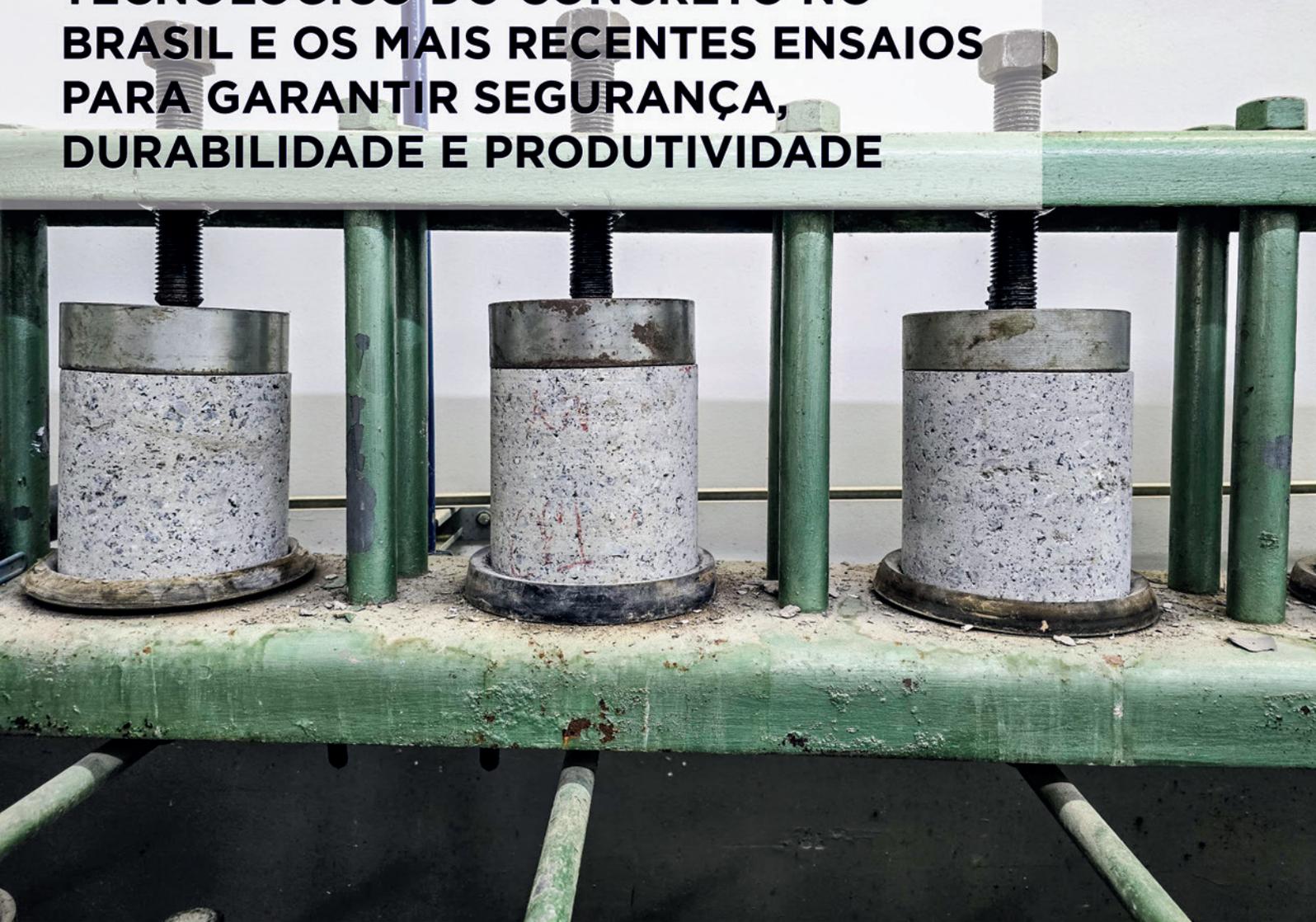




CONTROLE DA QUALIDADE DO CONCRETO

OS PRIMÓRDIOS DO CONTROLE TECNOLÓGICO DO CONCRETO NO BRASIL E OS MAIS RECENTES ENSAIOS PARA GARANTIR SEGURANÇA, DURABILIDADE E PRODUTIVIDADE



PERSONALIDADE ENTREVISTADA

JOSÉ MATOS: INSPEÇÃO E MANUTENÇÃO DE PONTES PARA GARANTIR QUALIDADE

MERCADO NACIONAL

DESEMPENHO E PERSPECTIVAS DE CRESCIMENTO DOS PRÉ-FABRICADOS

ENTIDADES DA CADEIA

CENSO DA EDUCAÇÃO EM ENGENHARIAS

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

ADITIVOS



ADIÇÕES



ARMADURA



RECUPERAÇÃO ESTRUTURAL



EQUIPAMENTOS



ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO



ESCRITÓRIOS DE PROJETOS



JUNTE-SE A ELAS

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

PRÉ-FABRICADOS



CONTROLE TECNOLÓGICO



CONCRETO



CONSTRUTORAS



FÓRMAS



FIBRAS



CIMENTO



GOVERNO



EVENTOS



SUMÁRIO

ENTENDENDO O CONCRETO

15 Primórdios e avanços iniciais do controle tecnológico do concreto no Brasil



ESTRUTURAS EM DETALHES

19 Determinação do módulo de elasticidade do concreto pelo método dinâmico

23 Comparação entre as técnicas de ultrassom e de excitação por impulso para determinação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto

28 Durabilidade do CRF: Por que avaliar o potencial de degradação das fibras é essencial?



PESQUISA E DESENVOLVIMENTO

35 Aplicação do método da maturidade em elementos estruturais pré-fabricados

39 On the experimental determination of concrete compressive and tensile strengths

47 Novas tecnologias usadas no acabamento do concreto de estacas – técnicas de arrasamento



54 Estudo preliminar da resistência de concretos com diferentes teores de cinzas da incineração de resíduos sólidos perigosos



CRÉDITOS DE CAPA
PENETRAÇÃO DE ÁGUA SOB PRESSÃO — ABNT NBR 10787.
CRÉDITO: INSTITUTO FALCÃO BAUER

Seções

- 5** MANIFESTO PÚBLICO
- 7** EDITORIAL
- 8** CONVERSE COM O IBRACON
- 9** PERSONALIDADE ENTREVISTADA: JOSÉ MATOS
- 33** MERCADO NACIONAL
- 60** ENTIDADES DA CADEIA
- 62** ENCONTROS E NOTÍCIAS
- 65** ACONTECE NAS REGIONAIS



REVISTA OFICIAL DO IBRACON

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

ISSN 1809-7197

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

EDITOR-CHEFE

→ Prof. Enio Pazini Figueiredo

JORNALISTA RESPONSÁVEL

→ Fábio Luis 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
gill@elemento-arte.com

ASSINATURA E ATENDIMENTO

office@ibracon.org.br

GRÁFICA

Duograf
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

CARLOS JOSÉ MASSUCATO

DIRETOR 2º VICE-PRESIDENTE

CLÁUDIO SBRIGHI NETO

DIRETOR 1º SECRETÁRIO

JOSÉ VANDERLEI ABREU

DIRETOR 2º SECRETÁRIO

NELSON COVAS

DIRETOR 1º TESOUREIRO

PAULA LACERDA BAILLOT

DIRETORA 2ª TESOUREIRA

ERCIO THOMAZ

DIRETOR TÉCNICO

MAURÍCIO BIANCHINI

DIRETOR DE RELAÇÕES INSTITUCIONAIS

LEANDRO MOUTA TRAUTWEIN

DIRETOR DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO

MARCO ANTONIO CARNIO

DIRETOR DE PUBLICAÇÕES

TÚLIO NOGUEIRA BITTENCOURT

DIRETOR DE EVENTOS

JÉSSICA MARIANA PACHECO MISKO

DIRETORA DE CURSOS

CÉSAR HENRIQUE SATO DAHER

DIRETOR DE CERTIFICAÇÃO DE PESSOAL

RAFAEL TIMERMAN

DIRETOR DE MARKETING

JÉSSICA ANDRADE DANTAS

DIRETORA DE ATIVIDADES ESTUDANTIS

IBRACON

Av. Queiroz Filho, 1.700 — sala 407 / 408, Torre D — 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 Araujo da Silva (controle da qualidade)
- Paulo Helene (tecnologia do concreto)
- Púlio Penna Firme Rodrigues (pisos e pavimentos)

PRESIDENTE DO COMITÊ CIENTÍFICO

Gláucia Dalfré

COMITÊ CIENTÍFICO MEMBROS

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

PRESIDENTE DO COMITÊ EDITORIAL

Marcelo Ferreira (UFSCAR)

COMITÊ EDITORIAL MEMBROS

- 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)

Manifesto pela segurança e manutenção das pontes brasileiras

Os recentes colapsos ocorridos em pontes, em especial a icônica ponte sobre o Rio Tocantins, em dezembro de 2024, ocasionando irreparáveis perdas de vidas humanas diretas e danos sociais e econômicos a uma enorme região do país, provocando uma grande sensação de insegurança à sociedade, motivaram as Associações representativas da Engenharia de Pontes do Brasil, signatárias deste documento, a se reunirem para apresentar as ações que a comunidade técnico-científica pode aportar, com base em análises e acompanhamentos contínuos da infraestrutura viária, de modo a reduzir ou evitar a repetição de tragédias semelhantes, dentro do espírito de responsabilidade cívica e profissional.

O Brasil possui atualmente um extenso patrimônio construído de Obras de Arte Especiais (OAEs), vitais para o trans-

porte de bens e logística do país, com um valor financeiro estimado na ordem de 600 bilhões de reais. Este conjunto possui um grande número de OAEs com idades avançadas, requerendo ações urgentes de investimentos em reparos e em manutenção. Por outro lado, as condições de cada obra somente poderão ser confirmadas através da realização de inspeções em todo parque de obras do país (norma ABNT NBR 9452/2023).

Um estudo recente, PANORAMA GERAL DAS PONTES BRASILEIRAS, estima a existência de 113.168 pontes rodoviárias no Brasil, das quais 14.874 encontram-se inventariadas e 12.142 pontes possuem registro de inspeção. O trabalho indica que a Ponte sobre o rio Tocantins apresentava-se em condição ruim, Nota Técnica (NT) igual a 2, desde o ano de 2020, revelando, ainda, que 1039 pontes apresentam-se em condição ruim (NT= 2) ou crítica (NT=1) e que cerca de 5500 pontes rodoviárias no Brasil possuem mais de 50 anos, Vida Útil de Projeto à época. Este estudo demonstra o desconhecimento da sociedade e do Poder Público sobre as condições de mais de 100.000 pontes rodoviárias brasileiras.

A partir dos dados obtidos para as pontes com registro de inspeção, e considerando-se o parque de 113.168 pontes identificadas, estima-se



que, no Brasil, cerca de 11.000 pontes rodoviárias brasileiras possuam índices de condição ruim (NT=2) ou crítico (NT=1), requerendo, portanto, medidas de manutenção imediatas. Além disso, estima-se que cerca de 42.000 pontes rodoviárias apresentam idade superior a 50 anos.

Tais constatações colocam o país diante de um gigantesco desafio tanto para a gestão quanto para a Engenharia ainda mais agravado pela nova realidade das Mudanças Climáticas, com vazões hidrológicas reais superando as vazões limites de projeto, como verificado no Rio Grande do Sul, em maio de 2024.

O presente MANIFESTO PELA SEGURANÇA E MANUTENÇÃO DAS PONTES BRASILEIRAS espera estar contribuindo de forma decisiva para a segurança das nossas pontes. Estamos alinhados na defesa da Vida e da conservação do nosso Patrimônio Público, que foi construído com o suor dos irmãos brasileiros do passado e do presente. Expressamos a urgente necessidade das seguintes ações, dando acessibilidade pública transparente aos resultados:

- ▶ **Inspeção Cadastral, Avaliação de Projeto e Inspeção Especial**, de todas as obras em **Condição Crítica ou Ruim (Notas Técnicas 1 e 2)**, executadas de acordo com a Norma ABNT **NBR 9452/2019**, confirmadas de acordo com a **NBR 9452/2023** e normas/critérios de projeto na época da construção. Estima-se um investimento da ordem de **240 milhões de reais**;
- ▶ **Reabilitação** de todas as obras em **Condições Emergencial e Crítica, (Notas Técnicas 0 e 1)**. Estima-se um investimento da ordem de **1,2 bilhão de reais**;
- ▶ **Reabilitação** de todas as obras em **Condição Ruim (Nota Técnica 2)**. Estima-se um investimento da ordem de **5,3 bilhões de reais**;
- ▶ **Inspeção Cadastral**, de acordo com a NBR 9452/2023, em todas as pontes sob gestões estadual e municipal, pública e privada. Estima-se um investimento da ordem de **450 milhões de reais**;
- ▶ **Reabilitação** de todas as pontes sob gestões estadual e municipal, pública e privada, em **Condições Emergencial, Crítica e Ruim, (Notas Técnicas 0, 1 e 2)**. Estima-se um investimento da ordem de **55 bilhões de reais**;
- ▶ **Inspeção Rotineira**, em todas as Pontes Brasileiras, **Avaliação de Projeto e Inspeção Especial**. Estima-se um investimento da ordem de **2 bilhões de reais**;
- ▶ **Previsão orçamentária específica, para Inspeção e Manutenção e Reabilitação das Pontes Brasileiras**. Estima-se um investimento da ordem de **38 bilhões de reais/ano**;
- ▶ Essas estimativas não contemplam as evidentes mudanças climáticas em curso cujos efeitos quantitativos serão oportunamente avaliados;
- ▶ **Fiel cumprimento da Norma ABNT 9452/2023** em vigor e manuais existentes complementares para Inspeção de Pontes;
- ▶ Os Projetos de Reabilitação deverão ser realizados conforme normas/critérios de projeto atualmente vigentes, com as devidas adaptações para as pontes existentes;
- ▶ Desenvolvimento de norma específica para **Projeto de Reforço e Reabilitação de Obras de Arte Especiais**;
- ▶ Elaboração de Plano Estratégico para reabilitação das Obras de Arte Especiais (OAEs), incluindo as pontes ferroviárias;
- ▶ Reformulação do sistema de contratação para Reabilitação de Pontes, com inclusão de **propostas Técnica e de Preço**, de modo que as notas técnicas das propostas avaliem unicamente a qualidade técnica do proponente através de atestados de OAEs de boa qualidade, não sendo o prazo considerado um fator para qualificação da empresa;
- ▶ **Capacitação e certificação urgente de profissionais para inspeção e avaliação das pontes** conforme preconizado na **NBR 9452/2023** e na **NBR 16230/2013**;
- ▶ Integração da disciplina **Manutenção de Estruturas** no currículo de graduação e pós-graduação das Engenharias.

Brasília, fevereiro de 2025 🇧🇷

Controle da qualidade **do concreto**



Caro leitor, inicialmente, é importante destacar o porquê de se dedicar ao estudo do concreto. Isto se deve ao fato de que o concreto é o produto industrializado mais utilizado no mundo, só perdendo para a água potável que é um produto natural. Atualmente, a produção de concreto no mundo é superior a dez (10) bilhões de

toneladas por ano (aproximadamente 4,2 bilhões de m³).

Controlar a resistência à compressão do concreto é uma atividade muito antiga e básica, e muitas vezes se confunde com o Controle da Qualidade do concreto. O controle da resistência sempre está acompanhado da determinação da consistência do concreto fresco, medida pelo ensaio de abatimento (“slump test”), e que decorre, desde 1918, das pesquisas experimentais de Duff Abrams, que, na época, observou que, para um dado traço de concreto, um aumento do slump implicava um aumento na relação água/cimento, e por consequência, na queda da resistência à compressão. Contudo, faz anos que isto não é necessariamente verdadeiro, pois se pode aumentar o slump, não com a adição de água, mas sim com o emprego de aditivos químicos dispersantes.

O Controle da Qualidade do concreto engloba o Controle Tecnológico mais o Controle da Execução.

O Controle Tecnológico do concreto é muito amplo, sendo importante ressaltar que ele não consiste em apenas moldar e romper corpos de prova, pois ele compreende a caracterização física e química de seus materiais componentes (cimento, adições, agregados, aditivos e fibras), análises dessas caracterizações, estudos experimentais de dosagem, determinação das características mecânicas (resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade), determinação das propriedades do

concreto fresco (abatimento, massa específica, teor de ar, exsudação, viscosidade etc.) e das propriedades de transporte (absorção por imersão e fervura, absorção por capilaridade, penetração de água sob pressão, resistividade elétrica, tortuosidade, migração iônica etc.). Devido a sua importância ele deve ser realizado por profissionais experientes, e que o laboratório de ensaios seja, no mínimo, acreditado pelo sistema RBLE do INMETRO (o que, por si só, não garante que os ensaios serão realizados corretamente). E aqui está um grande problema, pois, assim como nos Estados Unidos da América (artigo publicado nos USA pela Nadia Groome: “*How to combat poor field and lab testing*”), o Brasil vem sofrendo com a falta de técnicos de laboratório, laboratoristas e engenheiros com conhecimento da teoria e da prática de laboratório. O que tem sido observado são laboratórios colocando em risco a credibilidade dos resultados, alguns, inclusive, fechando as suas sedes ou simplesmente virando moldadores de corpo de prova de concreto.

O Controle da Execução consiste em verificar cobertura da armadura, qualidade dos espaçadores, mistura em central de concreto, transporte, lançamento, adensamento (vibração, caso necessário), cura, e desforma. Também é analisada a estrutura acabada.

Portanto, esta edição 117 da revista Concreto & construções, que trata do “Controle da Qualidade do Concreto e suas Estruturas”, é muito bem-vinda e dá destaque a uma das mais importantes atividades da construção, para apoiar na garantia da vida útil da estrutura de concreto. Convidamos os leitores a lerem os artigos publicados na edição, que foram criteriosamente selecionados e avaliados para ilustrar as diversas faces do controle da qualidade do concreto.

Boa leitura.

PROF. DR. PAULO FERNANDO ARAUJO DA SILVA

EDITOR ASSOCIADO DA EDIÇÃO

DIRETOR DE INFRAESTRUTURA DA NÚCLEO ENGENHARIA

CONVERSE COM O **IBRACON**

PERGUNTAS TÉCNICAS

UM CLIENTE LEVANTOU UMA DÚVIDA SOBRE COMO VÁLIDAR SE UMA EDIFICAÇÃO EM CONCRETO PROTENDIDO ESTÁ DESEMPENHANDO ADEQUADAMENTE NO QUE DIZ RESPEITO À PROTENSÃO. A ESTRUTURA NÃO APRESENTA MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS APARENTES QUE INDIQUEM PREOCUPAÇÕES COM O DESEMPENHO ESTRUTURAL. O INTERESSE DO CLIENTE É APENAS VERIFICAR SE HÁ ALGUM TIPO DE ENSAIO PERIÓDICO QUE POSSA CONFIRMAR QUE TUDO ESTÁ EM ORDEM.

EU, PARTICULARMENTE, NUNCA OUVI FALAR DE ENSAIOS ESPECÍFICOS REALIZADOS DIRETAMENTE NAS CORDOALHAS DE LAJES E VIGAS, ESPECIALMENTE CONSIDERANDO QUE AS ANCORAGENS GERALMENTE FICAM ENCAPSULADAS E PREENCHIDAS COM CONCRETO. GOSTARIA DE SABER SE O PROFESSOR CONHECE ALGUM ENSAIO QUE SEJA COMUMENTE UTILIZADO NESSAS CONDIÇÕES OU SE HÁ UMA METODOLOGIA ESPECÍFICA PARA AVALIAR PERIODICAMENTE A CONDIÇÃO DA PROTENSÃO EM ESTRUTURAS COMO ESTA.

Eng. Breno Alves
BVA ENGENHARIA

Excelente pergunta e diria super-oportuna tendo em vista o colapso da Ponte JK no Tocantins (o que poderíamos ter feito no caso daquela ponte além de trocar juntas, aparelhos de apoio, buzinotes, guarda-corpo, refazer pista, refazer cobrimentos, reparar armadura frouxa...???). Na minha opinião, as estruturas de concreto protendido ECP são muito mais sensíveis ao meio ambiente e muito mais difíceis de inspecionar e também de corrigir (reparar, reforçar). Salvo prova de carga muito bem pensada e realizada, não conheço outras possibilidades, além, de óbvio, observar se há fissuras onde não deveria haver e, quem sabe, descobrir as cabeças de ancoragem e, com muito cuidado, observá-las quanto à corrosão e situação da cunha de ancoragem. No caso de cordoalhas engraxadas em lajes planas de edifícios, já atendi casos de ruptura da cordoalha

com natural “explosão” das cabeças de ancoragem. Nestes casos, em certas situações, é possível substituir a cordoalha por outra; em outros casos é necessário fazer aberturas intermediárias e instalar “cabeças de ancoragem” ou cunhas intermediárias. Qualquer intervenção em ECP para inspecionar, reparar e reforçar é bem mais complexa e cara que em estruturas de concreto armado ECAs. Reparar e reforçar a armadura frouxa é sempre possível e ajuda, mas intervir na protensão é complexo. Certamente aqui nas nossas comunidades deve haver colegas com muito mais experiência que eu e vamos torcer para colaborarem e compartilhar seus conhecimentos com todos.

PROF. PAULO HELENE
VICE-PRESIDENTE DO IBRACON E MEMBRO DO COMITÊ EDITORIAL ☺



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



José António Silva **Carvalho** **Campos** **Matos**

José Matos vem de uma família de engenheiros e acadêmicos portugueses. Ele se graduou em engenharia civil em 2002 pela Universidade do Porto, onde obteve seu título de mestre em engenharia de estruturas em 2008. Foi convidado a ser professor assistente no Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade do Minho, em 2007, onde permanece.

Seu grupo de pesquisa interdisciplinar em gestão de pontes e estruturas já participou de diversos projetos, como o relacionado com o controle da qualidade de pontes existente no âmbito da COST 1406, Cooperação Europeia em Ciência e Tecnologia, que emitiu diversos relatórios sobre o estado de conservação de pontes em diferentes países e sua gestão.

José Matos fundou e foi o primeiro presidente da EuroStruct, a Associação Europeia de Controle de Qualidade de Pontes e Estruturas, e é vice-presidente da Associação Internacional de Engenharia de Pontes e Estruturas (IABSE).

IBRACON CONTE-NOS RESUMIDAMENTE SOBRE SUA CARREIRA PROFISSIONAL. POR QUE ESCOLHEU CURSAR ENGENHARIA CIVIL, POR QUAIS EMPRESAS/INSTITUIÇÕES PASSOU E CARGOS QUE EXERCEU, E POR QUE DECIDIU ESPECIALIZAR-SE EM GERENCIAMENTO DE RISCO DE OBRAS?

| **JOSÉ ANTÓNIO S. C. CAMPOS MATOS** | Uma das motivações para envergar pela engenharia civil tem um caráter familiar. Meu avô foi engenheiro civil e professor da Universidade do Porto. Ele teve uma empresa de projeto e foi especialista em pontes. Meu pai, engenheiro civil e professor universitário, tem uma empresa de projeto, sendo especializado em geotecnia. E, portanto, desde bastante novo, sempre tive contato com o tema da engenharia civil e com as infraestruturas. Portanto, decorrente desta experiência familiar, acabei por também seguir licenciatura em engenharia civil na Universidade do Porto. Entrei em 1997 e me formei em 2002.



Posteriormente, arranquei com um mestrado em estruturas de engenharia civil na Universidade do Porto. Sempre fui apaixonado por pontes. Lembro-me de ir com o meu avô visitar várias obras de pontes, em que ele esteve envolvido, inclusive aqui sobre o Rio Douro, no distrito do Porto. Além disso, meu avô tinha vários livros muito interessantes, que, recordo-me, desde jovem, lia quando ia para a sua casa. Iniciei o mestrado em avaliação estrutural de pontes existentes em 2003, durante o qual estudei questões de confiabilidade, risco e monitoramento. Fiz o monitoramento de várias pontes que estavam sendo construídas, sob supervisão do Prof. Joaquim Figueiras, e estive um período fora, na Universidade Politécnica da Catalunha, em Barcelona, sob supervisão do Prof. Joan Casa, para aprender mais sobre o tema. Continuei trabalhando na empresa de meu pai, o Gabinete de Estruturas e Geotecnia, fazendo projetos,

“

EM 2015, INTEGREI O PROJETO EUROPEU RELACIONADO COM O CONTROLE DA QUALIDADE DE PONTES EXISTENTES NO ÂMBITO DA COST 1406 E, DURANTE QUATRO ANOS, DESENVOLVEMOS VÁRIOS RELATÓRIOS SOBRE A SITUAÇÃO DAS PONTES EM DIFERENTES PAÍSES

”

quando fui convidado para ser docente da Universidade do Minho. Iniciei o doutoramento em regime parcial pois tinha de lecionar ao mesmo tempo. Meu projeto seguiu a pesquisa do mestrado, com viés mais aplicacional e agregando a avaliação preditiva do comportamento das pontes. Concluí o doutoramento em 2013, quando assinei um contrato permanente com a Universidade do Minho para ser professor auxiliar. Nesta altura, fui contactado por uma grande concessionária rodoviária portuguesa, chamada Ascendi, para desenvolver um sistema de gestão de ativos de autoestrada, como pontes, taludes, pavimentos, túneis e equipamentos. Foi meu primeiro grande projeto, com o qual montei uma equipe multidisciplinar na área de risco e gestão de infraestruturas civis na Universidade do Minho. O projeto durou de 2013 a 2017, e recebeu o prêmio de melhor sistema de gestão de ativos rodoviários em nível mundial, dado pela *International Road Federation*.

Em 2015, integrei o projeto europeu relacionado com o controle da qualidade de pontes existente no âmbito da COST 1406 (*European Cooperation in Science and Technology*), no qual participaram 57 países, com acadêmicos, consultores, donos de obra, e, durante quatro anos, desenvolvemos vários relatórios sobre a situação das pontes em diferentes

países e a forma como se fazia sua gestão.

Outro projeto que meu grupo participou foi o Projeto SIRMA, INTERREG Atlântico, em que estudamos o impacto das alterações climáticas na gestão das infraestruturas.

Quando terminou o projeto da COST 1406, montei uma associação chamada *EuroStruct**, uma associação Europeia dedicada ao tema do controle de qualidade de pontes e estruturas, que surgiu da COST 1406. Fui seu primeiro presidente. Infelizmente, em 2019 veio a Covid e tivemos que passar todo esse movimento recente para um registro praticamente on-line. Foi um período complicado e o que nos sustentou foram os projetos internacionais que nós já tínhamos ganho antes de 2019.

Com o novo Programa Quadro Europeu de Financiamento de 2022 e 2023, conseguimos obter cinco milhões de euros de financiamento para oito projetos, a maioria projetos nacionais. O grupo que coordeno aumentou para quatro professores e oito investigadores. Já, recebemos diversos prêmios pela publicação de artigos em revistas, da EuroStruct e da IABSE, onde sou atualmente vice-presidente.

IBRACON QUAL É SUA RELAÇÃO COM AS ASSOCIAÇÕES, COMO A IABSE?

JOSÉ ANTÓNIO S. C. CAMPOS MATOS | Tenho uma relação bastante antiga com a IABSE e



Equipe multidisciplinar na área de risco e gestão de infraestruturas civis da Universidade do Minho faz ensaio não destrutivo em ponte

*SITE: [HTTPS://EUROSTRUCT.ORG/](https://eurostruct.org/)

com a fib (Federação Internacional do Concreto Estrutural).

Atualmente, sou presidente da Comissão 8 de Durabilidade da fib. No meu mestrado, fui apresentar resultados do meu trabalho no congresso da fib em Delft, na Holanda. Sempre fui uma pessoa dinâmica e, desde jovem, quis apresentar resultados dos meus estudos e aprender com outros colegas, independentemente da idade.

Desde o mestrado, conheci e comecei a participar também da IABSE, com o qual me envolvi muito por conta do grupo de trabalho na área de pontes. Organizei várias conferências, sendo uma delas o simpósio da IABSE, em 2019, em Guimarães, Portugal, no estado do Minho. Mais à frente, fizeram um convite para me candidatar a vice-presidente. Achei que foi o tempo certo para aceitar porque, na altura, já estava a sair do EuroStruct. Concorri e ganhei, estando no segundo mandato como vice-presidente.

IBRACON NESTE QUADRO EXPOSTO SOBRE O DESENVOLVIMENTO DE SUA CARREIRA PROFISSIONAL, ONDE ENTRA O LEVANTAMENTO SOBRE AS CAUSAS DE COLAPSO DE MIL PONTES EM TODO MUNDO, QUE FOI APRESENTADO POR VOCÊ NO 65º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO?

| **JOSÉ ANTÓNIO S. C. CAMPOS MATOS** | Muito bem! Um grupo da IABSE, o TG 1.5, liderado durante

muitos anos por um colega da Rússia, o Anton Syrkov, de São Petersburgo, que, infelizmente, fruto da guerra, teve que suspender o grupo, tinha como objetivo fazer um apanhado das obras no mundo inteiro que tinham caído ou que estavam próximas de colapsar. Já havia alguns trabalhos feitos nos Estados Unidos e também pelo colega Dirk Proske, que, inclusive, escreveu um livro sobre esta temática. Achemos que a IABSE, como associação internacional na área das pontes, tinha a obrigação de ter uma base de dados sobre o assunto, para, no fundo, tirar lições sobre as falhas, que pudessem ser reutilizadas no futuro. Já havia um apanhado prévio de dados dos grupos técnicos da IABSE, que foi incrementado, atualizado e consolidado a partir de 2015. Na sequência, fizemos um estudo estatístico para perceber os modos de falha, as razões dessas falhas, os tipos de obras de arte, para tirar lições para o futuro. Deste estudo participou um aluno meu que ganhou o prêmio da melhor tese de doutorado em Cabo Verde, o Neryvaldo Galvão.

IBRACON VOCÊ TROUXE O DADO DE QUE 12% DAS CAUSAS DE COLAPSO FORAM DEVIDAS À DETERIORAÇÃO DO CONCRETO ARMADO. QUAIS OS TIPOS DE DETERIORAÇÃO?

| **JOSÉ ANTÓNIO S. C. CAMPOS MATOS** | A maioria dos processos que foram detectados foram processos de corrosão das armaduras devido a situações de grande exposição marítima, ou de exposição a sais usados no derretimento do gelo, no caso de pontes em montanhas. A exposição é um dos fatores, mas constatamos também erros construtivos, como baixo cobrimento, concretagem deficiente, e problemas de drenagem que originavam as corrosões nos tabuleiros e nos encontros. Identificamos também algumas situações de obras que apresentaram reações álcali-silica, devido a agregados reativos. A durabilidade era um fenômeno pouco conhecido e uma questão relativamente nova, que não era levada em consideração na construção de pontes há 50 anos.

IBRACON CONSIDERANDO O CENÁRIO QUE ADVEIO DESTA LEVANTAMENTO, AS PONTES DE CONCRETO ESTÃO EM CONDIÇÕES DE RESISTIREM ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS?

| **JOSÉ ANTÓNIO S. C. CAMPOS MATOS** | Nos relatórios, estudamos os indicadores mais relevantes que afetariam a performance e o comportamento dos diferentes ativos ao longo do tempo. Fizemos previsões de cenários com base nos dados do IPCC. O que posso dizer é que algumas situações têm impacto negativo, outras situações têm impacto positivo. O aumento de temperatura vai sobretudo provocar uma maior quantidade de água na atmosfera, o que vai gerar maior número de cheias, inclusive em zonas áridas e semiáridas, como

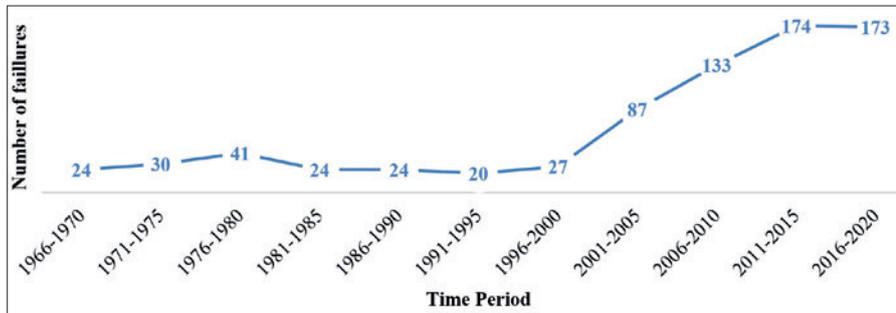
“

A MAIORIA DOS PROCESSOS QUE FORAM DETECTADOS FORAM PROCESSOS DE CORROSÃO DAS ARMADURAS DEVIDO A SITUAÇÕES DE GRANDE EXPOSIÇÃO MARÍTIMA, OU DE EXPOSIÇÃO A SAIS USADOS NO DERRETIMENTO DO GELO, NO CASO DE PONTES EM MONTANHAS

”



FIZEMOS UM ESTUDO DE ACORDO COM DIFERENTES TIPOLOGIAS DE PONTES SOBRE QUAIS PROCEDIMENTOS DEVERÍAMOS TER. DAÍ SURTIU A INTRODUÇÃO DE METODOLOGIAS COMO *KEY PERFORMANCE INDICATORS* PARA TOMAR DECISÃO



Número total de falhas registradas em pontes.

Crédito: Syrkov A. Review of bridge collapses worldwide 1966 — 2018. IABSE Work. Ignorance, Uncertain. Hum. errors Struct. Eng., Helsinki, Finland: 2017

aconteceu recentemente em Dubai. Obviamente, as obras que não estão preparadas para as grandes inundações podem vir a sofrer danos. Portanto, zonas que anteriormente não eram afetadas por cheias repentinas com um caudal bastante elevado, passam a serem e, portanto, as obras vão acabar por ser afetadas porque não têm proteções contra essas situações e, decorrente disso, vão apresentar mais rapidamente problemas de durabilidade e um serviço de vida útil mais curto, podendo, no limite, colapsar, como aconteceu recentemente na Alemanha e na Bélgica. Mas, pode acontecer o contrário. Fizemos estudos de situações em que as pontes enfrentavam um grande caudal e que, devido à seca, a carga hidráulica sobre os pilares se tornou mais baixa e, portanto, estão numa situação de menos risco. Portanto, para cada uma delas, é preciso analisar onde estão, quais são os mecanismos internos e externos

que afetam essa obra, e como as alterações climáticas vão alterar esses mecanismos. Diria que, para a maioria das pontes, o risco irá aumentar, mas que existem exceções.

IBRACON MAS EXISTE UMA ESTIMATIVA GERAL SOBRE QUAL SERÁ A PERDA EM TERMOS DE VIDA ÚTIL DE PONTES EM UM CENÁRIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS?

| **JOSÉ ANTÔNIO S. C. CAMPOS MATOS** | Tem que ser analisado

caso a caso. O Banco Mundial tem alguns relatórios que dizem que, em geral, para as infraestruturas, o tempo de vida vai diminuir decorrente destes problemas e como tal o investimento na operação e manutenção vai ser superior para manter o mesmo tempo de vida. Eu, como engenheiro, tenho que fazer contas e para cada situação tenho que avaliar. Eu não posso dizer assim de uma forma taxativa. O que eu posso dizer é que, na maioria das situações, vai acelerar o processo de degradação e vai diminuir o tempo de vida ou vai haver cenários de eventos extremos com maior sequência e com maior intensidade e também logo vai diminuir o tempo de vida. Não posso dar um número assim redondo, primeiro porque os registros que existem são ainda curtos; e segundo porque o estudo que nós temos feito destas questões de mudança de disposição, dos cenários, o que vai afetar, tudo isso é curto. Para chegar a conclusões, vamos precisar de pelo menos mais dois ou três anos para ter resultados consistentes.

IBRACON CONTE-NOS SOBRE O PROTOCOLO DE CONTROLE DA QUALIDADE DE OBRAS DE ARTE ESPECIAIS, CONSENSUADO ENTRE 56 PAÍSES, APRESENTADO NO 65º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO.

| **JOSÉ ANTÔNIO S. C. CAMPOS MATOS** | Na União Europeia, a COST são ações com objetivo discutir temas de alta relevância para a sociedade. Eu propus, em 2015, que um dos temas a ser discutido era o estabelecimento de planos de controle de qualidade para pontes, ou seja, desde o momento que projetamos uma ponte até o momento em que ela termina a sua vida, quais planos temos que implementar, com que recorrência devemos fazê-los, que dispêndios devemos fazer e quando é que vamos fazer monitorização e que ações a tomar de intervenção. Este projeto foi financiado pela Comissão Europeia.

Fizemos um estudo de acordo com diferentes tipologias de pontes sobre quais procedimentos deveríamos ter. Daí surgiu a introdução de

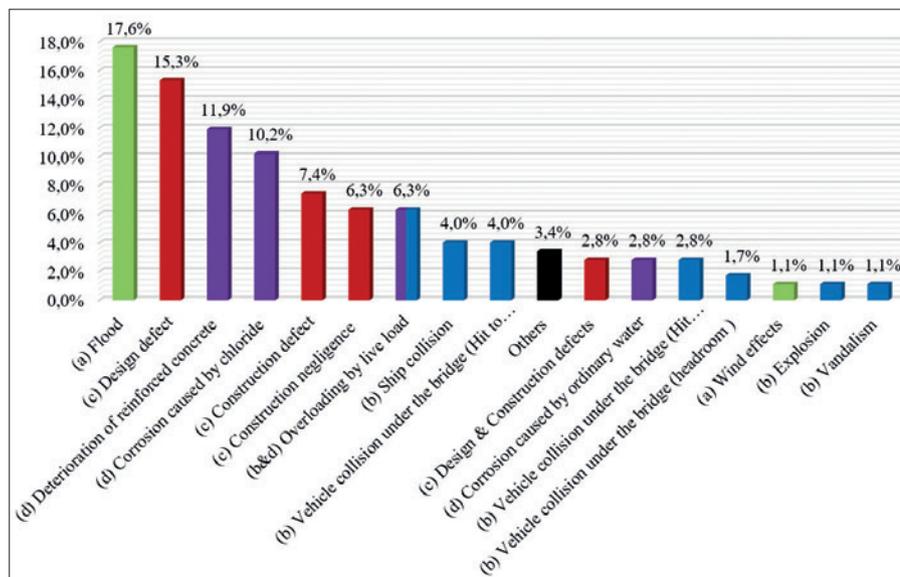
metodologias como *Key Performance Indicators* (KPI) para tomar decisão, que foram introduzidas posteriormente no Code 2020 da *fib*. A própria IABSE tem grupos de trabalho que estão a estender a metodologia dos KPIs para outros tipos de estruturas que não somente pontes.

Deste estudo surgiram publicações divulgadas abertamente no site da EuroStruct e diversos artigos de aplicação a casos concretos da metodologia desenvolvida. Veio ao meu conhecimento que a metodologia foi adotada nos procedimentos de gestão de obras de arte correntes de alguns países, como Eslovênia, Chile e Índia.

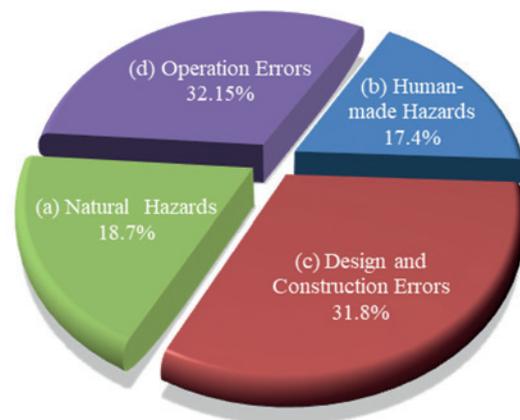
Um dos documentos mais recentes de *guidelines* para avaliação e inspeção de pontes é o italiano, que surgiu depois do colapso da Ponte de Gênova. É um documento bem feito, tendo uma parte que vem precisamente da ação COST 1406.

IBRACON NA SUA AVALIAÇÃO, O BRASIL DEVERIA LEVAR EM CONSIDERAÇÃO ESTE PROTOCOLO EM SUA NORMA DE INSPEÇÃO DE PONTES, VIADUTOS E PASSARELAS (ABNT NBR 9452)?

| **JOSÉ ANTÔNIO S. C. CAMPOS MATOS** | Eu acho que o Brasil como todos os outros países devem revisar as normativas e atualizá-las. Como disse ainda há pouco, o tema da durabilidade não aparecia 50 anos em nenhuma normativa. Portanto, o Brasil quando for revisar sua norma deve ter em conta os documentos da COST 1416 e outros que existem a nível internacional.



Principais causas específicas do colapso de pontes de concreto. Crédito: Syrkov (2017)



Principais causas de colapso de pontes de concreto. Crédito: Syrkov (2017)

Este documento foi entregue em 2019 e existe um grupo na EuroStruct responsável por fazer sua atualização.

IBRACON EXISTE UM MOVIMENTO DA COMUNIDADE TÉCNICA LIGADA A ESSE SETOR DE GESTÃO DE PONTES NO SENTIDO DE INCLUIR INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE NESSES DOCUMENTOS NORMATIVOS?

| **JOSÉ ANTÔNIO S. C. CAMPOS MATOS** | Sim. Diria que, quando eu arranquei com a COST 1408, a sustentabilidade não era um tema tão relevante como é agora. Nos documentos da COST 1406, o tema da sustentabilidade está lá, mas não é um dos seis temas prioritários, como o é agora, dadas as metas dos diferentes países no que respeita às emissões de carbono. Hoje, tudo o que é relacionado com a sustentabilidade tem que estar presente e, portanto, quando se vai fazer uma obra



QUANDO O BRASIL FOR REVISAR SUA NORMA DEVE TER EM CONTA OS DOCUMENTOS DA COST 1406 E OUTROS QUE EXISTEM A NÍVEL INTERNACIONAL





AGORA, AS NORMAS ITALIANAS, QUE SÃO, EU DIRIA, AS MAIS AVANÇADAS NESTE MOMENTO, FALAM NO TEMA DA RESILIÊNCIA E DO RISCO DOS EVENTOS EXTREMOS



nova ou uma intervenção numa obra existente, tem que se pensar muito bem que materiais é que se vão utilizar e qual o impacto que isso vai ter. Agora, as normas italianas, que são, eu diria, as mais avançadas neste momento, falam no tema da resiliência e do risco dos eventos extremos.

IBRACON NA SUA PALESTRA NO 65º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, VOCÊ DEFENDEU UMA MUDANÇA DE MENTALIDADE NAS NORMAS, DE MODELOS DE RISCO PARA MODELOS DE RESILIÊNCIA. QUAL SERIA A DIFERENÇA ENTRE ESSES MODELOS E PORQUE ESSA MUDANÇA SERIA POSITIVA?

| JOSÉ ANTÔNIO S. C. CAMPOS MATOS |

Os modelos de risco têm apenas em conta qual é a probabilidade de uma determinada obra atingir um determinado estado limite e as suas consequências. Os modelos de resiliência têm em conta o fato de quando atingir esse estado limite, quais as medidas tomadas antes, durante e após são possíveis de implementar para diminuir essas consequências e tornar a obra novamente operacional o mais rápido possível. Portanto, o risco avalia uma fotografia à data de hoje; a resiliência avalia o tempo que a obra vai levar até ser recuperada para os níveis de operação, antes do evento extremo. Assim, se fizermos a gestão apenas com o risco, posso dizer que há que investir

na reparação daquela obra; se fizermos a avaliação tendo em conta a resiliência, posso dizer que não só há que investir, como também tem que alocar mais recursos e reorganizar internamente a minha estrutura que faz operação e manutenção das pontes, para poder rapidamente atuar quando se atinge um determinado estado de limite. Por exemplo, a ponte de Gênova tinha um risco elevado, porque apresentava um estado de durabilidade avançado em elementos críticos, como os cabos de protensão e, porque, colapsando, iria ter consequências diretas e indiretas, pois era a única ligação ao interior da Itália. No meu entender, deveria ter sido mais vigiada, para se tomar medidas para diminuir o risco de colapso e também para criar rotas alternativas, e não depender de uma única rota. A própria agência que fazia a gestão daquela ponte deveria estar organizada para que rapidamente pudessem atuar. Mas, se demorou 4 ou 5 anos a construir a nova ponte, não estando o governo preparado. Com esta análise, entramos em uma perspectiva da resiliência, ou seja, a resiliência envolve a infraestrutura e os seus usuários. Nela entra o componente da sociedade e das pessoas. Por isso, defendo que nós temos que avançar para uma gestão das obras, tendo em conta não só o risco, mas também a resiliência.

IBRACON VOCÊ DISSE QUE A MAIOR INCIDÊNCIA DOS PROBLEMAS DE DETERIORAÇÃO DO CONCRETO É A CORROSÃO. VOCÊ ACHA QUE O USO DE ADITIVOS INIBIDORES DE CORROSÃO DEVERIA SER OBRIGATÓRIO NA DOSAGEM DO CONCRETO?

| JOSÉ ANTÔNIO S. C. CAMPOS MATOS | Acho que tem que ser mais estudado este assunto obviamente, mas eu diria que também dependerá bastante da exposição em que se encontra a obra, do cobrimento que foi utilizado. Vejo muitas obras bem conservadas que não usam qualquer aditivo, mas têm um bom cobrimento. Usar aditivos no concreto é mais um fator de segurança para os países que tem condição financeira para tal.

IBRACON O QUE VOCÊ FAZ NO SEU TEMPO LIVRE?

| JOSÉ ANTÔNIO S. C. CAMPOS MATOS | Gosto muito de viajar, de fotografia e de ler coisas da engenharia. Também gosto de estar com a família e junto da natureza, se tiver uma ponte no meio da floresta, melhor! Gosto de me informar sobre questões geopolíticas e participar de debates sobre decisões técnico-políticas, onde não sabemos, muitas vezes, onde termina a técnica e começa a política, porque é importante aos técnicos estarem próximos dos políticos. O que acontece muitas vezes é que isso não se sucede e, assim, demora-se muito tempo a decidir e, quando se toma a decisão, já é tarde demais. ☹

Primórdios e avanços iniciais do controle **tecnológico** do concreto no Brasil

LUÍS ALBERTO BORIN - DIR. TÉC. — Falcão Bauer
ROBERTO JOSÉ FALCÃO BAUER - PROF. — UNITAU

A implantação do concreto armado no Brasil como material de construção ocorreu no final do século XIX, trazido inicialmente por grandes construtoras alemãs que detinham a patente do uso do “cimento armado”, como era conhecido naquela ocasião.

As construtoras estrangeiras encarregavam-se da importação de técnicos (engenheiros e mestres de obras) e de métodos de construção e materiais (cimento importado). Além disso, o projeto e o cálculo das estruturas eram feitos na Europa.

Com a implantação de escolas superiores de engenharia e cursos técnicos voltados à formação de engenheiros civis, poucos anos depois, praticamente não havia necessidade de se importar mão de obra

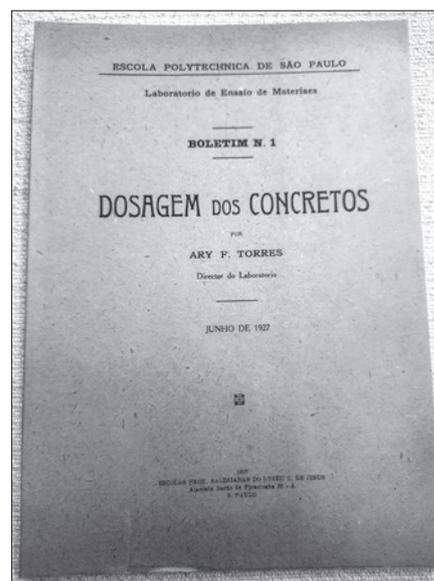
especializada da Europa para o cálculo e a execução das estruturas.

1. PRIMÓRDIOS DO CONTROLE TECNOLÓGICO DO CONCRETO

Apesar da aplicação do “cimento armado” no Brasil, não existia, nos anos 1920, norma ou regulamento brasileiro para o cálculo e aplicação desse material. Para o seu emprego, os técnicos e engenheiros brasileiros recorriam às normas alemãs e francesas datadas do início do século XX.

Emílio Baumgart utilizava a norma alemã DIN 1045 como fonte de conhecimento e de regras para o projeto e execução das edificações que projetava.

A primeira iniciativa de elaboração de um documento normativo nacional ocorreu, em 1927, com a publicação do Boletim



Capa do Boletim nº 1 do IPT



Sala de ensaios mecânicos do IPT

nº 1 “Dosagem de concretos” por Ary Torres, no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), surgido do antigo Gabinete de Resistência dos Materiais, de 1899, da escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Em 1931, Rômulo de Lemos Romano publicou o Boletim nº 5 “Especificações para Cimentos”, e, em 1933, junto com Ary Torres, o Boletim nº 11 “Um método para ensaio mecânico de cimento”.

Na Bahia, na década dos 40, Hernani Sávio Sobral, implantou uma nova rotina no campo de dosagem e controle de qualidade do concreto em Salvador. Teve como colaboradores Hilderico Oliveira e Afranio Garboggini.

Outro especialista inspirado por Ary Torres foi Eladio Petrucci, que desenvolveu o método de dosagem do ITERS (Instituto de Tecnologia do Rio Grande do Sul).

Posteriormente, Petrucci consolidou toda a tecnologia do concreto brasileiro em seu livro “Tecnologia do Concreto de Cimento Portland”.

Outra instituição de igual valor é o INT – Instituto Nacional de Tecnologia, fundado em 1922, entidade que seria o embrião da Tecnologia Civil no Rio de Janeiro.

Nesta época o INT se constituía em oito seções, sendo uma delas a Divisão de Indústria de Construção.

O engenheiro Fernando Luiz Lobo Carneiro foi outro grande colaborador no desenvolvimento da tecnologia e da normalização do concreto. Na Divisão de Indústria de Construção do Instituto Nacional de Tecnologia, fundado em 1922, iniciou, no Rio de Janeiro, os ensaios de cimentos, agregados e concreto.

Em 1924, foi implantada pela Companhia Brasileira de Cimento Portland uma fábrica em Perus, estado de São Paulo, marco da implantação da indústria brasileira de cimento. Até então, o consumo de cimento no país dependia exclusivamente do produto importado. A produção nacional foi gradativamente elevada com a implantação de novas fábricas e a participação de produtos importados oscilou durante as décadas seguintes, até praticamente desaparecer nos dias de hoje.

Para promover o desenvolvimento técnico da emergente indústria nacional de cimento, foi criada, em 1936, pelos representantes de cinco fábricas de cimentos atuantes na época, a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).

Na Sessão Solene Inaugural da 3ª Reunião de Laboratórios Nacionais de Ensaio, presidida pelo Professor Ernesto Lopes da Fonseca Costa, foi fundada, em 1940, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), com a aprovação do seu primeiro estatuto.

A ideia da criação da ABNT surgiu da necessidade de se elaborar normas técnicas brasileiras para a tecnologia do concreto, para substituir as normas que eram utilizadas pelos diversos laboratórios de ensaios do país.

O que se sabe é que, nessa data, as normas NB-1 – Cálculo e Execução de Obras de Concreto Armado e MB-1 – Cimento Portland – Determinação da Resistência à Compressão já existiam, embora ainda não tivessem sido aprovadas e, muito menos, adotadas pelo setor de construção civil.



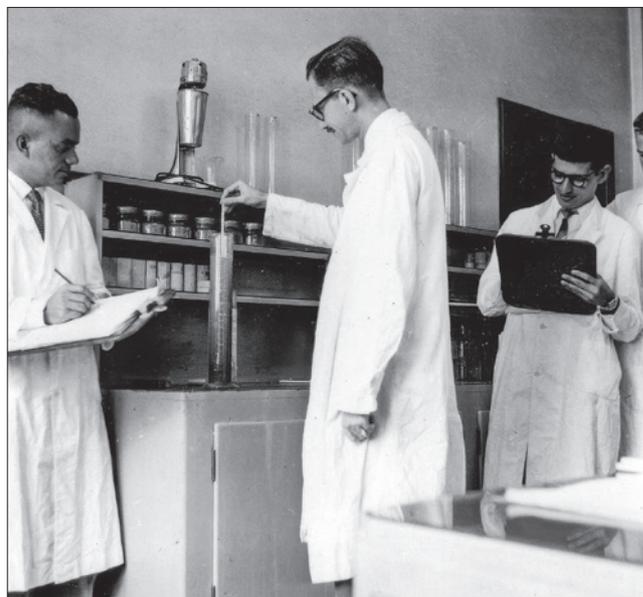
Primeira fábrica de cimento comercial, em Perus, em São Paulo

Os poucos registros históricos existentes indicam que a NB-1 foi elaborada por uma comissão de estudos do concreto armado e sua aprovação se deu na 3ª Reunião de Laboratórios de Ensaio e que a MB-1 já existia desde 1938, embora não haja nenhuma certeza quanto à sua adoção antes da criação da ABNT.

A partir deste momento, o Brasil era dotado de uma norma considerada uma das mais avançadas do mundo. Este fato veio a se confirmar quando, em 1944, em excursão pela América Latina, o engenheiro Arthur Boase – engenheiro americano colaborador do *American Concrete Institute* (ACI) – confirmou “as vantagens das normas brasileiras frente às americanas – ACI-318/41” (CARNEIRO, 1996 *apud*: ANGELO, 2004), constatadas através de um cálculo comparativo de uma estrutura utilizando-se as duas normas. Boase pediu aos membros do ACI a urgente reestrutura-

ção das normas americanas. Em seus estudos ele constatou que, além das arrojadas regras de cálculo ditadas pela NB-1/40, “uma das coisas mais interessantes (...) é o que ela deixa em aberto, não cercando excessivamente a capacidade criativa do engenheiro” (VASCONCELOS, 1992).

A primeira usina de concreto no Brasil foi do grupo australiano *Ready Mixed Concrete*, denominada *Redimix*, implantada, em 1953, na Vila Anastácio em São Paulo. Ela forneceu concreto para a rodovia



Aulas práticas no Laboratório da ABCP na década de 1950



Kombi usada pelo Laboratório Falcão Bauer para o controle tecnológico em campo na década de 1970

Anhanguera no trecho entre São Paulo e Jundiá.

Em 1957, veio a Concretex, de origem cubana, em 1964, a Redimix Brasileira, em 1968, a Engemix, atualmente do grupo Votorantim Cimentos, em 1974, a Concrebrás iniciou suas atividades na cidade de São Paulo pelo Grupo Ferruzzi, de origem italiana.

Inicialmente, o concreto era preparado no canteiro de obra pelo construtor, que era responsável pelo controle de produção e recepção. Mas, com a implantação das primeiras usinas de concreto, o controle de produção do concreto passou a ser feito pelo produtor, visando oferecer a qualidade combinada com o menor custo, e o controle de recepção do concreto, pelo construtor, visando comprovar a qualidade combinada com o menor risco de erro possível.

2. AVANÇOS NO CONTROLE TECNOLÓGICO DO CONCRETO

Até a década de 1970, o controle tecnológico do concreto era basicamente o controle da resistência e da estabilidade das estruturas.

Quando da construção da estação República do Metro de São Paulo, o diretor técnico da construtora Camargo Correa, engenheiro Epaminondas Melo do Amaral, resolveu que o concreto a ser usado em sua estrutura deveria ser impermeável.

Na época o único estudo levando em

consideração a impermeabilidade do concreto estrutural tinha sido realizado pela SABESP, com a participação do engenheiro Sérgio Simondi, responsável pelo laboratório da companhia, e de consultores tecnólogos europeus, que definiram o método de ensaio de permeabilidade sob pressão (norma alemã) e especificaram o valor máximo de penetração de água no corpo de prova cúbico, na definição das dosagens de concreto.

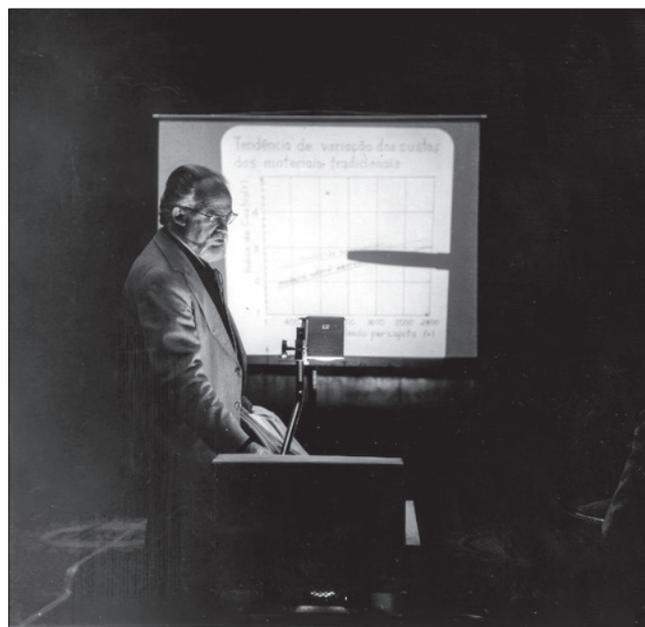
Neste contexto, nasceu o Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), reunindo especialistas para discutir a permeabilidade e a durabilidade do concreto. Esses primeiros encontros contaram com a participação dos maiores engenheiros da época, entre eles: Francisco de Assis Basílio, Eládio Petrucci, Gilberto Molinari, Lobo Carneiro e Luiz Alfredo

Falcão Bauer, reconhecidos pelo IBRACON que, inclusive, confere importantes prêmios em suas memórias.

Ao ser criado, em 23 de junho de 1972, o IBRACON foi erigido por profissionais visionários, que enxergaram a força de transformação que o concreto tinha em diferentes campos da vida humana e a necessidade de expandir o escopo do seu controle tecnológico.

Os ensaios realizados pela SABESP e pelo Metro de São Paulo, e outros apresentados nos colóquios do IBRACON, forneceram subsídios para a elaboração da norma técnica para determinação da penetração de água sob pressão (ABNT NBR 10787).

Em 1977, quando da construção do trecho elevado do metrô de São Paulo ligando a estação Parque Dom Pedro e a estação da Sé, em fase de conclusão, foram observadas deformações no conjunto de cinco vigas pré-moldadas entre apoios na pista ascendente da Rodovia dos Imigrantes, concluída em junho de 1976, que liga o litoral sul com a capital. Seu projeto especificava apenas a resistência à compressão do concreto, no controle para desformação e movimentação das peças.



II SEMINÁRIO INTERNACIONAL ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS NA CONSTRUÇÃO HABITACIONAL

Luiz Alfredo Falcão Bauer em palestra no Seminário sobre Habitações Populares

Como consequência houve a necessidade de readequação do topo dos pilares e troca de aparelhos de apoio, fato ocorrido em 1977.

Ciente do fato, o departamento de projeto do Metro de São Paulo, gerenciado pelo engenheiro Sérgio Eduardo Fávero Salvadori, em conjunto com o escritório técnico responsável pelo projeto estrutural, fizeram uma criteriosa análise e especificaram novos parâmetros para a dosagem do concreto das vigas pré-moldadas no trecho elevado, levando em consideração a resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto.

Com a nova especificação, foram realizados em laboratório inúmeras dosagens de concreto, para atender ao valor de módulo de elasticidade, mas que não apresentavam trabalhabilidade adequada, mínima necessária para viabilizar a concretagem das vigas.

O cálculo teórico do módulo de elasticidade, conforme MBI, previa o valor de 21.000 para constante da fórmula o valor de 21.000 ($E = 21.000 \times \text{raiz quadrada do } f_{ck}$).

No entanto, o livro "Fabrico e Propriedades do Betão", do autor A. de Souza Coutinho, do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, de Lisboa, editado em 1974, já citava que, para concretos convencionais, a constante podia variar de 12.000 a 20.000.

No caso do metrô foi consenso adotar a dosagem de concreto que permitisse as operações de lançamento e adensamento e obtivesse o maior valor de módulo de elasticidade. Este valor foi de 17.000 para as vigas pré-moldadas, com base em ensaio com 100 séries de corpos de prova.

Posteriormente, se descobriu que o valor de 21.000 da MB 1 foi obtido com base em ensaios de módulo de elasticidade exclusivamente realizados em obras de concreto massa (barragens) no Brasil até 1977. Concretos com elevado consumo de agregados e baixo teor de cimento geram módulo de elasticidade elevado com relação aos obtidos em concretos convencionais.



Ensaio de Módulo de Elasticidade

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A implantação do concreto armado no Brasil, no final do século XIX, marcou o início de um processo de evolução na construção civil nacional. Inicialmente, o uso desse material dependia de técnicos e normas estrangeiras, especialmente alemãs e francesas, que orientavam o cálculo e a execução das obras. No entanto, com o surgimento de escolas de engenharia e cursos técnicos, a capacitação local começou a ganhar força, e a dependência da expertise internacional diminuiu.

Durante as décadas de 1920 e 1930, diversas iniciativas foram realizadas para o desenvolvimento de normas e práticas de controle tecnológico, com destaque para os Boletins do IPT e a contribuição de especialistas como Ary Torres e Eladio Petrucci. Nos anos 1940, a criação da ABNT e a formulação das normas brasileiras, como a NB-1, colocaram o Brasil na vanguarda da engenharia mundial, sendo reconhecida por sua inovação e flexibilidade.

A partir da década de 1950, a criação das primeiras usinas de concreto e o aprimoramento da dosagem e controle de qualidade permitiram ao Brasil consolidar uma indústria de concreto autossustentável. Na década de 1970, o foco se expandiu para a impermeabilidade e durabilidade do concreto, com a formação do IBRACON,

que se tornou um centro de referência para a tecnologia do concreto no país.

Esses marcos históricos refletem o progresso contínuo no controle tecnológico do concreto no Brasil, promovendo avanços significativos na qualidade e segurança das estruturas de concreto. O país se consolidou como líder na tecnologia do concreto, com um sistema normativo e práticas de engenharia reconhecidas.

O controle tecnológico do concreto passou por uma evolução significativa ao longo do tempo. Inicialmente, as práticas se concentravam na resistência, estabilidade e dosagem do material, sendo que as normas estrangeiras, como as alemãs e francesas, eram predominantemente utilizadas. O desenvolvimento local se limitava a alguns esforços para elaborar normas nacionais e realizar pesquisas sobre a tecnologia do concreto. Nesse período, os processos eram bastante manuais e dependiam de pouca inovação tecnológica. Com o avanço da indústria de cimento e a criação de normas como a NB-1, o controle do concreto começou a se profissionalizar. As usinas de concreto surgiram, fornecendo um produto mais confiável e consistente. Em contraste, o cenário atual é marcado por um controle altamente automatizado, onde tecnologias avançadas são aplicadas. Sistemas computadorizados agora são responsáveis por garantir a precisão nas dosagens e o monitoramento da qualidade em tempo real, além de promover uma maior eficiência nos processos.

Além disso, a análise de características como durabilidade e permeabilidade agora é mais complexa, apoiada por ferramentas de modelagem e análise de dados. A sustentabilidade também se tornou um fator fundamental no controle do concreto, com a incorporação de materiais reciclados e aditivos eficientes. O foco na redução de impactos ambientais é uma das principais direções do setor, resultando em um controle mais integrado, inteligente e voltado para práticas ambientais responsáveis. ☺

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANGELO, Ana Margarida Vieira. Análise das patologias das estruturas em concreto armado do Estádio Magalhães Pinto – Mineirão. 2004. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte.
- [2] Vasconcelos, Augusto Carlos de. O Concreto no Brasil: Recordes, Realizações e História, vol. 1, 1ª ed. Rio de Janeiro: [Editora], 1985.

Determinação do módulo de elasticidade do concreto pelo método dinâmico: **contribuições para o controle tecnológico**

PEDRO BILESKY - MSc. - <https://orcid.org/0009-0003-2070-7580> (bilesky.pc@gmail.com) ;

HENRIQUE ALVES - DR. - <https://orcid.org/0000-0002-6508-4992> (ha@atcp-ndt.com) – **Sonelastic**

PAULO HELENE - PROF. DR. - <https://orcid.org/0000-0001-6442-7693> (paulo.helene@concretophd.com.br) ;

DOUGLAS COUTO - MSc. - <https://orcid.org/0000-0001-5968-517X> (douglas.couto@concretophd.com.br) – **PhD Engenharia**

ALESSANDRA L. DE CASTRO - PROF^a. DR^a. - <https://orcid.org/0000-0002-7248-7327> (alcastro@sc.usp.br) – **EESC/USP**

RUBENS CURTI - ENG. - <https://orcid.org/0009-0007-5011-1808> (rubens.curti@abcp.org.br) – **ABCP**

RESUMO

O MÉTODO DINÂMICO PARA A DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO É AMPLAMENTE UTILIZADO NO EXTERIOR E TEM GANHADO POPULARIDADE NO BRASIL, ESPECIALMENTE APÓS A SUA INCORPORAÇÃO NA NORMA ABNT NBR 8522[1], PELA REVISÃO DE 2021. ESSE ALINHAMENTO ÀS NORMAS INTERNACIONAIS VI-SOU PROMOVER UMA ALTERNATIVA NÃO DESTRUTIVA, MAIS PRÁTICA, PRECISA E REPRODUTIVA AO PROCEDIMENTO ESTÁTICO TRADICIONAL, COM O INTUÍTO DE MINIMIZAR AS CONTROVÉRSIAS ENTRE PROJETISTAS, CONSTRUTORAS, EMPRESAS DE SERVIÇO DE CONCRETAGEM E LABORATÓRIOS. A ADOÇÃO DO MÉTODO DINÂMICO PELA CADEIA PRODUTIVA DO CONCRETO TEM OCORRIDO RAPIDAMENTE E CONTRIBUÍDO PARA A POPULARIZAÇÃO DA DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE NO CONTEXTO DO CONTROLE TECNOLÓGICO. NESSE ARTIGO, É APRESENTADO O MÉTODO DINÂMICO, TAMBÉM CONHECIDO COMO TÉCNICA DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS DE VIBRAÇÃO, E DISCUTIDA AS SUAS CONTRIBUIÇÕES PARA O CONTROLE TECNOLÓGICO DO CONCRETO.

PALAVRAS-CHAVE: MÓDULO DE ELASTICIDADE, MÉTODO DINÂMICO, TÉCNICA DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS DE VIBRAÇÃO, ABNT NBR 8522, CONTROLE TECNOLÓGICO DO CONCRETO.

1. INTRODUÇÃO

A elevada demanda por materiais de construção civil, impulsionada pelas necessidades

humanas crescentes de infraestrutura, moradia e mobilidade, aliada à busca por sustentabilidade e redução das emissões de carbono, tem gerado novos desafios para a cadeia produtiva do concreto. É necessário construir mais com menos, sem desprezar matérias-primas. Como resultado, os concretos precisam ser produzidos com os agregados disponíveis localmente, que nem sempre são os mais resistentes ou os menos reativos, assim como os resíduos de produção devem ser sempre aproveitados. Adicionalmente, as estruturas precisam ser mais esbeltas, com menores volumes. Nessas circunstâncias, a especificação e o controle do módulo de elasticidade tornam-se indispensáveis. No entanto, o método

estático tradicional para a determinação do módulo de elasticidade é custoso, demorado e apresenta alta dispersão, especialmente para concretos de média e alta resistência. Neste contexto, o método dinâmico provê uma solução inovadora, que é, ao mesmo tempo, não destrutiva, mais acessível, prática e confiável. Apresentam-se, neste trabalho, além do procedimento de ensaio e suas vantagens, a correlação normativa entre os resultados obtidos em diversos estudos, realizados em diversos laboratórios brasileiros, do módulo de elasticidade dinâmico, E_{cd} , e do módulo de elasticidade estático, E_{ci} . Não foram determinadas correlações entre o módulo dinâmico, E_{cd} e o módulo de deformação, E_{cs} , que pode continuar a ser estimado, utilizando-se as correlações, aqui apresentadas, para obtenção do E_{ci} , e posteriormente utilizando as equações constantes no Item 8.2.8 da norma ABNT NBR 6118 [2].

2. O MÉTODO DINÂMICO

Todo corpo rígido emite um som quando excitado com uma leve pancada ou impulso mecânico; tocar um sino e bater na madeira são exemplos triviais desse fenômeno. Já, nos primórdios da ciência, descobriu-se que esses sons, ou respostas acústicas, são constituídos pelas frequências

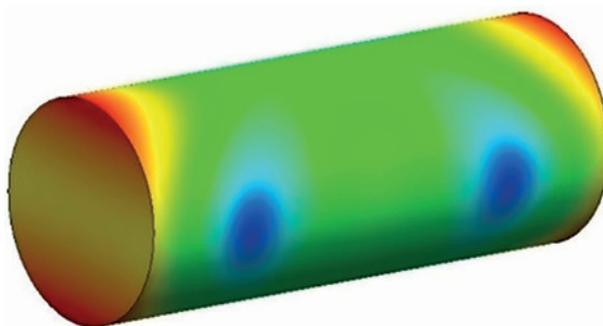


FIGURA 1

ILUSTRAÇÃO DO MODO DE VIBRAÇÃO FLEXIONAL: AS REGIÕES EM VERMELHO SÃO AS DE MAIOR AMPLITUDE DE VIBRAÇÃO E AS REGIÕES EM AZUL SÃO AS DE MENOR AMPLITUDE

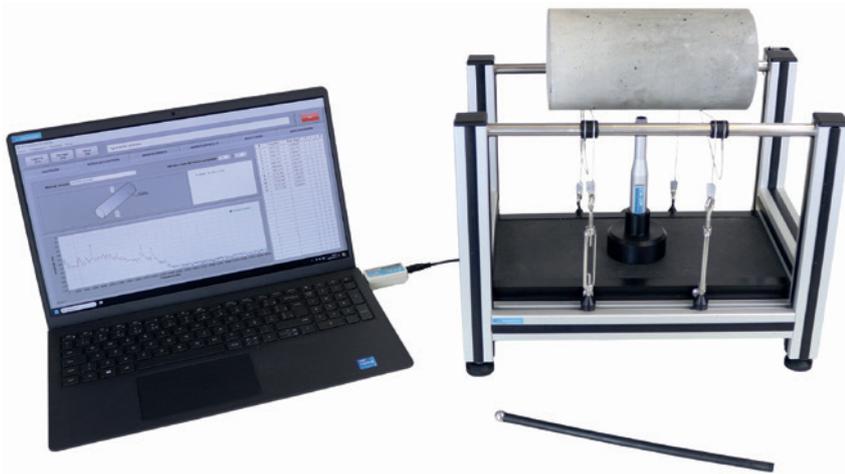


FIGURA 2

EXEMPLO DE SISTEMA DE MEDIÇÃO PARA O MÉTODO DINÂMICO

naturais de vibração do objeto, determinadas unicamente pela geometria, dimensões e densidade aparente. Essas frequências são altamente reprodutíveis: não importa o número de excitações, são sempre as mesmas — o corpo de prova não consegue vibrar em uma frequência errada. Para geometrias regulares, como cilindros e prismas, há equações analíticas que correlacionam as frequências com as dimensões e a densidade aparente, ou a massa, o que permite aplicações tecnológicas. Uma dessas aplicações é o método dinâmico, também conhecido como técnica das frequências naturais de vibração, utilizado na determinação do módulo de elasticidade de materiais. Este método, em sua forma mais simples, consiste em determinar o módulo de elasticidade de corpos de prova cilíndricos a partir de suas dimensões, massa e frequência de ressonância flexional. O modo de vibração flexional está ilustrado na Figura 1. As dimensões podem ser medidas com um paquímetro, a massa com uma balança e a frequência de ressonância flexional com arranjos experimentais ou instrumentos de medição dedicados, como o mostrado na Figura 2, que compreendem pelo menos um suporte de corpo de prova, um dispositivo excitador ou martelo de impacto, um captador acústico, uma eletrônica para a digitalização do sinal e em um software para os cálculos. Esse método não exige o uso de prensas, extensômetros ou o acoplamento de transdutores.

2.1 Procedimento de ensaio

O procedimento de ensaio é simples e consiste em apoiar o corpo de prova nas

regiões de amplitude de vibração mínima (linhas nodais), aplicar uma leve pancada na região central, onde a amplitude de vibração será máxima, detectar o som ou resposta acústica, processar este som para a identificação da frequência de vibração flexional, e calcular o módulo de elasticidade dinâmico, considerando a massa e as dimensões do corpo de prova [1]. Na Fig. 3, é ilustrada a aplicação do impacto e a captura da resposta acústica. Na Fig. 4, é ilustrado o processamento de sinais para a identificação da frequência flexional. No espectro de frequências à direita da Fig. 4, a frequência flexional é a do pico de maior amplitude, uma vez que o modo de vibração flexional foi o favorecido pelos locais de apoio e de excitação.

Uma vez identificada a frequência flexional (f_f), o módulo de elasticidade dinâmico do concreto E_{cd} é calculado pela Eq. 1, estabelecida pela ABNT NBR 8522-2 (2021) [1], em função da massa, altura, diâmetro e da frequência natural de vibração (modo

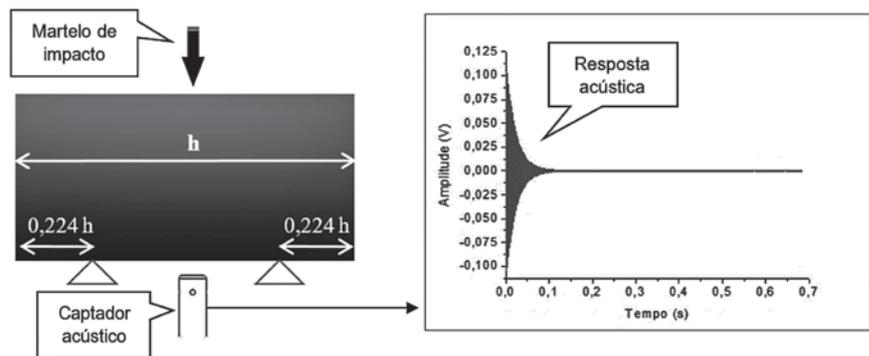


FIGURA 3

ILUSTRAÇÃO DA APLICAÇÃO DO IMPACTO E CAPTURA DO SOM OU RESPOSTA ACÚSTICA. IMAGEM ADAPTADA DA REFERÊNCIA [1]

de vibração flexional fundamental). Também está envolvido o fator de correção geométrico T, que depende da razão de aspecto do corpo de prova e é definido pela norma.

$$[1] \quad E_{cd} = 1,6067 \frac{h^3 \times m \times f_f^2}{d^4} \times T \times 10^{-9}$$

Sendo:

h: Altura do corpo de prova (mm);

m: Massa do corpo de prova (g);

f_f : Frequência natural de vibração do modo flexional (Hz);

d: Diâmetro do corpo de prova (mm);

T: Fator de correção geométrico (adimensional).

2.2 Incerteza de medição, repetitividade e reprodutibilidade

A incerteza típica do método dinâmico na determinação do módulo de elasticidade do concreto é de aproximadamente 1,5% [3,4] e pode ser calculada com exatidão aplicando o procedimento descrito na referência [7]. As principais contribuições são as incertezas das dimensões, que dependem do acabamento do corpo de prova e da habilidade do operador em medi-las corretamente.

A repetitividade do método dinâmico depende essencialmente da exatidão da medição da frequência [7], que deve ser de, no mínimo, 0,1% para corpos de prova de concreto, conforme especificado pela norma ABNT NBR 8522-2 (2021) [1]. Essa exatidão mínima é facilmente atendida pelos sistemas comerciais disponíveis. É importante destacar que a influência da intensidade da pancada na repetitividade é desprezível para concretos que

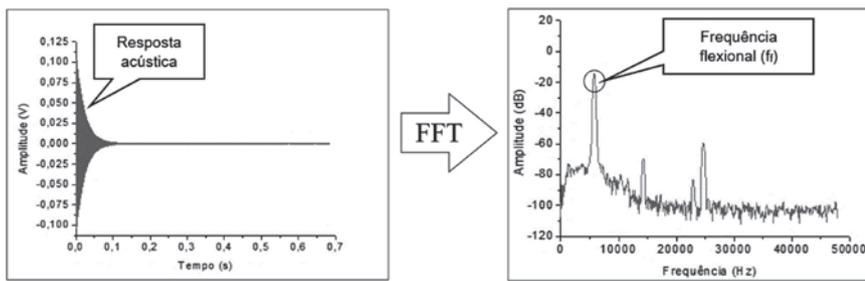


FIGURA 4

ILUSTRAÇÃO DO PROCESSAMENTO DA RESPOSTA ACÚSTICA PARA A IDENTIFICAÇÃO DA FREQUÊNCIA FLEXIONAL. IMAGEM ADAPTADA DA REFERÊNCIA [1]

não sofrerem solicitações mecânicas acima do limite elástico ou choques térmicos, como é o caso dos corpos de prova utilizados no controle tecnológico do concreto [1]. A repetitividade é uma medida da estabilidade dos resultados de medição quando o instrumento de medição é usado repetidamente, nas mesmas condições, para ensaiar o mesmo corpo de prova, pelo mesmo operador. Esse parâmetro pode ser avaliado apenas em métodos não destrutivos, como o método dinâmico, que permite determinar o módulo de elasticidade do mesmo corpo de prova repetidas vezes sem causar danos.

A reprodutibilidade do método dinâmico será avaliada por meio de sua inclusão nos ensaios interlaboratoriais do INMETRO. Essa inclusão é premente e deve ocorrer em breve, considerando a popularização do método e o fato de já existir um número expressivo de laboratórios equipados para realizá-lo. Devido às características do método dinâmico, que não envolve a aplicação de altas tensões mecânicas e nem requisitos rigorosos de alinhamento, estima-se que a reprodutibilidade deva ser da mesma ordem da incerteza de medição discutida anteriormente (aproximadamente 1,5%), acrescida da dispersão intrínseca dos corpos de prova. A reprodutibilidade mede a consistência dos resultados quando o ensaio é repetido em diferentes laboratórios por operadores distintos, sendo usualmente expressa como uma faixa de desvio entre os resultados. No caso dos ensaios interlaboratoriais do INMETRO, a reprodutibilidade corresponde a aproximadamente o desvio padrão da massa de resultados dos laboratórios para o mesmo traço.

2.3 Correlação entre o módulo dinâmico (E_{cd}) e o estático (E_{ci})

Devido ao comportamento viscoelástico e não linear do concreto, o módulo de elasticidade determinado pelo método dinâmico,

E_{cd} , não coincide com o módulo de elasticidade determinado pelo método estático, E_{ci} , sendo E_{cd} sempre maior ou igual a E_{ci} . No entanto, a correlação entre E_{ci} e E_{cd} é bem estabelecida e apresentada no Anexo Normativo B da ABNT NBR 8522-1 (2021) [1], conforme o modelo de POPOVICS (Eq. 2) [5].

$$[2] \quad E_{ci} = \frac{0,4275}{\rho} E_{cd}^{1,4}$$

Sendo:

E_{ci} : Módulo de elasticidade tangente inicial (GPa);

E_{cd} : Módulo de elasticidade dinâmico (GPa);

ρ : Massa específica aparente do concreto (g/cm^3).

Após extensos programas experimentais, o modelo de POPOVICS, aplicado em concretos brasileiros, apresentou, em média, um erro sistemático de $-6,7\%$ e um desvio padrão de $7,1\%$, o que, combinados, implicam em uma incerteza de $13,7\%$ [1,6].

2.4 Aplicações avançadas

A norma ABNT NBR 8522-2 (2021) limita-se a aplicação do método dinâmico para

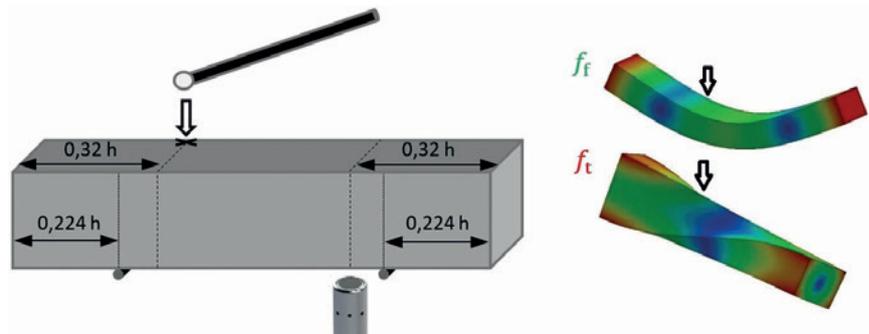


FIGURA 5

POSIÇÃO DE APOIO E DE APLICAÇÃO DA PANCADA PARA A OBTENÇÃO SIMULTÂNEA DOS MODOS DE VIBRAÇÃO FLEXIONAL E TORCIONAL DE UM CORPO DE PROVA PRISMÁTICO. IMAGEM ADAPTADA DA REFERÊNCIA [8]

determinação do módulo de elasticidade [1]. Contudo, esse método também pode ser aplicado para determinar o módulo de cisalhamento e o coeficiente de Poisson, propriedades importantes no dimensionamento de estruturas, especialmente para a verificação dos estados limites de serviço. Para a determinação do módulo de cisalhamento, do coeficiente de Poisson e do módulo de elasticidade, é necessário preparar corpos de prova prismáticos e excitar os modos de vibração flexional e torcional simultaneamente, como ilustrado na Fig. 5 para um corpo de prova prismático de $40 \times 10 \times 10$ cm. [8].

Após identificar as frequências flexional e torcional do corpo de prova prismático, é possível calcular os módulos e do coeficiente de Poisson por meio de equações analíticas [7].

3. CONTRIBUIÇÕES DO MÉTODO DINÂMICO PARA O CONTROLE TECNOLÓGICO

O método dinâmico é uma inovação disruptiva, pois reduz os custos e o tempo necessários para a determinação do módulo de elasticidade do concreto, ao mesmo tempo em que diminui a incerteza dos resultados. Com ele, obtêm-se resultados mais confiáveis com muito menos recursos e de forma mais rápida, como será discutido a seguir, em contraste com o método estático.

3.1 Economia no número de corpos de prova

A preparação de corpos de prova é custosa e, para os ensaios de módulo de

elasticidade pelo método estático, que é destrutivo, é necessária a preparação de mais três unidades, por idade, [1]. Por outro lado, o método dinâmico, por ser um ensaio não destrutivo, permite determinar o módulo de elasticidade em corpos de prova preparados para a determinação da resistência à compressão. Essa abordagem possibilita aumentar a frequência dos ensaios de módulo, sem necessariamente gerar demandas extras relacionadas à preparação dos corpos de prova.

3.2 Economia de tempo de execução do ensaio

O ensaio estático demanda, em média, cerca de uma hora para ser executado [5]. É demorado por conta das diversas etapas envolvidas, como o acoplamento dos medidores de deformação, posicionamento na prensa, o alinhamento e a aplicação dos ciclos de carregamento. Por outro lado, o método dinâmico requer aproximadamente seis minutos e meio [5], ou seja, quase dez vezes mais rápido. Em uma jornada de trabalho de oito horas, é possível realizar no máximo oito ensaios pelo método estático, enquanto o método dinâmico permite a execução de até 74 ensaios.

3.3 Maior confiabilidade dos resultados

Conforme estabelecido na ABNT NBR 8522-1 (2021) [1], a repetitividade mínima para o método estático é de 5% e a reprodutibilidade de 10%. Contudo, esses percentuais são dificilmente atingidos na prática, sendo corriqueiras discrepâncias de até 20%.

Analisando a dispersão dos resultados dos Interlaboratoriais do INMETRO entre 2006 e 2018, o desvio padrão percentual foi, em média, de 12% e proporcional ao módulo. Ou seja, quanto maior o módulo, maior a dispersão, atingindo aproximadamente 20% para concretos de média e alta resistência [7]. Por outro lado, a repetitividade mínima estabelecida na ABNT NBR 8522-1 (2021) [1] para o método dinâmico é de 0,1%, percentual facilmente atendido pelos sistemas comerciais disponíveis. A reprodutibilidade do método dinâmico ainda não foi incluída nos ensaios interlaboratoriais do INMETRO, porém estima-se que deva ser da mesma ordem da incerteza de medição, aproximadamente 1,5% [3,4], conforme discutido no tópico 1.2.

No caso do módulo tangente inicial (E_{ci}) estimado a partir do módulo dinâmico (E_{cd}), há a incerteza do modelo empregado na estimativa, que é de aproximadamente 13,7% [1,6], como discutido no tópico 1.3. Essa incerteza é similar ao do método estático para concretos de baixa resistência, porém se mantem para concretos de média e alta resistência, ao passo que a incerteza do método estático aumenta. Portanto, pode-se dizer que o E_{ci} estimado a partir do dinâmico é tão ou mais preciso do que quando medido pelo próprio método estático.

3.4 Custos de aquisição, operação e manutenção

Um sistema comercial para método dinâmico custa uma fração de uma prensa instrumentada para o método estático, ocupa um espaço menor, consome menos energia, requer menos manutenção e é facilmente calibrável.

3.5 Alta sensibilidade

O método dinâmico, por ser não destrutivo e por conta de sua alta repetitividade, permite a detecção de alterações sutis ao longo do tempo no módulo de elasticidade de um mesmo corpo de prova submetido a processos de intempéries, alterações essas que podem indicar a ocorrência de processos expansivos ou de degradação.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

No controle tecnológico do concreto relacionado ao módulo de elasticidade, o padrão atual é a especificação de E_{cs} e do E_{ci} pelos projetistas; o E_{ci} pode ser determinado pelo método estático ou estimado a partir do dinâmico, conforme norma ABNT NBR 8522-1&2 (2021) [1]. É intuitivo que a referência corrente seja o E_{ci} determinado pelo método estático, dada a sua maior semelhança com as condições de uso do material e a aplicação direta desta informação nos cálculos estruturais. No entanto, seria desejável a adoção do módulo dinâmico (E_{cd}) como referência, o que reduziria significativamente a incerteza dos resultados entre laboratórios, facilitando comparações e o atendimento das especificações técnicas. Nesse cenário, bastaria ao projetista estimar e especificar o E_{cd} a partir do E_{ci} almejado, utilizando o modelo de POPOVICS, conforme especificado pela norma [1,6]. Atualmente, o projetista especifica o módulo de elasticidade tangente inicial pelo método estático (E_{ci}) e, quando esse é estimado a partir do dinâmico, dilui-se uma contribuição em potencial importante do método dinâmico: a redução da incerteza dos resultados interlaboratoriais. A incerteza do método dinâmico é uma ordem de grandeza menor que do método estático e do E_{ci} estimado [7].

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABNT NBR 8522-1&2:2021 — Concreto endurecido — Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação, Partes 1 e 2 — Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro, 2021.
- [2] ABNT NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto — Rio de Janeiro, 2023.
- [3] BILESKY, Pedro Carlos. Contribuição aos Estudos do Módulo de Elasticidade do Concreto. 2016. 134 f. Dissertação (Mestrado) — Curso de Habitação, Coordenadoria de Ensino Tecnológico, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S. A., São Paulo, 2016. Cap. 5.
- [4] CARRAZEDO, R., *et al.* Mechanical Characterization of Concrete by Impact Acoustics Tests. *J. Mater. Civ. Eng.*, 2018, 30(4): 05018001. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002231.
- [5] THOMAZ, W. A. Estudo comparativo do módulo de elasticidade estático e dinâmico de concretos contendo agregados basálticos. Dissertação de Mestrado — UNILA. Foz do Iguaçu, 2020.
- [6] POPOVICS, S. "Verification of relationships between mechanical properties of concrete-like materials." *Matériaux et Construction*, 8(3), 183-191 (1975).
- [7] ALVES, H. *et al.* Considerações sobre a incerteza de medição do módulo de elasticidade do concreto, determinado de acordo com a norma ABNT NBR 8522-1&2:2021. ANAIS DO 64º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO — 64CBC2023. ISSN 2175-8182. Florianópolis, outubro 2023. 16 p.
- [8] CASTRO, A. L. *et al.* Aplicações avançadas do método das frequências naturais de vibração: Determinação do módulo de cisalhamento e coeficiente de Poisson dinâmicos em concretos de cimento Portland. ANAIS DO 63º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO — 63CBC2021. ISSN 2175-8182. Brasília, outubro 2022. 15 p.

Comparação entre as técnicas de ultrassom e de excitação por impulso para determinação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto

JOÃO VICTOR ROSA CRUZ - MESTRANDO - <https://orcid.org/0009-0002-1994-1903> (joaovrcruz@usp.br);

LARA GUIZI ANONI - DOUTORANDA - <https://orcid.org/0000-0001-5116-1507>;

LUANA MORAIS TEODORO - MESTRANDA - <https://orcid.org/0009-0001-0104-8087>;

PAULO MENDONÇA DE JESUS CUNHA - MESTRANDO - <https://orcid.org/0009-0004-6010-5899>;

GUSTAVO LOPES DA ROCHA - DOUTORANDO - <https://orcid.org/0000-0002-2413-0892>;

VLADIMIR GUILHERME HAACH - PROFESSOR - <https://orcid.org/0000-0002-9501-4450> – USP

RESUMO

ESTE TRABALHO EXPLORA A DIFERENÇA ENTRE AS TÉCNICAS DE ULTRASSOM E DE EXCITAÇÃO POR IMPULSO (MÉTODO DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS) NA DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO DE AMOSTRAS DE CONCRETO. O ESTUDO FOI FUNDAMENTADO NA CONFEÇÃO DE SEIS TRAÇOS DIFERENTES DE CONCRETO, QUE FORAM SUBMETIDOS AOS ENSAIOS DINÂMICOS. OS PRINCIPAIS RESULTADOS DESTES ESTUDOS INDICAM QUE OS VALORES OBTIDOS PARA O MÓDULO PELO MÉTODO DA VELOCIDADE DO PULSO ULTRASSÔNICO (VPU) SÃO SIGNIFICATIVAMENTE SUPERIORES AOS OBSERVADOS PELA TÉCNICA DE EXCITAÇÃO POR IMPULSO (TEI), EXCETO PARA AS AMOSTRAS REFORÇADAS COM FIBRAS, NAS QUAIS FOI OBSERVADA UMA REDUÇÃO SIGNIFICATIVA NA VELOCIDADE DO PULSO ULTRASSÔNICO. ENSAIOS ESTÁTICOS TAMBÉM FORAM REALIZADOS OBJETIVANDO A OBTENÇÃO DO MÓDULO TANGENTE ESTÁTICO PARA FINS COMPARATIVOS. POR FIM, O TRABALHO APRESENTA A VALIDAÇÃO DE EQUAÇÕES DA LITERATURA QUE ESTIMAM O MÓDULO DINÂMICO A PARTIR DO ESTÁTICO, E REITERA QUE ESTE ÚLTIMO É CONSISTENTEMENTE MENOR QUE O DINÂMICO.

PALAVRAS-CHAVE: MÓDULO ELÁSTICO DINÂMICO, CONCRETO, VPU, ULTRASSOM, FREQUÊNCIAS NATURAIS.

1. INTRODUÇÃO

A capacidade de um sistema estrutural suportar carregamentos é fundamental para garantir seu desempenho. No caso de estruturas de concreto armado, essa capacidade é determinada durante a caracterização do material e monitorada por meio

de ensaios mecânicos. Em situações de carregamento, a tensão está diretamente associada à deformação por meio do módulo de elasticidade.

A depender do método de caracterização utilizado, o módulo de elasticidade pode ser classificado entre estático, determinado com o ensaio mecânico de aplicação de tensão associada a um deslocamento medido no corpo de prova, ou dinâmico, obtido indiretamente a partir de correlações entre ensaios não destrutivos e parâmetros do material (Thomaz, Miyaji e Possan, 2021). A obtenção do módulo dinâmico, devido às técnicas aplicadas, é significativamente mais rápida e facilitada, com procedimentos já padronizados nacionalmente, como apresenta a ABNT NBR 8522-2 (2021), e procedimentos consagrados na literatura, utilizados por Karaiskos *et al.* (2015). No entanto, de acordo com as particularidades de cada técnica para a obtenção do módulo de elasticidade dinâmico, os resultados podem sofrer variações significativas.

Ademais, a relação entre o módulo dinâmico e estático também é de grande interesse, visto que esse último é utilizado como parâmetro principal de cálculo nos projetos. Dessa forma, se fazem necessários estudos para o estabelecimento de correlações adequadas, com investigação de parâmetros de variação que permitam a validação das equações utilizadas com maior precisão.

Diante deste cenário, duas técnicas são aplicadas neste estudo para determinação do módulo dinâmico do concreto: o método da Velocidade do Pulso Ultrassônico (VPU) e a Técnica de Excitação por Impulso (TEI). Os resultados de ambos os métodos em diferentes composições de concreto foram analisados comparativamente, a fim de observar a influência dos fenômenos envolvidos na realização de cada técnica. Espera-se que este trabalho contribua para maior entendimento das particularidades de cada uma das técnicas e auxilie na escolha do melhor método de ensaio de acordo às especificidades do concreto a ser estudado.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA: MÓDULO DE ELASTICIDADE

Segundo Mehta e Monteiro (2014), devido à não linearidade da curva tensão-deformação do concreto, o módulo pode ser calculado por três métodos: tangente, secante e cordal. Representando aproximadamente o módulo tangente inicial, o módulo dinâmico é de 20% a 40% maior que o estático (Mehta e Monteiro, 2014). Essa diferença ocorre, pois o concreto apresenta maior resistência em altas velocidades de carregamento, como no ensaio dinâmico, ao contrário do ensaio estático, realizado com velocidades menores.

A ABNT NBR 8522-1 (2021) apresenta uma equação que permite correlacionar o módulo estático ao dinâmico (Equação 1).

Da mesma forma, alguns trabalhos da literatura buscaram correlacionar esses dois módulos com equacionamentos mais robustos, como, por exemplo, a Equação 2, proposta por Carrazedo *et al.* (2018). Nessas equações, E_{Static} é o módulo tangente (GPa), E_{Dyn} é o módulo dinâmico (GPa) e ρ é a massa específica aparente do concreto (g/cm^3).

$$[1] \quad E_{Static} = \frac{0,4275E_{Dyn}^{1,4}}{\rho}$$

$$[2] \quad E_{Dyn} = 12,304 + 0,813E_{Static}$$

A obtenção do módulo dinâmico se dá por meio de ensaios não destrutivos, sendo entre os mais comuns o da VPU, preconizado pela ABNT NBR 8802 (2019), e o da TEI, descrito na ABNT NBR 8522-2 (2021). A seguir, uma breve discussão sobre a teoria dos métodos é apresentada.

2.1 Determinação do módulo dinâmico – VPU

No âmbito da engenharia civil, a aplicação de testes ultrassônicos é comumente centrada na avaliação da homogeneidade e detecção de falhas internas em estruturas. Contudo, sua utilização pode ser extrapolada para caracterização das propriedades elásticas de um material. O ensaio de ultrassom baseia-se na análise das variações nas velocidades de propagação de uma onda mecânica em um determinado meio.

A Equação 3 apresenta a formulação que correlaciona a velocidade de propagação de uma onda longitudinal (V_L) ao módulo dinâmico longitudinal (E_{Dyn}), ao coeficiente de Poisson (μ) e a massa específica do material (ρ_0).

$$[3] \quad V_L = \sqrt{\frac{E_{Dyn} \cdot (1 - \mu)}{\rho_0 \cdot (1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu)}}$$

2.2 Determinação do módulo dinâmico – TEI

O ensaio pelo método da TEI consiste em perturbar o corpo de prova com um impulso manual ou mecânico. Esta ação promove vibrações longitudinais ou flexionais (para amostras cilíndricas), como pode ser visto na Figura 1. Nesse sentido,

a amplitude do sinal varia com o tempo, até o momento em que esta solicitação é amortecida. O sinal no domínio do tempo é capturado por meio de um microfone e é convertido para o espectro da frequência por meio da Transformada de Fourier, onde torna-se possível observar as frequências dos modos de vibração.

Segundo a ABNT NBR 8522-2 (2021), o módulo de elasticidade dinâmico de amostras com geometria cilíndrica relaciona-se com a frequência flexional obedecendo a Equação 4.

$$[4] \quad E_{Dyn} = 1,6067 \cdot \frac{h^3 \cdot m \cdot f_f^2}{d^4} \cdot T \cdot 10^{-9}$$

Onde E_{Dyn} (GPa) é o módulo de elasticidade dinâmico medido no ensaio da TEI flexional, h é a altura do corpo de prova (mm), d é o diâmetro do corpo de prova (mm), m é a massa do corpo de prova (g), f_f é a frequência de ressonância flexional (Hz) e T é o fator de correção para o modo de vibração flexional, que varia em função da razão h/d . Para este último parâmetro, a norma apresenta uma tabela de valores.

3. TRAÇOS DE CONCRETO

Para diversificar a comparação entre os módulos dinâmicos obtidos pelos métodos VPU e TEI, foram utilizados traços de concretos não convencionais, incluindo quatro misturas ecoeficientes e duas de alto desempenho com fibras. As misturas ecoeficientes substituem 10%, 20% ou 30% do volume de cimento por adições minerais: sílica ativa (SA), metacaulim (MC), ou combinações entre ambos e com fíler calcário (SAMC e SAMCFC). Os traços com fibras (F1 e F2) incorporam fibras de aço (13 mm de comprimento, 0,2 mm de diâmetro) em 1,5% do volume de cimento, com fibras de poli-propileno em 0,4% no F1 e 0,6% no F2.

Utilizou-se o cimento CPV ARI, agregados locais (areia natural de quartzo e brita basáltica de 9,5 mm)

e adições minerais com massa específica de 2,2 g/cm^3 a 2,7 g/cm^3 e partículas entre 1,4 μm e 15,9 μm . Utilizou-se também aditivo superplastificante (SP) à base de poliacarboxilatos e água da rede local.

4. MÉTODOS

Os métodos para determinar o módulo dinâmico pelos métodos da VPU e da TEI foram aplicados nos corpos de prova antes do ensaio para o módulo estático. Este último foi realizado em uma prensa hidráulica, utilizando extensômetros para medir as deformações.

Os corpos de prova (cilindros de 5 x 10 cm^3) tiveram massa e medidas aferidas previamente e foram ensaiados nas mesmas condições de idade, temperatura e saturação de superfície seca, conforme a ABNT NBR 8522-2 (2021). Para comparação das médias, utilizou-se o teste t de Student com nível de confiança p de 0,05.

4.1 Módulo dinâmico - VPU

O método da VPU foi realizado por meio da técnica de transmissão direta através do equipamento Pundit Lab+ da Proceq®. Utilizou-se gel acoplante para promover uma distribuição adequada das ondas. A Figura 2a apresenta o esquema do ensaio.

A frequência de propagação das ondas longitudinais adotada foi de 250 kHz. O tempo de propagação da onda do transdutor emissor ao receptor é obtido con-

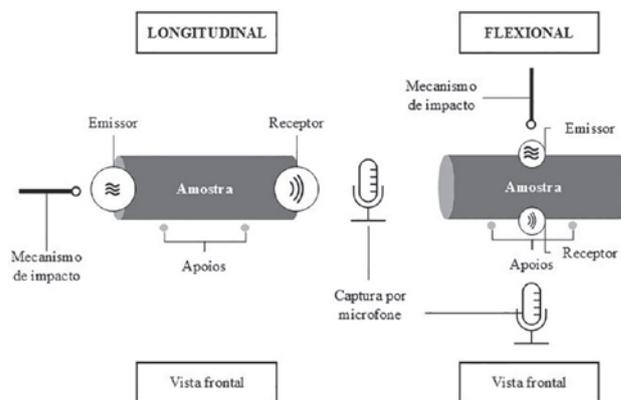


FIGURA 1
MODOS DE APLICAÇÃO DE IMPACTO NO ENSAIO DINÂMICO POR MEIO DA TEI

FONTE: AUTORES (2024)

TABELA 1

TRAÇOS UNITÁRIOS EM MASSA

Traço	c (kg/m ³)	Cim.	SA	MC	FC	PQ	Areia	Brita	Água	SP
SA	393	1	0,084	—	—	—	2,491	2,201	0,445	0,007
MC	394	1	—	0,102	—	—	2,500	2,195	0,444	0,007
SA-MC	338	1	0,095	0,115	—	—	2,805	2,479	0,509	0,011
SA-MC-FC	308	1	0,107	0,133	0,127	—	3,201	2,831	0,571	0,013
F1 e F2	757,2	1	0,25	v	—	0,5	1,1	—	0,21	0,09

c = CONSUMO DE CIMENTO; PQ = PÓ DE QUARTZO.

forme Figura 2b. Conhecido o tempo de propagação Δt e a distância entre os transdutores ΔS , a velocidade do pulso ultrassônico é calculada através da Equação 5. Com base nos valores das velocidades das ondas longitudinais, densidade do concreto e do coeficiente de Poisson (0,25), calcula-se o módulo dinâmico de acordo com a Equação 3.

$$[5] \quad v = \frac{\Delta S}{\Delta t}$$

4.2 Módulo dinâmico – TEI

Os diferentes traços de concreto utilizados neste trabalho foram testados um a um por meio da TEI com o sistema Sonelastic®. A configuração do ensaio foi feita conforme a Figura 3a, sendo as amostras apoiadas sobre fios de aço a 0,224 h de suas extremidades. Com o sinal obtido no domínio da frequência, obtém-se a frequência flexional (Figura 3b). Por fim, o módulo de elasticidade é calculado para cada um dos traços de concreto de acordo com a Equação 4.

5. RESULTADOS

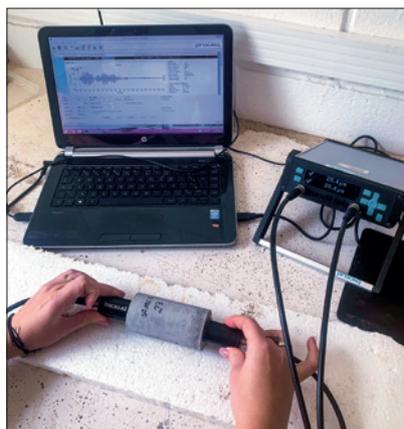
Abaixo são apresentados os resultados de módulos dinâmicos obtidos por meio do ensaio de VPU e TEI, além dos módulos estáticos.

5.1 Comparação entre os resultados: VPU e TEI

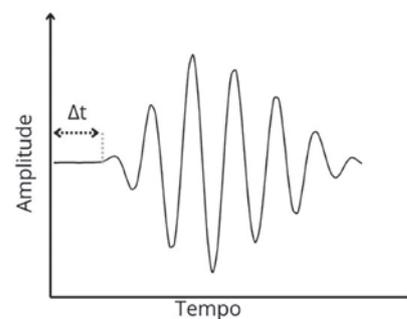
Os resultados obtidos para cada um dos 4 CPs de cada traço são apresentados na Figura 4a. Apesar de serem métodos de ensaio com velocidades de carregamento semelhantes, ou seja, ambos ob-

têm informações do concreto a partir de perturbações de alta velocidade, observa-se uma diferença nos resultados do módulo dinâmico obtido por meio da VPU e da

TEI. A configuração apresentada na Figura 4a facilita a visualização dessas diferenças. Para comparar as médias entre todos os traços, foi aplicado o teste t de Student.



A

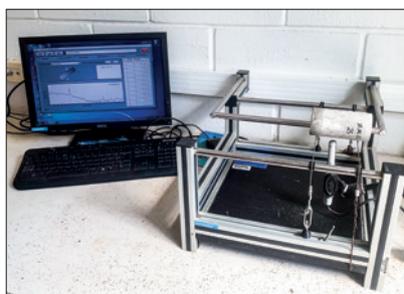


B

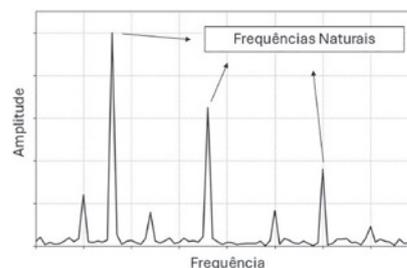
FIGURA 2

ENSAIO VPU (A), E OBTENÇÃO DO TEMPO DE CHEGADA DA ONDA ULTRASSÔNICA (B)

FONTE: AUTORES (2024)



A



B

FIGURA 3

TEI (A) E FREQUÊNCIAS NATURAIS OBTIDAS NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA (B)

FONTE: AUTORES (2024)

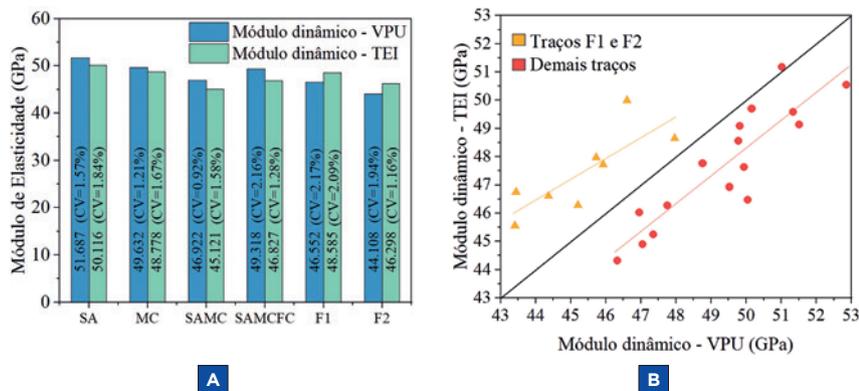


FIGURA 4
RESULTADOS DE MÓDULO DINÂMICO OBTIDOS POR MEIO DA VPU E DA TEI

FONTE: AUTORES (2024)

Os resultados indicaram uma diferença significativa entre todas as médias dos módulos obtidos pelos dois métodos ($t > t_{crit}$).

Nos traços SA, MC, SAMC e SAMCFC, o módulo dinâmico obtido pela VPU é significativamente maior do que o obtido pela TEI. Já, nos traços F1 e F2, o módulo dinâmico medido pela TEI é significativamente maior do que o obtido pela VPU. A Figura 4b apresenta os resultados para todos os corpos de prova ensaiados, destacando o padrão distinto observado em F1 e F2 em relação aos demais traços.

A diferença no módulo dinâmico obtido pela VPU em relação à TEI para os concretos sem fibra pode ser explicada pela natureza dos ensaios. O método VPU avalia as propriedades de propagação da onda em uma linha reta entre os transdutores, o que faz com que a velocidade calculada reflita as características da linha central do corpo de prova, uma região geralmente mais bem adensada e menos heterogênea. Por outro lado, a TEI mede a frequência de vibração de todo o corpo de prova, resultando em propriedades que representam uma média de diferentes regiões do material, devido à sua natureza heterogênea. Assim, o módulo de elasticidade obtido pela TEI tende a ser menor do que o medido pela propagação da onda na linha central do corpo de prova.

Outro fator relevante é o uso de gel acoplador nos ensaios de VPU, o que contribui para a amplificação da velocidade do pulso ultrassônico. Caso o

ensaio fosse realizado com transdutores pontuais, que dispensam o uso de gel, os resultados poderiam ser mais baixos.

A observação de que o módulo dinâmico medido pela TEI foi maior do que pela VPU em concretos com fibras levantou a hipótese de que a presença de fibras reduz a velocidade de propagação do pulso ultrassônico. Dal Bosco, Lorenzi e Silva Filho (2020) verificaram que a velocidade da onda diminuiu em concretos com fibras de polipropileno, mas aumenta em concretos com fibras de aço quando a adição de fibras não ultrapassa 1%. Já no trabalho de Silva e Bonfim (2019), a velocidade reduziu tanto em concretos com fibras de polipropileno quanto de aço.

Embora a velocidade de propagação

ultrassônica no aço seja maior do que no concreto, o que teoricamente aumentaria a velocidade global, acredita-se que a disposição aleatória das fibras na mistura tenha gerado reflexões e dispersão excessivas da onda. Isso pode ter reduzido a amplitude da onda que se propaga em linha reta entre os transdutores, dificultando sua captura no sinal e aumentando o tempo de chegada, conforme ilustrado na Figura 2b.

5.2 Comparação entre resultados de módulo dinâmico e estático

O comparativo dos resultados de módulo dinâmico obtidos por meio da VPU e da TEI com o módulo estático dos concretos é apresentado na Figura 5. Os valores de módulo dinâmico são superiores aos do módulo estático, conforme esperado teoricamente. Em média, os valores de módulo dinâmico obtidos pela VPU são 10% maiores que os do módulo estático, enquanto os valores obtidos pela TEI são, em média, 8% superiores ao módulo estático. Dado que já foi observada uma diferença significativa entre os traços com e sem fibras, é pertinente verificar essa relação de forma separada.

Nos traços de concreto sem fibra, os valores de módulo dinâmico obtidos pela VPU são, em média, 7,7% maiores que os valores do módulo estático, enquanto os obtidos pela TEI são, em média, 4% superiores ao módulo estático. Para os concretos com fibras (F1 e F2), os módulos

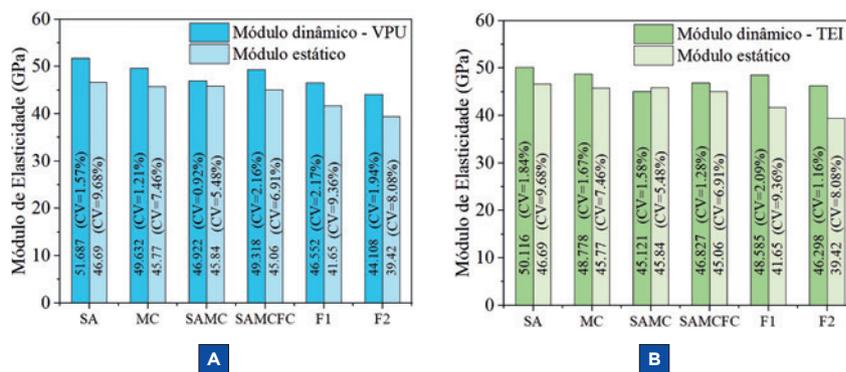


FIGURA 5
RESULTADOS DE MÓDULO DINÂMICO OBTIDOS POR MEIO DA VPU (A) E DA TEI (B) COMPARADOS AO MÓDULO ESTÁTICO

FONTE: AUTORES (2024)

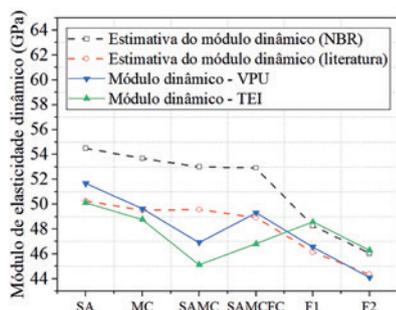


FIGURA 6

ESTIMATIVA DE MÓDULO DINÂMICO POR MEIO DE EQUAÇÕES DA NORMA BRASILEIRA E DA LITERATURA EM COMPARAÇÃO AOS MÓDULOS OBTIDOS POR MEIO DA VPU E TEI

FONTE: AUTORES (2024)

dinâmicos medidos pela VPU foram aproximadamente 11,5% maiores que os estáticos, e os obtidos pela TEI foram mais de 17% superiores ao módulo estático. Esses resultados mostram a variabilidade da correlação entre os módulos estático e dinâmico, que pode ser influenciada tanto pela metodologia de ensaio quanto pela composição do traço.

Apesar dessa variabilidade, ao estimar os valores de módulos dinâmicos a partir dos módulos estáticos utilizando a equação proposta pela norma brasileira (Equação 1) e pela literatura (Equação 2), verifica-se que os valores calculados pela equação da literatura são próximos aos obtidos pelo método da VPU, com a maior diferença sendo de 5,35%

(Figura 6). Por outro lado, a estimativa de módulo dinâmico pela norma brasileira apresentou valores consistentemente superestimados, com diferenças que chegaram a quase 15% em relação aos resultados da TEI.

Destaca-se que, apesar das diferenças observadas entre os módulos para traços com e sem fibras, os maiores erros percentuais entre os valores estimados e os medidos não ocorreram em F1 e F2. Pelo contrário, observa-se grande proximidade entre os resultados obtidos de módulo dinâmico pela TEI e a estimativa da norma brasileira e entre os resultados obtidos pela VPU e a estimativa pela equação proposta por Carrazedo *et al.* (2018).

6. CONCLUSÕES

As principais conclusões obtidas com o desenvolvimento deste trabalho foram:

- ▶ O módulo dinâmico obtido pela VPU foi superior, possivelmente devido à diferença na forma como cada técnica avalia o material: a VPU considera a propagação da onda em uma linha central, enquanto a TEI mede a vibração global, resultando em um módulo médio geralmente menor;
- ▶ Nos concretos com fibras de aço e polipropileno, os módulos obtidos pela TEI foram maiores, sugerindo que as fibras, especialmente as de polipropileno, podem reduzir a velocidade da onda ultrassônica. A disposição aleatória das fibras pode

causar reflexões e dispersões, aumentando o tempo de chegada e influenciando os resultados da VPU;

- ▶ Os valores de módulo dinâmico foram significativamente maiores que os estáticos, com até 17% de diferença para os concretos com fibras;
- ▶ As equações da literatura para a estimativa do módulo dinâmico a partir do estático foram mais precisas que as da norma, especialmente quando comparando os resultados da técnica da VPU.

Recomenda-se, para estudos futuros, investigar o impacto do acoplamento dos transdutores nos ensaios de VPU, dada sua influência nos resultados. Também seria relevante analisar como a vibração global medida pela TEI afeta estruturas maiores, como vigas e pilares, especialmente em geometrias complexas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro fornecido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo nº 2023/17255-3, pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - 303002/2021-2). As opiniões, hipóteses e conclusões ou recomendações expressas neste material são de responsabilidade dos autores e não necessariamente refletem a visão da FAPESP, CAPES ou CNPq. ©

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CARRAZEDO, R.; HAACH, V. G.; MONFRINATO, E. F.; PERISSIN, D. A. M.; CHAIM, J. P. Mechanical Characterization of Concrete by Impact Acoustics Tests. *Journal Of Materials In Civil Engineering*, v. 30, n. 4, abr. 2018. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002231](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002231).
- [2] DAL BOSCO, V. I.; LORENZI, A.; SILVA FILHO, L. C. P. Análise Comparativa Entre Concreto Convencional E Reforçado Com Fibras Através De Ensaio Ultrassônicos. *Congresso Brasileiro de Patologia das Construções*, [S.L.], p. 121-129, 2020. Associação Brasileira de Patologia das Construções. <http://dx.doi.org/10.4322/cbpat.2020.012>.
- [3] KARAIKOS, G. *et al.* Monitoring of concrete structures using the ultrasonic pulse velocity method. *Smart Materials and Structures*, v. 24, n. 11, p. 113001, 2015.
- [4] MEHTA, P.; MONTEIRO, P. *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. 2014. 978-85-98576-21-3.
- [5] NEVILLE, A. M. *Properties of Concrete*. 5th ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2011. ISBN 978-0-273-75580-7.
- [6] SILVA, R. R. C.; BONFIM, L. H. S. Análise Do Comportamento Mecânico De Concreto Com Diferentes Tipos De Adição De Fibras Através Da Propagação De Onda De Ultrassom. *Exatas & Engenharia*, [S.L.], v. 9, n. 25, 13 set. 2019. Institutos Superiores de Ensino do Censa. <http://dx.doi.org/10.25242/885x92520191748>.
- [7] THOMAZ, W. de A.; MIYAJI, D. Y.; POSSAN, E. Comparative study of dynamic and static Young's modulus of concrete containing basaltic aggregates. *Case Studies in Construction Materials*, v. 15, e00645, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00645>.

Durabilidade do CRF: Por que avaliar o potencial **de degradação das fibras é essencial?**

IGOR FERRAZ TORRES - GER. TÉC., DIR. TÉC. - <https://orcid.org/0000-0003-3187-9575> (igorferraz86@gmail.com) – **TM Concrete, Sika Brasil S/A, IFRC**

RESUMO

NESTE ARTIGO É ABORDADA A IMPORTÂNCIA DA DURABILIDADE DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS (CRF), DESTACANDO A NECESSIDADE DE AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE DEGRADAÇÃO DAS FIBRAS EM MATRIZES CIMENTÍCIAS ALCALINAS. EM GERAL, AS FIBRAS METÁLICAS OFERECEM INÚMERAS VANTAGENS, COMO ALTA RESISTÊNCIA MECÂNICA E CONTROLE DE FISSURAÇÃO, MAS PODEM SOFRER CORROSÃO EM AMBIENTES EXTREMAMENTE AGRESSIVOS, O QUE EXIGE REVESTIMENTOS PROTETORES. AS FIBRAS POLIMÉRICAS, ESPECIALMENTE AS DE PET, DEMONSTRAM ALTA SENSIBILIDADE AO ATAQUE ALCALINO, ENQUANTO AS DE POLIPROPILENO APRESENTAM MELHOR ESTABILIDADE. JÁ, AS FIBRAS DE VIDRO POSSUEM BOAS PROPRIEDADES MECÂNICAS, MAS SOFREM DEGRADAÇÃO RÁPIDA EM MEIO ALCALINO, SENDO NECESSÁRIO UM TEOR MÍNIMO DE ZIRCÔNIO PARA AUMENTAR SUA DURABILIDADE. O TEXTO REFORÇA A IMPORTÂNCIA DAS NORMAS TÉCNICAS BRASILEIRAS PARA GARANTIR A QUALIDADE DAS FIBRAS E CRF, SUGERINDO-SE MÉTODOS AVANÇADOS, COMO FTIR E DSC, PARA ANÁLISES COMPLEMENTARES. A ESCOLHA ADEQUADA DAS FIBRAS DEVE EQUILIBRAR BENEFÍCIOS E LIMITAÇÕES, GARANTINDO UM CRF DURÁVEL E EFICIENTE PARA DIFERENTES APLICAÇÕES.

PALAVRAS-CHAVE: FIBRAS, CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS (CRF), DEGRADAÇÃO, DURABILIDADE.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, os benefícios provocados pela incorporação de fibras no concreto são amplamente reconhecidos e aceitos (BERNARD, 2002) (BENTUR & MINDESS, 2006), (CARMONA & MOLINS, 2019). Dentre estes benefícios,

podemos destacar: aumento de ductilidade pelo reforço tridimensional pós-fissuração (resistência residual à tração ou absorção de energia); redução ou controle da fissuração; melhor comportamento à flexão; maior resistência a impacto, abrasão e fadiga; aumento de durabilidade devido ao maior controle de fissuração; maior resistência aos ciclos de gelo-degelo; aplicação mais fácil, segura e econômica, menor pegada de carbono etc.

Como consequência, é previsto que o mercado global de concreto reforçado com fibras (CRF) atinja um crescimento orgânico considerável de 8,2% no período de 2022 a 2031, atingindo o patamar de 4,8 bilhões de dólares, destacando-se especialmente as fibras poliméricas que apresentam a maior previsão de crescimento de aproximadamente 32,7% no período analisado. Tal crescimento da aplicação das fibras é impulsionado pelo crescimento populacional e a rápida urbanização que requerem melhorias de infraestrutura, construção residencial e comercial, mineração e construção subterrânea, industrial e outros (ALLIED MARKET RESEARCH, 2023).

Uma ampla variedade de fibras pode ser listada de acordo com os seus materiais constituintes: metálicas (aço trefilado a frio, refilado, usinado ou por fusão), poliméricas (polipropileno, polietileno, PVA, poliacrílico, aramidas ou combinações destes), vidro e naturais (celulose, sisal, cânhamo) etc. Tais fibras variam consideravelmente em termos de propriedades físico-químicas, mecâ-

nicas, desempenho e custo dos pontos de vista de material constituinte, bem como de desempenho quando aplicadas em CRF. Esses materiais são amplamente utilizados como matéria prima das fibras, pois geralmente apresentam comportamento mecânico adequado e durabilidade quando aplicados em CRF (BENTUR & MINDESS, 2006).

Contudo, é importante salientar que cuidados especiais devem ser tomados para garantia da durabilidade do CRF a partir da avaliação do potencial de degradação das fibras quando inseridas em matrizes cimentícias. Assim como outros materiais componentes do concreto, as fibras independentemente da origem devem apresentar sanidade quando inseridas em meio alcalino, já que a solução de poros de matrizes cimentícias apresentam convencionalmente um pH em torno de 13 (KURDOWSKI, 2014).

É neste sentido que o corrente artigo revisita algumas indicações técnicas já preconizadas por normas brasileiras - NBR 15530 (ABNT, 2019), NBR 16941 (ABNT, 2021) e NBR 16942 (ABNT, 2021), além de sugestões e recomendações adicionais por meio de técnicas microanalíticas que surgem para complementar e garantir o controle de qualidade do CRF na esfera de materiais e de desempenho ao longo de toda sua vida útil. O texto abrangerá aquelas fibras de maior representatividade no mercado, ou seja, aquelas cobertas atualmente pela norma brasileira de controle de qualidade - NBR 16938 (ABNT 2021): metálicas, poliméricas e vidro.

2. FIBRAS METÁLICAS

As fibras metálicas, assim como o reforço em aço convencional, são estáveis e compatíveis com o ambiente alcalino prevalente em um concreto de cimento Portland não fissurado e/ou carbonatado. Assim como ocorre com o concreto armado convencional, quando os álcalis do concreto são lixiviados ou quando é carbonatado, o pH do meio cai para um nível não seguro, de maneira que a corrosão se torna suscetível, mesmo em concreto não fissurado.

Embora fibras de aço de baixo carbono possam sofrer corrosão severa quando localizadas superficialmente, as fibras de aço mais internas permanecem livres de corrosão mesmo sob altos teores de cloreto (BERROCAL, LUNDGREN, & LÖFGREN, 2016). Positivamente, é importante destacar que as fibras possuem papel fundamental no controle da fissuração do CRF. Ou seja, por inibir o surgimento de fissuras, as fibras dificultam o acesso de agentes agressivos, sendo que em estruturas mistas protegem mais o aço convencional quando comparado com o cobrimento em concreto simples, além da autoproteção das próprias fibras. Devido à natureza discreta das fibras, a maior homogeneidade da superfície por conta do processo produtivo e a interface fibra-matriz mais densa são fatores que tornam as fibras de aço carbono incorporadas no CRF mais duráveis em relação ao aço convencional (MARCOS-MESONA, *et al.*, 2018)

Contudo, ainda há inconsistências e a não convergência de estudos sobre a compreensão total dos mecanismos que governam a corrosão de fibras de aço carbono (MARCOS-MESONA, *et al.*, 2018). Portanto, por motivos de segurança é importante que considerações especiais sejam tomadas em condições extremamente severas de exposição, especialmente em zonas marinhas ou industriais com ciclagem de molhagem/secagem. É esperada a perda de capacidade de reforço mecânico provocada pela perda de seção/diâmetro dos filamentos das fibras de aço carbono

comum, especialmente daqueles mais superficiais e expostos às intempéries sob menor cobrimento. Isso é explicado pela mudança no padrão de falha na ruptura do concreto reforçado com fibras de aço de arrancamento para fratura da fibra, decaindo, assim, a sua tenacidade. Adicionalmente, impactos estéticos também podem ocorrer devido a manchas provocadas pelo processo de corrosão (BENTUR & MINDESS, 2006) (JOHNSTON, 2010).

Diante desse contexto, torna-se importante seguir as recomendações da NBR 15530 (ABNT, 2019), a qual menciona que o uso de revestimentos de zinco (Zn) ou ligas de zinco/alumínio (Zn/Al) é amplamente recomendado para a proteção contra ambientes alcalinos (passivação). O tipo e a quantidade devem ser declarados pelo fabricante e no caso da galvanização (Zn), a determinação da espessura do revestimento deve ser realizada de acordo com a ISO 7989-1 (INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDIZATION, 2006).

Ademais, boas práticas já preconizadas por normas técnicas clássicas de concreto devem ser seguidas, sob a ótica prescritiva ou de desempenho

do material CRF. Adicionalmente, do ponto de vista estrutural, é importante a limitação da abertura de fissuras no que tange ao Estado Limite de Serviço (ELS), diminuindo a vulnerabilidade a quaisquer agentes corrosivos. Finalmente, é sugerida a combinação do concreto reforçado com fibras de aço com outros sistemas (revestimentos protetores poliméricos, por exemplo), a que fatalmente aumentará a redundância e reserva de segurança da solução conjunta adotada.

3. FIBRAS POLIMÉRICAS

É preciso ter ciência de que processos de envelhecimento e impacto na durabilidade do CRF podem ocorrer por efeitos associados à própria matriz cimentícia, à fibra em si e às mudanças intersticiais de fibra-matriz. Ensaios acelerados comumente adotados em concreto convencional, ataque químico por sulfatos, por exemplo, pode ser referenciado para qualificação do CRF. No entanto, aqui será abordado exclusivamente o problema atrelado a sensibilidade das fibras ao ataque dos álcalis, o que é um problema comum as fibras naturais, de vidro e poliméricas (BENTUR & MINDESS, 2006) (JOHNSTON, 2010).



FIGURA 1

ASPECTO DA FIBRA POLIMÉRICA BASEADA EM PET APÓS O ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO MEIO ALCALINO: A) ESCURECIMENTO DA SOLUÇÃO DE HIDRÓXIDO DE SÓDIO PROVOCADO PELA DEGRADAÇÃO DO PET; B) VARIAÇÕES GEOMÉTRICAS DE COMPRIMENTO, DIÂMETRO E ENRIJECIMENTO DOS FILAMENTOS APÓS O ATAQUE ALCALINO

FONTE: AUTOR (2025)

O que ocorre é que há certos tipos de polímeros termoplásticos, o exemplo mais conhecido é um tipo de poliéster: o PET - polietileno tereftalato, que é reconhecido por ser um material que sofre grave deterioração por hidrólise e dissolução quando em contato com os álcalis do cimento (SALVADOR & FIGUEIREDO, 2013). É importante esclarecer uma confusão terminológica que ocorre no mercado com as poliolefinas, grupo que engloba os polietilenos de baixa ou alta densidade, polietileno reticulado (PE) e o polipropileno (PP), ou seja, materiais intrinsecamente de elevada estabilidade em ambientes alcalinos.

Exatamente para evitar este tipo de problema que a NBR 16942 (ABNT, 2021) prediz que o polímero base ou as misturas de polímeros da fibra devem ser declarados pelo fabricante ou fornecedor e devem ser, obrigatoriamente, resistentes a meios alcalinos, de acordo com o método de ensaio descrito nesta mesma normativa para avaliação da resistência da fibra à ação do meio alcalino. O ensaio consiste em submeter três amostras de 10,0 g de fibra em 200,0 g de solução de hidróxido de sódio 1 M (40 g/L, pH 14), durante 30 dias, a uma temperatura de 60°C. Tais condições aceleradas são equivalentes ao período de 13 anos de exposição à solução de poros de uma matriz cimentícia (pH 13) à temperatura de 20°C, conforme a equação de Arrhenius (SALVADOR & FIGUEIREDO, 2013), o que não é demasiadamente conservador vide as atuais vidas úteis mínimas de projeto praticadas para estruturas de concreto. Como resultado, neste ensaio é avaliado a perda de massa da fibra com consequente avaliação visual da formação de resíduos e alterações superficiais e estruturais dos filamentos de fibra. Um exemplo da aplicação deste ensaio é mostrado na Figura 1 e Tabela 1, cuja perda de massa foi de cerca de 40%, ultrapassando consideravelmente o requisito normativo de 5%.

Além da declaração do fabricante, outro teste bastante singelo que pode ser realizado no canteiro de obras é o

TABELA 1

PERDA DE MASSA OBTIDA EM ENSAIO DE RESISTÊNCIA ALCALINA DE FIBRA PET

Amostra	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Perda de massa individual (%)	Perda de massa média (%)
1	10,1	6,2	-38,6	-39,1
2	10,0	6,1	-39,0	
3	10,1	6,1	-39,6	

de densidade sob imersão em água com a fibra suspeita em questão. Como o PET apresenta uma massa específica na ordem de $\gamma = 1,3 \text{ g/cm}^3$, esse afunda quando em contato com água, enquanto o polipropileno flutua, vide a massa específica da ordem de $\gamma = 0,92 \text{ g/cm}^3$, vide Figura 2. Apesar da simplicidade, é importante notar que esse teste não possui caráter reprobatório e não é normatizado, servindo apenas como um alerta. Há outros tipos de fibras



FIGURA 2

COMPORTAMENTO DAS FIBRAS PET (AO FUNDO) E PP (FLUTUANDO) NO TESTE DE IMERSÃO EM ÁGUA

FONTE: AUTOR (2025)

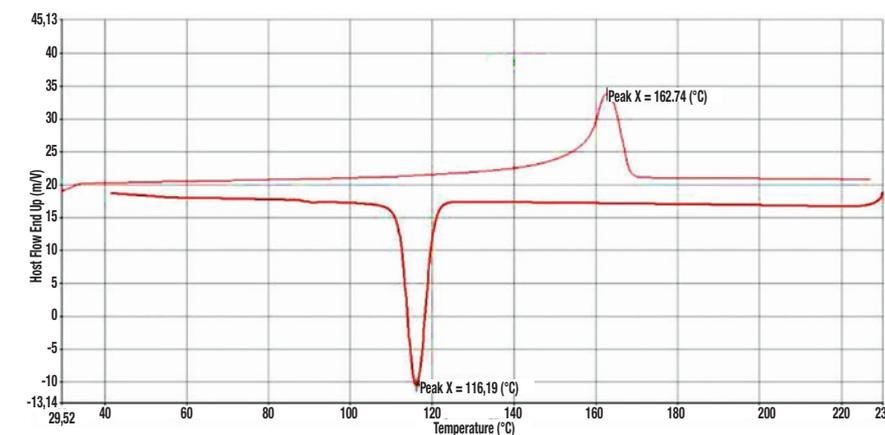


FIGURA 3

PERFIL TÍPICO OBTIDO NA ANÁLISE DSC DE UMA FIBRA COMPOSTA INTEGRALMENTE POR PP

FONTE: AUTOR (2025)

à da água e, portanto, afundam mesmo sendo um tipo de polímero reconhecidamente resistente ao meio alcalino.

Embora haja críticas sobre a dificuldade na correlação e modelagem com as situações reais de campo, o teste acelerado de resistência alcalina é de suma importância para comparação entre diferentes produtos comerciais e garantia da durabilidade dos compósitos, já que aqueles confeccionados com fibras PET podem perder até 50% da sua capacidade de resistência residual à tração em longas idades (>168 dias), quando comparada à idade referencial de 28 dias (SALVADOR & FIGUEIREDO, 2013).

De maneira complementar, este autor sugere para a próxima revisão normativa a adoção de técnicas microanalíticas, englobando a análise FTIR (sigla em inglês para espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier) e DSC (sigla em inglês para calorimetria exploratória diferencial), as quais possibilitam a investigação de componentes majoritários e minoritários das fibras a partir da absorbância ou transmitância característica da vibração e estrutura do material (FTIR) e pela determinação das temperaturas de transição de fases dos materiais e sua natureza termodinâmica (DSC). É importante mencionar que a análise FTIR já é contemplada, mesmo que optativa, pela norma de aditivos químicos para concreto para verificação de uniformidade (ABNT, 2019). Nota-se que os polímeros apresentam temperaturas de fusão características, sendo que o polietileno funde a cerca de 134°C, o polipropileno a cerca de 160°C e o poliéster a 257°C (ACI, 2018). A Figura 3 mostra o perfil típico de uma análise DSC de uma fibra composta integralmente por PP (Temperatura de fusão -162°C).

Já, na Figura 4, é mostrado um perfil típico de uma análise DSC de uma fibra composta parcialmente por PE e PP (Temperaturas de fusão de -133°C e -160°C, respectivamente). De forma complementar, temos, na Figura 5, uma análise comparativa dos espectros obtidos por FTIR entre ambas as fibras, sendo a diferença pronunciada pela banda

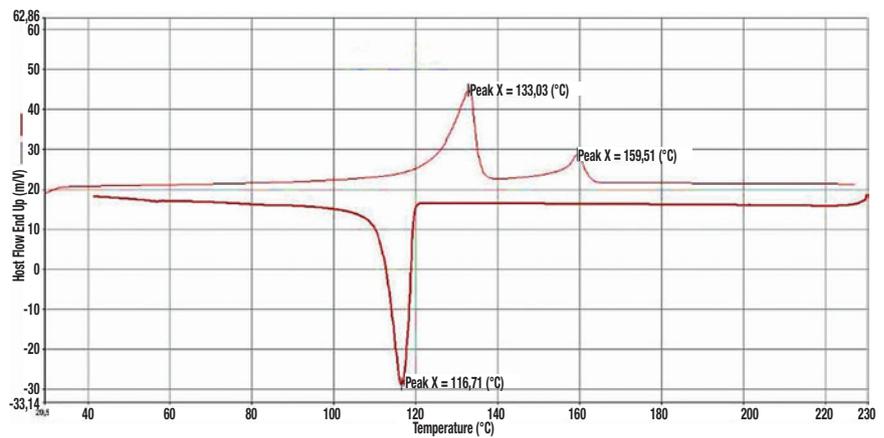


FIGURA 4

PERFIL TÍPICO OBTIDO NA ANÁLISE DSC DE UMA FIBRA COMPOSTA POR BLEND DE PE E PP

FONTE: AUTOR (2025)

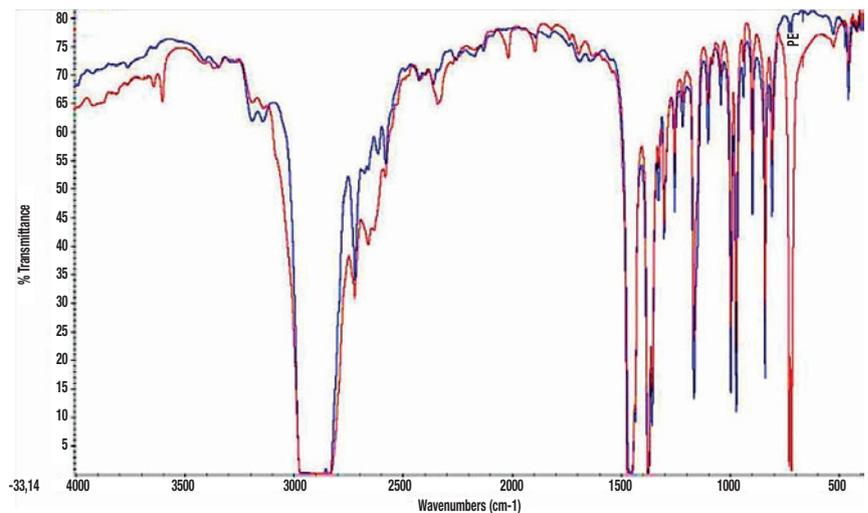


FIGURA 5

ESPECTROS COMPARATIVOS OBTIDOS POR ANÁLISE FTIR DE FIBRAS PP E PE + PP

FONTE: AUTOR (2025)

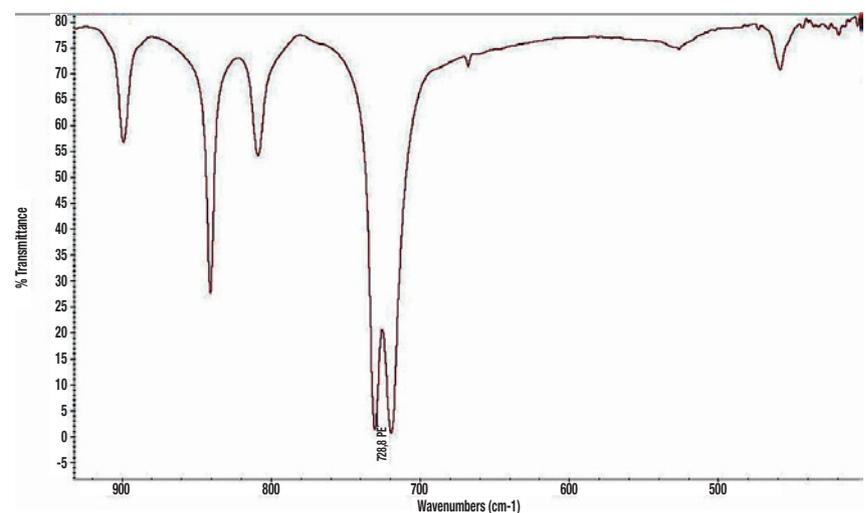


FIGURA 6

ANÁLISE FTIR: DESTAQUE PARA A BANDA CARACTERÍSTICA DO GRUPO PE DA FIBRA PE+PP

FONTE: AUTOR (2025)

característica ao PE no número de onda de -728 cm^{-1} , destacado na Figura 6.

4. FIBRAS DE VIDRO

Conforme já citado, a exposição das fibras de vidro a um ambiente alcalino leva a um rápido processo de deterioração, acarretando perdas de resistência, massa e diâmetro do filamento, devido a um processo de quebra das ligações Si-O-Si do vidro pelos íons OH^- existentes na solução de poros da matriz cimentícia (JOHNSTON, 2010). De forma a mitigar eficientemente tal problema de forma econômica, a incorporação de zircônio na composição do vidro apresentou-se como a solução mais eficaz para estabilidade química em soluções alcalinas.

Com base nesse contexto, a norma brasileira específica que a fibra deve ser composta por vidro resistente ao meio

alcalino da matriz cimentícia e específica que a composição deve conter teor mínimo de 16% de dióxido de zircônio (ZrO_2) (ABNT, 2021). Diferentemente das ligações Si-O, as ligações Zr-O são apenas levemente atacadas pelos íons OH^- , reduzindo consideravelmente a degradação do material devido a uma maior estabilidade da rede vítrea e/ou da formação de uma camada superficial protetora rica em ZrO_2 .

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A durabilidade do concreto reforçado com fibras (CRF) depende diretamente da resistência das fibras ao meio alcalino das matrizes cimentícias. As fibras metálicas apresentam boa estabilidade, mas podem sofrer corrosão em ambientes extremamente agressivos, exigindo revestimentos protetores. As fibras poliméricas, especialmente

as de PET, são altamente suscetíveis à degradação alcalina, enquanto as de polipropileno demonstram maior resistência. Já as fibras de vidro convencionais deterioram-se rapidamente, sendo essencial o uso de composições com alto teor de zircônio para garantir estabilidade química. Diante dessas variáveis, normas como NBR 15530, NBR 16941, NBR 16942 e NBR 16938 são fundamentais para a garantia de desempenho e qualidade das fibras utilizadas. Métodos avançados, como análise FTIR e DSC, podem complementar a qualificação prévia das fibras via avaliação de suas composições. A correta seleção das fibras e o cumprimento das normas são essenciais para garantir a longevidade e desempenho do CRF em aplicações estruturais e não estruturais, independentemente de questões mercadológicas. ☹

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALLIED MARKET RESEARCH. (2023). Global Concrete Fiber Market - Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2022-2031. Portland, United States.
- [2] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. (2018). ACI PRC-544.4-18: Guide to Design with Fiber-Reinforced Concrete. Farmington Hills.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2019). NBR 11768-2: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland. Parte 2: Ensaios de caracterização. Rio de Janeiro.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2019). NBR 15530: Fibras de aço para concreto — Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2021). NBR 16938: Concreto reforçado com fibras — Controle da qualidade. Rio de Janeiro.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2021). NBR 16941: Fibras de vidro álcali-resistentes (AR) para concreto e argamassa — Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2021). NBR 16942: Fibras poliméricas para concreto — Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro.
- [8] BENTUR, A., & MINDESS, S. (2006). Fibre reinforced cementitious composites. Crc Press.
- [9] BERNARD, E. S. (2002). Correlations in the behaviour of fibre reinforced shotcrete beam and panel specimens. *Materials and Structures*, 35, pp. 156-164.
- [10] BERROCAL, C., LUNDGREN, K., & LÖFGREN, I. (2016). Corrosion of steel bars embedded in fibre reinforced concrete under chloride attack: State of the art. *Cement and Concrete Research*, 80, pp. 69-85. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.10.006>.
- [11] CARMONA, S., & MOLINS, C. (2019). Use of BCN test for controlling tension capacity of fiber reinforced shotcrete in mining works. *Construction and Building Materials*, 198, pp. 399-410.
- [12] INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDIZATION. (2006). ISO 7989-1: Steel wire and wire products - Non-ferrous metallic coatings on steel wire - Part 1: General Principles.
- [13] JOHNSTON, C. D. (2010). Fiber-Reinforced Cements and Concretes (Vol. 3: Advances in Concrete Technology). London: Taylor & Francis Group.
- [14] KURDOWSKI, W. (2014). Cement and Concrete Chemistry. In: Chapter 6 - Concrete Properties. Springer Science+Business Media B.V. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7945-7_6
- [15] MARCOS-MESONA, V., MICHELA, A., SOLGAARD, A., FISCHER, G., EDVARDSEN, C., & SKOVHUS, T. (2018). Corrosion resistance of steel fibre reinforced concrete - A literature review. *Cement and Concrete Research*, 103, pp. 1-20. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.05.016>.
- [16] SALVADOR, R., & FIGUEIREDO, A. (2013). Evaluation of the durability of synthetic macrofibers in cement matrices. Conference: 7th International Conference Fibre Concrete 2013, (pp. 1-10). Prague, Czech Republic.

Desempenho e perspectivas das empresas brasileiras de pré-fabricados

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

Pesquisa realizada pela FGV IBRE para a ABCIC revelou que as expectativas das empresas nacionais de pré-fabricados para 2025 são otimistas. Cerca de 34% delas espera crescer seu volume de produção de 2% a 10% em 2025 em relação ao crescimento de 2024. Já, para 17%, seu volume de produção deve crescer mais de 10% (Fig. 1).

A pesquisa foi realizada com 52 empresas associadas a ABCIC, entre 21 de outubro e 17 de dezembro de 2024, por meio do envio de um questionário estruturado com perguntas qualitativas e quantitativas. Houve quase 79% de participação das empresas consultadas.

Das 41 empresas respondentes, quase 49% vão investir na produção neste ano, sendo esta decisão certa para 90% delas (Fig. 2)

Essas projeções das indústrias foram balizadas pela economista Ana Maria Castelo em sua palestra no evento Abcic Networking, ocorrido no último dia 13 de fevereiro, com cenários prováveis para o PIB nacional. Segundo ela, o PIB da construção deve crescer 3% em 2025 sobre uma projeção de aumento de 4,4% em 2024 (Tab. 1).

Para a economista, como os investimentos na construção estão em sua maior parte já contratados, a expectativa

dominante das empresas não deve se alterar, apesar do cenário mais adverso neste ano de projeção de aumento da taxa Selic.

ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE PRÉ-FABRICADOS EM 2024

A pesquisa ouviu as empresas quanto suas estimativas de produção em 2024. Quase 49% disseram que sua produção aumentou mais de 10%, enquanto que, para 24%, ela subiu entre 2% e 10% (Fig. 3).

Esse crescimento do setor ocorreu sobre um desempenho negativo em 2023. Neste ano, o volume total de produção

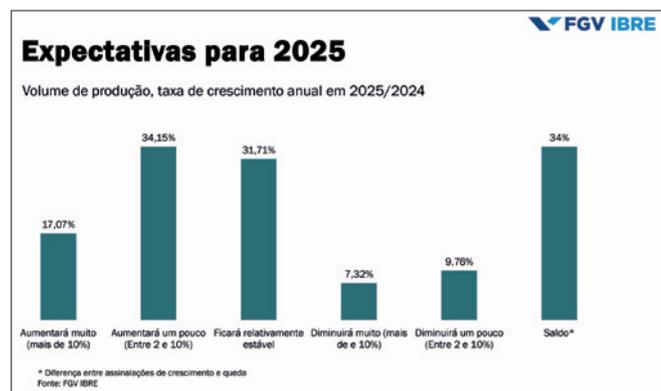


Figura 1 - Expectativas das empresas quanto ao seu volume de produção para 2025

Taxa de crescimento anual	2024*	CENÁRIOS 2025		
		Pessimista	Base	Otimista
PIB	3,3%	1,5%	2,0%	2,5%
PIB construção	4,4%	2,2%	3,0%	3,7%
Varejo de materiais	5,0%	1,5%	2,5%	3,0%
Ind. de materiais	5,5%	2,0%	2,8%	3,5%

* Estimativas
Fonte: FGV

Tabela 1 - Cenários para a taxa de crescimento do PIB brasileiro em 2025

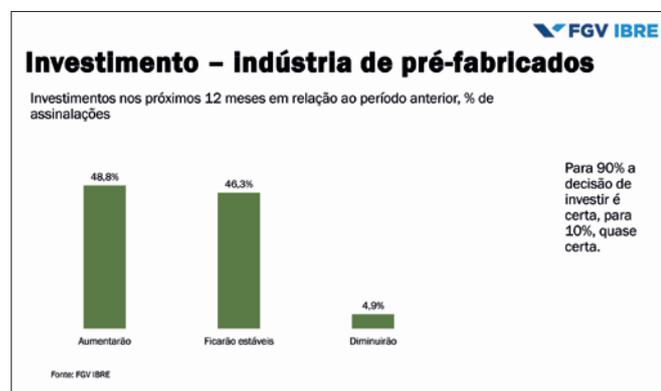


Figura 2 - Expectativas das empresas quanto aos investimentos em 2025

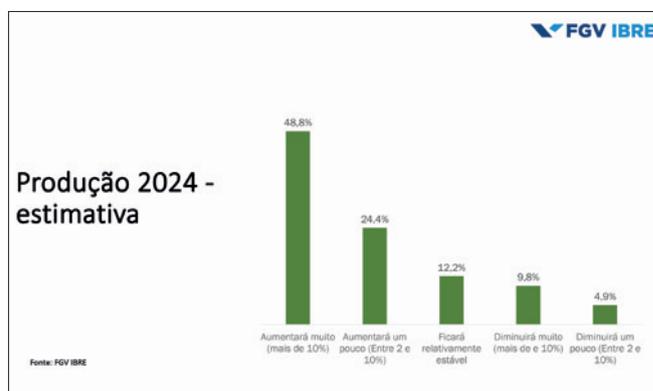


Figura 3 - Estimativas da produção das empresas de pré-fabricados em 2024

Indústria de pré-fabricados de concreto - desempenho 2023

	Total	Média	Var. 2023/2022
Empregados	7.750	189	0,2%
Volume de produção de pré-fabricados (em m³)	666.912,00	18.266	-16,8%
Vendas de pré-fabricados (em m³)	803.647,00	20.091	-3,1%
Cimento consumido no processo produtivo (t)	273.919,83	6.681	-14,3%
Aço consumido no processo produtivo (t)	99.293,56	2.422	25,1%

- A redução no volume de produção pode estar associada à tecnologia. O UHPC tem como objetivo utilizar menos volume de concreto, porém de elevada resistência e desempenho, contribuindo desta forma para a neutralidade de carbono, uma vez que ao reduzir o volume tem impacto significativo em logística e montagem.

Fonte: FGV IBRE

Tabela 2 - Desempenho da indústria de pré-fabricados em 2023

de pré-fabricados em metros cúbicos foi de quase 667 mil, decréscimo de cerca de 17% sobre a produção de 2022. As vendas perfizeram quase 804 mil, o que representou uma queda de 3,1% em relação a 2022 (Tab. 2).

Em 2023, o PIB da construção foi quase estável, com queda de 0,3%. Já, em 2022, o PIB do setor aumentou 6,8%.

PERFIL DAS EMPRESAS

A pesquisa levantou também o perfil das empresas nacionais de pré-fabricados. Quase 60% delas têm entre 101 e

500 empregados. Pouco mais da metade produz até 10 mil metros cúbicos de pré-fabricados anualmente, sendo que estas foram responsáveis por 16% do total da produção em 2023.

Metade da produção de pré-fabricados em 2023 vieram de 17% das empresas do setor, que produzem mais de 30 mil metros cúbicos anualmente.

A maioria das empresas produz pré-fabricados na indústria, ao invés de no canteiro de obras.

O tipo de concreto usado nessa produção divide-se quase igualmente

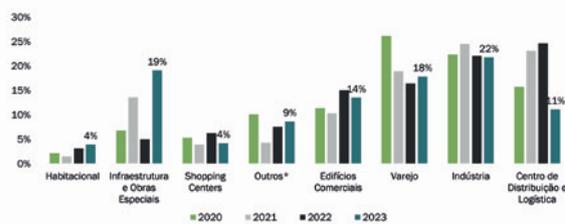
entre o armado e o protendido, sendo que 76% usa o concreto autoadensável. A implantação do concreto de ultra-alto desempenho ainda é tímida, cerca de quase 10%, mas mais da metade das empresas encontra-se em fase de estudos de implantação desta tecnologia.

Quase 90% da produção de pré-fabricados concentra-se nas regiões Sul e Sudeste.

Os setores que se destacam na implantação de pré-fabricados no país continuam sendo a indústria, o varejo e a infraestrutura (Fig. 4).

Vendas

Destino das vendas, em %



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

Figura 4 - Percentagem do destino das vendas da indústria de pré-fabricados por segmentos de 2020 a 2023

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

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



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

Patrocínio



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

Aplicação do método da maturidade em elementos estruturais pré-fabricados

ROBERTO CHRIST - PROF. - <https://orcid.org/0000-0003-1367-8972> (rchrist@unisinos.br) ;

ROBERTO L. CURRA - ENG. - <https://orcid.org/0000-0002-1308-2557> – Curra Engenharia

FERNANDA PACHECO - PROF. - <https://orcid.org/0000-0003-3455-491X> ;

HINOEL Z. EHRENBING - PROF. - <https://orcid.org/0000-0002-0339-9825> ;

BERNARDO F. TUTIKIAN - PROF. - <https://orcid.org/0000-0003-1319-0547> – UNISINOS

RESUMO

A INDÚSTRIA DO PRÉ-FABRICADO É UM IMPORTANTE SEGMENTO DA CONSTRUÇÃO CIVIL E VEM SE TORNANDO CADA VEZ MAIS RELEVANTE NO CENÁRIO DA CONSTRUÇÃO, UMA VEZ QUE HÁ ESCASSEZ DE MÃO DE OBRA. A APLICAÇÃO DO MÉTODO DA MATURIDADE PODE REDUZIR CUSTOS E AUMENTAR A VELOCIDADE DE PRODUÇÃO, PRINCIPALMENTE NA PRÉ-FABRICAÇÃO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS. O PRESENTE ARTIGO TEM COMO OBJETIVO EVIDENCIAR OS GANHOS DE PRODUTIVIDADE AO APLICAR O MÉTODO DA MATURIDADE EM UMA EMPRESA DE PRÉ-FABRICADO. PARA TAL, MONITOROU-SE A TEMPERATURA EM DOIS LOCAIS EM UM CONCRETO, AVALIANDO-SE O BENEFÍCIO DE TEMPERATURAS ELEVADAS NO PROCESSO DE CURA E ESTIMANDO A IDADE EQUIVALENTE DE RESISTÊNCIA DO CONCRETO. OS RESULTADOS OBTIDOS INDICAM QUE EM 24H A RESISTÊNCIA DO CONCRETO DA PEÇA JÁ ERA EQUIVALENTE À 93,6H (EM CURA ISOTÉRMICA). A RESISTÊNCIA DE SAQUE DA PEÇA FOI ATINGIDA EM 11 HORAS.

PALAVRAS-CHAVE: CONTROLE TECNOLÓGICO DO CONCRETO; MATURIDADE; RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO; PRÉ-FABRICADO.

1. INTRODUÇÃO

A construção civil é um dos segmentos que mais emprega pessoas. Segundo a CBIC (Câmara Brasileira da Indústria da Construção), a construção civil, nos primeiros três meses de 2024, gerou 109.911 novos empregos com carteira assinada, o que representou uma alta de 16,85% em relação aos mesmos meses no ano de 2023. Mesmo com este crescimento de emprego, a falta de mão de obra na construção civil é elevada e tende a ser maior nos próximos anos. A pré-fabricação é uma maneira

de aumentar a produtividade e diminuir o desperdício da construção civil (COSTA; DALTRO, 2017), assim como reduzir os danos causados pela escassez de mão de obra (PERES, 2006). O aumento do uso do pré-fabricado na construção civil também auxilia na redução do consumo de recursos naturais, uma vez que o processo de produção é mais controlado e não há a necessidade de retrabalho (PELED, 2007; REINHARDT; KRÜGER; GROSSE, 2003).

O uso do método da maturidade para a determinação da resistência à compressão do concreto em tempo real, sem a necessidade de realizar ensaios em corpos de prova, já se mostrou eficiente em diversos estudos (CURRA *et al.*, 2021; HERBELÉ *et al.*, 2013; HU *et al.*, 2024; PERES, 2006). O método considera o efeito da temperatura na cura e no desenvolvimento de resistência, que pode ainda ser influenciada por aspectos como tipo de cimento, relação água/cimento, distribuição granulométrica dos agregados, cura, moldagem dos corpos de prova entre outros (CURRA *et al.*, 2021). Isto posto, o método precisa ser analisado na sua condição de aplicação.

A ASTM C 1074 (2019) estabelece o procedimento para se estimar a resistência à compressão do concreto por meio do método da maturidade. O uso deste método é uma maneira eficaz, que permite maior agilidade nas etapas subsequentes da construção civil, como remoção das fôrmas, aplicação de cargas de pretensão, saque das peças entre outras. A Norma também apresenta algumas limitações no uso deste método, são eles: (a) O concreto deve ser mantido em condições que permitam sua hidratação; (b) O método não contempla os efeitos da temperatura inicial na resistência final; (c) Este método deve ser complementado por outras análises do concreto; (d) Altas temperaturas em idades iniciais resultarão em uma previsão incorreta da resistência em idades finais; (e) O uso de registros de dados errôneos de temperatura ou energia de ativação, ou seja, inconsistentes com o concreto avaliado, pode levar a uma previsão incorreta da resistência à compressão. (CURRA *et al.*, 2021; PERES, 2006).

Este artigo apresenta um estudo de caso em que foi aplicado o método da maturidade em uma empresa de pré-fabricado para obter com maior precisão e segurança a resistência à compressão do concreto, visando otimizar os processos de produção, tais como desforma e movimentação de peças.

2. MATERIAIS E MÉTODO

Com a finalidade de determinar o tempo em horas em que a resistência à compressão do concreto atingiria a resistência de saque de 15 MPa, o método da maturidade

TABELA 1

PROPORÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DO CONCRETO

Material	kg/m ³
Cimento CPV-ARI RS	475
Areia média	550
Areia fina	350
Brita (9,5 mm)	1106
Aditivo superplastificante	2,5
Água	195



CENTRO DA SEÇÃO TRANSVERSAL



SUPERFÍCIE SUPERIOR

FIGURA 1

ELEMENTOS COM OS SENSORES INSTALADOS PARA OBTENÇÃO DA TEMPERATURA AO LONGO DO TEMPO

foi aplicado em uma empresa de pré-fabricado. O concreto produzido pela empresa é de classe de resistência C50, com classe de abatimento S160, com resistência de saque de 15 MPa. O traço está apresentado na Tabela 1. O cimento utilizado é do tipo CPV-ARI, areia natural de rio, brita basáltica e aditivo à base de poliacarboxilatos.

Dois pilares com seção de 30 x 50cm e 50x80cm foram concretados e instalados os sensores (termistor NTC pré-calibrado de fábrica para desvio “zero”) para obter a temperatura ao longo do tempo. A instalação foi feita com mangueiras plásticas, de forma a proteger os termistores de quaisquer danos mecânicos e facilitar sua retirada. Os sensores foram instalados nos elementos em duas profundidades: a 5 cm da face superior de concretagem e no centro da seção transversal.

A concretagem foi executada em setembro de 2022. A temperatura ambiente, durante a concretagem, variou de 24°C e 28°C e a umidade relativa do ar entre 60% e 70%. A Figura 1 mostra os sensores instalados nos elementos. Também foram moldados corpos de prova para realizar a curva de calibração da maturidade (desenvolvimento da resistência em condi-

ção isotérmica). A medição da temperatura ao longo do tempo foi realizada por meio do sistema de monitoramento NEX[®] Monitoring System da CON-CURE[®], usando termistores reutilizáveis como sensores. Os dados coletados foram processados

pelo software NEX[®] e utilizou a equação de Arrhenius para o cálculo da maturidade. A configuração adotada considerou uma medição de temperatura a cada vinte minutos. A energia de ativação foi determinada pelo software NEX[®] da Con-Cure[®] e pela composição do concreto utilizado.

Foram moldados 12 corpos de prova para ensaios de resistência à compressão as 5, 9, 18 e 24 horas e 3 e 7 dias, em duplicata. Esses exemplares foram armazenados em sala climatizada sob condições controladas de temperatura e umidade de 23 ± 2°C e 65 ± 5%. Com o registro das resistências e das temperaturas do concreto, é possível conhecer e avaliar o comportamento da cura do concreto, do traço estudado, e a real resistência característica à compressão do concreto e a idade equivalente aos corpos de prova. As idades equivalentes encontradas significam o efeito da temperatura, e qual seria o intervalo necessário em condição isotérmica para o alcance da resistência estimada.

A maturidade do concreto é calculada com base na Lei de Maturidade de Arrhenius, que relaciona a taxa de hidratação do cimento à temperatura. Portanto, para fazer esse cálculo, é necessário medir a temperatura do concreto ao longo do tempo durante o processo de cura. O que é feito com o uso sensores de temperatura embutidos no concreto. Com os dados de temperatura

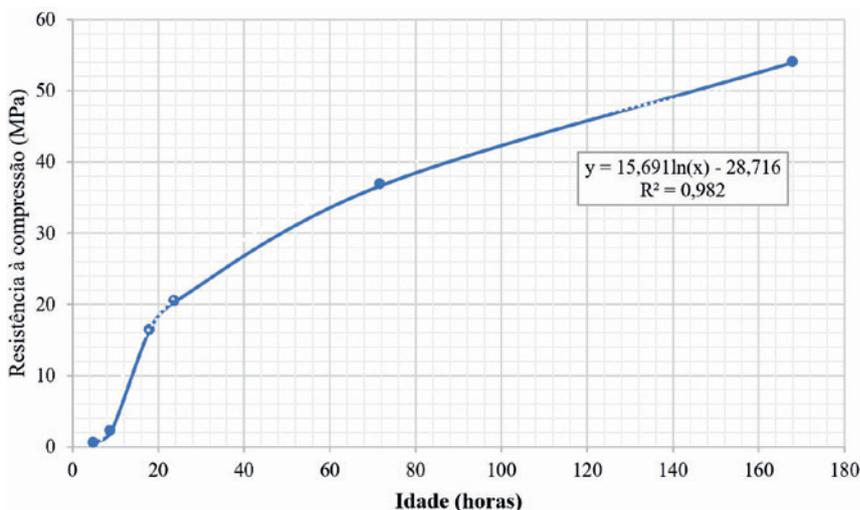


FIGURA 2

EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO EM TEMPERATURA ISOTÉRMICA

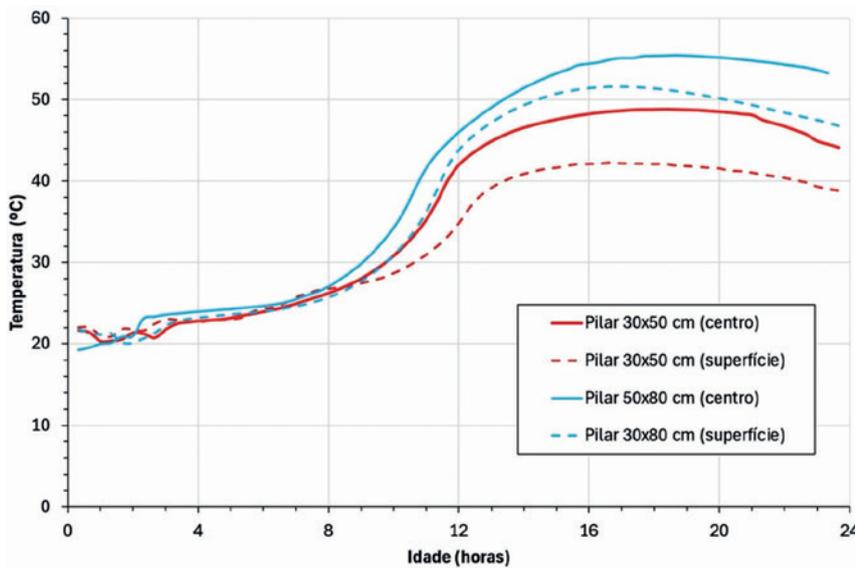


FIGURA 3
EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA AO LONGO DO TEMPO DOS ELEMENTOS (CENTRO E SUPERFÍCIE)

coletados, utiliza-se a seguinte fórmula para calcular a maturidade do concreto:

$$[1] \quad M = \sum (t_i - t_{i-1}) \times F$$

Onde:

- M: é a maturidade acumulada do concreto.
- Σ : representa a soma dos valores para cada intervalo de tempo.
- t_i : é a temperatura do concreto registrada no intervalo de tempo i .
- t_{i-1} : é a temperatura do concreto registrada no intervalo de tempo anterior ($i-1$).
- $F(T_i)$: é o fator de maturidade, que representa a taxa de hidratação do cimento a uma determinada temperatura.

3. RESULTADOS

3.1 Curva de ganho de resistência à compressão do concreto

Na Figura 2 é apresentada a curva de ganho de resistência à compressão do concreto utilizado pela empresa de pré-fabricados, juntamente com a equação da curva de ganho, onde a equação com função logarítmica foi escolhida, pois apresentou um maior coeficiente de determinação. Os resultados, por idade, representam a resistência média/potencial dos corpos de prova moldados e armazenados em condições de cura isotérmica.

É possível notar que a resistência à compressão do concreto apresenta tendência de crescimento padrão para o tipo de cimento empregado. Aos 7 dias, as resistências já superaram 50 MPa.

3.2 Monitoramento da temperatura do concreto

As curvas de desenvolvimento das temperaturas de cada elemento concreta são apresentadas na Figura 3.

É possível notar que há uma diferença significativa da temperatura no centro do elemento se comparado à temperatura mais próxima da face. Esta maior temperatura é devido à baixa condutividade térmica do concreto, onde o calor gerado pela hidratação do concreto não é dissipado

rapidamente como na superfície (TEKLE *et al.*, 2024). Com base no monitoramento da resistência nas duas geometrias do pilar e condição de instalação do sensor, são calculadas as idades equivalentes. Conforme citado, estas representam em um determinado momento, a idade equivalente do concreto curado em condição isotérmica, indicando assim a resistência que o elemento apresenta nesse momento. Como as condições climáticas foram de temperaturas médias a elevadas, houve um benefício no ganho de resistência e, conseqüentemente, na idade equivalente mensurada nos pilares. A Figura 4 exemplifica essa estimativa, considerando-se um pilar com geometria de 50 x 80cm, posição meio, em 24h.

Na Tabela 2 e Figura 5 são apresentados os resultados do estudo indicando a idade equivalente com base na idade real.

Como é possível perceber, o valor de idade equivalente estimada foi superior para as três condições (valor meio, ponta e médio) para os pilares com geometria de 30 x 50 como para 50 x 80cm. O uso do método da maturidade em elementos pré-fabricados com maiores dimensões pode otimizar o tempo de cura e aumentar a produtividade em empresas de pré-fabricado. A baixa difusividade do concreto faz com que peças de grandes volumes tenham um ganho de resistência diferencial ao longo da sua seção transversal, fazendo com que a peça possa ser sacada muito antes do

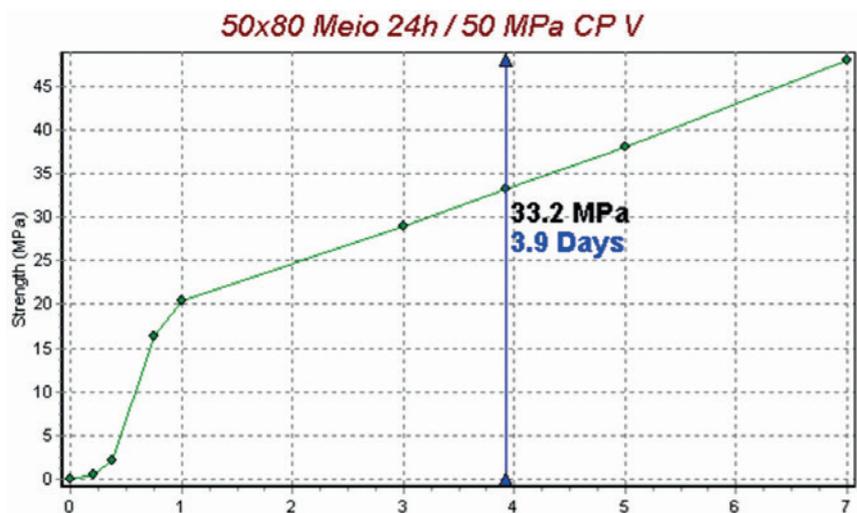


FIGURA 4
IDADE EQUIVALENTE OBTIDA NO PILAR DE 50 CM X 80 CM, POSIÇÃO MEIO, 24H DE CURA

TABELA 2

DADOS DE IDADE EQUIVALENTE

Pilar	Posição	Idade (h)		Resistência equivalente (MPa)
		Real	Equivalente	
50 cm x 80 cm	Centro	24	93,6	33,2
	Superfície	24	81,6	30,7
	Centro	18	69,6	28,4
	Superfície	18	60,0	27,0
	Centro	9	12,0	6,70
	Superfície	9	12,0	5,00
	Centro	5	4,80	0,80
	Superfície	5	4,80	0,60
30 cm x 80 cm	Centro	24	55,2	26,1
	Superfície	24	50,4	24,9
	Centro	18	45,6	24,3
	Superfície	18	40,8	23,4
	Centro	9	9,60	4,30
	Superfície	9	9,60	3,50
	Centro	5	4,8	0,60
	Superfície	5	4,8	0,60

tempo. De fato, o maior volume do elemento pode ter conduzido a um maior calor de hidratação percebido no interior do elemento. O sensor posicionado no meio do elemento resultou em uma maior resistência estimada em ambos os pilares.

4. CONCLUSÕES

Percebeu-se, após a estimativa dos valores de resistência à compressão, que houve um ganho em relação à condição isotérmica, chegando o pilar de 50 x 80cm, em 24h, a apresentar uma idade equivalente de 93,6h. Com isso, estima-se que nesse período de cura, a resistência do concreto já era superior a 33 MPa. Para além disso, notou-se que o setor localizado no centro dos elementos apresentou valores superiores ao de ponta,

considerando os períodos de 18h e 24h para os dois pilares. Foi possível concluir ao longo desse estudo que houve um benefício decorrente da exposição em temperaturas de medianas à elevadas, beneficiando esse ganho de resistência. Também é importante destacar que em elementos de grandes dimensões, a seção transversal apresenta diferentes resistências, assim a resistência do corpo de prova moldado e acomodado em condições padrão de cura vai apresentar resistências menores do que efetivamente terá na peça moldada.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Curra Engenharia e do itt Performance UNISINOS. ©

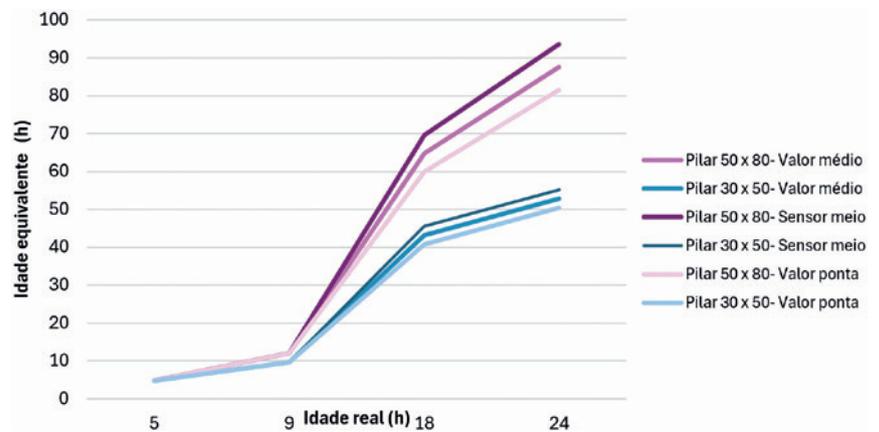


FIGURA 5

VALORES DE IDADE EQUIVALENTE PARA OS DIFERENTES PILARES E CONDIÇÕES

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASTM, A. S. FOR T. AND M. C1074-19 - Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method. West Conshohocken, PA ASTM International, 1 jun. 2019. Disponível em: <<http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?C1074-19>>
- [2] COSTA, J. E. M.; DALTRO, A. T. SISTEMAS CONSTRUTIVOS INDUSTRIALIZADOS UTILIZADOS NO BRASIL : UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA. (U. F. do M. Grosso, Ed.) Mato Grosso: 2017.
- [3] Curra, Roberto Luiz; Pacheco, Fernanda; Ehrenbring, Hinoel Zamis; Christ, Roberto; Patzlaff, Jeferson Ost; Trevisan, Rafael; Tutikian, Bernardo Fonseca. Application of the maturity method to reinforced concrete roof slabs. Revista Materia, v. 26, n. 4, 2021.
- [4] Herbelé, Lucas; Pacheco, Fernanda; Caldas, Daniel; Tutikian, Bernardo Fonseca. Estudo da maturidade em obra de médio porte de construção convencional: estudo de caso. Gramado: , 2013. (Nota técnica).
- [5] Hu, Guobiao; Yang, Yaowen; Mohanty, Lipi; Chae, SoungHo; Ishizeki, Kohsuke; Tang, Lihua. An electromechanical impedance measurement-based solution for monitoring fresh concrete maturity. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, v. 35, n. 10, p. 907-919, 8 jun. 2024.
- [6] PELED, A. Pre-tensioning of fabrics in cement-based composites. Cement and Concrete Research, v. 37, n. 5, p. 805-813, maio 2007.
- [7] PERES, L. D. P. AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PEÇAS PRÉ-MOLDADAS SUBMETIDAS À CURA TÉRMICA PELO MÉTODO DA MATURIDADE: ESTUDO DE CASO. Dissertação de Mestrado—São Paulo: UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA, 2006.
- [8] REINHARDT, H. W.; KRÜGER, M.; GROSSE, C. U. Concrete prestressed with textile fabric. Journal of Advanced Concrete Technology, v. 1, n. 3, p. 231-239, 2003.
- [9] Tekle, Biruk Hailu; Al-Deen, Safat; Anwar-U-Saadat, Mohammad; Willans, Njoud; Zhang, Y. X.; Lee, Chi King; Ribakov, Yuri. Maturity method to estimate early age concrete strength in cold weather: alternative activation energy calibration. Australian Journal of Civil Engineering, v. 22, n. 1, p. 1-12, 2024.

On the experimental determination of concrete compressive and tensile strengths

CLAUDIA A. MOREL - ASSIST. PROF. - <https://orcid.org/0009-0003-6889-4063> (cmorel@ing.unne.edu.ar) – **Universidad Nacional del Nordeste, Argentina**
IGNACIO ITURRIOZ - PROF. - <https://orcid.org/0000-0002-4918-9698> ;
JORGE RIERA - PROF. EMÉRITO - <https://orcid.org/0000-0002-4902-237X> – **UFGRS**

RESUMO

FOR DESIGN PURPOSES, CONCRETE IS OFTEN MODELLED AS A LINEARLY ELASTIC, ISOTROPIC AND HOMOGENEOUS MATERIAL. DIN CODES INITIALLY USED CUBIC SAMPLES TO ASSESS UNIAXIAL COMPRESSIVE STRENGTH, BUT FRICTION EFFECTS ALONG THE LOADING PLATES LED TO THEIR REPLACEMENT BY CYLINDERS. EVIDENCE THAT STRENGTH VARIES WITH THE CASTING DIRECTION RAISED DOUBT ABOUT THE IMPLICIT ISOTROPY ASSUMPTION. MEASURING THE COMPRESSIVE STRENGTH IN VERTICAL AND HORIZONTAL DIRECTIONS REQUIRES, HOWEVER, PROPERLY SUPPORTED CUBIC SAMPLES. TO ADDRESS THE FRICTION PROBLEM, GREASE PERFORMED BETTER THAN OTHER ALTERNATIVES AND WAS CHOSEN FOR DISCRETE ELEMENT METHOD (DEM) SIMULATIONS OF EXPERIMENTAL RESULTS. GREASED CUBIC SPECIMENS LED TO NEARLY THE SAME COMPRESSIVE STRENGTH MEASUREMENTS AS FOUND FOR CYLINDERS OR PRISMS, AND DETERMINED ANISOTROPY DUE TO THE CASTING DIRECTION. DEM SIMULATIONS ALSO SUGGEST THAT CUBIC SAMPLES CAN REPLACE CONVENTIONAL SPLITTING TENSILE STRENGTH TESTS, PROVIDING TENSILE STRENGTH DATA IN BOTH DIRECTIONS.

PALAVRAS-CHAVE: COMPRESSIVE STRENGTH; TESTING, APPARATUS & METHODS; DISCRETE-ELEMENT MODELLING; CONSTITUTIVE RELATIONS.

1. INTRODUCTION

For engineering design, under low-stress conditions, concrete is generally modelled as a linearly elastic, isotropic and homogeneous material. However, compressive and tensile strengths are assessed through tests on samples subjected to a non-uniform stress field. Conventional tests apply loads using rigid steel



FIGURA 1
SPECIMEN GEOMETRIES: (A) PRISM, (B) CUBE

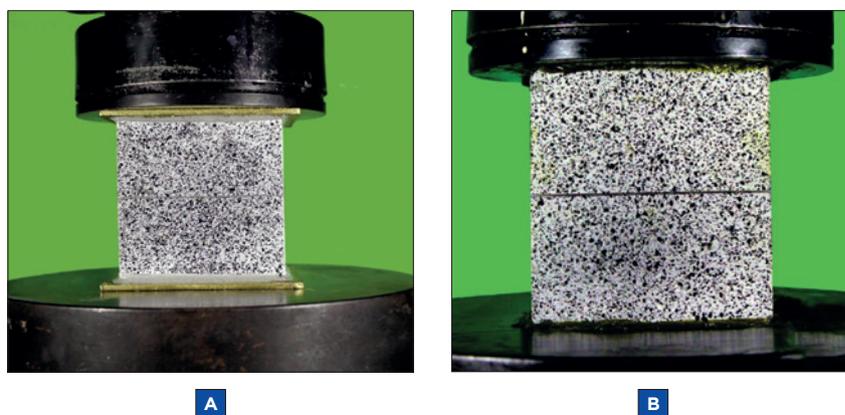


FIGURA 2
BOUNDARY CONDITIONS: (A) GLUED SHEETS, (B) GREASE

plates, which induce shear stresses that restrict lateral deformations and generate a triaxial stress state near the contact surfaces. This effect has not been fully

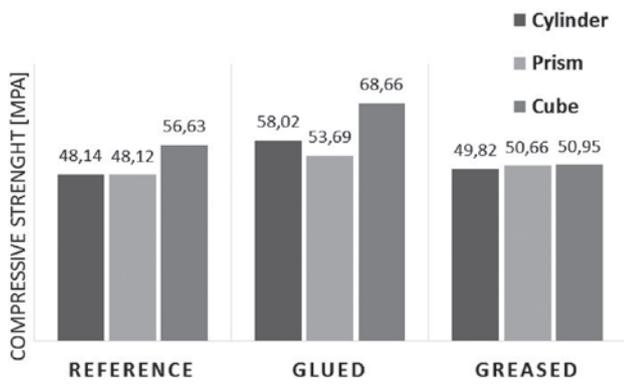


FIGURA 3
COMPRESSIVE STRENGTH OF C50 CONCRETE ACCORDING TO GEOMETRY AND BOUNDARY CONDITIONS

quantified, but Kotsovos(1983) and Wang et al(2024) used FEM models to analyze how friction between the plates and the sample affects the result. Experimental studies show that the compressive strength in vertically oriented cylindrical samples can be as much as 10% higher than in horizontally oriented samples.

Friction at the contact surfaces must be minimized when using cubic samples to measure strength in both orienta-

tions. Grease layers have proven more effective than other solutions in reducing friction.

Bandeira *et al.* (2022) conducted tests under various boundary conditions on the loading plates, finding that grease performed best as an anti-friction solution. We select it, therefore, for numerical simulations using the discrete element method (DEM). Riera *et al.* (2014) used DEM simulations to evaluate methods for determining the tensile strength of concrete, highlighting limitations due to material anisotropy. Previously, Rocco *et al.* (2001) had proposed using cubic samples to evaluate tensile strength in both directions, assessing concrete anisotropy, a scheme further examined in this paper.

Wang *et al.* (2024) conducted similar simulations using FEM, reaching similar conclusions.

2. TEST DESCRIPTION

2.1 Experimental Assessments of Compressive Strength

The samples consisted of cylinders (20 cm height, 10 cm diameter), prisms (20 cm height, 10 cm square section), and cubes (10 cm edges). Concrete mixes with nominal strengths of 50 MPa (C50) and 30 MPa (C30) were used, previously studied by Kostas *et al.* (2018); Bandeira *et al.* (2022); Vidal *et al.* (2020); Kostas *et al.* (2019). A total of 104 specimens were cast, as shown in Figure 1. Bandeira *et al.* (2022) analyzed five boundary conditions, from which two were simulated: (a) the specimen ends in direct contact with steel plates, and (b) 3 mm metal sheets adhered to the faces, greased to reduce friction (Figure 2).

Four compression tests were performed for each geometry and boundary condition of the concrete mix. Figure 3 shows the average compressive strengths for the C50 concrete. Stress-strain curves for each case (Figure 4) reflect typical behaviour. Prisms and cylinders exhibited similar stress-strain behaviour in the reference and greased conditions. After peak load, specimens with greased interfaces rapidly lost compressive capacity. Table 1 shows, for reference, the C50 concrete composition as used by Bandeira *et al.* (2022).

Kumar *et al.* (2016) and Kotsovos (1983) noted that such behaviour aligns with brittle material responses. The observed toughness in tests with glued plates resulted from friction between the specimen and the machine, not from the material's intrinsic properties.

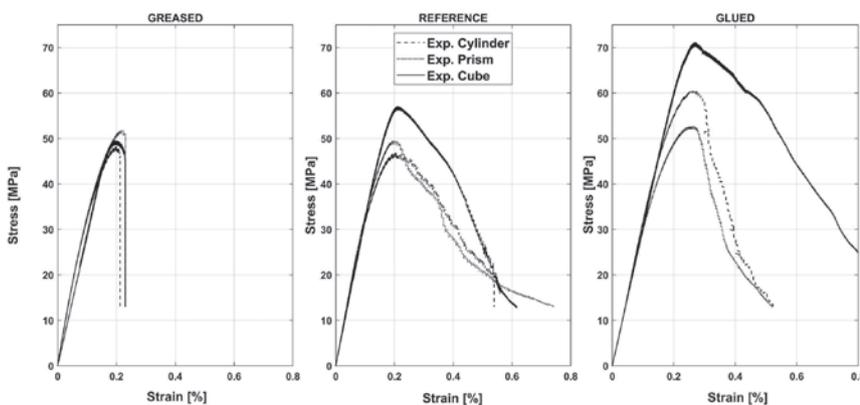


FIGURA 4
PLOTS OF EXPERIMENTAL MEAN STRESS-STRAIN CURVES FOR C50 CONCRETE

TABELA 1
THE COMPOSITION OF CONCRETE MIX C50 USED IN BANDEIRA *ET AL.* (2022)

Feature	Cement [kg/m ³]	Sand [kg/m ³]	Aggregate [kg/m ³]	Superplasticizer [kg/m ³]	w/c
C50	445.59	794.44	1029.31	0.33	0.44

2.2 Splitting Tensile Test

The splitting tensile test, commonly referred to as the Brazilian Test, is a widely employed method for determining the tensile strength of concrete. Lobo Carneiro recognized the importance of using consistent sample size and geometry to determine compressive and tensile strength, though implicitly accepted the assumption

of isotropy. Rocco *et al.* (2001) examined the splitting tensile test standards, incorporating fracture mechanics concepts, noting that tensile strength values could vary by as much as 40% within the prescribed standards.

Rocco *et al.* (2001) also examined cylindrical and prismatic specimens, determining that the maximum tensile stress on the load plane depends on the width of the load-bearing strips and can be expressed as:

$$[1a] \quad \sigma_{\max} = \frac{2P}{\pi dh} (1 - \beta^2)^{3/2}$$

for cylindrical specimens

$$[1b] \quad \sigma_{\max} = \frac{2P}{\pi dh} \left[(1 - \beta^2)^{5/3} - 0.0115 \right]$$

for prismatic specimens

Here, *d* and *h* denote the specimen's dimensions, *P* is the applied load, and β is the ratio of the load-bearing strip width to the specimen diameter or side length. These equations hold for $\beta \leq 0.20$. For brittle, linear-elastic materials, failure is assumed to occur when the maximum tensile stress reaches a critical value, corresponding to the material's tensile strength f_{ct} . Thus, the failure criterion is:

$$[2a] \quad f_{ct} = \frac{2P_u}{\pi dh} (1 - \beta^2)^{3/2}$$

for cylindrical specimens

$$[2b] \quad f_{ct} = \frac{2P_u}{\pi dh} \left[(1 - \beta^2)^{5/3} - 0.0115 \right]$$

for prismatic specimens

Where P_u is the maximum load recorded during the test. By definition, f_{ct} corresponds to a cylinder's theoretical splitting tensile strength when $\beta = 0$. It should be noted that small values of β may not meet these assumptions. The splitting tensile strength from the standard test is given by Equation (2) and, incorporating Equation (1), can be rewritten as:

$$[3a] \quad f_{ctsp,c} = f_{ct} (1 - \beta^2)^{-3/2}$$

for cylindrical specimens

$$[3b] \quad f_{ctsp,q} = f_{ct} \left[(1 - \beta^2)^{5/3} - 0.0115 \right]^{-1}$$

for prismatic specimens

Where $f_{ctsp,c}$ and $f_{ctsp,q}$ represent the splitting tensile strengths of cylinders and prisms, respectively. The equations provide the tensile strength in the horizontal direction, which may differ significantly from the

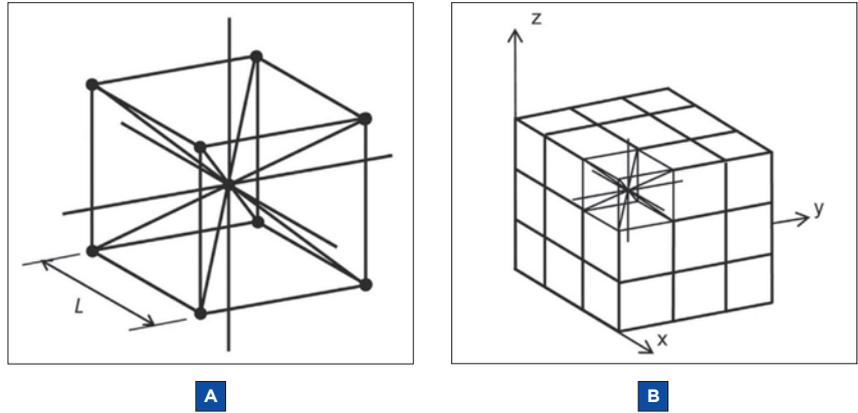


FIGURA 5

DEM MODELS: (A) BASIC CUBIC MODULE, (B) PRISM FORMED FROM MULTIPLE CUBIC MODULES

vertical tensile strength. Therefore, the degree of anisotropy remains undetermined.

3. DISCRETE ELEMENT METHOD

The Discrete Element Method (DEM) represents a continuum using a periodic array of bars with masses concentrated at nodes. As shown in Figure 5, a basic cubic module consists of twenty bars and nine nodes, and each node has three degrees of freedom, enabling the determination of displacements in a global reference system.

Applying Newton's second law, the system of equations is obtained by writing, for each node:

$$[4] \quad M\ddot{\mathbf{x}}(t) + C\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{F}(t) - \mathbf{P}(t) = \mathbf{0}$$

$\ddot{\mathbf{x}}(t)$ and $\dot{\mathbf{x}}(t)$ are the nodal accelera-

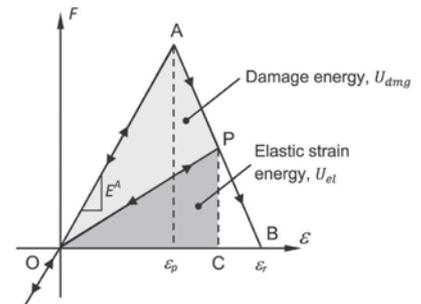


FIGURA 6

BILINEAR CONSTITUTIVE MODEL

tions and velocities, and *M* and *C* are the mass and damping matrices, respectively. As these matrices are diagonal, the equa-

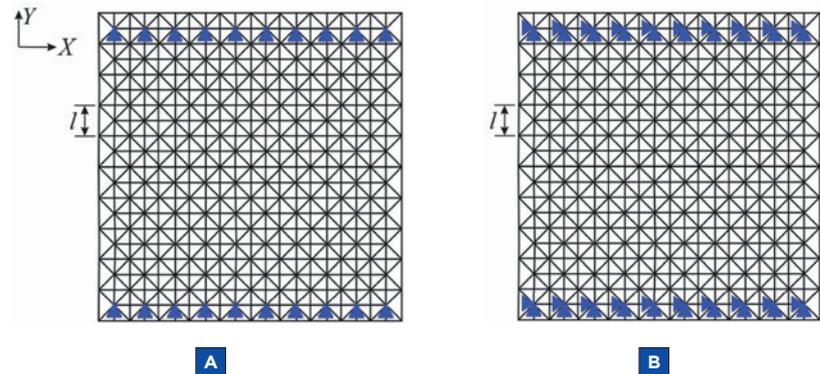


FIGURA 7

RESTRICTIONS ON NODE MOBILITY. (A) CONSTRAINED ON THE Y AXIS ALONE, (B) CONSTRAINED ON BOTH THE X AND Y AXES

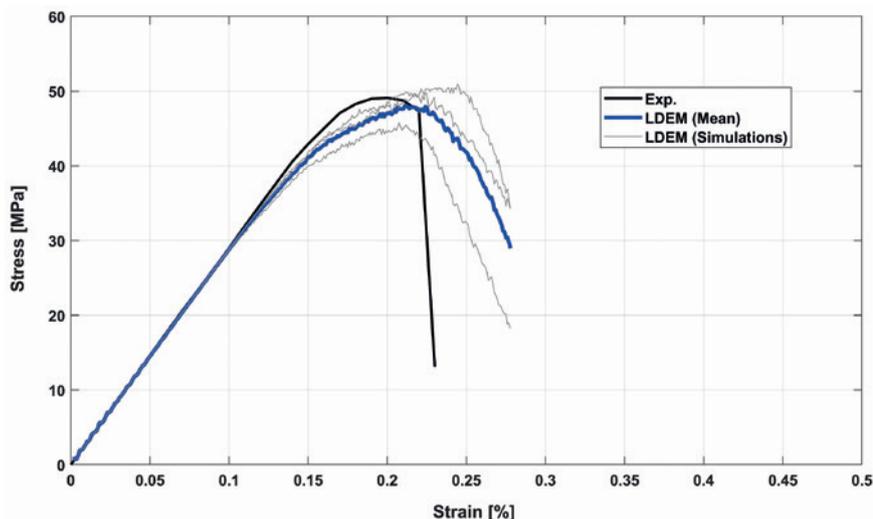


FIGURA 8

MEAN EXPERIMENTAL AND SIMULATED CURVES FOR THE CUBE WITH GREASED BOUNDARIES JOINTLY WITH THREE DEM SIMULATIONS

tions are decoupled, allowing time-domain integration using an explicit finite difference scheme. This approach simplifies handling large displacements as the nodal positions are updated at each time step.

Rocha *et al.* (1991) and Kostas *et al.* (2011) developed nonlinear constitutive models for quasi-brittle materials, as illustrated in Figure 6. The area under the force-strain curve (the area of triangle OAB in Figure 6) represents the energy required to fracture the element. Failure occurs when the dissipated energy equals the fracture energy.

The elements remain linearly elastic in compression, with failure induced indirectly through tensile stresses. The energy dissipated by the fracture of a DEM module is given by:

$$[5] \quad \Gamma_{LDEM} = G_f c_A \left[(4)(0.25) + 1 + 4 \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \delta \right) \right] L_c^2$$

Where G_f = specific fracture energy (N/m); c_A = scale parameter; δ = density of the material (kg/m³) and; L_c = length of longitudinal elements in the cubic DEM arrangement (m).

The critical strain can be obtained from the following relationship:

$$[6] \quad \epsilon_p = \sqrt{\frac{G_f}{d_{eq} E}}$$

Where d_{eq} denotes a material parameter (m).

Furthermore, Carpinteri's brittleness number is adapted to DEM as a measure of ductility based on the characteristic length of the material R .

$$[7] \quad s = \sqrt{\frac{d_{eq}}{R}}$$

In DEM models, constitutive laws are

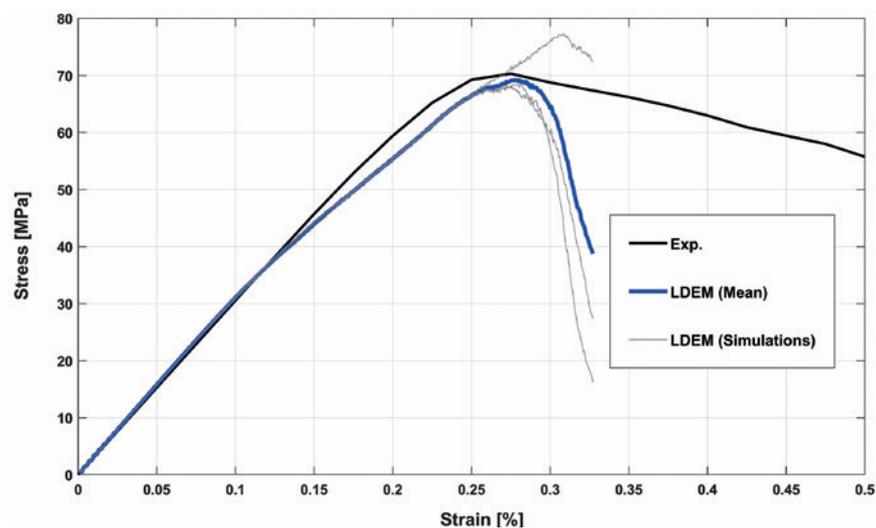


FIGURA 9

MEAN EXPERIMENTAL AND SIMULATED CURVES FOR THE CUBE WITH GLUED PLATES JOINTLY WITH THREE DEM SIMULATIONS

TABELA 2

PARAMETERS ADOPTED IN DEM SIMULATIONS FOR COMPRESSION TESTS

Length of cubic element L_c	0.01m
DEM modules in x, y, z directions (cube)	11, 11, 11
DEM modules in x, y, z directions (prism)	11, 21, 11
Poisson ratio ν	0.25
Specific mass $[\rho]$	2400 kg/m ³
Young's modulus $[E]$	32 GPa
μG_f	150 N/m
CVG _f	100%
$\mu(\epsilon_p)$	0.0004

influenced by both material properties and the discretization level. Mesh perturbations do not significantly alter the stiffness of elements, improving model performance under compressive loads. Additionally, DEM has been effectively applied to study size effects in quasi-brittle materials, a phenomenon previously explored in various studies such as Kostas *et al.* (2011).

4. COMPUTATIONAL MODELS

Cubic samples with 10 cm sides were used in this study. Two boundary conditions, shown in Figure 2, were simulated:

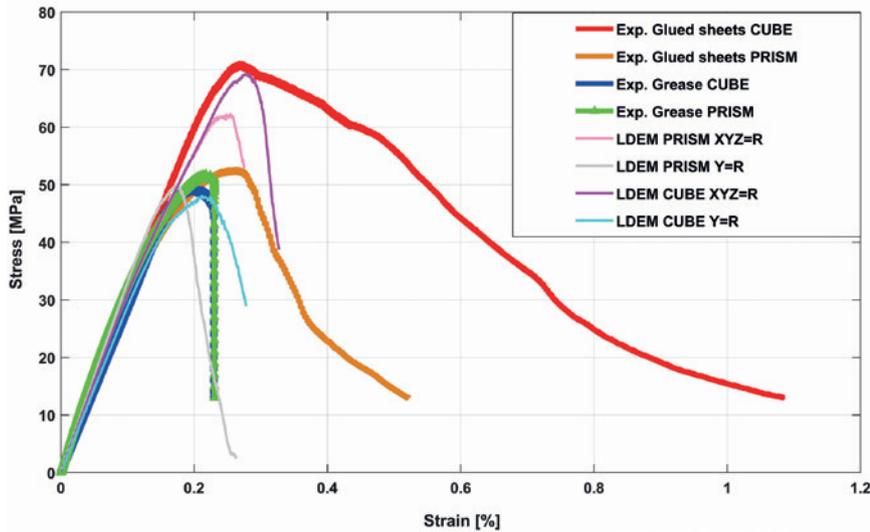


FIGURA 10

EXPERIMENTAL MEAN STRESS VS MEAN STRAIN CURVES FOR PRISMS WITH GREASED AND GLUED PLATES, JOINTLY WITH DEM PREDICTIONS FOR CUBES AND PRISMS WITH AND WITHOUT LATERAL RESTRICTION AT THE BOUNDARIES

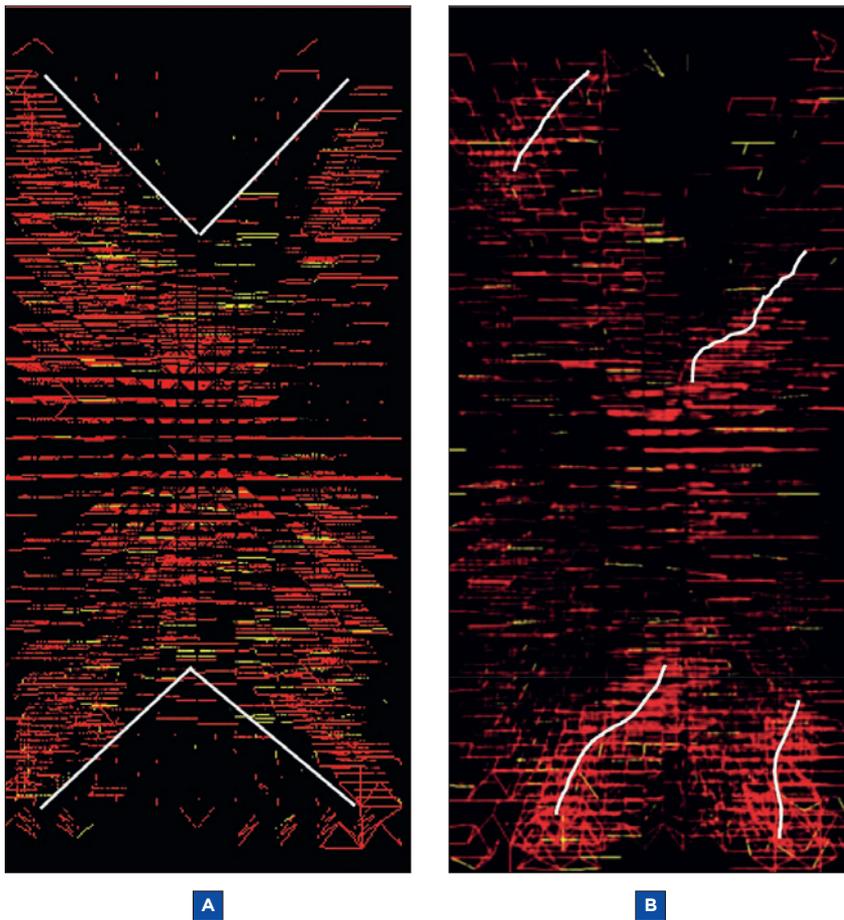


FIGURA 11

TYPICAL RUPTURE CONFIGURATION FOR PRISMATIC SAMPLES UNDER COMPRESSION IS (A) HORIZONTAL DISPLACEMENTS RESTRAINED AT UPPER AND LOWER FACES AND (B) FRICTIONLESS BOUNDARIES

(a) glued upper and lower plates and (b) grease layers to reduce friction. Uncertainties in these boundary conditions were considered negligible.

For the glued plates, prescribed vertical displacements were applied at the upper end, simulating the action of the upper loading plate on a specimen under compression. In contrast, horizontal displacements of the nodes shown are zero. Nodes at the lower surface are considered fixed. In the grease-layer setup, a thin viscous fluid was assumed between the plates and the cube surfaces, resulting in vertical displacements normal to the surface. In this case, nodes could move horizontally.

Figure 7(a) represents the restrictions for tests with grease layers, while Figure 7(b) corresponds to tests with glued plates. Table 2 summarizes the parameters adopted for the DEM simulations in compression tests.

5. DEM PREDICTIONS OF COMPRESSION TEST RESULTS

This section compares the average vertical stress and strain from the experiments by *Bandeira et al.* (2022) with DEM simulation predictions. Figure 8 shows the experimental curve for the cube with greased boundaries, along with three DEM simulations and their average. Similarly, Figure 9 presents the experimental curve for the cube with glued plates, with corresponding DEM simulations. Both figures highlight the effect of boundary

TABELA 3

PARAMETERS ADOPTED IN DEM SIMULATIONS FOR INDIRECT TENSILE TESTING

Length of cubic element L_c	0.01 m
DEM modules in x, y, z directions (cube)	16, 16, 16
Poisson ratio ν	0.25
Specific mass [ρ]	2400 kg/m ³
Young's modulus [E]	33.0 GPa
μG_f	150 N/m
CVG_f	50%
$\mu(\epsilon_p)$	0.0002

conditions on the results. Finally, Figure 10 displays mean stress-strain curves for prisms with reference, greased, and glued plates, along with DEM predictions for cubes with greased boundaries. The numerical DEM predictions align closely with the experimental measurements of both the strength and the average strain, particularly at the peak stress value for cubes, prisms, and under all boundary conditions. The unconfined uniaxial compressive strength is primarily determined by the prisms (or cylinders) and by the cubes with grease.

The strength observed is influenced by boundary conditions, meaning it cannot be considered a material property. The numerical simulations, which assume consistent material properties, confirm this. However, the boundary conditions in the simulations only approximate those in the tests for mean strains below the peak strain. Figure 10 highlights differences in failure stress between numerical and experimental tests when lateral displacement is restricted. In contrast, when lateral displacements are unrestricted, the failure stress for prisms and cubes aligns, suggesting that it can be treated as a material property under these conditions.

Uncertainties increase significantly during the softening phase. For example, assuming that all boundary nodes on the upper and lower surfaces remain coplanar throughout the test becomes questionable once large cracks form. In frictionless tests, cracks develop nearly perpendicular to the load direction, a phenomenon more evident in the cubes (Figure 12) than in the prisms (Figure 11). Material variability influences fracture locations, resulting in unique patterns for each test (see also *Bandeira et al. (2022)*). Cubic and prismatic models with glued plates show pyramidal patterns at both ends, as illustrated in Figures 11 and 12. The damage patterns are visualized using Paraview.

The strength with glued plates – where horizontal displacements are restricted – is about 40% higher than in frictionless cubes, closely matching the

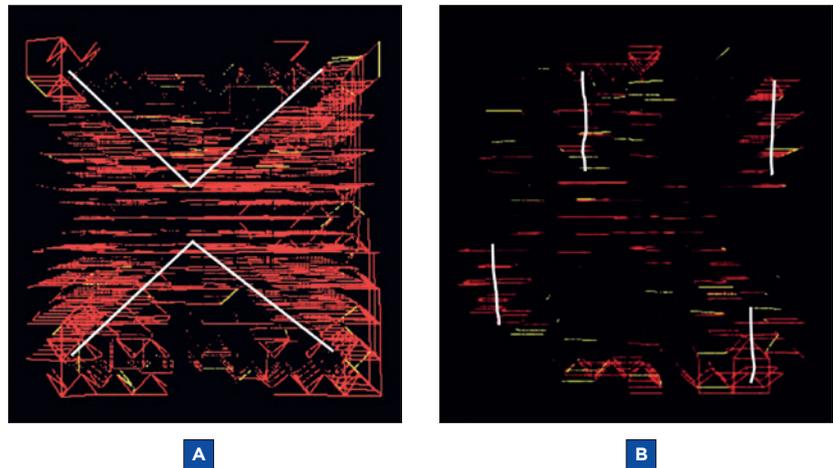


FIGURA 12

TYPICAL RUPTURE CONFIGURATION FOR CUBIC SAMPLES UNDER COMPRESSION IS (A) HORIZONTAL DISPLACEMENTS RESTRAINED AT BOTH UPPER AND LOWER FACES AND (B) FRICTIONLESS BOUNDARIES

results by *Bandeira et al. (2022)*. In case (a), fractures form at 45° at both ends, and the concrete fails by indirect tension, creating six pyramids. In some cases, sliding with friction follows, determining the softening branch. Post-peak curves differ between tests and cannot be considered a material property.

6. DEM PREDICTIONS OF INDIRECT TENSION TEST RESULTS

Cubic models with 15 cm side lengths

were simulated in indirect tensile tests. Figure 13 illustrates the boundary conditions. Vertical displacements are specified at the upper face, simulating the effect of the upper bearing strip under load P in a splitting test. The indicated nodes remain unrestricted in the horizontal plane.

Min et al. (2014) report the experimental results used for comparison. Table 3 lists the values used in the DEM simulations. Figure 14 shows the

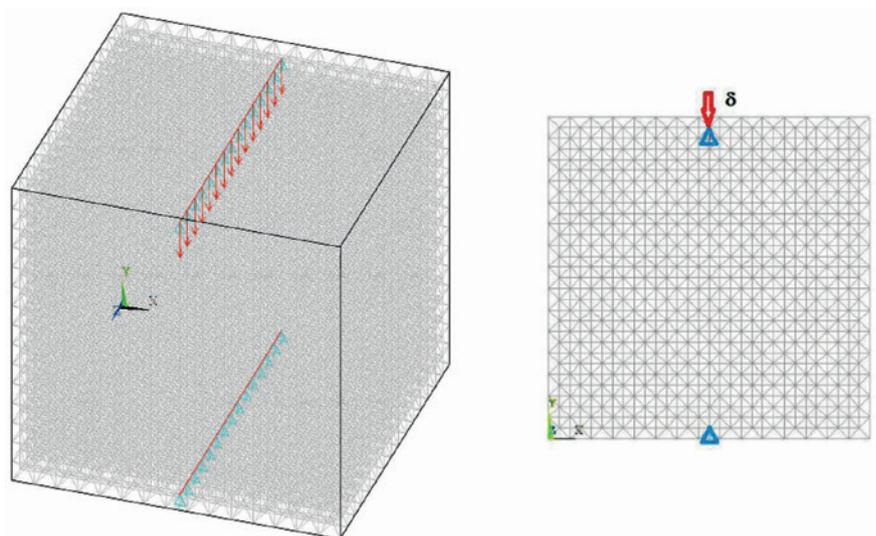


FIGURA 13

BOUNDARY CONDITIONS FOR INDIRECT TENSILE TEST SIMULATION

force-strain curve of a cube with DEM predictions for the indirect tensile test. In the study by Min *et al.* (2014), the maximum load values varied between 121 kN and 124.7 kN, providing crucial insights into the mechanical behaviour under consideration.

Numerical DEM results closely reproduce experimental values of both peaks of the force and indirect tensile strength of the cube (Min *et al.*, 2014). Damage patterns, visualized using Paraview, are shown in Figure 15. The model breaks by indirect trac-

tion, resulting in a neat failure plane in the middle of the cube. The horizontal tensile stress associated with the splitting test may be determined using expression 2b, in which $P_u = 149$ kN, $d = h = 0.15$ m, and $b = 1/15$, yielding a tensile stress $f_{ct} = 4.13$ Mpa, a value compatible with the tensile stress specified in the input data, that is $f_{ct} = \mu(\epsilon_p) \times E = 6.6$ MPa.

7. CONCLUSIONS

Numerical simulations confirmed that tests on cubic samples with

frictionless upper and lower supports provide comparable measures of the unconfined compressive strength of concrete to those obtained from standard tests on cylinders or prisms. Among the various methods proposed in the technical literature to minimize friction, only grease consistently satisfies the zero-friction condition in the simulations.

An advantage of using cubic samples is the ability to measure concrete compressive strength *in orientations normal to the casting direction* (horizontal directions). This is particularly relevant because, in standard splitting tensile tests, the tensile strength measured corresponds to a horizontal direction, which is often assumed - despite experimental evidence - to be identical in all orientations. Further investigation into the differences between concrete strengths in vertical and horizontal directions requires frictionless tests *on cubic samples*.

A key finding of this study is that the post-peak behavior observed in the numerical simulations depends primarily on the testing conditions rather than on material properties. This observation highlights the limitations of DEM simulations in their current formulation for capturing the softening branch, as large fractures may close and sliding with friction along fracture surfaces introduces uncertainty. The accuracy of the simulations is highly dependent on the testing conditions and any change in these conditions could significantly alter the results.

Additionally, DEM simulations of the splitting tensile test performed on cubes show promising results, warranting further experimental validation to confirm their applicability and accuracy.

ACKNOWLEDGEMENTS

This project was supported by CNPq, CAPES, and FAPERGS (Brazil). The authors thank Dr Juan Manuel Vallejos, Eng Julio César Molina and MSc Ricardo Barrios D'Ambra for their assistance in editing some of the figures in this paper. ©

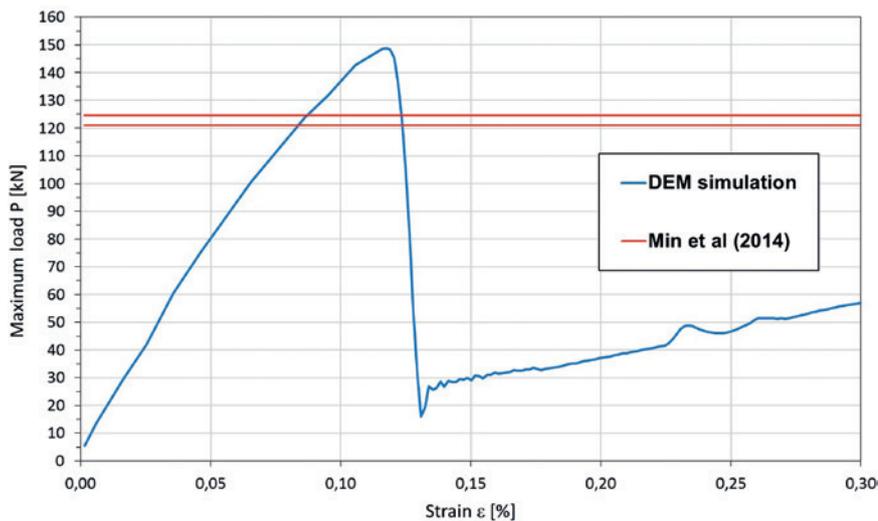


FIGURA 14

DEM PREDICTION VS. LOAD IN INDIRECT TENSILE TEST

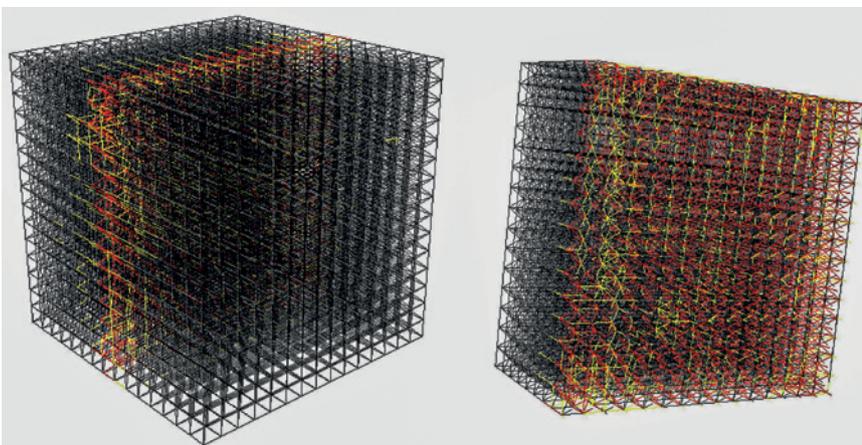


FIGURA 15

TYPICAL RUPTURE CONFIGURATION FOR CUBIC SAMPLE UNDER INDIRECT TENSILE TEST. AXONOMETRIC VIEW AND CROSS-SECTION. THE BROKEN BARS ARE INDICATED IN RED, AND THE DAMAGED BARS IN YELLOW

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BANDEIRA, M. V. V.; LA TORRE, K. R.; KOSTESKI, L. E.; MARANGON, E.; RIERA, J. D. Influence of contact friction in compression tests of concrete samples. *Construction and Building Materials*, vol. 317, 2022, 125811.
- [2] KOTSOVOS, M. D. Effect of testing techniques on the post-ultimate behaviour of concrete in compression. *Matériaux Constr.*, 1983.
- [3] KOSTESKI, L.; ITURRIOZ, I.; GALIANO, B. R.; CISILINO, A. P. The truss-like discrete element method in fracture and damage mechanics. *Engineering Computations*, vol. 28, no. 6, 2011, 765-787.
- [4] KOSTESKI, L. E.; MARANGON, E.; RIERA, J. D.; KECHE DOS SANTOS, F. J.; BANDEIRA, M. V. V. Assessment of concrete anisotropy in relation to the direction of casting. *Rev. Sul-americana Eng. Estrutural*, 2018.
- [5] KOSTESKI, L. E.; MARANGON, E.; RIERA, J. D. Assessment of concrete anisotropy by means of compression and indirect tensile tests. *Rev. IBRACON Estruturas e Mater.*, 2019.
- [6] KUMAR, S.; MUKHOPADHYA, T.; WASEEM, S. A.; SINGH, B.; IQBAL, M. A. Effect of Platen Restraint on Stress-Strain Behaviour of Concrete Under Uniaxial Compression: a Comparative Study. *Strength Mater*, 2016.
- [7] MIN, F.; ZHANHU, Y.; TENG, J. Experimental and Numerical Study on Tensile Strength of Concrete under Different Strain Rates. *The Scientific World Journal*, vol. 2014, Article ID 173531, 2014, 11 páginas.
- [8] RIERA, J. D.; MIGUEL, L. F. F.; ITURRIOZ, I. Assessment of Brazilian Tensile Test by means of the truss-like Discrete Element Method (DEM) with imperfect mesh. *Engineering Structures*, vol. 81, 2014, 10-21.
- [9] ROCHA, M. M.; RIERA, J. D.; DE KRUTZIK, N. J. Extension of a Model that Aptly Describes Fracture of Plain Concrete to the Impact Analysis of Reinforced Concrete. In: *Int. Conf. and Structural Mechanics in Reactor Technology, SMIRT 11*, Trans. Vol. J. Tokyo, Japão, 1991.
- [10] ROCCO, C.; GUINEA, G. V.; PLANAS, J.; ELICES, M. Review of the splitting-test standards from a fracture mechanics point of view. *Cement and Concrete Research*, vol. 31, 2001, 73-82.
- [11] VIDAL, D. M. C.; BANDEIRA, V. V. M.; LA TORRE, R. K.; KOSTESKI, L. E.; MARANGON, E. Numerical and experimental evaluation of the anisotropic behaviour and boundary condition of a structural concrete. *Constr. Build. Mater.*, vol. 260, 2020.
- [12] WANG, J.; YU, X.; FU, Y.; ZHOU, G. A 3-D meso-scale model and numerical uniaxial compression tests on concrete with consideration of the friction effect. *Materials*, vol. 17, no. 5, 1024, 2024.

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)

Novas tecnologias usadas no acabamento do concreto **de estacas** – técnicas de arrasamento

ABRAHÃO B. ROHDEN - PROF., DR. - <https://orcid.org/0000-0002-8652-5064> (abrcivil@gmail.com) ; JOÃO V. F. DAMÁSIO - ENG. – PUCRS

RESUMO

O ARRASAMENTO DE ESTACAS DE CONCRETO DO TIPO HÉLICE CONTÍNUA É UMA ATIVIDADE REALIZADA APÓS A EXECUÇÃO DAS ESTACAS E ANTES DA CONSTRUÇÃO DOS BLOCOS DE FUNDAÇÃO. NESTE SERVIÇO A QUALIDADE E PRODUTIVIDADE SÃO ESPECIALMENTE IMPORTANTES EM OBRAS COM ELEVADO NÚMERO DE ESTACAS. EXISTEM DIFERENTES MÉTODOS DE ARRASAMENTO DE ESTACAS, DENTRE ELES O USO DO MARTELO DEMOLIDOR, USO DE FERRAMENTA ESMAGADORA E O ENFRAQUECIMENTO DA SEÇÃO DE CONCRETO. O OBJETIVO DESTA TRABALHO FOI APRESENTAR TRÊS MÉTODOS DIFERENTES PARA O ARRASAMENTO DE ESTACAS, COMPARANDO CUSTOS E PRODUTIVIDADE. PARA ISSO, REALIZOU-SE UM ESTUDO EM OBRA NO QUAL AVALIARAM-SE OS PROCEDIMENTOS, A PRODUTIVIDADE, OS CUSTOS E AS DIFICULDADES PRÁTICAS DE CADA MÉTODO DE ARRASAMENTO EM ESTACAS DE DIFERENTES TAMANHOS. OS RESULTADOS INDICARAM QUE O MÉTODO DE ENFRAQUECIMENTO DA SEÇÃO, COMBINADO AO MARTELO DEMOLIDOR PARA AJUSTES, É UMA SOLUÇÃO VANTAJOSA POR ALIAR SEGURANÇA, ECONOMIA E BOM DESEMPENHO. A PESQUISA REFORÇA A IMPORTÂNCIA DE ADAPTAR A ESCOLHA DOS MÉTODOS ÀS CONDIÇÕES ESPECÍFICAS DO PROJETO, BEM COMO A BUSCA POR INOVAÇÃO PARA AUMENTAR A PRODUTIVIDADE E REDUZIR CUSTOS NO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL.

PALAVRAS-CHAVE: ARRASAMENTO DE ESTACAS, FUNDAÇÕES, ENGENHARIA CIVIL.

1. INTRODUÇÃO

As estacas hélice contínua monitoradas têm sido cada vez mais utilizadas no Brasil. Esta classe de fundação reserva-se em utilizar uma máquina para perfurar o solo com um trado metálico helicoidal atingindo a profundidade desejada, a concretagem simultânea à retirada da hélice do solo até a cota de apoio do equipamento e a instalação da armadura. É denominada monitorada, pois o operador consegue monitorar a profundidade, o volume de concreto injetado, o máximo torque de giro da hélice e um gráfico de perfil da estaca (ABEF, 2022). Diferentemente dos demais métodos de execução de estacas escavadas onde a altura da concretagem das estacas pode ser definida durante a execução da concretagem do elemento, para a estaca de hélice contínua a concretagem sempre é realizada até o nível do solo, ou seja, toda a altura da perfuração é concretada.

Este fato geralmente aumenta a altura de arrasamento do elemento.

A tarefa subsequente à concretagem da estaca por hélice contínua é o arrasamento e preparação do topo da estaca para receber as armaduras dos blocos. Este procedimento pode ser feito por diferentes métodos, como arrasamento de estaca com a ferramenta de martelo demolidor, quebrando o concreto em volta da armadura da estaca; com um equipamento mecânico que se acopla na máquina escavadeira, gerando pressão hidráulica para esmagar o concreto ao envolver a estaca; ou enfraquecendo a seção do concreto da estaca com determinado material, como madeira ou isopor, tornando-a fácil de ser arrasada. Há diversas limitações no arrasamento das estacas, por exemplo na altura de concretagem, gerando perdas da ordem de até 20%.

Com o avanço das tecnologias presentes no ramo da construção civil, cada vez mais se busca utilizar mecanismos que reduzam prazo de execução de determinadas tarefas e apresentem economia de custo para o empreendimento. A questão deste trabalho foi avaliar o custo real entre alternativas existentes sobre a etapa de arrasamento, visando economia para a obra.

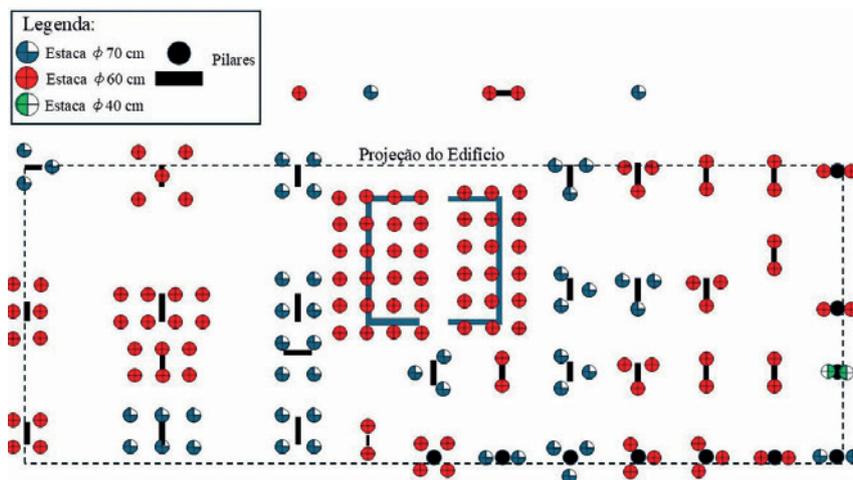


FIGURA 1

PARTE DO PROJETO DE FUNDAÇÕES DA TORRE 3 DO EMPREENDIMENTO ESTUDADO

FONTE: PROJETO DE FUNDAÇÃO DA EMPRESA CONSTRUTORA DO EMPREENDIMENTO (2024)

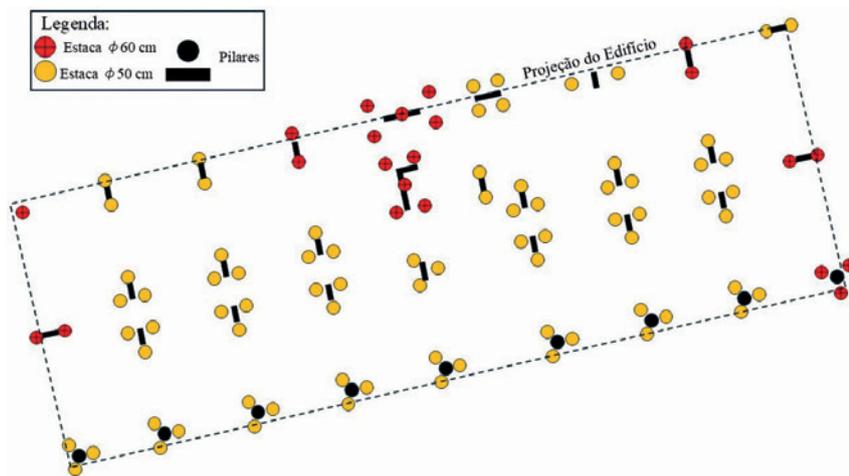


FIGURA 2
 PARTE DO PROJETO DE FUNDAÇÕES DA TORRE 4 DO EMPREENDIMENTO ESTUDADO
 FONTE: PROJETO DE FUNDAÇÃO DA EMPRESA CONSTRUTORA DO EMPREENDIMENTO (2024)

O objetivo deste trabalho foi apresentar três métodos diferentes para o arrasamento de estacas, comparando custos e produtividade. Também foram apresentadas as dificuldades e melhorias que se obtêm na execução da tarefa. Este estudo se delimitou a métodos de arrasamento utilizados em estacas do tipo hélice contínua. O trabalho compreendeu o estudo de uma única obra construída na cidade de Porto Alegre.

2. DESENVOLVIMENTO

O presente estudo foi realizado em uma obra situada na cidade de Porto Alegre, Rio

Grande do Sul. A obra foi construída em um terreno com área total de 12.000 metros quadrados e o empreendimento possui, no total, 4 torres que serão construídas em duas etapas. O trabalho foi realizado na primeira etapa (Torres 3 e 4), sendo esta composta de 1 edifício residencial de 16 pavimentos e 01 edifício comercial de 9 pavimentos, iniciados, respectivamente, em fevereiro de 2024 e abril de 2024. O projeto de fundações previa estacas de hélice contínua de diâmetros 40 centímetros, 50 centímetros, 60 centímetros e 70 centímetros, conforme mostrado na Figura 1 e Figura 2.

Como vantagens do uso de

hélice contínua em comparação à estaca escavada, pode-se citar: o maior controle no processo executivo, com monitoramento contínuo; a possibilidade de execução em solos de diferentes características, inclusive solos moles com elevado nível do lençol freático, com baixo nível de ruídos e descompressão do terreno.

As principais etapas de execução das estacas da hélice contínua compõem a limpeza do terreno, removendo vegetação, detritos e outros obstáculos que interferem na perfuração. Em seguida, ocorre a marcação da estaca, podendo ser por gabarito ou topografia. O gabarito deve ser usado para conferência de cota durante a concretagem da estaca. Assim que estiver marcado o eixo da estaca no piquete, a máquina perfuratriz se desloca até o ponto de furação e o operador apruma a torre, deixando-a verticalmente alinhada. Verifica-se, com um prumo, o eixo do trado com a marcação do piquete. Ajustado o eixo, a perfuração do solo é iniciada girando a hélice contínua (trado) até a cota de projeto (Figura 3). Quando finalizada, é realizado o bombeamento do concreto para a estaca através de uma tubulação conectada na parte oca do trado (Figura 4).

Concluída a injeção de concreto, a máquina perfuratriz se afasta da estaca concretada e é realizada uma limpeza do material escavado realizando-se a colocação da armadura na estaca. A armadura da estaca deve ser preparada anteriormente conforme projeto e introduzida na estaca concretada até o nível de arrasamento, determinado por projeto (Figura 5).

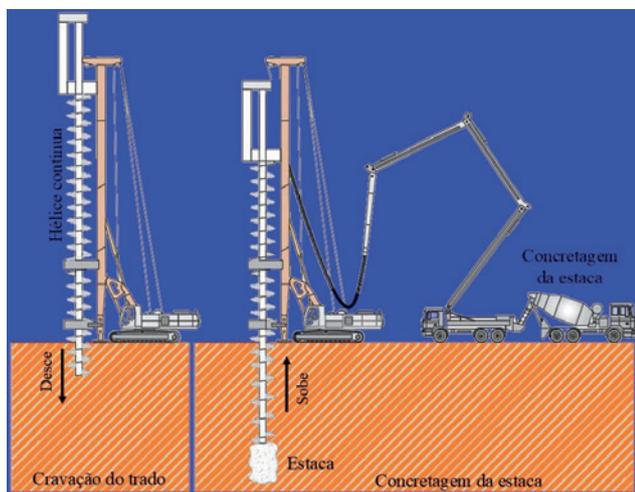


FIGURA 3
 EXECUÇÃO DE ESTACA DE HÉLICE CONTÍNUA



FIGURA 4
 EXTREMIDADE INFERIOR DO TRADO DA HÉLICE CONTÍNUA

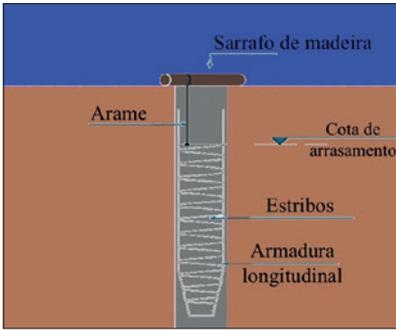


FIGURA 5
COLOCAÇÃO DA ARMADURA
NA ESTACA

Para ocorrer a colocação da armadura até a cota desejada, usa-se um nível laser ou a cota de topo do gabarito.

A cota de arrasamento em um projeto de fundações é determinada pela altura dos blocos de fundação. A cota é um nível até onde será removido excesso de concreto para, posteriormente, a armadura do bloco de fundação apoiar-se sobre a estaca arrasada. Segundo a NBR 6122 (ABNT, 2022), para execução dos blocos de coroamento, é obrigatório o uso de lastro de concreto magro com espessura não inferior a 5 cm. A cabeça da estaca deve ficar pelo menos 5 cm acima do lastro (Figura 6).

Foram utilizadas estacas com diâmetros de 40 cm, 50 cm, 60 cm e 70 cm. As profundidades das estacas foram de 19 a 23 metros. O arrasamento das estacas foi realizado até a profundidade estabelecida em projeto pelos diferentes métodos estudados neste trabalho. A cota de arrasamento de cada estaca depende do tamanho dos blocos de coroamento, geralmente quanto mais estacas há em um bloco, maior será sua altura, isso faz com que a cota de arrasamento das estacas

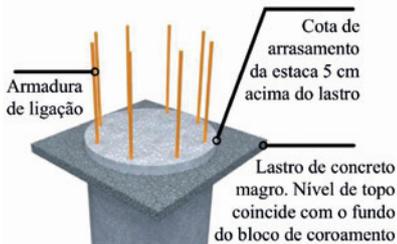


FIGURA 6
ESTACA ARRASADA
COM CONCRETO MAGRO
FONTE: NAKAJIMA E MARTINS (2022)

tenha que ser mais profunda. Na Figura 6, é apresentado uma imagem que ilustra o topo de uma estaca após a conclusão do arrasamento, onde ficará exposta a armadura de ligação com o bloco de coroamento que pode ser visto na Figura 7.

2.1 Método de arrasamento com martelete (martelo demolidor)

O arrasamento de estacas por martelo demolidor, ou martelete, é o método mais tradicional utilizado no arrasamento de estacas, segundo a NBR 6122 (ABNT, 2022). Ele consiste em remover o excesso de concreto atingindo a cota de arrasamento e mantendo a integridade estrutural do restante da estaca, com procedimentos normativos de execução.

O procedimento utilizado no arrasamento das estacas compreendeu as etapas descritas no fluxograma apresentado na Figura 8. O procedimento foi realizado em 55 estacas do empreendimento.

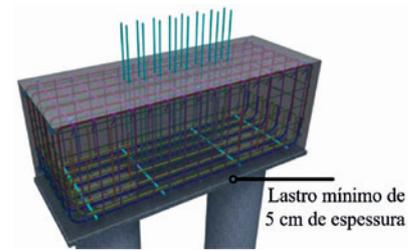


FIGURA 7
ESTACA PRONTA COM ARMADURAS
DO BLOCO DE FUNDAÇÃO
FONTE: NAKAJIMA E MARTINS (2022)

Existem diversos tipos de martelo rompedor que possuem diferentes especificações, como maior ou menor potência. Para o arrasamento das estacas estudadas nesta pesquisa, utilizou-se um martelete elétrico de 30 kgf, seguindo o Caderno Técnico do Serviço do SINAPI (2023). O trabalho foi realizado também observando o procedimento estabelecido pela ABEF (Associação

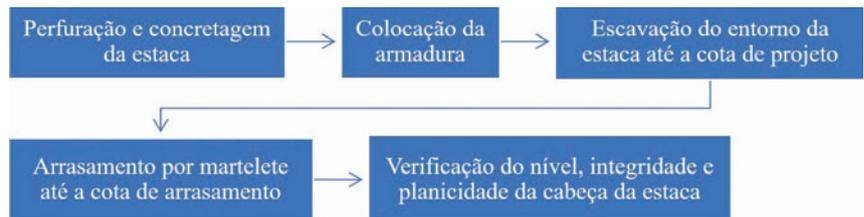


FIGURA 8
PROCEDIMENTOS EXECUTIVOS DE ARRASAMENTO POR MARTELETE

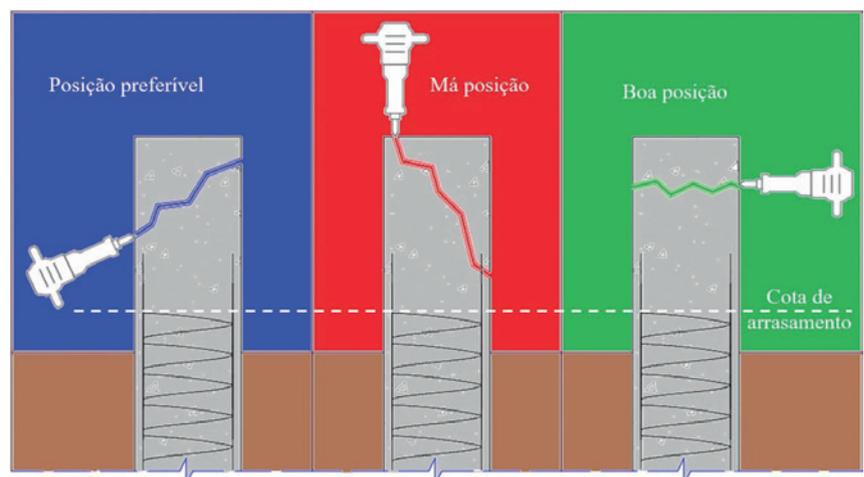


FIGURA 9
PRÁTICAS DO ARRASAMENTO POR MARTELO DEMOLIDOR

TABELA 1

INDICADOR DE PRODUTIVIDADE EM ARRASAMENTO DE ESTACAS COM MARTELETE

Pilar / Bloco	Diâmetro da estaca	Número de estacas no bloco	Altura do arrasamento (m)	Tempo médio por metro de estaca (h)
P301	70	3	1,3	2,00
P302	60	5	1,7	1,20
P309	60	6	1,6	1,20
P328	60	4	1,4	1,20
P311	70	8	2,1	2,20
P330	70	4	1,5	2,00
P351	60	2	1,05	1,10
P352	60	4	1,4	1,20
P319	60	6	1,6	1,25
P333	60	3	1,25	1,10
P310	60	8	1,9	1,25
P348	40	2	0,90	0,80

Brasileira de Empresas de Fundações e Geotecnia), no qual o martelo deve ser utilizado a 90 graus ou superior, tomando sempre o cuidado de não transmitir a força rompedora verticalmente, ou de forma a trincar ou danificar o restante da estaca (Figura 9).

Na Tabela 1, são apresentados os dados coletados em obra para as diferentes estacas estudadas para as quais o método do martelo demolidor foi aplicado.

A partir da observação em campo e medição do tempo gasto no serviço, calculou-se a Razão Unitária de Produção (RUP), que é um indicador de produtividade de seguindo Loturco (2022).

A partir das RUP's calculadas com os valores indicados na Tabela 1 e considerando os procedimentos descritos na Figura 9, foi elaborada a Tabela 2, na qual são descritos os coeficientes (RUP's) e insumos utilizados na composição de custos do serviço de uma unidade para diferentes diâmetros de estaca.

2.2 Arrasamento de estacas por ferramenta esmagadora de concreto

O procedimento utilizado no arrasamento das estacas compreendeu as etapas

TABELA 2

COMPOSIÇÃO DE INSUMOS PARA O MÉTODO DO MARTELO DEMOLIDOR EM 1 ESTACA - UNIDADE

Insumo	Unidade	Diâmetro da estaca (cm)			
		φ 40	φ 50	φ 60	φ 70
Martelo demolidor elétrico 30 kgf	P301	P301	P301	P301	P301
Servente com encargos complementares	P302	P302	P302	P302	P302

**FIGURA 10**

PROCEDIMENTOS EXECUTIVOS DE ARRASAMENTO POR FERRAMENTA ARRASADORA

descritas no fluxograma apresentado na Figura 10. O procedimento foi realizado em 42 estacas do empreendimento estudado.

O arrasamento por ferramenta esmagadora de concreto é um método utilizado para nivelar a cabeça da estaca através de um equipamento com força hidráulica acoplada à escavadeira (Figura 11). Este consiste em introduzir a ferramenta envolvendo a estaca e esmagando o concreto em etapas, até atingir a cota de arrasamento (Figura 12). Os elos conectores permitem que este tipo de equipamento possa ter

**FIGURA 11**

EQUIPAMENTO HIDRÁULICO ARRASADOR DE ESTACA

FONTE: AGF EQUIPAMENTOS (2024)

**FIGURA 12**

EQUIPAMENTO SENDO UTILIZADO NO ARRASAMENTO DE ESTACA

FONTE: MSG EQUIPAMENTOS (2024)

TABELA 3

INDICADOR DE PRODUTIVIDADE EM FERRAMENTA ESMAGADORA DE CONCRETO

Pilar / Bloco	Diâmetro da estaca	Número estacas do bloco	Altura do arrasamento (m)	Tempo médio por estaca (h)
P312	60	24	2,5	0,20
P313	60	18	2,2	0,20

TABELA 4

COMPOSIÇÃO DE CUSTO DO MÉTODO DA FERRAMENTA ARRASADORA DE ESTACA - UNIDADE

Insumo	Unidade	Diâmetro da estaca (cm)			
		φ 40	φ 50	φ 60	φ 70
Máquina escavadeira 21 T	hprod	0,200	0,200	0,200	0,200
Ferramenta esmagadora	hprod	0,200	0,200	0,200	0,200
Martelo demolidor elétrico 30 kgf	hprod	0,100	0,100	0,100	0,100
Servente com encargos complementares	h	0,100	0,100	0,100	0,100

diâmetros variáveis, podendo encaixar em diferentes tamanhos de estacas.

Na Tabela 3 foram apresentados os dados coletados em obra para as diferentes estacas estudadas para as quais o método da ferramenta esmagadora de concreto foi aplicado.

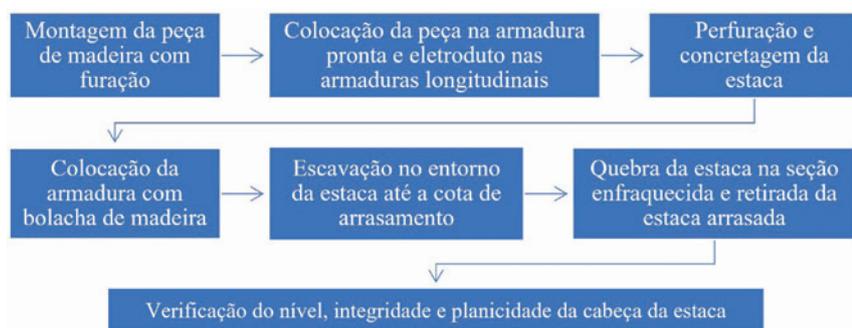
A partir dos valores indicados na Tabela 3 e dos procedimentos descritos na Figura 12 foi elaborada a Tabela 4, na qual são descritos os coeficientes calculados de acordo com Loturco (2022) e insumos utilizados na composição de custos do serviço de uma unidade para diferentes diâmetros de estaca. No cálculo do tempo, considerou-se a retirada das estacas arrasadas, deixando somente pequenos fragmentos de concreto no solo, oriundos do processo de arrasamento do concreto.

Neste processo, foi necessário realizar o alinhamento final da estaca com martelete demolidor elétrico.

2.3 Arrasamento de estacas por enfraquecimento da seção da estaca

Na obra estudada, o método de enfraquecimento da seção foi utilizado em 67 estacas da torre 3 e em 99 estacas da torre 4 totalizando 166 estacas. As etapas deste procedimento são descritas no fluxograma da Figura 13.

O arrasamento por enfraquecimento da seção da estaca é um método que se baseia em enfraquecer a estaca no nível da cota de arrasamento, sendo a parte arrasada da estaca removida por uma

**FIGURA 13**

PROCEDIMENTOS EXECUTIVOS DE ARRASAMENTO POR ENFRAQUECIMENTO DA SEÇÃO DE CONCRETO

máquina escavadeira. Para isso, durante a armação da ferragem da estaca, coloca-se uma chapa de madeira circular, com diâmetro pouco inferior ao trado da hélice e levemente maior que a circunferência da armadura. Além disso, deve-se encamisar a armadura longitudinal, que será transpassado com o bloco, com mangueira ou eletroduto flexível (Figura 14), não permitindo o concreto aderir a armadura, facilitando o processo de arrasamento. Além disso, foi colocado um sarrafo de pinus 2,5 centímetros por 5 centímetros para reforço do compensado de madeira, para, na hora de afundar a armadura no concreto, não haver a quebra ou fissura do artefato de compensado.

Este tipo de arrasamento tem o mesmo princípio da junta serrada utilizada em pisos de concreto, no qual se fragiliza a seção do piso, cortando-o com uma serra a uma profundidade de 1/4 a 1/3 da espessura do mesmo, fazendo com que haja uma fissura controlada no restante do concreto (Braga e Pereira, 2014). A principal diferença em relação à junta serrada de piso é que esta é realizada posteriormente à concretagem, o arrasamento por enfraquecimento na seção, por outro lado, precisa ser previsto antes da concretagem da estaca, para que a armadura seja introduzida na estaca de concreto com a peça de madeira até a cota de arrasamento. Na Figura 15 foi apresentado uma sequência de imagens que ilustra a técnica sendo aplicada em obra, onde: (15-a) a armadura é colocada

**FIGURA 14**

ESTACA COM MADEIRA E VERGALHÃO ISOLADO



A Colocação

B Imersão parcial

C Aprofundamento

D Retirada

FIGURA 15

COLOCAÇÃO DE ARMADURA COM ARTEFATO DE MADEIRA

na estaca; (15-b) utiliza-se uma peça de madeira para fazer a imersão da armadura com a círculo de madeira na estaca; (15-c) o conjunto é afundado até a profundidade de arrasamento; e (15-d) a peça de madeira é removida.

Após o endurecimento da estaca com a utilização de uma escavadeira hidráulica, a estaca é arrasada através do contato da concha da escavadeira com a estaca conforme ilustrado na Figura 16.

Finalizada a quebra de seção enfraquecida, deve-se limpar o topo da estaca com uma ferramenta demolidora (martetele), de forma que a superfície se mantenha plana. Na Tabela 5, foram apresentados os dados coletados em obra para as diferentes estacas estudadas para as quais o método do enfraquecimento da seção foi aplicado. A partir da observação em campo e medição do tempo gasto no serviço, calculou-se a Razão Unitária de Produção (RUP) de acordo com Loturco (2022). Foram contabilizados os tempos gastos no corte

das peças de madeira e montagem do aparato na armadura.

O arrasamento da estaca propriamente teve tempo médio observado de aproximadamente de 1 minuto, independente da altura do arrasamento e do diâmetro arrasado. Porém, a máquina escavadeira precisou possuir força suficiente para arrasar à estaca e retirá-la do local da escavação do bloco. Na Tabela 6, foram apresentados os coeficientes e insumos utilizados na composição de custos do serviço de uma unidade para diferentes diâmetros de estaca.

TABELA 5

INDICADOR DE PRODUTIVIDADE EM ENFRAQUECIMENTO DA SEÇÃO

Diâmetro da estaca (cm)	Número de estacas	Tempo médio fabricação por estaca e arrasamento (h)
50	77	0,417
60	55	0,467
70	34	0,717

TABELA 6

COMPOSIÇÃO DE CUSTO DO MÉTODO DE ENFRAQUECIMENTO DA SEÇÃO - UNIDADE

Insumo	Unidade	Diâmetro da estaca (cm)			
		φ 40	φ 50	φ 60	φ 70
Máquina escavadeira 21 T	hprod	0,017	0,017	0,017	0,017
Carpinteiro com encargos complementares	hprod	0,111	0,200	0,250	0,500
Martelo demolidor elétrico 30 kgf	hprod	0,100	0,100	0,100	0,100
Servente com encargos complementares	h	0,100	0,100	0,100	0,100
Chapa de compensado resinado 12 mm	m ²	0,134	0,242	0,242	0,605
Sarrafo de pinus 2,5 cm x 5 cm	m	0,350	0,450	0,550	0,650
Eletroduto flexível PVC corrugado 25 mm	m	3,200	4,000	5,600	6,400



A Estaca íntegra



B Quebra controlada da estaca



C Retirada

FIGURA 16

QUEBRA DA SEÇÃO ENFRAQUECIDA POR MADEIRA

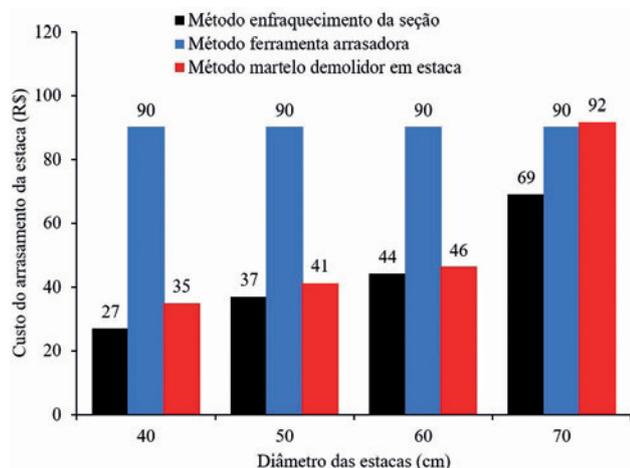


FIGURA 17

CUSTOS TOTAIS PARA O ARRASAMENTO DE ESTACA PARA CADA DIÂMETRO NOS DIFERENTES MÉTODOS ESTUDADOS

3. RESULTADOS

Para o cálculo do custo do arrasamento das estacas através dos diferentes métodos estudados, utilizou-se as composições de custos elaboradas nesta pesquisa e apresentadas nas Tabelas 2, 4 e 6. Os coeficientes das composições foram multiplicados por custos unitários da Tabela SINAPI do mês outubro de 2024. Com as composições e custos unitários, realizou-se então o cálculo do custo do arrasamento de cada estaca pelos diferentes métodos estudados. Os valores resultantes foram apresentados no gráfico da Figura 17.

O custo do método da ferramenta arrasadora foi bastante influenciado pelo custo de locação da escavadeira hidráulica e pelo custo de locação da ferramenta

esmagadora de concreto. Seu custo somente foi superado pelo método do martelo demolidor para o diâmetro de estaca de 70 cm, isso ocorreu em função do elevado tempo gasto para realização do serviço nas estacas de maior diâmetro. Já, o custo do serviço realizado pelo método de enfraquecimento da seção teve seu custo influenciado principalmente

pelo custo das matérias-primas utilizadas na produção do dispositivo.

Ao analisar os resultados, é importante observar que o custo unitário do arrasamento com martelo rompedor é bastante dependente além do diâmetro também da altura de estaca a ser arrasada (na obra estudada essa altura foi de 50 cm em média). Já, o custo do arrasamento realizado com enfraquecimento da seção depende fundamentalmente do diâmetro da estaca a ser arrasada, isso porque há mais consumo de material e tempo na produção dos aparatos utilizados nas estacas maiores. Por outro lado, o arrasamento feito com a ferramenta esmagadora independe do comprimento a ser removido e do diâmetro da estaca.

De maneira geral, o método de enfraquecimento da seção apresentou menor custo em relação aos dois outros, sendo o método do martelo demolidor o segundo método com menor custo. É importante salientar que estes resultados são fruto de uma obra onde se realizou o arrasamento de 263 estacas, e que, portanto, não podem ser generalizados para obras com porte menor, pois o método de enfraquecimento da seção e o método da ferramenta demolidora pressupõem a utilização de equipamentos que normalmente não estão disponíveis em obras de pequeno porte.

4. CONCLUSÕES

Neste estudo, comparando diferentes alternativas para o arrasamento em estacas de concreto, foi possível concluir que, para diferentes diâmetros, o método de enfraquecimento da seção se mostrou com menor custo. A diferença de custo é superior para os diâmetros menores. Para o diâmetro de 70 cm, a diferença de custo é menor entre os diferentes métodos.

Para os diferentes diâmetros, o método de enfraquecimento da seção teve seu custo reduzido em média 15,5% quando comparado ao método do martelo demolidor. Já, o método da ferramenta esmagadora apresentou custo até 3 vezes superior ao custo do arrasamento com o método de enfraquecimento da seção. Essa diferença diminuiu para 25% para as estacas com diâmetro de 70 cm. Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de estudos com estacas de diâmetros superiores aos contemplados nesta pesquisa. ©

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABEF - Associação Brasileira de Empresas de Engenharia de Fundações e Geotecnia. Manual de execução de fundações: práticas recomendadas. São Paulo, 2022.
- [2] ABMS - Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Fundações: teoria e prática. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2022.
- [4] BRAGA R. E., PEREIRA, W. A. Método Executivo De Piso Industrial, Revista Pensar Engenharia. v.2, n. 2, 2014.
- [5] LOTURCO, Bruno. Produtividade na Construção Civil: o que é e como medir. Disponível em: <https://www.sienge.com.br/blog/produtividade-na-construcao-civil/>. Acesso em: 30 de set. de 2024.
- [6] NAKAJIMA, Jorge; ARAKAWA MARTINS, Larissa. Manual de Boas Práticas - Montagem das Armaduras de Estruturas de Concreto Armado. Volume 2. São Paulo: França e Associados Projetos Estruturais, 2022.
- [7] SINAPI. Caderno Técnico: Composições para Serviços de Arrasamento de Estacas. Brasília: Caixa Econômica Federal, 2023. 29 p. Disponível em: <https://www.caixa.gov.br/sinapi>. Acesso em: 10 out. 2024.

Estudo preliminar da resistência de concretos com diferentes teores de cinzas da incineração de resíduos sólidos perigosos

ALESSANDRA B. SOARES - MESTRANDA - <https://orcid.org/0009-0004-4932-3756> (soares.bastos87@aluno.ifce.edu);
LEANDRO W. S. BRITO - GRADUANDO ; **GEMMELLE O. SANTOS** - PROF. DR. — IFCE ; **ROBERTO A. C. DA SILVA** - TÊC. DE LABORATÓRIO — UFC

RESUMO

O OBJETIVO DA PESQUISA FOI ANALISAR PRELIMINARMENTE O EFEITO DA ADIÇÃO DAS CINZAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS PERIGOSOS (CIRSP) SOBRE AS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND (CCP). FORAM MOLDADOS, CURADOS EM ÁGUA E ENSAIADOS CORPOS DE PROVA DE REFERÊNCIA E COM DIFERENTES TEORES DE CIRSP (10%, 15% E 25%) EM SUBSTITUIÇÃO AO AGREGADO MIÚDO (AREIA). OS RESULTADOS PRELIMINARES MOSTRARAM QUE A INCORPORAÇÃO DAS CINZAS AO CONCRETO PERMITIU A PRODUÇÃO DE CORPOS DE PROVA COM RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SUPERIOR A 20 MPa, EXCETO PARA OS QUE CONTINHAM 25% DE SUBSTITUIÇÃO. PARA ESSE PARÂMETRO, A SUBSTITUIÇÃO DE 10% FOI CONSIDERADA A MAIS ADEQUADA, SENDO QUE A LITERATURA NÃO APRESENTA CONSENSO QUANTO AO TEOR IDEAL, JÁ QUE AS CINZAS VARIAM EM TERMOS QUÍMICOS E FÍSICOS. ALÉM DISSO, FOI OBSERVADO QUE A ADIÇÃO DE 25% DE CINZAS PREJUDICOU A TRABALHABILIDADE DO CONCRETO, RESULTANDO EM DESAGREGAÇÃO E REDUÇÃO SIGNIFICATIVA DO TEMPO DE PEGA. ESSA PESQUISA, LOCALMENTE PIONEIRA, INICIA UMA IMPORTANTE LINHA DE INVESTIGAÇÃO PARA ENGENHARIA CIVIL E GESTÃO AMBIENTAL NO ESTADO DO CEARÁ, TENDO EM VISTA AS POSSIBILIDADES DE SE REDUZIR O CONSUMO DE AREIA (UM AGREGADO NATURAL CARO E PROVENIENTE DE ÁREAS CADA VEZ MAIS DISTANTES E LEGALMENTE PROTEGIDAS), BEM COMO REDUZIR A DISPOSIÇÃO FINAL DE CIRSP EM ATERRO SANITÁRIO.

PALAVRAS-CHAVE: RESÍDUOS PERIGOSOS, INCINERAÇÃO, CINZAS, CONCRETO.

1. INTRODUÇÃO

Uma parte dos resíduos gerados nas indústrias e nos serviços de saúde são

Classe I (perigosos) em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, e por apresentarem significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental.

Os Resíduos Sólidos Perigosos (RSP) podem ser tratados através de diversas tecnologias: incineração, autoclave, micro-ondas e aterros industriais (que representam as alternativas mais caras), a blendagem e o coprocessamento em fornos de cimenteiras (que são formas de aproveitamento desses resíduos como insumos) e o

envio para aterros sanitários ou outras disposições sobre o solo (com diversos riscos ambientais e sociais).

Em várias partes do mundo, vem crescendo a tentativa de aumentar a valorização das cinzas provenientes da incineração de resíduos perigosos e reduzir seu envio aos aterros sanitários.

Em Fortaleza-CE, os geradores de RSP (independente do volume) são obrigados a assumir todos os custos pelos serviços de manejo, conforme a Lei Municipal 10.340/2015. Em geral, esses geradores enviam seus RSP para incineração no Centro de Tratamento de Resíduos Perigosos

TABELA 1

LISTA DE ANÁLISES, PARÂMETROS E ENSAIOS REALIZADOS

Ensaio ou procedimento	CIRSP	A	B	CP
Quarteamento	X	X	X	
Granulometria	X	X	X	
Determinação de umidade	X	X	X	
Módulo de finura e dimensão máxima	X	X	X	
Massa específica dos agregados miúdos	X	X		
Massa específica dos agregados graúdos			X	
Densidade real dos agregados miúdos	X	X		
Material pulverulento	X	X	X	
Massa unitária	X	X	X	
Moldagem/cura dos corpos de prova cilíndricos				X
Resistência à compressão				X
Ensaio de abatimento				X

CIRSP: CINZAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS PERIGOSOS; A: AREIA; B: BRITA; CP: CORPO DE PROVA

FONTE: AUTORES (2024)



A



B

FIGURA 1

EXEMPLOS DOS CORPOS DE PROVA E DO ENSAIO DE ROMPIMENTO AOS 28 DIAS

FONTE: AUTORES (2024)

- CTRP, localizado no bairro Passaré, por meio de um contrato com uma transportadora devidamente licenciada.

A incineração resulta na geração de cinzas (que são enviadas para o Aterro Sanitário Metropolitano), gases (que são tratados antes de serem lançados na atmosfera), efluentes (que são tratados em estação interna) e calor (que é aproveitado no aquecimento da autoclave existente dentro do CTRP).

Em Fortaleza-CE, os estudos sobre as cinzas são recentes e essa pesquisa, a partir desse histórico, visa contribuir com o crescimento dos conhecimentos sobre esse tema à medida que realizou a caracterização física das cinzas e avaliou sua incorporação em concretos, substituindo a areia.

Considerando a tendência de crescimento na geração de CIRSP, a necessidade de se pesquisar as possibilidades de reaproveitamento e valorização desse resíduo, a importância de se reduzir sua destinação ao aterro sanitário e a busca por soluções inovadoras e sustentáveis na gestão dessa classe de resíduo, decidiu-se desenvolver essa pesquisa, cujo objetivo foi analisar o efeito da adição da CIRSP sobre as propriedades físicas e mecânicas do Concreto de Cimento Portland (CCP).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

As cinzas estudadas foram provenientes da incineração de Resíduos Sólidos Perigosos - RSP realizada no Centro de Tratamento de Resíduos Perigosos (CTRP), localizado na Rua A, nº 725, Passaré, Fortaleza-CE. Atualmente, o equipamento incinera 10 toneladas de RSP por dia, sendo 98% de resíduos de serviços de saúde e 2% de resíduos industriais. Após a queima (1000 °C), sobra aproximadamente 10%, ou seja, 01 tonelada de cinza por dia, que é acondicionada em contêiner e depois enviada para aterro sanitário. Além da cinza, a pesquisa utilizou brita, areia grossa e Cimento Portland de Alto-forno Poty CP III 32-RS. As amostras desses materiais foram

submetidas aos ensaios listados na Tabela 1.

Na pesquisa, o concreto foi preparado conforme o traço de referência definido pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP): 1:1,74:2,98:0,53 (cimento, areia, brita, fator água/cimento, em massa), com resistência característica à compressão de 20 MPa (classe de resistência C20 e classe de consistência S50; mínimo admissível para concreto estrutural), uso de misturador de argamassa acoplado em furadeira e baldes plásticos de 20 litros. Ao todo, foram moldados 04 corpos de prova de referência, realizada cura por imersão em água e rompimento em prensa de 300 toneladas após 28 dias (Figura 1).

Para analisar o efeito da adição da CIRSP nas propriedades físicas e mecânicas do concreto, realizou-se a substituição parcial da areia por teores crescentes de CIRSP passantes na peneira de 2 mm em novos traços de concreto com 10, 15 e 25% de substituição em massa (Tabela 2). Para cada mistura, foram moldados 04 corpos de prova (Tabela 3). A CIRSP, antes da utilização nas misturas, ficou dentro de uma bandeja metálica durante 48 horas exposta ao sol para redução da sua umidade natural, passou por catação manual (para retirada de materiais grosseiros como agulhas, vidros e outros materiais não queimados), foi britada por aproximadamente 40 minutos.

As curvas granulométricas da CIRSP (catada e britada) e da areia estão representadas na Figura 2 e detalhadas na Tabela 4. A granulometria das britas está representada na Figura 3. Foi observada uma granulometria diferente para os três materiais, sendo que apenas a cinza catada não

TABELA 2

DISTRIBUIÇÃO DOS INSUMOS NAS DOSAGENS ESTUDADAS

Materiais	Materiais	Referência	Misturas ensaiadas		
		A100/CIRSP 0	A90/CIRSP 10	A85/CIRSP 15	A75/CIRSP 25
Cimento			6,0		
Areia		12,0	10,8	10,2	9,0
Brita	Kg		12,0		
Água			3,3		
CIRSP		0,0	1,2	1,8	3,0

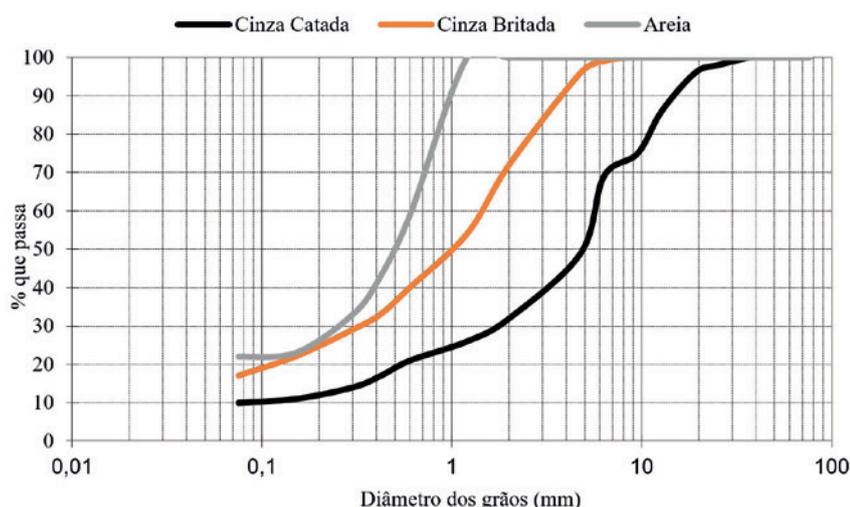
FONTE: AUTORES (2024)

TABELA 3

DESCRIBÇÃO DAS PREPARAÇÕES DO CONCRETO COM E SEM CIRSP

Traço	Composição	Frações (%)	Corpos de prova
Referência	Cimento, areia, brita, água	A100/CIRSP 0	4
1	Cimento, areia, CIRSP, brita, água	A90/CIRSP 10	4
2		A85/CIRSP 15	4
3		A75/ CIRSP 25	4
Total			16

A = AREIA; CIRSP: CINZAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS PERIGOSOS
 FONTE: AUTORES (2024)

**FIGURA 2**

CURVA GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS

FONTE: AUTORES (2024)

se encaixou dentro dos limites utilizáveis recomendados pela norma para agregado miúdo, não sendo utilizada nas misturas. A Tabela 4 mostra a composição granulométrica dos agregados e a Tabela 5 as demais características físicas.

Segundo Silva, Barroso e Cabral (2019), as areias exibem massas especí-

ficas superiores às das britas, sugerindo que os materiais constituintes dos agregados finos são mais densos em comparação com os agregados grossos.

TABELA 4

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS MIÚDOS

Composição (%)	Cinza		Areia
	Catada	Britada	
Pedregulho	51	4	0
Areia grossa	17	24	0
Areia média	15	39	57
Areia fina	7	16	21
Silte/Argila	10	17	22

FONTE: AUTORES (2024)

Sobre as características das cinzas, apesar de influenciadas por sua origem, pelas características dos resíduos e pelo método de tratamento utilizado (MEMON; SHEIKH; PARACHA, 2013), obtiveram-se os resultados contidos na Tabela 6, comparativamente com a literatura.

As características físicas do agregado graúdo utilizado na pesquisa estão reunidas na Tabela 7 e 8.

Observou-se que a curva granulométrica da amostra de brita se encaixou dentro dos limites da zona granulométrica 9,5/25 recomendados pela norma.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados preliminares da resistência à compressão do concreto convencional e do concreto modificado (com teores diferentes de CIRSP) foram reunidos na Tabela 9 e plotados na Figura 4. Observou-se que a resistência à compressão de todos os corpos de prova (com e sem cinzas) superaram 20MPa, sendo este um resultado inovador da pesquisa e muito positivo, exceto para o CP₂ e CP₄ da mistura com 25% de cinzas (M25 destacado em verde).

Os resultados preliminares também permitiram outra observação: em geral, o aumento do teor de cinzas no CCP tendeu a diminuir a resistência à compressão. Considerando os valores médios, essa redução de resistência chegou a 17% em relação à dosagem de referência quando foram

TABELA 5

OUTRAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS AGREGADOS MIÚDOS

Características	Cinza		Areia
	Catada	Britada	
Umidade (%)	9,62	6,69	5,40
Módulo de finura (mm)	6,97	5,75	2,48
Dimensão máxima (mm)	25,40	6,35	2,38
Massa unitária (g/cm ³)	—	1,00	1,32
Massa específica (g/cm ³)	—	2,50	2,53
Material pulverulento (%)	—	0,36	0,44
Densidade real	—	2,37	2,69

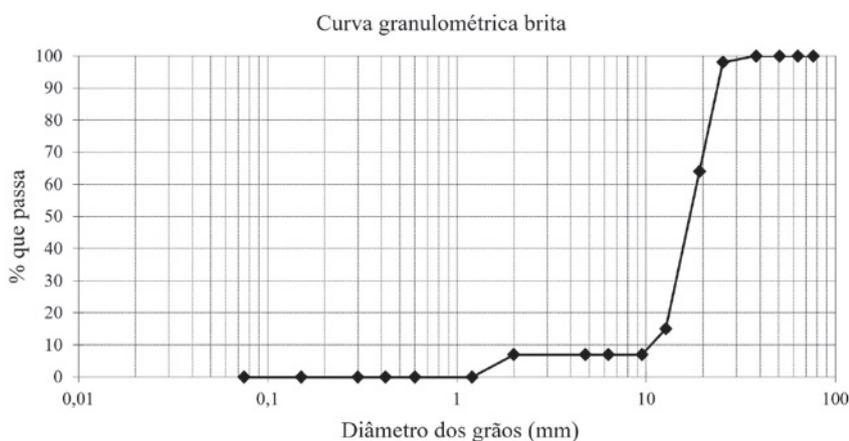
FONTE: AUTORES (2024)

TABELA 6

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS CINZAS NA LITERATURA E DADOS DESTA PESQUISA

Referências	MF (mm)	MU (g/cm ³)	ME (g/cm ³)	DR	MP (%)	DM (mm)	U
Dados desta pesquisa	5,75	1,00	2,5	2,37	0,36	6,35	6,69
Graupmann; Martins, 2019	2,75	2,36	—	—	—	—	—
Mendonça, 2018	2,50	0,46	2,03	—	—	—	—
Pinto, 2018	1,60	4,80	—	—	—	—	—
Sharma; Gupta; Singh, 2022	—	—	3,15	—	—	—	—
Moura, 2023	—	—	—	2,065 2,367	—	—	—
Alencar, 2022	—	—	—	1,76	—	—	—
Alam; Singh; Kumar, 2021	—	—	—	2,07	—	—	—

MF: MÓDULO DE FINURA; MU: MASSA UNITÁRIA; ME: MASSA ESPECÍFICA; DR: DENSIDADE REAL; MP: MATERIAL PULVERULENTO;
DM: DIMENSÃO MÁXIMA; U: UMIDADE
FONTE: AUTORES (2024)

**FIGURA 3**

CURVA GRANULOMÉTRICA DA BRITA UTILIZADA

FONTE: AUTORES (2024)

TABELA 7

CLASSIFICAÇÃO DA BRITA

Brita	Dimensão (mm)	% Retido
0	4,8 - 9,5	7,90
1	9,5 - 19	52,4
2	19 - 25	35,9

FONTE: AUTORES (2024)

TABELA 8

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA BRITA

Características	Brita
Módulo de finura (mm)	8,05
Dimensão máxima (mm)	25,40
Massa específica da brita (g/cm ³)	2,53
Massa unitária solta (g/cm ³)	1,46
Massa unitária compactada (g/cm ³)	1,61
Material pulverulento (%)	3,09

FONTE: AUTORES (2024)

pode trazer benefícios em determinados contextos, a sua dosagem deve ser controlada cuidadosamente para evitar a deterioração das propriedades mecânicas dos materiais.

Kaur, Siddique e Rajor (2019) identificaram um aumento da resistência com 10% de substituição de cinzas, mas uma diminuição significativa quando o nível de substituição foi elevado para 15%, evidenciando a necessidade de um equilíbrio adequado na dosagem de cinza para garantir o desempenho otimizado do concreto.

Katara, Samaiya e Murthy (2022) observaram que uma substituição de 7,5%

aplicados 10% de cinzas (M10 destacada em amarelo), 21% para a dosagem com 15% de cinzas (M15 destacada em vermelho) e até 29% para a dosagem com 25% de cinzas (M25 destacada em verde). A dosagem com menor variação nos resultados da resistência à compressão foi a M15 (desvio padrão 0,7) e maior foi a M25 (desvio padrão 3,8). A Figura 5 mostra o exato momento do rompimento dos corpos de prova com 10, 15 e 25% de cinzas, respectivamente.

Na literatura, as pesquisas sobre a substituição de cimento e areia por cinzas de resíduos incinerados têm revelado uma variedade de resultados em relação à resistência à compressão

e à durabilidade de concretos e argamassas, com autores identificando diferentes comportamentos em função do nível de substituição e do tipo de cinza. De forma geral, as análises indicam que, enquanto a incorporação de cinzas

TABELA 9

RESULTADOS PRELIMINARES DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS ESTUDADOS

Dosagem	CP ₁	CP ₂	CP ₃	CP ₄	Média	Desvio
REF	30,1	28,4	29,2	28,9	29,2	0,7
M10	23,7	27,5	21,1	24,9	24,3	2,7
M15	24,0	22,7	23,2	22,4	23,1	0,7
M25	23,3	17,5	24,5	17,4	20,7	3,8

CP: CORPO DE PROVA; REF: REFERÊNCIA; M: MISTURA

FONTE: AUTORES (2024)

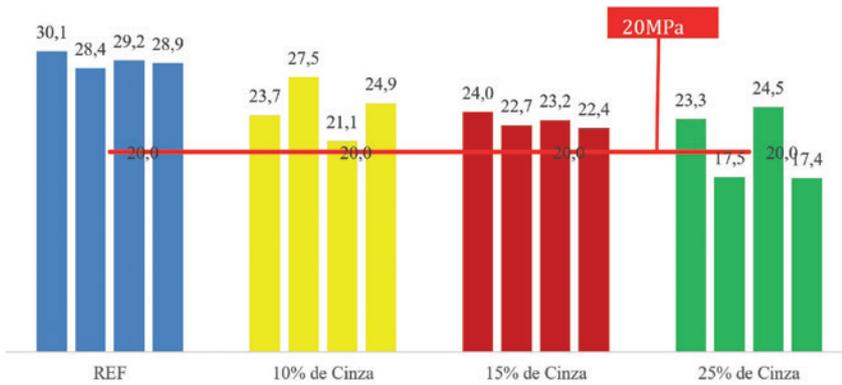


FIGURA 4

REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS PRELIMINARES DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

FONTE: AUTORES (2024)

com cinzas de RSS não só aumentou a resistência à compressão do concreto em 20%, como também melhorou sua resistência à tração em 17% e à flexão em 14%, demonstrando que pequenas adições de cinzas podem ter efeitos positivos em misturas de concreto. Contudo, com níveis de substituição maiores

observaram um claro padrão de perda de resistência.

Maltaka (2023) observou corpos de prova de argamassa preparados com 20% de cinzas com resistência à compressão 67,1% maior, aos 28 dias, que os corpos de prova das amostras de controle.

Nesta pesquisa, preliminarmente, foi verificado que a trabalhabilidade do concreto também sofreu influência da presença da CIRSP. O concreto de referência baixou 1 cm, a mistura com 10% de cinzas teve 3 cm de abatimento, com 15% de cinzas (4 cm) e com 25% (7 cm). Os dois primeiros resultados foram classificados como positivos, ou seja, resultaram em um concreto com maior fluidez e trabalhabilidade, sem segregação, exsudação e perda de resistência (que são fatores que podem comprometer a integridade estrutural do concreto). Quando a substituição de areia pela cinza foi aumentada para 25%, o concreto apresentou desagregação significativa, reduzindo drasticamente a trabalhabilidade da mistura.

Wang; Song (2016) observaram baixos índices de fluidez em argamassa com 20% de cinzas e esse comportamento é consequência da alta quantidade de carbono não queimado presente nas cinzas e sua capacidade de adsorver e reter água, alterando a relação água/cimento.

Mare; Ouellet-Plamondon; Bhojaraju (2023) observaram o mesmo comportamento: quanto maior a quantidade



A 10% de CIRSP



B 15%



C 25%

FIGURA 5

DETALHES DOS ROMPIMENTOS DOS CORPOS DE PROVA

FONTE: AUTORA (2024)

substituída, menor o tempo de pega. Os autores atribuíram esse comportamento à natureza absorvente das cinzas e à menor quantidade de cimento nos sistemas mistos, bem como à presença de altos teores de álcalis (9%) nas cinzas, que aceleram a hidratação e reduzem o tempo de indução.

Manjunatha *et al.* (2023) também destacaram que o tempo de pega é significativamente influenciado pela adição de cinzas de RSS em função da composição química desse material. A presença de maiores quantidades de SiO₂ e Al₂O₃ tende a aumentar o tempo de pega das pastas, enquanto altos teores de álcalis aceleram o processo de endurecimento. Essas variações químicas afetam diretamente o comportamento da mistura, mostrando que o controle da composição das cinzas é crucial para determinar o tempo de pega ideal nas aplicações de cimento.

4. CONCLUSÕES

O estudo preliminar da incorporação das cinzas de resíduos perigosos ao concreto inaugurou uma importante

linha de investigação para engenharia civil e gestão ambiental no estado do Ceará, tendo em vista as possibilidades de se reduzir o consumo de areia, bem como o envio de cinzas ao aterro sanitário.

Os resultados preliminares permitiram concluir que a incorporação das cinzas ao concreto resultou em corpos de prova com resistência à compressão acima de 20MPa, sendo este resultado uma importante descoberta (exceto para o CP2 e CP4 que continham 25% de cinzas).

Foi possível concluir, preliminarmente, que o aumento do teor de cinzas no CCP tendeu a diminuir a resistência à compressão, sendo aparentemente mais adequado a substituição de até 10%. É importante destacar que não há unanimidade na literatura sobre o teor (%) ideal dessa substituição em função das diferenças entre as cinzas do ponto de vista químico e físico, do tipo de uso (*in natura* ou triturado) e da opção de emprego (com ou sem plastificante), entre outras variáveis.

Esse cenário aponta para o potencial de estudo nessa área.

Concluiu-se de forma inicial que o maior teor de cinzas (25%) influenciou negativamente na trabalhabilidade do concreto, com desagregação significativa e que o tempo de pega reduziu rapidamente.

Por fim, cabe destacar que este trabalho é parte de uma dissertação de mestrado em desenvolvimento e na próxima fase serão confeccionados novos traços para aprofundar as descobertas.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi apoiada financeiramente pela Fundação Cearense de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP). Os autores também estendem seus agradecimentos ao Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará e ao Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará. ©

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALAM, P.; SINGH, D.; KUMAR, S. Incinerated municipal solid waste bottom ash bricks: a sustainable and cost-efficient building material. *Materials Today: Proceedings*, v.49, p.1566-1572, part 5., 2022.
- [2] ALENCAR, V. L. de L. Caracterização geotécnica de solo estabilizado com cimento e cinzas de resíduos sólidos da saúde. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 90f., 2022.
- [3] GRAUPMANN et al. Análise da resistência à compressão de concretos com adição de cinza de aterro sanitário. *Revista Matéria*, v.24, n.02, e-12348, 11p., 2019.
- [4] KAUR, H.; SIDDIQUE, R.; RAJOR, Rajor. Influence of incinerated biomedical waste ash on the properties of concrete. *Construction and Building Materials*, v. 226, p. 428-441, 2019.
- [5] MANJUNATH et al. Exploring the potential use of incinerated biomedical waste ash as an eco-friendly solution in concrete composites: a review. *Construction and Building Materials*, v.387, n.17, jul., 2023.
- [6] MATAKKAH, F. Recycling of hazardous medical waste ash toward cleaner utilization in concrete mixtures. *Journal of Cleaner Production*. v.400, may., 2023.
- [7] MEMON, S. A.; SHEIKH, M. A.; PARACHA, M. B. Utilization of hospital waste ash in concrete. *Journal of Engineering and Technology*, v.32, n.1, 8p, jan., 2013.
- [8] MENDONÇA, F. L. de. Caracterização das cinzas de incineração de resíduos sólidos de serviços de saúde para inserção em ciclos produtivos e ambientais. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 26f., 2018.
- [9] MOURA, M. C. C. Avaliação do comportamento das cinzas da incineração de resíduos sólidos perigosos no tratamento de lixiviados de aterros sanitários. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará — IFCE, Fortaleza, 98f., 2023.
- [10] PINTO, B. H. A. Estudo de argamassas com adição de cinzas do processo de incineração de resíduos sólidos dos serviços de saúde. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 24f., 2018.
- [11] SILVA, W. B. C.; BARROSO, S. H. A.; CABRAL, A. E. B. Avaliação da aplicação de cinzas pesadas de termelétrica em blocos intertravados de concreto para pavimentos. *Revista Matéria*, v.25, n.01, e-12570, 16p., 2020.
- [12] SINGH et al. Sustainable use of different size fractions of municipal solid waste incinerator bottom ash and recycled fine aggregates in cement mortar. *Case Studies in Construction Materials*, v17, e01434, dec., 2022. WANG, L. K.; HUNG, Y-T.; SHAMMAS, N. K. *Physicochemical Treatment Processes*. 1.ed. Totowa, NJ: Humana Press, Handbook of Environmental Engineering, v.3, 2004.
- [13] WANG, L. K.; HUNG, Y-T.; SHAMMAS, N. K. *Physicochemical Treatment Processes*. 1.ed. Totowa, NJ: Humana Press, Handbook of Environmental Engineering, v.3, 2004.

Censo da Educação Superior 2023 em Engenharias

MENOS GRADUADOS NA ENGENHARIA

O Censo da Educação Superior 2023 revela mais uma redução no número de formados nas engenharias. Conforme levantamento feito pela Mira Pesquisa para o Sindicato dos Engenheiros no Estado de São Paulo (SEESP), foram 95.607 concluintes nas várias modalidades.

Em 2022, conforme o Painel Estatístico Censo da Educação Superior do Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (Inep), ligado ao Ministério da Educação (MEC), foram 97.672. Esse número considera os concluintes das engenharias de três grandes áreas: Agricultura, Silvicultura, Pesca e Veterinária;

Engenharia, Produção e Construção; e Computação e TIC. Não inclui, contudo, Engenharia Agrônoma, não discriminada na plataforma do instituto. De acordo com a mesma base de dados, a queda vem sendo observada desde 2018, quando se formaram no Brasil 128.871 engenheiros.

CIVIL NO TOPO

Entre as engenharias com maior número de concluintes, a Civil continua no topo em 2023, com 26.314 no total, sendo 8.007 mulheres e 18.307 homens. Completam as cinco mais: Produção (15.888), Mecânica (12.856), Elétrica (11.029) e Computação (5.258).

CONCLUINTES ENGENHARIAS

Ano	Feminino	Masculino	Total
2010	9.233	32.058	41.291
2011	10.867	34.309	45.176
2012	13.682	40.692	54.374
2013	15.723	44.293	60.016
2014	18.925	48.280	67.205
2015	23.830	57.644	81.474
2016	30.234	70.198	100.432
2017	36.015	78.448	114.463
2018	41.024	87.847	128.871
2019	39.829	87.103	126.932
2020	36.236	81.444	117.680
2021	31.184	74.127	105.311
2022	27.757	69.915	97.672
2023	25.934*	69.673*	95.607*

Elaboração: Sindicato dos Engenheiros no Estado de São Paulo (SEESP)

Fonte: Painel Estatístico Censo da Educação Superior | Inep/MEC

Observações: 1) Selecionadas apenas engenharias nas categorias: Agricultura, Silvicultura, Pesca e Veterinária; Engenharia, Produção e Construção; e Computação e TIC. 2) Não inclui Engenharia Agrônoma

*Somados os concluintes em Engenharia Agrônoma constantes do levantamento da Mira Pesquisa feito para o SEESP

Censo da Educação Superior 2023 – Engenharias

ENGENHARIAS COM MAIOR NÚMERO DE CONCLUINTES EM 2023

Curso	Total	Feminino	Masculino
Engenharia Civil	26.314	8.007	18.307
Engenharia de Produção	15.888	5.228	10.660
Engenharia Mecânica	12.856	1.365	11.491
Engenharia Elétrica	11.029	1.269	9.760
Engenharia de Computação	5.258	706	4.552
Engenharia Química	4.328	2.265	2.063
Engenharia Agrônoma	2.585	849	1.736
Engenharia de Controle e Automação	2.361	306	2.055
Engenharia de Software	1.875	256	1.619
Engenharia Ambiental	1.821	901	920
Engenharia de Alimentos	1.270	863	407
Engenharia Ambiental e Sanitária	1.300	737	563
Engenharia Florestal	1.068	607	461
Engenharia Mecatrônica	774	96	678
Engenharia de Materiais	580	257	323
Engenharia Eletrônica	417	64	353
Engenharia de Minas	322	119	203
Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia	306	202	104
Engenharia Agrícola	283	83	200
Engenharia de Telecomunicações	272	71	201

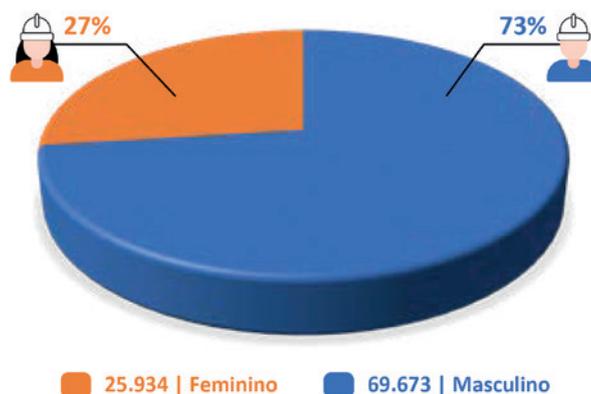
Elaboração: Sindicato dos Engenheiros no Estado de São Paulo (SEESP)

Levantamento e tratamento de dados: Mira Pesquisa

Fonte: Censo da Educação Superior 2023 | Inep/MEC

Censo da Educação Superior 2023 – Engenharias

CONCLUINTES POR SEXO



PROFISSÃO SEGUE BRANCA E MASCULINA

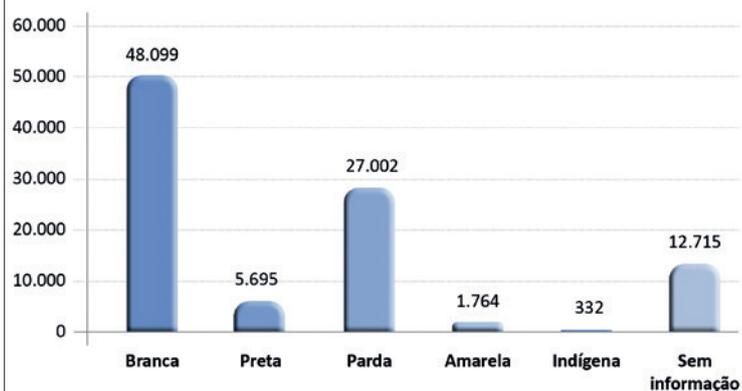
A análise dos dados de 2023, da Mira Pesquisa, aponta também que a profissão continua majoritariamente branca e masculina. Entre os concluintes, computaram-se 25.934 (27%) mulheres e 69.673 (73%) homens.

Na distribuição racial, foram 50% brancos, 28% pardos, 6% pretos, 2% amarelos, 1% indígena; a informação não estava disponível para 13% dos concluintes.

PERFIL DO GRADUADO EM 2023

Conforme o painel do Inep, o engenheiro típico formado em 2023 é homem, branco, tem 24 anos, estudou Engenharia Civil em um curso noturno presencial de uma universidade privada com fins lucrativos.

CONCLUINTES POR RAÇA/COR



Elaboração: Sindicato dos Engenheiros no Estado de São Paulo (SEESP)
Levantamento e tratamento de dados: Mira Pesquisa
Fonte: Censo da Educação Superior 2023 | Inep/MEC

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



9th International Conference on Concrete Repair, durability and technology

A Conferência Internacional promovida pela Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal objetiva apresentar os mais recentes avanços em durabilidade e

reabilitação de estruturas de concreto. Sua nona edição vai acontecer de 16 a 18 de junho, em Lisboa. Durante o evento será ministrado o curso "Entendendo os defeitos do

concreto, seu diagnóstico e reparação". Associados do IBRACON tem desconto de 50 euros na inscrição na Conferência. As inscrições podem ser feitas no site www.concrete-solutions.org.

São Paulo School of Advanced Science on Structural Safety

No contexto das mudanças climáticas, com a combinação de efeitos da intensificação de eventos extremos com a redução potencial da durabilidade das estruturas, acarretando maior riscos às estruturas de concreto armado, a Escola de Ciência Avançada em Segurança Estrutural patrocinada pela Fundação de Amparo à Pesquisa no Estado de São Paulo (Fapesp), vai discutir os principais desafios impostos para segurança e resiliência das estruturas de concreto,



bem como as soluções para superá-los. O evento contará com palestras de renomados profissionais da Austrália, Colômbia, Estados Unidos, Noruega e Brasil. As aulas acontecerão na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, no dia 5 de maio, e na Escola de Engenharia de São Carlos, de 6 a 15 de maio.

MAIS INFORMAÇÕES:

<https://spschoolstructuralafety.eesc.usp.br/#application>



IBRACON

GUIA DE PREVENÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO PRÁTICA RECOMENDADA IBRACON



COMITÊ TÉCNICO - CT 201

Coordenador: Claudio Sbrighi Neto
Secretário: Eduardo Brandau Quitete

Guia de Prevenção da Reação Alkali-Agregado

COORDENADORES

Cláudio Sbrighi Neto, Eduardo Brandau Quitete e Arnaldo Forti Battagin

Apresenta de forma didática a sequência de ações necessárias para a prevenção da reação álcali-agregado (RAA). São abordadas generalidades da RAA, avaliação de risco de sua ocorrência, medidas preventivas, classificação da ação preventiva, ensaios laboratoriais, medidas de mitigação e a tomada de decisão.

O trabalho é resultado das discussões ocorridas no **Comitê Técnico de Reação Alkali-Agregado do IBRACON (CT-201)** e seu lançamento segue a recente publicação das sete partes da norma **ABNT NBR 15577 Agregados – Reatividade álcali-agregado**.

DADOS TÉCNICOS

ISBN: 978-85-98576-31-2

Formato: 18,6 x 23,3cm

Páginas: 32

PATROCÍNIO



Aquisição: Acesse a Loja Virtual do IBRACON.

www.ibracon.org.br

International *fib* Symposium

A próxima edição do Simpósio Internacional da *fib* em Projeto de Estruturas vai ser realizada entre 14 e 16 de maio, no Pestana Rio Atlântica Hotel, no Rio de Janeiro.

O objetivo do evento é reunir especialistas em projeto estrutural para refletir sobre questões sobre como a concepção

do projeto estrutural emerge, como as decisões são tomadas e as responsabilidades distribuídas nesse processo, como as condicionalidades são endereçadas, como os princípios normativos são aplicados e como os membros da equipe colaboram.

Ao lado de palestrantes internacionais,

como Hugo Corres, Akio Kasuga, Aurelio Muttoni e David Ordoñez, estarão o presidente e diretor de marketing do IBRACON, Engs. Julio e Rafael Timerman, que abordaram os projetos de museus.

MAIS INFORMAÇÕES:

<https://fib.abece.com.br>

Congresso Brasileiro de Túneis

O 6º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas acontece de 10 a 12 de março no Centro de Convenções Frei Caneca, em São Paulo.

A temática do evento focará a inovação e a sustentabilidade e contará com

uma delegação de 20 representantes da Associação Internacional de Túneis e do Espaço Subterrâneo (ITA), entre os quais seu vice-presidente, Andrés Marulanda e a secretária geral, Helen Roth.

O evento é promovido pelo Comitê Brasileiro

de Túneis e Espaços Subterrâneos, ligada à Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS).

MAIS INFORMAÇÕES:

<https://6cibt.tuneis.org.br/>

Seminário Internacional de Retrofit

Organizado pelo Sinduscon-SP, após representantes da entidade visitarem a Espanha e conhecerem a recuperação da área

central de Bilbao, o Seminário Internacional de Retrofit vai apresentar o case de Bilbao e outros projetos nacionais de sucesso em retrofit, inclusi-

ve o do Centro Histórico da cidade de São Paulo.

O evento ocorreu em 20 de fevereiro, no Millenium Centro de Convenções.

PRÁTICA RECOMENDADA IBRACON/ABECE
CONTROLE DA QUALIDADE DO
CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS



COMITÊ 303: Materiais não convencionais para Estruturas de Concreto, Fibras e Concreto Reforçado com Fibras

GT4: Caracterização de materiais não convencionais e fibras para reforço estrutural

Coordenador: Eng. Marco Antonio Carnio
 Representante CTA: Sofia Maria Carrato Dinis

ABECE **IBRACON**

PRÁTICA RECOMENDADA IBRACON/ABECE

Controle da qualidade do concreto reforçado com fibras

Elaborada pelo CT 303 – Comitê Técnico IBRACON/ABECE sobre Uso de Materiais não Convencionais para Estruturas de Concreto, Fibras e Concreto Reforçado com Fibras, a Prática Recomendada “Controle da qualidade do concreto reforçado com fibras” indica métodos de ensaios para o controle da qualidade do CRF utilizado em estruturas de concreto reforçado com fibras e estruturas de concreto reforçado com fibras em conjunto com armaduras.

A Prática Recomendada aplica-se tanto a estruturas de placas apoiadas em meio elástico quanto a estruturas sem interação com o meio elástico.

AQUISIÇÃO

www.ibracon.org.br (Loja Virtual)

DADOS TÉCNICOS

ISBN: 978-85-98576-30-5

Edição: 1ª edição

Formato: eletrônico

Páginas: 31

Acabamento: digital

Ano da publicação: 2017

Coordenador: Eng. Marco Antonio Carnio

Patrocínio



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



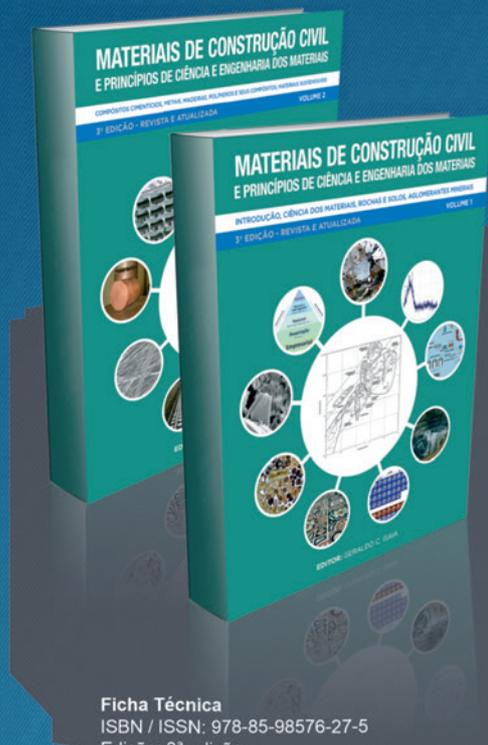
de Concretagem (Abesc), Eng. Álvaro Sérgio Barbosa Júnior.

O curso vai acontecer nos dias 15 e 16 de abril, das 8h às 17h, no Celi Hotel Aracaju, e conta com 15 créditos do Programa MasterPEC.

MAIS INFORMAÇÕES:

<https://site.ibracon.org.br/educacao-continuada/calendario-de-cursos-2025/>

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

Encontro Regional do Pará

A Regional do Pará vai realizar seu tradicional Encontro, de 11 a 13, no Auditório da Universidade Federal do Pará, em Belém.

No evento, estão previstos quatro workshops sobre as novas tecnologias em concreto e concursos estudantis com estudantes de graduação e



pós-graduação. Entre os palestrantes, estão: Eduardo Cabral (UFC), Enson Portela (IFCE), Edna Possan (Unila), Alexandra Vignoli (Realmix Concreto) e Klemerson Veloso (Tabalmix Concreto). Serão discutidas as mudanças climáticas, a transição energética, as estruturas sustentáveis e a economia circular.

PRÁTICA RECOMENDADA IBRACON/ABECE

Macrofibras poliméricas para concreto destinado a aplicações estruturais: definições, especificações e conformidade

Elaborada pelo CT 303 – Comitê Técnico IBRACON/ABECE sobre Uso de Materiais não Convencionais para Estruturas de Concreto, Fibras e Concreto Reforçado com Fibras, a Prática Recomendada especifica os requisitos técnicos das macrofibras poliméricas para uso em concreto estrutural.

A Prática Recomendada abrange macrofibras para uso em todos os tipos de concreto, incluindo concreto projetado, para pavimentos, pré-moldados, moldados no local e concretos de reparo.

AQUISIÇÃO

www.ibracon.org.br (Loja Virtual)

DADOS TÉCNICOS

ISBN: 978-85-98576-29-9

Edição: 1ª edição

Formato: eletrônico

Páginas: 37

Acabamento: digital

Ano da publicação: 2017

Coordenador: Eng. Marco Antonio Carnio

PRÁTICA RECOMENDADA IBRACON/ABECE MACROFIBRAS POLIMÉRICAS PARA CONCRETO DESTINADO A APLICAÇÕES ESTRUTURAIS



COMITÊ 303: Materiais não convencionais para Estruturas de Concreto, Fibras e Concreto Reforçado com Fibras

GT4: Caracterização de materiais não convencionais e fibras para reforço estrutural

Coordenador: Eng. Marco Antonio Carnio
Representante CTA: Sofia Maria Carrato Dinis

Patrocínio





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

AXIA

Inovação e Tecnologia

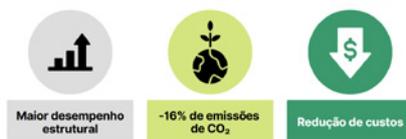
CONCRESERV
Concreto & Serviços

Axia & Sika: concreto sustentável e tecnologia aliadas na construção civil.

Aditivos de última geração e baixa pegada de carbono em cada traço de concreto.

O setor da construção civil enfrenta um grande desafio: reduzir o impacto ambiental sem comprometer o desempenho estrutural. Com o aumento contínuo dos investimentos em pesquisa e desenvolvimento, a Concrese, em parceria com a Sika, desenvolveu a Linha de Concreto Ecoeficiente AXIA, que reduz em até 16% as emissões de CO₂, mantendo a resistência e durabilidade exigidas pelo setor.

Com sua formulação inovadora e aditivos de última geração, ele possibilita a otimização de projetos estruturais, reduzindo a necessidade de materiais adicionais e contribuindo para construções mais leves e eficientes. Além disso, sua alta resistência mecânica e durabilidade garantem maior vida útil às edificações.



A Linha AXIA oferece uma ampla gama de traços desenvolvidos para otimizar o dimensionamento estrutural das obras, possibilitando a redução das seções dos elementos estruturais e da taxa de armadura. Com formulações avançadas, seus concretos podem atingir resistência característica à compressão (fck) de até 80 MPa e módulos de deformação secante iguais ou superiores a 42 GPa, proporcionando alta eficiência estrutural e desempenho mecânico superior.

Sika & Concrese: Aliadas na Construção Civil

A Sika fornece os aditivos e serviços essenciais para que a linha AXIA atinja sua máxima performance. Desde redutores de água de última geração, que reduzem o consumo de água sem comprometer a trabalhabilidade, até produtos complementares tais como aceleradores e redutores de retração, que garantem maior estabilidade volumétrica e resistência estrutural. Destaque especial é dado ao suporte oferecido pela Sika no processo de certificação e emissão das Environmental Product Declaration (EPD) de todos os concretos que compõe a linha sustentável Axia, garantindo assim maior transparência e responsabilidade.

Desenvolvimento das EPDs

CONCRESERV - SIKA



CONCRESERV
Concreto & Serviços

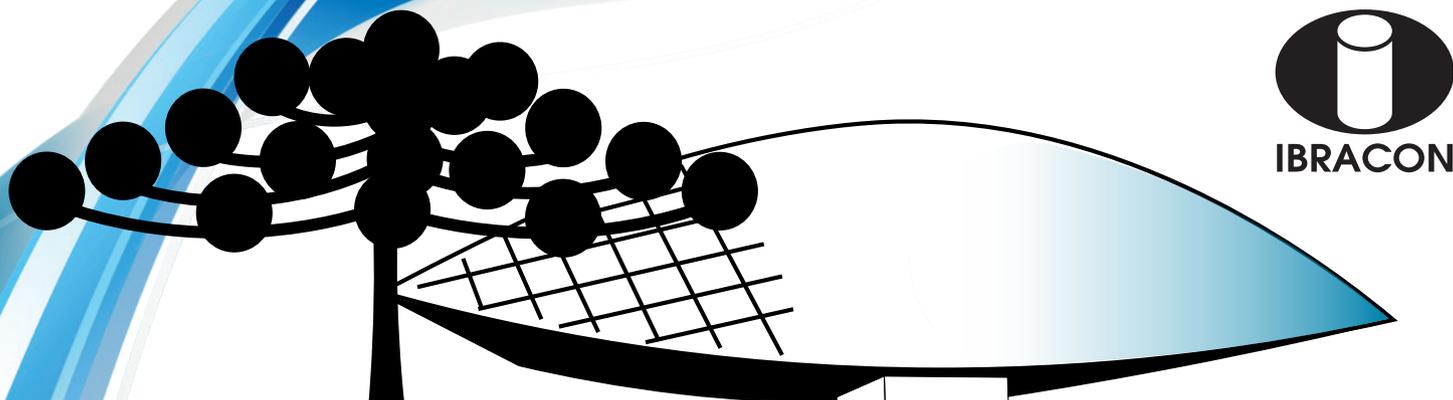
AXIA
Um produto do grupo CONCRESERV

CONCRESERV
Concreto & Serviços

CONCRESERV: Praça Alberto Lion, 366 - Cambuci
São Paulo - SP, 01515-000
Telefone: 4020-0100 | www.concrese.com.br | @concrese



SIKA BRASIL: Av. Alberto J. Byington, 1525 (Matriz) -
Osasco, São Paulo - SP, 06276-000
Telefone: 0800 703 7340 | bra.sika.com | @sika_brasil



66^o CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO

CURITIBA 2025

28 a 31 de Outubro

**Concreto: o material do passado,
do presente e do futuro**

PATROCÍNIO E EXPOSIÇÃO

- Estreite relacionamentos na Feira Brasileira da Construção em Concreto
- Associe sua marca ao maior evento técnico-científico sobre o concreto no país
- Apresente o que sua empresa vem fazendo em P&D&I no Seminário de Novas Tecnologias

PROGRAMAÇÃO

- Conferências com especialistas internacionais
- Seminários sobre temas emergentes
- Sessões técnico-científicas
- Cursos de qualificação profissional
- Concursos estudantis