutural, que abrangem a especificação de perfis de resistência escalonada, o ajuste paramétrico da rigidez inicial e a definição de curvas de maturidade alvo. Por meio de simulações analíticas fundamentadas nas variáveis cinéticas de ligantes de baixo carbono, propõe-se um protocolo de validação estrutural que utiliza o *Birth Certificate* e a Gestão da Qualidade da Informação (Q&IM) como instrumentos para mitigar o hiato informativo entre a execução e a idade de controle final, garantindo a segurança e a integridade do ativo ao longo de seu ciclo de vida.

3.1 Estratégias de design proativo: requisitos para a transição ao controle aos 91 dias

A transição para a idade de controle de 91 dias e a implementação do *Birth Certificate* (BC) exigem que o projetista estrutural transcenda a mera alteração cronológica nos carimbos de projeto. Torna-se imperativo adotar uma postura proativa, fundamentada na segurança construtiva e na durabilidade sistêmica. Conforme as diretrizes do MC 2020, as iniciativas e ajustes paramétricos fundamentais são:

ESPECIFICAÇÃO DE PERFIS DE RESISTÊNCIA ESCALONADA

O conceito de um f_{ck} estático deve ser substituído por um perfil de crescimento de resistência. O projetista deve definir no memorial descritivo os valores de f_{ckj} para marcos críticos da obra. É fundamental validar se a resistência intermediária aos 28 dias é suficiente para suportar as solicitações de peso próprio e as sobrecargas dinâmicas da execução.

DEFINIÇÃO DA CURVA DE MATURIDADE ALVO

O projeto deve estabelecer a curva de referência necessária para a validação do BC. Uma nota técnica deve ser integrada ao projeto exigindo que o estudo de dosagem apresente a correlação rigorosa entre maturidade (integral tempo x temperatura) e resistência à compressão, utilizando modelos preditivos validados em laboratório.

SINCRONIA ENTRE RIGIDEZ E RESISTÊNCIA: AJUSTE DO MÓDULO DE ELASTICIDADE (E_c)

A análise estrutural deve considerar que o desenvolvimento do módulo de elasticidade (E_c) ocorre de forma mais acelerada que o ganho de resistência. O MC 2020 e o *Eurocode 2 (EN 1992-1-1:2023)* fornecem equações para a evolução temporal da rigidez em idades iniciais. Em concretos com altos teores de adições minerais, o incremento de rigidez da matriz é impulsionado pelo efeito físico e pela rápida densificação inicial [4]. Isso permite que verificações de Estados Limites de Serviço (ELS), especialmente o controle de flechas, sejam validadas precocemente, mesmo com a resistência final prevista para os 91 dias.

EXIGÊNCIA DO PLANO DE GESTÃO DA INFORMAÇÃO (Q&IM)

O projeto deve instituir a obrigatoriedade de um sistema de monitoramento estruturado. A aceitação técnica do concreto aos 91 dias fica condicionada à integridade do *Birth Certificate*, que deve fornecer os dados de maturidade e resistências precoces necessários para validar a trajetória de desempenho prevista.

OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE DURABILIDADE

Concretos com elevados volumes de escória ou cinza volante resultam em matrizes mais densas e resilientes, porém mais sensíveis às condições iniciais de hidratação. O projetista pode otimizar as camadas de cobrimento e os limites de abertura de fissuras, desde que o BC assegure uma cura úmida rigorosa e verificável, em estrita conformidade com as classes de exposição ambiental do MC 2020.

3.2 Exemplo de validação estrutural com controle de resistência aos 91 dias

Sob a ótica do projeto estrutural, a principal desvantagem do controle da resistência à compressão aos 91 dias reside no atraso crítico para a tomada de decisões e na validação das premissas de cálculo. Esse intervalo gera um “hiato informativo” de 63 dias em relação ao marco tradicional de 28 dias, onde deve ser aplicada uma “janela de predição digital”.

A Figura 3 apresenta a simulação de monitoramento de um concreto estrutural fictício projetado para uma resistência de referência f_{c91} de 50 MPa e um carregamento da construção suposto linear.

Este cenário ilustra a discrepância entre a percepção de risco convencional e a análise baseada na gestão do ciclo de vida:

ANÁLISE DA CURVA DE MATURAÇÃO (AZUL)

Aos 28 dias, o material atinge 32 MPa. Em um protocolo de controle tradicional, esse resultado seria classificado como uma não conformidade crítica, possivelmente acarretando paralisações onerosas ou reforços desnecessários.

DINÂMICA DE CARREGAMENTO (LARANJA)

A linha de Carga de Construção demonstra o incremento progressivo das

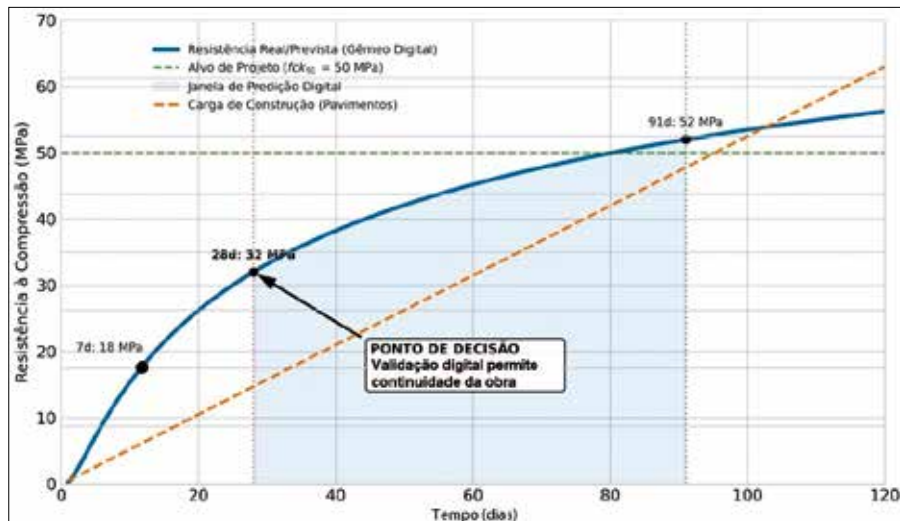


FIGURA 3

EXEMPLO DE VALIDAÇÃO DE UM CONCRETO PROJETADO PARA UM f_{c91} DE 50 MPa

FONTE: O AUTOR (2026)

solicitações (ex: avanço dos pavimentos superiores). O desafio técnico reside em garantir que a resistência disponível no instante j supere sempre a demanda estrutural, independentemente do valor final de projeto.

PREDIÇÃO VIA GÊMEO DIGITAL

Utilizando os dados reais capturados pelo *Birth Certificate* (18 MPa aos 7 dias e 32

MPa aos 28 dias), o Gêmeo Digital processa a trajetória cinética do ligante alternativo. O modelo matemático projeta uma “janela de predição” que aponta para um valor final de aproximadamente 52 MPa aos 91 dias.

O PONTO DE DECISÃO ESTRATÉGICA

O marco de 28 dias deixa de ser um ponto de “aprovação ou reprovação” estática

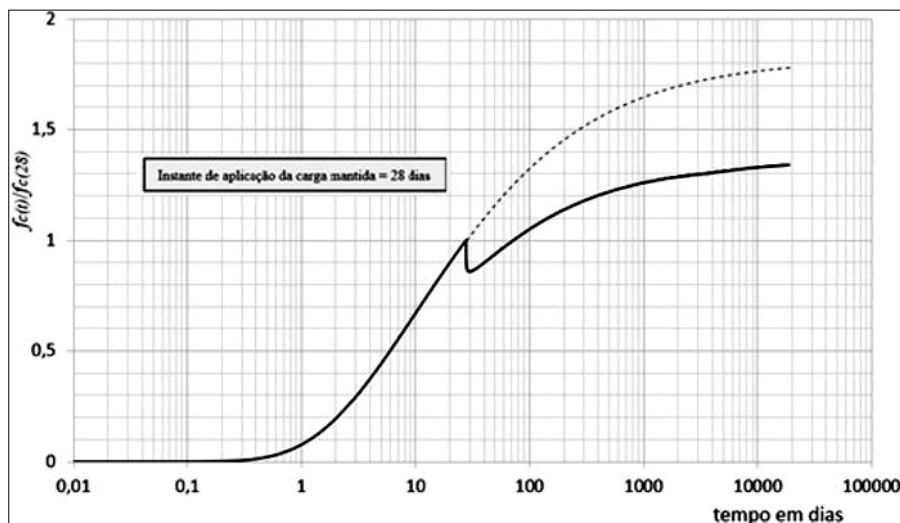


FIGURA 4

CURVA DE CRESCIMENTO E DECRESCIMO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO ATÉ 50 ANOS DE CONCRETOS $Sc = 0,6$, *fib MODEL CODE 2020*, $t_{ref} = 28$ DIAS, $T(\Delta t_i) = 20^\circ C$, BONI [5]

para tornar-se um Ponto de Decisão Crítico fundamentado. Com a tendência de ganho validada pela densidade de dados precoces, o engenheiro possui respaldo técnico para autorizar a continuidade do carregamento e o avanço do cronograma executivo com segurança. A incerteza é mitigada não pela espera cronológica, mas pela capacidade analítica do sistema de gestão da informação.

3.3 Simulação para a curva de desenvolvimento da resistência e módulo de elasticidade para cimentos de endurecimento lento

Por meio da aplicação das formulações do modelo do *fib Model Code 2020*, a Figura 4 ilustra simulações realizadas por Boni [5] para a curva de desenvolvimento da resistência em um horizonte de 50 anos, para cimentos de endurecimento lento (Classe CS, $Sc = 0,60$), caracterizados por teores elevados de escória de alto-forno (>65%) ou cinzas volantes (>35%) e um t_{ref} de 28 dias. O emprego dessas equações permite converter a variabilidade do material em uma trajetória de crescimento previsível, garantindo que a resistência de projeto seja validada tecnicamente desde a concepção.

Os resultados indicam que, para este tipo de ligante, a aplicação de carga permanente resulta em uma redução temporária de 14% na resistência combinada [$f_{c(29)}/f_{c(28)} = 0,86$]. Entretanto, essa defasagem é rapidamente atenuada: aos 56 dias, a redução cai para apenas 4% [$f_{c(56)}/f_{c(28)} = 0,96$]. Aos 91 dias, observa-se a plena recuperação e superação do valor de referência em 4% [$f_{c(91)}/f_{c(28)} = 1,04$], evidenciando o robusto ganho de resistência progressivo do material.

Quanto à aplicação da formulação do módulo de elasticidade, a análise quantitativa da evolução inicial (7 e 14 dias) revela que este se desenvolve de forma significativamente mais célere que a resistência à compressão. Como demonstrado na Figura 5, a rigidez (linha tracejada em vermelho) precede a resistência (linha sólida em azul) nas idades precoces. No 7º dia, o ganho relativo de rigidez supera o de resistência em aproximadamente 49%. Enquanto a resistência atinge 55% do valor de projeto, a rigidez já se encontra em patamares superiores, garantindo maior estabilidade estrutural e deformações imediatas reduzidas sob carregamentos precoces.

Esta “Zona de Segurança Estrutural” (período de 21 dias com rigidez proporcionalmente superior) minimiza o risco de flechas excessivas a partir do 14º dia. Tal comportamento confirma a estratégia de concentrar a gestão de risco (Q&IM) na resistência, permitindo cronogramas de descimbramento mais dinâmicos. Finalmente, o registro desses dados no *Birth Certificate* transforma a característica de hidratação lenta em uma oportunidade estratégica de otimização de cronograma e segurança técnica.

5. IMPACTOS DO MC2020 NA ENGENHARIA BRASILEIRA: DESCARBONIZAÇÃO DE PROJETO VS. GARANTIA DE PRAZOS EXECUTIVOS

O principal impacto reside na mudança da unidade de medida de eficiência do projeto. Atualmente, as normas brasileiras focam na conformidade mecânica e de durabilidade de forma isolada. O MC2020 introduz o conceito de que um bom projeto deve minimizar o índice de carbono.

5.1 Critérios de projeto e metas de descarbonização

À luz das normas brasileiras, o impacto mais imediato ocorre na especificação do concreto. Enquanto a prática atual foca na conformidade aos 28 dias, o MC2020 estabelece que a ecoeficiência é um requisito de projeto.

O uso de cimentos com elevados teores de adições minerais reduz drasticamente a emissão de $\text{CO}_{2\text{eq}}/\text{m}^3$, mas exige que o projetista aceite um ganho de resistência mais lento. O impacto direto nos critérios de projeto brasileiros será a necessidade de:

- ▶ Substituir o f_{ck} de 28 dias por idades de 56 ou 91 dias nos memoriais descritivos;
- ▶ Adotar o Índice de Intensidade de Carbono ($\text{kg CO}_{2\text{eq}}/\text{m}^3/\text{MPa}$) como parâmetro de validação do traço;
- ▶ Revisar modelos de durabilidade, uma vez que concretos com adições minerais apresentam matrizes mais densas e resilientes ao ataque de agentes agressivos em idades avançadas.

5.2 Dinâmica construtiva e desempenho em tempo real

A principal barreira cultural para a

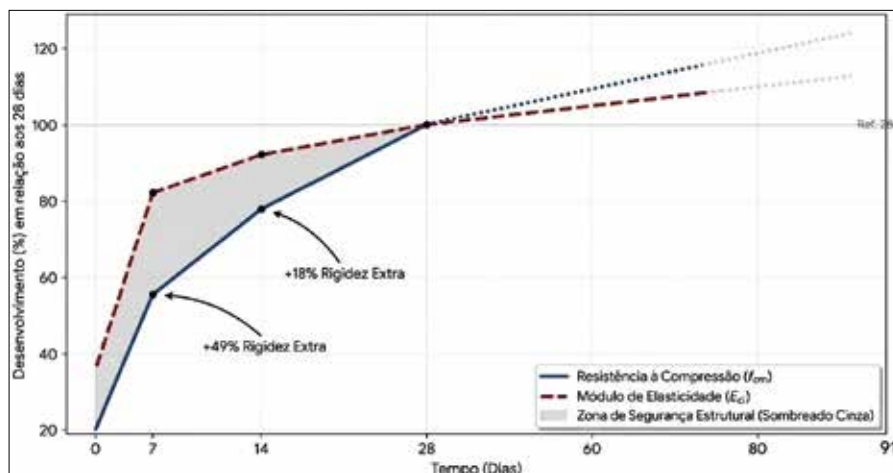


FIGURA 5

EVOLUÇÃO TEMPORAL ENTRE O MÓDULO DE ELASTICIDADE E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NAS PRIMEIRAS IDADES (7 E 14 DIAS), (t_{ref} 28 DIAS)

FONTE: O AUTOR (2026)

adoção do MC2020 no Brasil é o receio de atrasos nos cronogramas físicos. No entanto, o impacto nos prazos de entrega pode ser neutralizado, ou até otimizado, mediante o uso da Gestão da Qualidade da Informação (Q&IM).

Diferente do modelo tradicional, onde se “aguarda” o resultado da prensa, a implementação do *Birth Certificate* permite:

1. **Validação precoce pela rigidez:** Como o módulo de elasticidade (E_{ci}) se desenvolve de forma mais célere que a resistência à compressão (f_c), as verificações de Estados Limites de Serviço (ELS) e desformas podem ser autorizadas precocemente.
2. **Janela de predição digital:** Através de dados de maturidade capturados in situ, o gestor da obra possui uma trajetória estatística confiável da evolução do material. Isso permite o carregamento progressivo da estrutura sem comprometer a segurança, garantindo que o cronograma físico não seja impactado pela idade de controle de 91 dias.

Dessa forma, o cumprimento das diretrizes do MC2020 nas obras brasileiras converte o risco técnico em lucro de durabilidade, sem sacrificar a velocidade executiva, desde que a engenharia de dados (Gêmeo Digital) seja integrada ao ciclo de vida da estrutura.

6. CONCLUSÕES E DISCUSSÕES

A transição para o paradigma da construção sustentável, consolidada pelo *fib Model Code 2020*, demanda a superação do dogma técnico dos 28 dias. A adoção de idades de referência estendidas (56 ou 91 dias) transcende o benefício ambiental; trata-se de uma decisão fundamentada na cinética de hidratação de ligantes de baixo carbono, permitindo ao projetista sintonizar a resistência de controle com as solicitações reais da estrutura ao longo de sua vida útil. Embora o ganho de resistência à compressão seja mais lento nesses compostos, o desenvolvimento do módulo de elasticidade (E_{ci}) ocorre de forma acelerada, assegurando a rigidez necessária para a estabilidade e o Estado Limite de Serviço (ELS) em fases precoces da obra.

É imperativo o aprimoramento técnico dos profissionais envolvidos para compatibilizar as particularidades de cada sistema construtivo com as novas tecnologias de concreto. Em edifícios de múltiplos pavimentos, por exemplo, o aproveitamento do desenvolvimento tardio do módulo de elasticidade pode ser limitado pelos ciclos de concretagem e pelo cronograma de descimbramento. O sistema de escoramento exige que as lajes alcancem rigidez e resistência precoces para suportar o carregamento das etapas superiores, o que pode restringir o benefício do ganho tardio

apenas aos elementos de fundação e pilares.

Em contrapartida, considerando que edifícios de apartamentos representam apenas 14,86% das habitações no país [6], a maioria das construções brasileiras consiste em residências unifamiliares. Nestas obras, a distribuição de cargas sobre lajes inferiores via cimbramento costuma ser menos crítica ou inexistente, tornando a aplicação de concretos de baixo carbono e cura lenta significativamente mais viável e vantajosa do ponto de vista técnico-econômico.

Para mitigar o hiato informativo entre a execução e a idade de controle final, a implementação da Gestão da Qualidade e da Informação (Q&IM) torna-se mandatória. O *Birth Certificate*, conforme preconizado no fib Bulletin 93, atua como o elo de segurança, convertendo dados de maturidade e ensaios iniciais em trajetórias de desempenho validadas. A integração entre o MC2020 e o *Life Cycle Management* (LCM) converte a redução de clínquer em um 'lucro técnico' de durabilidade superior.

Por meio da validação digital, o *Birth Certificate* deixa de ser uma formalidade para se tornar um instrumento de precisão, garantindo estruturas resilientes, seguras e em estrita conformidade com os imperativos climáticos.

Em última análise, a convergência entre o MC2020 e a engenharia brasileira converte o 'ganho lento' das adições minerais em um ativo de durabilidade superior, desde que amparado por uma governança rigorosa de dados (Q&IM) ao longo de todo o ciclo de vida da obra. ☺

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (fib). Model Code for Concrete Structures 2020. Lausanne: version 1, 2023.
- [2] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (fib). Bulletin 93: Birth Certificate and Through-Life Management Documentation. Lausanne: fib, 2020.
- [3] BONI, RICARDO; HELENE, PAULO. Evolução da resistência à compressão do concreto segundo a ABNT NBR 6118:2023; fib Model Code 2020 e Eurocode 2: 2023. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 65., 2024, [Maceió]. Anais. São Paulo: ISSN 2175-8182. IBRACON, 2024.
- [4] NEVILLE, A. M. (2011). Properties of Concrete. 5th Edition. Pearson Education.
- [5] BONI, RICARDO. Contribuição aos modelos de comportamento da resistência à compressão do concreto. 2025. Dissertação (Mestrado em Habitação) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), São Paulo, 2025.
- [6] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo Demográfico 2022: Domicílio. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/indicadores.html?localidade=BR&tema=2>. Acesso em: 4 maio 2026

Concrete Show

by informa

25-27 agosto | 2026 | São Paulo Expo

Participe do principal evento de construção civil e infraestrutura da América Latina

- EQUIPAMENTOS • EXPERIÊNCIAS IMERSIVAS
- CONGRESSO • ARENAS • ÁREA EXTERNA

Promoção e Organização



Garanta seu ingresso!

concreteshow.com.br



+26 mil visitantes qualificados

+450 marcas expositoras

+36 mil m² de área de exposição



+70 palestrantes

+50 horas de conteúdo

80% do público formado por decisores



Ligante sustentável obtido por termoativação de resíduos de construção e demolição

RAPHAEL BALDUSCO - MSc. - <https://orcid.org/0009-0007-5061-9062> – IPT
VALDECIR ANGELO QUARCIONI - Dr. - <https://orcid.org/0000-0003-0840-4758> – IPT
VALDIR MORAES PEREIRA - Dr. - <https://orcid.org/0000-0002-0691-2348> – Poli USP
SÉRGIO CIRELLI ÂNGULO - Prof. Dr. - <https://orcid.org/0000-0001-9700-1621> – Poli USP
SEIITI SUZUKI - MSc. - <http://lattes.cnpq.br/4276370212216414> – InterCement

RESUMO

DADO QUE A PRODUÇÃO DO CIMENTO PORTLAND LIBERA APROXIMADAMENTE 10% DE CO₂ ANTROPOGÊNICO NA ATMOSFERA, EXISTE GRANDE DEMANDA EM NÍVEL MUNDIAL PARA A OBTENÇÃO E USO DE LIGANTES COM BAIXA PEGADA DE CARBONO. NESTE CONTEXTO, O PRESENTE TRABALHO APRESENTA O DESENVOLVIMENTO DE UM LIGANTE PRODUZIDO A PARTIR DA TERMOATIVAÇÃO DA FRAÇÃO FINA DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD). DIFERENTES TIPOS DE RESÍDUOS DE RCD FORAM AMOSTRADOS, PROCESSADOS E SUBMETIDOS À CALCINAÇÃO ENTRE 300 °C E 600 °C, SENDO POSTERIORMENTE AVALIADOS QUANTO À SUA REATIVIDADE QUÍMICA E DESEMPENHO MECÂNICO. O LIGANTE OBTIDO A PARTIR DE RESÍDUO MISTO TERMOATIVADO APRESENTOU RESULTADOS PROMISSORES NO ESTUDO LABORATORIAL E FOI, ENTÃO, APLICADO EM MISTURAS PARA ESTABILIZAÇÃO DE BASES DE PAVIMENTOS E VALIDADA EM TRECHO PILOTO. OS RESULTADOS EVIDENCIAM O POTENCIAL DOS FINOS DE RCD PARA A PRODUÇÃO DE LIGANTES ALTERNATIVOS DE BAIXO CARBONO, CONTRIBUINDO, DESSA FORMA, PARA A ECONOMIA CIRCULAR E VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL.

PALAVRAS-CHAVE: RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD), TERMOATIVAÇÃO, CIMENTO RECICLADO.

1. INTRODUÇÃO

A emergência climática tem impulsionado o desenvolvimento de materiais cimentícios mais sustentáveis.

Nesse contexto, a descarbonização da indústria do cimento, responsável por cerca de 7-8% das emissões globais de CO₂, depende de estratégias como a redução do teor de clínquer, o uso de materiais cimentícios suplementares e o aproveitamento de resíduos minerais para a produção de novos ligantes (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018).

O Brasil gera cerca de 106 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (RCD) por ano (ABRECON, 2022), onde cerca de um terço do RCD são beneficiados em usinas de reciclagem para produção de agregados reciclados destinados a diferentes aplicações na construção civil. Embora britas e areias recicladas, ou combinados destes, como a bica corrida reciclada, já apresentem aplicações consolidadas, a fração fina do RCD, especialmente partículas inferiores a 0,30 mm, ainda possui aplicação tecnológica limitada, sem valor econômico bem definido.

Contudo, essa fração fina apresenta elevado potencial para aplicação como ligante alternativo (CARRIÇO, BOGAS e GUEDES, 2020) devido à presença de compostos cimentícios hidratados e fases cerâmicas amorfas ricas em silicatos e aluminatos, que podem adquirir (re)atividade quando calcinado (ÂNGULO; ZANOVELLO, 2025). A termoativação desses materiais promove a formação de fases amorfas derivadas do C-S-H desidratado, em vez da gera-

ção de cal livre (CaO) ou silicatos dicálcicos cristalinos do tipo belita (ÂNGULO *et al.*, 2022). Além disso, a redução da demanda de água e o controle da porosidade, por meio do uso de aditivos, contribuem para a melhoria do desempenho mecânico desses ligantes (SILVA, 2018; ZANOVELLO *et al.*, 2023). Estudos recentes também indicam que a incorporação de materiais pozolânicos pode potencializar ainda mais suas propriedades mecânicas (ÂNGULO; ZANOVELLO, 2025). Nesse contexto, a ativação térmica de finos de RCD surge como uma alternativa promissora para a produção de ligantes de baixo carbono e adições cimentícias voltadas à pavimentação e obras geotécnicas.

O Laboratório de Materiais para Produtos de Construção (LMPC) do IPT desenvolveu um projeto de pesquisa, desenvolvimento e inovação (P&D&I) voltado à produção de ligantes termoativados (e de baixo carbono), a partir da fração fina de resíduos de construção e demolição (RCD) para aplicação em pavimentação, em cooperação com a Intercement e o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). Esta publicação comenta sobre o avanço do conhecimento obtido no aproveitamento de finos de resíduos de construção e demolição como matéria-prima para a produção de ligantes alternativos, demonstrando o potencial da termoativação como estratégia de baixo carbono e valorização desses materiais.

2. AMOSTRAGEM E PROCESSAMENTO DOS RCD

Inicialmente, foram amostrados resíduos provenientes de diferentes fontes geradoras, de modo a contemplar a diversidade de materiais presentes nos resíduos de construção e demolição (RCD) produzidos na região metropolitana de São Paulo. Para isso, foram selecionados resíduos de concreto provenientes de concreteiras, resíduos cimentícios de usinas de reciclagem, resíduos cerâmicos de olarias, resíduos mistos de áreas de transbordo e triagem (ATT) e solos urbanos depositados em aterros de inertes (Figura 1). Essa estratégia permitiu avaliar a melhor forma de combinar e otimizar a reatividade dos materiais que compõem os RCD.

Após a amostragem, os materiais foram britados em frações inferiores a 25 mm e peneirados para obtenção da fração fina menor que 0,30 mm. Em seguida, os finos foram moídos em moinho de bolas até atingirem granulometria passante em peneira de 0,075 mm,

semelhante à finura do cimento Portland. Posteriormente, os materiais foram submetidos à calcinação em forno estático de batelada, em temperaturas entre 300 °C e 600 °C, e homogeneizados mecanicamente, conforme ilustrado na Figura 2. O processo de termoativação promoveu a desidratação do resíduo de cimento, constituído por fases hidratadas do cimento, como o C-S-H, dentre outras. A desidratação permite a obtenção de fases reativas e recuperar parcialmente o potencial ligante dos materiais cimentícios.

3. DESENVOLVIMENTO DA REATIVIDADE DOS FINOS DE RCD

Com o objetivo de avaliar a reatividade dos materiais obtidos, os finos termoativados foram caracterizados por diferentes técnicas físico-químicas e mineralógicas, incluindo fluorescência de raios X (FRX), difração de raios X (DRX), análise termogravimétrica (TG), calorimetria isotérmica

e reometria de pastas. Essas análises permitiram investigar a composição química, as transformações mineralógicas promovidas pela termoativação, o potencial de reidratação das fases cimentícias e a evolução do endurecimento das pastas.

Adicionalmente, foram produzidas pastas contendo 100% de finos termoativados de RCD, utilizando relações água/material de 0,40 e 0,45, associadas à adição de cal hidratada para compensar a deficiência de cálcio observada em determinadas composições. O desempenho das formulações foi avaliado por meio de ensaios de resistência à compressão, permitindo a seleção dos materiais mais promissores.

Entre as diferentes composições estudadas, destacou-se a formulação produzida com finos de resíduo misto e adição suplementar de cal hidratada, que apresentou resultados de resistência mecânica satisfatórios e elevada disponibilidade nos centros urbanos, sendo, portanto, selecionada para as



Resíduo misto



Resíduo cimentício



Resíduo de cerâmica vermelha



Resíduo de concreto



Solo urbano

FIGURA 1

RESÍDUOS AMOSTRADOS NO PROJETO

etapas subsequentes do projeto e para a execução do trecho piloto.

Os resultados da Figura 3 mostram que o tratamento térmico dos finos de resíduo misto exerceu influência decisiva no desenvolvimento da resistência à compressão das pastas cimentícias. Observa-se um aumento progressivo da resistência com a elevação da temperatura de termoativação, passando de valores inferiores a 6 MPa nas condições ambiente e 300 °C para resistências superiores a 12 MPa nas amostras tratadas a 500 °C e 600 °C.

Além disso, como esperado, as formulações com menor relação água/sólidos ($a/s = 0,40$) apresentaram desempenho mecânico superior em comparação às de $a/s = 0,45$, especialmente nas maiores temperaturas de tratamento. O ganho de resistência observado entre 7 e 28 dias confirma a continuidade das reações de hidratação e reativação das fases cimentícias presentes no resíduo. Já, o incremento adicional de resistência entre 28 e 91 dias, mais pronunciado nas amostras termoativadas a 500 °C e 600 °C, sugere a ocorrência de reações pozolânicas tardias associadas aos compostos ricos em sílica e alumina presentes na fração cerâmica e cimentícia do resíduo misto. Essas reações promovem a formação gradual de produtos cimentícios secundários, contribuindo para a densificação da microestrutura e para o aumento contínuo da resistência mecânica ao longo do tempo.

De modo geral, os resultados demonstram o potencial da ativação térmica dos finos de RCD como estratégia tecnológica para a produção de ligantes reciclados com propriedades mecânicas aprimoradas, contribuindo para a circularidade de materiais e para a redução da pegada de carbono na construção civil.

4. APLICAÇÃO DO CIMENTO RECICLADO

Após o desenvolvimento da reatividade dos finos de RCD e a definição da formulação de cimento reciclado com desempenho mecânico satisfatório, foram desenvolvidas misturas de brita graduada tratada com cimento (BGTC) e brita graduada simples (BGS) visando sua aplicação em camadas de base de pavimentos.

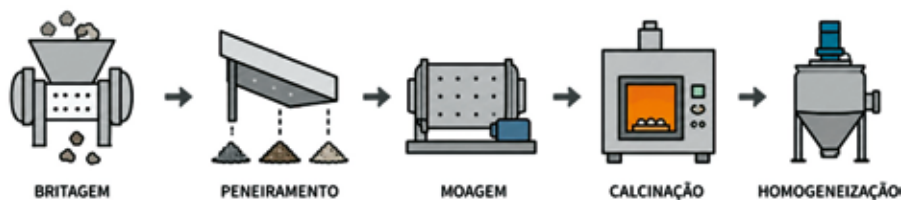


FIGURA 2

OPERAÇÕES UNITÁRIAS PARA OBTENÇÃO DO CIMENTO RECICLADO

Nessa etapa, foram avaliadas diferentes combinações de agregados reciclados e naturais associadas ao ligante termoativado, com o objetivo de verificar sua viabilidade técnica para uso em infraestrutura viária. Os resultados obtidos permitiram a seleção das composições mais promissoras para aplicação em escala real, culminando na execução de trechos piloto destinados à avaliação do desempenho estrutural e funcional do pavimento. Informações detalhadas sobre o desenvolvimento das misturas, a execução dos trechos experimentais e os resultados de monitoramento podem ser encontradas em Pereira et al. (2024).

Com base nas formulações selecionadas, foram executados quatro trechos experimentais em escala piloto na Rua Miguel Biondi - Guarulhos (SP), contemplando bases de pavimento compostas por brita graduada reciclada tratada com cimento reciclado (BG_{R,TC_R}), brita graduada natural tratada com cimento reciclado

(BG_{N,TC_R}), brita graduada tratada com cimento Portland (BGTC) e brita graduada simples (BGS). A implantação dos trechos permitiu comparar diretamente o desempenho estrutural de soluções contendo cimento reciclado em relação às alternativas convencionais. Para o monitoramento da evolução estrutural ao longo do tempo, foram realizadas avaliações deflectométricas, possibilitando analisar a capacidade de suporte das estruturas e o comportamento mecânico das diferentes composições sob condições reais de serviço.

Na Figura 4 são apresentados alguns registros fotográficos da execução do pavimento.

Os dados apresentados acima demonstram o potencial dos finos termoativados de RCD como ligante alternativo para estabilização de camadas de pavimentos, com indicativo de ser viável em outras aplicações de menor exigência estrutural, como artefatos de concreto, contribuindo para a valorização de

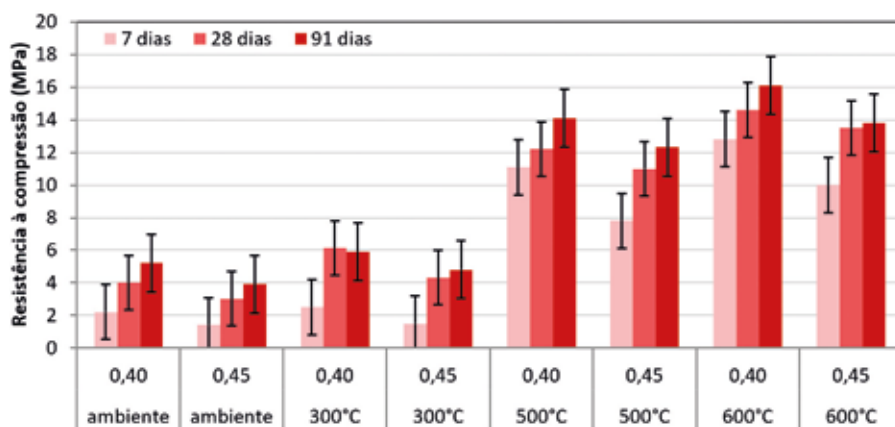


FIGURA 3

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE PASTAS DE CIMENTO COM FINOS DE AGREGADO RECICLADO MISTO E SUPLEMENTO DE CAL HIDRATADA



TRECHO 1 – BG_RTC_R – Brita graduada reciclada tratada com cimento reciclado



TRECHO 2 – BG_NTC_R – Brita graduada natural tratada com cimento reciclado



TRECHO 3 – BGTC – Brita graduada tratada com cimento



TRECHO 4 – Brita graduada simples



Pavimento asfaltado finalizando a execução



Pavimento asfaltado após 8 anos de uso

FIGURA 4

EXECUÇÃO DOS TRECHOS PILOTO COM AS FORMULAÇÕES COM CIMENTO RECICLADO E CONVENCIONAL

resíduos e para redução da pegada de carbono associada aos materiais cimentícios. Essa abordagem resultou no desenvolvimento e concessão da Patente BR 102013030981-8 (QUARCIONI, ANGULO; GUILGE, 2026), reforçando a relevância da pesquisa nacional na busca por soluções tecnológicas alinhadas às demandas futuras da infraestrutura e da indústria de materiais cimentícios.

Em estudos como Zanovello *et al.* (2024) e Rocha; Rocha e Toledo Filho (2023), são observadas abordagens complementares onde o cimento reciclado termoativado é incorporado como material cimentício suplementar (MCS) em sistemas híbridos de baixo carbono, combinando-se teores reduzidos de clínquer Portland e obtenção de desempenho mecânico superior aos obtidos neste estudo. Nesse contexto, a integração de estratégias de reciclagem de cimento com otimização granulométrica e outros materiais para desenvolver ligantes circulares de baixo carbono amplia as possibi-

lidades de aplicação dos finos de RCD em diferentes setores da construção civil.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A valorização dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD) é um imperativo para a sociedade brasileira atual e futura, em especial nos centros urbanos, cujo crescimento progressivo leva à saturação de novas áreas disponíveis para a construção. Com o passar dos anos, prevê-se uma demanda progressiva para a desconstrução de edifícios multipavimentos em concreto armado — a começar pelos mais longevos no Brasil — e a necessária substituição por novas obras com tecnologias modernas e sustentáveis. Estes cenários sugerem uma demanda crescente pelo tratamento adequado de grandes volumes de RCD e por seu reaproveitamento em novas edificações e demais aplicações na construção civil, pautando-se por uma prática tecnicamente sustentável e economicamente viável. A tecnologia de termoativação de finos cimentícios de RCD pode representar

uma contribuição para esta vasta demanda, presente e futura, no campo do reaproveitamento sustentável desses materiais.

Nesse contexto, a tecnologia de termoativação surge como uma alternativa promissora para transformar resíduos em novos insumos para a construção civil, contribuindo para os desafios globais de descarbonização e gestão sustentável de resíduos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao BNDES pelo fomento financeiro não reembolsável para esta pesquisa e à InterCement. Igualmente, registram agradecimentos ao IPT pela disponibilização de sua infraestrutura laboratorial e técnico-administrativa, ao Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da USP e à Prefeitura de Guarulhos/SP pelo apoio para a execução do trecho piloto de pavimentação, com o suporte direto, à época, da equipe da Proguaru (Progresso e Desenvolvimento de Guarulhos S/A). ©

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANGULO, Sergio C.; GUILGE, Mário S.; QUARCIONI, Valdecir A.; CINCOTTO, Maria A.; NOBRE, Thiago R.S.; PÖLLMANN, Herbert. The role of calcium silicates and quicklime on the reactivity of rehydrated cements. *Construction and Building Materials*, [S.L.], v. 340, p. 127625, jul. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127625>.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO (ABRECON). Pesquisa Setorial ABRECON 2022. São Paulo: ABRECON, 2022.
- [3] CARRIÇO, Ana; BOGAS, José A.; GUEDES, Mafalda. Thermoactivated cementitious materials - A review. *Construction and Building Materials*, [S.L.], v. 250, p. 118873, jul. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118873>.
- [4] PEREIRA, Valdir M; BALDUSCO, Raphael; SILVA, Patricia B; QUARCIONI, Valdecir A.; MOTTA, Rosângela S.; SUZUKI, Seiiti; ANGULO, Sergio C.. Thermoactivated cement from construction and demolition waste for pavement base stabilization: a case study in Brazil. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, [S.L.], v. 43, n. 1, p. 121-132, 21 fev. 2024. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0734242x241227370>.
- [5] QUARCIONI, Valdecir Angelo; ANGULO, Sérgio Cirelli; GUILGE, Mario Sérgio. Processo de produção de cimento pozolânico de baixo impacto ambiental, obtido por resíduo misto de construção e demolição (RCD), e produtos resultantes para a construção civil. Titulares: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A IPT; Intercement Brasil S.A. BR 102013030981-8. Depósito: 02 dez. 2013. Concessão: 26 maio 2026.
- [6] ROCHA, Joaquin Humberto Aquino; TOLEDO FILHO, Romildo Dias. The utilization of recycled concrete powder as supplementary cementitious material in cement-based materials: a systematic literature review. *Journal of Building Engineering*, [S.L.], v. 76, p. 107319, out. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107319>.
- [7] SCRIVENER, Karen L.; JOHN, Vanderley M.; GARTNER, Ellis M.. Eco-efficient cements: potential economically viable solutions for a low-co2 cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, [S.L.], v. 114, p. 2-26, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>.
- [8] SILVA, Raphael Baldusco da. Reidratação de cimento de alto forno: Análise e otimização por técnicas combinadas de caracterização. 2018. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.
- [9] ZANOVELLO, M.; ANGULO, S.. Thermoactivated recycled cement waste: optimal dehydration temperature and binder properties insights. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 25, e143282, jan./dez. 2025. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. 1 <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212025000100889>.
- [10] ZANOVELLO, Mateus; BALDUSCO, Raphael; JOHN, Vanderley M.; ANGULO, Sérgio C.. Strength-porosity correlation and environmental analysis of recycled Portland cement. *Resources, Conservation and Recycling*, [S.L.], v. 190, p. 106763, mar. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106763>.
- [11] ZANOVELLO, Mateus; JOHN, Vanderley M.; WHITE, Claire E.; ANGULO, Sérgio C.. Engineered Blended Thermoactivated Recycled Cement: a study on reactivity, water demand, strength-porosity, and co2 emissions. *Acs Sustainable Chemistry & Engineering*, [S.L.], v. 13, n. 2, p. 800-814, 27 dez. 2024. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c06567>.

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



Agentes ligantes para concretos refratários: uma breve revisão da literatura

RAFAEL SALOMÃO - PROF. TITULAR - <https://orcid.org/0000-0003-3392-6857> - (rsalomao@sc.usp.br);

ANA CAROLINA FIGUEIREDO PRADO - DOUTORA - <https://orcid.org/0000-0001-9421-8868> ;

CRISLAYNE GABRIELA ANDRETO - DOUTORA - <https://orcid.org/0000-0001-8098-5353> ;

LEANDRO FERNANDES - DOUTOR - <https://orcid.org/0000-0003-0384-3604> – EESC/USP

ULISSES S. PRADO - DOUTOR - <https://orcid.org/0000-0003-4794-3957> - (ulissesprado@uol.com.br) – Lining Representação, Consultoria e Projetos Ltda

RESUMO

CONCRETOS REFRAATÓRIOS SÃO MATERIAIS CERÂMICOS MOLDÁVEIS, PROJETADOS PARA APLICAÇÕES EM ALTAS TEMPERATURAS, NOS QUAIS OS AGENTES LIGANTES DESEMPENHAM UM PAPEL FUNDAMENTAL NO PROCESSAMENTO E NO DESEMPENHO EM SERVIÇO. ESTE ARTIGO REALIZOU UMA REVISÃO DA LITERATURA SOBRE OS DOIS PRINCIPAIS SISTEMAS DE LIGANTES EMPREGADOS NESSE TIPO DE CONCRETO: CIMENTOS DE ALUMINATO DE CÁLCIO (CAC) E SÍLICA COLOIDAL (SC). INICIALMENTE, SÃO APRESENTADAS AS DIFERENÇAS EM RELAÇÃO AOS CONCRETOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL E A IMPORTÂNCIA DAS MATÉRIAS-PRIMAS REFRAATÓRIAS. EM SEGUIDA, SÃO DISCUTIDAS AS MÚLTIPLAS FUNÇÕES DOS LIGANTES AO LONGO DAS ETAPAS DE MISTURA, CURA, SECAGEM, SINTERIZAÇÃO E

OPERAÇÃO. O CAC ATUA POR MEIO DA HIDRATAÇÃO, PROPORCIONANDO RESISTÊNCIA INICIAL RÁPIDA, EMBOIRA POSSA GERAR FASES DE MENOR REFRAATARIEDADE. DIFERENTEMENTE, A SC GELIFICA, RESULTANDO EM MICROESTRUTURAS MAIS HOMOGÊNEAS E MAIOR ESTABILIDADE TERMOQUÍMICA. SÃO DISCUTIDAS AS IMPLICAÇÕES DESSES MECANISMOS NAS ETAPAS DE PROCESSAMENTO E DE APLICAÇÃO, EVIDENCIANDO AS VANTAGENS E LIMITAÇÕES DE CADA SISTEMA E CONTRIBUINDO PARA A SELEÇÃO ADEQUADA CONFORME AS EXIGÊNCIAS DE DESEMPENHO.

PALAVRAS-CHAVE: CONCRETOS REFRAATÓRIOS, LIGANTES REFRAATÓRIOS, EVOLUÇÃO MICROESTRUTURAL, CIMENTO DE ALUMINATO DE CÁLCIO, SÍLICA COLOIDAL.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Objetivos e metodologia de revisão

Este estudo realizou uma revisão da literatura sobre os dois principais sistemas de ligantes empregados em concretos refratários: o cimento de aluminato de cálcio (CAC) e a sílica coloidal (SC). Inicialmente, são apresentadas as diferenças em relação aos concretos de construção civil e a importância das matérias-primas refratárias. Em seguida, são discutidos individualmente os mecanismos de consolidação, as particularidades de processamento e as múltiplas funções dos ligantes ao longo das etapas de mistura, cura, secagem, sinterização e operação. Por fim, um quadro comparativo apresenta as principais vantagens e limitações de cada sistema. Além de livros técnicos, foram consultadas publicações indexadas e identificadas nos bancos de dados *Web of Science (Clarivate)* e *Scopus (Elsevier)*, entre 1980 e 2026, tendo como palavras-chave os termos “refractory castables”, “binders”, “calcium aluminate cement” e “coloidal silica”. Adicionalmente, informações sobre as classificações e nomenclaturas desses sistemas foram levantadas junto ao portal eletrônico da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Todas as pesquisas foram conduzidas entre 1 e 15 de maio de 2026.

1.2 Aspectos gerais dos concretos refratários

Os concretos refratários (também conhecidos como refratários monolíticos ou

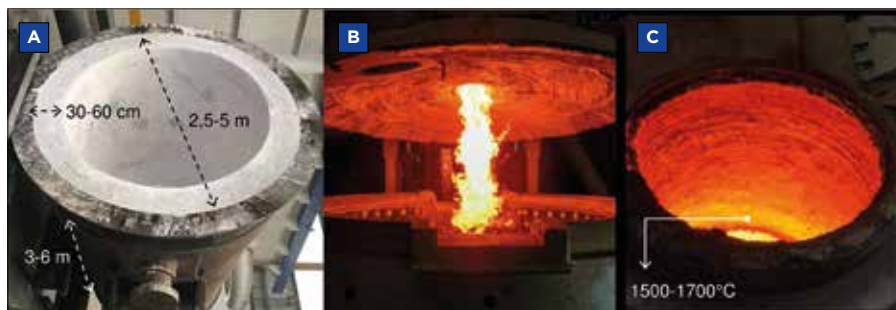


FIGURA 1

EXEMPLO DE EQUIPAMENTO SIDERÚRGICO (PANELA DE ACIARIA) REVESTIDO COM CONCRETO REFRAATÓRIO À BASE DE ÓXIDOS DE ALUMÍNIO E MAGNÉSIO, LIGADO COM CIMENTO DE ALUMINATO DE CÁLCIO (CAC): A) EQUIPAMENTO COM REVESTIMENTO EM CONCRETO RECÉM-DESMOLDADO, B) ETAPA DE SECAGEM E AQUECIMENTO INICIAL COM USO DE MAÇARICOS, C) EQUIPAMENTO AQUECIDO E SINTERIZADO, PRESTES A RECEBER AÇO LÍQUIDO (COM TEMPERATURAS ENTRE 1500 E 1700 °C)

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

não conformados são uma classe de materiais cerâmicos moldáveis, desenvolvidos para operar sob condições extremas de temperatura, abrasão e ataque químico, sendo amplamente empregados em equipamentos industriais, como fornos, caldeiras e reatores, nas indústrias siderúrgicas, petroquímicas, cimentícias, de fundição, entre outras (Figura 1) (1-3). Diferentemente dos concretos utilizados na construção civil, cujo principal objetivo é garantir resistência mecânica estrutural em condições ambientais moderadas, os concretos refratários são projetados para manter estabilidade físico-química e integridade microestrutural em temperaturas elevadas, frequentemente superiores a 1000 °C (4).

Nos concretos de construção civil, as formulações típicas contêm agregados grossos e finos (brita de rocha vulcânica, como quartzo, basalto e granito e calcário) e uma matriz ligante baseada em água (10-20% em massa), areia e cimento Portland, cuja hidratação resulta na formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), responsável pelo ganho de resistência mecânica durante a cura (5). Entretanto, essas fases são termicamente instáveis e sofrem decomposição progressiva a temperaturas relativamente baixas (acima de 250 °C), o que pode aumentar a porosidade e comprometer a integridade do material. Em contraste, os concretos refratários utilizam matérias-primas com alto ponto de fusão e sistemas de ligantes específicos que conferem maior resistência térmica e estabilidade em serviço (5-8). Os agregados refratários têm granulometria entre 10 mm e 100 µm e são compostos por sílica fundida (SiO_2 , $T_{\text{Fusão}} = 1800$ °C), mulita ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$, $T_{\text{Fusão}} = 1900$ °C), alumina (Al_2O_3 , $T_{\text{Fusão}} = 2000$ °C), ou magnésia (MgO , $T_{\text{Fusão}} = 2800$ °C). Sua distribuição granulométrica é cuidadosamente projetada para maximizar o empacotamento das partículas, reduzir a porosidade inicial e otimizar as propriedades reológicas no estado fresco. Essa abordagem permite a obtenção de sistemas com elevada densidade após a secagem e sinterização, contribuindo para o desempenho mecânico e a resistência à corrosão por escórias (3,9). Já, a matriz é elaborada com baixo teor de água (entre 4 e 7 % em massa) e frações finas e reativas (100-0,1 µm) de partículas à base de alumina

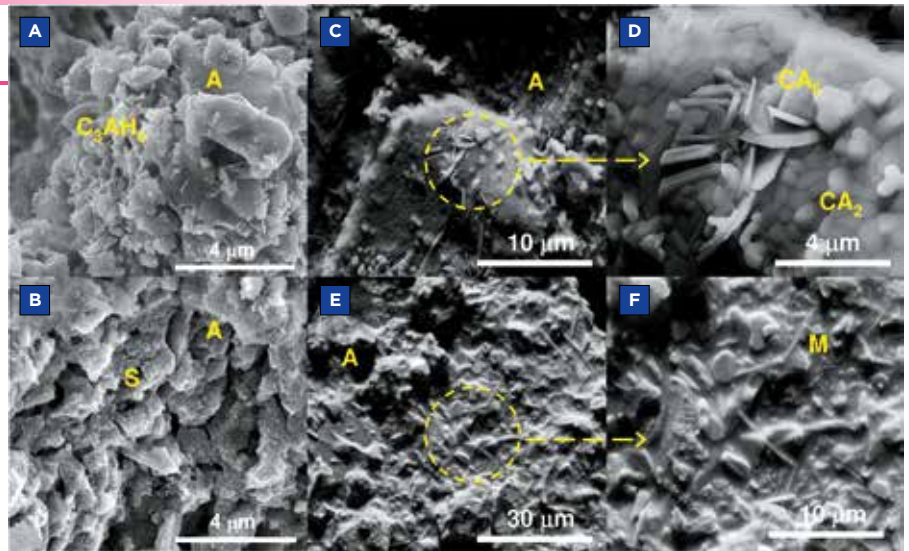


FIGURA 2

MICROESTRUTURAS TÍPICAS DE MATRIZES DE CONCRETO REFRAATÓRIO LIGADAS COM CIMENTO DE ALUMINATO DE CÁLCIO (A) APÓS SECAGEM A 120 °C E (C-D) APÓS SINTERIZAÇÃO A 1500 °C OU COM SÍLICA COLOIDAL ANIÔNICA (B) APÓS SECAGEM A 120 °C E (E-F) APÓS SINTERIZAÇÃO A 1500 °C.

ABREVIACOES: $\text{C}_3\text{AH}_6 = 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; $\text{A} = \text{Al}_2\text{O}_3$; $\text{S} = \text{SiO}_2$; $\text{CA}_2 = \text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$; $\text{CA}_6 = \text{CaO}_6 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$; $\text{M} = 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$

FONTE: REFERÊNCIAS (8, 10)

calcinada ou sílica ativa, aditivos dispersantes e agentes ligantes, como cimentos de aluminato de cálcio (CAC, Figura 2a), ligantes coloidais (sílica ou alumina coloidal, Figura 2b) ou ligações químicas alternativas (por exemplo, ligações fosfáticas) (5).

Em relação às denominações dos concretos refratários, eles podem ser classificados em diferentes categorias, como densos (de função estrutural) ou porosos (para isolamento térmico, sem função estrutural, com densidade aparente entre 0,7-1,2 g/cm³), convencionais, de baixo teor de cimento (BTC, 1,0-2,5 %), ultrabaixo teor de cimento (UBTC, 0,2-1,0 %) e livres de cimento (NC, CaO < 0,2 %), sendo esta classificação baseada na quantidade e no tipo de ligante empregado (2-4).

Em seu estado fresco, os concretos refratários podem ser transportados por bombeamento (concretos bombeáveis) e aplicados por diversos processos, como moldagem direta (autoescoantes), com auxílio de vibração (vibrados) ou ainda por projeção. Após a moldagem, o processo de cura geralmente leva de 12 a 24 h e ocorre à temperatura ambiente. Em seguida, nas etapas de secagem e de aquecimento inicial, ocorre a eliminação de água livre e combinada, seguida da formação de ligações cerâmicas por sinterização. Dependendo da composição, podem ocorrer

transformações de fase, como a conversão de aluminatos hidratados em fases anidras estáveis (Figuras 2c-d) ou a formação de mulita em sistemas alumina-sílica (Figuras 2e-f) (8). Essas transformações são críticas para o desenvolvimento das propriedades finais, incluindo a resistência mecânica a quente, a estabilidade dimensional e a resistência ao choque térmico.

2. AS (MUITAS) FUNÇÕES DOS AGENTES LIGANTES EM CONCRETOS REFRAATÓRIOS

Nos concretos refratários, os ligantes desempenham um papel central não apenas na consolidação inicial, mas também na evolução microestrutural e no desenvolvimento das propriedades ao longo do processamento térmico e do uso em serviço. Sua atuação deve ser analisada de forma integrada, considerando as etapas de mistura, moldagem, cura, secagem, sinterização, operação em alta temperatura, demolição e reciclagem.

Durante a mistura e a moldagem, os ligantes afetam diretamente o comportamento reológico da suspensão ou da massa. Em sistemas contendo CAC ou sílica coloidal, partículas finas interagem com a água e com dispersantes, controlando a viscosidade, a dispersão e a estabilidade (3,7,11). Ligantes coloidais, por exemplo,

formam redes tridimensionais a partir de partículas nanométricas, promovendo coesão inicial mesmo com baixos teores de água (9,11). Como esses concretos são frequentemente preparados no local de aplicação, pode-se empregar aditivos retardadores ou aceleradores para ajustar a trabalhabilidade às condições ambientais (12).

Na etapa de cura, os ligantes promovem o desenvolvimento da resistência mecânica inicial, denominada resistência verde (Figura 1a), essencial para a manutenção da geometria após a moldagem e para a desmoldagem rápida. A ausência de ação adequada do ligante pode resultar em segregação, trincas, empenamentos ou colapso estrutural (13). Após cerca de 24 horas, são atingidos níveis mínimos de resistência à compressão uniaxial (5-10 MPa) e à flexão (1-10 MPa), permitindo o manuseio sem danos (3,7,8).

Durante a secagem (25-150 °C, Figura 1b), o tipo de ligante influencia a permeabilidade e a distribuição de poros da microestrutura a verde. Estruturas mais densas podem dificultar a remoção de água (8, 10, 13), exigindo taxas de aquecimento lentas (inferiores a 1 °C/h) ao longo de vários dias. Para reduzir o risco de explosões por vapor, utilizam-se aditivos de secagem, como fibras

poliméricas, que aumentam a permeabilidade inicial de forma controlada (4).

Após essa etapa, o aquecimento até as temperaturas de sinterização (1000-1600 °C, Figura 1c) promove a transformação dos ligantes em ligações cerâmicas estáveis. Dependendo da composição, o ligante pode favorecer a densificação, o ganho de resistência mecânica a quente e a estabilidade dimensional, ou, de forma indesejada, gerar fases de baixo ponto de fusão, como anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$, $T_{\text{Fusão}} = 1550 \text{ °C}$) e gehlenita ($\text{Ca}_2\text{A}_2\text{SiO}_7$, $T_{\text{Fusão}} = 1590 \text{ °C}$) (8).

Em fase de serviço, que pode durar de semanas a anos, dependendo da aplicação, o desempenho do concreto é governado pelas ligações cerâmicas formadas. A escolha do ligante define a quantidade de fases de baixo ponto de fusão, a refratariedade e a resistência à corrosão química (8, 14). Microestruturas com menor fração de fase líquida tendem a apresentar melhor desempenho em ambientes agressivos, maior resistência ao choque térmico e menor deformação sob carga.

Ao final da vida útil, na demolição e reciclagem, o tipo de ligante também é determinante. Sistemas com maior teor de fases ricas em cálcio, fases vítreas ou ligações menos refratárias tendem a fratu-

rar de forma mais frágil, o que pode limitar a qualidade do material reciclado (3). Em contraste, concretos com baixo teor de ligante ou baseados em ligações coloidais podem apresentar maior resistência à fragmentação, o que dificulta a remoção, mas favorece a obtenção de agregados de melhor qualidade para reaproveitamento.

3. SISTEMAS LIGANTES MAIS UTILIZADOS EM CONCRETOS REFRAATÓRIOS

3.1 Cimento de aluminato de cálcio (CAC)

Os concretos refratários ligados com cimento de aluminato de cálcio (CAC) constituem uma das tecnologias mais consolidadas entre os materiais refratários moldáveis, sendo amplamente utilizados devido à sua versatilidade de processamento e ao bom desempenho em diferentes aplicações industriais (3,7,8). Seu desenvolvimento remonta ao início do século XX, quando esses cimentos foram produzidos na França, por volta de 1908, visando maior tolerância a ambientes quimicamente agressivos e ganho acelerado de resistência em comparação com o cimento Portland. Seu uso em refratários se intensificou a partir da segunda metade do século XX, acompanhando a expansão das indústrias siderúrgicas e de cimento, que exigiam materiais capazes de suportar altas temperaturas e ciclos térmicos severos (4,5).

No processamento, sistemas com CAC caracterizam-se por apresentarem reações de hidroxilação após a adição de água. As fases anidras, principalmente CA ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) e CA_2 ($\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$), reagem formando compostos hidratados como CAH_{10} ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) e C_2AH_8 ($2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$), que podem se converter em C_3AH_6 ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), com formação simultânea de $\text{Al}(\text{OH})_3$ (7,8). Esses produtos, com morfologia lamelar e acicular (Figura 2a), preenchem os vazios e enrijecem a estrutura após a moldagem.

A temperatura de cura influencia a cinética de hidratação e as fases formadas (13). Abaixo de 20-25 °C, predominam fases metaestáveis como CAH_{10} e C_2AH_8 , menos densas. Em temperaturas mais elevadas, favorece-se a formação de C_3AH_6 , que é mais estável e densa. Esse processo pode

TABELA 1

PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS, VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO CIMENTO DE ALUMINATO DE CÁLCIO (CAC) E SÍLICA COLOIDAL (SC) COMO AGENTES LIGANTES EM FORMULAÇÕES DE CONCRETOS REFRAATÓRIOS

Sistema ligante	Características gerais	Vantagens	Limitações
CAC	<ul style="list-style-type: none"> Composto por fases do sistema Al_2O_3-CaO Misturado a seco com outras matérias-primas do concreto Consolidação por formação de hidratos de aluminato de cálcio 	<ul style="list-style-type: none"> Versatilidade (compatível com a maioria dos sistemas refratários: Al_2O_3, MgO, SiC, carbono) Disponibilidade Menor custo (em comparação com SC) 	<ul style="list-style-type: none"> Sensibilidade à cura em $T < 20 \text{ °C}$ (baixa resistência à compressão; secagem requer atenção para evitar explosões) Pode reduzir refratariedade devido ao excesso de CaO na composição
SC	<ul style="list-style-type: none"> Composta por nanopartículas de SiO_2 vítreo e água Fornecida como dispersão coloidal aquosa e empregada como fase líquida do concreto Consolidação pela gelificação com óxidos alcalinos 	<ul style="list-style-type: none"> Facilidade de mistura, cura e secagem Microestrutura homogênea Atinge máximo de resistência à compressão em menor temperatura de sinterização Elevadíssima resistência à erosão e desgaste por abrasão 	<ul style="list-style-type: none"> Menor fluidez livre (em relação ao CAC) Menor resistência à compressão após desmoldagem (em relação ao CAC) Requer condições especiais para uso em sistemas com MgO e CaO

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

umentar a porosidade e reduzir a resistência mecânica a frio se não for controlado. No caso dos sistemas com teores de CAC baixos (1,0-2,5 %) e ultrabaixos (0,2-1,0 %), a reduzida resistência mecânica no estado fresco pode ser compensada pela adição de microsilica (ou sílica fume). Devido ao seu reduzido diâmetro médio de partícula (entre 0,05 e 0,1 μm), forma esférica e elevada área superficial específica (acima de 20 m^2/g), adições de 1-5 % dessa matéria-prima podem aumentar a resistência à compressão entre 25 e 50% graças ao melhor empacotamento e à reação pozolânica com o CAC (3,7,9). Durante a secagem, a remoção da água livre e combinada deve ser realizada cuidadosamente para evitar pressões internas de vapor. Com o aumento da temperatura, os hidratos se decompõem, formando fases anidras como CA, CA₂ e CA₆ (Figura 2c-d) (8), marcando a transição para ligações cerâmicas e o desenvolvimento das propriedades a quente.

Apesar dessas complexidades, os CACs apresentam vantagens relevantes (Tabela 1): ganho rápido de resistência mecânica, permitindo desmolde precoce; compatibilidade com diversos agregados; e processamento relativamente simples. Além disso, ajustes na formulação permitem reduzir os efeitos indesejáveis associados às fases ricas em cálcio.

3.2 Sílica coloidal (SC)

Os concretos ligados com sílica coloidal (SC) representam uma alternativa avançada aos sistemas hidráulicos, com foco na redução das fases de baixa refratariedade e no aumento do desempenho em altas temperaturas (5,6,9,11). A SC é uma dispersão aquosa de partículas nanométricas de SiO₂ amorfa, cuja aplicação industrial se consolidou a partir da década de 1990, impulsionada pelas tecnologias sol-gel (15,16).

A consolidação ocorre por gelificação, na qual a desestabilização das partículas coloidais, decorrente de variações de pH ou da adição de sais, leva à formação de uma rede tridimensional de ligações Si-O-Si (15). Essa rede garante a coesão e a manutenção da geometria após a moldagem (Figura 1b).

Diferentemente dos sistemas com CAC, não ocorre formação de fases hidratadas.

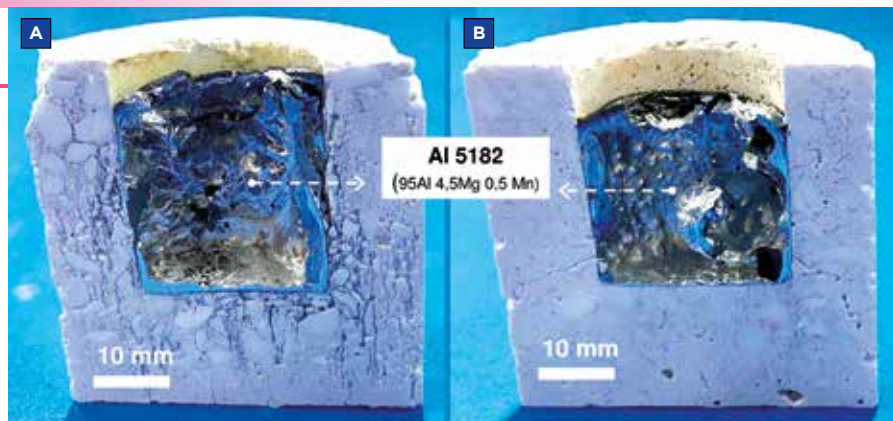


FIGURA 3

EXEMPLO DE ENSAIO UTILIZADO PARA AVALIAR A RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE MATERIAIS REFRAATÓRIOS DEVIDO À INFILTRAÇÃO DE LIGA DE ALUMÍNIO 5182 FUNDIDA (820 °C, POR 24 H): CONCRETOS REFRAATÓRIOS À BASE DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO (AL₂O₃) LIGADOS COM A) CIMENTO DE ALUMINATO DE CÁLCIO (CAC) OU COM B) SÍLICA COLOIDAL (SC), PREVIAMENTE SINTERIZADOS A 850 °C POR 48 H

Fonte: REFERÊNCIA (10)

Assim, os concretos com SC apresentam microestrutura inicial mais homogênea, com poros mais finos e menos conectados (9,10,12). Como a água é majoritariamente livre, sua remoção torna a secagem mais previsível, reduzindo os riscos de pressurização de vapor e de defeitos como fissuração ou explosão. Isso permite ciclos de secagem mais rápidos e seguros, embora o controle térmico continue sendo necessário (3).

Na sinterização, acima de 500-600 °C, ocorrem a condensação da sílica e a formação de uma fase vítrea contínua, promovendo a coesão entre os grãos (10). Em sistemas com alumina, há formação de mulita (3Al₂O₃·2SiO₂) (Figura 2e-f) (11), fase com alta estabilidade térmica, baixa expansão e elevada resistência ao choque térmico. A ausência de fases ricas em cálcio também confere maior resistência química em ambientes agressivos. A microestrutura resultante apresenta menor fração de fases vítreas de baixa viscosidade, o que contribui para a estabilidade dimensional e a resistência à fluência (14).

Entre as principais vantagens dos sistemas com SC, destacam-se (Tabela 1): elevada refratariedade, resistência à abrasão, maior durabilidade em ambientes corrosivos (Figura 3) e menor necessidade de temperaturas elevadas para o desenvolvimento da resistência mecânica (10,12). Além disso, apresentam menor suscetibilidade a problemas de secagem, o que reduz os tempos de comissionamento e os riscos durante o aquecimento inicial. Recentemente, a modificação superficial das

nanopartículas de sílica com agentes silanos e siloxanos permitiu o emprego desses ligantes em sistemas à base de MgO (17).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os concretos refratários são materiais de engenharia desenvolvidos para operar em condições térmicas e químicas severas, cujo desempenho depende do sistema ligante. Esses agentes influenciam todas as etapas do ciclo de vida, desde o processamento até o uso e a reciclagem. Sistemas com cimento de aluminato de cálcio (CAC) são amplamente utilizados devido à facilidade de processamento, à elevada resistência mecânica inicial e ao desempenho adequado em diversas aplicações. Em contraste, ligantes à base de sílica coloidal (SC) representam uma alternativa mais avançada, com maior homogeneidade, estabilidade termoquímica e confiabilidade em serviço. As diferenças nos mecanismos de consolidação afetam diretamente a permeabilidade, a secagem e a segurança durante o aquecimento inicial. A escolha do ligante deve considerar sua compatibilidade com as matérias-primas e com o ambiente de aplicação. Avanços no desenvolvimento desses sistemas continuam aprimorando o desempenho e a vida útil dos concretos refratários.

AGRADECIMENTOS

CAPES (Financiamento 001); CNPq (147526/2021-3; 140930/2022-1; 311010/2023-7); FAPESP (2022/03655-7; 2025-12394-0). ©

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Norma ABNT NBR 8826, Materiais refratários - Terminologia, Segunda edição (30.10.2014). ISBN 978-85-07-05201-2.
- [2] Norma ABNT NBR 10237, Materiais refratários - Classificação, Segunda edição (29.10.2014). ISBN 978-85-07-05200-5.
- [3] Nishikawa, A. Technology of monolithic refractories (1984) PLIBRICO, Tokyo, pp. 33-37.
- [4] Lee W.E., Moore R.E. Evolution of in situ refractories in 20th century (1998) J. Am. Cer. Soc. 81 (6), pp. 1385-1410.
- [5] Banerjee, S. Recent developments in monolithic refractories (1998) Am. Cer. Soc. Bull. 77 (10), pp. 59-63.
- [6] Roy, J. *et al*, Nanotechnology in castable refractory (2019) Cer. Int. 45 (1) pp. 19-29.
- [7] Salomão, R. *et al*, Hydraulic binders for refractory castables: Mixing, curing and drying (2007) CFI Cer. For. Int. 84 (9), pp. E103-E108.
- [8] Salomão, R. *et al*, Calcium aluminate cement in castable alumina: From hydrate bonding to the *in situ* formation of calcium hexaluminate (2021) Cer. Int. 47 (11), pp. 15082-15093
- [9] Ismael, M.R. *et al*, Optimization of the particle size distribution of colloidal silica containing refractory castables (2007) InterCeram: Int. Cer. Rev. pp. 34-39.
- [10] Salomão, R. *et al*, Colloidal silica-bonded high-alumina refractory castables: Systemic analysis from casting, curing, and drying up to contact with molten aluminum (2025) Proceedings of 19th Biennial Worldwide Congress on Refractories - UNITECR 2025. Asociación Latinoamericana de Fabricantes de Refractarios. Cancún, México, pp. 127-130.
- [11] Soury, A.R., Kashaninia, F. The effect of nano-structured colloidal silica on the properties of tabular alumina castables (2008) InterCeram: Int. Cer. Rev. 57 (6), pp. 414-416.
- [12] Ismael, M.R. *et al*, Refractory Castables Based on Colloidal Silica and Hydratable Alumina (2007) Am. Cer. Soc. Bull. 86 (9), pp. 58-61.
- [13] Innocentini, M.D.M. *et al*, Drying stages during the heating of high-alumina, ultra-low-cement refractory castables (2003) J. Am. Cer. Soc. 86 (7), pp. 1146-1148
- [14] Wynn, A.M. Testing of castable refractories for resistance to molten aluminium alloys (1992) Brit. Cer. Trans. 91 (5) 153-158.
- [15] Iller, R.K. The chemistry of silica: Solubility, polymerization, colloid and surface properties (1979) 1st Ed., Wiley & Sons, ISBN: 047102404X, New York, pp. 40-49, 364-366, 624-637.
- [16] Roberts, W.O. Colloidal Silica: Fundamentals and Applications (2005) CRC Press, ISBN: 9780429116582 Boca Raton, pp. 131-175.
- [17] Salomão, R. *et al*, Novel silanized colloidal silica-MgO self-flowing dispersions with improved hydroxylation resistance (2023) J. Eur. Cer. Soc. 43 (13), pp. 5691-5705.

VERGALHÃO GG 70

PRODUTIVIDADE | ECONOMIA | SUSTENTABILIDADE

Conheça a solução que combina, como nenhuma outra, alta performance e redução de custos com menor impacto ao meio ambiente.

O VERGALHÃO DE ALTA RESISTÊNCIA PARA TODAS AS OBRAS

Otimização de insumos diretos e indiretos.
40% mais resistência, reduzindo a quantidade de barras necessárias.

CONHEÇA ALGUMAS DAS POSSÍVEIS APLICAÇÕES DO GG 70:

Blocos de coroamento
Pilares de edifícios altos
Contenções
Vigas de transição
Núcleos rígidos de edifícios
Obras de Infraestrutura
Pré-fabricados

BAIXE O EBOOK:



- Nova nervura transversal exclusiva e diferente do GG 50
- 700MPa de limite mínimo de resistência ao escoamento
- Disponível nas bitolas de 12,5mm a 32mm
- 100% soldável

ALTA RESISTÊNCIA INÚMERAS POSSIBILIDADES

Projete e desenvolva com mais eficiência, economia e sustentabilidade.

 **GERDAU**
O futuro se molda

mais.gerdau.com.br

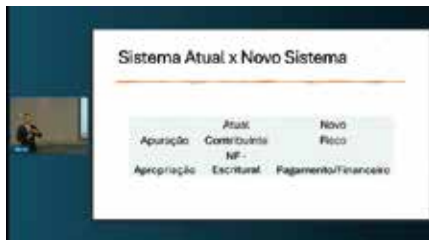


Reforma Tributária e empresas de engenharia

O Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON) e a Associação Brasileira de Consultoria e Engenharia Estrutural (ABECE) realizaram, no último 26 de março, no Centro de Convenções Villa Logos Office Park, o evento “Reforma Tributária e os impactos nas empresas de engenharia”, para seus associados.

O objetivo foi explicar como a reforma tributária aprovada, que substituiu o PIS/Cofins pela Contribuição sobre Bens e Serviços (CBS) e o ICMS, IPI E ISS pelo Imposto sobre Bens e Serviços (IBS), cuja implementação progressiva vai ser estender até 2033, vai impactar as receitas, os preços e os lucros das empresas que prestam serviços de engenharia.

Em sua palestra, o professor Pedro Anan Júnior, advogado e especialista em direito tributário, comparou o sistema tributário atual e o novo, para mostrar o cálculo que as empresas



de engenharia deverão fazer para se manterem competitivas. Por exemplo, as empresas que optarem em continuar no regime do Simples Nacional, recolherão menos CBS/IBS, no entanto seus contratantes podem demandar que mudem para o regime regular, devido aos créditos que esses contratantes terão direito.

Outra mudança importante: hoje a empresa apura o imposto devido e o governo fiscaliza; com o novo regime, o governo vai fazer a apuração assistida e a empresa vai verificar se está correta. Isto vai impactar o fluxo de caixa das empresas, pois

“o pagamento do tributo vai diretamente para o governo e recebimento do crédito dependerá deste pagamento pelo fornecedor”, explicou.

Ponto de controvérsia entre o público presente no evento foi quanto ao enquadramento das empresas de serviços de engenharia na Lei Complementar 214/2025: essas empresas devem ser enquadradas no artigo 127 ou nos artigos 251 a 270?

O artigo 127 refere-se às empresas prestadoras de serviços intelectuais, que prevê redução da alíquota da CBS/IBS em 30%. Já, os artigos 251 a 270 referem-se a serviços de construção civil, preveem redução da alíquota em 50%.

Segundo o palestrante, esse enquadramento não está ainda definido, cabendo às empresas e as associações técnicas pleitearem junto aos órgãos regulamentadores o enquadramento mais adequado.



Os desafios da sua obra estão em nosso DNA.

Chryso® Optima 1000

ROBUSTEZ EXCEPCIONAL

ALTA COESÃO E BAIXA VISCOSIDADE

MANUTENÇÃO PROLONGADA DA TRABALHABILIDADE

ALTO MÓDULO DE ELASTICIDADE

Atinja desempenho de concreto de alto nível.

ENTENDA COMO



IBRACON marca presença em eventos internacionais

Diretores do Instituto Brasileiro do Concreto participaram de eventos organizados por entidades técnicas da cadeia produtiva do concreto no exterior.

Do último 30 de março, o diretor de marketing, Eng. Rafael Timerman, foi palestrante numa das sessões do ACI Concrete Convention 2026, ocorrido de 29 de março a 1º de abril, em Chicago, nos Estados Unidos, organizado pelo



American Concrete Institute. O presidente do IBRACON, Eng. Julio Timerman, marcou também presença no evento.

Já, de 6 a 8 de maio, o presidente do IBRACON e o vice-presidente, Prof. Paulo Helene, participaram da Reunião do Cimento e do Concreto (PROCEMCO 2026), em Cartagenas das Índias, na Colômbia. O evento foi promovido pela Câmara Colombiana de Cimento e Concreto.

CBPAT 2026 com inscrições abertas

Estão abertas as inscrições para o 7º Congresso Brasileiro de Patologia das Construções (CBPAT 2026), que será realizado de 24 a 27 de junho, na Universidade Mackenzie, em São Paulo.

Fórum de debates sobre o controle da qualidade, a patologia e a recuperação de estruturas e sistemas construtivos,

tanto em edificações convencionais quanto em obras de infraestrutura, o evento busca divulgar as pesquisas científicas e tecnológicas sobre esses temas e integrar os profissionais da construção civil.

Os Congressos Brasileiros de Patologia das Construções são abertos aos profis-

sionais do setor construtivo, engenheiros, técnicos, pesquisadores, empresários, fornecedores, investidores e estudantes que queiram aprender mais, discutir e se atualizar. Os idiomas oficiais do evento são o português, espanhol e inglês.

Mais informações:

<https://cbpat.org.br/>



CONSTRUIR É CUIDAR

Soluções que conectam pessoas, conhecimento e futuro.

Aditivos para Concreto | Agentes de Cura | Desmoldantes | Proteção de Superfícies
Revestimentos para Pisos | Impermeabilização | Sistemas de Reparo



Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis

Fórum que reúne especialistas brasileiros e portugueses para debater inovações e soluções em materiais de construção com menor impacto ambiental, o Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis (CLBMCS 2026) vai acontecer

de 3 a 6 de novembro, em Fortaleza, Ceará. Realizado pela Universidade Federal do Ceará, o evento está organizado em torno dos seguintes eixos temáticos: materiais sustentáveis e inovadores, construções sustentáveis e bioarquitetura, tecnologias sustentáveis, eficiência na constru-

ção civil, economia circular e reciclagem, descarbonização e desenvolvimento sustentável, avaliação e modelação da sustentabilidade, reabilitação e conservação do patrimônio, e estudos de caso.

Mais informações:

<https://www.clbmcs2026.com.br>

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

IBRACON publica a Recomendação Técnica “Gestão de Obras de Arte Especiais”

Um estudo recente estima que existam aproximadamente 113 mil pontes e viadutos na malha rodoviária que cobre todo o território nacional. Somados às obras de arte especiais da malha ferroviária brasileira, evidencia-se a escala e complexidade do desafio de manter essas estruturas em níveis adequados de segurança, funcionalidade e desempenho ao longo do tempo.

Para contribuir com este desafio, o grupo de trabalho dedicado à gestão de OEA, composto por profissionais de entidades técnicas, como ABECE, ABMS, ABNT, ABPE, ALCONPAT, IABMAS e IBRACON, para consolidar diretrizes técnicas para concepção, operação e gestão de estruturas, estabelecer critérios de monitoramento e avaliação do desempenho, entre outras ações, lançou recentemente sua Recomendação técnica.



A Recomendação técnica “Gestão de Obras de Arte Especiais” traz, de forma estruturada, um conjunto abrangente de boas práticas aplicáveis a todas as etapas do ciclo de vida das OEA, tais como: concepção estrutural e projetos de manutenção; monitoramento do desempenho; avaliação da integridade estrutural; gestão de riscos e priorização de intervenções; definição de plano de manutenção; gestão de ações emergenciais, risco operacional e resiliência; elaboração de especificações e procedimentos técnicos; planejamento das intervenções e execução de obras; entre outros temas.

A publicação pode ser baixada gratuitamente por associados do IBRACON em seu perfil de sócio.

Acesse:

<https://www.ibracon.org.br/admasnew/>



Equipamentos para
**Caracterização, Pesquisa
& Desenvolvimento
do Concreto**

www.instron.com
vendas@instron.com
[+55] (41) 3035-9400

**Concreto Convencional,
CAD, CRF, UHPC, FRP, 3DCP...
Faça seus ensaios em
equipamentos Instron**

Regional em Minas realiza seu segundo encontro com expressiva participação de profissionais

O 2º Encontro da Regional do IBRACON em Minas Gerais ocorreu conjuntamente com a 2ª Civil+, no Campus Coração Eucarístico da PUC-MG, em Belo Horizonte, nos dias 13 e 14 de abril.

O evento reuniu 597 inscritos, envolvendo a participação de 41 docentes, bem como os três diretores regionais do IBRACON,



Prof. Ricardo Couceiro Bento, Eng. Lucca Ricci Grandinetti e Eng. Allyson Schiavinato, e expoentes da engenharia, como o Prof. Paulo Helene, vice-presidente do IBRACON, Flávio Capuruço, Álvaro Barbosa e Otávio Luz do Nascimento, como palestrantes no “Dia Especial do IBRACON”. Ao todo, foram realizadas 11 palestras magnas e 10 oficinas práticas.

Regional São Carlos realizou palestra sobre reforço de estruturas

A Regional de São Carlos recebeu, no último dia 29 de maio, o engenheiro português Filipe Dourado, que apresentou a palestra “Reforço

de Estruturas com aço com memória de forma - *memory steel*”. Com público de 18 profissionais, a palestra foi realizada na UFSCar, contou com o apoio do

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGECiv) e da Associação de Engenheiros e Arquitetos de São Carlos (AEASC).

Encontro Regional no Pará

O 31º Encontro da Regional do IBRACON no Pará aconteceu de 16 a 18 de junho, no auditório central do Instituto Federal do Pará, em Belém, em conjunto com Seminário de Patologia das Estruturas de Concreto (VII SEMPAT).

Com participação de profissionais,

professores e pesquisadores, o evento discutiu a durabilidade o desempenho das estruturas na Amazônia, expondo estratégias para infraestruturas mais resilientes e sustentáveis. O vice-presidente, Prof. Paulo Helene, o diretor institucional, Eng. Maurício Bianchini, e do diretor de marketing do

IBRACON, Eng. Rafael Timerman, palestraram no Encontro, que contou com o apoio da ABESC, ALCONPAT Brasil, CREA-PA, MC, Tabalmix e Totalmix.

Na ocasião ocorreram as premiações do Prêmio José Zacarias e do Concurso Estudantil dos Melhores Artigos Científicos.

Regional do Mato Grosso reforça aproximação entre academia e setor produtivo

No dia 8 de abril, o diretor regional do Mato Grosso, Pedro Matiazzi da Silva, apresentou aos alunos do curso de Engenharia Civil da UNEMAT, campus de Sinop, o Instituto Brasileiro do Concreto, sua missão e sua relevância para o desenvolvimento da engenharia do concreto no Brasil. Destacou-se a

realização de congressos técnico-científicos, oportunidades de capacitação profissional, formas de associação e acesso às publicações técnicas de referência na área.

Já, em 20 de maio, foi realizada a palestra do Prof. Bernardo Fonseca Tutikian, que abordou o tema “Utilização de Gelo no Concreto: Mitos e

Verdades”, no V Congresso de Engenharia Civil da Unifasipe JET, em Sinop-MT, para cerca de 120 participantes, entre estudantes, professores e profissionais da engenharia. Na palestra, esclareceu-se quando essa prática é tecnicamente necessária e quando seu uso ocorre apenas por tradição ou equívocos de execução.



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



67º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO

Natal 2026
30 de setembro a 3 de outubro

INSCRIÇÕES ABERTAS!

MAIOR EVENTO TÉCNICO-CIENTÍFICO
SOBRE O CONCRETO NO BRASIL

PROGRAMAÇÃO

- Conferências plenárias
- Seminários
- Sessões técnico-científicas
- Concursos estudantis
- Cursos

PATROCÍNIO E EXPOSIÇÃO

- Feira Brasileira da Construção em Concreto
- Seminário de Novas Tecnologias
- Logotipagem do evento

EVENTO PARALELO



15º CONGRESSO INTERNACIONAL IBERO-AMERICANO DE PAVIMENTOS DE CONCRETO

30 de setembro a
2 de outubro de 2026

MAIS INFORMAÇÕES



www.ibracon.org.br [ibracon_oficial](https://www.instagram.com/ibracon_oficial) [ibraconOffice](https://www.facebook.com/ibraconOffice) office@ibracon.org.br

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