



IBRACON

ADITIVOS E ADIÇÕES

CONCRETOS MAIS SUSTENTÁVEIS, RESILIENTES E DE MELHOR DESEMPENHO

PERSONALIDADE ENTREVISTADA

ROGÉRIO VENÂNCIO:
COMPATIBILIZANDO
ADITIVOS, SCMS E CIMENTOS

PESQUISA E DESENVOLVIMENTO

CRITÉRIOS DE
DIMENSIONAMENTO
DE MATERIAIS
NÃO CONVENCIONAIS

MANTENEDOR

PRÉ-FABRICADOS PARA
ESTRUTURAS DE
GEOMETRIA COMPLEXA

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

ADITIVOS



Eficiência em
Aditivos para
Concreto

ADITIBRAS



Borregaard



chryso
SAINT-GOBAIN



PENETRON
CEMENT-BASED PENETRATING ADJUSTABLE



BUILDING TRUST



QUÍMICA INDUSTRIAL

ADIÇÕES

Elkem



Tecnosil

PROTENSÃO

EVEHX
CORRAL CO.

ARMADURA



ArcelorMittal

belgo
arames



GERDAU

RECUPERAÇÃO ESTRUTURAL

ONSITE
ESTRUTURAS

EQUIPAMENTOS



INSTRON



ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO



100 educação associada

ipt

INSTITUTO DE
PESQUISAS
TECNOLOGICAS

PUC
CAMPINAS
UNIVERSIDADE LUIZ DE OLIVEIRA



ESCRITÓRIOS DE PROJETOS



ABECE



ENGET



PhD
Engenharia



TQS

JUNTE-SE A ELAS

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

PRÉ-FABRICADOS



CONTROLE TECNOLOGICO



FÓRMAS



FIBRAS



CONCRETO



CONSTRUTORAS



CIMENTO



GOVERNO



EVENTOS



SUMÁRIO

ENTENDENDO O CONCRETO

- 15 Impactos da incorporação de aditivos no desempenho do concreto industrializado



PESQUISA E DESENVOLVIMENTO

- 27 A influência da aplicação de aditivo contendo nanopartículas de sílica na durabilidade do concreto
- 31 Analysis of the mechanical properties between High-strength and Self-compacting concretes, using an additive and an admixture, for different reductions in water content

- 37 Utilização do pó da casca de melancia como substituinte parcial do cimento Portland em argamassas



- 43 Desempenho do bioconcreto com a bactéria *Bacillus subtilis*

ESTRUTURAS EM DETALHES

- 53 Capacidade de pilar em flexo-compressão reforçado por confinamento polimérico



- 61 Análise comparativa da capacidade resistente de vigas compostas por concreto reforçado com fibras



CAPA

MONTAGEM DE ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS DE CONCRETO DA PISCINA DE ONDAS, EM BUZIOS, NO RIO DE JANEIRO.

CRÉDITO: CASSOL PRÉ-FABRICADOS

Seções

- 5 EDITORIAL
- 6 COLUNA INSTITUCIONAL
- 8 CONVERSE COM O IBRACON
- 9 PERSONALIDADE ENTREVISTADA:
ROGÉRIO VENÂNCIO
- 22 MANTENEDOR
- 51 MERCADO NACIONAL
- 67 ENCONTROS E NOTÍCIAS



REVISTA OFICIAL DO IBRACON

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

ISSN 1809-7197

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

EDITOR-CHEFE

→ Prof. Enio Pazini Figueiredo

JORNALISTA RESPONSÁVEL

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

PUBLICIDADE E PROMOÇÃO

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

PROJETO GRÁFICO E DTP

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

ASSINATURA E ATENDIMENTO

office@ibracon.org.br

GRÁFICA

Elyon
Preço: R\$ 12,00

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

© Copyright 2025 IBRACON

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



INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO

Fundado em 1972

Declarado de Utilidade Pública Estadual

Lei 2538 de 11/11/1980

Declarado de Utilidade Pública Federal

Decreto 86871 de 25/01/1982

JULIO TIMERMAN

DIRETOR PRESIDENTE

PAULO HELENE
DIRETOR 1º VICE-PRESIDENTE

ENIO PAZINI FIGUEIREDO
DIRETOR 2º VICE-PRESIDENTE

CLÁUDIO SBRIGHI NETO
DIRETOR 1º SECRETÁRIO

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

Enio Pazini Figueiredo

COMITÊ EDITORIAL MEMBROS

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

PRESIDENTE DO COMITÊ CIENTÍFICO

Gláucia Dalfré

COMITÊ CIENTÍFICO MEMBROS

- Ricardo Couceiro Bento (projeto estrutural)
- Vinicius Caruso (saneamento)
- Andrielli Morais (UFG)
- Ana Elizabete Jacintho (PUC-Campinas)
- Cristiane Bueno (UFSCAR)
- Edna Possan (Unila)
- Emerson Felix (UNESP)
- Fernanda G. da Silva Ferreira (UFSCAR)
- Fernando Couto (UFMG)
- Leandro Mouta (UNICAMP)
- Luiz Carlos de Almeida (UNICAMP)

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

Desenvolvimento de aditivos e adições **contribui para a transformação tecnológica da construção**

Caro leitor,



A evolução dos aditivos e adições para concreto consolidou-se como um dos motores mais relevantes na transformação tecnológica do setor. O desenvolvimento de moléculas cada vez mais eficientes, aliado ao de adições minerais reativas e práticas construtivas inovadoras, tem ampliado o desempenho, a durabilidade e a sustentabilidade da construção. Este movimento, já consolidado internacio-

nalmente, se intensifica no Brasil, à medida que a construção civil assume compromissos formais de redução de emissões, racionalização de recursos e aumento da vida útil das estruturas.

Entre os avanços mais significativos, destacam-se os superplastificantes à base de policarboxilatos (PCE), que redefiniram o controle reológico das misturas ao permitir elevadas reduções de água, estabilidade e fluidez, mesmo em sistemas altamente adensados. A sua combinação com modificadores de viscosidade e aditivos especializados possibilitou saltos importantes em produtividade, precisão e desempenho. A entrevista desta edição reforça esse panorama ao discutir a evolução dos aditivos, os desafios de compatibilidade com cimentos modernos e a futura revisão da ABNT NBR 11768.

A nanotecnologia, por sua vez, representa uma fronteira emergente. O estudo apresentado sobre o uso de nanossílica demonstra sua capacidade de densificação da matriz, redução da porosidade e mitigação da penetração de cloretos — benefícios determinantes para a durabilidade de estruturas submetidas a ambientes agressivos. Esses resultados dialogam diretamente com os esforços globais para ampliar a resiliência de concretos expostos, sobretudo em obras de infraestrutura.

Também ganha destaque o papel dos aditivos em concretos

especiais, como nos estudos que analisam a relação entre reologia, desempenho mecânico e reduções progressivas de água em misturas autoadensáveis e de alta resistência. A compreensão integrada desses fatores é decisiva para garantir confiabilidade em aplicações que exigem fluidez elevada e controle rigoroso das propriedades no estado fresco e endurecido.

Do ponto de vista estrutural, esta edição aborda ainda o comportamento de concretos reforçados com fibras e sistemas de confinamento polimérico, discutindo critérios de dimensionamento, modelos analíticos e desempenho pós-fissuração. As análises mostram avanços na modelagem e nos parâmetros de projeto, fundamentais para ampliar a adoção de tecnologias que aumentam a ductilidade e a capacidade resistente de elementos estruturais.

Em paralelo, práticas de industrialização ganham força, como ilustrado pelo estudo de pré-fabricados para estruturas de geometrias complexas, que evidencia o papel dos aditivos na produção de concretos autoadensáveis de alta estabilidade e repetibilidade, essenciais para tolerâncias dimensionais rigorosas e qualidade de acabamento.

A sustentabilidade, eixo transversal de inovação, avança com soluções que reduzem o impacto ambiental e valorizam materiais alternativos. Nesta edição, destacam-se pesquisas sobre bioconcretos baseados em *Bacillus subtilis*, capazes de promover cicatrização autônoma de fissuras, e o uso de resíduos agroindustriais, como o pó de casca de melancia, como substituição parcial do cimento em argamassas — alternativas que reforçam o potencial da economia circular na construção.

O conjunto desses estudos evidencia um setor em transição para uma engenharia de materiais mais precisa, digital, ambientalmente responsável e conectada às demandas do futuro. A integração entre pesquisa, indústria e normalização será determinante para consolidar esses avanços e garantir que o concreto permaneça como protagonista das infraestruturas modernas — mais duráveis, eficientes e sustentáveis.

MANFREDO BELOHUBY

MEMBRO DO COMITÊ EDITORIAL E EDITOR ASSISTENTE DA EDIÇÃO

Atividades da nova gestão para 2026

Prezados leitores,



É com grande alegria e imensa satisfação que escrevo esta Coluna nesta Revista, que procura levar aos leitores as inúmeras atividades de nossa entidade, além de apresentar artigos técnicos de grande interesse da comunidade técnica.

A nossa reeleição para o biênio 2025-2027 traz muita motivação, para, juntos com esta nova Diretoria e com o imprescindível apoio do Conselho Diretor, irmos levar à frente o Instituto!

Com relação à nova Diretoria, ressalto que a mesma já está em plena atividade, com os Diretores já tendo apresentado seu planejamento e metas a serem alcançadas em 2026.

A boa receptividade da nova Diretoria demonstrou o quanto se quer fazer pelo desenvolvimento do concreto no Brasil, dando ênfase a todas as ações que beneficiem os sócios. A orientação transmitida aos Diretores é implementar ações simples, sem fazer conjecturas e projetos irreais e inalcançáveis, que atendam à filosofia contida em nossa missão principal, que é “criar, divulgar e defender o correto conhecimento sobre materiais, projeto, construção, uso e manutenção de obras de concreto”

Destaco, dentre as inúmeras ações que nossa Diretoria apresentou no planejamento para 2026, as seguintes atividades que pretendemos dinamizar e/ou implementar:

► Fortalecimento das Regionais do Ibracon, incentivando-as a promover eventos e workshops, dando suporte técnico e material a estes eventos.

Os Diretores deverão manter uma rotina de visita às Regionais, ouvindo a necessidade das mesmas, participando de eventos locais e/ou indicando profissionais aderentes aos tópicos de interesse destes eventos;

- Criação de Diretorias Internacionais, conforme previsto na atualização de nosso Estatuto. O *Brasil ACI Chapter*, por exemplo, já é uma realidade, e esta Diretoria será dinamizada!! Temos previsão de apresentar, no *Fall Convention* do ACI, em Chicago, nossa Entidade no *International Forum* e estaremos, juntamente com a ABNT, assinando um acordo de cooperação técnica com o *American Concrete Institute*, com o intuito de implementar um intercâmbio de normas técnicas e de também traduzir para o português algumas das normas mais importantes do ACI;
- Manter, incentivar e promover uma nova estratégia de Marketing de nossa instituição, que reconhecidamente é a mais importante entidade técnica nacional voltada à cadeia produtiva do concreto;
- Fortalecer e ampliar os Comitês Técnicos, inserindo-os nos eventos do Ibracon e de entidades parceiras, promovendo ainda workshops no sentido de apresentar os resultados obtidos. Temos temas de suma importância a serem desenvolvidos nos diversos Comitês Técnicos e, por isso, houve uma grande reestruturação nos mesmos, objetivando-se alcançar os resultados previstos no planejamento desta Diretoria;
- Estreitar e aumentar o relacionamento com entidades parceiras;
- Não obstante o nosso evento anual já ter reconhecimento da comunidade técnica, pretende-se colocar, na sua grade, sessões técnicas com temas práticos e de interesse de construtoras, atraindo novamente este importante participante da cadeia produtiva do concreto;

- ▶ Fortalecer as atividades estudantis, sedimentando os Concursos promovidos durante os eventos do Ibracon e de outras entidades;
- ▶ Viabilizar, técnica e economicamente, o processo de certificação, mediante uma reestruturação do mesmo e iniciando, pela Diretoria de Cursos, o treinamento de potenciais candidatos ao processo de Certificação;
- ▶ Manter, promover e incentivar o lançamento de livros, publicações e periódicos que tanto interesse atraem em nossos associados.

Não poderia deixar de destacar o 66º CBC recentemente realizado em Curitiba/PR. O retorno dos cerca de um mil e trezentos presentes no evento, através da pesquisa respondida pelos mesmos, demonstra que o evento superou as expectativas, seja pelos temas escolhidos, seja pelo alto nível técnico das palestras proferidas, destacando-se, ainda, a perfeita organização do mesmo.

Finalizando, não poderia deixar de destacar que as atividades preparatórias ao 67º CBC, a ser realizado em Natal/RN, já estão em curso e contam com a coordenação da Secretaria Executiva e o apoio imprescindível de TODAS as Diretorias. Teremos neste evento uma grande novidade, que é a realização conjunta com a FIHP, *Federacion IberoAmericana del Hormigon Premezclado*, do 15º Congresso Ibero Americano de Pavimentos de Concreto. Destacando-se, ainda, os animados concursos estudantis, que irão acontecer, assim como o já tradicional jantar dos estudantes, o *Concrete Lovers*.

Desejamos a todos uma boa leitura desta edição e que o início desta nova gestão à frente do IBRACON coincida com o começo de um ciclo de crescimento para o setor, com resultados mais positivos para toda a cadeia produtiva do concreto.

JÚLIO TIMERMAN

**PRESIDENTE DO IBRACON – INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO
(2025/2027)** 



NO PRUMO

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

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

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

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

FORMATO: 21 x 29 cm

PÁGINAS: 170

ANO: 2017

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



PRODUÇÃO



PATROCÍNIO



REALIZAÇÃO

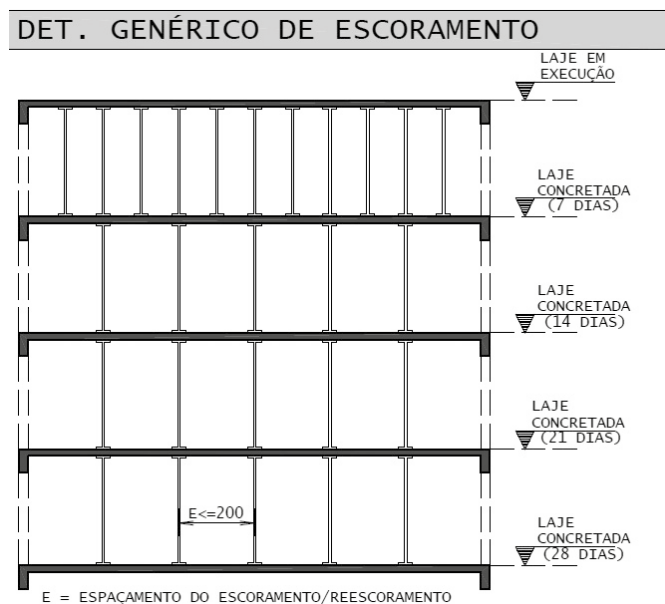


PERGUNTAS TÉCNICAS

ENVIE SUA PERGUNTA PARA O E-MAIL:

fabio@ibracon.org.br

RECEBI ESTA PROPOSTA GENÉRICA DE ESCORAMENTO DE LAJES PARA EDIFÍCIOS MULTI-PAVIMENTOS, PARA TODAS AS OBRAS COM f_{ck} A 28 DIAS:



Tenho as seguintes dúvidas:

1. Vale para laje armada ou protendida?
2. Vale para laje maciça ou nervurada?
3. Vale para qualquer f_{ck} e qualquer E_c ?
4. Vale para f_{ck} a 28 dias, ou 63 dias ou 91 dias?
5. Independe do peso próprio da laje confrontado com sua capacidade de carga (150, 200, 500, 1.000 kgf/m²)?

Seria viável um procedimento universal?

PROF. PAULO HELENE

VICE-PRESIDENTE DO IBRACON

Eu trabalho com execução de estruturas e já executamos mais de 10 milhões de m² de formas com escoramentos diversos. Temos, como padrão, um cálculo que leva em conta os seguintes fatores para um ciclo de uma concretagem a cada 7 dias:

- a estrutura é projetada para receber a totalidade da carga aos 28 dias com o f_{ck} previsto em projeto;
- no ato da concretagem as lajes inferiores já estão com o resultado positivo do concreto, pelo menos, aos sete dias de cura;
- a laje que está sendo concretada transfere, em sua totalidade, as cargas do peso próprio e o adicional de 150 kg/M² de carga viva (equipe trabalhando na laje);

- o escoramento principal é competente para transferir as cargas para a laje inferior de forma uniformemente distribuída;
- a laje inferior vai receber o peso da laje superior + a carga viva + seu peso próprio e absorverá 65% (admitindo o concreto dentro de sua curva normal) da carga final de projeto; transferindo a diferença para a laje imediatamente inferior;
- 3ª laje, com 14 dias de cura, terá capacidade de absorver 76% da carga final de projeto, o que não for absorvida será transferida para a 4ª laje.

Usamos para a resistência do concreto, em relação ao f_{ck} de 28 dias:

- 7º dia - 65%
- 14º dia - 76%
- 21º dia - 88%
- 28º dia - 100%

Eu sempre peço ao construtor para fazer uma amostragem da resistência do concreto no 3º dia, caso haja um resultado negativo a obra diminui o ritmo para a solução do problema.

Enfim, um cálculo dinâmico para manter o “pacote de lajes” estável.

Para lajes protendidas o cálculo é outro.

Seria interessante um estudo do comportamento da estrutura nos diversos tetos na fase construtiva, cada teto com seu f_{ck} e seu módulo de elasticidade, os escoramentos sendo entendidos como molas pontuais e assim verificar a distribuição das cargas ao longo dos tetos.

Esse estudo é para quando o construtor não passa informações sobre o tipo de concreto que ele vai utilizar. O correto é o construtor informar sobre a curva de resistência do concreto que ele vai utilizar na obra. As informações das cargas podem ser obtidas com o projetista da estrutura.

A engenharia de escoramentos e, em especial, de cimbramento de obras de arte é muito “mecanizada”: o projeto das peças é um “lego” de montagem, simples no papel, complexo no campo.

Como é decidido o apoio das cargas sobre o solo? Como adaptar as diferenças de altura dos escoramentos? Haverá excentricidades nas cargas? E outras tantas questões que deverão ser discutidas e analisadas no local.

O assunto é bem complexo e são poucos os profissionais que saberão decidir corretamente, acidentes podem ocorrer por falta de comunicação e competência.

ROBERTO SOLANO

VARCTEC - ARQUITETURA, CONSTRUÇÃO E TECNOLOGIA LTDA

PALMETA - PALMETA ENGENHARIA

DE ESTRUTURAS LTDA

Rogério Venâncio

Engenheiro civil formado na Universidade Nove de Julho (Uninove) e tecnólogo em Tecnologia em Construção Civil pela Universidade Estadual Paulista (UNESP), com mestrado profissional em Habitação pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT), Rogério José Cândido Venâncio atuou como coordenador técnico na Polimix Concreto, de 1996 a 2009, ano em que ingressou na GCP, como gerente técnico.

Atualmente, é Diretor Técnico na Chryso/Saint Gobain e coordenador da comissão de estudos da ABNT NBR 11768, a norma de aditivos para concreto.

Nesta entrevista, Venâncio conta sobre a evolução tecnológica dos aditivos para concreto, os focos das pesquisas atuais relacionadas aos aditivos e o que deve ser mudado na revisão da norma NBR 11768.



IBRACON POR QUE ESCOLHEU GRADUAR-SE EM ENGENHARIA CIVIL E SE ESPECIALIZAR EM ADITIVOS PARA CONCRETOS?

| **ROGÉRIO VENÂNCIO** | Acredito que a influência do meu pai, que era pedreiro, tenha sido decisiva na minha trajetória. Eu o acompanhava nas construções e reformas, e sempre soube que era seu sonho ter um filho engenheiro. Antes de migrar para a área de aditivos, atuei por 13 anos no departamento técnico de uma das maiores concreteiras do país. Depois recebi um convite e, há 17 anos, sigo nesse segmento. Concreto e aditivos caminham lado a lado, e por isso, considero que hoje transito entre esses dois mundos.

IBRACON OS ADITIVOS COMEÇARAM A SER ADICIONADOS AO CONCRETO MODERNO NO INÍCIO DA DÉCADA DE 1930, COM VISTAS A INCORPORAR AR EM PAVIMENTOS DE RODOVIAS NOS ESTADOS UNIDOS. COMO SE DEU ESTA APLICAÇÃO?

| **ROGÉRIO VENÂNCIO** | As primeiras utilizações sistemáticas de agentes incorporadores de ar em concretos ocorreram no início da década de 1930 nos Estados Unidos, quando pesquisadores passaram a investigar maneiras de melhorar o desempenho de pavimentos de concreto sujeitos a ciclos de gelo-degelo. Segundo registros históricos, o avanço decisivo ocorreu com os trabalhos dos pesquisadores da *Portland Cement Association* (PCA), que descobriram que a introdução

controlada de microbolhas de ar no concreto aumentava significativamente sua durabilidade em condições severas de congelamento. Essa inovação surgiu ao mesmo tempo em que engenheiros buscavam resolver falhas recorrentes em pavimentos rodoviários, especialmente o deslocamento superficial causado pelo gelo.

IBRACON ESTA APLICAÇÃO DOS INCORPORADORES DE AR FOI EMPÍRICA, AINDA SEM BASE TEÓRICA FUNDAMENTADA?

| **ROGÉRIO VENÂNCIO** | Os primeiros experimentos foram majoritariamente empíricos, baseados em tentativas de melhorar a resistência ao gelo utilizando compostos naturais, como resinas e gorduras animais. Esses materiais introduziam bolhas de ar de forma não controlada e sua eficácia era observada mais na prática do que por compreensão teórica profunda. Pesquisas do início do século XX relatam ensaios com resina de pinho, que mostraram melhorias entre 10% a 15% na resistência ao gelo, mas sem explicações químicas consolidadas, tratava-se de tentativa e erro.

IBRACON QUEM ENTENDEU O MECANISMO DE AÇÃO DOS INCORPORADORES DE AR?

| **ROGÉRIO VENÂNCIO** | A inovação é atribuída principalmente aos pesquisadores da PCA, que elucidaram

“

NO JAPÃO, HATTORI E COLABORADORES DESENVOLVERAM SUPERPLASTIFICANTES PARA REDUZIR DRASTICAMENTE A ÁGUA DE AMASSAMENTO E, ASSIM, POSSIBILITAR CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA, ESSENCIAL PARA EDIFÍCIOS ALTOS E INFRAESTRUTURA AVANÇADA

”

o mecanismo científico da incorporação de ar no concreto e, a partir disso, desenvolveram aditivos específicos. Esse avanço consolidou o processo como uma tecnologia confiável, impulsionando sua adoção em larga escala no país.

IBRACON O PRÓXIMO SALTO TECNOLÓGICO NO DESENVOLVIMENTO DE ADITIVOS OCORREU COM O APARECIMENTO DOS SUPERPLASTIFICANTES NO JAPÃO E NA ALEMANHA, NA DÉCADA DE 1960. QUAIS FATORES ECONÔMICOS, CIENTÍFICOS E TECNOLÓGICOS CONTRIBUÍRAM PARA SEU SURGIMENTO?

| **ROGÉRIO VENÂNCIO** | A demanda por concretos de maior desempenho, isto é, mais fluidos, mais fáceis de adensar e que permitissem reduzir o consumo de cimento, começou a crescer rapidamente nos pós guerra devido principalmente ao crescimento acelerado da construção civil no Japão e na Alemanha, que exigia soluções para acelerar processos, reduzir retrabalho e aumentar a velocidade de moldagem e desforma. Os lignossulfonatos e redutores de água de primeira geração foram desenvolvidos para atender a esta demanda, mas tinham limitações, como redução de água de apenas 5 a 10%.

O surgimento de arranha-céus, pontes de grande vão e estruturas altamente armadas exigia concretos capazes de fluir sem segregação e com melhor capacidade de adensamento em espaços confinados. Os primeiros superplastificantes foram criados especificamente para atender esse tipo de estrutura, pois permitiam reduzir o teor de água entre 20 e 30%, possibilitando concretos mais resistentes sem aumentar o consumo de cimento, o que reduzia custos globais das obras.

A base científica dos superplastificantes surgiu de avanços anteriores na química de polímeros e na indústria de corantes. Na Alemanha, compostos de naftaleno sulfonados foram inicialmente desenvolvidos por grupos como a IG Farben ainda nos anos 30, criando conhecimento químico, que mais tarde seria adaptado ao concreto.

Pesquisadores japoneses e alemães descobriram que certos polímeros orgânicos, como condensados de formaldeído com melamina ou naftaleno, podiam promover repulsão eletrostática entre partículas de cimento, dispersando-as e liberando água aprisionada, o que aumentava enormemente a fluidez da mistura.

No Japão, Hattori e colaboradores desenvolveram superplastificantes com o foco explícito de reduzir drasticamente a água de amassamento e, assim, possibilitar concretos de alta resistência, algo essencial para edifícios



Teste de abatimento do concreto, no qual, além da fluidez, nota-se a coesão e homogeneidade da mistura

altos e infraestrutura avançada. Empresas, como a Kao Corporation, desenvolveram produtos pioneiros como o “Mighty”, introduzido em 1964 na indústria de concreto. Esse tipo de inovação corporativa ajudou a transformar pesquisa de laboratório em produto comercial aplicável e escalável, pois a evolução tecnológica demandava aditivos muito mais potentes.

IBRACON O SALTO SEGUINTE OCORREU POR VOLTA DO ANO 2000, COM O APARECIMENTO DE ADITIVOS À BASE DE POLICARBOXILATOS (PCE), QUE DERAM UM NOVO IMPULSO À INDÚSTRIA DO CONCRETO, INCLUSIVE COM O SURGIMENTO DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL. ENTRETANTO, PASSADOS QUASE 30 ANOS, NÃO HOUVE O SURGIMENTO DE UMA NOVA GERAÇÃO DE ADITIVOS COM O MESMO IMPACTO NO MERCADO DOS PCEs.

A QUE SE DEVE ESSA APARENTE DEMORA NO DESENVOLVIMENTO DE NOVAS TECNOLOGIAS E O QUE SE DEVERIA ESPERAR PARA O FUTURO?

| ROGÉRIO VENÂNCIO | Os PCEs entregam benefícios decisivos, tais como: dispersão altamente eficiente por impedimento estérico; altíssima redução de água que pode superar os 30%; controle avançado do comportamento reológico; versatilidade para concretos bombeáveis, de alta resistência e autoadensáveis. Superar essa versatilidade exige avanços químicos muito além dos já dominados, somados a uma combinação de barreiras técnicas, científicas, econômicas e regulatórias identificadas nos estudos mais recentes. Os desafios atuais não estão mais na

capacidade de reduzir água, mas em ter compatibilidade com diferentes tipos de cimento e adições minerais, isto é, menor sensibilidade a variações das matérias primas e desempenho estável com os materiais cimentícios suplementares (SCM), como escória, cinzas, filler calcário etc. Esses desafios foram identificados como lacunas de inovação que estão em processo avançado de desenvolvimento, ou seja, trata-se do surgimento de uma nova “geração” disruptiva. Além disso, a indústria de aditivos enfrenta pressões para reduzir emissões, resíduos e rotas de ciclo de vida. As exigências regulatórias mais rígidas mundialmente (REACH – *Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals*, EPA – *Environmental Protection Agency* etc.) estão demandando que qualquer nova molécula não seja apenas mais eficiente, mas também mais limpa e sustentável. As pesquisas atuais concentram-se em otimizar arquitetura das cadeias poliméricas, produzir PCEs customizados para cada tipo de cimento ou SCM e reduzir sensibilidade química.

IBRACON O QUE ESPERAR PARA O FUTURO?

| ROGÉRIO VENÂNCIO | As pesquisas avançam para ajustar a densidade e o comprimento das cadeias laterais, criar PCEs dedicados a cada tipo de cimento, SCM e condição climática, bem como controlar propriedades reológicas com precisão quase “sob medida”. O foco está em microscopia, engenharia molecular e customização extrema.

A maior lacuna atual da tecnologia de aditivos é a imprevisibilidade da interação entre aditivos e diferentes composições de cimento, que hoje variam muito devido ao aumento do uso de filler calcário, escória, cinzas, metacaulim e ligantes alternativos. O cimento moderno deixou de ser um produto padronizado: cada fábrica usa diferentes matérias primas e SCMs, tornando impossível uma formulação universal.

Pesquisas mostram que a dispersão ideal dos PCEs depende fortemente da composição do cimento, exigindo adaptações específicas e elevando a complexidade do projeto reológico. A introdução de novos ligantes e sistemas alternativos (como LC3 e materiais álcalis ativados) criou ainda mais desafios, exigindo o desenvolvimento rápido de aditivos cada vez mais específicos. Por outro lado, as maiores inovações



Concreto autoadensável, que se tornou possível com o uso de aditivos superplastificantes com policarboxilato, sendo lançado

“

OS DESAFIOS ATUAIS NÃO ESTÃO MAIS NA CAPACIDADE DE REDUZIR ÁGUA, MAS EM TER COMPATIBILIDADE COM DIFERENTES TIPOS DE CIMENTO E ADIÇÕES MINERAIS

”



AS MAIORES INOVAÇÕES DEVEM SURGIR POR PRESSÕES AMBIENTAIS: PROCESSOS DE SÍNTESE MAIS LIMPOS, PCES QUE PERMITAM REDUZIR AINDA MAIS O TEOR DE CIMENTO, MAIOR INTEGRAÇÃO COM MATERIAIS DE ECONOMIA CIRCULAR



devem surgir por pressões ambientais, tais como: processos de síntese mais limpos, PCEs que permitam reduzir ainda mais o teor de cimento, maior integração com materiais de economia circular (SCMs industriais). Atualmente, os PCEs já permitem otimizar mais de 25% de cimento nos traços, reduzindo drasticamente as emissões de CO₂ do concreto e essa será a maior fonte de inovação futura.

O futuro aponta para aditivos compatíveis com sensores, de modo que os concretos em centrais dosadoras e canteiros sejam monitorados em tempo real quanto à sua trabalhabilidade, viscosidade, tempo de pega e resistência inicial. Esses dados alimentarão modelos probabilísticos e serão analisados por algoritmos que correlacionarão variáveis químicas (tipo de cimento, aditivo, temperatura, umidade) com desempenho esperado do concreto. O processo de automatização permitirá prever falhas ou desvios antes que ocorram, adaptando a reologia automaticamente por sistemas inteligentes de dosagem de aditivos. Assim, ao invés de confiar em uma ficha técnica, os pesquisadores e usuários terão acesso a curvas dinâmicas de desempenho, ajustadas às condições reais da obra.

Embora ainda em estágio inicial, tendências incluem PCEs híbridos com nanopartículas, aditivos funcionalizados para aumentar durabilidade e reduzir permeabilidade, integração com concretos de ultra alto desempenho (UHPC).

IBRACON SEGUINDO ESTE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO, QUANDO APARECERAM AS PRIMEIRAS REGULAMENTAÇÕES DO MERCADO DE ADITIVOS PARA CONCRETO? QUANDO SURTIRAM AS PRIMEIRAS NORMAS TÉCNICAS? O QUE, NO GERAL, ELAS BUSCAM ASSEGURAR COM RELAÇÃO AOS ADITIVOS COMERCIALIZADOS E APLICADOS NO CONCRETO?

| **ROGÉRIO VENÂNCIO** | As primeiras regulamentações e normas técnicas voltadas para aditivos de concreto surgiram quando o uso desses produtos começou a se consolidar como prática industrial, exigindo critérios claros de qualidade e segurança.

A partir das décadas de 1960 e 1970, normas internacionais passaram a regulamentar o uso de aditivos, com destaque para a ASTM C494, nos Estados Unidos, e a EN 934, na Europa, que estabeleceram requisitos mínimos de desempenho e métodos de ensaio.

Os objetivos centrais da normalização são assegurar a qualidade e o desempenho mínimo, garantindo que os aditivos cumpram de forma efetiva a função declarada e estando em plena compatibilidade com o cimento. Com isso, busca-se prevenir problemas de incompatibilidade que possam comprometer a trabalhabilidade, a resistência e a durabilidade do concreto. Além disso, a norma deve enfatizar a segurança e a confiabilidade, assegurando que os produtos químicos não provoquem efeitos adversos à estrutura ou ao meio ambiente.

Outros objetivos estão em padronizar os ensaios laboratoriais e garantir transparência comercial, exigindo informações técnicas claras e verificáveis dos fabricantes, o que profissionalizou o mercado de aditivos e trouxe segurança aos projetistas e construtores ao estabelecer parâmetros confiáveis.

IBRACON COMO A NORMA ABNT NBR 11768 DISCIPLINA ATUALMENTE O MERCADO BRASILEIRO DE ADITIVOS, COMPOSTO POR ENORME VARIEDADE DE PRODUTOS QUÍMICOS PARA OS MESMOS PROPÓSITOS?

| **ROGÉRIO VENÂNCIO** | A ABNT NBR 11768 é hoje a principal norma que disciplina o mercado brasileiro de aditivos químicos para concreto, justamente porque esse mercado é extremamente diverso e composto por produtos que muitas vezes têm o mesmo propósito, mas com formulações distintas.

Esta norma está composta por 3 partes. A parte 1 estabelece os requisitos gerais e específicos que o aditivo deve cumprir no compósito cimentício, sempre comparando uma mistura com e sem aditivo. Na parte 2, o usuário tem um guia de como realizar uma avaliação comparativa do desempenho do aditivo em função dos materiais disponíveis em cada região. E, finalmente, na parte 3, são definidos os critérios de como realizar ensaios físicos e químicos diretamente no aditivo.

Na prática, a NBR 11768 funciona como um balizador de qualidade e desempenho, dando segurança para engenheiros, construtores e centrais dosadoras. Ela garante que, apesar da enorme diversidade de produtos químicos, todos sejam avaliados sob critérios técnicos comuns, reduzindo riscos de incompatibilidade e falhas em obra.

IBRACON ESTA NORMA SUBSTITUIU A ANTIGA NORMA ABNT NBR 10908? O QUE MUDOU COM ESTA SUBSTITUIÇÃO?

| **ROGÉRIO VENÂNCIO** | A NBR 11768-3 cancela e substitui a

NBR 10908:2008, estabelecendo as aparelhagens, os materiais e os procedimentos necessários para a realização de ensaios físicos e químicos diretamente nos aditivos. Entre os ensaios de caracterização previstos estão a determinação de pH, teor de sólidos, massa específica, teor de cloretos e análise por infravermelho. Com base nesses procedimentos, o usuário intermediário ou final pode comprovar os valores informados pelo produtor nos certificados de análise, assegurando que o aditivo mantenha sua uniformidade, desempenho e inocuidade no compósito cimentício, além de garantir maior confiabilidade e segurança às estruturas e ao meio ambiente.

IBRACON QUANDO OCORRERÁ A REVISÃO DA NORMA ABNT NBR 11768 E, NA SUA AVALIAÇÃO, O QUE DEVE MUDAR NELA?

| **ROGÉRIO VENÂNCIO** | A última revisão da NBR 11768 ocorreu em 2019, substituindo a versão de 2011. Como a ABNT costuma revisar normas em ciclos de 5 a 10 anos, é razoável esperar uma nova atualização a partir deste ano. Além da inclusão de novos aditivos e da revisão dos métodos de ensaio, a próxima versão deve contemplar pontos atuais, tais como: integração digital, com requisitos para documentação eletrônica e interoperabilidade com sistemas de gêmeos digitais; sustentabilidade, com maior foco em aditivos que contribuam para a redução de emissões de CO₂, uso de cimentos alternativos e economia circular; compatibilidade avançada, com diretrizes mais detalhadas sobre a interação entre aditivos e diferentes tipos de cimentos com adições minerais; e



Concreto projetado para revestimento de túnel, tecnologia que se viabilizou a partir do desenvolvimento dos aditivos

monitoramento em tempo real, prevendo que fabricantes disponibilizem dados dinâmicos de desempenho, além das fichas técnicas tradicionais.

IBRACON A EVOLUÇÃO DAS NORMAS REFLETE UMA TENDÊNCIA MUNDIAL DE SEREM BASEADAS EM DESEMPENHO. EM SUA VISÃO, AS NORMAS BRASILEIRAS ESTÃO PREPARADAS PARA LIDAR COM ADITIVOS MULTIFUNCIONAIS QUE ATUAM SIMULTANEAMENTE NA REOLOGIA, NA CURA E NA DURABILIDADE A LONGO PRAZO?

| **ROGÉRIO VENÂNCIO** | Já não se trata apenas de aditivos multifuncionais, como se dizia no passado. Hoje, o termo mais adequado é aditivos disruptivos. A evolução das normas técnicas aponta para uma tendência mundial baseada em desempenho, o que traz à tona a questão sobre a capacidade das normas brasileiras de acompanhar e regulamentar esses novos aditivos disruptivos. A ABNT NBR 11768 já estabelece requisitos de desempenho para diferentes classes de aditivos, mas ainda de forma segmentada, ou seja, cada função é tratada isoladamente. Já, as normas complementares, como a ABNT NBR 15575 (Desempenho de Edificações) e documentos do IBRACON, trazem exigências de durabilidade e vida útil, mas não integram diretamente o papel dos aditivos disruptivos. No cenário internacional, a ASTM e EN já caminham para uma abordagem mais holística, considerando desempenho global do concreto (aspecto reológico, resistência, durabilidade e sustentabilidade).



NO CENÁRIO INTERNACIONAL, A ASTM E EN JÁ CAMINHAM PARA UMA ABORDAGEM MAIS HOLÍSTICA, CONSIDERANDO DESEMPENHO GLOBAL DO CONCRETO (ASPECTO REOLÓGICO, RESISTÊNCIA, DURABILIDADE E SUSTENTABILIDADE)





OS GÊMEOS DIGITAIS PERMITEM MONITORAR
EM TEMPO REAL A HIDRATAÇÃO, A RESISTÊNCIA
E O COMPORTAMENTO DO MATERIAL,
TRANSFORMANDO DECISÕES QUE ANTES
ERAM REATIVAS EM DECISÕES PREDITIVAS



Falta à normalização brasileira: reconhecer que um mesmo aditivo pode atuar em diferentes dimensões (ex.: PCEs que reduzem água, melhoram comportamento reológico e aumentam durabilidade); adotar critérios de desempenho combinados, criando parâmetros que avaliem o efeito global do aditivo no concreto, e não apenas em uma função isolada; e incorporar indicadores ambientais (EPDs/DAPs) e dados dinâmicos para alimentar gêmeos digitais e modelos probabilísticos de vida útil.

Os gêmeos digitais estão mudando a forma como entendemos e controlamos o concreto. Eles permitem monitorar em tempo real a hidratação, a resistência e o comportamento do material, transformando decisões que antes eram reativas em decisões preditivas. Isso reduz risco, aumenta a qualidade e melhora a eficiência da tecnologia do concreto.

Mas, o impacto vai além da operação: a normalização técnica também deve evoluir. Com dados contínuos, podemos migrar de normas prescritivas para normas baseadas em desempenho, incorporando curvas de maturidade, rastreabilidade digital e critérios dinâmicos, algo impossível na abordagem tradicional.

O terceiro ponto é a inovação. Os gêmeos digitais aceleram o desenvolvimento de novos aditivos e misturas porque permitem simular interações químicas, reologia e hidratação antes mesmo de fazer testes físicos. Isso encurta ciclos de P&D de anos para meses.

Em resumo: os gêmeos digitais conectam operação, normas e inovação, criando uma nova geração de concretos mais previsíveis, sustentáveis e tecnologicamente avançados.

IBRACON QUANDO A INDÚSTRIA DE ADITIVOS VAI APRESENTAR SUAS EPDs OU, EM PORTUGUÊS, SUAS DAPs? ATUALMENTE PORQUE NÃO SEGUEM AS RECOMENDAÇÕES DA NORMA ISO 14025 QUE TRATA DA SUSTENTABILIDADE?

| **ROGÉRIO VENÂNCIO** | A apresentação das EPDs (Environmental Product Declarations) ou DAPs (Declarações Ambientais de Produto) pela indústria de aditivos para concreto ainda é incipiente no Brasil. Embora já existam programas estruturados como o EPD Brasil, que integra o sistema internacional de declarações ambientais baseado na ISO 14025 e na EN 15804, a maioria dos fabricantes de aditivos ainda não disponibiliza suas DAPs. As razões para isso são:

- Complexidade técnica: elaborar uma DAP exige uma Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) completa, cobrindo desde a extração das matérias-primas até o descarte final. Isso demanda profissionais habilitados, além de dados detalhados e confiáveis, que muitas empresas ainda não têm sistematizados;
- Custos elevados: a certificação e verificação independente das DAPs envolvem custos significativos, o que desestimula empresas menores;
- Foco em outros segmentos: setores como aço e cimento já avançaram na publicação de EPDs, enquanto os aditivos ainda são vistos como insumos secundários, apesar de seu impacto ambiental relevante;
- Baixa pressão regulatória: no Brasil, ainda não há exigência normativa ou de mercado forte para que aditivos apresentem DAPs, diferentemente da Europa, onde certificações ambientais são requisitos para participação em obras públicas.

Nos próximos dois anos, é provável que grandes fabricantes globais de aditivos passem a disponibilizar DAPs no Brasil, alinhando-se às práticas internacionais. A própria revisão da ABNT NBR 11768 pode incluir requisitos de sustentabilidade, acelerando sua adoção no país.

IBRACON VOCÊ TEM PARTICIPADO DE VÁRIAS EDIÇÕES DO CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO COMO PALESTRANTE. QUAL É SUA VISÃO DO EVENTO E A ATUAÇÃO DO IBRACON NO SETOR CONSTRUTIVO BRASILEIRO?

| **ROGÉRIO VENÂNCIO** | O Congresso Brasileiro do Concreto é o principal evento científico de concreto da América Latina. Mais do que realizar pesquisas para o setor de concreto e cimento, sua missão é estruturar uma forma estratégica e eficiente de disseminar essas pesquisas e tecnologias para todos os profissionais envolvidos. Concreto, cimento e aditivos são elementos que aprendemos a valorizar e amar ao longo da nossa vida profissional. Divulgar e compartilhar esse conhecimento com as novas gerações é uma tarefa prazerosa, que nos enche de orgulho e motivação. O IBRACON cumpre esse papel ao integrar ciência, mercado e prática, fortalecendo a comunidade técnica e garantindo que o setor avance de forma consistente e sustentável.

IBRACON O QUE FAZ NOS SEUS TEMPOS LIVRES? QUAIS SEUS HOBBIES?

| **ROGÉRIO VENÂNCIO** | Desenvolver espiritualidade, andar de moto, ir em shows, participar de uma boa conversa com família/amigos e interagir com os pets. ☺

Impactos da incorporação de aditivos no desempenho do concreto industrializado

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

Hoje, o concreto industrializado no Brasil, além de cimento, brita, areia e água, componentes do concreto convencional virado em obra, que ainda perfaz quase 70% do mercado devido à venda a granel de cimento no país, traz mais um componente essencial para seu melhor desempenho: o aditivo. Sem falar em outros ingredientes, como as adições.

O aditivo é qualquer produto químico adicionado ao cimento, argamassa ou concreto para modificar suas propriedades no estado fresco ou endurecido, no sentido de melhor adequá-las às determinadas condições de aplicação. Seu uso no concreto no Brasil é atualmente normatizado pela ABNT NBR 11768:2019, que estabelece requisitos gerais e específicos para os aditivos e critérios para realização dos ensaios de caracterização.

Esta realidade de uso dos aditivos no concreto tem pouco mais de cinquenta anos no Brasil e apenas um século no mundo. “A meia dúzia de concreteiras existentes no país na década de 1970 pouco divulgavam o uso do aditivo, desconhecido pelos clientes”, informa o coordenador técnico da Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem (ABESC), Eng. Álvaro Barbosa. “Foi um trabalho de convencimento, tal como o feito para habituar as construtoras sobre os custos de rodar concreto em obra relativamente a comprá-lo pronto da concreteira, dosado e fresco”, completa.

Naquela época, os únicos aditivos disponíveis no mercado brasileiro eram os incorporadores de ar e os plastificantes. As construtoras envolvidas com as grandes obras de infraestrutura contribuíram para popularizar seu uso no Brasil.

Segundo Barbosa, o próprio Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON),



Imagem do primeiro pavimento de concreto com emprego de aditivo incorporador de ar sintético.
Fonte: Arquivo W. R. Grace (apud: ISAIA, 2011)

fundado em 1972, com suas reuniões técnicas, contribuiu para disseminar a tecnologia de aditivos no país. O vice-presidente do IBRACON, Prof. Paulo Helene, lembra que uma palestra do Mario Collepardi, professor da Universidade de Ciência de Roma, no Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT), ajudou a desmistificar o uso de aditivos no concreto na década de 1980.

ADITIVOS INCORPORADORES DE AR

Os aditivos incorporadores de ar foram desenvolvidos nas décadas de 1930 a 1950 nos Estados Unidos e no Canadá,

por exigências técnicas das autoridades rodoviárias desses países, que passaram a exigir concretos para pavimentos capazes de resistir aos ciclos de congelamento e descongelamento.

Percebeu-se que resinas vegetais e gorduras animais introduziam microbolhas de ar no concreto, que, quando endurecido, formavam espaços vazios, ocupados pela água congelada, sem tensionar o elemento estrutural, evitando sua fissuração e deslocamento. Adicionalmente, esses aditivos melhoravam a plasticidade do concreto no estado fresco, e consequentemente, sua moldabilidade,

o que facilitava seu transporte, lançamento, moldagem e acabamento.

No entanto, havia uma contrapartida. “Esses materiais introduziam bolhas de ar de forma não controlada no concreto”, indica o gerente de projeto e infraestrutura da Sika, Eng. Manfredo Belohuby.

Se são adicionadas muitas microbolhas, a microestrutura do concreto fica com mais vazios e a resistência à compressão cai. A correlação depende do teor de cimento na mistura: concretos com consumo de cimento abaixo de 250 kg/m^3 têm redução pouco significativa de sua resistência com a incorporação de ar; mas concretos com alto consumo de cimento têm redução de 10% ou mais de sua resistência final de compressão. Sendo assim, a incorporação deve ser suficiente para atender à trabalhabilidade adequada e à resistência necessária para resistir ao deslocamento e à fissuração do ciclo de gelo e degelo. É importante destacar que, diferentemente das microbolhas de ar introduzidas pelos aditivos, o aprisionamento de bolhas de ar no concreto (com tamanhos maiores que 1mm, em geral) não contribui de forma alguma para a resistência aos ciclos de congelamento e descongelamento.

Na sequência, a indústria da construção incorporou as primeiras moléculas surfactantes sintéticas desenvolvidas pela indústria de detergentes a partir de produtos petroquímicos. “Documentos industriais e normas da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) consolidaram o uso de detergentes sintéticos como agentes de incorporação de ar no concreto nas décadas de 1930 a 1950”, aponta Belohuby.

Nesta época, foram também incorporados ao concreto os lignossulfonatos, subprodutos baratos e abundantes da indústria de celulose, por sua ação plastificante. Esses primeiros aditivos plastificantes possibilitavam que fosse reduzido o consumo de água de amassamento no concreto, ao mesmo tempo que era mantida a trabalhabilidade do concreto fresco e a resistência mecânica do concreto endurecido.

No entanto, “havia a necessidade de aprimoramento e controle de produção dos aditivos, para que a demanda fosse atendida e a variação fosse mais previsível”, alerta Belohuby.

Foi somente nas décadas de 1950 e

1970 que pesquisadores ligados a *Portland Cement Association* (PCA) elucidaram os mecanismos físico-químicos de atuação dos aditivos incorporadores de ar e plastificantes no concreto, abrindo caminho para o desenvolvimento especificamente para o setor da construção civil.

Os incorporadores de ar geram microbolhas uniformemente distribuídas no concreto, com diâmetro médio menor que 0,3 mm, que atuam como microesferas compressíveis dispersas na pasta, na forma de uma película de ar entre 10 e 100 micrômetros. Essas microbolhas reduzem a tensão superficial da água, contribuindo para uma maior aderência entre partículas de água, cimentos e agregados, aumentando coesão interna da mistura e reduzindo a segregação e exsudação no concreto fresco. Além disso, as microbolhas de ar funcionam como um lubrificante, promovendo melhor compactação do concreto, especialmente na ausência de finos no traço de concreto.

Devido a esses benefícios técnicos, as construtoras brasileiras neste período passaram a usar os aditivos incorporadores de ar, “que se tornaram um ‘clássico’ e sucesso por décadas entre barrageiros”, exemplifica Belohuby.

Mais tarde, os aditivos incorporadores de ar foram também usados em argamassas ensacadas, grautes, concretos bombeados e projetados, concretos leves,

concretos celulares, ampliando seu espaço de aplicação.

Atualmente, seu uso no concreto é bastante limitado no Brasil, geralmente restrito ao mercado de argamassas ensacadas. “Também podem ser aplicados em concreto semiseco, na fabricação de blocos, pavers e outros artefatos cimentícios em geral, bem como em aplicações específicas, como concreto celular”, informa o diretor da ADCO, Eng. Ricardo Alencar.

ADITIVOS REDUTORES DE ÁGUA

Por sua vez, os plastificantes à base de lignossulfonatos são adsorvidos nas partículas de cimento em hidratação, impedindo que floculem e, por conseguinte, aprisionem a água em seu interior. Por liberarem a água de amassamento do concreto, torna-se possível diminuir seu consumo, mantendo, porém, a consistência e fluidez do concreto no estado fresco. Por isso, são chamados de aditivos redutores de água.

Devido à lei de Abrams, que estabelece uma correlação entre a relação água/cimento e a resistência à compressão do concreto, principal parâmetro do projeto de estruturas de concreto, os aditivos plastificantes de primeira geração, ao reduzir o consumo de água (de 5% a 10%), possibilitam concomitantemente reduzir o consumo de cimento, mantendo a resistência mecânica.

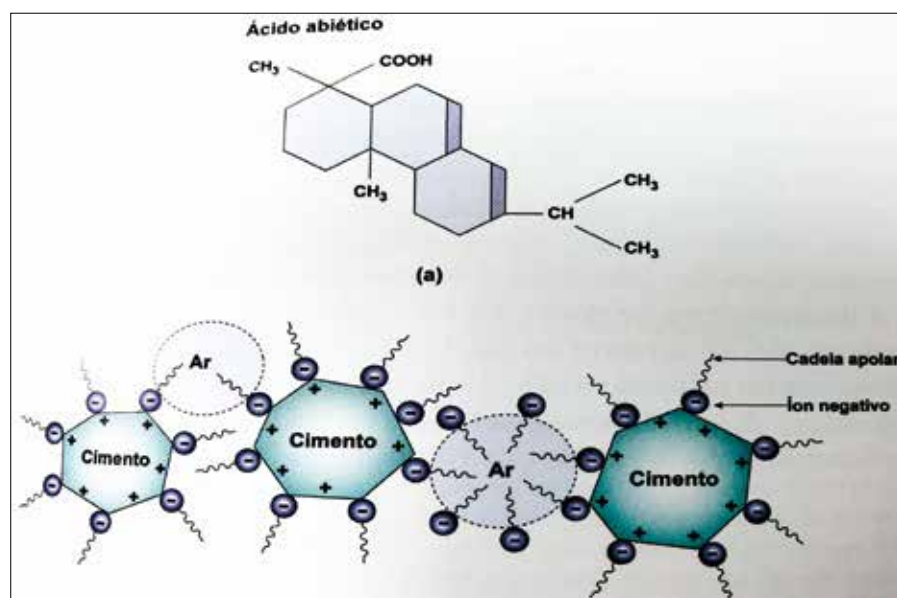


Ilustração da estrutura típica de um surfactante incorporador de ar derivado de óleo de pinho e de seu mecanismo de ação ao ser adicionado ao cimento. **Fonte:** Mehta e Monteiro (2014)

Barbosa explica este tipo de controle tecnológico antes e depois do advento dos aditivos plastificantes. “Para concretar uma peça, é necessário que o concreto fresco tenha certo abatimento. Sem os aditivos, o abatimento do concreto que chega no canteiro de obras é aumentado pela adição de mais água, o que requer adicionar mais cimento, para manter a relação água/cimento constante”. O abatimento é uma medida de assentamento do concreto, obtida por meio de um ensaio rápido e normatizado (ABNT NBR 16889:2020), indicativa de sua consistência e fluidez, que serve de controle de recebimento do concreto na obra ou laboratório.

“Com o aditivo plastificante, o abatimento do concreto que chega na obra passa a ser garantido, sem precisar adicionar água e cimento no canteiro”, completa.

Antes dos aditivos, a trabalhabilidade do concreto era obtida apenas pelo ajuste da água adicionada nele. Por isso, nesta época, eram comuns fatores água/cimento entre 0,55 e 0,70, bem como resistências à compressão entre 10 e 20 MPa. Segundo Belohuby, “esses concretos eram bastante segregáveis e de baixa durabilidade”. A segregação ocorre por falta de coesão entre os diferentes componentes da mistura, devido à tensão superficial da água, fazendo com que os agregados graúdos ocupem predominantemente a borda do concreto lançado, ao invés

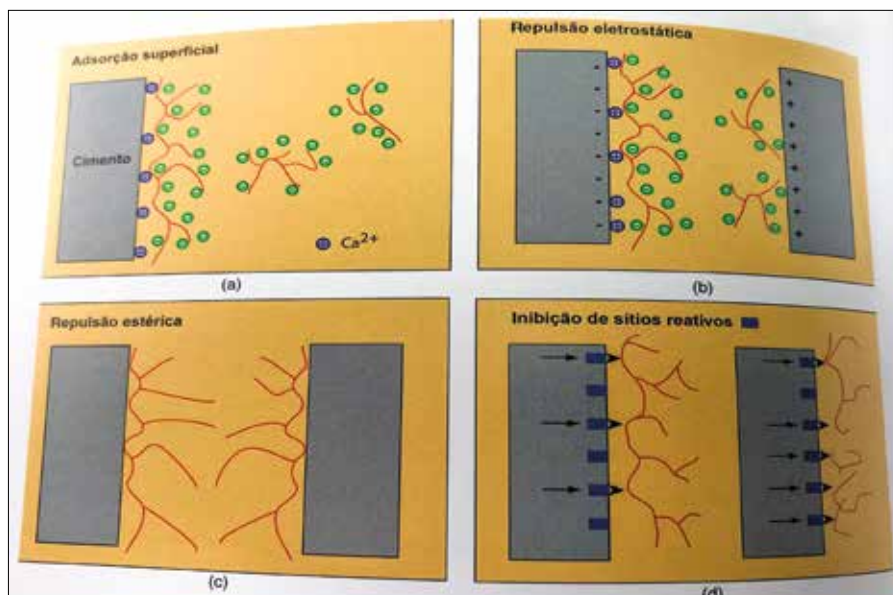


Ilustração esquemática de mecanismos por meio dos quais os plastificantes (a, b) e superplastificantes (c, d) podem dispersar partículas de cimento na mistura de concreto.

Fonte: Mehta e Monteiro (2014)

dos componentes estarem uniformemente distribuídos. Já, aumentar o fator água/cimento implica maior porosidade do concreto endurecido e, conseqüentemente, maior suscetibilidade à penetração de agentes agressivos ao concreto, como gás carbônico, cloretos e sulfatos, que deterioram o concreto.

Já, com o surgimento dos aditivos plastificantes de primeira geração, a relação água/cimento passou para ordem de 0,50

a 0,60 e as resistências alcançaram facilmente 20 a 30 MPa.

Além do ganho de desempenho do concreto com uso de lignosulfonatos, como a redução de água no concreto, com aumento de fluidez (trabalhabilidade) e da resistência à compressão, eles trouxeram redução de custos para as concreteiras, que passaram a usar menos cimento para uma mesma classe de resistência demandada pelos clientes. “Seu baixo custo justifica ainda seu uso em concreteiras pequenas, com poucos traços de concreto, geralmente para concretagem de casas”, adiciona Barbosa.

A segunda geração de aditivos, os condensados de formaldeído-sulfonatos de naftaleno (NSFC) ou melanina (MSFC), fez aumentar ainda mais a classe de resistência de concretos para a faixa de 40 a 50 MPa e reduzir os fatores a/c para a faixa entre 0,38 e 0,45. Com essas especificações de desempenho, os concretos bombeáveis tornaram-se o padrão na indústria da construção.

Por terem um poder de dispersão eletrostática mais forte, os aditivos de segunda geração passaram a ser conhecidos por superplastificantes. Com eles, tornou-se possível reduzir o consumo de água adicionada ao concreto de 15% a 25%.

Os primeiros NSFC foram desenvolvidos nos anos de 1930 por uma indús-



Ensaio de abatimento do tronco de cone, normatizado pela ABNT NBR 16889, para aferir trabalhabilidade do concreto.

Crédito: Banco de Imagens da ABCIC

tria alemã, chamada IG Farben, visando seu uso em couro, têxteis e borracha. Na década de 1960, no Japão, ocorreu a primeira aplicação dos naftalenos no concreto pela construtora Kao Corporation. Na sequência, o produto foi disseminado nas centrais de concreto japonesas e delas para todo o mundo. Na década de 1990, a tecnologia já estava disseminada no Brasil.

Os superplastificantes vieram atender a demanda por concretos de maiores resistências para serem usados em edifícios altos e pontes de grandes vãos, bem como concretos mais fluidos, para serem usados estruturas altamente armadas. “Em peças com geometrias complexas ou com elevada taxa de armadura, concretos com elevada fluidez, sem aumento do teor de água, de modo a manter baixo o fator água/cimento, é determinante para garantir o preenchimento adequado e a redução de falhas de concretagem”, exemplifica a presidente-executiva da Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto, Eng^a Íria Doniak.

O Brasil acompanhou essa evolução mundial da engenharia de projetos demandando estruturas cada vez mais altas, esbeltas e complexas. “A evolução concomitante entre engenharia de projeto, de concreto e de aditivos no país é vista por meio das sucessivas mudanças normativas ocorrida no âmbito da Associação Brasileira de Normas Técnicas, em especial da norma de projeto de estruturas de concreto – a ABNT NBR 6118”, argumenta Barbosa.

A terceira geração de aditivos começou a ser usada na Europa na década de 1980 e representou um salto extraordinário em termos de redução de água no concreto, de eficiência de dispersão das partículas de cimento hidratado, de versatilidade de uso e de controle de comportamento reológico do concreto. No Brasil, os superplastificantes com policarboxilatos (PCE) aportaram nos anos 2000.

Com redução de água superior a 30%, o fator a/c dos concretos produzidos com aditivos superplastificantes com policarboxilatos caiu para a faixa de 0,25 a 0,40, podendo chegar até 0,20 nos concretos de ultra-alto desempenho (UHPC). Por sua vez, as resistências típicas desses concretos passaram a ser de 50 a 70 MPa, podendo atingir 100 MPa em concretos especiais e 200 MPa nos UHPC.

Os aditivos com policarboxilatos atuam por meio de dois mecanismos físico-químicos: a repulsão eletrostática, comum aos aditivos plastificantes de primeira e segunda geração, e a ação estérica – suas longas e numerosas cadeias laterais não permitem que as partículas de cimento hidratado se aglutinem até serem completamente cobertas pelos produtos de hidratação do cimento. As dispersões estérica e eletrostática fazem a redução de água atingir o máximo limite possível para o estado atual de conhecimento da química do concreto. “Superar essa versatilidade exige avanços químicos muito além dos já dominados, somados a uma combinação de barreiras técnicas, científicas, econômicas e regulatórias identificadas nos estudos mais recentes”, esclarece o diretor técnico da Saint-Gobain, Eng. Rogério Venâncio.

Para além da altíssima eficiência de dispersão das partículas de cimento, os aditivos de terceira geração são engenheirados para melhor se compatibilizarem com os tipos de cimento e de agregado.

Devido à enorme variedade das matérias-primas que entram na composição do concreto, principalmente dos cimentos, que passaram a admitir em sua fabricação escórias de alto forno, cinzas volantes, fíler calcário, entre outros subprodutos de diferentes processos industriais, o aditivo tinha, por vezes, efeitos adversos inesp-

rados, como, por exemplo, a perda muito rápida da trabalhabilidade do concreto fresco. Isto é, apesar de o aditivo ser adicionado no concreto para garantir o abatimento especificado no projeto, este poderia ser perdido mais rapidamente que o desejável pelo pessoal do canteiro de obras. Como resultado: o bombeamento tornava-se mais dificultoso e o cronograma da obra atrasava porque problemas de bombeamento e endurecimento precoce do concreto impactava o ritmo de execução. No limite, lotes inteiros de concreto eram descartados, aumentando custos e desperdícios relativos à obra. Sem falar no tipo de incompatibilidade que ocasionava uma resistência final abaixo do esperado pelo projeto da obra, que requeria reforços estruturais e podia comprometer a durabilidade da estrutura.

Esse cenário começou a melhorar com a introdução da terceira geração de aditivos plastificantes. “A grande novidade dos policarboxilatos é que se passou de matérias-primas e subprodutos utilizados em outras indústrias para a produção de aditivos específicos para serem aplicados ao concreto”, explica Belohuby.

Como a interação dos aditivos, cimentos e agregados ocorre em escala molecular, mínimas alterações nas características físicas e químicas desses componentes afetam o desempenho do concreto. No entanto, “as moléculas dos



Concreto de ultra-alto desempenho usado na produção de bases de apoio de segmentos de ímãs do acelerador Sirius.

Fonte: Altheman *et al.* (2023)



Vista geral da concretagem do bloco de fundação com concreto bombeável.
Fonte: Funahashi Jr et al. (2023)

policarboxilatos podem ser desenhadas e produzidas de forma específica para compensar essas variações nas composições do concreto”, completa.

As moléculas de policarboxilatos podem ser modificadas pela indústria de aditivos para atender demandas específicas, como obter concreto de alta resistência por meio de baixa relação a/c, ou produzir concreto que mantenha o abatimento por mais de quatro horas para contornar complicações logísticas de transporte e concretagem. Doniak exemplifica mais uma demanda atendida pelos PCE: “Na indústria de pré-fabricação, moldes têm alto custo, o espaço fabril é limitado e cada hora improdutiva impacta diretamente o resultado financeiro. Nesse contexto, controlar o comportamento do concreto não é apenas uma questão técnica, mas também uma necessidade operacional”. Os aditivos à base de PCE possibilitaram o desenvolvimento de concreto autoadensáveis, isto é, concretos que dispensam adensamento externo, preenchendo e se compactando nas fôrmas pelo peso próprio. “Os CAA foram introduzidos no Brasil em meados de 2007 e, atualmente, são realidade predominante na indústria brasileira de pré-fabricados”, complementa Alencar.

Essa customização dos aditivos para o setor construtivo ocasionou uma verdadeira revolução nos concretos, que se diversificaram para muito além do concreto convencional mais resistente, como o concreto de alto desempenho (CAD), de alta resistência (CAR), de ultra-alto desempenho (UHPC) e o concreto autoadensável (CAA). Doniak aponta a revolução dentro da construção industrializada: “CAD e UHPC são fundamentais para que tenhamos peças mais esbeltas, o que

impacta significativamente custos logísticos, como transporte, içamento e montagem, ao reduzir o peso dos elementos”. O CAA impacta diretamente o ritmo de produção dentro da indústria da construção, ao agilizar o lançamento, dispensar



Fachadas pré-fabricadas do Almirante Green Residence, em Porto Alegre, cujo acabamento foi facilitado pelo uso de aditivos no concreto.

Crédito: Banco de Imagens da ABCIC

o adensamento e minimizar o acabamento da peça e, com isso, diminuir número de operários necessários na execução e o cronograma da obra.

Do ponto de vista econômico, apesar de representarem custo adicional por metro cúbico de concreto, os aditivos tendem a gerar economia global. “A possibilidade de reduzir o consumo de cimento, diminuir retrabalhos, evitar perdas, melhorar acabamento e ampliar a produtividade compensa amplamente o investimento inicial”, argumenta Doniak.

“São evidentemente produtos de custo mais elevado, mas que se tornarão cada vez mais indispensáveis para a indústria da construção, em função da crescente pressão pela diminuição de consumo de cimento, de maiores resistências para diminuir volume de peças e estruturas, bem como a necessidade de redução de consumo de água, um bem vital cada vez mais escasso”, aponta Belohuby.

Hoje, é comum os fabricantes de aditivos procurarem as concreteiras para fazer testes de desempenho, cruzando linhas de produtos com cartas de traços. Para Barbosa, esse desenvolvimento tecnológico seria mais estimulado no Brasil, se a informação integral de projeto chegasse à concreteira. Isto porque, em geral a concreteira produz o concreto com base apenas em informações básicas de projeto, como resistência à compressão e abatimento. No entanto, as concreteiras associadas a ABESC podem produzir traços mais customizados aos projetos de seus clientes, contribuindo, assim, com o desenvolvimento tecnológico do concreto e dos aditivos. “Falta, na verdade, mais união e diálogo na cadeia da construção”, diagnostica.



Edifício Quadria, em São José dos Campos, cujos painéis de fachada, regulares e bem acabados, usam aditivos para sua produção.
Crédito: Banco de Imagens da ABCIC

ADITIVOS MODIFICADORES DE PEGA, DE CURA, REDUTORES DE RETRAÇÃO E INTELIGENTES

O desenvolvimento dos aditivos buscou essa tendência de customização de sua aplicação no concreto. Na sequência, apareceram os aditivos modificadores de pega, que, ao invés de atuarem no abatimento do concreto, agem nos processos químicos que governam sua pega, isto é, sua capacidade de endurecer progressivamente.

Os aditivos retardadores de pega, devido à sua composição química, estendem a janela de pega do concreto, isto é, o tempo para que o concreto comece a endurecer. Eles são usados, por exemplo, em concretos lançados no verão ou em regiões quentes, que aceleram as reações de hidratação do cimento e, por conseguinte, diminuem o tempo de pega. O mecanismo de atuação é químico, de modo que varia conforme eles sejam compostos por hidroxicarboxílicos, lignossulfonatos, glicóis ou açúcares modificados. Eles são adicionados ao concreto para que se possa fazer a concretagem, o adensamento e o acabamento num período mais adequado à execução.

Uma linha especial de aditivos retardadores de pega são os estabilizadores de hidratação, capazes de 'pausar' quimicamente a hidratação do cimento por horas ou dias. Recomendados para concretos que precisarão ficar por muitas horas e dias esperando o momento oportuno de

lançamento, como é o caso de obras subterrâneas, onde o acesso ao local de concretagem é difícil. Outro uso recorrente é nas sobras dos caminhões betoneira, para seu reaproveitamento, integrando-o novamente à produção, num tipo de economia circular adotada por algumas empresas.

"Quando o processo de pega é retardado, a estrutura interna do concreto fica por mais tempo sem rigidez, com porosidade mais aberta. Isso faz com que mais água possa evaporar antes da formação do gel C-S-H e, consequentemente, haja maior deformação autógena, por secagem ou plástica", alerta Belohuby.

Ao contrário, os aditivos aceleradores de pega diminuem a janela de desenvolvimento de resistência do concreto, acelerando a taxa de hidratação do cimento. São empregados em concretos que precisam ser desformados em poucos dias, para garantir a produtividade do processo de produção, como na indústria de pré-fabricados, ou em concretos para pavimentos, cujo acabamento final ocorre apenas quando certa resistência mecânica é atingida. "A necessidade de desformar conforme o ciclo da indústria, liberando uma peça pretendida, por exemplo, com 24 horas, requer atender à recomendação da ABNT NBR 9062 de o concreto atingir 21 MPa", exemplifica Doniak.

Hoje existem no mercado, diversas opções de aditivos para cumprir diferentes requisitos, tais como: aditivos inibidores de

corrosão (que agem para deter a reação de corrosão das armaduras no concreto, repassando quimicamente a zona em torno do metal); aditivos redutores de retração (reduzem a tensão superficial da água nos poros da microestrutura do concreto e, assim, são capazes de reduzir a retração por secagem entre 25% e 50%); aditivos modificadores de viscosidade (reduzem a segregação e exsudação do concreto fresco, ao aumentar a coesão e viscosidade do concreto fresco); aditivos redutores de reação álcali-agregado (mitigam a reação entre os álcalis do cimento e os agregados reativos no concreto); e aditivos de autocura (microcápsulas de polímeros ou bactérias específicas que reagem, em contato com a água, formando uma substância que preenche microfissuras no concreto, prolongando sua vida útil).

"O resultado dessa combinação tecnológica é a obtenção de concretos cada vez mais densificados, com excelente comportamento reológico e apresentando reduções significativas de emissões de CO₂ equivalente e de consumo de água por metro cúbico", resume Venâncio. A ABNT NBR 6118:2023 Projeto de Estruturas de Concreto vem, desde sua primeira versão, em 1940, acompanhando essa evolução.

"Mais do que melhorar o concreto, os aditivos ajudam a transformar o processo construtivo em um sistema industrial eficiente e tecnologicamente avançado", finaliza Doniak. ☺

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Tutikian, B.; Pacheco, F.; Isaia, G.; Battagin, I. Concreto: Ciência e Tecnologia. IBRACON: São Paulo, 2011 e 2022;
- [2] Mehta, P.K.; Monteiro, P.J.M. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. IBRACON: São Paulo, 2014.
- [3] Revista CONCRETO & Construções eds. 109 e 112. IBRACON: São Paulo, 2023

SILICA FLOW[®] 40

SÍLICA LÍQUIDA MAIS FLUÍDA E ESTÁVEL

Benefícios Técnicos

(Equivalentes aos da sílica em pó)

- Mitigação das reações álcali-agregado (RAA)
- Aumento das resistências mecânicas
- Incremento da durabilidade do concreto
- Melhoria da reologia do concreto fresco e aumento da coesão da mistura
- Redução do calor de hidratação

Vantagens Operacionais e técnicas

- Redução de investimento em infraestrutura
- Utiliza os mesmos tanques e bombas empregados para aditivos líquidos, com sistema de reciclo.
- Melhor dispersão na mistura
- Desempenho superior em relação às sílicas adensadas, garantindo melhor homogeneização e potencializando os resultados técnicos.
- Maior estabilidade e fluidez
- Superior ao padrão das sílicas líquidas disponíveis no mercado,
- Facilita a dosagem e reduz o risco de sedimentação.

Segurança e Saúde Ocupacional

- Elimina geração de pó na central de concreto
- Evita insalubridade aos operadores
- Reduz riscos de passivos trabalhistas

Sustentabilidade

- Não gera poeira no ambiente produtivo
- Contribui para um processo mais limpo e ambientalmente responsável



www.adco.com.br



Aditivos que
fortalecem um futuro
mais concreto



(11) 93060-1379

Piscina de Ondas em Estrutura Pré-Fabricada de Concreto

LUIS ANDRÉ TOMAZONI - DIR. — CASSOL Pré-fabricados
RICARDO ALENCAR - DIR. — ADCO Aditivos

1. O DESAFIO

O complexo esportivo e de lazer BSC Aretê Búzios, em Búzios (RJ), na região dos Lagos do Rio de Janeiro, contará com a maior piscina de ondas do Hemisfério Sul (Figura 1)! Com inauguração prevista para o 2º semestre de 2026, o complexo apresenta tecnologia de ponta Endless Surf, capaz de gerar ondas personalizadas e de diferentes tamanhos.

O projeto para a criação das ondas é bastante ousado, apresentando estruturas com tipologia na forma de arcos de grande proporção, aliado à necessidade de uma maior precisão construtiva, durabilidade e menor manutenção. Isso, aliado ao prazo exíguo para execução da obra, fez com que se optasse por industrializar a parte mais complexa da estrutura, ao invés da concretagem *in loco*.

A utilização de sistemas pré-fabricados em obras especiais já não é novidade — por exemplo, em projetos de infraestrutura — e hoje não se restringe às tradicionais obras industriais, comerciais e logísticas [1].

Para esse desafio, a CASSOL Pré-fabricados desenvolveu o projeto estrutural para o sistema pré-fabricado de forma precursora para este tipo de obra no Brasil. A industrialização ocorreu em sua unidade de Seropédica (RJ).

2. DO PROJETO ATÉ À CONCEPÇÃO DO SISTEMA DE FÔRMAS PRÉ-FABRICADAS

Um grande desafio residia no projeto e desenvolvimento das fôrmas, as quais foram concebidas para atender simultaneamente e de maneira integrada todas as etapas do “ciclo de vida” dos elementos pré-fabricados, desde o posicionamento e fixação das armaduras, concretagem, desmoldagem, movimentação interna, até o transporte à obra e posterior montagem.



FIGURA 1

VISTA GERAL DO COMPLEXO ESPORTIVO E DE LAZER BSC ARETÊ BÚZIOS, EM BÚZIOS-RJ

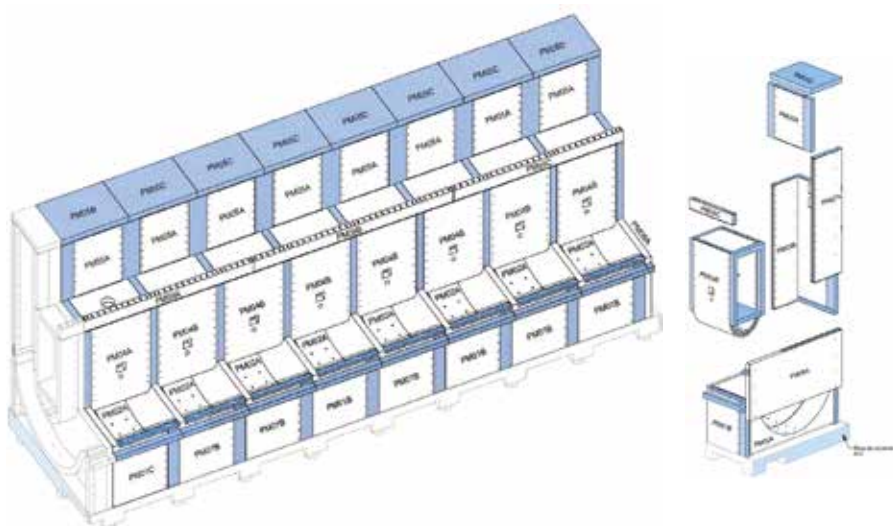


FIGURA 2

MÓDULOS PRÉ-FABRICADOS: A. PERSPECTIVA E B. VISTA EXPLODIDA

A estrutura pré-fabricada é composta por 48 elementos agrupados em módulos, num total de 2.700 m³, conforme demonstrado na Figura 2. As hachuras, em destaque no azul, indicam as regiões de solidarização dos concretos e grautes entre os elementos pré-fabricados, e a concretagem *in loco* (na obra).

Em função da tipologia estrutural dos elementos, caracterizada por geometrias não convencionais, com existência de elementos em arco, múltiplas interfaces de acoplamento e armaduras complexas, o projeto das fôrmas demandou soluções específicas para garantir não apenas a conformidade geométrica e o acabamento superficial de alta qualidade das peças, mas também a repetibilidade dimensional entre os elementos estruturais, característicos do sistema pré-fabricado de concreto (Figura 3).

A elevada precisão exigida para o sucesso do empreendimento impôs tolerâncias rigorosas às fôrmas, especialmente nas regiões de bainhas, inserts, armaduras de acoplamento e interfaces de solidarização entre peças. Qualquer imprecisão acumulada nessa etapa poderia comprometer o alinhamento, a estabilidade durante a montagem e o desempenho estrutural final do conjunto.

Além disso, o processo de desmoldagem e movimentação das peças requereu que as fôrmas fossem projetadas de modo a minimizar esforços indesejados nos elementos recém-concretados, evitando fissuração, deformações permanentes ou danos localizados. O projeto precisou ainda considerar os pontos de içamento, centros de gravidade variáveis e as condições transitórias de manuseio, assegurando a integridade estrutural das peças ao longo de todas as fases operacionais (Figura 4 e Figura 5).

Por fim, a concepção das fôrmas precisou estar diretamente alinhada com a estratégia de montagem em campo, garantindo que as interfaces, tolerâncias e sistemas de acoplamento permitissem uma execução precisa, segura e eficiente, condição essencial para o desempenho adequado da casa



FIGURA 3

SISTEMA DE FÔRMAS COM ARMADURAS POSICIONADAS PARA ELEMENTOS PRÉ-FABRICADOS EM FORMA DE ARCO (16 T)

de máquinas e para o funcionamento confiável dos sistemas geradores de ondas.

Toda etapa de fabricação aconteceu entre julho e dezembro de 2025.

3. DOSAGEM DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL

Para atender a uma demanda exigente de qualidade, foi desenvolvido um criterioso estudo de dosagem de



FIGURA 4

DESFORMA COM SEQUENCIAL ACOMODAÇÃO DE PEÇAS EM CAIXA DE AREIA



FIGURA 5

MOVIMENTAÇÃO DAS PEÇAS DENTRO DA PLANTA DE PRÉ-FABRICADOS

concreto autoadensável (Tabela 1), com as seguintes características no estado fresco [2]:

- ▶ **Alta fluidez:** classe SF2, *slump-flow* entre 660 mm e 750 mm, devido à complexidade geométrica dos elementos estruturais;
- ▶ **Baixa viscosidade plástica aparente:** classe VS1 ($t_{500} \leq 2s$) e VF1 (funil-V $\leq 9s$), para facilitar o escape do ar incorporado na moldagem, melhorando o acabamento da superfície e minimizando o aparecimento de bolhas;
- ▶ **Alta habilidade passante por entre armaduras:** classe PL2, com $H2/H1 \geq 0,8$ (caixa-L);
- ▶ **Alta resistência à segregação:** classe SR2 ($\leq 10\%$), minimizando os efeitos da trepidação que o concreto sofre em caçamba no transporte da central à fôrma.

Para isso, a escolha do aditivo superplastificante, redutor de água tipo 2 (RA2) [3], ADCO MixFLOW® 6405, a base de policarboxilatos (PCE) que combina moléculas de maior cadeia principal, para potencializar o corte de água, com moléculas de cadeia lateral mais longa, para aumentar o tempo de manutenção de trabalhabilidade [4], foi fundamental, não apenas para assegurar

as características de autoadensabilidade requeridas, diante de temperaturas mais elevadas e eventuais interrupções operacionais que poderiam atrasar a aplicação, mas também para atender a uma elevada resistência inicial ($f_{cj}^{24hs} \geq 35$ MPa).

Além disso, para garantir uma adequada robustez na aplicação do CAA, mantendo as características de coesão do concreto fresco, sem ocorrência de segregação ou exsudação, foi realizada a adição de uma superpozolana líquida: ADCO SilicaFLOW® 40. Classificada como sílica ativa na forma de dispersão aquosa [4], com os mesmos benefícios da sílica em pó quanto a: mitigação das reações álcali-agregado (RAA), aumento das resistências mecânicas, incremento da durabilidade, melhoria na reologia do concreto fresco, aumento da coesão, redução

do calor de hidratação e agregando as seguintes vantagens técnicas:

- ▶ Melhora a dispersão da mistura, sobretudo comparado às sílicas adensadas, potencializando, assim, os resultados técnicos;
- ▶ Evita a insalubridade dos operadores e problemas trabalhistas decorrentes;
- ▶ Contribui positivamente ao meio ambiente, por não gerar pó na central de concreto;
- ▶ Reduz investimento em tanques e bombas, que são iguais aos dos aditivos, com sistema de reciclo, devido à sua característica mais fluída (menos viscosa) e estável, comparada ao padrão de sílica líquida de mercado que necessita de tanques especiais com misturador.

Por se tratar de uma suspensão com 40% de sólidos de sílica de alto desempenho dispersa em 60% de água com aditivos químicos, para conferir sua estabilidade e performance, no cálculo do fator água/aglomerante, deve-se somar 40% da suspensão (parte sólida) com o cimento como aglomerante e os demais 60% (parte líquida) ao total de água.

Já, o Penetron Admix®, impermeabilizante por cristalização, entrou na composição, além da baixa relação água/aglomerantes e uso da sílica, para incrementar ainda mais a durabilidade, tornando o concreto menos permeável contra água e agentes químicos agressivos, além de permitir sua autocicatrização, importantíssimo para este tipo de estruturas de difícil acesso para manutenção.

TABELA 1

CONSUMO DOS MATERIAIS (KG/M³) PARA CAA f_{ck} 50

Traço	Unitário	kg/m³
CPV ARI	0,98	438
ADCO SilicaFLOW 40 (1)	0,02	23
Areia natural	1,38	619
Areia artificial	0,59	265
B0	1,29	577
B1	0,55	247
Água		200
ADCO MixFLOW 6405	1,09%	4,9
Penetron Admix	0,85%	3,8
Ar incorporado	1,80%	
Massa específica (kg/dm³)		2.378



FIGURA 6

CONCRETAGEM DE ELEMENTO “TIPO U”. A. VISTA GERAL. B. DETALHE DO CONCRETO

4. PRODUÇÃO DOS ELEMENTOS PRÉ-FABRICADOS

A homogeneização do concreto foi realizada em misturador de eixo horizontal (1,5 m³ de capacidade), mais eficiente comparado ao tradicional processo de mistura (por tombamento em betoneira de eixo inclinado) e, logo após, lançado sobre caçamba, de mesma capacidade, evitando tempo de espera entre misturas sucessivas para preenchimento total da caçamba, e, então, transportado até à ponte rolante que leva a fôrma.

A peça de maior complexidade foi a em forma de arco de 16 t (Figura 6), onde a fôrma foi concebida de forma invertida (em relação à posição de montagem na obra) para favorecer o escape do ar aprisionado na concretagem e potencializar o acabamento, justamente na área de formação das ondas.

Além disso, o controle de qualidade foi rígido na correção da umidade das areias, que foi realizada três vezes ao dia e sempre após a entrega de novo lote na fábrica,

bem como na verificação do espalhamento (*slump-flow*) e análise visual da estabilidade em todas as misturas (IEV), de modo a evitar qualquer exsudação.

5. MONTAGEM EM OBRA

A expedição das peças iniciou em outubro de 2025 e se encontrava em fase final de montagem em janeiro de 2026.

Na montagem da estrutura pré-fabricada, o principal desafio foi o controle rigoroso das tolerâncias geométricas e posicionais nas interfaces entre os elementos estruturais. A conexão das bainhas das primeiras peças à fundação requereu elevada precisão, uma vez que a interação entre múltiplas armações de espera e as bainhas incorporadas aos elementos pré-fabricados impõe tolerâncias extremamente restritas. Pequenos desvios acumulados nessa fase inicial podem resultar em desalinhamentos progressivos, comprometendo a montagem sequencial e a conformidade geométrica global da estrutura.

Diante desse cenário, tornou-se imprescindível gabaritar criteriosamente as ligações, bem como o controle dimensional da concretagem *in loco* (Figura 7). Esse procedimento visou assegurar a compatibilidade geométrica entre fundações, elementos pré-fabricados e sistemas de conexão, minimizando riscos de interferências, tensões não previstas e necessidade de ajustes corretivos em obra.



FIGURA 7

VISTA GERAL DA OBRA EM CONCRETAGEM NOTURNA



FIGURA 8

TRANSPORTE DE ELEMENTO PRÉ-FABRICADO NA OBRA



FIGURA 9

VISTA AÉREA DA MONTAGEM DOS MÓDULOS PRÉ-FABRICADOS

Outro aspecto crítico refere-se à estabilidade provisória dos elementos durante a fase de montagem (Figura 8). Em função das tipologias, geometrias e esbeltezes específicas das peças pré-fabricadas, fez-se necessária a concepção de sistemas de escoramento, travamento e apoio provisório individualizados para cada tipologia estrutural. Essas soluções foram dimensionadas para as ações transitórias de montagem, garantindo a estabilidade global e local dos elementos até a conclusão da etapa de solidarização estrutural.

A solidarização entre os elementos estruturais demandou o emprego de concretos e grautes de desempenho específico, desenvolvidos para atender simultaneamente aos requisitos de fluidez,

resistência mecânica, aderência às interfaces e controle de retrações. A execução dessa etapa exigiu rigoroso controle tecnológico, de modo a evitar manifestações patológicas associadas a falhas de preenchimento, segregação ou descontinuidade do material, além de assegurar a integridade estrutural, a durabilidade e a estanqueidade do sistema, condição crítica para a operação da casa de máquinas (Figura 9).

Adicionalmente, o acompanhamento topográfico sistemático ao longo de todas as fases de montagem foi condição indispensável para o controle dimensional da estrutura. O monitoramento contínuo de prumo, alinhamento, cotas e posicionamento relativo dos elementos garante a confor-

midade geométrica do conjunto, requisito essencial para o correto funcionamento dos equipamentos geradores de ondas, cuja eficiência e confiabilidade operacionais são diretamente dependentes da precisão geométrica da estrutura civil que os abriga.

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Carlos Britez, diretor da Britez Consultoria, responsável da consultoria em concreto; ao Eng. Walter Nascimento, supervisor de produção da CASSOL; ao Eng. João Batista da Silveira Filho, gerente de projeto da CASSOL; ao Eng. Thiago Dias Santiago, montagem da CASSOL e ao Tec. Hailton Gouveia, consultor de pré-moldados da ADCO Aditivos. ☺

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ROVARIS; Gustavo; ALENCAR, Ricardo. Megavigas pré-fabricadas: projeto, tecnologia do CAA, produção e montagem em obra. p. 35-45. Artigo, In: Revista Concreto & Construções. IBRACON, n. 72, ano XLI, Out-Dez. 2013. ISSN: 18097197;
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Concreto autoadensável - Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco. NBR 15823. Rio de Janeiro, 2017;
- [3] _____. (ABNT). Aditivos químico para concreto de cimento Portland. NBR 11768. Rio de Janeiro, 2019;
- [4] Yamada, K.; Takahashi, T.; Hanehara, S.; Matsuhisa, M. Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer. In: Cement and Concrete Research, p.197-206, 2000;
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Silica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. NBR 13956. Rio de Janeiro, 2012.

A influência da aplicação de aditivo contendo **nanopartículas de sílica** na durabilidade do concreto

DIOGO AUGUSTO DA SILVA DE ASSIS - DR., RESP. TÉC. - (diogo.augusto@nextchemical.com.br) ;

RAYSSA PEREIRA DE JESUS - ANALISTA DE P&D ;

ANNE ELIZE PUPPI STANISLAWCZUK - DIR. GERAL ;

CAMILA MATIOSKI DE SOUZA - QUIM. - Next Química

RESUMO

A CORROSÃO DAS ARMADURAS DE AÇO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO É FAVORECIDA PELA PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO, RELACIONADA À POROSIDADE DO MATERIAL. A INCORPORAÇÃO DE NANOMATERIAIS AO CONCRETO MODIFICA SUA MICROESTRUTURA, REDUZINDO A INTERCONECTIVIDADE DOS POROS E AUMENTANDO A DURABILIDADE. ENTRE ELES, DESTACAM-SE AS NANOSSÍLICAS (nSiO_2). ESTE ESTUDO AVALIOU A INFLUÊNCIA DE UM ADITIVO À BASE DE nSiO_2 COMBINADO COM POLÍMEROS HIDROFÍLICOS NA DURABILIDADE DO CONCRETO. FORAM INVESTIGADOS EFEITOS DE DIFERENTES TEORES SOBRE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, MIGRAÇÃO E PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO E ABSORÇÃO DE ÁGUA. ENSAIOS EXPERIMENTAIS MOSTRARAM QUE A nSiO_2 REFINOU A MICROESTRUTURA, REDUZINDO A POROSIDADE E AUMENTANDO A DENSIDADE DO COMPOSITO. OBSERVOU-SE REDUÇÃO DE ATÉ 10% NA ABSORÇÃO DE ÁGUA E MITIGAÇÃO DE ATÉ 18% NA MIGRAÇÃO DE CLORETOS EM COMPARAÇÃO AO CONCRETO CONTROLE. OS RESULTADOS INDICAM QUE O ADITIVO É UMA SOLUÇÃO PROMISSORA PARA MELHORAR A DURABILIDADE DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO EXPOSTAS A AMBIENTES AGRESSIVOS.

PALAVRAS-CHAVE: NANOPARTÍCULAS DE SÍLICA, ADITIVO, CONCRETO, DURABILIDADE.

1. INTRODUÇÃO

O concreto é considerado o material de construção mais empregado no mundo, combinando características desejáveis como resistência mecânica, bom custo-benefício e longo período de vida útil. O mercado global de concreto e cimento deve atingir US\$ 991,98 bilhões até 2032, com uma taxa de crescimento anual composta de 28,65%. Esses mercados podem ser analisados de

forma conjunta, uma vez que o concreto está diretamente relacionado ao elevado consumo de cimento (SANTOS *et al.*, 2025). Esse insucesso é responsável por uma das maiores pegadas de carbono da indústria brasileira, sobretudo devido à emissão de grandes volumes de dióxido de carbono (CO_2), contribuindo significativamente para o efeito estufa global. Em 2024, o mercado global de cimento foi estimado em 4,39 bilhões de toneladas, com previsão de crescimento para 5,96 bilhões de toneladas até 2030 (FORTUNE BUSINESS INSIGHTS, 2024).

Diante desse cenário, a redução do consumo de cimento no concreto torna-se uma necessidade premente para a sustentabilidade ambiental, especialmente no Brasil, país que tem demonstrado interesse e potencial para se destacar como uma potência ecológica mundial. A busca por alternativas que promovam a diminuição do uso de cimento, sem comprometer as propriedades mecânicas e a durabilidade do concreto, é, portanto, de grande interesse científico e tecnológico (TANIMOLA; EFE, 2024).

Diversas alternativas vêm sendo investigadas, como o uso de materiais reciclados da construção civil, materiais oriundos de coprocessamento na produção de cimento e a substituição de agregados convencionais. Entretanto, de maneira geral, essas estratégias podem impactar negativamente a resistência mecânica e a durabilidade do concreto. Nesse contexto, a incorporação de nanopartículas ao concreto apresenta-se como uma estratégia promissora para mitigar possíveis prejuízos à qualidade do material. Essas nanoestruturas podem aprimorar propriedades mecânicas, prevenir ou retardar o desenvol-

vimento de manifestações patológicas e, em alguns casos, reduzir o consumo de cimento, resultando em um material mais durável e com menor impacto ambiental. Todavia, a adição de nanoestruturas em composições cimentícias impõe variáveis adicionais que influenciam o sucesso da aplicação, como dispersão, compatibilidade e método de incorporação (PEREIRA; OLIVEIRA; CASCUDO, 2023). Assim, torna-se essencial compreender detalhadamente os mecanismos de atuação das diferentes nanopartículas no concreto, bem como suas contribuições específicas para a performance do material, considerando as tecnologias já aplicadas em larga escala (MORDOR INTELLIGENCE, 2024; OBSERVATÓRIO CIENTÍFICO, 2025).

Atualmente, diversos tipos de partículas de sílica são aplicados ao concreto, como sílica ativa, e sílica coloidal, caracterizadas por diferentes tamanhos de partículas e propriedades físico-químicas. Essas características específicas resultam em impactos distintos nas propriedades do concreto. A nSiO_2 , devido às suas dimensões nanométricas e elevada área superficial, atua no processo de hidratação do cimento por dois mecanismos principais: reação pozolânica concomitante à hidratação do cimento; e atuação como ponto de nucleação para a formação e o crescimento do gel C-S-H (SANTOS *et al.*, 2025). Esses mecanismos promovem o refinamento dos poros e a densificação da microestrutura, refletindo-se no aumento da resistência mecânica e da durabilidade do concreto.

A literatura científica recente demonstra que os benefícios associados ao uso de nSiO_2 dependem de fatores como dosagem, dispersão, método de mistura e compatibilidade

TABELA 1

COMPOSIÇÃO PROBABILÍSTICA DA CAL HIDRATADA

Cimento (kg)	Água (L)	Areia fina (kg)	Areia média (kg)	Brita 0 (kg)	Brita 1 (kg)
350	175	244	526	203	811

FONTE: ELABORADO PELOS AUTORES

com os demais componentes do concreto. Em muitos casos, observa-se a existência de uma dosagem ótima de nanomaterial para cada traço, sendo que teores superiores tendem a reduzir a trabalhabilidade, prejudicar a homogeneidade da mistura e, consequentemente, impactar negativamente o ganho de resistência do concreto (RUIZ *et al.*, 2025).

Nesse contexto, o presente trabalho propõe-se a realizar uma análise detalhada de uma curva de dosagem do aditivo nanotecnológico para concreto com nSiO₂. Foram reunidos resultados de ensaios de qualidade do concreto, com o objetivo de elucidar os efeitos do aditivo no aprimoramento da resistência mecânica e da durabilidade, bem como suas repercussões relacionadas à mistura, dispersão, trabalhabilidade e demais efeitos associados.

2. MATERIAIS E MÉTODO

O traço padrão de concreto convencional escolhido para aplicação dos testes foi experimentado anteriormente com diversos aditivos e aplicações. A Tabela 1 mostra um traço de 1m³, com os componentes em kg para cimento e agregados e em litros para água. Para todos os traços, os parâmetros fator água/cimento (a/c) e teor de argamassa foram fixados em 0,5 e 52% respectivamente. As areias usadas eram de origens naturais, tanto a de granulometria fina quanto a de tamanho médio, sendo complementares entre si no traço. Ambas as britas 1 e 0 usados foram do tipo basáltica. Optou-se por empregar o cimento de alta resistência inicial - CP V ARI.

Ao todo foram feitos 4 traços de concreto convencional de 30 l em uma betoneira de 150 l, seguindo a Tabela 1. O primeiro foi o concreto referência ou controle e os outros se dividiram em 3 dosagens do aditivo NEXT ACnano, contendo nSiO₂. O volume foi suficiente para moldar 15 corpos de prova de 10x20 por traço. Dos quais: 7 corpos de prova se executaram os ensaios de absorção de água juntamente a índice de vazios (ABNT NBR 9778 - 2:2009), 6 CP foram rompidos para obtenção da resistência à compressão (ABNT NBR 5739) e o restante, após seleção, seguiu para testes de permeabilidade forçada de íons cloreto (ASTM C1202- 12).

O aditivo empregado para o estudo é de uma base de nSiO₂ amorfa, previamente sintetizado como uma dispersão estável. As especificações do produto são descritas na

Tabela 2. O aditivo foi adicionado nas dosagens de 0,25%, 0,5% e 0,75% de nSiO₂ com relação a massa de cimento, juntamente com parte da água de amassamento como último componente. A água da dispersão foi contabilizada no cálculo do fator água/cimento, parâmetro que foi constante em todos os traços executados, incluindo o traço sem nSiO₂. Manteve-se um valor de abatimento conforme teste descrito na ABNT NBR 16889:2020 padronizado de 120 mm ± 20 mm, a fim de normalizar a plasticidade do concreto fresco empregando conjuntamente superplastificante à base de policarboxilato (PCE) nos traços de concreto. Ambos os produtos foram adicionados conforme cálculo de porcentagem sobre a massa de cimento empregado no traço.

Os primeiros testes realizados com concreto em estado endurecido foram resistências à compressão axial nas idades iniciais. As idades convencionadas foram para 1, 7 e 28 dias.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O primeiro teste executado foi o de abatimento do tronco de cone, sendo padronizado para todos os traços, a fim de que a comparação fosse justa entre os impactos da aplicação de diferentes dosagens de aditivo contendo nSiO₂ utilizadas no traço. Para essa padronização, foi preciso diferentes dosagens de PCE adicional. A Tabela 3 mostra os traços rodados contendo os principais parâmetros para comparação.

Muitos efeitos puderam ser observados nos traços desde o momento da adição, estando o concreto ainda fresco. O primeiro foi a redução do abatimento inicial, levando a

necessidade do uso de mais PCE. Esta quantidade aumentou conforme maior dosagem de aditivo nanotecnológico adicionado. Isso indica um leve aumento de viscosidade com o aumento do teor de nSiO₂ (GONÇALVES, LEONI & FERREIRA, 2023). O principal motivo se deve à elevada área superficial destas partículas, resultando na interação com a água de amassamento, aumentando a coesão do concreto e modificando sua reologia (ISFAHANI *et al.*, 2016).

As resistências para 24h após moldagem apresentaram incrementos de 21%, 46% e 58% respectivamente às dosagens de 0,25%, 0,50% e 0,75% de aditivo nanotecnológico. Os maiores aumentos de resistência mecânica em relação ao concreto de controle foram observados nas primeiras 24h. A reação de hidratação do cimento ocorre normalmente no concreto controle e é aprimorado ao se adicionar a nanopartícula de sílica. Esse comportamento foi esperado e pode ser atribuído principalmente à atividade pozolânica, em que a nSiO₂ deve reagir com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) excedente ou gerado durante a hidratação do cimento, promovendo a formação adicional do gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) (SINGH *et al.*, 2013). Essa reação promove o refinamento dos poros, responsável pelo aumento da densidade e implementação da coesão da matriz cimentícia, reforçando a zona de transição interfacial (ITZ do inglês). Isso permite um reforço adicional na resistência à ruptura, a qual ocorre geralmente nesta zona de interface do concreto/agregado (RUNCI, PROVIS & SERDAR, 2022). Além disso, segundo Hakeem *et al.* (2023) e Neto & Geyer (2019), o aumento de resistência obtido também é resultado da

TABELA 2

ESPECIFICAÇÕES DO PRODUTO NEXT ACnano

Produto	NEXT ACnano
Meio de aplicação:	Aditivo contendo policarboxilato e nSiO ₂
Tamanho da nSiO ₂ :	Entre 1 e 100 nm
Área superficial:	> 500 m ² /g

FONTE: FICHA TÉCNICA NEXT ACnano, NEXT QUÍMICA (2022)

TABELA 3

PARÂMETROS DOS TRAÇOS TESTADOS

Traço	Dosagem de NEXT ACnano	Dosagem de PCE
S0	0	0,25%
S025	0,25%	0,25%
S05	0,50%	0,35%
S75	0,75%	0,4%

FONTE: ELABORADO PELOS AUTORES

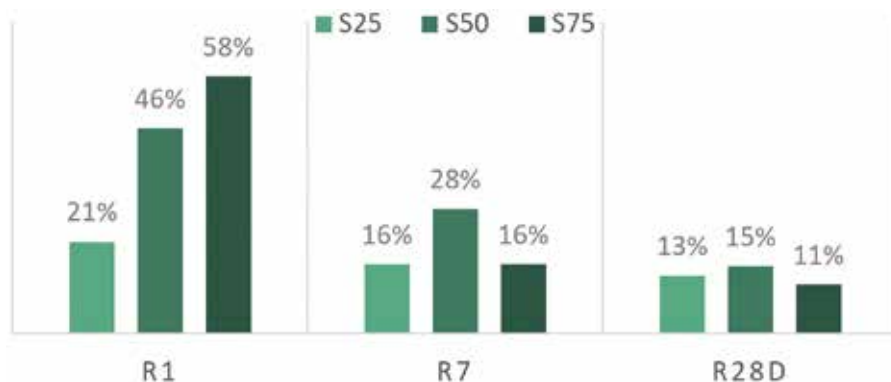


FIGURA 1

GRÁFICO DE DADOS DE ACRÉSCIMOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA AXIAL POR IDADE

FONTE: ELABORADO PELOS AUTORES

capacidade da $nSiO_2$ de servir como ponto de nucleação para crescimento do C-S-H do cimento. Esse efeito, juntamente com a progressão da reação pozolânica, pode ser atrelado ao fato de que a adição de $nSiO_2$ tende a antecipar o início de pega. Pois essas atuações são responsáveis por acelerar a reação de hidratação de cimento (HLOBIL, KUMPOVÁ & HLOBILOVÁ, 2022).

Aos 7 dias, os ganhos de resistência em relação ao controle foram de 16% para as dosagens de 0,25% e 0,75%, e 28% para 0,5%. Nesta idade, ainda se considera uma resistência inicial, reunindo ganhos expressivos para todas as dosagens empregadas. Aos 28 dias, os ganhos somaram-se em 13%, 15% e 11% para as dosagens de 0,25%, 0,50% e 0,75% de aditivo químico nanotecnológico, respectivamente.

A tendência geral seria o aumento da resistência inicial proporcional à quantidade de $nSiO_2$ contida no aditivo adicionado. Os dados de resistência podem ser vistos compactados para comparação na Figura 1.

Nota-se um acréscimo de resistência à compressão maior para a dosagem média do que para a maior dosagem aplicada. Esse desempenho demonstra que, para o alcance de maior resistência aos 28 dias, a dosagem ideal seria de 0,5%, que se demonstra como o ponto ótimo para o traço aplicado. Conforme estudos de Isfahani *et al.* (2016) e Suárez *et al.* (2022), esta performance dispar é corriqueira na aplicação de nanopartículas ao concreto. Nesses casos, a elevada quantidade relativa de $nSiO_2$ levaria a má dispersão do material na matriz cimentícia, gerando, em decorrência, a formação de aglomerados ao longo do processo de hidratação do cimento que se espalham no concreto. Quando se atinge o estado endurecido, esses pontos podem se comportar

como pontos de fraqueza, onde a ruptura tende a ocorrer (TANIMOLA & EFE, 2024).

Diferentes estudos relevantes da área de construção civil demonstram resultados promissores na durabilidade do concreto ao se adicionar $nSiO_2$. Essa performance pode ser medida a partir de diferentes ensaios padronizados. As principais estão relacionadas à porosidade e permeabilidade do concreto (RIUZ *et al.*, 2025). Quanto menos poroso o material final, mais dificultada ficaria a entrada de agentes deletérios na estrutura do concreto ao longo do tempo, permitindo que o material fique livre de manifestações patológicas, tais como: corrosão das armaduras, eflorescência e reação álcali-agregado (RAA) (AL-SAFAR, WONG & PAUL, 2023 e SALOMA *Et al.*, 2015). Para elucidar a capacidade das nanopartículas utilizadas em aprimorar a durabilidade do concreto, foram realizados ensaios de permeabilidade forçada de íons cloreto e obtenção de resultados de absorção de água e de índice de vazios, conforme as respectivas normas.

Os resultados de absorção de água e de índice de vazios foram coerentes

entre si. Comparativamente ao concreto controle, houve redução da absorção e do índice de vazios proporcionalmente à dosagem de aditivo nanotecnológico aplicado ao concreto. As respectivas atenuações na absorção foram de 6%, 7% e 12% (Figura 2), enquanto as reduções dos índices de vazios alcançaram valores de 1,5%, 4,9% e 9,8% menores que o valor encontrado para o concreto sem adição de aditivo contendo $nSiO_2$. Nota-se, por meio dos resultados comparativos, a redução relativa da porosidade dos concretos com adição de $nSiO_2$ que devem evitar a permeação de água ao longo do tempo. Quanto maior a quantidade adicionada, menor se mostrou a porosidade, comprovando o efeito previsto de densificação da matriz (KUMAR, KUMAR & KUJUR, 2019). Comportamento comumente atribuído à atividade pozolânica do nanomaterial empregado, juntamente com a ação de preenchimento de poros articulado pela presença dele no meio (TJAHJANI *et al.*, 2023 e RUNCİ, PROVIS & SERDAR, 2022).

Com base nos resultados obtidos de resistência mecânica e durabilidade, foi selecionada a condição de incorporação de 0,5% de $nSiO_2$, para seguir com o ensaio de migração de íons cloreto. Os resultados demonstraram uma carga elétrica passante de 2462 Coulombs para a amostra referência e 2030 Coulombs para o traço com incorporação de nanotecnologia. Dessa forma, foi verificada uma redução de 18% da migração / penetração de íons cloreto quando comparado ambos os traços, como pode-se verificar na Figura 3. O ensaio realizado não depende apenas da porosidade da matriz, mas também da agressividade da solução iônica de teste, conforme a norma ASTM C1202 (2012). Os resultados obtidos

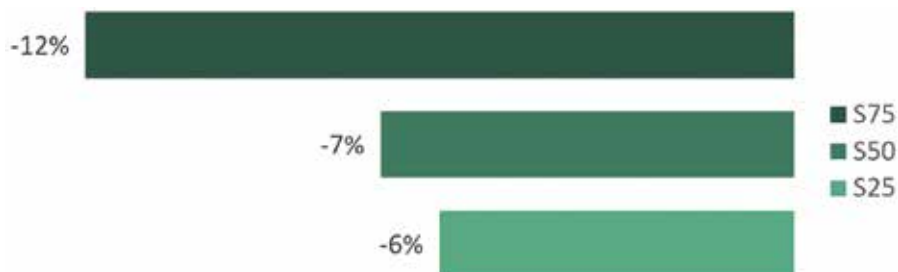


FIGURA 2

GRÁFICO DE REDUÇÃO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

FONTE: ELABORADO PELOS AUTORES

reforçam a capacidade das nanopartículas de reduzir o volume e dimensão da porosidade, impactando positivamente a durabilidade do concreto. Este mecanismo é derivado justamente da atividade pozolânica e do efeito nucleante das partículas de sílica presentes no aditivo nanotecnológico (KUMAR, KUMAR & KUJUR, 2019, PRAVEEN KUMAR & DEY, 2023).

5. CONCLUSÕES

Os estudos, apresentados neste trabalho, concernentes aos efeitos do aditivo químico para concreto com incorporação de nSiO₂ (NEXT ACnano) contou com ensaios de resistência mecânica, testes de porosidade e absorção de água para comprovar os benefícios prometidos pelo produto comercial. Os resultados discuti-

dos no presente trabalho permitem concluir que o aditivo nanotecnológico teve atuação efetiva e positiva no aumento da resistência mecânica e no prolongamento da durabilidade do concreto. O aditivo nanotecnológico apresentou maior efeito de acréscimo de resistência inicial, demonstrando que as atuações de atividade pozolânica e efeito de ponto de nucleação podem gerar aceleração da reação de hi-

dratação do cimento, resultando em aceleração do ganho de resistência. Os resultados demonstram ganhos de até 58% para o primeiro dia e de até 28% aos 7 dias. A porosidade foi refinada pela adição de nSiO₂ por meio do aditivo químico ao concreto, inferindo-se pelos resultados de redução de índice de vazios em até 9,8% e de absorção de água de até 12% proporcionais às dosagens incrementadas nos traços. ☺

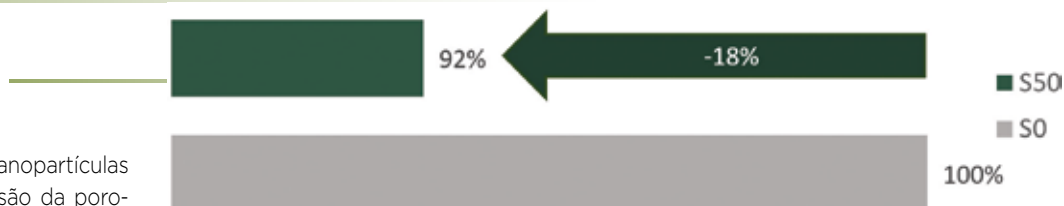


FIGURA 3

GRÁFICO DE COMPARAÇÃO DE REDUÇÃO DE MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETO

FONTE: ELABORADO PELOS AUTORES

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AL-SAFFAR, F. Y.; WONG, L. S.; PAUL, S. C. An Elucidative Review of the Nanomaterial Effect on the Durability and Calcium-Silicate-Hydrate (C-S-H) Gel Development of Concrete. Gels, 2023.
- [2] FORTUNE BUSINESS INSIGHTS. Tendências do mercado de cimento Portland. Disponível em: <https://www.fortunebusinessinsights.com/pt/portland-cement-market-112870>. Acesso em: 05 jun. 2025.
- [3] GONÇALVES, G. M.; LEONI, V. L.; FERREIRA, F. G. DA S. Efeito da nanosilica nas propriedades mecânica, física e térmica de concretos. Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB, v. 60, n. 1, p. 50, 30 mar. 2023.
- [4] HAKEEM, I. Y. *et al.* Properties of sustainable high-strength concrete containing large quantities of industrial wastes, nanosilica and recycled aggregates. Journal of Materials Research and Technology, v. 24, 2023.
- [5] HLOBIL, M.; KUMPOVÁ, I.; HLOBILOVÁ, A. Surface area and size distribution of cement particles in hydrating paste as indicators for the conceptualization of a cement paste representative volume element. Cement and Concrete Composites, v. 134, 1 nov. 2022.
- [6] ISFAHANI, F. T. *et al.* Effects of Nanosilica on Compressive Strength and Durability Properties of Concrete with Different Water to Binder Ratios. Advances in Materials Science and Engineering, v. 2016, 2016.
- [7] KUMAR, S.; KUMAR, A.; KUJUR, J. Influence of nanosilica on mechanical and durability properties of concrete. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings, v. 172, n. 11, 2019.
- [8] MORDOR INTELLIGENCE. Tamanho do mercado de cimento e análise de participação - Relatório de pesquisa da indústria. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/cement-market>. Acesso em: 05 jun. 2025.
- [9] OBSERVATÓRIO CIENTÍFICO UFC. Fabricação de cimento, grande emissor industrial de carbono, pode ser menos poluente com troca de matéria-prima. Disponível em: <https://observatoriocientifico.ufc.br/pt/fabricacao-de-cimento-grande-emissor-industrial-de-carbono-pode-ser-menos-poluente-com-troca-de-materia-prima/>. Acesso em: 05 jun. 2025.
- [10] PEREIRA, Ana; OLIVEIRA, Andrielli; CASCUDO, Oswaldo. Efeito da sílica ativa e nano sílica na durabilidade frente a cloretos e CO₂ - um mapeamento da literatura para futuras pesquisas: ternary effect of silica fume and nano-silica on the durability in front of chlorides and CO₂ - a literature mapping for future research. Revista Tecnica, v. 8, 2023.
- [11] PRAVEEN KUMAR, V. V.; DEY, S. Study on strength and durability characteristics of nano-silica based blended concrete. Hybrid Advances, v. 2, 2023.
- [12] RUIZ, A. I. *et al.* Sustainable low-cement blends featuring blast furnace slag, metakaolin and nanosilica show remarkable long-term durability against chlorides for one day curing age. Case Studies in Construction Materials, v. 22, 1 jul. 2025.
- [13] RUNCI, A.; PROVIS, J.; SERDAR, M. Microstructure as a key parameter for understanding chloride ingress in alkali-activated mortars. Cement and Concrete Composites, v. 134, 2022.
- [14] SALOMA; NASUTION, Amrinsyah; IMRAN, Iswandi; ABDULLAH, Mikrajuddin. Improvement of concrete durability by nanomaterials. Procedia Engineering, v. 125, p. 608-612, 2015.
- [15] SANTOS, Altair. Meta da indústria do cimento é emissão zero de CO₂ até 2050. ABCIC, 2025. Disponível em: <https://abcic.org.br/Noticia/Exibir/meta-da-industria-do-cimento-e-emissao-zero-de-co-ate-2050>. Acesso em: 05 jun. 2025.
- [16] SINGH, L. P. *et al.* Beneficial role of nanosilica in cement based materials - A review. Construction and Building Materials, 2013.
- [17] TANIMOLA, J. O.; EFE, S. Recent advances in nano-modified concrete: Enhancing durability, strength, and sustainability through nano silica (nS) and nano titanium (nT) incorporation. Applications in Engineering Science, v. 19, 1 set. 2024.
- [18] TJAHJANI, A. R. *et al.* Comparative analysis of natural nanosilica versus commercial nanosilica on compressive strength and durability of high-performance concrete. Archives of Civil Engineering, v. 69, n. 3, 2023.

Analysis of the mechanical properties between High-strength and Self-compacting concretes, **using an additive and an admixture, for different reductions in water content**

ROBERTO ALEJANDRO ROJAS HOLDEN - PROF. DR. ENG. - (rrojas@ing.una.py) – Departamento de Engenharia Civil, Geográfica y Ambiental, Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Asunción - FIUNA

DANIEL FERRANDEZ VEGA - PROF. DR. - (Daniel.fvega@upm.es) – Escuela Técnica Superior de Edificación, Universidad Politécnica de Madrid - ETSEM-UPM

ABSTRACT

CONCRETE IS CHARACTERIZED BY ITS WORKABILITY, CONSISTENCY, LOW COST, AND RAPID DRYING TIME. ONCE HARDENED, IT IS CHARACTERIZED BY ITS HIGH STRENGTH, ABSORPTION CAPACITY, AND RESISTANCE TO WATER, ABRASION, AND OTHER FACTORS. FOR DIFFERENT STRESSES, IMPACTS, ENVIRONMENTS, AND CONSTRUCTION TECHNOLOGIES, TO CHOOSE PLACEMENT METHODS FOR DIFFERENT ELEMENTS AND STRUCTURES, SPECIAL CONCRETES HAVE BEEN DEVELOPED. IT POSSESSES SPECIFIC PROPERTIES SUITED TO PARTICULAR APPLICATIONS AND THE LIFESPAN OF THE STRUCTURES. AS A RESULT, ADDITIVES HAVE ALSO EVOLVED, AND FOR THE PURPOSE OF BETTER AND EASIER PLACEMENT AND HIGH DURABILITY MAKES SELF-COMPACTING CONCRETE (SCC) A SPECIAL TYPE AMONG SPECIALTY CONCRETES. IT IS WELL KNOWN THAT ITS MAIN PROPERTY IS FLUIDITY. TO ACHIEVE CONSIDERABLE STRENGTH, HIGH-RANGE WATER REDUCERS (HRWR) ARE USED, ALSO USED TO ACHIEVE HIGH STRENGTH FOR HIGH-STRENGTH CONCRETES (HSC). THESE REDUCERS ALLOW US TO ADJUST THE AMOUNT OF WATER REDUCED TO ACHIEVE DIFFERENT CONCRETE CONSISTENCIES AND DETERMINE ITS COMPRESSIVE STRENGTH.

KEYWORDS: SELF-COMPACTING CONCRETE, HIGH-STRENGTH CONCRETE, HIGH-RANGE WATER REDUCER, POLYCARBOXYLATE PC.

1. INTRODUCTION

Self-compacting concrete is a type of concrete that through its properties using superplasticizers, compacts by gravity, flowing between the formwork thanks to

its viscosity. It compacts without the aid of any mechanical system and maintains its homogeneity and stability throughout its application, preventing slurry bleeding and coarse aggregate blockage. SCC is characterized by a lower coarse aggregate content, a higher mineral fine content, and, in general, a smaller maximum aggregate size. Furthermore, SCC is typically produced with a low water-cement ratio, leading to increased strength, faster formwork removal, and quicker commissioning of structures. Furthermore, there are some places in the world, including Paraguay, especially in the Chaco region, where it hardly ever rains, water is salty if it can be found at all, and is a limited resource in terms of both quality and potability. If we ran out of water, it would take about three hours to continue pouring the concrete. All of this made us realize the importance of the water we have. [1]

According to EN 934-2:

- **Water reducer:** Allows a reduction in the water content of a concrete mix without affecting its consistency, or increases workability without changing the water content, or both effects.
- **Superplasticizer:** Allows a significant reduction in the water content of a given concrete mix without affecting its consistency, or increases workability without changing the water content, or both effects. Also known as HRWR (high-range water reducer). [9]. In this

work, a HRWR, superplasticizer based on modified polycarboxylates will be used. HSC aims a high level of strength through various factors, including the use of selected materials and low water-to-binder ratios. This results in a less porous, less permeable, and more durable structure. The predominantly spherical aggregates and their varying size distribution necessitate the use of admixtures to reduce the heat of hydration generated by the high Portland cement content. The hypothesis is whether HSC can be achieved through an analogous process by starting to design a SCC.

2. DEVELOPMENT

A characterization of the materials was performed to design concrete mixes. It was added silica fume and a HRWR with water reduction ratios of 0%, 2.4%, 5%, 10%, 20%, 30%, and 40%. The following material values were used to prepare the first batch of SCC for this study; subsequently, the water content was reduced.

- **Binder:** CEMEX Class IV/B(P) 32.5 N-SR cement, density 3.1 g/cm^3 , with 8% of its weight replaced by silica fume or micro-silica, density 2.2 g/cm^3 .
- **Water:** The suitability of water for concrete production depends on its source. The UNE EN 1008 establishes:
- **Drinking water:** Suitable for concrete. No testing is required. (Water used from

the Madrid city water system).

- ▶ **Recovered water from concrete industry processes (e.g., wash water):** This is generally suitable for concrete, but the standard's requirements must be met (e.g., the additional weight of solids in the concrete when using this type of water must be less than 1% of the total weight of the aggregates in the mix).
- ▶ **Groundwater:** May be suitable, but must be verified. Natural surface water and industrial water: May be suitable, but must be checked.
- ▶ **Seawater or saltwater:** Can be used for mass concrete but is not suitable for reinforced or prestressed concrete. The maximum permissible chloride content in concrete must be observed for concrete reinforced with steel fibers or embedded metal parts.
- ▶ **Wastewater:** Not suitable for concrete. Combined water is a mixture of water recovered from concrete industry processes and water from another source.
- ▶ **Chemical properties:** The water was taken from Madrid's potable water system.
- ▶ **Harmful contaminants:** Tests must be carried out for sugars, phosphates, nitrates, lead, or zinc. If the results are positive, the content of each substance must be determined, or setting time and compressive strength development tests must be performed.
- ▶ **Admixture:** Dosage according to EHE-08: Permitted dosage < 5% of the cement weight (the effect of a higher dosage on Setting Time and Strength.

In this work, 1.25% of the weight of the cement was used. Concrete **additions** are fine materials that are normally added to concrete in significant proportions (around 5–20%). They are used to improve or obtain specific properties in fresh and/or hardened concrete. According EN 206-1. *Silica fume* consists essentially of spherical particles of amorphous silicon dioxide from the production of silicon and silicon alloys. It has a specific surface area of 18–25 m² per gram and is a highly reactive pozzolan. The standard dosage for silica fume is 5% to 10% max. of the cement weight. In this work, silica fume was used at 8% replacement. This gives the binder finer particles that provide better rheological properties, fill the empty spaces left by the cement, and give better granulometric distribution to the whole, better compactness, and therefore more impermeability, durability and compressive strength.

- ▶ **Aggregates:** Gravel was used as coarse aggregate, and a mixture of 90% washed sand and 10% marble dust as fine aggregate.

SCC: requires a higher quantity of fines than conventional concrete to achieve the necessary fluidity. Aggregates with a maximum diameter of 19.1 mm or 12.7 mm are preferred, but no larger. Although some researchers used aggregates 25 mm. The procedures included consistency-flow tests using the truncated cone method, visual inspections of fluidity, and non-segregation of the concrete components, also compres-

sive strength at 7, 28, and 56 days of age to determine when the concrete acquires HSC's properties. The results were graphed plotting the strength curves of the concrete. Silica fume was used as addition and a PC HRWR admixture. The mix design method is a simplified design, a modification [1] of the ACI 211.1 [2] code for CC. The ranges included within the European Guidelines for SCC () [5] were also studied. The main function of HRWR is to disperse cement particles, achieving high levels of fluidity without the need of additional water, reducing the risk of bleeding and segregation, adjusting the water content and the dosage of the admixture. Superplasticizers can be classified into four categories according to their chemical composition: lignosulfonates (LS), naphthalene sulfonate (NS), melamine sulfonate (MS), and polycarboxylates (PC) are the most modern, 3rd generation superplasticizers. Currently, PC are the most widely used in SCC due to their high effectiveness in maintaining workability without the need for high doses [7]. The microstructure of SCC differs from that of conventional concrete, due to the mix design, especially the use of admixtures and the reduction in the volume and size of the coarse aggregate. The larger the coarse aggregate, the weaker the transition zone. The low water-to-fines ratio reduces porosity. Figure 1 shows the rheological parameters and the influences of components.

According to the Figure 2, the coarse aggregates (gravel) used are classified as having average or semi-round sphericity.

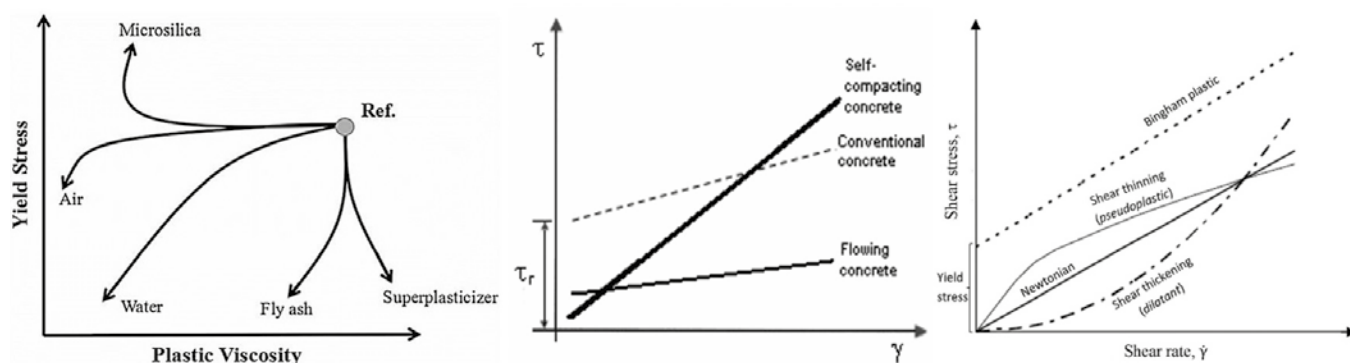


FIGURE 1

EFFECTS ON THE RHEOLOGICAL PARAMETERS OF WATER CONTENT, SUPERPLASTICIZER AND ENTRAINED AIR, OF FLOW ON SCC, CC CONVENTIONAL CONCRETE AND HSC [4]

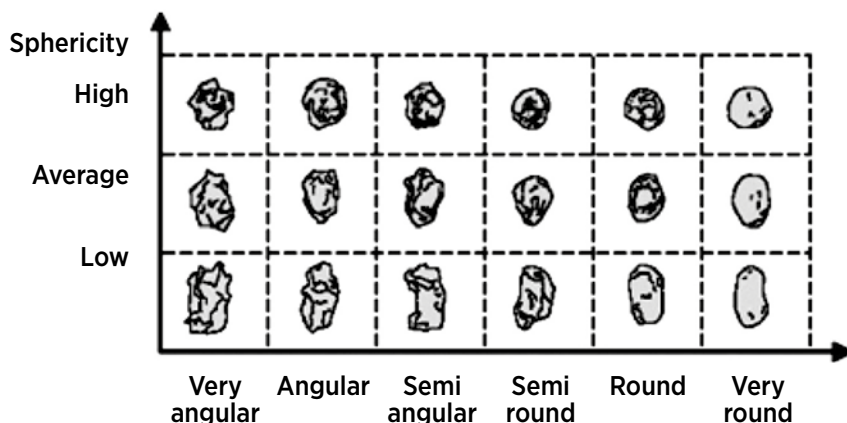


FIGURE 2
CLASSIFICATION ACCORDING TO THE SHAPE OF THE AGGREGATES

The results were analyzed to determine appropriate water reduction percentages for both self-compacting and high-strength concrete. Figure 3 helps with the results of slump flow and T50 to consider our SCC.

The validity of the hypothesis regarding the use of the methodology for designing SCC was verified, and the values for HSC were achieved. In regions where 62 MPa compressive strength concrete is commercially produced, high strength could be in the range of 83 MPa to 103 MPa. However, in regions where the maximum compressive strength for commercially available

concrete is 34 MPa, we could well call a 62 MPa compressive strength a HSC. The ACI Committee 363 [3] on HSC establishes that the specified design strength should be 41 MPa or greater, and its mix design table starts with 49 MPa concrete and ends at 84 MPa for 28 and/or 56 days of age [3].

2.1 Developed Methodology

We prepared SCC and HSC prior to UPM. From this, it was concluded that for SCC, when the proposed value of the coarse aggregate weight was set at 50%

of the compacted dry unit weight, the high variation in fluidity resulted in unsatisfactory strength [1]. Therefore, upon analyzing the theory, if the concrete is not self-compacting, the 50% criterion mentioned above is not only unnecessary, but it is recommended to use Table 5 of ACI 211.1 [2] for conventional concretes and enter the fineness modulus of the fine aggregate and the maximum diameter of the coarse aggregate to obtain the percentage for the concretes to be analyzed. At UPM we prepared mortars using locally available materials. Analysis of additive dosage and fluidity was conducted, and the water/cement ratio for mortars containing these components. The component materials were analyzed and characterized. A 1:3 mortar (binder: fine aggregate) was prepared with a water/binder ratio of 0.475 and 1.25% superplasticizer by weight of cement. Its behavior in the fresh state and its hardened mechanical strength at 28 days were observed. Rational proportioning of each concrete mix was performed using the ACI 211.1 method, and the HAC mix was determined using the simplified method of the ACI 211.1 code. Concretes with water reduction of 0%, 2.4%, 5%, 10%, 20%, 30% and 40% as a variable were made, keeping cement and additive content constant (1.25% additive of the weight of cement according to results of mortar tests). On Figures 4 and 5 we can see the red curve corresponding to the materials used for our concrete.

Three mortar 40 mm x 40 mm x 160 mm specimens were prepared. The flexural strength at 28 days averaged 14.1 MPa, and the compressive strength 34.93 MPa. Its density 2.226 g/cm³. Ten concrete specimens made for every case, with water reduction (the variable) of 0%, 2.4%, 5%, 10%, 20%, 30%, and 40%. The mixes consisted of 92% cement and 8% silica fume binder, 1.25% PC superplasticizer, gravel as coarse aggregate, and 90% sand and 10% marble dust as fine aggregate. The proportions of cement, addition, and gravel remained constant in the mix design (except for the SCC candidates, as conventional concretes according to ACI 211.1 [2] followed Table 5). The final component of the mix design was the fine aggregate. The specimens were cured in a humid chamber. Figures 6 to 8 shows us part of the testes performed.

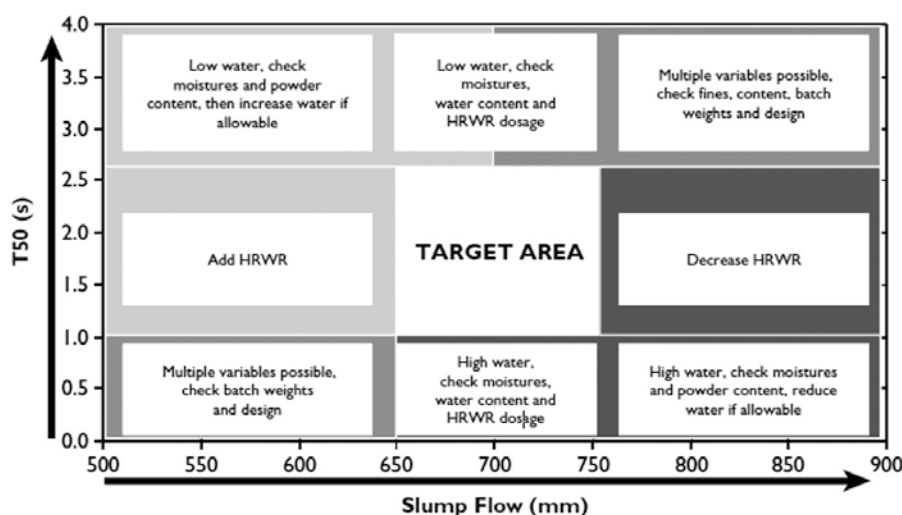


FIGURE 3
HUMIDITY ADJUSTMENT MATRIX OR WATER/BINDER RATIO AND ENERGY CONSUMPTION

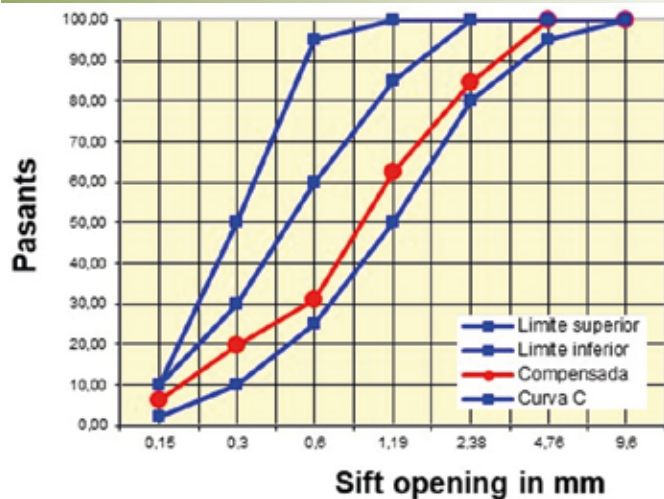


FIGURE 4

COMPENSATED CURVE OF FINE AGGREGATE WITH 90% SAND AND 10% MARBLE DUST (RESIDUE FROM THE MARBLE INDUSTRY). IRAM STANDARD 1548/71 AND 1568/71; NBR 7217/87 [10]. FINENESS MODULUS = 2.94. $D_s = 2.5 \text{ g/cm}^3$.

SOURCE: OWN ELABORATION

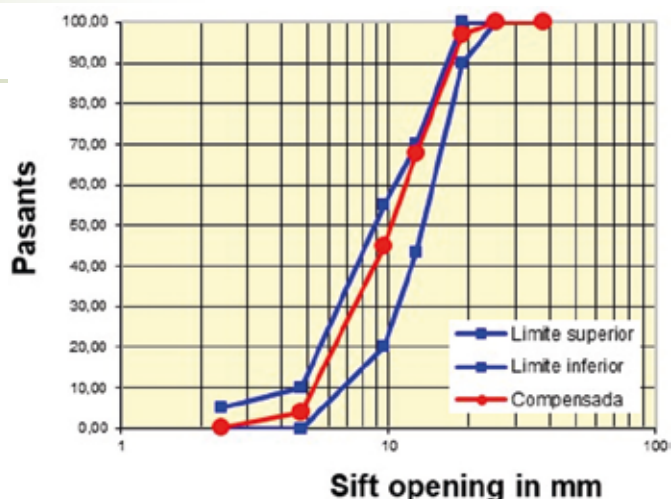


FIGURE 5

COARSE AGGREGATE CURVE (GRAVEL). CURVE LIMITS IRAM 1548/71 AND 1568/71 AND NBR 7217/87 [10], MAX. DIAM. 20 MM. $D_s = 2.55 \text{ g/cm}^3$; PU COMP = 1800 kg/m^3

SOURCE: OWN ELABORATION

2.2 Results

The series of results is shown in Table 1.

In Figures 9 and 10 it can be seen some of the graphs made by the universal machine, from which it was taken The elasticity Module E.

On Figure 11 the results are ordered by % of water reduction.

The results validate the initial hypotheses; however, this field of research is just beginning in order to find a better method for

proportioning HSC. For example, we started with SCC as an initial idea, but this could be done using other concrete mixes to improve the properties of different concretes, including their respective compressive strengths. On the other hand, the SCC achieved a T50 of 2.8 seconds and an average final diameter of 750 mm. It also exhibited a uniform thickness of the coarse aggregate (in this case, 20 mm gravel) without segregation, resulting in a homogeneous, well-distributed mass with few voids and good strength. Strength is a secondary desired property;

the most important is achieving self-compacting by gravity alone and the absence of segregation, among other properties in the fresh state of the SCC. According to European Guidelines (5), these results indicate a self-compacting concrete of category AC-E2, class SF2, suitable for doubly reinforced walls, columns, and pillars. (5).

Reviewing Zerbino's research (4), many materials have a threshold value below which movement does not occur. These materials are also known as viscoplastics. Fluids that respond to the Bingham model



FIGURES 6 TO 8

FRESH AND HARDENED TESTING

SOURCE: AUTHOR'S OWN WORK

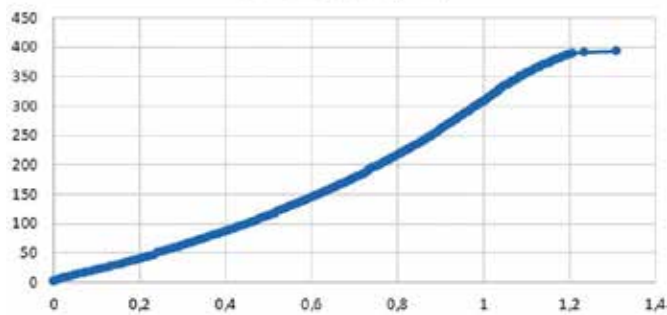
TABLE 1

DOSAGES OF THE CONCRETES CONSIDERED FOR THEIR STUDY IN THE FRESH AND HARDENED STATE

Dosage in kg starting with 2.4% reduction of water based on estimates with the test mortar									
Serie	Cement	Microsilica	Gravel	Sand	Marmoline	Water	Superplastifier	Water reduction	Tipe/A(cm)
1	425	37	900	615	63	207,89	5,78	2,40%	22
2	425	37	1080	567	57	170,4	5,78	20%	20
3	425	37	1080	425	37	192	5,78	10%	22
4	425	37	900	738	82	202,35	5,78	5%	HAC/Φ75
5	425	37	1080	558	62	149	5,78	30%	14
6	425	37	1080	414,5	46	213	5,78	0%	25
7	425	37	1080	894	99	128	5,78	40%	4

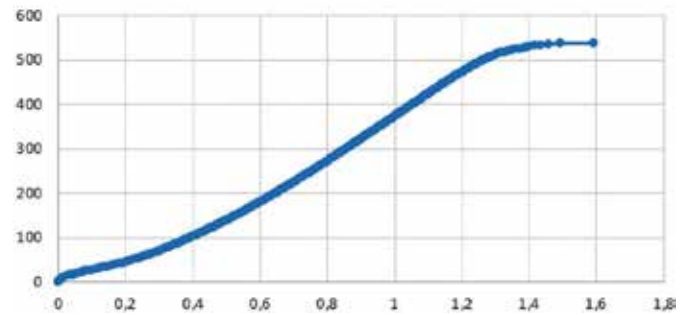
Source: AUTHOR'S OWN WORK

Compresión KN (Resist Comp/10 (Mpa) vs Deformación (mm)

**FIGURE 9**

4 SERIES (REDUCTION 5% SCC)

Compresión KN (Resist Comp/10 (Mpa) vs Deformación (mm)

**FIGURE 10**

5 SERIES (REDUCTION 30%)

TABLE 2

COMPRESSIVE STRENGTH, MODULUS OF ELASTICITY, INDIRECT TENSILE STRENGTH AND DENSITY

Compress strength in Mpa				E (Mpa)	Indirect tension in Mpa (28 d)		Density (g/cm³)
Serie	7-8 d	28 d	56 d	28 d	Serie	28 d	28 d
1	24,45	39,33	43,12	38931	1	3,02	2,365
2	42,33	56,17	56,54	38205	2	2,14	2,416
3	30,65	47,74	52,11	46465	3	1,69	2,416
4	34,14*	38,15	42,25	30999	4	1,90	2,409
5	53,85	>60	>60	39167	5	3,19	2,472
6	29,89	40,53	45,90	37500	6	1,30	2,434
7	37,26	38,26	46,35**	41048	7	2,63	2,237

NOTE: *13 DAYS OLD. **44 DAYS; SOURCE: AUTHOR'S OWN ELABORATION

NOTE: (>60) The press has a safety mechanism before reaching its maximum capacity of 600 kN. for compression specimens (10 cm x 10 cm x 10 cm), this mechanism is activated when the specimens reach approximately 60 MPa of compressive strength. *SCC.

behave as Newtonian fluids above the threshold. This model is one of the best representations of the behavior of cement paste, mortar, and concrete; it uses two parameters to characterize movement: the shear threshold (τ_0), which represents the resistance to deformation under static conditions, and the plastic viscosity (μ), which can be associated with an increasing resistance

to movement according to equation 1.

$$[1] \quad \tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}$$

Materials that behave as dilatant or pseudoplastic above the threshold stress are better represented by other models, such as the Herschel-Bulkley model according to equation 2, where a and b are constants. This model has also

been used to represent the behavior of SCC.

$$[2] \quad \tau = \tau_0 + a \dot{\gamma}^b$$

There are fluids whose viscosity can change even under constant applied stress; these include thixotropic fluids. A thixotropic fluid has a structure that breaks down during movement and reforms upon returning to rest. Concrete, depending on the nature of

the cement, mineral admixtures, and chemical additives, may or may not exhibit a thixotropic response. In practice, thixotropic behavior manifests as a loss of fluidity when the material is left at rest and a recovery of its flowability when a certain amount of energy is subsequently applied. This aspect has a practical interest considering that this loss of fluidity or recovery of the structure will result in a significant reduction of pressure on the formwork. Although cement paste is essentially water and cement particles, its behavior is quite different from a suspension of inert solids. Attractive forces exist between the particles, leading to the formation of flocs. Shortly after contact with water, rapid reactions occur, resulting in the dissolution of ions, and then hydrated products begin to form on the particle surfaces. These membranes that form around the flocs rupture during mixing, which explains why the effort required to move the system varies depending on the rate of deformation."

According to European Guidelines (5), the SCC used in this research corresponds to class SF2 for walls and columns and VS2/VF for lower segregation of said concrete.

3. CONCLUSIONS

The HSCs were obtained with 10, 20 and 30% of water reduction. To improve strength requires to increase the coarse aggregate content, as verified by the initial and subsequent results of this research. Therefore, the hypothesis is confirmed. Furthermore, we propose using Table 3 of ACI 363 for the

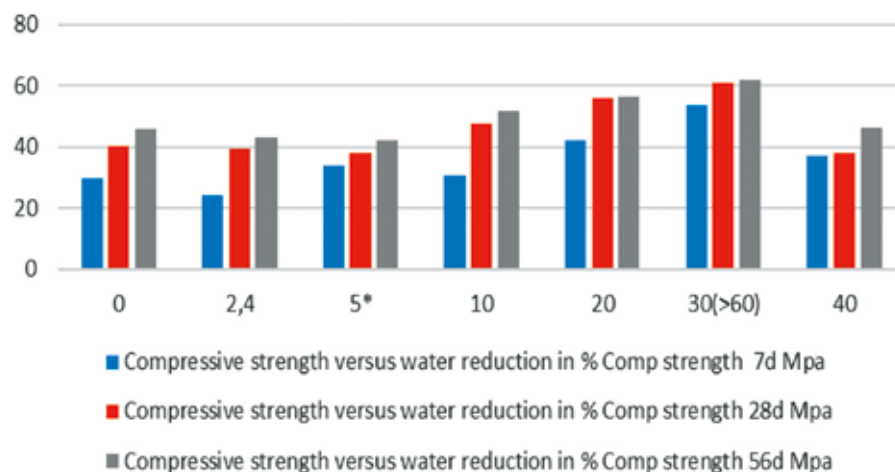


FIGURE 11

COMPRESSIVE STRENGTH (MPa) VERSUS % WATER REDUCTION

SOURCE: AUTHOR'S OWN ELABORATION

coarse aggregate content, which provides an even higher content of coarse aggregates, potentially leading to higher strengths than those found in this study. In HSC, the amount of coarse aggregate notably favors the compressive strength according to ACI 363 (3), the rest of the dosage is achieved using the methodology of ACI 211.1 (2) used. We hope this work will open up a range of research that can lead to more precise dosing methods. Using the same percentage of admixture as for SCC, greater compressive strength can be achieved by reducing the water content and dosing the remaining

components as if it were conventional concrete. This results in water reductions of 10, 20, and 30 percent higher than those of SCC concrete and the reference concrete considered with 0% water reduction. And it achieved strengths that qualify them as HSC.

ACKNOWLEDGMENTS

My thanks to the Faculty of Engineering FIUNA, the National University of Asunción; the Higher Technical School of Building Construction at the Polytechnic University of Madrid, the Carolina Foundation, my advisor and Technician Enrique Ruano. ☺

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[Segundo a ABNT NBR 6023]

- [1] ROJAS, R.A. Simplifying the Design of a Self-Compacting Concrete. Revista ABE, Advances in Building Education- Innovación Educativa en Edificación. DOI:https://doi.org/10.20868/abe.2025.1.5454. 2025
- [2] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, Committee 211 "Standard Practice for Selecting Pro-portions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete", USA, 1993.
- [3] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, Committee 363 "High - Strength Concrete", USA, 1993.
- [4] Zerbino, R.; Barragán, B.; Agulló, L.; García, T. & Gettu, R. "Reología de Hormigones autocompactantes", Ciencia y Tecnología del Hormigón N° 13, pp. 53-64. 2006. Faculty of Engineering and Physical Sciences. University of Surrey. Guildford, Surrey, UK.
- [5] ANDECE, ANFAH, ANEFHOP, IECA, BIBM, CEMBUREAU, EFCA, EFNARC & ERMCO. Directrices Europeas para el HAC. Especificaciones, Producción y Uso. Grupo de Proyecto Europeo (GPE) del HAC. 2005. Traducido al Español en el 2006.
- [6] ROJAS, R.A. "Los Hormigones Especiales-Sabiendo cómo innovar en Concreto". Imprenta Yolysuitter. Asunción. 2024.
- [7] Tutikian, B., & Dal Molin, D. (2015). Concreto autoadensável. 2ª ed. São Paulo: Editora PINI.
- [8] Mehta & Monteiro, 2008. Concreto. Propiedades e Infraestructura. IBRACON, Sao Paulo,
- [9] Sika. Manual del Hormigón. Madrid and Sika Solutions for Sustainable Concrete (s/a).
- [10] IRAM-Normas Argentinas 1548/71 y 1568/71. Buenos Aires. NBR 7217/87. Composición Granulométrica. Norma Brasileira. Brasil. UNE-Normas Españolas 83-109/85, 83-133/90, 83-134/90, 83-304/84. INTN Normas Paraguayas. Asunción.

Utilização do pó da casca de melancia como **substituinte parcial do cimento Portland** em argamassas

DIEGO DORNELAS DIOGO - PROF. - <https://orcid.org/0009-0006-0597-9803> — Centro Universitário Geraldo Di Biase (UGB)

RESUMO

A CRESCENTE DEMANDA POR MATERIAIS SUSTENTÁVEIS NA CONSTRUÇÃO CIVIL TEM INCENTIVADO A BUSCA POR RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS QUE POSSAM SER REAPROVEITADOS COMO INSUMOS ALTERNATIVOS. ESTE TRABALHO AVALIA A VIABILIDADE DO USO DO PÓ DA CASCA DE MELANCIA (*CITRULLUS LANATUS*) COMO SUBSTITUINTE PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND EM ARGAMASSAS, CONSIDERANDO SEUS EFEITOS NA TRABALHABILIDADE, NA ABSORÇÃO DE ÁGUA E NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO. FORAM REALIZADOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS COM TEORES DE SUBSTITUIÇÃO VARIANDO DE 0% A 10% EM MASSA DO CIMENTO. OS RESULTADOS INDICARAM QUE A INCORPORAÇÃO DO RESÍDUO INFLUENCIA DIRETAMENTE O COMPORTAMENTO DAS ARGAMASSAS, COM LEVE INCREMENTO DE RESISTÊNCIA PARA 1% DE SUBSTITUIÇÃO E MANUTENÇÃO DE DESEMPENHO MECÂNICO EM TEORES ATÉ APROXIMADAMENTE 7%, QUANDO COMPARADOS À ARGAMASSA DE REFERÊNCIA. PARA TEORES SUPERIORES, OBSERVOU-SE REDUÇÃO SIGNIFICATIVA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, ASSOCIADA AO AUMENTO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA E DO ÍNDICE DE VAZIOS. OS RESULTADOS OBTIDOS REFEREM-SE ÀS CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS ADOTADAS E INDICAM QUE O PÓ DA CASCA DE MELANCIA PODE SER EMPREGADO EM SUBSTITUIÇÕES LIMITADAS, ESPECIALMENTE EM APLICAÇÕES NÃO ESTRUTURAIS, CONTRIBUINDO PARA A VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS E PARA A REDUÇÃO DO CONSUMO DE CIMENTO.

PALAVRAS-CHAVE: ARGAMASSA SUSTENTÁVEL, RESÍDUO AGROINDUSTRIAL, CASCA DE MELANCIA, SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO, CONSTRUÇÃO CIVIL.

1. INTRODUÇÃO

Na busca por atender às crescentes demandas por infraestrutura, a construção civil consolidou-se como um dos setores industriais de maior impacto ambiental, tanto pelo elevado consumo de recursos naturais quanto pela expressiva geração de

resíduos sólidos e emissões atmosféricas. Entre os principais responsáveis por esse impacto, destaca-se o cimento Portland, cuja produção representa aproximadamente 8% das emissões globais de dióxido de carbono (SCRIVENER *et al.*, 2018), além de demandar grandes quantidades de energia e matérias-primas minerais.

Nesse contexto, a substituição parcial do cimento por materiais alternativos tem sido amplamente investigada como estratégia para reduzir custos, minimizar impactos ambientais e promover práticas alinhadas aos princípios da sustentabilidade e da economia circular (MALHOTRA, 2002). Resíduos agroindustriais, em especial, vêm se destacando por apresentarem disponibilidade abundante, baixo custo e potencial para atuar como adições ou substituições minerais em concretos e argamassas (ARAÚJO *et al.*, 2022).

Entre esses resíduos, a casca de melancia (*Citrullus lanatus*), constitui um subproduto amplamente descartado no Brasil, com elevado volume de geração e reduzido aproveitamento industrial. Do ponto de vista químico e estrutural, esse material apresenta composição rica em celulose, lignina, hemicelulose e sais minerais, além de partículas finas com potencial de atuar como microfíler e, parcialmente, como material pozolânico (NASCIMENTO *et al.*, 2020; LOPES *et al.*, 2023). Estudos recentes indicam que a incorporação controlada de resíduos orgânicos na matriz cimentícia pode melhorar a trabalhabilidade, reduzir a porosidade e, em determinados teores, manter ou até elevar a resistência mecânica dos compósitos (SULTANA *et al.*, 2019; VIERA *et al.*, 2021; SILVA *et al.*, 2022). Contudo, a presença de matéria orgânica também pode interferir negativamente na

hidratação do cimento e comprometer a durabilidade quando utilizada em proporções excessivas, o que torna essencial a avaliação experimental criteriosa de cada resíduo e de seus teores de substituição.

Diante desse contexto, este trabalho tem como objetivo geral avaliar a viabilidade técnica e ambiental do uso do pó da casca de melancia como adição alternativa na fabricação de argamassas, por meio da substituição parcial do cimento Portland. Como objetivos específicos, pretende-se: (i) analisar a influência do pó da casca de melancia na trabalhabilidade da argamassa, por meio do ensaio de consistência (abatimento); (ii) avaliar o efeito da substituição parcial do cimento na absorção de água e nos índices de porosidade, como indicadores de durabilidade; (iii) determinar a variação da resistência à compressão em função dos diferentes teores de substituição; e (iv) identificar o intervalo de substituição mais adequado, que concilie desempenho mecânico satisfatório e benefícios ambientais.

2. METODOLOGIA

2.1 Materiais utilizados

Neste trabalho foram utilizados os seguintes materiais, conforme ilustrado na figura 1:

- Cimento Portland CPIII-32 CSN, fabricado conforme a ABNT NBR 16697 (2018), adequado para a produção de argamassas de uso geral;
- Agregado miúdo (areia lavada), proveniente de jazida local, com granulometria adequada para uso em argamassas, conforme recomendações da ABNT NBR 13276 (2016), garantindo adequada trabalhabilidade e resistência mecânica;



FIGURA 1

MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA

FONTE: AUTOR

- ▶ Água potável, utilizada para amassamento, em conformidade com as recomendações da ABNT NBR 13276 (2016); e
- ▶ As cascas de melancia foram inicialmente lavadas, fragmentadas e submetidas à secagem em estufa a 60 °C por 24 h,



FIGURA 2

MISTURA DOS MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA

FONTE: AUTOR

com o objetivo de reduzir o teor de umidade livre. Em seguida, o material foi submetido a aquecimento em mufla a 200 °C por 1 h, caracterizando um processo de secagem avançada, sem atingir temperaturas típicas de calcinação. Esse tratamento térmico moderado foi adotado visando promover maior estabilidade física do resíduo, reduzir sua higroscopicidade e facilitar sua moagem, possibilitando a obtenção de partículas com granulometria compatível com a matriz cimentícia. Procedimentos semelhantes são relatados na literatura para resíduos agroindustriais utilizados como adições em materiais cimentícios, nos quais o aquecimento prévio é empregado principalmente para remoção de umidade residual e melhoria da dispersão do material na mistura (ZHANG *et al.*, 2020; LOPES *et al.*, 2023).

2.2 Preparação das misturas

Foram preparados traços de argamassa com substituição parcial do cimento Portland pelo pó da casca de melancia calcinada, nos seguintes teores em massa:

0% (referência), 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 7%, 8%, 9% e 10%.

A relação água/cimento foi mantida constante em 0,48 para todas as misturas, de modo a isolar o efeito da substituição do cimento pelo pó da casca de melancia sobre o comportamento da argamassa.

A mistura foi realizada em misturador mecânico, conforme procedimento estabelecido

na ABNT NBR 13276 (2016). Inicialmente, os materiais secos (cimento, areia e pó da casca) foram homogeneizados por 2 minutos. Em seguida, adicionou-se água de amassamento, mantendo-se a mistura por mais 3 minutos até obtenção de uma argamassa homogênea, conforme ilustra a Figura 2.

2.3 Moldagem e cura dos corpos de prova

Foram moldados corpos de prova cilíndricos com dimensões de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, em quatro exemplares para cada traço, totalizando 44 corpos de prova.

A moldagem e a compactação foram realizadas manualmente, por meio de adensamento em camadas com haste padrão, conforme recomendações da ABNT NBR 13279 (2016).

Após a moldagem, os corpos de prova permaneceram em ambiente controlado, com temperatura de 27 ± 3 °C e umidade relativa superior a 80%, por um período de 24 horas. Em seguida, foram desmoldados e submetidos à cura úmida em tanque com água potável a 20 ± 5 °C, permanecendo imersos por 33 dias até a realização dos ensaios mecânicos, conforme ilustra a figura 3.



FIGURA 3

CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS

FONTE: AUTOR

2.4 Ensaios realizados

2.4.1 CONSISTÊNCIA DA ARGAMASSA

A consistência da argamassa fresca foi avaliada por meio da determinação do índice de consistência, conforme procedimento descrito na ABNT NBR 13276 (2016), com o objetivo de analisar a influência do pó da casca de melancia na trabalhabilidade da mistura.

Os valores obtidos no ensaio de consistência foram utilizados como parâmetro comparativo entre os diferentes teores de substituição do cimento pelo pó da casca de melancia.

2.4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O ensaio de resistência à compressão foi realizado aos 33 dias de idade, conforme a ABNT NBR 13279 (2016).

Os corpos de prova foram ensaiados em prensa hidráulica, com aplicação de



FIGURA 4

ENSAIO DE COMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA

FONTE: AUTOR

TABELA 1

ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÍNDICE DE VAZIOS

Média das Amostras	M _{sat} (g)	M _s (g)	M _i (g)	Absorção (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica da amostra seca (g/cm³)
TR	447,6	435,9	238,6	2,6	5,6	2.085
T1	452,5	440,0	241,5	2,8	5,9	2.085
T2	464,0	450,8	250,2	2,9	6,1	2.108
T3	468,1	454,2	244,0	3,0	6,2	2.026
T4	436,2	422,2	211,2	3,3	6,2	1.876
T5	430,5	416,5	205,4	3,3	6,2	1.850
T6	433,4	418,4	211,4	3,5	6,7	1.884
T7	428,7	410,1	198,2	4,5	8,0	1.779
T8	426,0	405,5	186,9	5,0	8,5	1.695
T9	391,7	366,2	110,4	6,9	9,0	1.301
T10	358,8	335,1	107,9	7,0	9,4	1.333

FONTE: AUTOR

carga contínua e crescente até a ruptura, sendo registrada a tensão máxima suportada por cada amostra (Figura 4). Para cada traço, foram considerados três valores válidos, desconsiderando-se o menor resultado, conforme procedimento adotado para controle estatístico básico.

2.4.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA

A absorção de água foi determinada segundo a ABNT NBR 9778 (2005), com o objetivo de avaliar a porosidade aparente e a susceptibilidade da argamassa à penetração de água, parâmetros diretamente relacionados à durabilidade do material.

Os valores obtidos foram utilizados para comparar o comportamento das argamassas com diferentes teores de substituição.

2.5 Procedimentos de controle e tratamento dos dados

Todos os ensaios foram realizados em triplicata, garantindo repetibilidade e confiabilidade estatística básica. Os resultados foram organizados em tabelas e analisados de forma comparativa, considerando a argamassa de referência (0%) como parâmetro base para avaliação do efeito do pó da casca de melancia.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Consistência e trabalhabilidade

Os valores de abatimento obtidos no ensaio de consistência indicam que a incorporação do pó da casca de melancia influenciou diretamente a trabalhabilidade da argamassa fresca. Para baixos teores de substituição, observou-se um leve aumento no abatimento em relação à argamassa de referência, evidenciando melhoria da fluidez da mistura.

Esse comportamento pode ser atribuído à elevada capacidade de retenção hídrica do pó da casca, que favorece a liberação gradual de água durante a mistura, promovendo maior coesão e plasticidade da pasta. Tal efeito é compatível com o observado por Lopes *et al.* (2023) e Sultana *et al.* (2019), que reportam aumento de trabalhabilidade em argamassas contendo resíduos vegetais finamente moídos.

Entretanto, para teores de substituição mais elevados, verificou-se redução progressiva do abatimento. Esse resultado está associado ao aumento da fração de partículas orgânicas finas, que passam a absorver parte significativa da água de amassamento, elevando a viscosidade da mistura e dificultando o escoamento. Resultados semelhantes foram relatados por Silva *et al.* (2022) e Araújo *et al.* (2022).

Cabe destacar que os ensaios foram conduzidos mantendo-se constante a relação água/cimento ($a/c = 0,48$), conforme definido na metodologia. Dessa forma, não foram empregados aditivos plastificantes nem ajustes adicionais de água, o que permite atribuir as variações observadas exclusivamente à presença do pó da casca de melancia. Essa condição experimental, embora adequada para análise comparativa, constitui uma limitação do estudo, uma vez que, em aplicações práticas, ajustes no teor de água ou uso de aditivos poderiam mitigar perdas de trabalhabilidade em teores elevados de substituição.

3.2 Absorção de água e durabilidade

Os resultados do ensaio de absorção de água, apresentados na Tabela 1 e ilustrados na Figura 5, evidenciam uma tendência de aumento progressivo da absorção e do índice de vazios com o incremento do teor de pó da casca de melancia nas argamassas. A mistura de referência (TR) apresentou absorção de 2,6% e índice de vazios de 5,6%, enquanto as formulações com maiores teores de substituição (T9 e T10) atingiram valores de absorção de até 6,9% e 7,0%, acompanhados de índices de vazios de 9,0% e 9,4%, respectivamente.

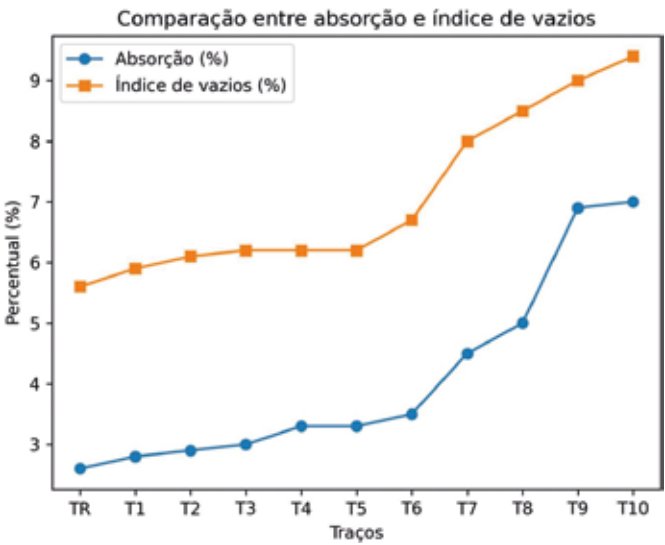


FIGURA 5
ABSORÇÃO DE ÁGUA X ÍNDICE DE VAZIOS
FONTE: AUTOR

Apesar do crescimento gradual desses parâmetros, todos os valores de absorção permaneceram dentro dos limites estabelecidos pela ABNT NBR 9778 (2005), indicando que, do ponto de vista normativo, as argamassas avaliadas apresentam comportamento compatível com materiais cimentícios convencionais. Observa-se, contudo, que o aumento do índice de vazios acompanha de forma coerente o acréscimo da absorção de água, evidenciando a relação direta entre a porosidade aberta da matriz e a capacidade de incorporação de água.

Esse comportamento pode ser atribuído, principalmente, à natureza higroscópica do pó da casca de melancia, cuja estrutura fibrosa e composição orgânica favorecem a retenção de água no interior da matriz cimentícia. Além disso, a redução progressiva da massa específica da amostra seca, especialmente a partir da mistura T4, reforça a hipótese de aumento da porosidade global do sistema, possivelmente associada à formação de microcanais e à maior conectividade dos poros quando a dispersão do material não ocorre de forma plenamente homogênea (VIERA *et al.*, 2021).

Por outro lado, nos teores mais baixos de incorporação (T1 a T3), observa-se um aumento discreto da absorção e do índice de vazios, sugerindo a atuação de um efeito microfíler, no qual as partículas finas do pó contribuem para o preenchimento parcial dos vazios da matriz cimentícia. Esse efeito pode limitar a conectividade dos poros capilares e, consequentemente, atenuar o avanço da permeabilidade do material, conforme discutido por Lopes *et al.* (2023) e Gonçalves *et al.* (2021).

De modo geral, os resultados indicam que a incorporação do pó da casca de melancia influencia diretamente a

TABELA 2
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS AMOSTRAS

Porcentagem	Corpos de prova	Tensão de ruptura (MPa)
0%	TR - am1	34,9
0%	TR - am2	35
0%	TR - am3	39,6
MÉDIA 36,5		
1%	T1% - am1	35,5
1%	T1% - am2	38,3
1%	T1% - am3	39,2
MÉDIA 37,67		
2%	T2% - am1	33,4
2%	T2% - am2	35,2
2%	T2% - am3	33,5
MÉDIA 34,03		
3%	T3% - am1	31,6
3%	T3% - am2	30,6
3%	T3% - am3	34,6
MÉDIA 32,27		
4%	T4% - am1	32,4
4%	T4% - am2	33,8
4%	T4% - am3	36,2
MÉDIA 34,13		
5%	T5% - am1	34,4
5%	T5% - am2	34,5
5%	T5% - am3	33,5
MÉDIA 34,13		
6%	T6% - am1	29,5
6%	T6% - am2	30,4
6%	T6% - am3	23,8
MÉDIA 27,9		
7%	T7% - am1	31,2
7%	T7% - am2	35,1
7%	T7% - am3	31,5
MÉDIA 32,6		
8%	T8% - am1	31,7
8%	T8% - am2	27,9
8%	T8% - am3	32
MÉDIA 30,53		
9%	T9% - am1	21,8
9%	T9% - am2	22,7
9%	T9% - am3	21
MÉDIA 21,83		
10%	T10% - am1	21,5
10%	T10% - am2	20,1
10%	T10% - am3	21
MÉDIA 20,87		

FONTE: AUTOR

microestrutura das argamassas, promovendo alterações graduais na porosidade e na absorção de água. Entretanto, até os teores máximos analisados, o desempenho observado permanece compatível com os requisitos normativos, evidenciando o potencial do material como adição alternativa em matrizes cimentícias, desde que controlados os percentuais de substituição.

3.3 Resistência à compressão

Os resultados de resistência à compressão aos 33 dias, apresentados na Tabela 2 e na Figura 6, evidenciam que a substituição parcial do cimento por pó da casca de melancia influencia diretamente o desempenho mecânico das argamassas, em consonância com as alterações observadas nas propriedades físicas, especialmente na absorção de água e no índice de vazios. A argamassa de referência (0%) apresentou resistência média de 36,50 MPa, associada a baixos valores de absorção (2,6%) e índice de vazios (5,6%), conforme discutido no capítulo anterior.

Para o teor de 1% de substituição, verificou-se incremento da resistência média para 37,67 MPa, comportamento

que se mostra coerente com o discreto aumento da absorção e do índice de vazios observado nessa composição. Esse resultado indica que, em baixos teores, a incorporação do pó da casca de melancia favorece a densificação da matriz cimentícia, possivelmente em função do efeito microfiller, no qual partículas finas promovem o preenchimento de vazios e a redução da porosidade capilar efetiva (SULTANA *et al.*, 2019; NASCIMENTO *et al.*, 2020). Adicionalmente, a literatura aponta que resíduos vegetais finamente moídos podem apresentar frações minerais residuais, o que pode contribuir de forma limitada para a compactação da matriz, embora no presente estudo não tenham sido realizados ensaios específicos para confirmar reações químicas secundárias (ZHANG *et al.*, 2020).

Nos teores intermediários de substituição (2% a 7%), os valores médios de resistência à compressão mantiveram-se próximos aos da argamassa de referência, variando entre 32,27 MPa e 34,13 MPa. Esse comportamento é compatível com os resultados de absorção de água e índice de vazios, que, embora apresentem tendência de aumento, ainda se mantêm em patamares moderados. Tal equilíbrio sugere que, nesse intervalo, os efeitos físicos de preenchimento parcial de vazios podem compensar parcialmente o aumento da porosidade global, resultando em desempenho mecânico satisfatório e estatisticamente próximo ao material de referência, conforme indicado pelos intervalos de

% . Resultados semelhantes são reportados por Lopes *et al.* (2023) e Gonçalves *et al.* (2021) em estudos com resíduos agrícolas finamente moídos.

Entretanto, para teores iguais ou superiores a 8%, observa-se queda acentuada da resistência à compressão, acompanhando o aumento expressivo da absorção de água e do índice de vazios discutidos anteriormente. As argamassas com 9% e 10% de substituição apresentaram resistências médias inferiores a 22 MPa, associadas a elevados índices de vazios, o que evidencia a deterioração da microestrutura da matriz cimentícia. Esse comportamento pode ser atribuído ao aumento da fração orgânica, que tende a intensificar a higroscopicidade do sistema, elevar a conectividade dos poros e reduzir a quantidade efetiva de ligante hidráulico disponível, interferindo negativamente na coesão interna do material (SILVA *et al.*, 2022).

Assim, a análise conjunta das propriedades físicas e mecânicas indica que a incorporação do pó da casca de melancia promove alterações graduais na microestrutura das argamassas. Em baixos teores, predominam mecanismos físicos de densificação e preenchimento de vazios, enquanto em teores elevados o aumento da porosidade e da absorção de água passa a governar o comportamento mecânico, resultando em perdas significativas de resistência.

Os ensaios foram realizados em corpos de prova cilíndricos de 50 × 100 mm, sob condições de cura controladas, representando o comportamento do material em escala laboratorial. Dessa forma, embora os resultados forneçam indicativos consistentes da relação entre porosidade e resistência, recomenda-se cautela na extrapolação direta para aplicações em escala real.

3.4 Síntese dos resultados e implicações técnicas e ambientais

De forma integrada, os resultados indicam que o pó da casca de melancia

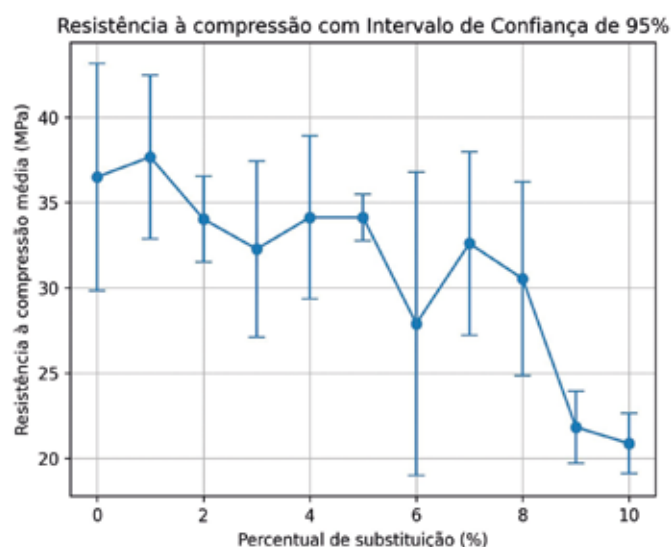


FIGURA 6

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO COM INTERVALO DE CONFIANÇA DE 95%

FONTE: AUTOR

pode ser incorporado à argamassa em teores moderados sem comprometer suas propriedades fundamentais. O intervalo de substituição entre 1% e 7% mostrou-se tecnicamente viável, conciliando resistência mecânica satisfatória, trabalhabilidade adequada e absorção de água dentro de limites aceitáveis.

Do ponto de vista ambiental, a substituição parcial do cimento contribui diretamente para a redução das emissões de CO₂ associadas à produção do cimento Portland, além de promover a valorização de um resíduo agroindustrial amplamente descartado. Essa abordagem está alinhada aos princípios da economia circular e da construção sustentável.

Entretanto, o estudo apresenta limitações inerentes à escala laboratorial, ao número restrito de parâmetros de durabilidade avaliados e à ausência de ensaios de longo prazo. Dessa forma, recomenda-se que investigações futuras explorem diferentes relações água/cimento, o uso combinado de aditivos químicos, ensaios de durabilidade acelerada e avaliações microestruturais, visando ampliar a compreensão do comportamento do material em condições reais de serviço.

4. CONCLUSÃO

O presente estudo avaliou experimentalmente a incorporação do pó da casca de melancia como substituinte parcial do cimento Portland em argamassas, considerando os parâmetros de trabalhabilidade, absorção de água e resistência à compressão, em condições controladas de laboratório.

Os resultados indicaram que a substituição de 1% do cimento pelo pó da casca de melancia promoveu leve incremento da resistência à compressão em relação à argamassa de referência, comportamento associado principalmente a efeitos físicos de preenchimento de vazios. Para teores de substituição entre 2% e 7%, os valores de resistência permaneceram próximos aos do traço de referência, indicando que, nesse intervalo, a incorporação do resíduo não compromete de forma significativa o desempenho mecânico da argamassa.

Para teores superiores a 8%, observou-se redução acentuada da resistência à compressão, acompanhada por aumento da absorção de água e do índice de vazios, comportamento atribuído à maior fração orgânica do material e à sua elevada capacidade de retenção hídrica.

No que se refere à trabalhabilidade, verificou-se que baixos teores de substituição favoreceram discretamente a fluidez da mistura, enquanto teores mais elevados resultaram em perda progressiva de consistência, em função da absorção de água pelo resíduo.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que a incorporação do pó da casca de melancia em argamassas é tecnicamente viável em substituições limitadas, particularmente em torno de 1%, podendo ser estendida até aproximadamente 7% sem prejuízos relevantes às propriedades avaliadas, desde que destinada a aplicações não estruturais e mantidas as condições de dosagem e cura adotadas neste estudo.

Ressalta-se que as conclusões se restringem às condições experimentais investigadas, não tendo sido realizada caracterização físico-química do resíduo nem ensaios de durabilidade de longo prazo. Estudos futuros devem contemplar a caracterização do material, diferentes relações água/cimento, o uso de aditivos químicos e análises microestruturais, a fim de ampliar a compreensão do comportamento do composto em condições reais de serviço. 

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ARAÚJO, R. S. et al. Potential use of agro-industrial wastes in sustainable construction materials: A review. *Journal of Cleaner Production*, v. 345, p. 130-985, 2022.
- [2] GONÇALVES, L. F. et al. Influence of agricultural residues on concrete mechanical properties and durability. *Materials Today: Proceedings*, v. 45, p. 5614-5620, 2021.
- [3] LOPES, M. R. et al. Effect of watermelon peel powder addition on the properties of concrete: Mechanical and durability assessment. *Construction and Building Materials*, v. 313, p. 125457, 2023.
- [4] MALHOTRA, V. M. Sustainable construction materials: A comprehensive review. *Cement and Concrete Composites*, v. 24, n. 2, p. 127-138, 2002.
- [5] NASCIMENTO, T. M. et al. Characterization of watermelon peel waste and its potential as supplementary cementitious material. *Journal of Cleaner Production*, v. 253, p. 119-745, 2020.
- [6] SCRIVENER, K. L. et al. Cement production and CO₂ emissions - sustainability challenges and solutions. *Cement and Concrete Research*, v. 114, p. 2-26, 2018.
- [7] SILVA, P. R. et al. Influence of organic residues on cement hydration and concrete properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 34, n. 6, p. 040-210-56, 2022.
- [8] SULTANA, R. et al. Impact of natural fibers on the mechanical properties of concrete composites. *Construction and Building Materials*, v. 223, p. 238-247, 2019.
- [9] VIERA, A. C. et al. Water absorption and microstructural analysis of concretes with agricultural waste additions. *Construction and Building Materials*, v. 279, p. 122-489, 2021.
- [10] ZHANG, Y. et al. Pozzolanic activity of agricultural waste ashes and their impact on concrete properties. *Journal of Materials Science*, v. 55, n. 18, p. 7890-7903, 2020.

Desempenho do bioconcreto com a bactéria *Bacillus subtilis*

ANTÔNIA MARIANA A. DO NASCIMENTO - GRAD. - <https://orcid.org/0009-0003-8880-4838> - (mariana.nascimento@fas.edu.br) ;

CRISTIANNE BITENCOURT MOURA - ENG. - <https://orcid.org/0009-0001-3654-8989> ;

FRANCISCO ELDER DE SOUZA SANTANA - ENG. - <https://orcid.org/0009-0009-4100-1900> ;

FRANCISCA LILIAN CRUZ BRASILEIRO - ENG. - <https://orcid.org/0000-0002-4030-1321> - UNIAri

CLARICE JORDÂNIA RIBEIRO DE PAIVA - ENG. - <https://orcid.org/0009-0005-7504-4125> - UFC

RESUMO

ESTE ARTIGO APRESENTA OS PRINCIPAIS PROCESSOS E RESULTADOS DE UM ESTUDO DE CARÁTER EXPLORATÓRIO VOLTADO À AVALIAÇÃO DO BIOCONCRETO PRODUZIDO COM *BACILLUS SUBTILIS*, COMPARADO AO CONCRETO CONVENCIONAL. O ESTUDO ANALISA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, ABSORÇÃO DE ÁGUA E CAPACIDADE DE AUTOCICATRIZAÇÃO, VISANDO REDUZIR CUSTOS DE MANUTENÇÃO E AMPLIAR A DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS. FORAM MOLDADOS CORPOS DE PROVA COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DA SOLUÇÃO BACTERIANA E UM TRACÇO DE REFERÊNCIA. A AUTOCICATRIZAÇÃO OCORRE QUANDO BACTÉRIAS EM ESTADO LATENTE, ATIVADAS PELA UMIDADE DAS FISSURAS, GERAM CARBONATO DE CÁLCIO (CaCO_3), MATERIAL QUE PREENCHE E SELA AS ABERTURAS. COMO RESULTADO PARCIAL, VERIFICOU-SE A PRESENÇA E ATIVIDADE DA *BACILLUS SUBTILIS* NOS PROBIÓTICOS IMPREGNADOS EM VERMICULITA, POR MEIO DE ANÁLISE MICROSCÓPICA. A ETAPA DE PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA FOI CONCLUÍDA E OS ENSAIOS EXECUTADOS ATÉ O MOMENTO DEMONSTRAM DESEMPENHO SATISFATÓRIO NA MAIOR PARTE DOS PARÂMETROS AVALIADOS.

PALAVRAS-CHAVE: *BACILLUS SUBTILIS*, AUTOCICATRIZAÇÃO, FISSURAS.

1. INTRODUÇÃO

O concreto é o material de maior relevância na construção civil e desde a sua descoberta, no final no século XIX, a crescente aplicação deste material o posicionou como um dos recursos mais essenciais para a humanidade.

Tendo em vista a relevância do concreto, o aprimoramento de métodos que prolonguem sua vida útil e durabilidade é indispensável. Prolongar a vida útil deste material está intrinsecamente relacionado à prevenção de manifestações patológicas,

sendo o surgimento de fissuras a principal anomalia. Tais descontinuidades podem originar-se por diversas causas, como falhas no processo de cura, retração hidráulica, variações de temperatura e umidade do ar, presença de agentes agressivos, sobrecarga, erros de projeto e/ou execução etc. (Koga, 2020). Embora fissuras em idades iniciais possam não representar riscos estruturais iminentes, elas funcionam como portas de entrada para agentes agressivos.

A presença de porosidade e permeabilidade excessivas facilita a penetração de cloretos, sulfatos e ácidos, que desencadeiam a degradação da matriz cimentícia e a corrosão prematura da armadura, comprometendo a integridade dos elementos de concreto armado, o que prejudica a durabilidade da estrutura a longo prazo (Jonkers, 2011). Diante das limitações dos métodos convencionais de reparo, que, muitas vezes, possuem alto custo e difícil acesso, a tecnologia de materiais autocicatrizantes surge como uma solução disruptiva.

Dentro dessa vertente, destaca-se o estudo das bactérias do gênero *Bacillus*, que são capazes de secretar substâncias que cristalizam, formando calcário dentro de poros e fissuras, o que promove a autorregeneração do concreto. O gênero *Bacillus* consome o hidróxido solúvel e, através do seu metabolismo, produz carbonato de cálcio (CaCO_3), preenchendo os poros do concreto e aumentando sua resistência mecânica, conforme preconiza Costa e Rodrigues (2018). Os autores descrevem ainda que as fissuras das primeiras idades são eliminadas em cerca de três semanas nos concretos com as bactérias do gênero *Bacillus*.

Portanto, o presente trabalho tem como objetivo analisar o desempenho do biocon-

creto (concreto que utiliza bactérias para promover a autocicatrização), com a bactéria *Bacillus subtilis*, em relação ao concreto convencional, avaliando comparativamente a resistência à compressão, a absorção de água e a capacidade de autocicatrização de fissuras, como ferramenta de redução de custos de manutenção e promoção da sustentabilidade na construção civil.

2. DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento apresenta a metodologia, os materiais empregados, os procedimentos adotados, a produção dos corpos de prova e os ensaios realizados.

2.1 Metodologia

O presente trabalho adota uma abordagem quantitativa, pautada em ensaios laboratoriais para obtenção de dados numéricos. Ademais, devido à natureza desta pesquisa, o estudo possui caráter exploratório e preliminar, voltado à identificação de tendências no comportamento do bioconcreto.

Ressalta-se que, diante das limitações de recursos e da complexidade do agente biológico, a análise foca na viabilidade técnica do método de impregnação. Assim, os resultados servem como indicadores para o desenvolvimento de protocolos experimentais mais robustos em pesquisas futuras.

2.2 Materiais e procedimentos

Para a execução da pesquisa, foram utilizados os seguintes materiais: Cimento Portland CP II F 32, areia média de rio como agregado miúdo, brita 2 como agregado graúdo, *Bacillus subtilis* QST 71 na concentração 13,68g/l através do probiótico

TABELA 1
PROPRIEDADES DOS MATERIAIS UTILIZADOS

Agregados	Propriedades	Valores	Método de ensaio	Fonte
Areia fina	Massa específica	2,604 g/cm ³	NBR 16916:2021	Autores
	Massa unitária	1,470 g/cm ³	NBR 16972:2021	Autores
	Módulo de finura	2,63	NBR 17054:2022	Autores
Brita 02	Massa específica	2,560 g/cm ³	NBR 16917:2021	Autores
	Massa unitária	1,472 g/cm ³	NBR 16972:2021	Autores
	DMC	25 mm	NBR 17054:2022	Autores
Argila expandida	Massa específica	0,77632 g/cm ³	NBR 16917:2021	Diniz (2022)
	Massa unitária	0,47586 g/cm ³	NBR 16972:2021	Diniz (2022)
	DMC	25 mm	NBR 17054:2022	Diniz (2022)
Cimento CP II-F- 32	Massa específica	3,000 g/cm ³	NBR 16605:2017	Fabricante

FONTE: AUTORES (2024)

denominado de *Serenade*, lactato de cálcio, ureia, argila expandida do tipo 2215, e vermiculita. Todos os materiais foram fornecidos pelo Laboratório de Materiais de Construção do Centro Universitário Ari de Sá.

O presente estudo utilizou o método aplicado por Mello e Santiago (2020) de empregar um produto que já contém a bactéria, a saber: *Bacillus subtilis* QST 713, contida no probiótico *Serenade*. A ativação da bactéria foi realizada a partir do lactato de cálcio e da ureia, e a solução bacteriana foi impregnada na argila expandida.

Os agregados, miúdo e graúdo, foram submetidos aos ensaios pertinentes para obtenção das propriedades necessárias para posterior utilização nas dosagens dos traços. A Tabela 1 sintetiza os valores obtidos.

Para verificação da existência da bactéria *Bacillus subtilis* nos probióticos *Serenade* (Figura 1), realizou-se um teste preliminar com a impregnação da bactéria em partículas de vermiculita. A vermiculita é um silicato hidratado de ferro, alumínio e magnésio, que possui características que se assemelham às da argila expandida.

- O procedimento adotado, em consonância com Mello e Santiago (2020) foi:
- (i) aquecimento de 800 ml de água próximo à ebulição, seguido de resfriamento por 10 minutos;
 - (ii) adição de 2 g de ureia e mistura até a dissolução;
 - (iii) retirada de 20 ml da solução e adição de 8 ml do produto *Serenade*, gerando uma solução bacteriana (com ureia e lactato de cálcio) de 28 ml;
 - (iv) homogeneização da solução;
 - (v) adição gradual de 8 g de vermiculita até a mistura apresentar aspecto pastoso (Figura 2). A vermiculita impregnada com bactérias permaneceu em repouso por 12 dias.
- O procedimento foi realizado para os quatro frascos do probiótico *Serenade*.

2.3 Verificação da atividade bacteriana

Como resultados, foi constatada a atividade bacteriana nos probióticos utilizados, tanto por meio da análise visual (Figura 3) quanto por meio da análise realizada via microscópio Marte MIC-100 Bino-cular (Figura 4).

Na Figura 4, tem-se a análise microscópica da vermiculita sem impregnação bacteriana e na Figura 5, com impregnação bacteriana, onde é possível ver a aglutinação da vermiculita. Além disso, através da utilização do microscópio com ampliação



FIGURA 1
PROBIÓTICOS SERENADE TESTADOS
FONTE: AUTORES (2024)



FIGURA 2
VERMICULITAS IMPREGNADAS COM A SOLUÇÃO BACTERIANA
FONTE: AUTORES (2024)



FIGURA 3
COMPARATIVO VISUAL DA VERMICULITA IMPREGNADA E NÃO IMPREGNADA
FONTE: AUTORES (2024)

de 40x retrátil com abertura numérica n.a 0,65, distância de trabalho w.d. 0.10 mm, foi possível identificar a presença dos microrganismos em atividade.

Logo, a comprovação da atividade bacteriana nesta fase preliminar foi de fundamental importância, demonstrando a viabilidade do agente biológico. Ademais, a análise visual e microscópica comprovou que a bactéria se manifesta com poucos dias de impregnação, promovendo o efeito no concreto.

2.4 Dosagem dos traços

O traço de referência da pesquisa foi definido a partir do método de dosagem da Associação Brasileira Cimento Portland (ABCP). Sua composição, em massa, foi



FIGURA 4
ANÁLISE MICROSCÓPICA – VERMICULITA SEM IMPREGNAÇÃO BACTERIANA
FONTE: AUTORES (2024)

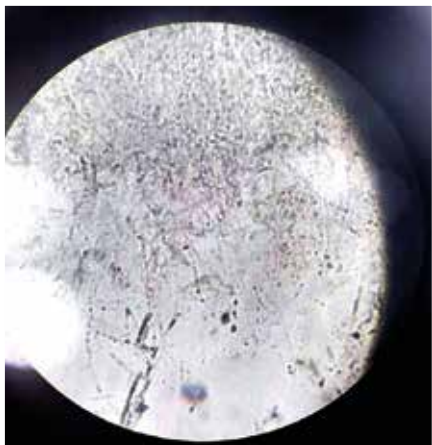


FIGURA 5
ANÁLISE MICROSCÓPICA – VERMICULITA COM IMPREGNAÇÃO BACTERIANA
FONTE: AUTORES (2024)

de 1:1,743:2,368:0,45, buscando atingir os 30 MPa aos 28 dias. Além do traço de referência, outros três traços foram dosados com a descrição sintetizada no Quadro 1.

Para os traços com solução bacteriana, a argila expandida foi empregada para o encapsulamento e preservação da bactéria. A substituição de 20% do agregado graúdo foi realizada compensando a massa

específica. A quantificação dos materiais por traço está exposta na Tabela 2.

As partículas de argila expandida que foram empregadas nos Traços II e III passaram pela impregnação na solução de *Bacillus subtilis*, permanecendo em sistema aberto durante 8 dias.

Para preservar o material biológico das ações mecânicas durante a preparação

QUADRO 1
DESCRIÇÃO DOS TRAÇOS ADOTADOS

Traços	Descrição dos traços
REF	Traço de referência.
I	Traço com argila expandida em substituição de 20% agregado graúdo e sem bactéria.
II	Traço com argila expandida em substituição de 20% do agregado graúdo e com adição 750 mL do Probiótico de Serenade, com impregnação na argila expandida.
III	Traço com argila expandida em substituição de 20% do agregado graúdo e com adição 1000 mL do Probiótico de Serenade, com impregnação na argila expandida.

FONTE: AUTORES (2024)

TABELA 2
QUANTIDADE DOS MATERIAIS POR METRO CÚBICO (KG/M³)

Traços	Cimento (kg/m³)	Areia (kg/m³)	Brita 2 (kg/m³)	Argila expandida (kg/m³)	Água (kg/m³)	Aditivo (kg/m³)	Solução bacteriana (l/m³)
Referência	419,7	731,6	993,9	—	188,9	2,3	—
Traço I	420,3	732,8	796,2	58,9	189,2	2,7	—
Traço II	413,8	721,4	783,9	58,0	186,2	2,0	16,2
Traço III	411,4	717,2	779,3	57,6	185,1	2,4	21,4

FONTE: AUTORES (2024)

e proteger as células dos microrganismos das condições extremas do ambiente, foi utilizada a imobilização prévia do agente biológico e de seus nutrientes em microcápsulas. O microencapsulamento oferece várias vantagens, incluindo a preservação das atividades metabólicas, criando um microambiente favorável para seu desenvolvimento.

O procedimento adotado para a incorporação das bactérias na argila expandida foi em consonância com os pesquisadores brasileiros Mello e Santiago (2020):

- (i) aquecimento de 3 litros de água à 80°C;
- (ii) resfriamento da água com o controle de temperatura até 30° C aproximadamente;
- (iii) adição de 96 g de lactato de cálcio e mistura até a dissolução completa;
- (iv) adição de 750 ml (para o Traço II) e adição de 1000ml (para o Traço III) do probiótico Serenade com a homogeneização da solução até a estabilização;
- (v) imersão de 2,69 kg de argila expandida na solução (Figura 11). A argila expandida com a impregnação da solução bacteriana permaneceu em estufa por 8 dias a uma temperatura constante de 37° C (Figura 6).

2.5 Produção dos corpos de prova

2.5.1 PRODUÇÃO DO CONCRETO E ENSAIOS ESTABELECIDOS

Seguindo os procedimentos especificados pela NBR 12655 (ABNT, 2022) e tendo os traços devidamente calculados, foi realizada a fabricação dos corpos de prova. Para tanto, utilizou-se uma betoneira com capacidade de 250 litros. Durante o processo de concretagem, foi necessária a utilização de aditivo superplastificante para melhoria da fluidez do concreto e para ajustes no abatimento do tronco de cone, que teve seu valor estipulado em

100 ± 20 mm. Os materiais usados no ensaio foram: placa de base, tronco cônico e haste de compactação, conforme prescrito na NBR 16889 (ABNT, 2020).

Ressalta-se que, em todos os traços, foi alcançado um resultado satisfatório, visto que, o esperado era entre 80 e 120 milímetros. A Tabela 3 apresenta os valores de abatimento obtidos.

Para moldagem dos corpos de prova, foi coletada amostragem de concreto fresco, conforme específica a NBR NM 16886 (ABNT, 2020). No total foram moldados 24 corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 10 cm x 20 cm (diâmetro x altura).

Após a moldagem, os corpos de prova foram deixados em processo de cura inicial por um período de 24h, em uma superfície horizontal, sem vibrações e perturbação. Após esse período, os corpos de prova foram desmoldados, identificados e submetidos à cura submersa, onde ficaram até as idades de rompimento de 28 e 84 dias, para a realização dos ensaios de resistência à compressão axial e absorção de água. Todo processo de cura foi feito segundo o prescrito pela NBR 5738 (ABNT, 2016).

O ensaio de resistência à compressão foi realizado conforme especificações da NBR 5739 (ABNT, 2018), nas idades de rompimento de 28 e 84 dias, e, para cada traço, foram utilizados 2 corpos de prova por idade.

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi iniciado com a secagem das amostras em estufa (T = 105° C) até a variação de massa ser menor que 0,10 g, segundo a NBR 9779 (2012). Depois disso, os corpos de prova foram colocados em uma camada de água de (5 ± 1) mm, com fundos expostos, e suas massas foram aferidas após 3, 6, 24, 48 e 72 horas de exposição.

O teste de absorção de água por imersão obedeceu às prescrições da norma brasileira NBR 9778 (2009) e, para cada traço, foram utilizados 2 corpos de prova por idade.



FIGURA 6
ARGILA EXPANDIDA NO PROCESSO DE IMPREGNAÇÃO
FONTE: AUTORES (2024)

Para análise e acompanhamento da autocicatrização e verificação visual da precipitação do carbonato de cálcio, foram utilizados 2 corpos de prova por traço. Para formação das fissuras foi realizado o procedimento de pré-fissuração dos corpos de prova com 70% da carga de ruptura aos 28 dias. Os corpos de prova passaram pelo processo de cura úmida e em ciclos (72 horas submersos em água e 72 horas expostos ao ar). O acompanhamento da capacidade de reparo das fissuras foi feito de forma visual.

2.6 Ensaios realizados

2.6.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Conforme as especificações da norma técnica citada posteriormente, foram rompidos dois corpos de prova por traço, sendo adotada a média dos valores encontrados. A Tabela 4 reúne os valores de

TABELA 3
VALORES DE ABATIMENTOS OBTIDOS

Traços	Slump (mm)
Referência	100
Traço I	100
Traço II	110
Traço III	120

FONTE: AUTORES (2024)

TABELA 4
RESULTADO ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (28 DIAS)

Idade (dias)	Nome	CP 1 (MPa)	CP 2 (MPa)	Média (MPa)
28	REF	32,6	35,4	34,0
	I	28,5	32,7	30,6
	II	28,3	31,8	30,0
	III	28,2	30,2	29,2

FONTE: AUTORES (2025)

TABELA 5
RESULTADO ENSAIOS DE RESISTÊNCIA
À COMPRESSÃO (84 DIAS)

Idade (dias)	Nome	CP 1 (MPa)	CP 2 (MPa)	Média (MPa)
84	REF	38,1	38,6	38,3
	I	25,7	32,7	29,2
	II	29,5	30,0	29,8
	III	27,2	35,8	31,5

FONTE: AUTORES (2025)

resistência à compressão axial obtidos para cada amostragem do concreto aos 28 dias, e a Tabela 5 apresenta os valores correspondentes aos 84 dias.

Com base nos dados apresentados, através do gráfico 1, é possível estabelecer a comparação visual entre as médias de cada traço e suas referidas idades.

Por conseguinte, a Tabela 6 apresenta os dados comparativos de desempenho e variabilidade entre as idades de 28 e 84 dias. Embora uma oscilação térmica inicial tenha retardado o metabolismo bacteriano e limitado os ganhos de resistência aos 28 dias, a porosidade da argila expandida preservou a viabilidade dos microrganismos. Logo, com a estabilização das condições aos 84 dias, houve a retomada da atividade biomineralizante, alcançando-se resultados satisfatórios no Traço III.

Ressalta-se que a variação percentual de resistência é utilizada para medir o ganho ou a perda de resistência do concreto entre 28 e 84 dias.

Neste caso, as análises estatísticas dos resultados de 28-84 revelam perda significativa de uniformidade nos traços modificados, principalmente no Traço I (argila sem bactéria) e no Traço II (argila com 750 ml de solução do probiótico *Serenade*).

Ademais, ao observar a resistência a longo prazo, nota-se que o Traço III (argila com 1.000 ml de probiótico) demonstrou o maior ganho percentual de resistência

TABELA 6
COMPARAÇÃO DAS MÉDIAS DE 28
E 84 DIAS

Traço	Média 28 dias (MPa)	Média 84 dias (MPa)	Variação (%)
REF	34,01	38,32	12,67
I	30,60	29,23	-4,51
II	30,06	29,77	-0,96
III	29,19	31,55	8,02

FONTE: AUTORES (2025)

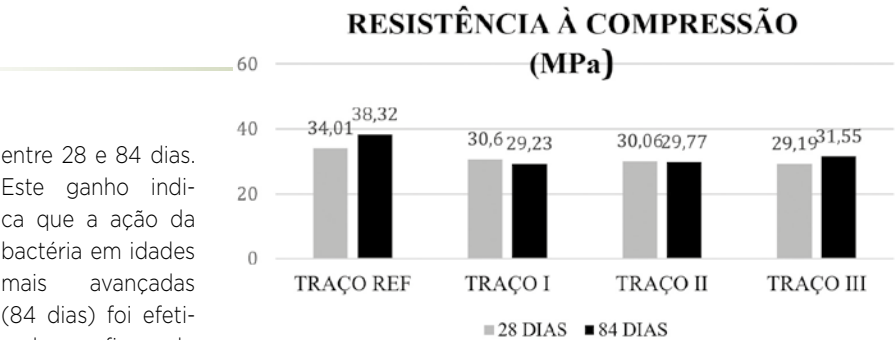


GRÁFICO 1
COMPARAÇÃO DAS MÉDIAS DOS RESULTADOS OBTIDOS NO
ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

FONTE: AUTORES (2025)

entre 28 e 84 dias. Este ganho indica que a ação da bactéria em idades mais avançadas (84 dias) foi efetivada, confirmando que a argila expandida atuou de forma eficiente como um reservatório interno de umidade. A retenção de água e nutrientes (lactato de cálcio e ureia) no interior da argila possibilitou uma liberação gradual desses compostos, prolongando as reações de hidratação e resultando em uma resistência superior a 30 MPa aos 84 dias.

Além disso, salienta-se que o traço de referência, aos 28 dias superou a resistência esperada (30 MPa) em aproximadamente 13,37%. Dessa forma, este resultado demonstra um excelente controle de qualidade e uma alta uniformidade na mistura do concreto convencional, confirmando a confiabilidade do processo de dosagem e moldagem.

2.6.2 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

O processo de absorção de água por capilaridade de acordo com a NBR 9779

(ABNT, 2012) envolve a determinação da capacidade de um material em absorver água devido à ação capilar. Dessa maneira, foram utilizadas 3 amostras, colocadas na estufa para a secagem e, em seguida, pesadas para obter o valor de sua massa seca. Posteriormente, os 3 corpos de prova foram parcialmente emergidos em água, em uma lâmina de 5 mm, e feito a sua nova pesagem nos intervalos de 3h, 6h, 24h, 48h e 72h. Os resultados estão apresentados na tabela 7 e para uma melhor visualização e análise no gráfico 2.

Ao observar os dados obtidos, é notório que:

- O Traço de referência (REF) apresentou as menores taxas de absorção em todos os intervalos de tempo;

TABELA 7
ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE MEDIDOS COM 3H, 6H, 24H, 48H E 72H DE ENSAIO (G/CM²)

Traços	Corpo de prova	Área da seção transversal (cm ²)	C Msat (3h)	C Msat (6h)	C Msat (24h)	C Msat (48h)	C Msat (72h)
REF	CP 01	78,54	0,051	0,076	0,318	0,560	0,662
	CP 02	78,54	0,255	0,127	0,178	0,357	0,471
	CP 03	78,54	0,280	0,204	0,089	0,331	0,458
I	CP 01	78,54	0,140	0,267	0,509	0,688	0,802
	CP 02	78,54	0,191	0,229	0,509	0,675	0,726
	CP 03	78,54	0,140	0,229	0,535	0,764	0,802
II	CP 01	78,54	0,229	0,344	0,637	0,777	0,891
	CP 02	78,54	0,229	0,306	0,598	0,713	0,815
	CP 03	78,54	0,166	0,229	0,420	0,535	0,598
III	CP 01	78,54	0,255	0,369	0,675	0,828	0,904
	CP 02	78,54	0,267	0,369	0,726	0,840	0,968
	CP 03	78,54	0,216	0,369	0,573	0,713	0,802

FONTE: AUTORES (2024)

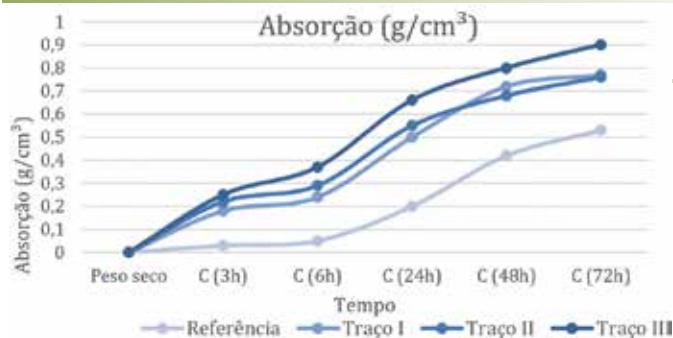


GRÁFICO 2

ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE EM G/CM²

FONTE: AUTORES (2024)

- ▶ Os Traços I,II e III mostram valores de absorção superiores aos do traço de referência, o que se pode relacionar com a maior porosidade do agregado leve (argila expandida);
- ▶ O Traço III, com maior concentração da solução probiótica, foi o que apresentou maior taxa de absorção acumulada durante as 72 horas de ensaio.

Os ensaios de absorção de água por imersão são de fundamental importância para avaliar a porosidade e durabilidade do concreto. Através das Tabelas 8 e 9, é possível visualizar e analisar o desempenho dos traços em idades iniciais e ao longo prazo.

Com relação aos valores encontrados aos 28 dias (Tabela 8), nota-se que o traço de referência (REF) apresentou o menor

Dessa maneira, os resultados e dados atingidos foram coerentes, já que a substituição de 20% do agregado graúdo por argila expandida eleva o índice de vazios e a permeabilidade.

valor médio de absorção (5,29%), seguido pelos traços I, II e III.

Já, com dados obtidos aos 84 dias (Tabela 9), percebe-se que ocorreu uma redução média da absorção do traço III. Essa queda indica a continuidade da hidratação e possível densificação da matriz interna através da ação bacteriana. Ademais, o traço de referência apresentou um ótimo desempenho com relação aos demais.

2.6.3 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

TABELA 8

ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO AOS 28 DIAS

Traço	Corpo de prova	Massa seca (g)	Massa saturada (g)	Absorção (%)	Absorção média (%)	DP (%)	CV (%)
REF	CP 01	3583,00	3775,00	5,36	5,29	0,11	2,01
	CP 02	3607,00	3795,00	5,21			
I	CP 01	3324,00	3539,00	6,47	6,38	0,12	1,92
	CP 02	3336,00	3546,00	6,30			
II	CP 01	3311,00	3540,00	6,92	6,82	0,14	1,98
	CP 02	3316,00	3539,00	6,73			
III	CP 01	3354,00	3578,00	6,68	6,41	0,38	5,91
	CP 02	3386,00	3594,00	6,14			

FONTE: AUTORES (2024)

TABELA 9

ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO AOS 84 DIAS

Traço	Corpo de prova	Massa seca (g)	Massa saturada (g)	Absorção (%)	Absorção média (%)	DP (%)	CV (%)
REF	CP 01	3.536	3.766	6,50	6,39	0,15	2,38
	CP 02	3.562	3.775	6,00			
I	CP 01	3.274	3.495	6,75	6,67	0,11	1,65
	CP 02	3.344	3.559	6,43			
II	CP 01	3.311	3.518	6,25	7,27	1,44	19,81
	CP 02	3.316	3.577	7,87			
III	CP 01	3.38	3.498	3,49	2,91	0,82	28,18
	CP 02	3.386	3.465	2,33			

FONTE: AUTORES (2025)



FIGURA 7

CP's TRAÇO DE REFERÊNCIA PARA ANÁLISE DE AUTOCICATRIZAÇÃO

FONTE: AUTORES (2024)

2.6.4 ENSAIO DE AUTOCICATRIZAÇÃO

Como mencionado anteriormente, para análise e acompanhamento da aut cicatrização, o procedimento de formação das fissuras foi realizado em dois corpos de prova por traço. A conferência da capacidade de reparo e a verificação visual da precipitação do carbonato de cálcio, foram feitas de forma visual (Figuras 7 a 10).

A análise visual da capacidade de aut cicatrização foi realizada nove dias após a pré-fissuração dos corpos de prova, período em que os ciclos de cura úmida foram aplicados. Através da verificação visual, foi possível identificar a precipitação de carbonato de cálcio (CaCO_3) no Traço II (750 ml de solução bacteriana), esta manifestação se caracteriza pela formação de massa cristalina e de coloração esbranquiçada nos planos

de fissura, indicando que a biomineralização ocorreu com maior eficácia neste traço em específico. Logo, conclui-se que o traço II apresentou a maior evidência de aut cicatrização (Figuras 11 e 12), entre os demais.

Deste modo, comprova-se que a bactéria *Bacillus subtilis* tem potencial regenerativo: a observação de precipitados cristalinos e esbranquiçados nas fissuras do traço II indica fortemente que a bactéria iniciou a



FIGURA 8

CP's TRAÇO I PARA ANÁLISE DE AUTOCICATRIZAÇÃO

FONTE: AUTORES (2024)

FIGURA 9

CP's TRAÇO II PARA ANÁLISE DE AUTOCICATRIZAÇÃO

FONTE: AUTORES (2024)

FIGURA 10

CP's TRAÇO III PARA ANÁLISE DE AUTOCICATRIZAÇÃO

FONTE: AUTORES (2024)



FIGURA 11

CP TRAÇO II APÓS 8 DIAS COM PRECIPITAÇÃO DE CaCO_3

FONTE: AUTORES (2024)

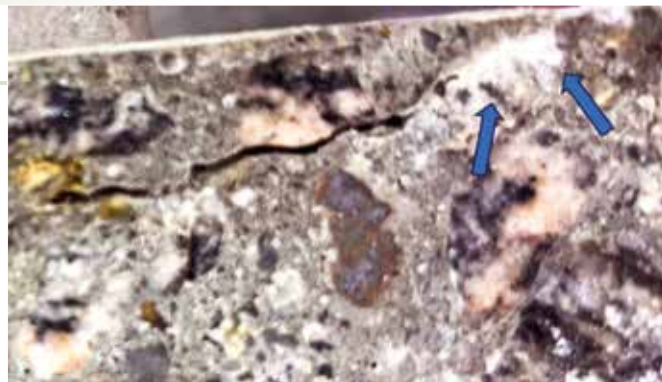


FIGURA 12

IMAGEM AMPLIADA CP TRAÇO II APÓS 8 DIAS COM PRECIPITAÇÃO DE CaCO_3

FONTE: AUTORES (2024)

ação biomineralização, precipitando carbonato de cálcio (CaCO_3). Logo, validando a premissa fundamental deste trabalho e reforçando a viabilidade do bioconcreto.

5. CONCLUSÕES

Conclui-se que o presente trabalho analisou o desempenho do bioconcreto com a bactéria *Bacillus subtilis* visando avaliar em caráter exploratório, propriedades de resistência, absorção de água e a autocicatrização de fissuras nos corpos de prova com e sem a solução bacteriana. O estudo obteve êxito na caracterização dos materiais e na comprovação da atividade bacteriana preliminar, validando o método de impregnação. Embora a funcionalidade bacteriana tenha sido parcialmente retar-

dada em idades iniciais devido a oscilações térmicas na estufa, a estrutura da argila expandida preservou a viabilidade dos microrganismos. Assim, ao realizar novas análises nos ensaios aos 84 dias, o traço com maior solução bacteriana apresentou resultados satisfatórios.

Os ensaios realizados, obteve-se as seguintes conclusões:

- **Resistência à compressão:** Os traços modificados com argila expandida mantiveram a resistência de projeto de 30 MPa em idades avançadas; o Traço III demonstrou um ganho de resistência significativo entre 28 e 84 dias;
- **Absorção por imersão:** Os dados obtidos aos 84 dias indicaram uma redução média na absorção do traço III;

- **Autocicatrização:** A análise visual pós-fissuração revelou depósitos compatíveis — o Traço II (750 ml de solução bacteriana) apresentou precipitação de carbonato de cálcio (CaCO_3), manifestada por massa cristalina e esbranquiçada.

Deste modo, a observação demonstra o potencial regenerativo da *Bacillus subtilis* e valida a premissa fundamental de que ela pode induzir a autocicatrização. Logo, o trabalho reforça a viabilidade do princípio do bioconcreto, mas ressalta a necessidade de controle rigoroso na produção para garantir a uniformidade da mistura e a importância de estudos futuros com maior amostragem e técnicas de análise instrumental complementar. ☹

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Estruturas de Concreto Armado – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: Argamassa e Concreto Endurecidos - Determinação da Absorção de Água Por Imersão - Índice de Vazios e Massa Específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16889: Concreto –Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- [6] COSTA, A.; RODRIGUES, F. Desenvolvimento de concretos autocuráveis utilizando a bactéria *Bacillus Megaterium*. Revista Científica UMC. UMC Universidade. [s.l.], 2018. ISSN 2525- 5250.
- [7] JONKERS, Henk M. Bacteria-based self-healing concrete. *Heron*, v. 56, n. 1-2, p. 5-16, 2011. Disponível em: <http://heronjournal.nl/56-12/1.pdf>. Acesso em: 30 de outubro de 2025.
- [8] JONKERS, H. M.; THIJSSSEN, A.; MUYZER, G.; et al. Application of bacteria as self- healing agent for the development of sustainable concrete. *Ecological Engineering*, v. 36, n. 2, p. 230-235, 2010. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857409000202>. Acesso em: 01 novembro 2025.
- [9] KOGA, D. S. Bioconcreto: autocicatrização do concreto pelo processo de biomineralização. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) — Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2020. Disponível em: <https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/handle/123456789/895>. Acesso em: 01 novembro 2025.
- [10] MELLO, G.N.A.; SANTIAGO, S.A. Avaliação da microestrutura e da resistência à compressão do concreto com incorporação de concreto do gênero *Bacillus subtilis*, *Tecnologia em Materiais e processos construtivos*, Paraná, p. 15-26, 2020. *high-performance concrete*. *Archives of Civil Engineering*, v. 69, n. 3, 2023.

Sondagem aponta boas perspectivas para **os pré-fabricados de concreto** em 2026

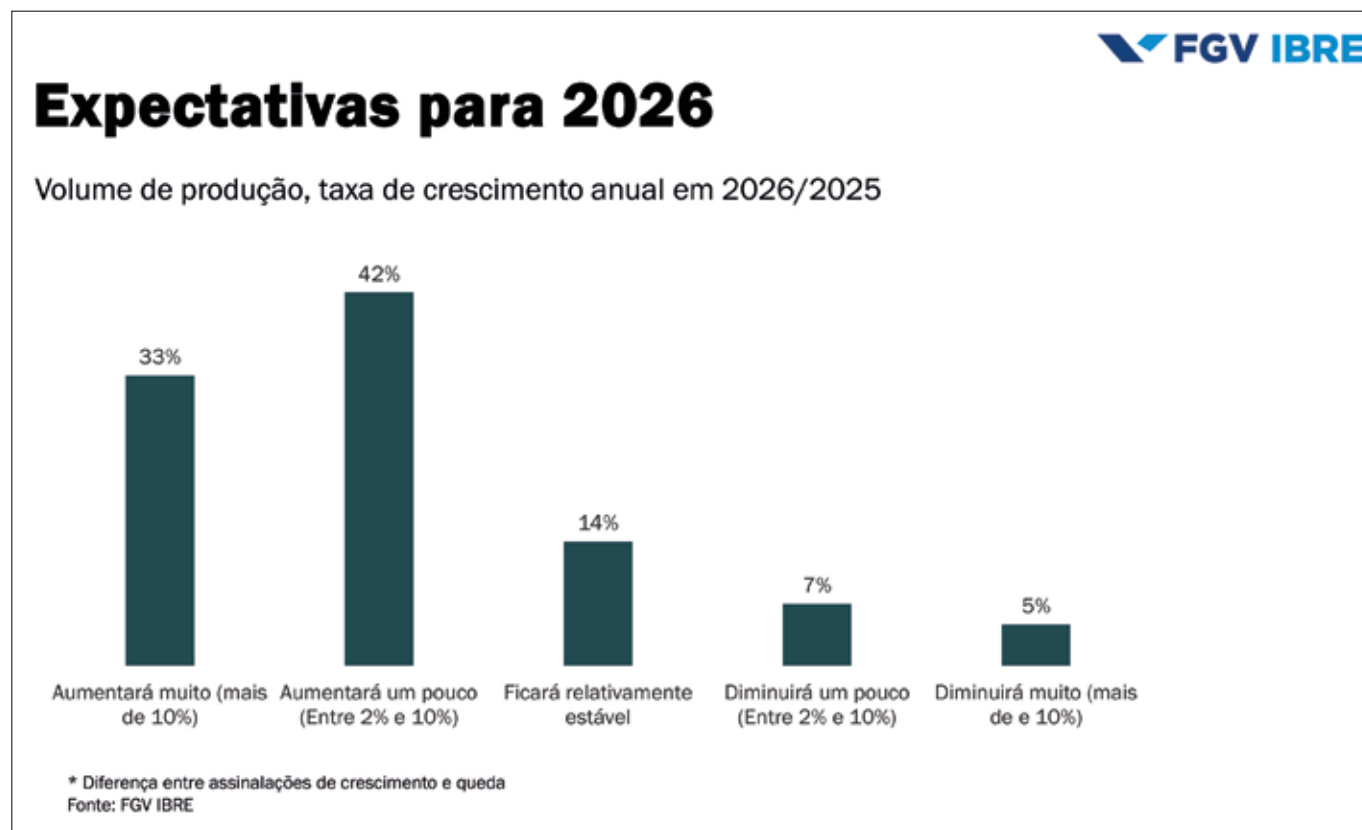


Figura 1: Expectativas para o volume de produção em 2026, comparativamente ao de 2025, pelas empresas associadas a ABCIC.

As empresas de estruturas pré-fabricadas de concreto estão otimistas para 2026: 33% delas projetam expansão de mais 10% no volume de produção, enquanto 42% esperam crescimento de até 10%. O percentual de empresas otimistas para este ano é ligeiramente superior (9%) ao do ano passado (Figura 1).

A sondagem foi realizada pela Fundação Getúlio Vargas (FGV), sob coordenação da economista Ana Maria Castelo, por encomenda da Abcic – Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto, com 56 empresas associadas entre os dias 1º de outubro e 27 de novembro. A adesão foi de 77% (43 empresas responderam o questionário estruturado).

Um dos setores responsáveis pelas boas perspectivas das indústrias de pré-fabricado de concreto é a infraestrutura, cujos investimentos têm avançado com as concessões e PPPs. De acordo com a Sondagem de Pré-Fabricados de Concreto, essa área está entre os mercados com maior participação, tanto em 2023 como em 2024, com 19% e 15%, respectivamente. Já, a indústria e centros de distribuição e logística tiveram uma participação de 28% e 18%, respectivamente, em 2024 (Figura 2).

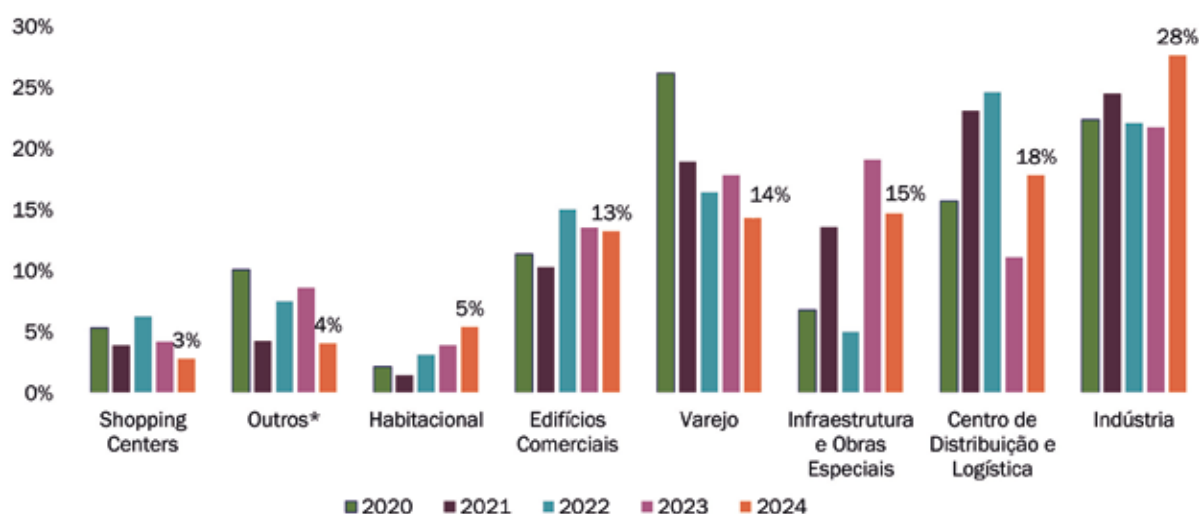
A pesquisa registrou um volume de produção de pré-fabricados de mais de 716 mil m³, em 2024. A Região Sudeste concentra o maior percentual de empresas (44%) e de produção (45%), seguida pela

Região Sul (43% da produção). O número de empregados cresceu 10,5% em relação ao ano anterior, alcançando 8.560 pessoas no setor. As vendas de pré-fabricados tiveram expansão de 9,6% em 2024 ante 2023, atingindo mais de 880 mil m³. Os dados fazem parte do Caderno de Dados Setoriais Abcic 2026, lançado na 20ª edição do ABCIC Networking, em 05 de fevereiro, em São Paulo.

O resultado obtido pelo setor mostra que as empresas conseguiram se apropriar do movimento de expansão da construção, cujo PIB registrou alta de 4,4% em 2024. O mercado imobiliário se manteve aquecido, amparado especialmente pelo novo Minha Casa Minha Vida, assim como os aportes realizados na área de infraestrutura.

Vendas

Destino das vendas, em %



* Hospitais, escolas, estádios de futebol, data center, obras rurais
Fonte: FGV IBRE

Figura 2: Setores de destino das vendas de pré-fabricados de 2020 a 2024

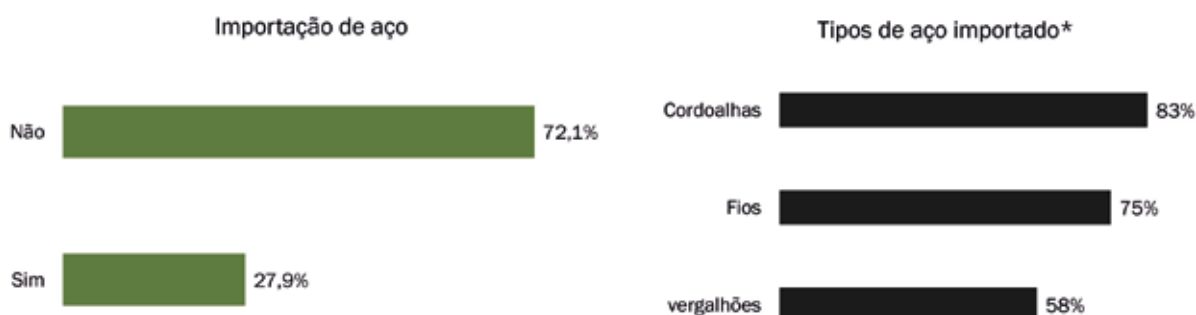
O estudo encomendado pela Abcic apontou um avanço fundamental na área de tecnologia e sustentabilidade, com o aumento no número de empresas que assinalou estar implementado ou em implementação o uso de *Ultra High Performance*

Concrete (UHPC). Em 2023, eram 10% contra 14% em 2024. A maioria (56%) mencionou ainda que o plano de implementação está em fase de estudos. Além disso, o concreto autoadensável passou a ser produzido, em 2024, por 78% das empresas, represen-

tando 64% da produção dessas empresas.

A Sondagem relatou que, em 2024, as empresas de pré-fabricados consumiram 293,6 mil toneladas de cimento e 75,4 mil toneladas de aço. Apenas 29% importaram aço (Figura 3). ☹

Perfil - aço



* Comporta mais de uma assinalação
Fonte: FGV IBRE

Figura 3: Percentagem de empresas que importaram aço e dos tipos importados

Capacidade de pilar em flexo-compressão reforçado por confinamento polimérico

VLADIMIR JOSÉ FERRARI - PROF. - <https://orcid.org/0000-0002-9230-927X> - (vjferrari2@uem.br) – UEM

RESUMO

NESTE ARTIGO APRESENTA-SE O PROCEDIMENTO PARA CÁLCULO DA CAPACIDADE RESISTENTE DA SEÇÃO TRANSVERSAL DE PILAR DE CONCRETO ARMADO SOLICITADO EM FLEXO-COMPRESSÃO E REFORÇADO POR ENCASAMENTO COM POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS (PRF). A METODOLOGIA EMPREGADA É A RECOMENDADA PELO ACI PRC-440.2 (2023) E BASEIA-SE NAS EQUAÇÕES DE EQUILÍBRIO E COMPATIBILIDADE DAS DEFORMAÇÕES, CONSIDERANDO-SE O COMPORTAMENTO DO CONCRETO CONFINADO. A CAPACIDADE DA SEÇÃO É OBTIDA PELA CONSTRUÇÃO DO DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE INTERAÇÃO MOMENTO-FORÇA NORMAL (M-P), LIMITANDO-SE A APLICAÇÃO PARA CASOS DE RUÍNA CONTROLADA PELA COMPRESSÃO DO

CONCRETO. A TÍTULO DE EXEMPLIFICAÇÃO, A METODOLOGIA É APLICADA EM UMA SEÇÃO TRANSVERSAL DE UM PILAR RETANGULAR SOLICITADO EM FLEXO-COMPRESSÃO. OS RESULTADOS OBTIDOS PERMITEM VISUALIZAR AS MODIFICAÇÕES NO DIAGRAMA M-P DA SEÇÃO REFORÇADA EM RELAÇÃO À SEM REFORÇO INDICANDO-SE A POSSIBILIDADE DE INCREMENTAR OS ESFORÇOS SOLICITANTES EM ATÉ 28% COM ELEVADA QUANTIDADE DE CAMADAS DE REFORÇO.

PALAVRAS-CHAVE: REFORÇO, CONFINAMENTO, PILAR, DIAGRAMA INTERAÇÃO.

1. INTRODUÇÃO

Pilares são elementos estruturais usualmente dispostos na vertical e im-

portantes numa edificação visto que a ruptura de um deles pode conduzir à ruína parcial ou total da estrutura. São comumente solicitados pela força normal, combinada com o momento fletor, devido às ligações com as vigas, desalinhamento vertical, excentricidades e forças horizontais.

Alguns dos motivos para o reforço de um pilar são a resistência inadequada do concreto, falha em projeto e alteração da utilização da edificação. A técnica de reforço com emprego de PRF é atrativa porque não modifica o tamanho da seção que pode ser confinada visto que o mecanismo é eficiente para aumento da

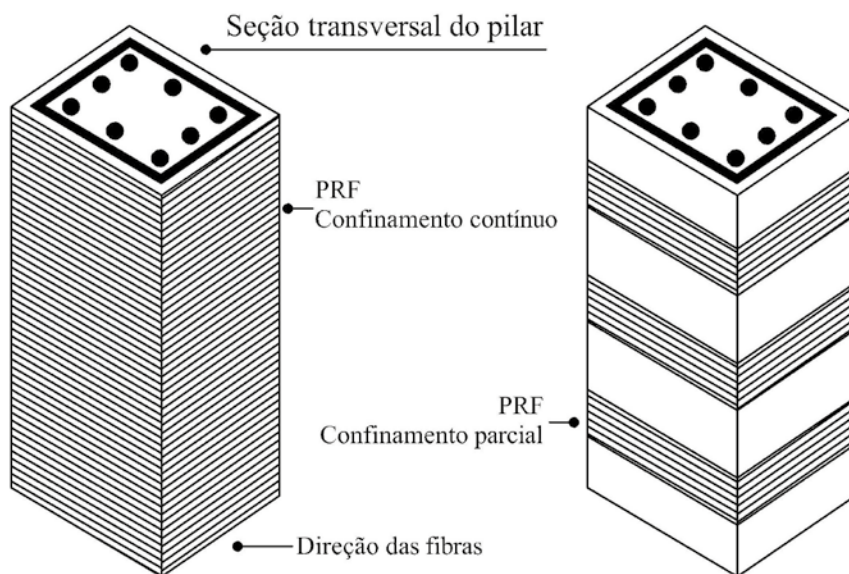


FIGURA 1

CONFINAMENTO DE PILAR COM PRF

FONTE: AUTOR

capacidade resistente e ductilidade de pilares carregados axialmente ou excêntrica-mente (ABOKWIED *et al.* 2021; SIDDIKA *et al.*, 2020; ACI PRC-440.2 2023).

O confinamento do concreto é um efeito obtido pelo encamisamento da seção pela orientação transversal das fibras poliméricas em relação ao eixo longitudinal do pilar, restringindo-se a expansão lateral do concreto comprimido pela pressão de confinamento (Figura 1).

Como já demonstrado nas pesquisas, o confinamento tem um impacto significativo em pilares curtos axialmente carregados de seção circular ou quadrada. Em pilares solicitados excêntrica-mente, são ainda poucos os estudos nacionais e a ausência de norma brasileira sobre o tema é um obstáculo aos profissionais da área de projeto. Entretanto, o envolvimento da seção com polímero pode aumentar a capacidade resistente de pilares solicitados pelo efeito combinado de força normal e momento fletor.

Neste artigo apresenta-se a formulação indicada no ACI PRC-440.2 (2023) para construção do diagrama simplificado momento-força normal (M-P) para verificação da capacidade resistente da seção de pilar solicitado por flexo-compressão e reforçado por encamisamento com PRF. A metodologia é aplicada, como exemplo, em seção transversal de pilar retangular de concreto armado solicitado por flexo-compressão.

2. CONFINAMENTO POLIMÉRICO DO CONCRETO

O mecanismo do confinamento, como indicado por Carrazedo (2002), pode ser compreendido idealizando-se um pilar circular de material elástico-linear e livre de qualquer restrição lateral. Com a solicitação axial (P), Figura 2, ocorre um encurtamento axial proporcional ao módulo de elasticidade (E) do material e uma expansão lateral proporcional ao produto do coeficiente de Poisson (ν) pelo módulo de elasticidade (νE).

Para o caso de envolvimento do pilar, antes da solicitação, por um tubo de parede fina, fica restringida a deformação lateral, desenvolvendo-se consequentemente no interior do tubo uma pressão (f_l), com magnitude que depende da solicitação axial, do material

do pilar, do tubo e das características geométricas.

O FIB (1999) explica o efeito do confinamento no concreto (Figura 3) ponderando que as tensões de compressão propagam-se preferencialmente pelos componentes mais rígidos (agregados graúdos), tendo o equilíbrio

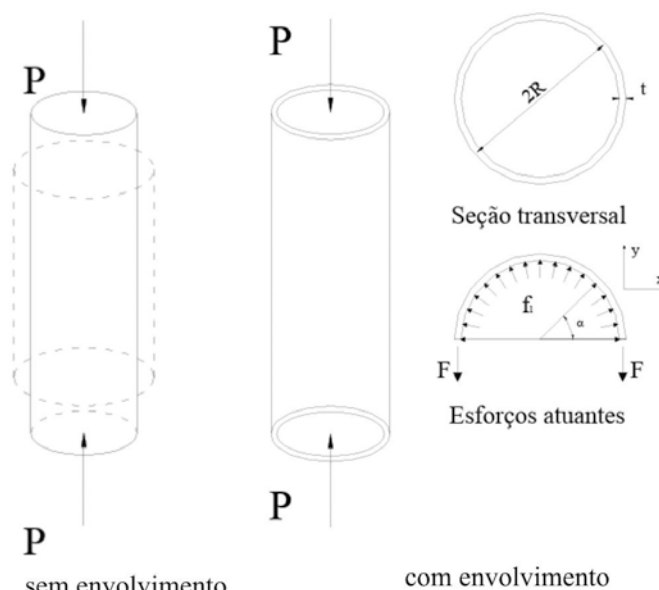


FIGURA 2

PILAR SOLICITADO À COMPRESSÃO SEM E COM ENVOLVIMENTO POR TUBO DE PAREDE FINA

FONTE: CARRAZEDO (2002)

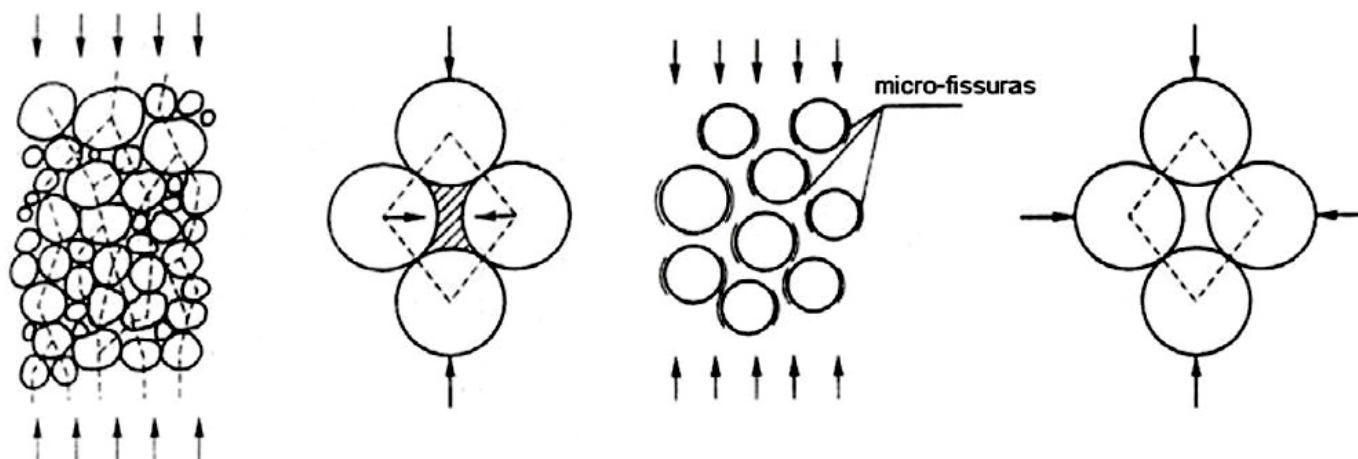


FIGURA 3

MECANISMO DO CONFINAMENTO DO CONCRETO

FONTE: FIB (1999)

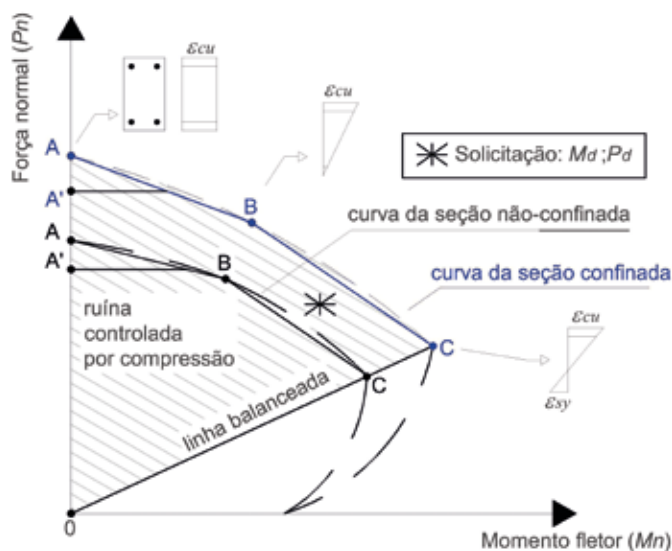


FIGURA 4
DIAGRAMA TÍPICO M-P

FONTE: ADAPTADO DO ACI PRC-440.2 (2023)

garantido por forças laterais provenientes da coesão da matriz cimentícia. A superação da coesão acarreta o surgimento de microfissuras na interface agregado-matriz e o aumento da solicitação promove a propagação com a ruptura do concreto por fissuras paralelas à direção da solicitação. O confinamento promove o aumento da coesão atuando no sentido de impedir a expansão lateral do concreto, formando

e a deformação última são incrementados mediante a presença de tensões laterais de confinamento.

Grande parte dos modelos teóricos existentes para o cálculo do confinamento foram desenvolvidos, segundo Diego *et al.* (2022), a partir de pesquisas realizadas em pilares de seções circulares e modificados para aplicações em seções não circulares. Os modelos indicados no ACI PRC-440.2 (2023) consideram as

um estado multiaxial de tensão capaz de incrementar a resistência do elemento comprimido.

Segundo Oliveira (2017), entre os primeiros ensaios de compressão axial do concreto confinado, podem ser citados os realizados por Richart *et al.* (1928) no estudo da influência da pressão lateral de armaduras transversais em cilindros de concreto. A pesquisa mostrou que a resistência à compressão

pesquisas de Lam & Teng (2003), Harries & Carey (2003) e Carey & Harries (2005).

3. METODOLOGIA DO ACI PRC-440.2 (2023)

Para excentricidade da força normal superior a 10% da dimensão do lado da seção do pilar, o ACI PRC-440.2 (2023) apresenta uma metodologia para a construção do diagrama simplificado de interação momento fletor-força normal (M-P) baseado nas equações de equilíbrio e compatibilidade das deformações. A metodologia difere-se do que é feito para seções de concreto armado pela consideração do comportamento do concreto confinado.

Na Figura 4 ilustra-se o diagrama típico (M-P) referente a capacidade resistente da seção confinada e não confinada solicitada em flexo-compressão. O incremento na capacidade do pilar reforçado é satisfatória pelo ponto com coordenadas dos esforços solicitantes (M_d-P_d), localizado no interior da região delimitada pelas retas do diagrama da seção confinada e pela linha balanceada que limita a ruína pelo efeito de compressão do concreto. O diagrama é formado por linhas retas conectadas aos pontos A, B e C correspondentes aos pares de valores (M-P), com as características apresentadas na sequência.

3.1 Seção em compressão axial pura

O ponto A do diagrama representa a seção transversal em compressão axial pura, com deformação uniforme para o concreto confinado (ϵ_{ccu}) ou não confinado (ϵ_{cu}). Aplicam-se os conceitos de confinamento do concreto idealizado por Lam & Teng (2003) e as Equações 1 e 2, respectivamente, para o cálculo da capacidade resistente da seção ($\phi P_n(A)$; $\phi M_n(A)=0$) e ($\phi P_n(A')$; $\phi M_n(A')=0$), considerando-se a excentricidade acidental com o coeficiente "0,80".

$$[1] \quad \phi P_{n(A)} = \phi \cdot \left[\frac{0,85 \cdot f'_{cc} \cdot (A_g - A_{st})}{(A_g - A_{st})} + f_y \cdot A_{st} \right]$$

$$[2] \quad \phi P_{n(A')} = 0,80 \cdot \phi \cdot \left[\frac{0,85 \cdot f'_{cc} \cdot (A_g - A_{st})}{(A_g - A_{st})} + f_y \cdot A_{st} \right]$$

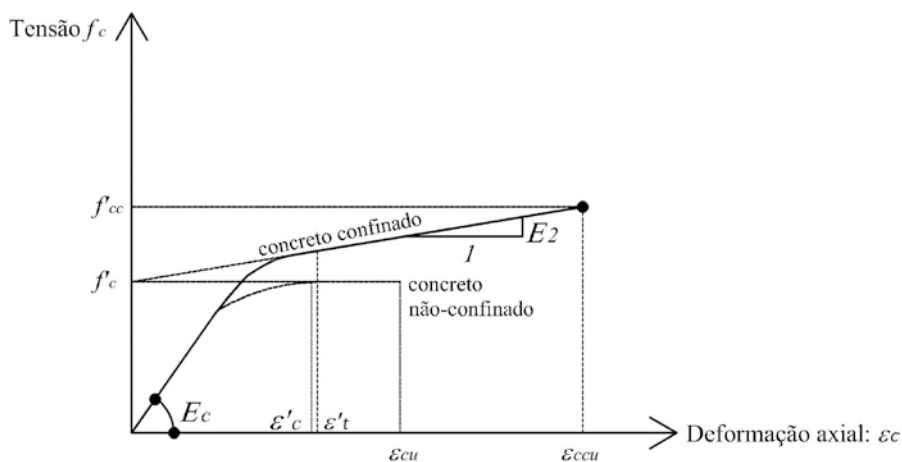


FIGURA 5
MODELO TENSÃO-DEFORMAÇÃO DO CONCRETO CONFINADO COM PRF

FONTE: ADAPTADO DO ACI PRC-440.2 (2023)

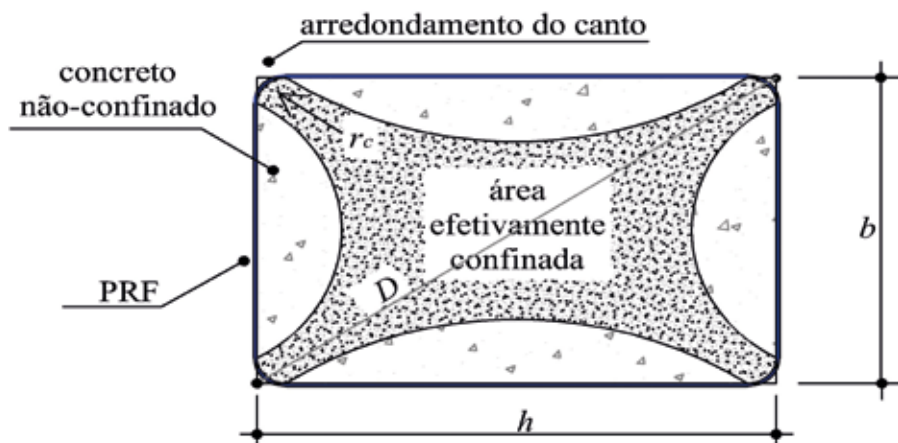


FIGURA 6

DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES DE CONFINAMENTO EM SEÇÃO RETANGULAR

FONTE: ADAPTADO DO ACI PRC-440.2 (2023)

A curva tensão-deformação (f_c - ϵ_c) do concreto confinado (Figura 5) é representada por uma parábola seguida por trecho linear até a resistência máxima do concreto (f'_{cc}) e respectiva deformação (ϵ_{ccu}). O ponto de transição entre a parábola e o trecho linear é denotado pela deformação (ϵ'_t) e o concreto não-confinado tem comportamento representado por uma parábola seguida por trecho horizontal até a deformação ($\epsilon_{cu} = 0,003$).

A resistência à compressão do concreto confinado (f'_{cc}) é obtida pela Equação 3, sendo ($\Psi_f = 0,95$) o fator adicional de redução da resistência.

$$[3] \quad f'_{cc} = f'_c + \Psi_f \cdot 3,3 \cdot \kappa_a \cdot f_l$$

A pressão de confinamento (f_l) pelo envolvimento polimérico do concreto é determinada pela Equação 4.

$$[4] \quad f_l = \frac{2 \cdot E_f \cdot n \cdot t_f \cdot \epsilon_{fe}}{D}$$

Em que:

n : número de camadas do reforço;

t_f : espessura da manta de reforço;

E_f : módulo de elasticidade da manta de reforço;

ϵ_{fe} : deformação efetiva de ruptura do reforço, obtida pelo produto do fator de eficiência ($k_e = 0,55$) e a deformação última do polímero (ϵ_{fu}) pela Equação 5.

$$[5] \quad \epsilon_{fe} = \kappa_\epsilon \cdot \epsilon_{fu}$$

$$[6] \quad \kappa_a = \frac{A_e}{A_c} \cdot \left(\frac{b}{h}\right)^2$$

$$[7] \quad D = \sqrt{b^2 + h^2}$$

A área de concreto não-confinado é delimitada entre cada parábola e o lado adjacente da seção e a área efetivamente confinada (A_e) é aquela entre as parábolas formando o núcleo confinado. A relação (A_e/A_c) é a área de concreto efetivamente confinada (Equação 8) com a taxa da armadura ($r_g = A_s/A_g$) e a área de concreto da seção transversal (A_c).

$$[8] \quad \frac{A_e}{A_c} = \frac{1 - \left[\frac{\left(\frac{b}{h}\right)(h - 2 \cdot r_c)^2 + \left(\frac{h}{b}\right)(b - 2 \cdot r_c)^2}{3 \cdot A_g} \right] - \rho_g}{1 - \rho_g}$$

Deve-se garantir uma pressão mínima de confinamento do concreto (Equação 9) para assegurar comportamento ascendente do trecho linear do concreto confinado.

$$[9] \quad \frac{f_l}{f'_c} \geq 0,08$$

A deformação máxima do concreto confinado (ϵ_{ccu}) é determinada pela Equação 10, limitada em 0,010 para evitar fissuração excessiva e perda da integridade por falta de coesão.

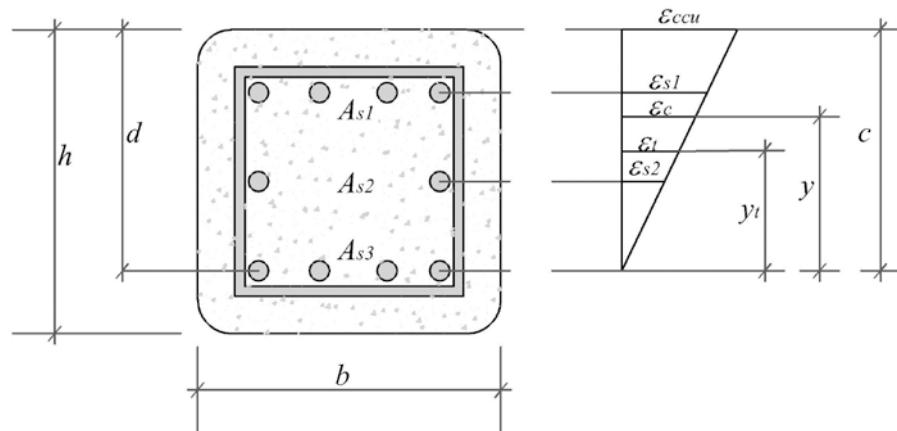


FIGURA 7

DISTRIBUIÇÃO DAS DEFORMAÇÕES NA SEÇÃO PARA O PONTO B

FONTE: ADAPTADO DO ACI PRC-440.2 (2023)

$$[10] \quad \left(\begin{aligned} \epsilon_{ccu} &= \epsilon'_c \cdot \\ &\left(1,50 + 12 \cdot \kappa_b \cdot \frac{f_l}{f'_c} \cdot \left(\frac{\epsilon_{fe}}{\epsilon'_c} \right)^{0,45} \right) \\ &\leq 0,010 \end{aligned} \right)$$

O fator de eficiência (κ_b) considera influência da geometria da seção para a determinação da deformação axial última do concreto confinado (Equação 11) para seção não circular.

$$[11] \quad \kappa_b = \frac{A_e}{A_c} \cdot \left(\frac{h}{b} \right)^{0,5}$$

3.2 Compressão não uniforme (ponto B) e compressão e tração (ponto C)

O ponto B representa a seção toda comprimida, com distribuição de deformações caracterizada por valor máximo na borda mais comprimida (ϵ_{ccu} ou ϵ_{cu}) e zero na camada de armadura mais próxima da face menos comprimida (Figura 7) com linha neutra ($c = d$).

O ponto C representa seção com região comprimida e tracionada caracterizando-se ruína do tipo balanceada com deformação máxima de compressão (ϵ_{ccu} ou ϵ_{cu}) no concreto e deformação de tração de escoamento (ϵ_{sy}) na armadura mais próxima da face tracionada (Figura 8) com linha neutra (c), determinada pela Equação 12.

$$[12] \quad c = d \cdot \frac{\epsilon_{ccu}}{\epsilon_{sy} + \epsilon_{ccu}}$$

As coordenadas dos pontos B e C do diagrama são obtidas pelas Equações 13 e 14 com os coeficientes “A” a “I” determinadas pelas Equações 15 a 23.

$$[13] \quad \phi P_{n(B,C)} = \phi \left[\begin{aligned} &A \cdot (y_t)^3 + B \cdot (y_t)^2 + \\ &C \cdot (y_t) + D + \sum A_{si} \cdot f_{si} \end{aligned} \right]$$

$$[14] \quad \phi M_{n(B,C)} = \phi \left[\begin{aligned} &E \cdot (y_t)^4 + F \cdot (y_t)^3 + \\ &G \cdot (y_t)^2 + H \cdot (y_t) + I + \\ &\sum A_{si} \cdot f_{si} \cdot d_{si} \end{aligned} \right]$$

$$[15] \quad A = \frac{-b \cdot (E_c - E_2)^2}{12 \cdot f'_c} \cdot \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c} \right)^2$$

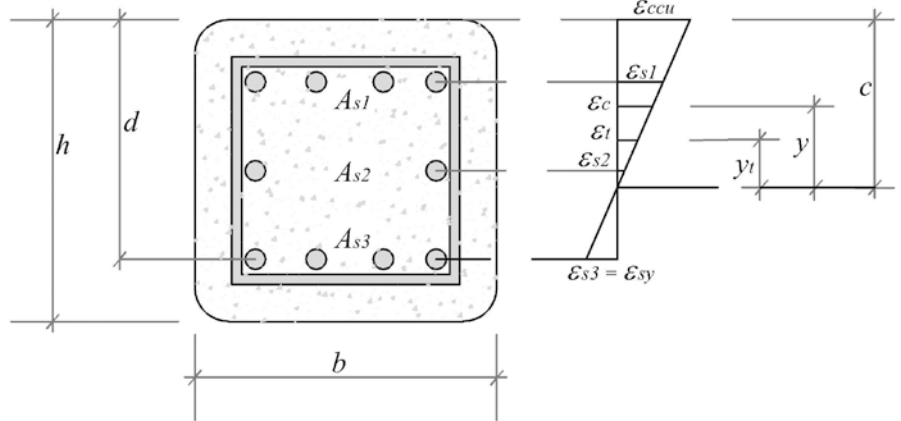


FIGURA 8

DISTRIBUIÇÃO DAS DEFORMAÇÕES NA SEÇÃO PARA O PONTO C

FONTE: ADAPTADO DO ACI PRC-440.2 (2023)

$$[16] \quad B = \frac{b \cdot (E_c - E_2)}{2} \cdot \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c} \right)$$

$$[17] \quad C = -b \cdot f'_c$$

$$[18] \quad D = b \cdot c \cdot f'_c + \frac{b \cdot c \cdot E_2}{2} \cdot (\epsilon_{ccu})$$

$$[19] \quad E = \frac{-b \cdot (E_c - E_2)^2}{16 \cdot f'_c} \cdot \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c} \right)^2$$

$$[20] \quad F = b \cdot \left(c - \frac{h}{2} \right) \cdot \frac{(E_c - E_2)^2}{12 \cdot f'_c} \cdot \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c} \right)^2 + \frac{b \cdot (E_c - E_2)}{3} \cdot \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c} \right)$$

$$[21] \quad G = - \left(\frac{b}{2} \cdot f'_c + b \cdot \left(c - \frac{h}{2} \right) \cdot \frac{(E_c - E_2)}{2} \cdot \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c} \right) \right)$$

$$[22] \quad H = b \cdot f'_c \cdot \left(c - \frac{h}{2} \right)$$

$$[23] \quad I = \frac{b \cdot c^2}{2} \cdot f'_c - b \cdot c \cdot f'_c \cdot \left(c - \frac{h}{2} \right) + \frac{b \cdot c^2 \cdot E_2}{3} \cdot (\epsilon_{ccu}) - \frac{b \cdot c \cdot E_2}{2} \cdot \left(c - \frac{h}{2} \right) \cdot (\epsilon_{ccu})$$

A posição da fibra correspondente à deformação (ϵ'_i) é representada pela coordenada vertical (y_t), medida a partir da linha neutra, conforme Equação 24.

$$[24] \quad y_t = c \cdot \frac{\epsilon'_t}{\epsilon_{ccu}}$$

As deformações específicas em cada camada de armadura (ϵ_{si}) são calculadas pela compatibilidade (Equação 25) com (d_{si}) a distância entre o centro de gravidade da camada (i) e da seção transversal.

$$[25] \quad \epsilon_{si} = \epsilon_{ccu} \cdot \frac{(c - d_{si})}{c}$$

Conforme a posição da linha neutra (c), o sinal da tensão (f_{si}) é positiva para a compressão e negativa para a tração e, para considerar o efeito do sentido da rotação do momento das forças, deve-se tomar como positiva a distância (d_{si}) das armaduras acima do centro da seção e, negativa, para as camadas abaixo do centro de gravidade.

A deformação efetiva do reforço (ϵ_{fe}) para o caso de flexo-compressão deve ser limitada pelo valor da Equação 26 para assegurar integridade ao cisalhamento do concreto confinado.

$$[26] \quad \epsilon_{fe} = \kappa_e \cdot \epsilon_{fu} \leq 0,004$$

4. EXEMPLO

A seção transversal da Figura 9 é retangular (250 mm x 400 mm) e representa um pilar localizado no interior de uma edificação com solicitação de cálculo composta por força normal $P_d = 1.380$ kN e momento $M_d = 63$ kN.m. O pilar foi projetado e executado conforme a armadura indicada, concreto C30,

aço com resistência de cálculo de 435 MPa e cobrimento de 30 mm. Ocorre que, devido à necessidade de instalação de equipamentos sobre a laje, os esforços solicitantes devem ser aumentados em 28%: $P_d = 1.766 \text{ kN}$ e $M_d = 80,64 \text{ kN.m}$. Deseja-se, então, verificar a capacidade resistente da seção transversal sem reforço.

Para determinação da capacidade resistente da seção sem reforço, emprega-se a metodologia do ACI PRC-440.2 (2023), que consiste na determinação do diagrama M-P, visto que a seção está solicitada em

flexo-compressão com excentricidade ($e = 6.300 \text{ kN.m}/1.380 \text{ kN} = 4,57 \text{ cm}$) superior ao valor limite ($0,1h = 0,140 = 4 \text{ cm}$).

Em razão da limitação do tamanho do artigo, os resultados para a seção sem reforço são indicados diretamente pela apresentação do diagrama na Figura 10. O ponto em laranja representa a solicitação inicial de projeto com coordenada no interior da envoltória resistente da seção. O ponto em vermelho, fora da envoltória, é a condição com o aumento nas solicitações, denotando-se, portanto, falta de capacidade

da seção. Assim, a seção transversal não apresenta capacidade resistente para suportar as novas solicitações incrementadas em 28%.

Para o reforço do pilar por encaimamento emprega-se manta de fibras de carbono com as seguintes características geométricas e propriedades:

$t_f = 0,166 \text{ mm}$;
 $f_{tu}^* = 4.900 \text{ MPa}$;
 $\epsilon_{fu}^* = 0,021 \text{ mm/mm}$;
 $E_f = 230.000 \text{ MPa}$;

$C_E = 0,95$;

$f_{tu} = 4.655 \text{ MPa}$;

$\epsilon_{fu} = 0,01995 \text{ mm/mm}$.

Determina-se, inicialmente, o número de camadas de reforço necessárias para garantia da pressão mínima de confinamento ($f_{l,min} = 2,40 \text{ MPa}$). Rearranjando-se os termos da Equação 4, tem-se a Equação 27 que resulta em $n = 4$ camadas para ($\epsilon_{fe} = 0,004$ - Equação 26 para flexo-compressão) e ($D = 471,6991 \text{ mm}$ - Equação 7). Para $n = 4$ camadas, recalcula-se a pressão de confinando, resultando em $f_l = 2,5901 \text{ MPa} > f_{l,min}$.

$$[27] \quad n = \frac{D \cdot f_{l,min}}{2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \epsilon_{fe}} = 3,71 \rightarrow n = 4 \text{ camadas}$$

O ponto A do diagrama M-P para a seção confinada tem coordenadas ($\phi P_n(A)$; $\phi M_n(A)=0$), sendo ($\phi P_n(A)$) a capacidade resistente da seção para compressão centrada e determinada pela Equação 1 (transcrita abaixo) com $\epsilon_{fe} = 0,01097$ (Equação 5), a pressão de confinamento $f_l = 7,1034 \text{ MPa}$ e a resistência do concreto confinado $f'_{cc} = 34,5785 \text{ MPa}$ (Equação 3) para $A_g/A_c = 0,5264$ (Equação 8) e $\kappa_a = 0,2056$ (Equação 6) com raio de arredondamento $r_c = 25 \text{ mm}$.

$$[28] \quad \phi P_n(A) = \phi \cdot \left[0,85 \cdot f'_{cc} \cdot (A_g - A_{st}) + f_y \cdot A_{st} \right] = 2.156,8356 \text{ kN}$$

Para o ponto A', tem-se o valor ($\phi P_n(A') = 0,8 \cdot \phi P_n(A) = 1.725,4685 \text{ kN}$). As coordenadas do ponto B ($\phi P_n(B)$; $\phi M_n(B)$) são calculadas pelas Equações 13 e 14, empregando-se os dados indicados:

$b = 250 \text{ mm}$;
 $E_c = 26.070 \text{ MPa}$;
 $\epsilon_{fe} = 0,004$;
 $f_l = 2,5901 \text{ MPa}$;
 $\kappa_b = 0,6658$;
 $\epsilon'_c = 0,002$;
 $f'_{cc} = 31,6695 \text{ MPa}$;
 $E_s = 341,7605 \text{ MPa}$;
 $\epsilon'_t = 0,002332$;
 $c = d = 360 \text{ mm}$;
 $\gamma_t = 171,8567 \text{ mm}$;
 $\epsilon_{ccu} = 0,004885$;
 $A = -0,00008464 \text{ kN/mm}^3$;
 $B = 0,0436 \text{ kN/mm}^2$;
 $C = -7,50 \text{ kN/mm}$;
 $D = 2.775,1362 \text{ kN}$;
 $E = -0,00006348 \text{ kN/mm}^3$;

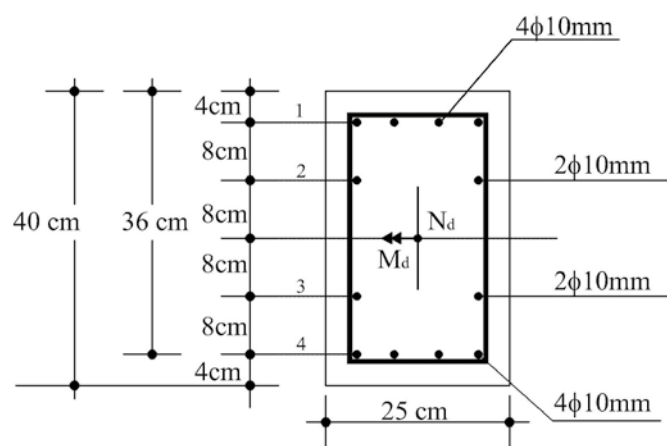


FIGURA 9

SEÇÃO TRANSVERSAL DO PILAR

FONTE: AUTOR

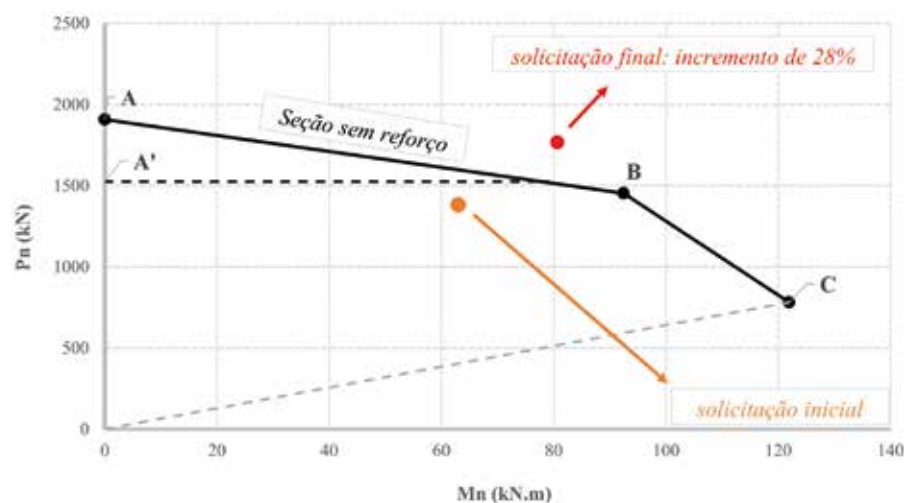


FIGURA 10

DIAGRAMA M-P DA SEÇÃO SEM REFORÇO

FONTE: AUTOR

$F = 0,0426 \text{ kN/mm}^2$;
 $G = -10,7323 \text{ kN/mm}$;
 $H = 1.200 \text{ kN}$;
 $I = 60.010,8948 \text{ kN.mm}$;
 $f_{s1} = 435 \text{ MPa}$;
 $f_{s2} = 435 \text{ MPa}$;
 $f_{s3} = 227,85 \text{ MPa}$;
 $f_{s4} = 0$;

$$[29] \quad \phi P_{n(B)} = \phi \left[\frac{A \cdot (y_t)^3 + B \cdot (y_t)^2 + C \cdot (y_t) + D + \sum A_{si} \cdot f_{si}}{I + \sum A_{si} \cdot f_{si} \cdot d_i} \right]$$

$$= 1.680,3064 \text{ kN}$$

$$[30] \quad \phi M_{n(B)} = \phi \left[\frac{E \cdot (y_t)^4 + F \cdot (y_t)^3 + G \cdot (y_t)^2 + H \cdot (y_t) + I + \sum A_{si} \cdot f_{si} \cdot d_i}{I + \sum A_{si} \cdot f_{si} \cdot d_i} \right]$$

$$= 87,4797 \text{ kN.m}$$

O ponto C do diagrama M-P representa a condição em que a linha neutra corta a seção transversal com valor determinado pela Equação 12 ($c = 252,8177 \text{ mm}$) e a posição da fibra (y_t) com deformação específica de compressão correspondente a (ϵ'_t), segundo a Equação 24, igual a $y_t = 119,0857 \text{ mm}$. As coordenadas do ponto C ($\phi P_{n(C)}$; $\phi M_{n(C)}$) são calculadas pelas Equações 13 e 14, transcritas na sequência, empregando-se os seguintes valores para os coeficientes "A" até "I":

$A = -0,00017162 \text{ kN/mm}^3$;
 $B = 0,0621 \text{ kN/mm}^2$;
 $C = -7,50 \text{ kN/mm}$;
 $D = 1948,8987 \text{ kN}$;
 $E = -0,00012872 \text{ kN/mm}^3$;
 $F = 0,05049 \text{ kN/mm}^2$;
 $G = -7,0321 \text{ kN/mm}$;
 $H = 396,1328 \text{ kN}$;
 $I = 145.645,0626 \text{ kN.mm}$;
 $f_{s1} = 435 \text{ MPa}$;
 $f_{s2} = 435 \text{ MPa}$;
 $f_{s3} = -110,46 \text{ MPa}$;
 $f_{s4} = -435 \text{ MPa}$;

$$[31] \quad \phi P_{n(C)} = \phi \left[\frac{A \cdot (y_t)^3 + B \cdot (y_t)^2 + C \cdot (y_t) + D + \sum A_{si} \cdot f_{si}}{I + \sum A_{si} \cdot f_{si} \cdot d_i} \right]$$

$$= 1.103,4179 \text{ kN}$$

$$[32] \quad \phi M_{n(C)} = \phi \left[\frac{E \cdot (y_t)^4 + F \cdot (y_t)^3 + G \cdot (y_t)^2 + H \cdot (y_t) + I + \sum A_{si} \cdot f_{si} \cdot d_i}{I + \sum A_{si} \cdot f_{si} \cdot d_i} \right]$$

$$= 131,9878 \text{ kN.m}$$

Na Tabela 1, são reunidas as coordenadas para os pontos A, B e C do diagrama M-P para a seção transversal reforçada com $n = 4$ camadas de manta polimérica, com o respectivo diagrama indicado na Figura 11. Como se vê, com 4 camadas, a região delimitada pelo diagrama não engloba o ponto correspondente ao incremento de 28% nas solicitações; logo, a seção não tem condições de segurança para suportar ao aumento do carregamento. Empregando-se 8 camadas de reforço, é possível modificar o diagrama de forma a incrementar a capacidade da seção para atendimento as novas solicitações.

5. CONCLUSÕES

Como apresentado no artigo, a metodologia empregada possibilita construir o diagrama simplificado de interação momento-força normal representativo da capacidade da seção transversal. Foi possível obter o diagrama para a seção sem reforço considerando-se concreto não confinado, com resistência à compressão

f'_c e deformação $\epsilon_{cu} = 0,003$ para diagrama típico tensão-deformação. Assim, comprovou-se que a seção tinha capacidade suficiente para suportar as solicitações previstas inicialmente em projeto, mas insuficiente para resistir as novas solicitações impostas pelo aumento de carregamento. A metodologia foi, então, empregada para a construção do diagrama da seção reforçada considerando-se o comportamento do concreto confinado com manta de fibras de carbono e representado pelo trecho pós-pico com comportamento linear ascendente (pressão mínima de confinamento), com resistência máxima f'_{cc} e deformação última ϵ_{ccu} . Para o número mínimo de 4 camadas de reforço, verificou-se capacidade insuficiente para o incremento das solicitações e que a região de concreto efetivamente confinada era de apenas 52% da área da seção retangular de relação entre os lados igual a 1,60 e raio de arredondamento de 25 mm.

TABELA 1

COORDENADAS DOS PONTOS DO DIAGRAMA M-P PARA A SEÇÃO REFORÇADA

Pontos	n = 4 camadas		n = 8 camadas	
	P_n (kN)	M_n (kN.m)	P_n (kN)	M_n (kN.m)
A	2.156,8356	0,00	2.406,75	0,00
A'	1.725,4685	0,00	1.925,40	0,00
B	1.680,3064	87,4797	1.815,43	84,21
C	1.103,4179	131,9878	1.306,46	131,83

FONTE: AUTOR

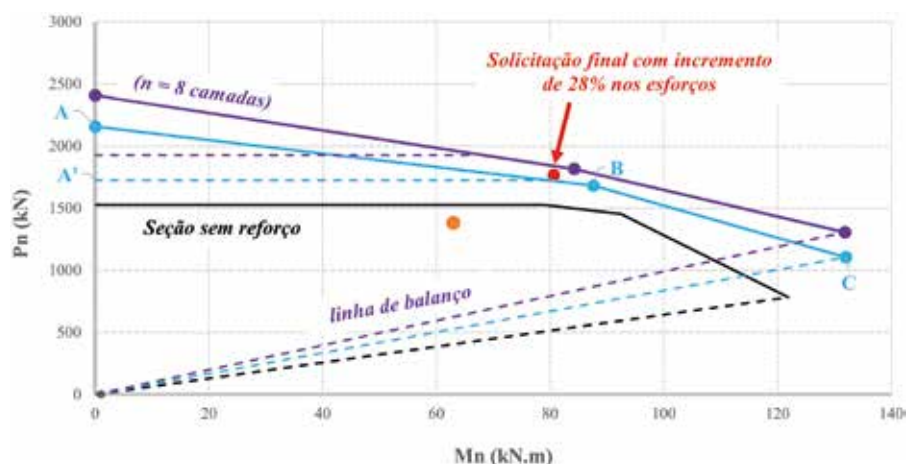


FIGURA 11

DIAGRAMA M-P DA SEÇÃO REFORÇADA

FONTE: AUTOR

As análises mostraram que seriam necessárias 8 camadas de reforço para que o pilar tenha condições de suportar as novas solicitações. Este resultado apenas representa o resultado da aplicação do

modelo proposto, uma vez que este número de camadas não é usual e demandaria, segundo o ACI PRC-440.2 (2023), a garantia de impregnação de todas as camadas e a verificação do efeito de cisalhamento

entre camadas. Neste caso, o mais adequado seria considerar outras técnicas de reforço, como o aumento da seção do pilar com armaduras adicionais, chapas e perfis metálicos colados externamente etc. ©

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ACI PRC-440.2. Design and Construction of Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Systems for Strengthening Concrete Structures - Guide. November, 2023.
- [2] ABOKWIEK, R. et al. RC columns strengthened with NSM-CFRP strips and CFRP wraps under axial and uniaxial bending: Experimental investigation and capacity models. Journal of Composites for Construction, 25, 2, 2021.
- [3] CARRAZEDO, R. Mecanismos de confinamento e suas implicações no reforço de pilares de concreto por encamisamento com compósito de fibras de carbono. Dissertação. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 2002.
- [4] CAREY, S.A; HARRIES, K. A. Axial behavior and modeling of confined small, medium and large-scale circular sections with carbon fiber-reinforced polymer jackets. ACI Structural Journal. 2005.
- [5] DIEGO A. et al. Experimental investigation on the compressive behaviour of FRP-confined rectangular concrete columns. Archives of Civil and Mechanical Engineering. v.22, n.131, 2022.
- [6] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON - FIB. Structural concrete: textbook on behaviour, design and performance. Bulletin 1, v.1, 1999.
- [7] HARRIES, K. A.; CAREY, S. A. Shape and Gap effects on the behavior of variably confined concrete. Cement Concrete Research. v.33, n.6, 2003.
- [8] LAM, L.; TENG, J. Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete. Construction and Building Materials. v.17, n.6-7, 2003.
- [9] OLIVEIRA, D. S. Reforço de pilares de concreto armado de seção transversal retangular mobilizando efeitos de confinamento. Tese de doutorado da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 2017.
- [10] RICHART, F. E. et al. A study of the failure of concrete under combined compressive stresses. Engineering Experiment Station Bull. n.185, University of Illinois, Urbana, Ill, 1928.
- [11] SIDDIKA, A. et al. Performance, challenges and opportunities in strengthening reinforced concrete structures by using FRPs - A state-of-art review. Engineering Failure Analysis, 111, 2020.

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

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



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

Patrocínio



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

Análise comparativa da capacidade resistente de vigas compostas por concreto reforçado com fibras

MATEUS NUNES BARBOSA VILELA - ENG. - <https://orcid.org/0009-0008-3036-2463> - (mateus.vilela@estudante.ufscar.br) ;

RENATO GRANERO - ENG. ;

MARGOT FABIANA PEREIRA - PROF.^a - <https://orcid.org/0000-0001-6432-3931> – UFSCar

ARTHUR ÁLAX DE ARAÚJO ALBUQUERQUE - PROF. - <https://orcid.org/0009-0008-8622-6962> – UFG

RESUMO

O CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO (CRFA) MELHORA O DESEMPENHO DO CONCRETO, ESPECIALMENTE NO COMPORTAMENTO PÓS-FISSURAÇÃO, AO ATUAR COMO PONTE DE TRANSFERÊNCIA DE TENSÕES. CONTUDO, A DETERMINAÇÃO DE SUA CAPACIDADE RESISTENTE É UM DESAFIO, POIS DIFERENTES NORMATIVAS GERAM RESULTADOS DIVERGENTES. ESTE TRABALHO COMPARA A CAPACIDADE RESISTENTE DE VIGAS DE CRFA USANDO QUATRO MODELOS NORMATIVOS. UTILIZARAM-SE DADOS EXPERIMENTAIS DA LITERATURA (VIGA EM FLEXÃO DE QUATRO PONTOS), COMPARANDO OS MODELOS ACI 544.4R-88, MC2010 E OS MODELOS LINEAR E RÍGIDO-PLÁSTICO (ABNT NBR 16935:2021). OS RESULTADOS INDICARAM QUE OS MODELOS ACI 544.4R-88, MC2010 E RÍGIDO-PLÁSTICO (NBR 16935:2021) SUBESTIMARAM A CAPACIDADE RESISTENTE, ENQUANTO O MODELO

LINEAR (NBR 16935:2021) A SUPERESTIMOU. OBSERVOU-SE AINDA QUE OS MODELOS MC2010 E RÍGIDO-PLÁSTICO (NBR 16935:2021) FORAM SATISFATORIAMENTE PRÓXIMOS.

PALAVRAS-CHAVE: CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS, ACI 544.4R-88, MC2010, MODELOS LINEAR E RÍGIDO PLÁSTICO DA ABNT NBR 16935:2021.

1. INTRODUÇÃO

A baixa resistência à tração do concreto, uma de suas principais limitações, o torna suscetível à fissuração. A introdução de fibras de aço na massa cimentícia, resultando no Concreto Reforçado com Fibras de Aço (CRFA), é uma alternativa eficaz. A ABNT NBR 16935:2021 o define como um compósito com fibras descontínuas que atuam como reforço estrutural.

A adição de fibras melhora a resistência à tração e modifica o comportamento pós-fissuração. Elas agem como “pontes de transferência de tensões”, minimizando o comportamento frágil e melhorando as resistências à flexão, fadiga, impacto e tração (Barros, 2009; Góis, 2010).

Figueiredo (2011) ressalta que a adição de fibras, além de reforçar a matriz, eleva a produtividade executiva, pois pode eliminar a montagem de armaduras convencionais.

Apesar das qualidades do CRFA, o mercado nacional resiste à sua utilização, devido à recente normatização (ABNT NBR 16935:2021) e à carência de estudos aprofundados sobre o tema.

Neste contexto, o artigo compara a capacidade resistente de uma viga de CRFA (dados experimentais) aplicando quatro modelos normativos: ACI 544.4R-88, MC2010 e os modelos Linear e Rígido-Plástico (ABNT NBR 16935:2021), discutindo as diferenças entre as abordagens.

2. MODELOS DE CÁLCULO

O dimensionamento de vigas de CRFA baseia-se em diferentes modelos normativos, destacando-se o ACI 544.4R-88, o MC2010 (item 7.7) e a ABNT NBR 16935:2021. A seguir, descrevem-se os roteiros de cálculo preconizados por essas normas.

2.1 Modelo do ACI 544.4R-88

Este modelo baseia-se no diagrama de esforços de uma viga sob flexão, simplificado na Figura 1.

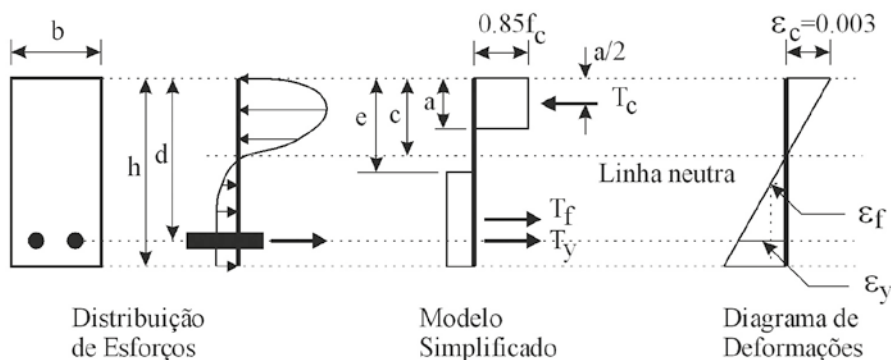


FIGURA 1

MODELO DO ACI 544.4R-88 DA DISTRIBUIÇÃO DE ESFORÇOS E DO DIAGRAMA DE DEFORMAÇÕES DE UMA VIGA SUBMETIDA A ESFORÇOS DE FLEXÃO. ADAPTADO DE ACI, 1988

FONTE: ACI, 1988

Neste modelo, a tensão de tração do concreto com fibras (σ_t) é definida de acordo com a equação (1). Sendo, λ_f o fator de forma das fibras; V_f o volume de fibras (%); η_t a eficiência da aderência das fibras, que depende de suas características e varia de 1,0 a 1,2.

$$[1] \quad \sigma_t = 0,00772 \cdot \lambda_f \cdot V_f \cdot \eta_t$$

A profundidade da linha neutra (c) é calculada em função da altura útil da viga (d) e da deformação nas barras de aço (ϵ_y), conforme mostra a equação (2), que é obtida a partir do diagrama de deformações da Figura 1. A deformação nas barras da armadura principal (ϵ_y) é calculada pela razão entre a tensão de escoamento do aço e o seu respectivo módulo de elasticidade.

$$[2] \quad c = \frac{0,003 \cdot d}{\epsilon_y + 0,003}$$

O valor da profundidade (e), calculada com a equação (3), é obtido em função da profundidade da linha neutra (c) e da deformação das fibras (ϵ_f), que, por sua vez, é determinada com a razão entre a tensão de tração nas fibras, quando estas sofrem o arrancamento, e o módulo de elasticidade das fibras.

$$[3] \quad e = (\epsilon_f + 0,003) \cdot \frac{c}{0,003}$$

Por fim, o momento resistido pela seção da viga (M_R) é calculado com a equação (4). Onde: A_s é a área total de aço; f_y é a tensão de escoamento do aço; e (a) é a altura do diagrama de tensões considerado retangular.

$$[4] \quad M_R = A_s \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right) + \sigma_t \cdot b \cdot (h - e) \cdot \left(\frac{h + e - a}{2}\right)$$

2.2 Modelo do MC2010 item 7.7

Neste modelo, a capacidade resistente de uma seção transversal de CRF é baseada no equilíbrio de momento na seção. A profundidade da linha neutra é determinada a partir do equilíbrio das forças de tração e compressão e, conseqüentemente, encontra-se a capacidade resistente. As equações de (5) a (8) descrevem este procedimento.

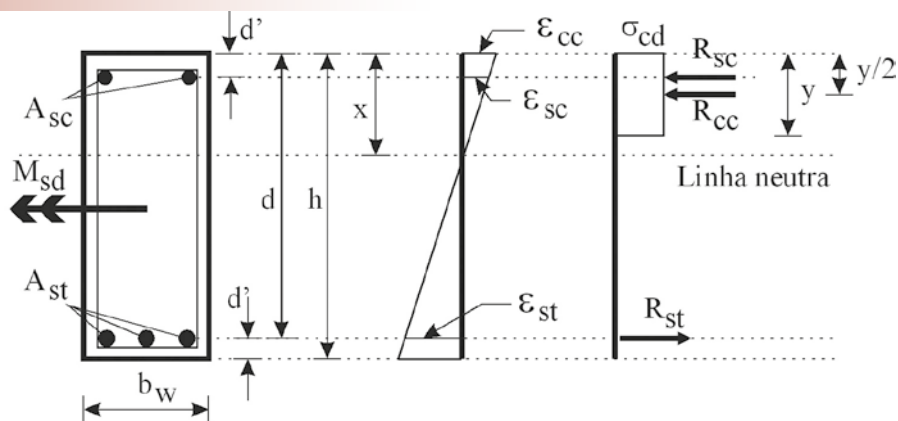


FIGURA 2

SEÇÃO TRANSVERSAL GENÉRICA

FONTE: DOS AUTORES, 2025

$$[5] \quad C_c = \alpha_2 \cdot f'_c \cdot \gamma \cdot d_n \cdot b$$

$$[6] \quad C_s = A_{sc} \cdot E_s \cdot \epsilon_{cu} \cdot \frac{d_n - d_{sc}}{d_n}$$

$$[7] \quad T_s = A_{st} \cdot f_s$$

$$[8] \quad T_f = (D - D_n) \cdot b \cdot f'_{1.5}$$

Onde: C_c representa a contribuição do concreto à compressão; C_s corresponde à parte absorvida pelo concreto reforçado com fibras (CRF); T_s é a fração suportada pelas barras de aço; T_f a porção associada às fibras metálicas. As dimensões da seção são indicadas por (b) e (D); (d_n ou D_n) é profundidade da linha neutra; o coeficiente (α_2) define a forma do bloco de tensões no concreto; (f'_c) a resistência característica à compressão; o fator (γ) introduz a redução aplicada aos esforços de compressão; as áreas de armadura em compressão e em tração são representadas por (A_{sc}) e (A_{st}), respectivamente; o módulo de elasticidade do aço é dado por (E_s); a deformação última do concreto comprimido é expressa por (ϵ_{cu}); a tensão atuante nas barras é designada por (f_s); ao passo que a resistência residual do compósito reforçado com fibras, associada à abertura de fissura de 1,5 mm, é indicada por ($f'_{1.5}$ ou $f_{R1.5}$).

O equilíbrio global é expresso pela equação (9).

$$[9] \quad C_c + C_s = T_s + T_f$$

O momento resistente último (M_{rd}), da equação (10), resulta do somatório das forças internas multiplicadas por seus braços de alavanca. A equação considera a parcela resistente à compressão do con-

creto (C_c), multiplicada pelo seu braço de alavanca (distância entre a resultante do bloco retangular e a armadura tracionada); a parcela da armadura comprimida (C_s), com braço definido pela diferença de posição entre a armadura de compressão e a tracionada; e a parcela de tração das fibras (T_f), multiplicada pela distância entre o centroide da região tracionada e a armadura tracionada.

$$[10] \quad M_{rd} = C_c(d - 0,5\lambda 0,001d_n) + C_s(d - d'') - T_f \left[\frac{0,001(h - d_n)}{2 - d'} \right]$$

Onde: (d) é a altura útil da seção, (d_n) a profundidade da linha neutra, (λ) o coeficiente do bloco de tensões, (d'') a posição da armadura comprimida e (d') a posição da armadura tracionada, com a coerência dimensional garantida pela conversão de milímetros em metros (0,001).

2.3 Modelo da ABNT NBR 16935:2021

O modelo da norma brasileira é dividido em dois: Modelo Rígido Plástico e Modelo Linear, cujo resumo dos equacionamentos são apresentados a seguir.

2.3.1 MODELO RÍGIDO PLÁSTICO

No modelo rígido plástico a profundidade da linha neutra é determinada através do equilíbrio da seção transversal, apresentada na Figura 2.

Onde: x é a profundidade da linha neutra; A_{st} é a área de aço tracionada; A_{sc} é a área de aço comprimida; d é a altura útil da seção; d' é a distância entre o CG da

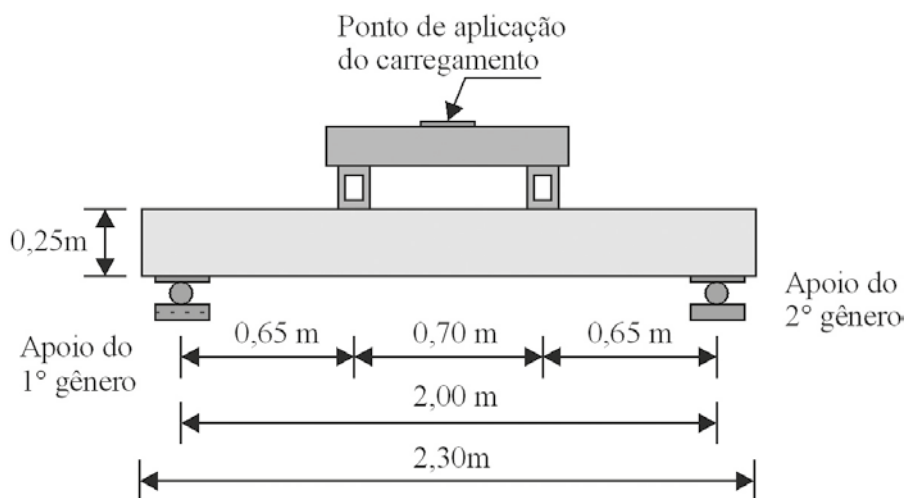


FIGURA 3

ENSAIO DE FLEXÃO EM QUATRO PONTOS

FONTE: ADAPTADO DE SILVA NETO, 2017

armadura longitudinal comprimida e a face mais próxima do elemento estrutural; M_{sd} é o momento fletor resistente de cálculo; b_w é a largura da viga; R_{cc} é a resultante no concreto comprimido; R_{st} é a resultante no aço tracionado; e h é a altura total da seção transversal.

O momento resistente da seção (M_R), equação (13), é dado pela soma do momento resistente da armadura longitudinal (M_A) e das fibras (M_u) que, por sua vez, são determinados através das equações (11) e (12). Sendo: f_{yk} resistência característica do aço; f_{ck} a resistência característica do concreto; b_w é a largura da viga; α_c igual a 0,85 para concretos com $f_{ck} \leq 50$ MPa; λ igual a 0,80 para concretos com $f_{ck} > 50$ MPa; f_{R3} representa a resistência residual à tração na flexão do CRFA correspondente ao $CMOD_3 = 2,5$ mm.

$$[11] \quad M_u = \frac{f_{R3} \cdot b_w \cdot h^2}{6}$$

$$[12] \quad M_A = \alpha_c \cdot \lambda \cdot \left(\frac{f_{ck}}{\gamma_c} \right) \cdot b_w \cdot x \cdot \left(d - \frac{\lambda \cdot x}{2} \right)$$

$$[13] \quad M_R = M_u + M_A$$

2.3.2 MODELO LINEAR

Diferentemente do modelo rígido-plástico, o modelo linear utiliza o equilíbrio da seção transversal que considera as parcelas resistentes à compressão e à tração localizadas acima e abaixo da linha neutra, respectivamente.

Com a equação (11) determina-se a profundidade da linha neutra e, conseqüentemente, define-se o domínio de deformação que a seção transversal se encontra. Para isso, utilizam-se também as equações (14)

e (15). Onde: ε_{su} é a deformação no aço; e ε_{cu} é a deformação no concreto.

$$[14] \quad \varepsilon_{su} = \frac{d - x}{x} \cdot \varepsilon_{cu}$$

$$[15] \quad \varepsilon_{fu} = \frac{h - x}{x} \cdot \varepsilon_{cu}$$

Determinam-se, então, mais dois fatores (w_u e f_{Ftuk}), usados para quantificar a contribuição residual das fibras na fase pós-fissuração do CRFA. O parâmetro w_u , a abertura efetiva de trinca, estimada da deformação última das fibras (limite 2,5 mm), e f_{Ftuk} é a resistência residual à tração ajustada por essa abertura. Estes parâmetros representam a degradação gradual da resistência das fibras com o aumento da trinca, e são descritos nas equações (16) e (17). Sabendo que $CMOD_3$ é igual a 2,5 mm; ε_{Fu} descreve a deformação última do CRFA; f_{R1} representa a resistência residual à tração na flexão do CRFA correspondente ao $CMDOD1 = 0,5$ mm.

$$[16] \quad w_u = \min \left\{ \frac{2,5 \text{ mm}}{\varepsilon_{Fu} \cdot (h - x)} \right\}$$

$$[17] \quad f_{Ftuk} = 0,45 \cdot f_{R1} - \frac{w_u}{CMOD_3} \cdot (0,65 \cdot f_{R1} - 0,5 \cdot f_{R3})$$

Por fim, o momento resistente de cálculo (M_R) é determinado com a equação (20), que, por sua vez, é obtida se considerar o equilíbrio da seção transversal entre a força de compressão atuante (R_{cc}), dada pela equação (18), e a força de tração do concreto (R_{ct}), equação (19).

$$[18] \quad R_{cc} = \alpha_c \cdot \lambda \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot b_w \cdot x$$

$$[19] \quad R_{ct} = \frac{f_{Ftuk}}{\gamma_c} \cdot b_w \cdot (h - x)$$

$$[20] \quad M_R = R_{cc} \cdot \left(d - \frac{\lambda \cdot x}{2} \right) - R_{ct} \cdot \left[\left(\frac{h \cdot x}{2} \right) - d' \right]$$

TABELA 1

DADOS EXPERIMENTAIS DAS VIGAS ENSAIADAS POR SILVA NETO (2017)

Viga	Quantidade de armadura de flexão	Taxa de armadura de flexão (%)	Volume de fibras (%)
T1F000	4 ϕ 16 mm	1,287	0,00
T2F050	2 ϕ 16 mm	0,643	0,50
T3F075	2 ϕ 16 mm	0,643	0,75
T4F100	2 ϕ 16 mm	0,643	1,00

FONTE: SILVA NETO, 2017

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para as análises comparativas entre

TABELA 2

RESULTADOS DAS CARGAS RESISTIDAS POR CADA VIGA

Viga	Momento fletor resistente (kNm)				
	Valores experimentais	ACI 544.4R-88	MC2010	NBR 16935:2021 rígido-plástico	NBR 16935:2021 linear
T2F050	62,930	41,500	49,41	50,30	78,10
T3F075	62,780	43,100	50,28	51,37	81,80
T4F100	67,729	44,800	52,98	55,02	94,80

FONTE: DOS AUTORES, 2025

os quatro modelos já descritos, utilizaram-se os resultados experimentais de Silva Neto (2017) em ensaios de vigas submetidas à flexão em quatro pontos. A Figura 3 apresenta o esquema do ensaio, as dimensões das vigas e os pontos de aplicação da carga. A Tabela 1 mostra a quantidade e taxa da armadura de flexão e o volume de fibras das quatro vigas ensaiadas. Este trabalho discute apenas o momento resistente das vigas ensaiadas com os modelos já discutidos, calculados segundo as equações (4), (10), (13) e (20).

A Tabela 2 compara os momentos resistentes experimentais das três vigas com fibras (Silva Neto, 2017) com os calculados pelos quatro modelos. A viga T1F000 foi excluída por não conter fibras. O modelo linear da NBR 16935:2021 e o ACI 544.4R-88 geram os maiores e menores momentos resistentes, respectivamente. Os resultados dos modelos MC2010 e rígido plástico (NBR 16935:2021) aproximam-se mais do ACI 544.4R-88 do que do linear (NBR 16935:2021). Finalmente, apenas o modelo linear da NBR 16935:2021 supera os valores experimentais.

Segundo a Figura 4, os modelos rígido-plástico da NBR 16935:2021 e MC2010 são os mais próximos dos experimentais (diferenças relativas de -21% a -12%). Valores negativos indicam subestimação da resistência (momentos calculados < experimentais). Apenas o modelo linear (NBR 16935:2021) foi contrário à segurança, com uma diferença positiva. A Figura 4 aponta ainda que, para os demais modelos, a diferença relativa diminui com o aumento do volume de fibras. No modelo rígido-plás-

tico (NBR 16935:2021), por exemplo, a diferença cai de -20% (T2F050) para -18% (T3F075) e -12% (T4F100). Isso sugere que os modelos ACI 544.4R-88, MC2010 e NBR 16935:2021 (Rígido Plástico) ganham precisão com o aumento de fibras.

A Figura 5 compara os modelos teóricos com o ACI 544.4R-88. O mo-

delo linear (NBR 16935:2021) apresentou as maiores diferenças relativas: 88% (T2F050), 90% (T3F075) e 112% (T4F100), aumentando com o volume de fibras. Os demais modelos, MC2010 e Rígido-Plástico (NBR 16935:2021), não mostraram essa tendência de aumento com o volume de fibras. As diferenças destes para o ACI 544.4R-88 ficaram na faixa de 17% a 23% superiores.

A Figura 6 compara a diferença relativa do MC2010 com os outros três modelos. O modelo rígido-plástico (NBR 16935:2021) é o mais próximo do MC2010 (diferenças de 2% a 4%). Essa proximidade é esperada, pois ambos se baseiam no mesmo princípio de equilíbrio da seção transversal. Em contraste, o ACI 544.4R-88 e, principalmente, o linear (NBR 16935:2021) mostram diferenças significativamente maiores do MC2010. O modelo linear, por exemplo, mostra divergência

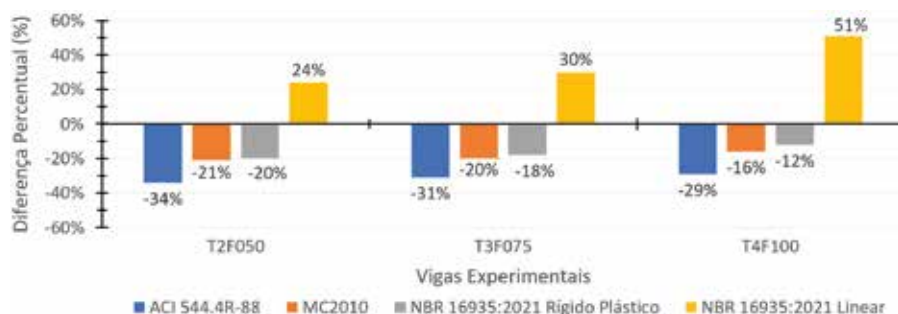


FIGURA 4

DIFERENÇA RELATIVA DOS MODELOS DE CÁLCULO TEÓRICO E O EXPERIMENTAL

FONTE: DOS AUTORES, 2025

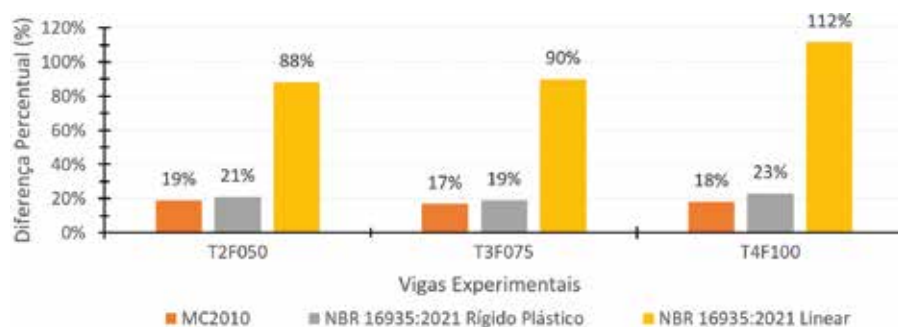


FIGURA 5

DIFERENÇA RELATIVA ENTRE O MODELO ACI 544.4R-88 E DEMAIS MODELOS TEÓRICOS

FONTE: DOS AUTORES, 2025

considerável, com a diferença aumentando com as fibras: de 58% (T2F050) para 79% (T4F100). A diferença do

ACI 544.4R-88 ficou entre -15% e -16%, sem grande variação com o volume de fibras.

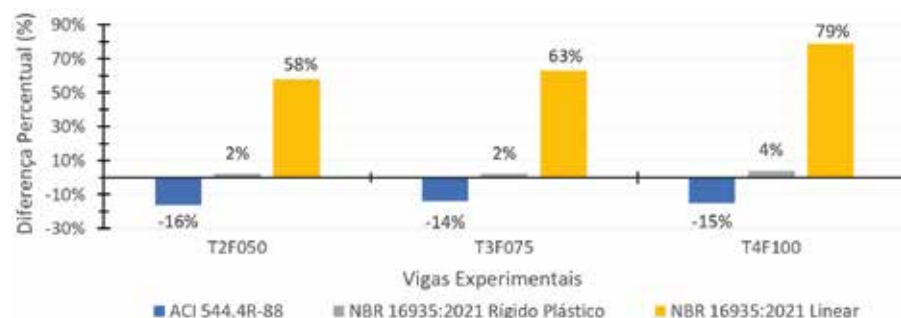


FIGURA 6

DIFERENÇA RELATIVA ENTRE O MODELO MC2010 E DEMAIS MODELOS TEÓRICOS

FONTE: DOS AUTORES, 2025

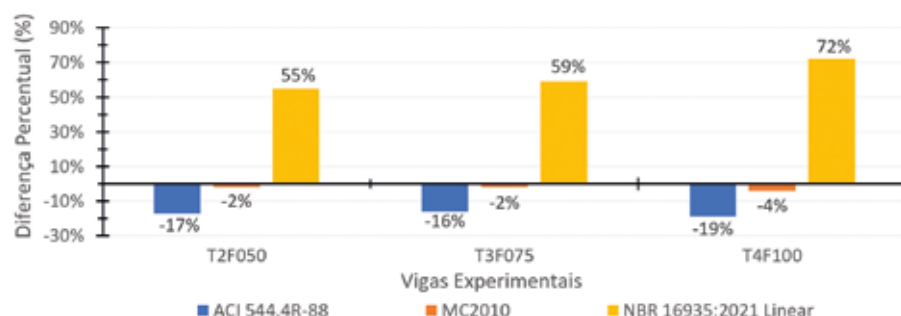


FIGURA 7

DIFERENÇA RELATIVA ENTRE O MODELO RÍGIDO PLÁSTICO DA NBR 16935:2021 E DEMAIS MODELOS TEÓRICOS

FONTE: DOS AUTORES, 2025

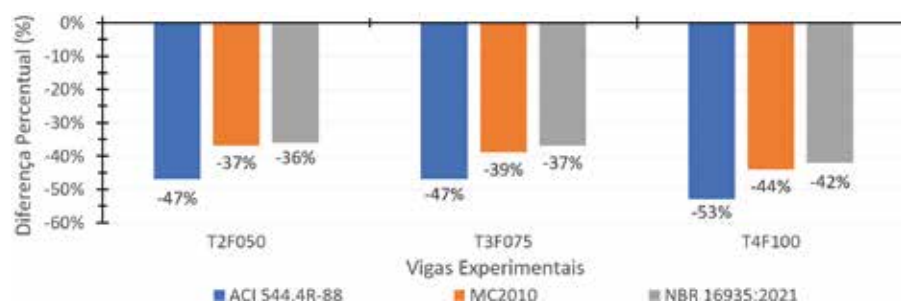


FIGURA 8

DIFERENÇA RELATIVA ENTRE O MODELO RÍGIDO LINEAR DA NBR 16935:2021 E DEMAIS MODELOS TEÓRICOS

FONTE: DOS AUTORES, 2025

A Figura 7, que compara o modelo Rígido-Plástico (NBR 16935:2021) com os demais, apresenta diferenças semelhantes às da Figura 6. Isso ocorre porque os modelos Rígido-Plástico e MC2010 são muito próximos. Por isso, ao trocar a referência entre eles, o comportamento dos demais modelos (ACI 544.4R-88 e Linear NBR 16935:2021) se mantém, apresentando apenas pequenas variações percentuais.

Finalmente, a Figura 8 compara os modelos ao Linear (NBR 16935:2021), e todos apresentam diferenças relativas negativas. Isso indica que o modelo linear superestima o momento resistente, sendo o único com resultados superiores aos demais. As diferenças significativas (de -36% a -53%) devem-se às abordagens de cálculo. Os modelos Rígido (NBR 16935:2021) e MC2010 dependem da resistência residual (possível causa da discrepância), enquanto o ACI 544.4R-88 considera uma contribuição de tensão menor. A diferença relativa negativa também aumenta com o volume de fibras, sugerindo que a superestimação do modelo linear cresce com o reforço.

3.1 Análise de sensibilidade da Resistência Residual (f_R)

As diferenças relativas anteriores indicam que os modelos de equilíbrio da seção transversal (NBR 16935:2021 Rígido-Plástico e MC2010) subestimam a resistência experimental do CRFA. Essa subestimação é significativa (-21% a -12% no modelo Rígido-Plástico NBR 16935:2021). Isso sugere que a resistência residual à flexão (f_R) é o parâmetro-chave para o cálculo das fibras, sendo a principal fonte de incerteza.

Para avaliar o impacto de f_R , fez-se uma análise de sensibilidade paramétrica, variando seus valores médios f_R em $\pm 25\%$. Esse intervalo é o limite máximo de variação aceito pela ABNT NBR 16935:2021 para a resistência residual. A Tabela 3 apresenta os momentos resistentes recalculados para o modelo NBR 16935:2021 Rígido-Plástico.

A Tabela 3 mostra que uma variação de 25% em altera o calculado. Na viga com menos fibras (T2F050), a variação de foi de -1.5%, enquanto na com mais fibras (T4F100) foi de -3.2%. Ou seja, mudanças em (no intervalo considerado) provocam pequenas variações em , e, assim, não alteram muito as diferenças relativas aos valores experimentais.

4. CONCLUSÃO

O Concreto Reforçado com Fibras de Aço (CRFA) tem vantagens sobre o concreto armado tradicional, como o comportamento pós-fissuração e maior capacidade resistente. A relevância do CRFA e a nova ABNT NBR 16935:2021 justificam a validação de seus modelos de cálculo.

Este estudo comparou a capacidade resistente à flexão de vigas de CRFA usando quatro modelos normativos: ACI 544.4R-88, MC2010 e ABNT NBR 16935:2021 (Rígido-Plástico e Linear). As análises usaram os dados experimentais de ensaios de flexão em quatro pontos de Silva Neto (2017).

Constatou-se que os modelos ACI 544.4R-88, MC2010 e Rígido-Plástico (NBR 16935:2021) subestimaram a capacidade resistente, enquanto o Linear a superestimou, em relação aos dados experimentais. Dos que subestimaram,

TABELA 3

MOMENTO RESISTENTE CALCULADO PELO MODELO RÍGIDO-PLÁSTICO DA NBR16935:2021, VARIANDO A RESISTÊNCIA RESIDUAL (f_R) EM $\pm 25\%$

Traço	M_R Médio (kN.m)	$M_R + 25\% f_R$ (kN.m)	$M_R - 25\% f_R$ (kN.m)	M_{exp} (kN.m)
T2F050	50,30	51,03	49,57	62,93
T3F075	51,37	52,30	50,44	62,78
T4F100	55,02	56,79	53,26	101,54

FONTE: DOS AUTORES, 2025

o ACI 544.4R-88 foi o mais distante e o Rígido-Plástico o mais próximo dos ensaios. Para estes três modelos, a precisão aumenta com o volume de fibras.

Em contrapartida, o Modelo Linear apresentou comportamento divergente: a superestimação da resistência intensificou-se com o aumento do volume de fibras, variando de 24% (T2F050) a 51% (T4F100). Embora o modelo apresente maior acurácia para vigas com baixas dosagens de reforço, classifica-se como não conservativo, uma vez que superestima sistematicamente a capacidade resistente experimental.

Verificou-se também que os modelos MC2010 e Rígido-Plástico são muito próximos (diferenças de 2% a 4%), o que se justifica por ambos usarem o mesmo princípio de equilíbrio da

seção. Ambos apresentaram diferenças maiores (17% a 23%) em relação ao ACI 544.4R-88.

A análise de sensibilidade da resistência residual à flexão (f_R), com variação de $\pm 25\%$ no modelo Rígido-Plástico (NBR 16935:2021), mostrou variações pouco significativas na capacidade resistente (entre -1,5% e -3,2%).

O cálculo da capacidade resistente do CRFA envolve aproximações que impactam a previsão de cada modelo. No geral, os modelos testados apresentaram discordâncias com os resultados experimentais. Este estudo reforça a necessidade de modelos analíticos mais precisos e confiáveis para o CRFA. Ressalta-se a necessidade de comparar estes modelos com outros dados experimentais, para verificar as previsões e se estas conclusões se mantêm. ☺

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABNT NBR 15530:2019. Fibras de aço para concreto - Especificação. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2019, Rio de Janeiro, Brasil.
- [2] ABNT NBR 16935:2021. Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras - Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2021, Rio de Janeiro, Brasil.
- [3] ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 544: Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete (ACI 544.4R-88 Reapproved 1999). Farmington Hills, 18p, 1988.
- [4] BARROS, A. R. Avaliação do comportamento de vigas de concreto auto-adensável reforçado com fibras de aço. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2009.
- [5] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. fib Model Code for Concrete Structures 2010. Berlin: Ernst & Sohn, 2013. 434 p. ISBN 978-3433030613.
- [6] FIGUEIREDO, A. D. Concreto reforçado com fibras. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- [7] GÓIS, F. A. P. Avaliação experimental do comportamento de concreto fluido reforçado com fibras de aço: Influência do fator forma da fração volumétrica das fibras nas propriedades mecânicas do concreto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2009.
- [8] NATAJARA, M. C. e DHANG, N. Stress-strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression. Cement and Concrete Composites, v. 21, n. 5-6, p. 383-390, 1999.
- [9] SILVA NETO, A. P. Análise numérico-experimental de vigas de concreto reforçado com fibras de aço. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.

Horizons 2026

Reunindo líderes empresariais, setor público, investidores e academia para transformar visão inovadora de negócios em ação, a

Horizons vai ter lugar de 5 a 7 de maio, no Hub Green Sampa, em São Paulo.

Promovida pela FIA Business School, o evento contará com arenas temáticas,

apresentação de startups, workshops imersivos e jantar.

Mais informações:

<https://horizons.fia.com.br/>

PROCEMCO 2026 reúne indústria e academia

A Reunião do Cimento e do Concreto (PROCEMCO 2026) acontece de 6 a 8 de maio, em Cartagena das Índias, na Colômbia.

Com conferências, seminários, reuniões e feira de produtos e serviços da construção, o evento da indústria da construção é realizado pela Câmara

Colombiana de Cimento e Concreto.

Mais informações:

<https://procem.co/procemco26/>

II CBEMM 2026

O II Congresso Brasileiro de Estruturas Metálicas e Mistas (II CBEMM 2026) será realizado no dia 15 de abril de 2026, às 9h, no Hotel Deville, em Maringá - PR.

O II CBEMM reunirá pesquisadores, profissionais, estudantes e representantes do setor produtivo de diversas regiões do Brasil e do exterior, promovendo discussões técnico-científicas sobre es-

truturas metálicas e mistas, inovação, sustentabilidade e desenvolvimento tecnológico na construção civil.

Mais informações:

www.cbemm.uem.br

Sistemas de Fôrmas para Edifícios

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



ANTONIO CARLOS ZORZI

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

Autor: Antonio Carlos Zorzi

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

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

DADOS TÉCNICOS

ISBN 9788598576237

Formato: 18,6 cm x 23,3 cm

Páginas: 195

Acabamento: Capa dura

Ano da publicação: 2015

Patrocínio



Aquisição:

www.ibracon.org.br

(Loja Virtual)

CBPAT 2026

O 7º Congresso Brasileiro de Patologia das Construções (CBPAT 2026) vai ser 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 profissionais 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.

As inscrições devem ser feitas pelo site:

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

7th fib Congress

O 7º Congresso da Federação Internacional do Concreto Estrutural vai acontecer em Lisboa, Portugal, de 15 a 19 de junho, sob a bandeira "Concreto estrutural 2050: para a neutralidade

do carbono, o projeto auxiliado por Inteligência Artificial e a construção robótica.

O Congresso vai trazer as novidades em termos de pesquisa e desenvolvimento

do concreto, bem como cases dos projetos estruturais mais impressionantes.

Mais informações:

<https://fiblisbon2026.pt/>

PRÁTICA RECOMENDADA IBRACON CONCRETO AUTOADENSÁVEL



COMITÊ TÉCNICO CT-202



Prática Recomendada IBRACON Concreto Autoadensável

COORDENADOR Bernardo Fonseca Tutikian
SECRETÁRIO Roberto Christ

Traz para a comunidade técnica os conceitos relacionados ao concreto autoadensável, as recomendações para seleção de materiais, os métodos de dosagem, os procedimentos de mistura, as recomendações para a aceitação do concreto no estado fresco e para seu transporte, lançamento e rastreamento

A obra é resultado do trabalho do Comitê Técnico IBRACON sobre Concreto Autoadensável (CT 202), voltando-se aos profissionais que lidam com a tecnologia do concreto autoadensável nos canteiros de obras, nas indústrias de pré-fabricados, nos laboratórios de controle tecnológico e nas universidades.

DADOS TÉCNICOS

ISBN / ISSN: 978-85-98576-25-1

Edição: 1ª edição

Formato: Eletrônico

Páginas: 78

Acabamento: Digital

Ano da publicação: 2015

Patrocínio



Pavimento Urbano de Concreto

O curso apresenta os procedimentos de projeto, orçamento, escolha e dosagem de materiais, execução e avaliação do Pavimento Urbano de Concreto (PUC).

Voltado para engenheiros, arquitetos e estudantes, o curso será ministrado

pelo diretor técnico da Mixdesign, Eng. Eduardo Tartuce, e pelo coordenador técnico da Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem (Abesc), Eng. Álvaro Sérgio Barbosa Júnior.

O curso será realizado em diferentes

cidades e datas, e conta com 15 créditos do Programa MasterPEC:

► 21 e 22 de maio – Joinville (SC)

► 10 e 11 de junho – Belém (PA)

Mais informações:

<https://site.ibracon.org.br/educacao-continuada>

3º SIMPAVCON

A terceira edição do Simpósio de Pavimento de Concreto Reforçado vai ser realizada nos dias 12 e 13 de junho, na PUC-Campinas.

Organizado pelo Programa de Pós Graduação em Infraestruturas Urbana da PUC Campinas em conjunto com o IFRC e a ABCP.

Mais informações:

<https://www.puc-campinas.edu.br/evento/simposio-de-pavimento-de-concreto-reforçado/>

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!

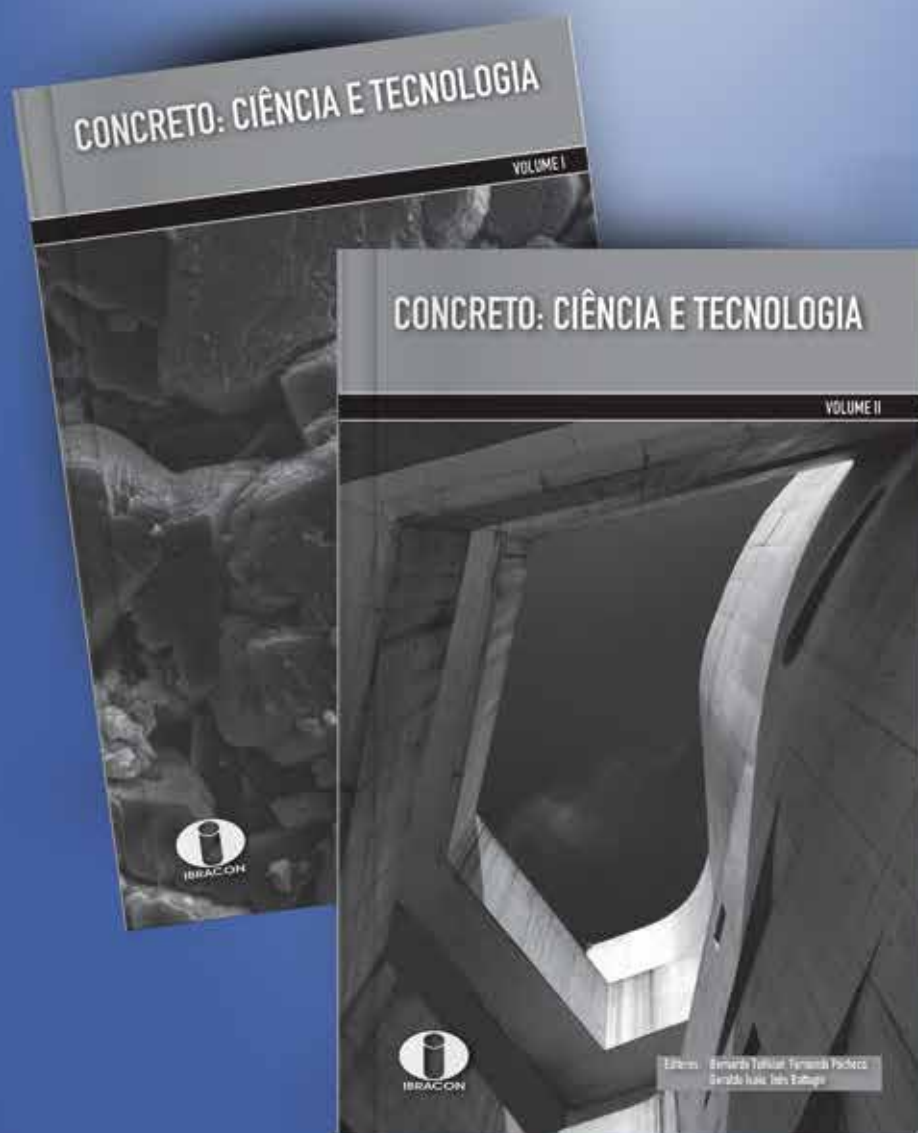
Acesse a Loja Virtual do IBRACON

www.ibracon.org.br

Livro

CONCRETO:

Ciência e Tecnologia



A publicação aborda os **componentes do concreto**, seu **comportamento no estado fresco e endurecido**, e abrange as **inovações na ciência do concreto**, como **dosagem, confecção e durabilidade**.

Com **2055 páginas**, divididas em **dois volumes**, o compêndio foi escrito por **65 especialistas brasileiros**, sendo voltado para pesquisadores, estudantes de engenharia civil, arquitetura e urbanismo, profissionais que atuam no setor de construção civil.

ISBN / ISSN: 978-65-89675-00-6
Edição: 3ª edição
Páginas: 2055

Formato: 15,7 x 23cm
Acabamento: capa dura
Ano de Publicação: 2022

Coordenadores:
Bernardo Tutikian
Fernanda Pacheco
Geraldo Isaia e
Inês Battagin



Instituto Brasileiro do Concreto

Organização técnico-científica nacional de defesa
e valorização da engenharia civil

Fundado em 1972, seu objetivo é **promover e divulgar conhecimento sobre a tecnologia do concreto e de seus sistemas construtivos para a cadeia produtiva do concreto**, por meio de publicações técnicas, eventos técnico-científicos, cursos de atualização profissional, certificação de pessoal, reuniões técnicas e premiações.

Associe-se ao IBRACON! Mantenha-se atualizado!

- Receba gratuitamente as quatro edições anuais da **revista CONCRETO & Construções**
- Tenha descontos de até **50%** nas **publicações técnicas do IBRACON** e de até **20%** nas **publicações do American Concrete Institute (ACI)**
- Descontos nos eventos promovidos e apoiados pelo **IBRACON**, inclusive o **Congresso Brasileiro do Concreto**
- Oportunidade de participar de **Comitês Técnicos**, intercambiando conhecimentos e fazendo valer suas **opiniões técnicas**

Fique bem informado!

 www.ibracon.org.br

 facebook.com/ibraconOffice

 twitter.com/ibraconOffice



67º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO

Natal 2026
30 de setembro a 3 de outubro

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://twitter.com/ibraconOffice) [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