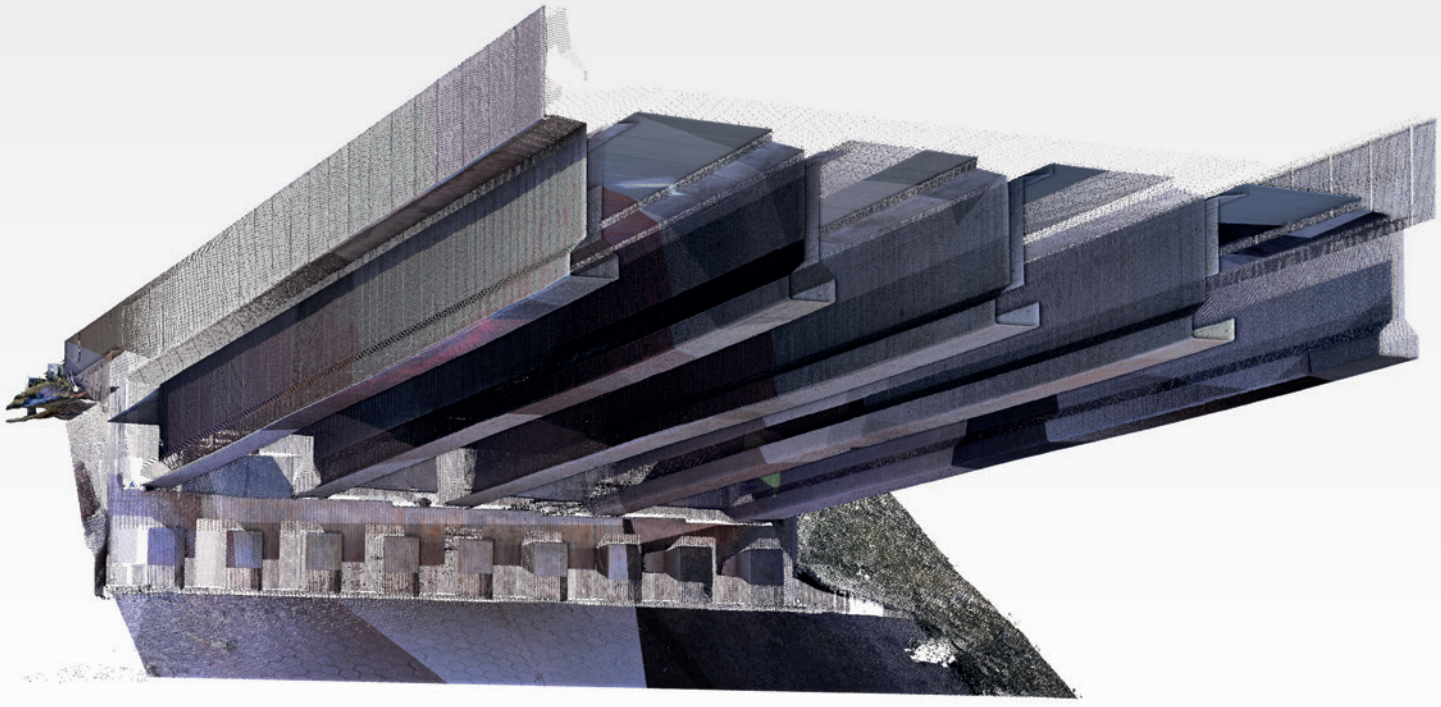
CONCRETO & Construções

Ano LII
114
ABR-JUN | 2024
ISSN 1809-7197
www.ibracon.org.br

IBRACON

CONCRETO NA ERA DIGITAL

COMO AS TECNOLOGIAS DIGITAIS VÊM IMPACTANDO O PROJETO, A EXECUÇÃO E A INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO?



PERSONALIDADE ENTREVISTADA

RAFAEL PILEGGI: REOLOGIA NA FORMULAÇÃO DE ARGAMASSAS E CONCRETOS SUSTENTÁVEIS

ALVENARIA ESTRUTURAL

CONFIABILIDADE DE LAJES DE EDIFÍCIO NA REMOÇÃO DE UMA PAREDE

PESQUISA E DESENVOLVIMENTO

SUSTENTABILIDADE NO DIMENSIONAMENTO DE PILARES CURTOS DE CONCRETO ARMADO

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

JUNTE-SE A ELAS

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

Sumário

ESTRUTURAS EM DETALHES

17 BIM: uma inovação disruptiva na construção civil

24 Vantagens do controle da desforma de paredes de concreto pelo método da maturidade

INDUSTRIALIZAÇÃO DA CONSTRUÇÃO

32 Impressão 3D: como essa tecnologia vem impactando atualmente a construção civil?

37 Confiabilidade de lajes de edifício em alvenaria estrutural na ocorrência de remoção de uma parede

PESQUISA E DESENVOLVIMENTO

43 Avaliação comparativa do comportamento térmico de paredes de concreto construídas por impressão 3D

49 Pilares curtos de concreto armado dimensionados de acordo com as normas ABNT NBR 6118:2014, ABNT NBR 6118:2023, *fib* Model Code 2020 e Eurocode 1992-1-1:2023: Estudo da sustentabilidade

INSPEÇÃO E MANUTENÇÃO

58 Levantamentos digitais como suporte à inspeção em edificações: uma aplicação no Acquário Ceará

65 Inspeção de estruturas de concreto afetadas por reações expansivas com o uso de drone

Créditos de Capa
Modelo digital de viaduto escaneado a laser para verificação de deformações geométricas. Trimble

Seções

5 Editorial
8 Converse com o IBRACON
9 Personalidade Entrevistada: Rafael Pileggi
29 Entidades da Cadeia
72 Encontros e Notícias
81 Acontece nas Regionais

CONCRETO & Construções

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 distribuida gratuitamente aos associados

EDITOR-CHEFE
→ Prof. Enio Pazini Figueiredo

JORNALISTA RESPONSÁVEL
→ Fábio Luís Pedroso — MTB 41.728
fabio@ibracon.org.br

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

PROJETO GRÁFICO E DTP
→ Gill Pereira
gill@ellementto-arte.com

ASSINATURA E ATENDIMENTO
office@ibracon.org.br

GRÁFICA
Elyon
Preço: R$ 12,00

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

© Copyright 2024 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 / 1º TESOUREIRO

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

JÉSSIKA MARIANA PACHECO MISKO
DIRETORA DE CURSOS

CÉSAR HENRIQUE SATO DAHER
DIRETORA DE CERTIFICAÇÃO DE PESSOAL

ALEXANDRE BRITEZ
DIRETOR DE MARKETING

JÉSSICA ANDRADE DANTAS
DIRETORA DE ATIVIDADES ESTUDANTIS

I B R A C O N
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)
→ Fabiano Ferreira Chotoli (qualidade e desempenho)
→ Lydio dos Santos B. de Mello (normalização)
→ Manfredo Belohuby (cimentos e aditivos)
→ Marco Carnio (estruturas e materiais não convencionais)
→ Paulo Campos (Arquitetura)
→ Paulo Fernando Araújo da Silva (controle da qualidade)
→ Paulo Helene (tecnologia do concreto)
→ Públio Penna Firme Rodrigues (pisos e pavimentos)
→ Ricardo Couceiro Bento (projeto estrutural)
→ Vinicius Caruso (saneamento)

PRESIDENTE DO COMITÊ CIENTÍFICO
Gláucia Dalfré

COMITÊ CIENTÍFICO MEMBROS
→ Andrielli Morais (UFG)
→ Wellinton Andrade da Silva (UFCAT)
→ Ana Elizabete Jacintho (PUC-Campinas)
→ Cristiane Bueno (UFSCAR)
→ Emerson Felix (UNESP)
→ Fernanda G. da Silva Ferreira (UFSCAR)
→ Leandro Mouta (UNICAMP)
→ Luiz Carlos de Almeida (UNICAMP)
→ Marcelo Ferreira (UFSCAR)
→ Marcelo H. Farias de Medeiros (UFPR)
→ Margot Fabiana Pereira (UFSCAR)
→ Maria Tereza da Silva Melo (UFCAT)
→ Mariana Posterlli (UFMT)
→ Nadia Carazim (PUC-Campinas)
→ Ricardo Carrazedo (USP/São Carlos)
→ Roberto Christ (UNISINOS)
→ Rodrigo de Melo Lameiras (UNB)
→ Rogério Carrazedo (USP/São Carlos)
→ Wallison Medeiros (UFCAT)
→ Wellington Andrade da Silva (UFCAT)

Construções de concreto **na era digital**

Estamos na Era Digital, e avançando rapidamente com a adoção de novas tecnologias. Os atuais avanços científicos e tecnológicos mostram o que o ser humano é capaz de fazer. E na construção civil, que é vista tradicionalmente como atividade prática e pesada, não é diferente, pois a tecnologia tem desempenhado um papel crucial na modernização e escalabilidade, desde a produção de insumos até a manutenção de infraestruturas.

O processo de fabricação do cimento Portland, principal insumo da cadeia, tem sido beneficiado há décadas, com ganhos de produtividade e redução do impacto ambiental. No passado, onde os processos de formulação eram arcaicos e dependiam de demorados resultados analíticos por via úmida, foram digitalizados por meios computacionais, os quais são alimentados por resultados analíticos instrumentais, mais rápidos e precisos. Fábricas modernas têm realizado análises em pontos do processo em tempo real e utilizando inteligência artificial para tomada de decisões. A Cimento Apodi, em parceria com a UFC, por exemplo, implementaram uma plataforma inteligente de gerenciamento do sistema de forno de cimento da fábrica da Apodi em Quixeré (CE), que faz uso de algoritmos de Inteligência Artificial, automatizando o moinho e o forno de clínquer, com o objetivo de reduzir as paradas do forno e o consumo de energia e de água e aumentar a produtividade – introduzindo processos no conceito Indústria 4.0 na produção.

Em termos de elaboração de projetos, tem-se o conceito *BIM* (*Building Information Modeling* ou Modelagem da Informação da Construção), que é uma metodologia inovadora que envolve a criação e gestão de informações digitais sobre uma construção durante todo o seu ciclo de vida, e integrada para o planejamento, projeto, construção e gestão de edifícios e infraestruturas, que melhora a eficiência, reduz erros e otimiza a colaboração entre todos os envolvidos no projeto. Inclui aspectos tais como:

- **modelagem 3D**, que utiliza modelos tridimensionais para representar graficamente e geometricamente construções e edificações;
- **informações de forma integradas**, que incorpora dados detalhados sobre os componentes do edifício, tais como materiais, especificações técnicas, dados de desempenho e custos, o que facilita a análise e a tomada de decisões informadas durante e pós projeto;
- **conexão**, permitindo a interação entre arquitetos, engenheiros, construtores e outros profissionais da construção, de forma colaborativa em um modelo centralizado, e no qual todos tenham nível de acesso e estruturação, garantindo que as mudanças sejam comunicadas e delineadas dentro de padrões e regras pré-estabelecidas;
- **análises e simulações**, onde é possível realizar análises e simulações no ponto de vista de desempenho (energético, higrotérmico e acústico), análise estrutural, planejamento de construção e detecção de conflitos, que ajudam a identificar e resolver problemas antes mesmo da construção começar;
- **gestão do ciclo de vida**, auxiliando a operação e manutenção do edifício, sendo atualizada com informações sobre reparos, manutenção e alterações, facilitando a gestão do edifício ao longo de sua vida útil.

Veja reportagem especial nesta edição sobre o BIM: breve história de seu desenvolvimento, seus aspectos conceituais, tecnológicos e gerenciais, bem como seu impacto no setor construtivo.

Além do *BIM*, os projetistas já são de longa data beneficiados pelo uso de ferramentas computacionais de cálculos e simulações estruturais, os quais são variados

e especializados para diferentes complexidades e tipos de análises e projetos de edifícios e obras de arte, oferecendo ferramentas avançadas para análises estática e dinâmica, sísmica e estrutural avançada, bem como apresentar cálculo e detalhamento de estruturas de concreto armado, fundações, piso de concreto pós-tensionados e lajes.

No tocante aos processos de produção de concreto, não é diferente. As usinas integradas de concreto, munidas de sistemas computacionais inteligentes e parque fabril robusto, permite a concretagem de grandes volumes de concreto com dosagens homogêneas e controladas. Devido ao elevado congestionamento do tráfego nas grandes cidades, o controle das propriedades se faz necessário em alguns casos. O *VERIFI®* é um exemplo de sistema automatizado que monitora e ajusta a consistência (reologia) do concreto em tempo real durante o transporte em caminhões betoneira, por meio de sensores instalados no caminhão para medir continuamente a consistência do concreto e ajustar a mistura conforme necessário.

Em obra, os meios digitais também estão presentes, tanto no controle de entrega de concreto fresco, registros de histórico e até mesmo liberação de faturamentos, em uma sinfonia em franco amadurecimento. Maneiras não destrutivas, tais como o Método da Maturidade do Concreto, que utiliza a temperatura real do concreto na estrutura para estimar a sua resistência no local, é outro exemplo interessante e eficaz de acompanhar o desenvolvimento da resistência à compressão, alternativa aos corpos de prova cilíndricos curados em câmara úmida e com temperatura e umidade constantes (Leia artigo nesta edição). Outros instrumentos eletrônicos de inspeção, tais como pacômetro, ultrassom, esclerômetro, radar *GPR* (*Ground Penetrating Radar*), entre outros, já são per si ferramentas muito úteis para inspecionar e verificar o desempenho do concreto. Sensores inseridos em estruturas, a fim de serem monitoradas à distância em termos de corrosão de armadura e movimentação, é uma realidade já observadas em obras de arte de grande porte, tais como pontes, viadutos, portos, usinas nucleares, entre outros.

Se considerá-las embarcadas, instrumentações associada a meios digitais tem-se a expansão desse universo para a inspeção de obras por meio de veículo aéreo não tripulado (*VANT*), também conhecido como drone e veículo terrestre não tripulado. São inspeções robóticas que envolvem o uso de veículos não tripulados controlados remotamente, equipados com sensores e câmeras, para realizar inspeções em regiões aéreas, terrestres e subterrâneas de difícil acesso ou perigosas. De forma a salvaguardar a vida humana, protegendo os profissionais do perigo de trabalhos em altura e em espaços confinados, aquáticos, com riscos de explosões e sob pressão, essa abordagem oferece várias vantagens em termos de segurança, eficiência e acessibilidade em comparação com inspeções humanas tradicionais. Operar inspeções diretamente de notebooks ou tablets era tipo como ficção científica há décadas atrás – hoje é uma realidade (Confira artigo nesta edição).

A impressão 3D, com seu potencial para reduzir o desperdício de material e permitir construções mais eficientes e personalizadas, é um exemplo claro de como a tecnologia pode transformar e beneficiar o setor da construção civil. Essa tecnologia está sendo utilizada para criar estruturas complexas que seriam difíceis ou impossíveis de construir com métodos tradicionais. Além disso, este método permite uma personalização extrema, onde cada componente pode ser adaptado para necessidades específicas sem custo adicional significativo. Grandes players do setor, como a Apis Cor e a ICON, estão imprimindo casas inteiras em horas, destacando a rapidez e eficiência desse método. Projetos de pesquisa como o PDIP – IPT (junto a FAPESP), desenvolvido por pesquisadores do IPT e da Poli Civil/USP, estão na vanguarda dessa transformação. Eles focam na pesquisa aplicada em Transformação Digital, incluindo impressão 3D de cimentícios, dentro dos eixos de Manufatura Avançada e Cidades Inteligentes e Sustentáveis. Outro exemplo é o *Hubic* (Hub de Inovação e Construção Digital) é outro exemplo de iniciativa que celebra convênio de cooperação técnica junto a USP, ABCP e SNIC para o desenvolvimento e a criação de ambientes cooperativos de inovação especializados na promoção

de soluções inovadoras de construção digital, tais como processo por meio de impressão 3D.

A digitalização e *IoT* (Internet das Coisas) nos espaços habitáveis é sem-fronteiras. Sistemas de segurança, câmeras, eletrodomésticos e demais *utilities* interligados a uma gerenciadora doméstica acionável à distância, por controle remoto ou mesmo simples comando de voz, tem ocupado destaque no hall de desejo dos usuários amantes de tecnologia.

A era da digitalização tem sido também uma forte aliado forte para a diminuição de impactos ambientais ao longo do ciclo de vida. A união maciça desses dados, trabalhados de maneira inteligente, otimizada e rastreável, permitirá, por exemplo, estimar de forma eficiente a pegada de carbono das construções, de forma a subsidiar incentivos fiscais, geração de compensações, entre outros benefícios. Construções duráveis e sustentáveis são o mote da indústria da construção civil, e a digitalização a grande ferramenta. Catalogar e disponibilizar eletronicamente indicadores de demanda de energia primária e levantamento de emissão de carbono em plataformas, tais como o *SIDAC* ou o *CeCarbon* são exemplos de ações que permite calcular indicadores de desempenho ambiental de produtos de construção com base em dados brasileiros e nos conceitos da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

Em suma, em todos as etapas da construção civil há exemplos de que a adoção de tecnologia é um caminho irreversível e sem o qual não avançaremos para superar dificuldades, diferenças, conflitos e necessidades. E sendo um dos materiais mais importantes e consumidos no mundo, o concreto segue solidário a essa tendência.

FABIANO FERREIRA CHOTOLI

Gerente Técnico do Laboratório de Materiais para Produtos de Construção (LMPC)

IPT — Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A

COMBO

Materiais de Construção e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais (Vol1 e Vol2) **+** No Prumo

ibracon.org.br/loja

IBRACON

O **IBRACON** *FAZ* ***ANIVERSÁRIO*** *MAS* ***VOCÊ*** *É QUEM RECEBE O* ***PRESENTE!***

HOMENAGENS PÓSTUMAS

ENGENHEIRO CARLOS FREIRE MACHADO

No último dia 16 de maio, nos deixou o engenheiro Carlos Freire Machado, pioneiro no emprego e difusão do concreto protendido no Brasil.

Carlos Machado se formou em engenharia civil na antiga Escola Nacional de Engenharia, hoje Universidade Federal do Rio de Janeiro, em 1945. Recém-formado foi convidado a integrar os quadros da empresa Sociedade Técnica para Utilização do Protendido (STUP), montada pelos franceses no Brasil para a execução da Ponte do Galeão, projetada por Eugène Freyssenet, em concreto protendido, com comprimento total de 316 m, recorde mundial na época e primeira ponte em concreto protendido do Brasil.

Posteriormente, como diretor técnico da STUP, Carlos Machado foi o responsável pela execução de outras pontes brasileiras em concreto protendido, como a Ponte Petrolina-Juazeiro, entre Bahia e Pernambuco, em 1956, e a ponte sobre o rio Tietê, nos municípios de Ibitinga e Iacanga (SAP).

O Eng. Machado chefiou a fabricação das ancoragens de concreto do sistema de protensão da STUP e intermediou a atuação da empresa Campenon Bernard (controladora da STUP) na construção da Ponte Rio-Niterói, que forneceu as formas de aço, o projeto e fabricação das treliças de montagem.

Além de pontes, participou como diretor da STUP, onde ficou até 1980, da construção da barragem de Ernestina (RS) e do cais da base naval de Recife (PE), entre outras obras.

Machado foi professor de concreto protendido no Instituto Militar do Rio de Janeiro, na Escola de Engenharia da Universidade Gama Filho e na Universidade Federal do Rio de Janeiro. Ele foi diretor e vice-presidente da Associação Brasileira de Pontes e Estruturas.

Com 101 anos, ele deixa filhos, netos e bisnetos.

COMBO

Concreto: Ciência e Tecnologia - 2 Vol. + Prática Recomendada - Inspeção de Estruturas de Concreto Visando Avaliar Manifestações da Reação Álcali-Agregado(RAA) e Etringita Tardia(DEF)

R$ 300 NÃO SÓCIOS

R$ 200 SÓCIOS

ibracon.org.br/loja

IBRACON

O **IBRACON** *FAZ* ***ANIVERSÁRIO*** *MAS* ***VOCÊ*** *É QUEM RECEBE O* ***PRESENTE!***

Rafael Giuliano **Pileggi**

Rafael Pileggi é apaixonado pela engenharia de materiais, área na qual se graduou (1992), fez mestrado (1994-1996) e doutorado (1996-2001) na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Especializou-se em reologia de materiais cimentícios refratários com reduzidos teores de água e cimento, desenvolvendo métodos para caracterização do comportamento reológico de concretos.

Suas pesquisas e conhecimentos em reologia o trouxeram, em 2003, para o departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, para, como pesquisador, contribuir com o desenvolvimento do tema de reologia aplicada a cimentícios no setor de construção civil, visando desenvolver estratégias de formulação de argamassas e concretos sustentáveis, com baixo teor de cimento e com incorporação de resíduos de mineração.

Ainda como pesquisador, criou, em 2005, a primeira disciplina de pós-graduação no tema de reologia de suspensões reativas aplicadas à construção civil na Escola Politécnica da USP, tendo sido efetivado docente USP em 2008. Após suas pesquisas sobre argamassas, concretos com incorporação de resíduo de bauxita, concretos ecoeficientes, foi para a Suíça, em 2019, para estudar projetos de fabricação digital de concreto.

Voltou ao Brasil, sendo um dos responsáveis pela implementação do Laboratório de Construção Digital (DCLab), onde coordena a equipe de pesquisa em materiais para o projeto de impressão 3D do hubIC, hub de inovação na Construção formado pela parceria entre Escola Politécnica da USP, Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC).

IBRACON **TRACE UM BREVE PANORAMA DE SUA CARREIRA PROFISSIONAL, DESDE A ESCOLHA DA ENGENHARIA DE MATERIAIS, PASSANDO PELO SEU ENVOLVIMENTO COM AS PESQUISAS EM REOLOGIA, ATÉ SUA COORDENAÇÃO DE PROJETOS DE FABRICAÇÃO DIGITAL DE COMPONENTES CIMENTÍCIOS.**

| **RAFAEL GIULIANO PILEGGI** | Escolhi engenharia por vocação. Eu sou de Ribeirão Preto e entrei na Universidade Federal de São Carlos em 1988. Prestei vestibular para engenharia mecânica, eletrônica e de materiais. Passei em todas e optei pelos materiais a partir de uma reportagem televisiva sobre desenvolvimento de cerâmicas odontológicas, que me encantou. Foi paixão mesmo! Me encantei pela área de cerâmica, que contempla a categoria dos materiais cimentícios, apesar da engenharia de materiais brasileira geralmente não tratar de materiais cimentícios.

Me formei em 1992, quando explodiu o mercado de concretos refratários com baixo teor de cimento e baixo teor de água. Meu conhecimento em reologia começou no mestrado quando fui trabalhar com concretos autoadensáveis refratários, por eles terem uma restrição técnica do teor de cimento aluminoso ser até 5% da massa total, com os melhores concretos tendo 1% de teor de cimento, o que é obtido por meio de estratégias de dosagem por dispersão e empacotamento de partículas. No doutorado, aprofundei os estudos em distribuição

> OS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DE TRABALHABILIDADE CONVENCIONAIS, COMO *SLUMP TEST*, SÃO AINDA USADOS, MAS COMO FERRAMENTAS DE VALIDAÇÃO, NÃO SENDO EFETIVOS COMO FERRAMENTAS DE DESENVOLVIMENTO DE FORMULAÇÕES COM REDUZIDO TEOR DE CIMENTO E ÁGUA

do tamanho de partículas, aditivação e controle reológico das formulações por meio do desenvolvimento de novos métodos de caracterização de trabalhabilidade para concretos de baixíssimo teor de cimento, em específico reometria de concreto. Os ensaios de caracterização de trabalhabilidade convencionais, como *Slump Test*, são ainda usados, mas como ferramentas de validação, não sendo efetivos como ferramentas de desenvolvimento de formulações com reduzido teor de cimento e água.

Por ter esse domínio do tema da trabalhabilidade, em 2003 fui convidado a integrar o grupo de pesquisa do Prof. Vanderley John e Profª. Maria Alba Cincotto na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Meu objetivo era desenvolver materiais cimentícios com baixíssimo teor de água, desde o concreto fluido até o concreto seco, com essa reologia mais refinada, com esses novos métodos de formulação, que possibilitam prever o comportamento do concreto no estado fresco, não apenas quanto às resistências mecânicas.

Trabalhamos muitos anos com argamassas, desenvolvemos novas técnicas de caracterização de trabalhabilidade, como o *Squeeze Flow*, que avalia o espalhamento do material sobre a superfície, acumulando conhecimento para avançarmos para os cimentos com baixo teor de clínquer, fazendo convênios com indústrias cimenteiras, e avançamos para os concretos com baixo teor de cimento para qualquer família de concreto – do mais fluido ao mais seco.

Minha história com concretos e argamassas com baixos teores de cimento e meu background em reologia são, portanto, alinhados com as necessidades da impressão 3D de paredes e pilares em materiais cimentícios ecoeficientes, sabendo que o sucesso dessa tecnologia é totalmente dependente do comportamento reológico do material. Lembrando que reologia é a ciência que estuda como qualquer matéria flui quando submetida a esforços.

IBRACON **Como a reologia torna isto possível – desenvolver com precisão uma argamassa, um concreto, com características adequadas para imprimir uma parede?**

| **RAFAEL GIULIANO PILEGGI** | Nosso grupo conseguiu desenvolver concretos e argamassas comerciais reduzindo o consumo de cimento em até 50% e o teor de água proporcionalmente, mas mantendo o desempenho. Os materiais cimentícios para impressão 3D são o resultado reológico mais sofisticado deste trabalho.

Partimos do conceito de que o comportamento no estado endurecido é definido pela microestrutura da argamassa e do concreto no estado fresco na primeira hora da formulação. É nesta primeira hora que precisa ser definido o teor de água e de aditivo na formulação.

Medimos as propriedades do material em momentos reológicos diferentes – na mistura, no transporte, no bombeamento e na moldagem, para, baseado nos modelos de mobilidade das partículas, dizer qual é o melhor teor de água, quais matérias-primas devem ser selecionadas, para fazer as formulações eficientes.

O projeto da impressão de uma cozinha funcional completa, que estamos desenvolvendo no hubIC, é um benchmark mundial para uma parede impressa continuamente com uma argamassa de 288 kg/m^3, em quatro horas, que atinge mais que 40 MPa de resistência à compressão aos 28 dias. Ainda não conhecemos quem conseguiu fazer igual, com menos de 350 kg/m^3.

IBRACON **Quanto tempo levou e qual foi o processo de aprendizado?**

| **RAFAEL GIULIANO PILEGGI** |

O estudo do material teve que ser acoplado ao resto do sistema: desenhar no computador, dominar os equipamentos e formular o traço. Todo o processo levou dois anos, sendo que a formulação do concreto levou seis meses.

Com o processo dominado, estabelecemos uma dinâmica de treinamento e aprendizado com os pesquisadores internos do grupo de trabalho na cozinha. Estimulamos que desenvolvessem peças conceituais impressas antes de partimos para a cozinha propriamente dita. Cada peça representa um "pedaço" do que será impresso na cozinha. Sendo assim, nessa dinâmica aprendemos muito sobre todos os tópicos envolvidos no sucesso da impressão de um componente.

Em relação às empresas parceiras, pelo grau de inovação do projeto e

o desconhecimento do mercado, o hubIC entendeu que tem um papel de avançar no desenvolvimento da tecnologia e compartilhar as experiências, para que as empresas consigam, a partir disso, explorar as diversas aplicações dentro de sua realidade.

O hubIC atualmente conta com um grupo de 37 empresas, entre cimenteiras, siderúrgicas, empresas de aditivos, pintura, concreteiras, construtoras, produtores de argamassas, instalações elétricas, projetista, entre outras.

Desse total, 21 participam do grupo de 3D do hubIC e sugeriram que fizéssemos a concepção e impressão de uma cozinha funcional com a dimensão de 2,50 m x 3 m, com 2,80 de altura e 10 cm de espessura de parede. Mais do que isso, estabelecemos o desafio de desenvolver soluções para paredes de concreto a custos competitivos com a realidade brasileira. Isso nos forçou a eliminar a opção de usarmos aditivos e matérias-primas caras. Visando ecoeficiência e custo baixo, a formulação do material assumiu como paradigma não ter mais de 300 kg/m3 de cimento. Em relação aos equipamentos, a máquina de impressão precisava ser barata e leve, capaz de imprimir um cômodo e a tecnologia de misturador e bomba deveria ser acessível no Brasil. Ajustamos o projeto e o processo para a rota de minimização de custo. Com essas condições de contorno,

Parede impressa com três fios de concreto no Hubic

meu time de materiais do Laboratório de Microestrutura e Ecoeficência de Materiais da Escola Politécnica da USP, liderado pelo Dr. César Romano, e a startup Portal 3D, montada pelos meus alunos para pilotar os equipamentos e coordenar os processos, toparam o desafio que propus de imprimir uma parede de forma contínua de 1,5 m de altura, sem acelerador de pega. Normalmente, sem os aceleradores de pega, as empresas imprimem de meio em meio metro, parando o processo para deixar o concreto endurecer. Com o novo robô de 6 eixos e o trilho que devem chegar em julho, conseguiremos subir uma parede de até 3,0 m de altura com 6 m de comprimento, o dobro do que conseguimos fazer agora.

IBRACON E QUANTO AS OUTRAS PARTES DA COZINHA: PAVIMENTOS, PILARES E VIGAS?
| **RAFAEL GIULIANO PILEGGI** | A parede impressa não conta com reforços, ela precisa ser autoportante. O segredo está na formulação do material e na rota: empacotamento de partículas, aditivos, vazão de bomba e desenho do fatiador. Tudo isso foi aprendido. O modo que se faz pode contribuir para

> AS EMPRESAS QUE PARTICIPAM DO GRUPO DE 3D DO HUBIC SUGERIRAM QUE FIZÉSSEMOS A CONCEPÇÃO E IMPRESSÃO DE UMA COZINHA FUNCIONAL COM A DIMENSÃO DE 2,5 M X 3 M, COM 2,8 DE ALTURA E 10 CM DE ESPESSURA DE PAREDE

> OS REQUISITOS SÃO SOLUÇÕES COM CUSTO ECONOMICAMENTE COMPETITIVO: PAREDES DE CONCRETO MAIS BARATAS, COM SISTEMA CONSTRUTIVO MAIS PRODUTIVO, MENOS INTENSO EM MÃO DE OBRA

subir ou derrubar a parede. Tudo isso foi aprendido.
Construída as paredes, a casa receberá reforços estruturais, pois não há código de normalização que permita o uso de estrutura 3D como um único elemento estrutural. Quem fez o projeto desses reforços foi o Eng. Francisco Graziano. Ele desenvolveu o projeto estrutural da cozinha considerando esses reforços estruturais.
A laje e o pavimento devem ser em concreto de alto desempenho.
O 3D é material, projeto, processo e sistema.
Importante enfatizar que esse é um grande projeto em equipe que servirá de embrião para essa tecnologia no país. Minha função é coordenar a iniciativa e atuar na parte de desenvolvimento dos materiais ecoeficientes. O pessoal de design, modelagem paramétrica e desenvolvimento do fatiador é uma parceria da startup Portal 3D com a Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da USP, coordenado pelo Prof. Arthur Lara e o Eng. Fernando Simões. O pessoal da mecatrônica envolve os professores Emilio Nelly Silva, Marcos Tsuzuki, Renato Picelli, além do Eng. Francisco Oliveira, que auxiliam na modelagem por otimização topológica e nos temas de robótica. A startup é pilotada pelos acadêmicos Victor Sakano, Gabriel Brasileiro, Yuri Confessor e Matheus Confessor, que operam toda a tecnologia, além de desenvolverem equipamentos, softwares e componentes, já atua comercialmente no mercado. Recentemente incorporamos ao time alguns alunos de iniciação científica oriundos da equipe Concreto Poli, entre outros, já preparando as futuras gerações para essa nova tecnologia.

Acadêmicos da startup Portal 3D posam em frente à parede de concreto impressa no Hubic

IBRACON QUAL É O PRAZO PARA ENTREGA DA COZINHA?
| **RAFAEL GIULIANO PILEGGI** | O tempo efetivo de impressão é menos de 20 horas. Devemos imprimir material suficientes para umas três cozinhas, cujos componentes serão oferecidos para os outros hubickers implantarem e testarem seus sistemas: caixilharias, conexões, telhado, assentamentos, pintura etc. Isto deve ser encerrar em julho e a cozinha deve ficar pronta no segundo semestre do ano. Com a cozinha pronta, começa uma segunda fase do projeto, envolvendo docentes pesquisadores da Poli/Civil, os professores Renata Monte (Construção Civil) e Luiz Bittencourt (Estruturas e Fundações), além de contarmos com o apoio do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT), iniciando estudos de avaliação de desempenho do sistema construído, criando bases para um futuro processo de certificação. O sucesso da iniciativa servirá também para abrir a discussão de códigos de normalização para que as soluções sejam utilizadas pelas empresas envolvidas no projeto. Os requisitos são soluções com

custo economicamente competitivo: paredes de concreto mais baratas, com sistema construtivo mais produtivo, menos intenso em mão de obra.
De prático, hoje temos o 3D mais barato e mais sustentável, referência mundial. Fazemos paredes impressas de concreto com metade do teor de cimento que as referências internacionais.
Nossa tecnologia é 100% nacional, sendo inspirada em soluções 3D de sucesso no exterior, como os desenvolvidos no DFabLab da ETH de Zurique, na Suíça, onde fiz meu pós-doutorado em 2019. Não trabalhamos com uma receita 3D, mas com um conceito 3D, que poderá ser ajustado para diferentes locais do país, com suas matérias-primas locais.

IBRACON Quem (empresa/academia) usou pela primeira vez a impressão 3D em concreto e com qual finalidade? De lá para cá, como empresas e academia contribuíram para o avanço da tecnologia?

| **RAFAEL GIULIANO PILEGGI** | A história de impressão 3D em concreto começou no Estados Unidos quando uma empresa chamada "Contour Craft" desenvolveu sua primeira impressora visando construção autônoma no espaço. Sério, a ideia começou em fazer obras na Lua, Marte etc. Logo em seguida, surgiram iniciativas parecidas na Itália e Inglaterra. A primeira cátedra acadêmica surgiu na Suíça, na universidade ETH Zurique, onde fui professor convidado em 2019. Depois disso, explodiu, com forte ênfase na Dinamarca, Estados Unidos, Europa em geral, países asiáticos etc. Hoje a quantidade de universidades e empresas no tema é gigante. No início, a tecnologia embrionária foi focada em construção de elementos pré-fabricados, avançando pra casas e pontes, sendo hoje uma realidade até para torres eólicas e outros elementos de infraestrutura. O desafio do momento tem sido a verticalização de edifícios. Um case superinteressante de colaboração universidade e empresas é a DFab House, construída no EMPA, Suíça. Lá, tudo foi feito com técnicas de manufatura aditiva e diversos produtos já estão disponíveis no mercado.

IBRACON O desenvolvimento da impressão 3D em concreto que vem sendo atualmente aplicada é majoritariamente da iniciativa privada ou de parcerias entre academia e setor industrial? Esta é a tendência para o futuro?

| **RAFAEL GIULIANO PILEGGI** | Diria que é um desenvolvimento mútuo, mas com forte ênfase para o ambiente empresarial. Claro que diversas companhias estão trabalhando em suas tecnologias 3D, mas a efervescência acadêmica no tema tem sido exuberante. Não por acaso, o número de artigos sobre o tema tem aumentado exponencialmente ao longo dos anos. Diria que a tecnologia vem das empresas e a ciência vem da academia. O mais importante é verificar que o sucesso tem sido construído com forte interface entre universidades e empresas.

Hoje, a grande parte da minha pesquisa acadêmica é usar as ferramentas da reologia para desenvolver soluções que incorporem subprodutos industriais, sobretudo resíduos de mineração: cobre, alumínio, níquel, entre outros. Isto para qualquer concreto, inclusive para impressão 3D.
A relevância da impressão 3D tem crescido aceleradamente no mundo todo. Foi notável verificar que no último congresso do ACI (Instituto Americano do Concreto), um terço da agenda era sobre impressão 3D, sendo a maior parte do tema sobre desempenho estrutural. Um trabalho interessante mostrou que sistemas estruturados em 3D, com pilar e viga, são bastante resistentes a terremotos. Ainda não se não se sabe o desempenho de peças impressas em situação de incêndio, mas esta questão deve estar resolvida em breve.
Hoje, não tem código normativo para 3D e há uma discussão se deve ser desenvolvido agora, se devemos esperar mais alguns anos, quando a tecnologia estiver consolidada. Até lá, quem quiser comercializar seu produto ou sistema tem que tirar a referência técnica da solução.

IBRACON Quais companhias brasileiras e estrangeiras têm aplicado a impressão 3D em obras? Em quais obras e para quais propósitos?

| **RAFAEL GIULIANO PILEGGI** | Estrangeiras inúmeras, tanto em peças arquitetônicas, como em obras residenciais e em todos os continentes

> NO BRASIL, JÁ HÁ CONSTRUTORAS IMPRIMINDO SEUS PRIMEIROS PROTÓTIPOS DE CASAS, COMO EM MINAS GERAIS E NO RIO GRANDE DO SUL

> O 3D TEM POTENCIAL DE COMBINAR DESMATERIALIZAÇÃO, DESCARBONIZAÇÃO, AUMENTO DE PRODUTIVIDADE, ELIMINAÇÃO DE FÔRMAS, REDUÇÃO DE CUSTOS, GEOMETRIAS COMPLEXAS, DIMINUIÇÃO DE REFORÇO ARMADO, AUMENTO DA DURABILIDADE ETC.

do mundo. Uma importante obra que exemplifica o esforço em desenvolver a tecnologia e o modelo de negócio é um conjunto de 100 casas que estão sendo impressas pela empresa Icon nos EUA/Texas, que levantou 500 milhões de dólares em fundos de investimentos nos últimos três anos. No Brasil, já há construtoras imprimindo seus primeiros protótipos de casas, como em Minas Gerais e no Rio Grande do Sul. Em São Paulo, a Statup Portal 3D, incubada na USP e no Hubic, já está produzindo componentes e protótipos para obras de construtoras mineiras e paulistas. Em outras palavras, o processo 3D começou no Brasil.

IBRACON **Na sua visão, a impressão 3D tem potencial de uso em quais nichos do setor construtivo? Em quanto tempo, essa tecnologia estará consolidada? Quais os desafios a vencer?**

| **RAFAEL GIULIANO PILEGGI** | Essa é a grande pergunta. A cada semana novas aplicações são reportadas na literatura e nas mídias eletrônicas. Desde instalações para infraestrutura urbana, a grandes elementos de torres e pontes. Casas, edifícios, mobiliário urbano, defensas oceânicas bioreceptivas, pisos, pavimentos, são exemplos já repostados de casos de sucesso em impressão 3D. É claro que não se imagina a construção virando 100% 3D, mas com certeza diversas aplicações serão encontradas como viáveis. Lembrando que 3D tem o potencial de combinar: desmaterialização, descarbonização, aumento de produtividade, diminuição de demanda por trabalhos manuais, projetos multifuncionais, eliminação de fôrmas, redução de custo, geometrias complexas, novos cimentos bicomponentes, diminuição de reforço armado e aumento de durabilidade.

IBRACON **Como os parceiros do hubIC se beneficiam no projeto de impressão 3D?**

| **RAFAEL GIULIANO PILEGGI** | Como o projeto é aberto e pré-competitivo, nenhuma empresa vai saber qual é a nossa formulação desenvolvida para a impressão 3D. Nossa devolutiva aos parceiros que são os produtores de massa é dizer que a formulação precisa ter tal comportamento reológico, teor de ar, densidade, resistência mecânica e módulo de elasticidade, sem abrir os "guidelines" da formulação. Caso uma empresa queira desenvolver sua formulação conosco, isso deverá ser atrelado ao um convênio com a Universidade de São Paulo. O espírito do projeto desenvolvido no hubIC é beneficiar a todos os parceiros com informações, para que cada qual trabalhe com suas próprias soluções. Hoje, temos vários possíveis formuladores de materiais no hubIC. A startup incubada na USP, por exemplo, está desenvolvendo suas próprias massas por meio de um convênio de pesquisas com a USP. O que ela vai fazer com este conhecimento – vender, licenciar ou terceirizar – é uma decisão dela. Nosso compromisso é fazer a supervisão acadêmica.
Nossa atuação em impressão 3D ocorre em dois momentos: um é o que se entrega para os parceiros no âmbito pré-competitivo do hubIC; o outro é a pesquisa científica por trás, que continua independente do hubIC e gera publicações científicas. Importante mencionar que o hubIC conta com uma equipe gestora operacional dedicada que apoia e participa da gestão e implantação de cada projeto. No caso de 3D, contamos com o envolvimento do Carlos Massucato, Eliana Taniguti, Letícia Macelari e Júlia da Silva. Lembrando que, uma vez por mês, organizamos visitas abertas ao laboratório para demonstração de impressão aos visitantes.

IBRACON **Como é o financiamento do projeto de impressão 3D?**

| **RAFAEL GIULIANO PILEGGI** | É um financiamento de múltiplas fontes. Do convênio do hubIC, entre ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) e USP, os recursos foram alocados para as obras físicas do laboratório e aquisição de equipamentos. Outra grande parte vem dos *hubickers*, empresas participantes do hubIC, para atividades de apoio. Outros equipamentos de laboratório vêm de convênios de pesquisas que envolvem a impressão 3D. Com isso, o laboratório virou um espaço multilateral, onde se pode fazer pesquisa, ensino e extensão.

IBRACON **Como foi a evolução das tecnologias de impressão 3D?**

| **RAFAEL GIULIANO PILEGGI** | Houve uma melhora de produtividade e

eficiência. Nas primeiras formulações se imprimia de 2 a 3 litros por minuto. Hoje, se imprime 200 litros por minuto. As máquinas ficaram rápidas e produtivas, com o desenvolvimento industrial. Os equipamentos eram pórticos, estáticos e gigantes. Hoje são "*minibuilders*", máquinas móveis. Hoje se se tem uma série de robôs em cima de trator-esteira ou caminhão, havendo inclusive caminhão bomba de lança de concreto convertida em robô de impressão 3D. Imagina: não precisa mais instalar a impressora, o caminhão com o robô faz a impressão e vai embora! Assim, as impressoras ganharam mobilidade e se tornaram fáceis de instalar.

Com relação às massas e o entendimento da reologia, há 10 anos era um ato um ato de fé imprimir uma peça de 30 cm, mas hoje se consegue imprimir uma parede de 3 m com acelerador de pega ou uma de 2,70 m sem acelerador de pega, como fizemos recentemente aqui no hubIC, devido à muita pesquisa científica e tecnológica. Hoje há congressos dedicados apenas à impressão 3D, como o *Digital Congress*, que ocorre de dois em dois anos e está em sua terceira edição.

A rota europeia decolou com tecnologias de equipamentos e aceleradores para edificações únicas. Já, os norte-americanos partiram para impressão de maior escala.

Para mim, um ponto que evoluiu rapidamente foram as máquinas e equipamentos. Antes tudo travava, o sensor não funcionava, os equipamentos não podiam tomar chuva. Hoje, as máquinas são rápidas, ágeis e precisas.

Atualmente, o que se experimenta é o modelo de negócios mais viável: fabricar as peças impressas num galpão e montar a casa, ou imprimir cada casa no canteiro. Hoje, as empresas mais consolidadas são os ateliês de impressão, que customizam peças pré-fabricadas a custos altos. O designer compra um robô e a massa e começa a imprimir peças. Isto já está chegando no Brasil. Em uma grande feira de Construção na Região Sul do país, já se apresentavam empresas vendendo máquinas de impressão para concreto. O kit para impressão – impressora, misturador, bomba e massa – já é possível aos brasileiros comprar. Os fabricantes de massas ainda trabalham para terem seus custos mais competitivos. Um ponto de sucesso que considero de nosso trabalho do hubIC foi chegar a formulações muito baratas e competitivas no mercado brasileiro, capazes de viabilizarem impressão 3D frente a outros sistemas construtivos em concreto. Tenho certeza de que com o tempo e demanda, as empresas, com suas equipes de pesquisa e desenvolvimento, chegarão a um custo menor também.

Coluna impressa com microconcreto desenvolvido sob coordenação do Prof. Rafael Pileggi

> ATUALMENTE, O QUE SE EXPERIMENTA É O MODELO DE NEGÓCIOS MAIS VIÁVEL: FABRICAR AS PEÇAS IMPRESSAS NUM GALPÃO E MONTAR A CASA, OU IMPRIMIR CADA CASA NO CANTEIRO

> O MAIOR GARGALO É QUANTO À MÃO DE OBRA: QUANTAS PESSOAS SÃO NECESSÁRIAS PARA OPERAR O SISTEMA DIGITAL FUNCIONANDO, QUAIS AS QUALIFICAÇÕES NECESSÁRIAS E QUAIS OS RISCOS DE ACIDENTES E MEDIDAS DE SEGURANÇA PARA ESTE NOVO CANTEIRO?

IBRACON **Qual é a pegada de carbono da argamassa produzida para a impressão da parede no Hubic?**

| **RAFAEL GIULIANO PILEGGI** | Um indicador de eficiência ambiental em um material cimentício é o consumo de cimento (kg/m³ de material reativo) por unidade de resistência mecânica à compressão (MPa). Esse indicador, chamado B.I. (*binder intensity*) mostra que uma concreteira de mercado opera com 8 a 10 kg/m³ por MPa. Nossa formulação está na casa de 2 a 3 Kg/m³ por MPa, ou seja, um terço a um quarto menos emissões de CO_2 de um concreto equivalente, na mesma resistência. Soma-se a isso o fato de que a impressão leva a elementos desmaterializados porque as paredes são ocas por serem formadas por fios impressos. Nossa meta na produção da cozinha agora é diminuir ainda mais a espessura do cordão de impressão, para chegar à metade da atual, isto é, fazer a mesma parede com a metade da massa.

IBRACON **Quais as vantagens e desvantagens da impressão 3D em relação ao sistema convencional?**

| **RAFAEL GIULIANO PILEGGI** | A manufatura aditiva por impressão 3D baseada em extrusão de fio dá liberdade de formas e liberdades das fôrmas, isto é, ela torna possível fazer qualquer geometria sem precisar usar fôrmas, o que traz benefícios ambientais, pois não há descarte dos materiais para fazer as fôrmas.

Outro benefício é a desmaterialização do componente, combinando o projeto estrutural com técnicas de dimensionamento como a otimização topológica. Com isso, se tem o material certo no lugar certo, onde se precisa de reforço estrutural.

A terceira vantagem é a produtividade trazida por máquinas mais velozes. Já tem máquinas com três bicos simultâneos, que fazem os fios externos e interno simultaneamente.

A única diferença em termos de sistema é o robô, porque o misturador e a bomba são equivalentes ao que se têm hoje: para grandes volumes de massa, usa-se bomba de duplo pistão; para microconcretos ou argamassas, usa-se bomba de rotor estator. É a mesma vida útil dos sistemas de mistura e bombeamento convencionais.

A maior diferença e o maior gargalo são quanto à mão de obra: quantas pessoas são necessárias para operar o sistema digital funcionando, quais as qualificações necessárias e quais os riscos de acidentes e medidas de segurança para este novo canteiro? Projetar para 3D precisa ser massificado para que crie rotas inteligentes quanto à função e estética. Vai demandar treinamento desta geração digital, como se fosse um jogo de videogame. Por fim, virá uma nova geração de trabalhadores nos canteiros de obras, sendo os pedreiros adaptados a esses equipamentos e à montagem digital.

IBRACON **Como a impressão 3D na construção poderá ser associada à robótica e à Inteligência Artificial para automatizar a construção?**

| **RAFAEL GIULIANO PILEGGI** | Esta é a direção. O sistema vai ser capaz de se autoajustar: o torque da máquina está mais alto porque se alterou a granulometria da areia e, com isso, o sistema altera a quantidade de aditivos. A impressão 3D alinhada a uma grande base de dados pode permitir que a inteligência artificial crie geometrias e modelos de controle.

Tenho um orientando que está pesquisando o uso de inteligência artificial para conceber o design de peças 3D para habitações populares.

Outro projeto mimetiza geometrias e texturas da natureza para que o crescimento de plantas seja favorecido sobre contenções de concreto. Com isso, aumenta-se a capacidade de fixar biomassa, tornado o concreto neutro ou negativo em emissões de carbono.

Hoje se pesquisa o design de paredes impressas, com geometrias complexas, para se ter isolamento térmico e acústico do ambiente interno, integrando cada vez mais o projeto ao seu meio, sem aumentar custo.

Dois grandes projetos de impressão 3D no mundo envolvem a construção de torres eólicas de 200 m de altura por impressão com uma única máquina, montada em cima da fundação, capaz de imprimir o concreto e protender. Diria que o céu é o limite.

IBRACON **O que gosta de fazer fora do trabalho?**

| **RAFAEL GIULIANO PILEGGI** | Família.

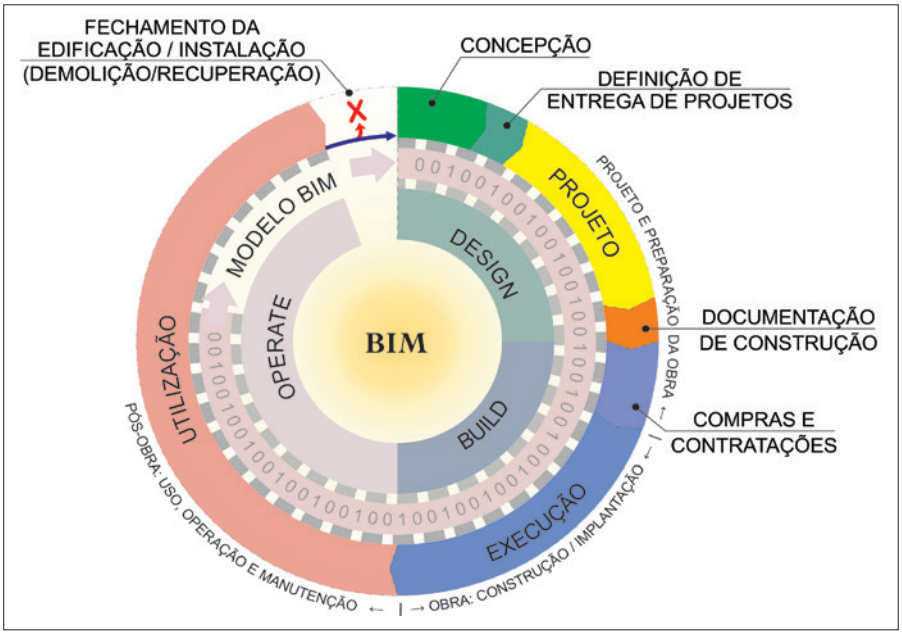
BIM: uma inovação disruptiva **na indústria da construção**

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

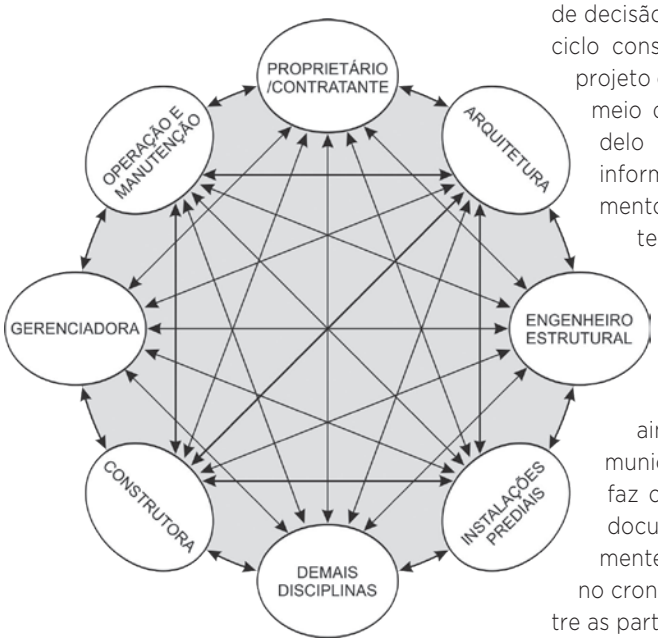
A construção civil é a maior indústria da economia global, respondendo por 13% do PIB mundial. Mas, seu ganho de produtividade anual é de apenas um terço das médias econômicas globais nos últimos 20 anos. A digitalização na indústria da construção é a mais baixa de qualquer outro ramo industrial.

Os dados são do relatório da McKinsey "*The next normal in construction*", publicado em 2020, que aponta também uma expectativa de crescimento para o setor de quase 70 trilhões de dólares até 2035 e nove transformações que deverão mudar esta situação de baixa produtividade e digitalização.

Neste cenário, o *Building Information Modeling* (Modelagem da Informação da Construção – BIM) será a metodologia para transformação do modelo de negócio na construção, ao trazer os processos de decisão para os primeiros estágios do ciclo construtivo, integrando a fase de projeto com as fases subsequentes por meio de um gêmeo digital, um modelo tridimensional completo, com informações e dados sobre cada elemento, componente, estrutura e sistemas que integram a obra física.



Integração das fases de um empreendimento pelo BIM — Fonte: Maciel, 2016



Fluxo de trabalho entre os agentes envolvidos num empreendimento no processo tradicional de construção — Fonte: Pries, 2010

Atualmente, o modelo de negócio na indústria da arquitetura, engenharia e construção (AEC) consiste num processo fragmentado e ainda muito dependente da comunicação escrita em papel. Isto faz com que omissões e erros nos documentos impliquem frequentemente aumento de custos, atrasos no cronograma da obra e conflitos entre as partes envolvidas no processo.

O proprietário contrata um arquiteto, que desenvolve os objetivos e requerimentos do projeto. Os engenheiros fazem o projeto estrutural e os projetos de outros sistemas, que são registrados em plantas, elevações e visualizações 3D. Por sua vez, o construtor recebe esse conjunto de esquemas e especificações, que são frequentemente redesenhados para refletirem seu processo construtivo e as fases de trabalho, e, com base neles, faz o levantamento quantitativo e estima o custo e o prazo da obra.

Qualquer imprecisão, erro, inconsistência ou omissão nos esquemas demanda alterações que implicam tempo, custo e necessidade de aprovação do arquiteto e das partes interessadas.

O uso de tecnologias auxiliadas por computador (CAD) proporcionou rapidez e armazenamento da informação, melhorando a análise para a tomada de decisão, mas não resolveu a fonte de problemas, isto é, os erros, omissões, inconsistências e imprecisões no projeto de arquitetura ou engenharia. Por isso,

os ganhos com o CAD e produtos baseados na web para gerenciar transações foram marginais.

O BIM muda todo o panorama atual. Ao gerar um modelo 3D paramétrico, isto é, conjunto integrado de objetos virtuais, que correspondem aos componentes previstos e necessários da futura construção real, com informações sobre sua geometria e outras informações importantes de especificação, as alterações feitas no modelo são automaticamente atualizadas, sendo o usuário avisado se um requerimento do projeto não for atendido!

Isto é, além de permitir que arquitetos e engenheiros testem variadas soluções com rapidez e facilidade, viabilizando novas formas e formatos, o modelo BIM identifica interferências entre os projetos, verifica o atendimento de requisitos estruturais, funcionais e sustentáveis, facilita o trabalho simultâneo de profissionais de diferentes áreas de formação (arquitetos, projetistas, construtores), fornece esquemas 2D precisos, quantifica espaços e materiais, estima custos e prazos e simula o processo construtivo no canteiro de obras, entre outras funcionalidades.

Sendo assim, o BIM facilita a criação de um ambiente colaborativo e, por conseguinte, entrega um projeto melhor, com menos erros, mais eficiente e produtivo.

Segundo levantamento da Fundação Getúlio Vargas de 2018, 9,2% das empresas do setor construtivo brasileiro já inseriram o BIM na sua metodologia de trabalho.

Para promover a modernização e a transformação digital na construção civil, o Governo Federal criou, em 2017, o Comitê Estratégico de Implementação do *Building Information Modeling* (CE-BIM), que lançou a Estratégia Nacional de Disseminação do BIM (Estratégia BIM BR).

A Estratégia BR estabelece três etapas para utilização do BIM em obras e serviços de engenharia da administração pública federal:

- A primeira etapa, que começou em 2021, foca os projetos de engenharia e arquitetura para novas construções, reformas e reabilitação de espaços;
- A segunda etapa começou em 2024 e exige o uso do BIM na fase de projetos e execução, como orçamento, planejamento e controle da execução;
- A terceira etapa, que começará em janeiro de 2028, requer o BIM no gerenciamento e manutenção do empreendimento construído.

A Estratégia BR almeja elevar em 10% a produtividade e reduzir em 9,7% os custos de produção das empresas que adotarem o BIM, bem como majorar em 10 vezes sua aceitação no ambiente de trabalho.

Vê-se que o uso do BIM na indústria da construção é promissor, apesar de sua adoção ainda ser tímida no país.

O QUE É O BIM?

O BIM não é uma tecnologia que vai substituir o CAD. Este é uma ferramenta desenvolvida a partir de 1963 para mostrar e gravar informações sobre formas, representando os objetos por meio de faces, arestas e vértices (modelagem sólida), além de dar suporte à geração convencional de documentos de projeto bidimensionais (2D). Diferentemente do BIM, o CAD é um programa de desenho digital no qual cada aspecto da geometria de um elemento construtivo precisa ser editado manualmente pelo usuário. Ele é fruto da sinergia entre as áreas de engenharia e projetos.

Nos projetos desenvolvidos em CAD, as representações em desenhos de perspectiva não possibilitam uma compreensão completa do que é projetado, exigindo imaginação para se visualizar a concretização do projeto.

"O AutoCad, lançado na década de 1980, aprimorou os conceitos relacionados à geração de desenhos 2D, melhorando a sua produtividade, consolidou-se como um dos softwares CAD mais populares e influentes da história, devido à sua interface intuitiva e recursos abrangentes para desenho 2D, apesar das limitações para projeto em 3D, permitindo a criação de modelos sólidos de projetos de construção", contextualiza Marcel Kater, diretor da Kater Engenharia.

Nenhum programa de computador que gere modelos tridimensionais, mas não dê suporte para ajustar automaticamente a posição ou proporção de objetos digitais ou não ofereça suporte para integração de dados entre equipes multidisciplinares (projeto, construção, manutenção) e para análises do projeto, pode ser considerado uma plataforma BIM. "Para ser uma plataforma BIM a principal condição é ter uma programação orientada a objeto (POO), ou seja, no caso de classes de paredes, pilares, vigas e lajes, criar-se-á uma classe para cada uma delas, com atributos de altura, largura, cor, material, etc. e métodos de pintar a parede, adicionar textura, calcular área específicos, para cada tipo de objeto, garantindo o seu relacionamento entre os objetos e suas classes", esclarece Kater.

O BIM representa objetos por meio de parâmetros e regras que determinam sua geometria, propriedades e características não geométricas. A forma e outras propriedades dos objetos são definidas e controladas por uma hierarquia de parâmetros (por exemplo: distâncias, ângulos) e regras (por exemplo:

Modelagem 3D de edifício com informações detalhadas de seus componentes — Fonte: Monteiro, 2019

emparelhar, anexar), cujos valores podem ser fixos, definidos pelos usuários ou associados a outras formas e objetos. Por isso, se diz que o BIM é tecnologia de modelagem orientada para objetos. Ele representa o projeto como uma combinação de objetos, caracterizados por sua geometria, relações e atributos, de maneira que havendo mudança num determinado objeto, os objetos dependentes ou adjacentes se ajustam (por exemplo: alterando-se a espessura de uma parede, a porta inserida nela se ajusta automaticamente). "Quando se aumenta o tamanho do vão a ser vencido, deve-se aumentar a seção transversal resistente do elemento estrutural. Há uma relação entre as grandezas na forma de parâmetros, segundo uma regra ou equação", explica o professor da Universidade Federal do Paraná, Sérgio Scheer.

Essa modelagem orientada paramétrica a objetos possibilita a visualização exata do que está sendo projetado, além de oferecer funcionalidades, como a detecção automática de interferências geoespaciais entre os objetos.

Os relacionamentos entre os parâmetros associados aos objetos no BIM garantem a coerência e integridade do modelo tridimensional, uma vez que as mudanças em um objeto são automaticamente atualizadas para os objetos relacionados, evitando, assim, inconsistências. Eles podem ser usados para identificar conflitos e sobreposições entre elementos, como um duto passando por uma coluna ou uma viga, resolvendo, assim, na fase de projeto um problema que só seria percebido na fase de construção. Por fim, promovem a colaboração entre profissionais de diferentes formações na fase de projeto, possibilitando análises e simulações de desempenho estrutural, energético, acústico, de fluxos de ar e de iluminação.

A correta visualização do que será construído se traduz em menor quantidade de problemas e desgastes durante a fase de construção e melhor entendimento e eficácia na comunicação e alinhamento na fase de projeto e planejamento.

As relações, análises e simulações são facilitadas pelas bibliotecas de objetos que já vem incorporadas nos softwares ou podem ser baixadas nos sites de fornecedores. Elas contêm informações sobre a geometria dos elementos (tamanhos, espessuras), seus materiais constituintes, seus comportamentos e as normas técnicas atendidas, e outras informações importantes para especificação. São conjuntos pré-definidos de objetos que podem ser aplicados prontamente no projeto de construção mais convencional e padronizado, incorporando as melhores práticas de projeto e construção.

"A biblioteca de objetos parametrizados proporciona redução no tempo de modelagem, pois com ela pode-se personalizar ajustando dimensões, materiais e outras propriedades", exemplifica Kater.

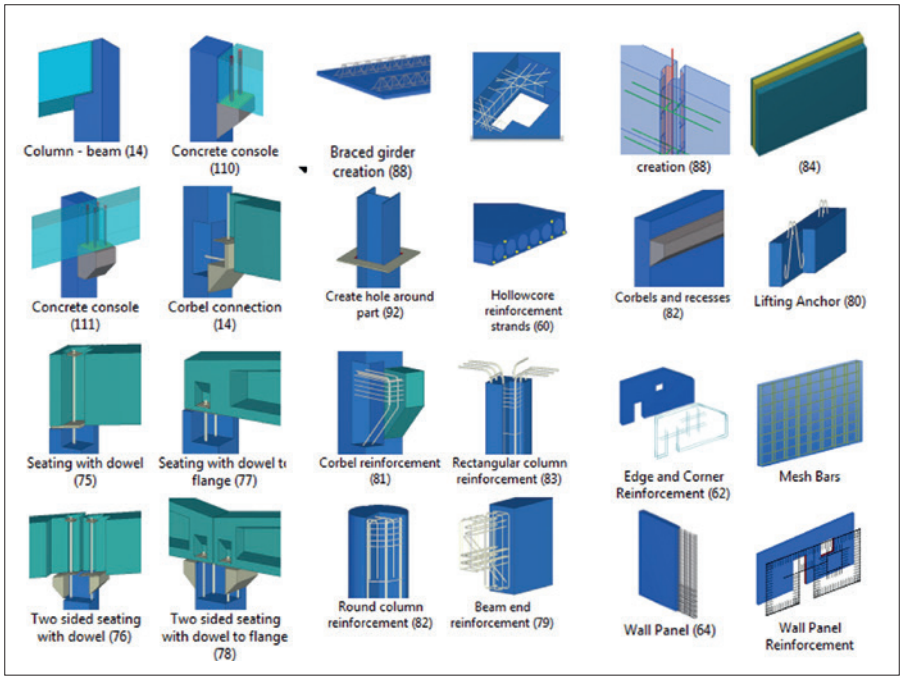
Na Plataforma BIM BR, lançada pelo Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC), está disponível uma biblioteca de objetos BIM – a Biblioteca Nacional BIM (BNBIM) – repositório de bibliotecas virtuais BIM no Brasil, com regulamento próprio com critérios mínimos para inclusão de novos objetos com qualidade e consistência.

"Os desenhos em pranchetas já usavam gabaritos, com silhuetas de objetos comuns aos projetos. Com a prancheta eletrônica, passou-se a utilizar as bibliotecas de símbolos representando os objetos. Já, com o BIM, as bibliotecas ganharam objetos paramétricos tridimensionais. Foi um salto de qualidade na representatividade dos componentes em um projeto", contextualiza Scheer.

É possível agregar novos objetos virtuais aos softwares BIM, bem como inserir novas informações nos próprios objetos de suas bibliotecas, pois os objetos funcionam como contêineres de dados, organizados em pastas de arquivo. Os objetos paramétricos podem ser refinados para produzir uma geometria complexa, dimensionar o trabalho das equipes e atender as demandas dos clientes.

Assim, os softwares BIM funcionam como gerenciadores de bancos de dados, oferecendo aos usuários diferentes formas de visualização e organização dos dados. Em razão disso, o BIM representa uma mudança na abordagem de projeto de engenharia e construção, que transitou da modelagem geométrica (com foco no desenho) para modelagem paramétrica (com foco em dados).

A ideia de uma modelagem paramétrica orientada para objetos apareceu pela primeira vez no artigo "Augmenting Human Intellect", do arquiteto Douglas Englebart, publicado em 1962. Nele, o autor sugere um projeto baseado em objetos, manipulação paramétrica e banco de dados relacional. No entanto, as



Exemplos de objetos de uma bibliioteca de objetos parametrizados no BIM — **Fonte:** Trimble

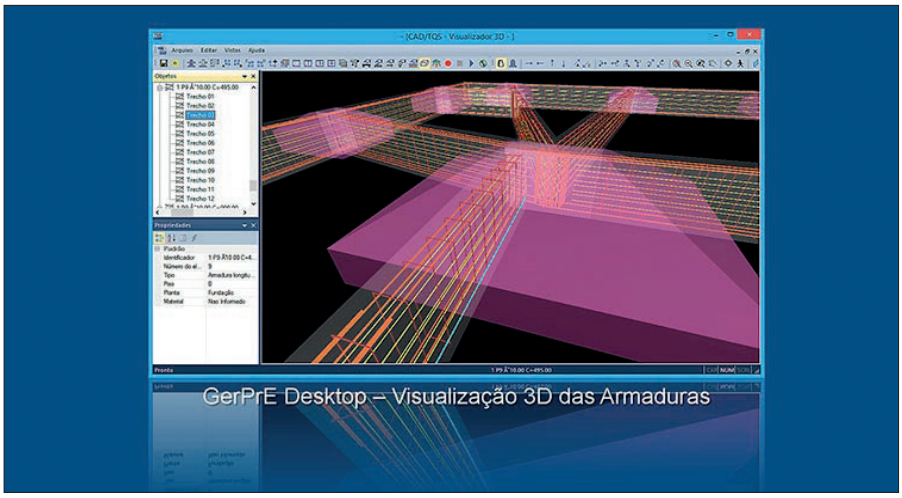
limitações computacionais da época (capacidade de armazenamento e velocidade de processamento) acabaram por impulsionar programas de modelagem sólida, como o Sketchpad, criado por Ivan Sutherland, pesquisador do Massachussets Institute of Technology (MIT), em 1963.

Em 1975, Charles Eastman, pesquisador da CMU (Carnegie Mellon University), publica um artigo em que discute um projeto paramétrico, com representação 3D, a partir de um banco de dados para análises visuais e quantitativas. Dois anos depois, ele desenvolve o primeiro programa BIM, o Glide, um software de modelagem baseado em biblioteca de objetos.

Na década de 1980, os softwares BIM diversificaram as bibliotecas de objetos, que se tornaram mais complexos, com informações sobre materiais, propriedades físicas e comportamentos específicos. Já, em 1990, os softwares possibilitaram que os objetos fossem adaptados às necessidades do projeto. Na virada do milênio, o BIM evoluiu para incorporar recursos de simulação e análise avançada, que permitiram a tomada de decisões mais informadas durante o projeto. Atualmente, o BIM representa a fronteira na modelagem de objetos. "A inteligência artificial está sendo cada vez mais integrada ao BIM, possibilitando a automação de tarefas, a análise preditiva, para a tomada de decisões otimizadas", informa Kater.

O BIM se tornou tão dominante que os sistemas CAD atuais estão cada vez mais incorporando recursos e funcionalidades do BIM. Sua constante evolução e adaptabilidade às novas demandas do setor garantem sua relevância e contribuição para a eficiência, qualidade e comunicação nos projetos de construção. "A utilização de plataformas CAD, que utilizam as melhores práticas de BIM, como Revit, Vectorworks, Archicad, OpenBuildings Designer, TQS, Eberick, etc. potencializa ainda mais os resultados na gestão de projetos de construção", sustenta Kater.

A despeito de sua evolução nos últimos 50 anos, os softwares BIM atuais ainda não conseguem incorporar todos os aspectos idealizados para a modelagem da informação da construção. Eles ainda são muito focados na representação geométrica dos elementos da construção, negligenciando alguns aspectos importantes do ciclo de vida dos empreendimentos, como construção e operação. A interoperabilidade entre os diferentes softwares é ainda um desafio. A padronização de elementos, terminologias e processos está ainda em desenvolvimento.



Visualização 3D de armaduras no BIM — Fonte: Monteiro, 2019

Desde 2008, a *buildingSMART International* (BSI), uma organização sem fins lucrativos com o objetivo de melhorar a troca de informações entre as ferramentas utilizadas na indústria da construção, apoia formatos não proprietários, isto é, extensões de arquivos que podem ser lidas em qualquer software escolhido para executar uma tarefa.

O IFC (*Industry Foundation Classes*) é um formato de arquivo aberto desenvolvido pela BSI para permitir a interoperabilidade entre projetos dentro de um fluxo de trabalho BIM. É o chamado *openBIM*, uma iniciativa para realizar projetos em colaboração por meio de fluxos de trabalho abertos, com padrões e processos transparentes e de livre utilização. O *BIM Colaboration Format* (BCF) é outro formato livre que participa do *openBIM*, dando suporte aos processos de compatibilização e revisão.

O IFC define um conjunto de classes e atributos que descrevem elementos básicos de um edifício, como vigas, paredes, pisos, escadas e qualquer componente de uma construção que desempenha uma função, como estruturar, vedar, entre outras. Ele é normatizado pela norma internacional ISO 16739, que padroniza termos, conceitos, especificações e dados a serem compartilhados no setor de arquitetura, engenharia, construção e operação (AECO).

Com isso, diferentes softwares utilizam e interpretam os dados de modo consistente, possibilitando a troca de informações e a colaboração entre diferentes profissionais, como arquitetos, engenheiros, construtores e gestores. "O IFC elimina a necessidade de converter ou recriar arquivos entre diferentes softwares, reduzindo retrabalho, aumentando a produtividade, facilitando a comunicação e a resolução de conflitos", esclarece Kater.

No Brasil, foi publicada em 2011 a norma ABNT NBR 15965 Sistema de classificação da informação da construção, com base na norma internacional ABNT NBR ISO 12006-2, de 2010. Esta primeira norma BIM brasileira estabelece terminologia e a estrutura de classificação para a tecnologia da modelagem da informação da construção.

COMO ESCOLHER SEU SOFTWARE BIM

Os softwares com as melhores práticas em BIM passaram a ser correntes no mercado brasileiro a partir de 2000.

Esses softwares variam quanto à sofisticação de sua biblioteca de objetos, à facilidade de criação de novas famílias de objetos pelos usuários, às capacidades de geração de desenhos e à interoperabilidade, que consiste na habilidade de receber e exportar os atributos dos objetos para outros softwares, aplicações e modelos. A biblioteca de objetos pode conter objetos desatualizados, com erros

Verificação de elementos de uma fundação e registro de fotos na plataforma BIM — **Fonte:** Monteiro, 2019

ou inconsistências, ou ainda incompatíveis com outras bibliotecas de objetos.

No mercado brasileiro, é possível encontrar softwares BIM para projetos de estruturas com diferentes níveis de maturidade:

- Softwares com funcionalidades básicas de modelagem 3D e documentação (Cisalfa Estruturas);
- Softwares intermediários: incluem a análise estrutural básica e a interoperabilidade com alguns formatos de arquivo (TQS Strusoft);
- Softwares avançados: incluem análise estrutural complexa, interoperabilidade com diversos softwares e formatos de arquivo e recursos específicos para atender às normas brasileiras (Etabs).

Algumas recomendações na escolha do software BIM são:

- Avaliar as funcionalidades básicas de modelagem 3D, análise estrutural, detecção de interferências, quantificação de materiais e geração de documentação em formato BIM;
- Verificar a capacidade de se integrar com outros softwares BIM, como o Revit e o Archicad (programas BIM para arquitetos) e com formatos de arquivo padrão;
- Certificar-se que atende às normas da ABNT e às especificações técnicas da construção civil no Brasil;
- Disponibilidade de suporte técnico e de treinamentos para auxiliar os usuários na utilização do software;
- Existência de uma comunidade ativa de usuários que compartilham experiências e boas práticas;
- Considerar o retorno sobre o investimento.

No site da buildingSMART (buildingsmart.org), há uma lista de softwares certificados para trabalhar de maneira aberta, importando e exportando arquivos IFC.

Mas, não basta adquirir softwares. Esses são o ponto de partida para mudanças nos processos, fluxos e políticas organizacionais para melhorar o desempenho do negócio e fomentar a integração de profissionais no ramo. Isto porque o BIM é uma tecnologia de modelagem associada a um conjunto de processos para produzir, comunicar e analisar modelos de construção. A própria representação digital tridimensional das características físicas e funcionais de uma obra é um recurso de conhecimento compartilhado, uma base confiável para a tomada de decisões durante o ciclo de vida do empreendimento.

Para Sheer, o BIM não é um software nem se resolve com o uso de um software específico. Mas, é um "conjunto de sistemas, processos e regramentos característicos da atividade humana".

O portal BIM Dictionary (https://bimdictionary.com), espécie de Wikipédia dos termos relacionados ao BIM, traz a seguinte definição de BIM: "conjunto de tecnologias, processos e políticas que permitem aos múltiplos interessados de um empreendimento a colaborativamente projetar, construir e operar uma construção no espaço virtual".

Em suma: o BIM é uma inovação na indústria da construção que afeta seus produtos e serviços, as relações e papéis da indústria.

Para alcançar a plenitude do BIM no modelo de negócio, existem quatro fases de maturidade:

- **BIM 1.0:** refere-se à transição da modelagem em 2D para a modelagem 3D baseada em objetos, onde as disciplinas são tratadas separadamente e a documentação final é composta majoritariamente por desenhos 2D;

Modelo 3D de salas de escritórios visualizadas em smartphone — **Fonte:** Wikimedia

- **BIM 2.0:** modelo baseado em colaboração, onde se adotam os modelos correlativos de dados, como cronogramas (BIM 4D), orçamentos (BIM 5D), gerenciamento de sistemas e equipamentos (BIM 6D), comparação de componentes (BIM 7D) e gerenciamento da segurança (BIM 8D);
- **BIM 3.0:** modelos federados integrados em uma plataforma única, que podem ser analisados e complementados por todos que participam do desenvolvimento do empreendimento;
- **BIM 4.0:** modelos para manutenção preventiva são incorporados.

A indústria da construção brasileira apresenta-se em estágio inicial de adoção do BIM. Segundo uma pesquisa realizada, em 2022, pela CTE Enredes, unidade de negócios do Centro de Tecnologia de Edificações, com 56 empresas participantes de sua Comunidade Técnica BIM, entre empresas de tecnologia, contratantes, fabricantes, consultorias, projetistas, incorporadoras, construtoras, fundos de investimentos e administradoras, 25% delas não implantaram ainda o BIM. Das que já o fizeram, a maioria encontra-se em nível médio de implantação, com uso mais pronunciado para visualização do projeto e geração do modelo de informação e menos pronunciado para simulação de desempenho, gestão e manutenção, e segurança ocupacional. Dentre as dificuldades de implantação do BIM, foi citado primordialmente a cultura empresarial não alinhada ao assunto e a falta de capacitação do corpo técnico. Por fim, os empresários que responderam ao questionário da pesquisa apontaram dificuldades quanto ao uso das bibliotecas de objetos, à ausência de padronização de modelos e informações, às incompatibilidades entre as disciplinas e à falta de maturidade dos projetos no uso do BIM.

Os resultados são compatíveis aos do diagnóstico do setor da construção civil brasileira junto aos profissionais do Conselho Federal de Engenharia e Agronomia (CONFEA), realizado em 2022, realizado pelo BIM Forum Brasil, uma associação nacional de disseminação do BIM.

BENEFÍCIOS DO BIM

A *PricewaterhouseCoopers* (PWC), contratada, em 2018, por uma agência governamental do Reino Unido, identificou oito benefícios potenciais da aplicação do BIM no setor público: otimização de tempo, de materiais e de custo; redução de risco; melhora na segurança e bem-estar; melhora de utilização e qualidade de ativos; e melhora na reputação da organização.

A Câmara Brasileira da Construção (CBIC), que representa as construtoras e incorporadoras brasileiras, trouxe numa publicação 10 motivos para evoluir com o BIM:

- A visualização em 3D do que está sendo projetado traz menor desgaste e menor quantidade de problemas na fase de execução, por permitir, por exemplo, que que o engenheiro de obras e o construtor visualizem e compreendam melhor o projeto e as etapas de execução, aumentando a eficácia no processo de comunicação e alinhamento;
- O planejamento ou sequenciamento permite estudar detalhadamente todas as etapas e atividades previstas para execução da obra, reduzindo incertezas, riscos na utilização de recursos e descontinuidades, como dificuldades de acesso, interferências entre elementos na obra, o que se traduz em maior aderência da execução ao orçamento e ao cronograma;
- As extrações automáticas de quantidades de serviços e componentes, que podem ser organizadas por fases definidas no planejamento e na programação de execução de serviços, garantindo comparações precisas entre serviços previstos e realizados, o dimensionamento dos equipamentos, materiais e das equipes de trabalho;
- Análises e simulações de desempenho de edifícios ou instalações, de suas partes e sistemas, como estruturais, energéticas, térmicas, luminotécnicas e de sombreamento, não podiam ser realizadas com CAD, mas podem ser realizadas no BIM, inclusive a verificação automática da conformidade do projeto com normas e especificações técnicas;
- Detecção de interferências entre os objetos que compõem o modelo, como uma tubulação de grande diâmetro com um componente estrutural (interferência crítica), que demanda a revisão de projetos, ou de um projetor e uma luminária (interferência leve);
- Geração de documentos consistentes e íntegros com as soluções projetadas – desenhos, detalhes e tabelas – é facilitada, acelerada e quase instantânea, desde que configurada adequadamente no modelo – diferentemente dos processos baseados em CAD, no qual qualquer mudança no projeto precisa ser replicada pelos profissionais nas plantas, cortes e detalhes;
- Capacitação da empresa para executar construções com formas complexas, com logística complicada ou com ritmo acelerado que exija a coordenação simultânea de diversas frentes de obras, por meio de sistemas BIM

Nuvem de pontos geradas por escaneamento a laser de um viaduto — **Fonte:** Trimble

voltados ao projeto, análise, dimensionamento e detalhamento de estruturas em diferentes sistemas estruturais e para todo o ciclo de vida do empreendimento;

- Aumento do nível de confiabilidade e previsibilidade nos projetos e especificações que usam sistemas pré-fabricados, eliminando a maioria dos potenciais erros e interferências, e possibilitando antever no computador os passos das montagens;
- Usar nuvens de pontos geradas por escaneamentos a laser para identificação e separação de subsistemas do edifício e, assim, facilitar os projetos e a execução de instalações, reforma e ampliações; bem como sensores e câmeras para monitoramento do canteiro em tempo real, comparando o programado com o realizado para fazer ajustes;
- Preparar-se para o futuro próximo, onde o BIM deve ser condição mandatória para a participação de qualquer empresa no mercado.

Afinal, como sobreviver no mercado diante de empresas com políticas, processos e tecnologias baseadas em modelagem paramétrica que lhe conferem o diferencial competitivo de determinar, na fase de planejamento, se um tipo de edificação pode ou não ser construído com determinado orçamento e prazo; na fase de projeto, se ele é construtível; na fase de execução, o dimensionamento preciso de recursos materiais e humanos; e na fase de manutenção, o nível de detalhamento de documentação necessária?

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] BIMWORKS. Building Information Modeling: O que você precisa saber? Consultado em 06/06/2024 (www.buildingworks.com.br)

[2] CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. 10 motivos para evoluir com o BIM. Brasília: CBIC, 2017, 2ª edição

[3] EASTMAN, C. et al. BIM Handbooks: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008

[4] MCKINSEY & COMPANY. The next normal in construction: how disruption is reshaping the world's largest ecosystem. Executive summary. Junho, 2020

[5] PESSOA, M.L. Inovação: projetos & política. Curitiba: Futuri9, 2022.

[6] RUSCHEL, R.C. et al. Ecossistema de inovação e transformação: diagnóstico da Comunidade Técnica de BIM do CTE Enredes. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19, 2022. Anais[...]. Porto Alegre: ANTAC, 2022

COMBO

Estruturas de Concreto Armado com Barras de Polímero Reforçado com Fibras (Frp) + Reforço de Elementos Estruturais de Concreto com Sistemas de Polímeros Reforçados com Fibras (FRP) Aplicado Externamente - CT303 + Estruturas de Concreto de Ultra Alto Desempenho (UHPC) + ABNT NBR 9062:2017 Comentários E Exemplos + 50 Anos IBRACON: Edificando Ideias e Concretando Valores

ibracon.org.br/loja

IBRACON

O **IBRACON** *FAZ* ***ANIVERSÁRIO*** *MAS* ***VOCÊ*** *É QUEM RECEBE O* ***PRESENTE!***

DOI – http://dx.doi.org/10.4322/1809-7197.2024.114.0001

Vantagens do controle da desforma de paredes de concreto **pelo método da maturidade – Estudo de caso**

CAIO FARTO FARINACIO – ENG. – https://orcid.org/0000-0001-5590-796X (caio.farinacio@desek.com.br) ;
EDUARDO ISSAMU FUNAHASHI JR. – ENG. – https://orcid.org/0000-0002-7516-4195 | **Desek**
LUÍS BORIN – ENG. – https://orcid.org/0009-0000-9940-0087 ;
LUÍS HENRIQUE C. BORIN – ENG. – https://orcid.org/0009-0000-7242-0344 | **FALCÃO BAUER**
ROBERTO J. FALCÃO BAUER – PROF. – https://orcid.org/0009-0008-4406-6526 | **UNITAU**
FABIO DOUDEK MAGALHÃES – ENG. – https://orcid.org/0009-0001-0890-7454 | **TENDA**

RESUMO

O MÉTODO DA MATURIDADE PODE SER EMPREGADO NO CONTROLE DE DESFORMA EM PAREDES DE CONCRETO, PROPORCIONANDO VANTAGENS NA CONSTRUÇÃO CIVIL. BASEADO NO MONITORAMENTO DA TEMPERATURA DO CONCRETO, O MÉTODO PERMITE ESTIMAR SUA RESISTÊNCIA SEM ENSAIOS DESTRUTIVOS. O EMPREGO DO MÉTODO EM UMA EDIFICAÇÃO EM SÃO PAULO EVIDENCIOU SUA EFICÁCIA, SENDO POSSÍVEL TAMBÉM OTIMIZAR A DOSAGEM DO CONCRETO EMPREGADO. AS RESISTÊNCIAS ESTIMADAS PELO MÉTODO FORAM, EM MÉDIA, 70% SUPERIORES ÀS OBTIDAS POR ENSAIOS DE CORPOS DE PROVA. HOUVE TAMBÉM UMA NOTÁVEL REDUÇÃO DE CUSTO COM O CONCRETO E NAS EMISSÕES DE CO_2 ASSOCIADAS À PRODUÇÃO DO CIMENTO, REDUZINDO CERCA DE 14 T/CO_2 A CADA 1000 M^3 DE CONCRETO. ASSIM, O MÉTODO DA MATURIDADE SE MOSTROU UMA FERRAMENTA VALIOSA PARA OTIMIZAR O PROCESSO CONSTRUTIVO, AO MESMO TEMPO QUE PODE CONTRIBUIR PARA A OTIMIZAÇÃO DE RECURSOS E SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL DA CONSTRUÇÃO.

PALAVRAS-CHAVE: MÉTODO DA MATURIDADE, PAREDES DE CONCRETO, CONTROLE TECNOLÓGICO.

1. INTRODUÇÃO

A construção em paredes de concreto no Brasil é uma realidade e em grande ascensão. O sistema traz ao construtor diversos benefícios, em especial o aumento da velocidade de execução, otimização da mão de obra, além do maior controle de qualidade devido à industrialização dos processos. O sistema consiste na montagem de fôrmas metálicas ou de madeiras pré-fabricadas, em todo ou parte do sistema de vedação e pilares do pavimento, para serem concretados em única vez. Assim, é possível eliminar diversas etapas construtivas, como a execução de alvenarias, sejam elas estruturais ou de vedação.

Após a concretagem, dependendo do ciclo adotado pelo construtor, as paredes podem ser desformadas em poucas horas, liberando o jogo de fôrmas para dar continuidade ao ciclo. Em obras com ciclos de concretagem diários, as paredes geralmente são desformadas entre 12 e 16 horas após o final da sua execução.

Conforme a NBR 16055 [1], deve ser especificada a resistência à compressão mínima do concreto para realização da desforma, na idade necessária, considerando o ciclo construtivo da obra. A resistência de desforma deve ser verificada em obra como parâmetro de aceitação do concreto no estado endurecido, além da resistência característica do concreto (f_{ck}).

O controle de desforma das paredes de concreto pode ser feito pelo ensaio de resistência à compressão por meio da moldagem e ruptura dos corpos de prova (CP's) com concreto amostrado dos caminhões betoneira. Caso a idade de desforma seja menor que 24 horas, é necessário a instalação de prensa em obra, devido a necessidade de cura inicial dos CP's, conforme NBR 5738 [2], impedindo seu transporte até o laboratório terceiro.

Outra alternativa para controle de resistência de desforma das paredes de concreto indicado na NBR 16055 [1] é pelo método da maturidade, preconizado pela ASTM C 1074 [3]. Este método de ensaio não destrutivo (END) consiste na estimativa do aumento da resistência à compressão do concreto da estrutura pelo monitoramento da evolução da sua temperatura, dispensando o rompimento de corpos de prova na idade especificada. Previamente à sua implementação em obra, é necessário o desenvolvimento da curva de calibração. Esta curva correlaciona a resistência à compressão dos CP's moldados com a evolução da temperatura dos mesmos a uma determinada condição de cura. Assim, monitorando a evolução das temperaturas do concreto da estrutura, estima-se a resistência à compressão de forma rápida, segura e econômica, sem a necessidade de ensaios destrutivos. Vale salientar que este método não se aplica como critério para aceitação da resistência característica de projeto (f_{ck}), prevalecendo os critérios da NBR 12655 [4].

O método da maturidade já é empregado no Brasil em algumas estruturas, como apresentado por Serafini *et al.* [5] no monitoramento da resistência à compressão do concreto de uma laje de edificação. No trabalho, os autores obtiveram diferenças menores que 13% entre resultados estimados pelo método da maturidade e corpos de prova rompidos e menores que 20% entre o método e corpos de prova removidos da estrutura, para idade de 28 dias. Segundo os autores, ficou evidente a diferença entre temperaturas que estão expostos os corpos de prova moldados e o concreto em condições reais de aplicação.

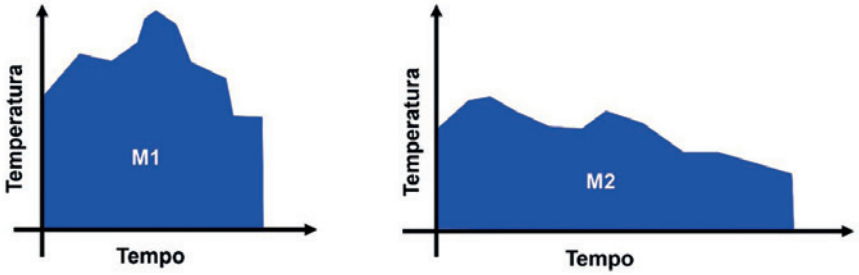


FIGURA 1
Relação da mesma maturidade acumulada em dois cenários

2. MÉTODO DA MATURIDADE

O método da maturidade é empregado em estruturas de concreto deste a década de 50, quando surgiu na Europa através do trabalho desenvolvido por Saul [6]. Desde então, o método é empregado principalmente para estimativa de resistência de controle em idades iniciais, como em estruturas pré-fabricadas para decidir sobre a desmontagem de formas, em estruturas protendidas para liberação das cargas de protensão, em concreto projetado nos túneis para avanço das escavações, em lajes para remoção dos escoramentos, em pavimentos de concreto para liberação do tráfego de veículos, liberação para início do acabamento mecânico de pisos, além da utilização para controle da resistência de desforma no sistema de paredes de concreto.

A ASTM C 1074 [3] prevê o desenvolvimento prévio de uma curva de calibração em laboratório, onde são moldados corpos de prova para serem rompidos na compressão em diversas idades (a depender da idade de controle na estrutura) e em paralelo, o monitoramento da temperatura acumulada no tempo dos corpos de prova, para a posterior correlação entre tempo, temperatura e resistência. Isso deve-se ao fato de que cada dosagem apresenta um diferente desenvolvimento de temperaturas, que varia em função dos consumos e tipos de materiais constituintes do concreto (cimento e adições pozolânicas, brita, areia e aditivos químicos).

Para os cálculos, duas funções de maturidade podem ser utilizadas, a que utiliza o conceito de idade equivalente e a função que considera o fator temperatura-tempo. O fator temperatura-tempo aborda o conceito de que a mesma resistência seria atingida por concretos que apresentassem a mesma maturidade, e leva em consideração que o concreto ganha resistência de maneira linear em função do desenvolvimento da temperatura. A Equação 1, presente na ASTM C 1074 [3], mostra a função para estimar a resistência do concreto em função do ganho de temperatura pelo método da maturidade com a função temperatura-tempo:

$$[1] \quad M(t) = \int_0^t (T_t - T_0)dt$$

Na qual M(t) é a maturidade do concreto em °C.dias ou °C.horas, T_t é a temperatura do concreto na idade t, T_0 é a *datum temperature* (abaixo da qual não há ganho de resistência) e dt é o intervalo de tempo em dias ou horas. As temperaturas são dadas em °C.

Ainda, segundo Saul [6], a mesma mistura de concreto com um mesmo fator de maturidade (medido como função de temperatura e tempo), apresenta a mesma resistência, qualquer que seja a combinação de temperatura e tempo para atingir o fator de maturidade. Essa relação pode ser entendida como abordado na Figura 1, que apresenta o monitoramento da temperatura em duas estruturas de concreto (abordagem genérica), onde há a mesma maturidade acumulada nos dois cenários, portanto a resistência dos concretos é a mesma. Pode-se relacionar o cenário M1 com uma estrutura de concreto moldada no local onde há um maior acúmulo de temperatura em menor tempo e o cenário M2, como sendo o acúmulo de temperaturas em um corpo de prova mais lentamente.

Devido à esta relação, percebe-se uma diferença entre a resistência à compressão ensaiada em corpos de prova moldados e a resistência do concreto na estrutura, devido ao calor acumulado entre ambos os concretos. Na estrutura concretada (Figura 1 – M1), há maior acúmulo do calor gerado pelas reações de hidratação do cimento, devido ao volume de concreto envolvido, enquanto no corpo de prova moldado (Figura 1 – M2) o acúmulo de calor é menor, tendo a mesma maturidade que a estrutura em um tempo maior.

Com o uso do método da maturidade em paredes de concreto é possível atender a especificação da resistência de desforma em um tempo menor quando comparada aos CP's rompidos em laboratório da obra. A aplicação do método resulta em ganhos na produtividade construtiva da obra com segurança e qualidade, assim como otimização da dosagem de concreto.

Dentre as vantagens já citadas, o objetivo do artigo foi demonstrar o uso e as vantagens do método da maturidade no controle da desforma de paredes de concreto moldadas no local, destacando sua eficácia, economia de recursos e contribuições para a sustentabilidade ambiental. O estudo de caso apresentado visa demonstrar a aplicação

FIGURA 2
Empreendimento de paredes de concreto em São Paulo/SP, em construção

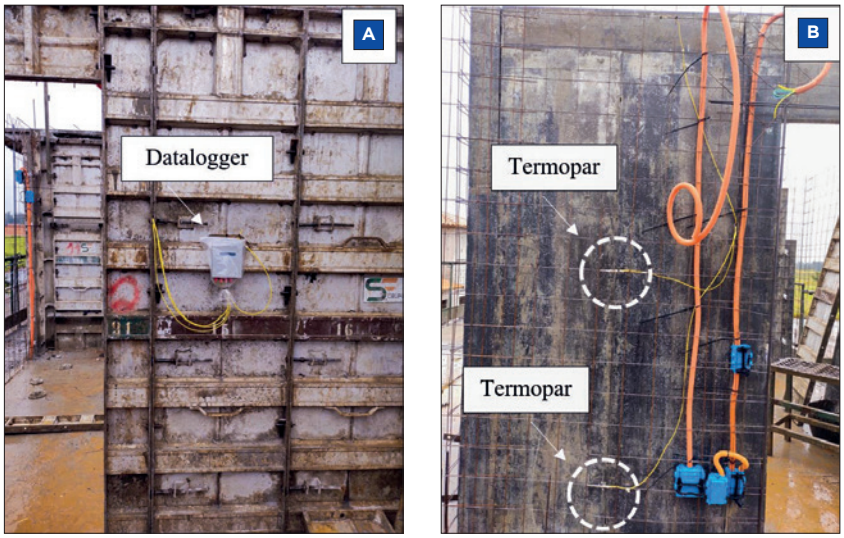


FIGURA 3
Instalação do monitoramento de temperatura nas paredes de concreto (A) no lado externo da forma e (B) no lado interno da forma

prática do método em uma edificação em São Paulo, fornecendo evidências de sua eficiência e impacto positivo no processo construtivo.

3. ESTUDO DE CASO – EDIFICAÇÃO SÃO PAULO/SP

O método da maturidade foi empregado para controle de resistência de desforma em uma obra de edificação, localizada em São Paulo/SP, com sistema de paredes de concreto moldadas no local. O empreendimento possui 2 torres com 25 pavimentos. O concreto das paredes foi especificado com f_{ck} = 35 MPa e resistência mínima de desforma de 3 MPa em 14 horas. O ciclo de concretagem adotado pela construtora nesta obra é diário, trazendo o desafio para a obra de que o concreto atinja, dentro de 14h após lançado, a resistência mínima de 3 MPa para desforma das paredes. A Figura 2 mostra uma das torres do empreendimento em fase de construção.

No início do monitoramento pelo método da maturidade, a obra empregava traço de concreto com consumo de cimento igual a 370 kg/m³ (Traço A). Após alguns meses de monitoramento, percebeu-se que havia possibilidade de ajuste do traço de concreto devido às resistências de desforma e f_{ck} obtidas. Com isso, a obra passou a utilizar traço de concreto com consumo de cimento em 355 kg/m³ (Traço B). Os traços de concreto constam da Tabela 1.

As curvas de calibração dos traços A e B foram realizadas em laboratório, considerando o emprego da função que adota o fator temperatura-tempo, conforme ASTM C 1074 [3].

O monitoramento dos concretos das paredes foi feito com o uso de (03) três sensores térmicos (tipo termopar) por concretagem e (01) um para monitoramento da temperatura ambiente. Os sensores instalados possuíam conexão remota para gravação de dados, permitindo que a obra obtivesse os dados de temperatura e estimativa da resistência do concreto da estrutura das paredes, de forma remota e ao vivo, com acesso em qualquer local com conexão à internet.

TABELA 1
Traços de concreto empregados nas paredes de concreto

Materiais empregados	Consumo (kg/m³)	
	Traço A	Traço B
CP V ARI RS	370	355
Areia natural	386	391
Areia industrial	578	586
Brita 0	852	852
Água	190	190
Aditivo 1 (polifuncional)	0,925	0,888
Aditivo 2 (superplastificante)	1,850	1,211
Microfibra de polipropileno	0,300	0,300
Relação água/cimento	0,51	0,54
Abatimento especificado	220 ± 30 mm	

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os dados dos monitoramentos da resistência de desforma das paredes de concreto do Traço A e do Traço B até a idade de 14 horas constam na Figura 4 e na Figura 5, respectivamente. De acordo com ciclo construtivo adotado, as concretagens foram realizadas no período da tarde e finalizadas por volta das 16:00. A desforma foi realizada na manhã do dia seguinte, próximo das 6:00. Foram utilizados dados de 12 concretagens, em um período de oito meses de monitoramento, com concretagens diárias de segunda-feira até sábado.

A Figura 4 mostra que o concreto das paredes (Traço A) atingiu a resistência de desforma especificada de 3 MPa na idade entre, aproximadamente, 6 e 7 horas após o final da concretagem.

Após o ajuste do traço de concreto (Traço B), os concretos atingiram a resistência especificada entre 7 e 11 horas,

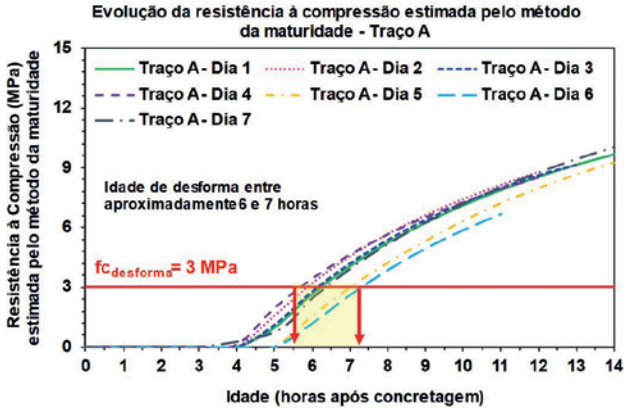


FIGURA 4
Evolução da resistência à compressão estimada pelo método da maturidade – Traço A

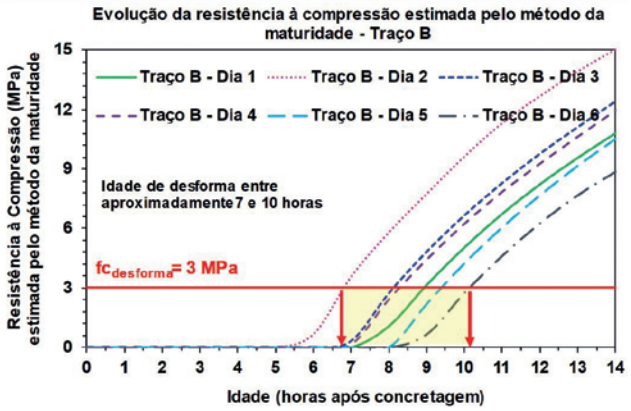


FIGURA 5
Evolução da resistência à compressão estimada pelo método da maturidade – Traço B

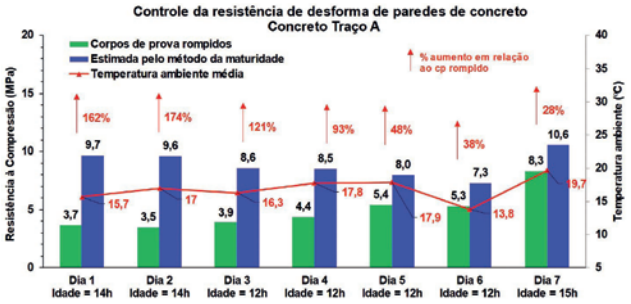


FIGURA 6
Controle da resistência de desforma de paredes de concreto – Corpos de prova rompidos x método da maturidade – Traço A

aproximadamente, conforme mostra a Figura 5. Essa diferença de resistência entre concretagens se deu pela evolução de temperatura nas paredes de concreto, também influenciada pela temperatura ambiente.

Neste empreendimento, também havia sido instalado laboratório com prensa para ensaios de CPs na idade de desforma especificada. A Figura 6 e a Figura 7 apresentam as análises comparativas entre os resultados de resistência obtidos a partir dos ensaios de CP's moldados estimados pelo método da maturidade, nas mesmas idades, para o Traço A e o Traço B, respectivamente.

Com base nas análises comparativas realizadas, a resistência à compressão estimada pelo método da maturidade é superior àquelas determinadas pela ruptura dos CP's. Isto ocorre devido ao maior acúmulo do calor gerado pela hidratação do cimento e maior velocidade de desenvolvimento das resistências mecânicas nos concretos das paredes de maior volume e dimensões, em relação aos corpos de prova, conforme esquema apresentado na Figura 1.

Nota-se que dependendo do dia da concretagem, em especial as condições de temperatura ambiente, as resistências dos corpos de prova moldados e da maturidade podem ser diferentes na mesma idade. É possível notar também que há uma maior variação nos resultados de resistência à compressão dos CP's rompidos, devido às possíveis variações nos processos de moldagem, adensamento e cura, além dos eventuais desvios durante o ensaio de ruptura. Já, na resistência estimada pelo método da maturidade, as diferenças podem se dar pela diferença de temperatura obtida em cada concretagem, podendo variar em função das condições climáticas.

Verifica-se que apesar dos resultados dos rompimentos dos CP's na idade de desforma e os estimados pela maturidade do Traço B serem maiores dos que os obtidos com o traço A, a idade com que o concreto obteve resistência suficiente para desforma, conforme especificação de projeto (3 MPa), foi maior para o Traço B, conforme visto na Figura 4 e na Figura 5. Isto se deu porque o tempo de início de hidratação do cimento é influenciado pela temperatura ambiente e temperatura de lançamento do concreto.

Após o ajuste do Traço B com a redução do consumo de cimento em 15 kg/m^3, foram atendidas às resistências de desforma (3 MPa/12 horas) e à resistência característica de projeto (f_{ck}), conforme mostra a Figura 8.

5. CONCLUSÕES

A partir do controle da resistência à compressão dos concretos de paredes moldados no local pelo método da maturidade, é possível concluir que:

a) Obteve-se êxito no monitoramento da resistência à compressão necessária para desforma das paredes de concreto pelo método da maturidade;

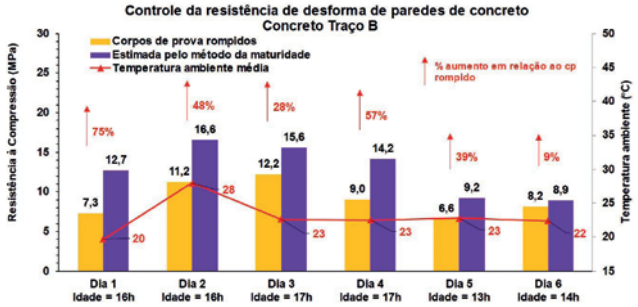


FIGURA 7
Controle da resistência de desforma de paredes de concreto – CPs rompidos x método da maturidade – Traço B

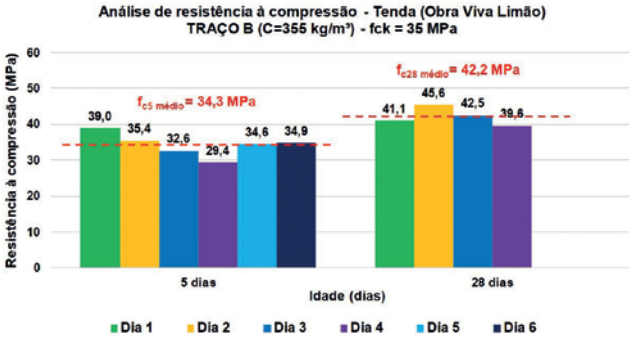


FIGURA 8
Resultados de corpos de prova rompidos nas idades de 5 e 28 dias – Traço B

b) As resistências obtidas por meio do método da maturidade, quando comparadas aos resultados dos corpos de prova rompidos para a idade de desforma, foram superiores, trazendo otimização do processo construtivo e ciclos de concretagens. Ressalta-se que é prudente que seja feita uma verificação entre a resistência estimada pelo método da maturidade e corpos de prova extraídos de estruturas monitoradas, quando da elaboração das curvas de calibração na fase inicial de projeto. Contudo, deve-se avaliar o efeito de broqueamento quando da realização das extrações dos corpos de prova, que poderá ser maior em testemunhos com idades de até 24 horas em relação a concretos de maior idade e resistência;

c) Otimizou-se o controle tecnológico do concreto, trazendo resultados de resistência a cada hora, em tempo real;

d) Foi possível ajustar o traço de concreto da obra, reduzindo o consumo de cimento em 15 kg/m^3, sem prejuízos no ciclo de concretagens do empreendimento, resultando na redução no custo do concreto fornecido;

e) De acordo com o SIDAC, considerando uma redução de 15 kg/m^3 de cimento CP V ARI no traço de concreto, a redução de emissão de CO_2 na atmosfera é de aproximadamente 14 kgCO_2/m^3 de concreto produzido, ou 14 t/CO_2 a cada 1000 m^3 de concreto.

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16055 — Parede de concreto moldada no local para a construção de edificações — Requisitos e procedimentos. ABNT, 2022.

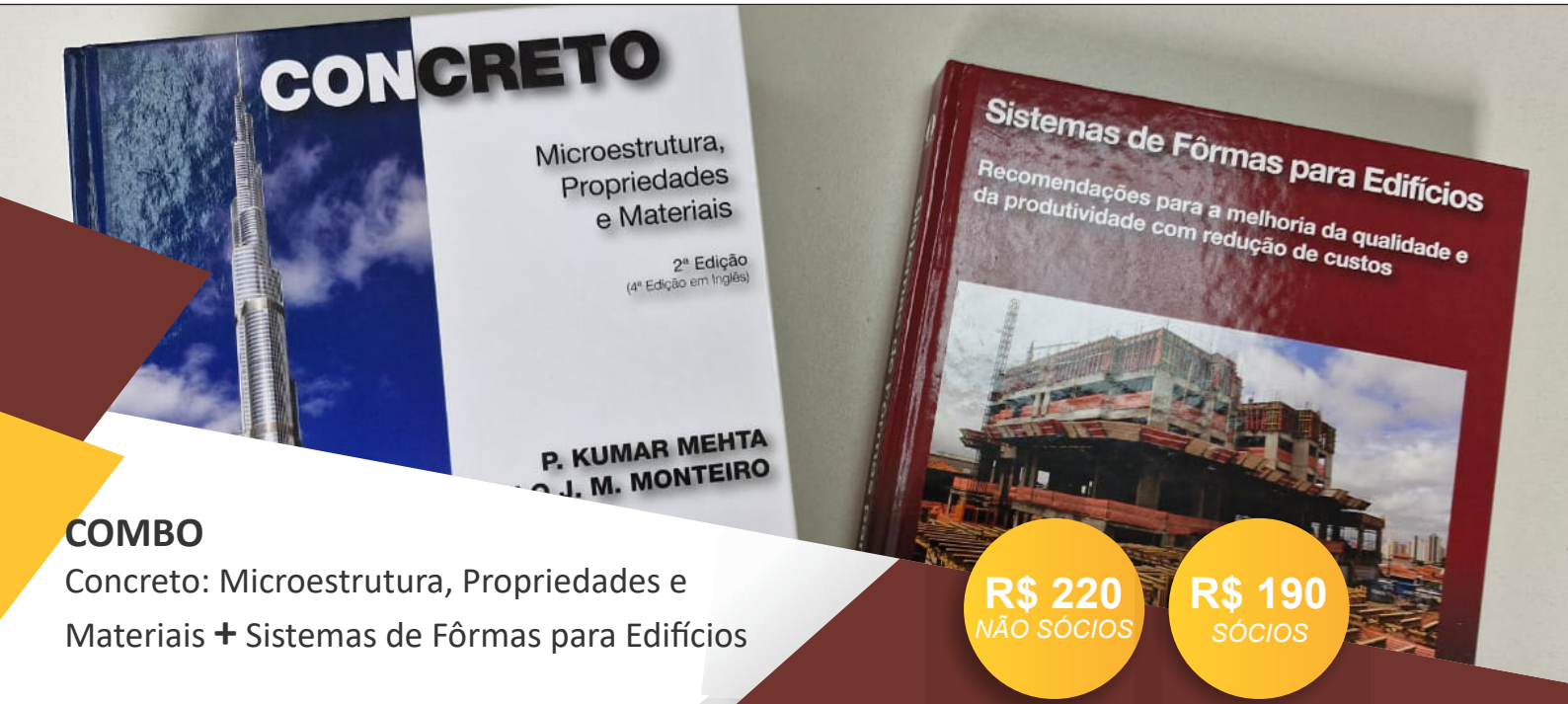
[2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738 — Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. ABNT, 2015.

[3] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. C 1074 — Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method. ASTM, 2019.

[4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655 — Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento. ABNT, 2022.

[5] SERAFINI, Ramoel *et al.* Controle contínuo da resistência de estruturas de concreto pelo método da maturidade. Concreto & Construções, São Paulo, n. 98, p. 85-90, 2020. Editora Cubo. http://dx.doi.org/10.4322/1809-7197.2020.98.0009.

[6] SAUL, A. G. A. Principles underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure. Magazine of Concrete Research, 1951



COMBO

Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais + Sistemas de Fôrmas para Edifícios

R$ 220 NÃO SÓCIOS

R$ 190 SÓCIOS

ibracon.org.br/loja

IBRACON

O **IBRACON** *FAZ* ***ANIVERSÁRIO*** *MAS* ***VOCÊ*** *É QUEM RECEBE O* ***PRESENTE!***

Tecnologias digitais: Inspeção de fachadas com drone acoplado **com câmera convencional ou termográfica**

ALEXANDRE CORDIRO DOS SANTOS – ENG. – (alexcord@ipt.br) ;
OSMAR HAMILTON BECERE – TEC. – (becere@ipt.br) | **LMPC**
CAIO POMPEU CAVALHIERI – ENG. – (caiopc@ipt.br) | **SIRGA**

De acordo com a norma NBR 5674 — Manutenção de edificações — Requisitos para o sistema de gestão de manutenção (ABNT; 2024), a manutenção das edificações é um tema cuja relevância transcende a cultura tradicional de considerar o processo de construção encerrado no momento em que a edificação é entregue e entra em uso.

Considerando o valor social das edificações como suporte físico para a realização direta ou indireta de todas as atividades produtivas, é imprescindível que a atividade de manutenção seja levada em conta desde o início da utilização do edifício. Esta deve ser entendida como um serviço técnico programável e como um investimento na preservação do valor patrimonial.

Em termos gerais, a manutenção pode ser classificada como preventiva ou corretiva. A manutenção preventiva consiste na realização de serviços programados antecipadamente, enquanto a corretiva é caracterizada por intervenções imediatas necessárias para garantir a continuidade do uso dos sistemas, elementos ou componentes das edificações, evitando riscos ou prejuízos graves aos usuários ou proprietários.

Os sistemas que compõem as fachadas, por estarem diretamente expostos aos agentes ambientais, podem apresentar degradação mais acelerada que as partes protegidas do edifício. No entanto, a altura dos edifícios cria locais de difícil acesso, demandando altos custos com a locação de equipamentos específicos para inspeção e manutenção. Como alternativa, o setor da construção civil tem investido no uso de veículos aéreos não tripulados (VANTs), ou drones, para a inspeção de fachadas. O LMPC-IPT, reconhecendo o potencial dessa tecnologia, também utiliza drones equipados com câmeras convencionais ou termográficas em seus serviços de diagnóstico de patologias em fachadas.

FIGURA 1
EQUIPAMENTOS USADOS PELO IPT: DRONE MULTIRROTOR DJI INSPIRE 1 V2.0 COM TABLET E CONTROLE REMOTO (A), CÂMERA RGB (B) E CÂMERA TERMOGRÁFICA (C)
FONTE: ACERVO DO IPT

Esta tecnologia permite a inspeção rápida de áreas de difícil acesso, registrando anomalias, fissuras e falhas construtivas com imagens de alta definição que auxiliam na tomada de decisão sobre diretrizes corretivas.

O método de inspeção de fachadas com drones inclui as seguintes etapas principais:

a) Análise do projeto da fachada ou arquitetônico, quando disponível, e avaliação visual da edificação para identificar as áreas a serem inspecionadas com o drone, considerando limitações de voo e interferências;
b) Seleção da câmera (convencional e/ou termográfica), operacionalização do voo e obtenção de imagens das áreas avaliadas;
c) Transferência das imagens para um computador e tratamento dos dados, identificando corretamente os locais das imagens nas fachadas;
d) Análise das manifestações patológicas para definição de diretrizes de recuperação ou aprofundamento da investigação com ensaios laboratoriais específicos.

O uso de câmeras de infravermelho merece destaque, pois fornece uma imagem térmica (termograma) com dados de temperatura da superfície da fachada. Quando há irregularidades no material, o fluxo de calor é alterado, resultando em uma distribuição irregular de temperaturas que permite identificar anomalias, como fissuras.

As fissuras, por exemplo, são manifestações patológicas que merecem atenção especial, pois permitem a penetração de água da chuva no interior da edificação, causando degradação nos materiais de construção e comprometendo a salubridade dos ambientes internos ao favorecer o desenvolvimento de microrganismos. Muitas vezes, essas fissuras são de pequena abertura e não detectáveis em

FIGURA 2
Imagem convencional de parte da fachada frontal de edifício histórico
Fonte: Acervo do IPT

imagens convencionais ou a olho nu, mas detectáveis pelas imagens termográficas.

A Figura 1 mostra os detalhes do drone do IPT (modelo DJI Inspire 1 V2.0) e as duas câmeras acopladas a ele separadamente: convencional (RGB) Zenmuse X3 e termográfica Flir Zenmuse XT não radiométrica.

DETECÇÃO DE FISSURAS

Na Figura 2, em (a), presença de fissura não facilmente identificada pela imagem convencional (RGB). Na Figura 3, obtida de

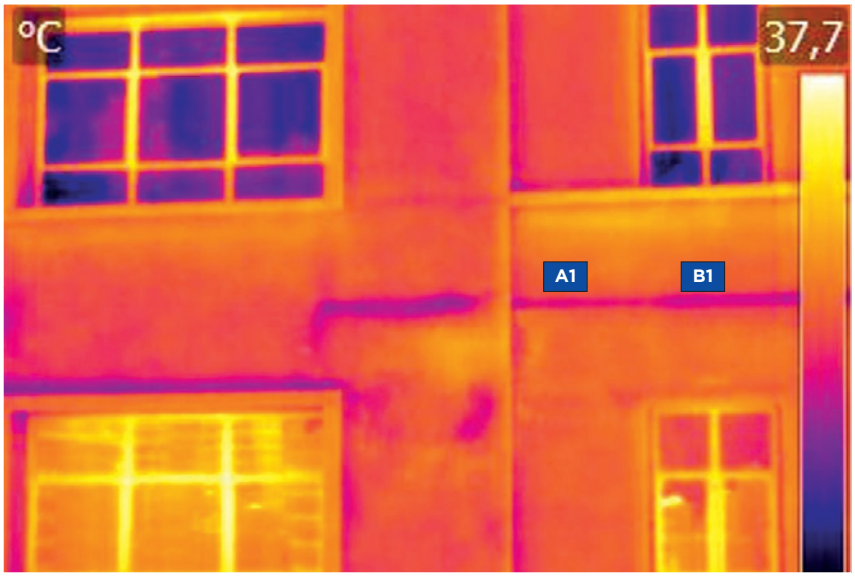


FIGURA 3
Imagem termográfica da mesma região da fachada da Figura 2
Fonte: Acervo do IPT

câmera termográfica a fissura fica destacada em roxo (a1), formando uma "linha contínua" com a parte tratada dessa fissura (b1).

Exemplo de aplicação prática no LMPC-IPT: as Figuras 2 e 3 mostram imagens obtidas com drone pelo Pesquisador Caio Pompeu Cavalhieri (LABGEO-IPT). A Figura 2, obtida de câmara convencional (RGB), mostra a presença de fissura tratada (b), todavia a parte não tratada dessa mesma fissura indicada pela seta em (a) não é facilmente identificada, principalmente a olho "nu". Por sua vez, na Figura 3, essa fissura é facilmente evidenciada pela imagem termográfica (a1), formando uma linha contínua com a parte tratada dessa fissura (b1).

O ideal é que as operações de inspeção de fachadas com drones sejam realizadas sempre em duas pessoas: uma dedicada à operação do equipamento e a outra, portadora de conhecimento técnico relacionado ao objeto da investigação para acompanhamento visual do equipamento e orientação dos locais de coleta de imagens. É essencial para o sucesso desse tipo de atividade que o profissional responsável pela operação do drone esteja atualizado, principalmente em relação à regulamentação que envolve três instituições governamentais: Anac (Agência Nacional de Aviação Civil), Decea (Depto. de Controle do Espaço Aéreo) e Anatel (Agência Nacional de Telecomunicações).

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5674: Manutenção de edificações — Requisitos para o sistema de gestão de manutenção. Rio de Janeiro: ABNT,Rio; 2024.

[2] Bauer E, Pavón E, Barreira E, Kraus E (2016) Analysis of building facade defects using infrared thermography: laboratory studies. J Build Eng 6:93–104

[3] TONDELO, Patricia Geittenes; BARTH, Fernando. Análise das manifestações patológicas em fachadas por meio de inspeção com VANT. PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção, Campinas, SP, v. 10, p. e019009, fev. 2019. ISSN 1980-6809. Disponível em: https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8652817>. Acesso em: 26 fev. 2019. doi: https://doi.org/10.20396/parc.v10i0.8652817.

COMBO

Estruturas de Concreto Armado - Vol1 e Vol2
+ Durabilidade do Concreto: Bases Científicas para a Formulação de Concretos Duráveis de Acordo com o AmbienteTardia(DEF)

R$ 450 *NÃO SÓCIOS*

R$ 300 *SÓCIOS*

ibracon.org.br/loja

IBRACON

O **IBRACON** *FAZ* ***ANIVERSÁRIO*** *MAS* ***VOCÊ*** *É QUEM RECEBE O* ***PRESENTE!***

DOI – http://dx.doi.org/10.4322/1809-7197.2024.114.0002

Impressão 3D: como essa tecnologia **vem impactando atualmente a construção civil?**

IVVY PEDROSA CAVALCANTE PESSÔA QUINTELLA – PROFª. DRª. – https://orcid.org/0000-0002-6279-0250 (ivvy.quintella@ctec.ufal.br) ;
EDUARDO QUINTELLA FLORÊNCIO – MSC. | **CENTRO DE TECNOLOGIA – CTEC/ UFAL**

RESUMO

NO PRESENTE ARTIGO, OBJETIVA-SE INTRODUZIR ASPECTOS TÉCNICOS DA IMPRESSÃO 3D COM MATERIAIS CIMENTÍCIOS APLICADA À CONSTRUÇÃO CIVIL, APRESENTANDO TENDÊNCIAS GLOBAIS E DISCUTINDO EM QUE MEDIDA ELA VEM IMPACTANDO ESSA INDÚSTRIA. SERÃO DISCUTIDAS ALGUMAS DAS PRINCIPAIS VANTAGENS DA MANUFATURA ADITIVA POR EXTRUSÃO DE CONCRETO, COMO A ELIMINAÇÃO DA NECESSIDADE DO USO DE FÔRMAS, RESPONSÁVEIS POR GRANDE PARTE DO TEMPO E DO CUSTO ASSOCIADO À CONSTRUÇÃO EM CONCRETO. POR OUTRO LADO, SERÃO APRESENTADAS ALGUMAS DAS LIMITAÇÕES DESSA TECNOLOGIA EM SEU ESTÁGIO ATUAL, RELATIVAS À SUA CAPACIDADE CONSTRUTIVA, ÀS PROPRIEDADES DO MATERIAL E AO SISTEMA ESTRUTURAL, ENTRE OUTROS. APESAR DAS DIFICULDADES TÉCNICAS E DA FALTA DE LEGISLAÇÃO, APRESENTA-SE TENDÊNCIAS GLOBAIS DO MERCADO, DENOTANDO CLARO CRESCIMENTO. FINALMENTE, CONSTATA-SE QUE, APESAR DOS FEITOS ATÉ O MOMENTO, A IMPRESSÃO 3D UTILIZANDO CONCRETO AINDA NÃO SE CONSOLIDOU COMO UMA TECNOLOGIA COMPETITIVA E AMPLAMENTE UTILIZADA COMO FERRAMENTA IMPORTANTE NA CONSTRUÇÃO TRADICIONAL E NO AMBIENTE DE PRÉ-FABRICAÇÃO. PORÉM, DADA A SUA RÁPIDA EXPANSÃO DE MERCADO E AMADURECIMENTO TECNOLÓGICO CONTÍNUO NOS ÚLTIMOS ANOS, A PERSPECTIVA DE CRESCIMENTO PARA A PRÓXIMA DÉCADA É PROMISSORA. NESSE SENTIDO, VISLUMBRA-SE A CONSOLIDAÇÃO DA 3DCP COMO UMA DAS PRINCIPAIS TECNOLOGIAS A SEREM ADOTADAS NA BUSCA DE UMA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO AUTOMATIZADA, PRODUTIVA, EFICIENTE E AMBIENTALMENTE SUSTENTÁVEL.

PALAVRAS-CHAVE: IMPRESSÃO 3D, CONCRETO, CONSTRUÇÃO CIVIL, TECNOLOGIA.

1. INTRODUÇÃO

Há pouco mais de uma década, o entusiasmo midiático em torno da impressão 3D prometia mudanças revolucionárias na produção de edificações, alardeando-a como uma tecnologia disruptiva que iria substituir os métodos construtivos tradicionais. Agora, suplantado o arroubo inicial, pode-se avaliar seu amadurecimento tecnológico, compreendendo suas vantagens e limitações. No presente artigo, objetiva-se apresentar aspectos técnicos da impressão 3D com materiais cimentícios aplicada à construção civil, apresentando tendências globais e discutindo em que medida ela vem impactando o mundo da construção civil.

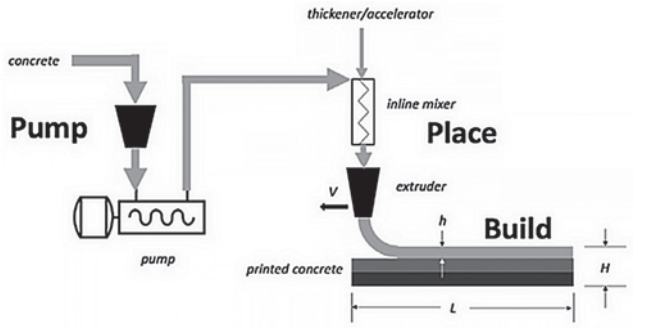


FIGURA 1
ESQUEMA DE UM SISTEMA 2K DE BOMBEAMENTO E EXTRUSÃO DE CONCRETO MOSTRANDO ALGUMAS DAS PRINCIPAIS ETAPAS DE PROCESSAMENTO
FONTE: WANGLER *et al*, 2018. [2]

O processo de impressão 3D, ou manufatura aditiva (MA), é feito geralmente a partir de um desenho digital CAD, que é transformado em um código geométrico e enviado para o maquinário que realiza a fabricação tridimensional do objeto, sobrepondo camada por camada de material. No âmbito da construção civil, existem diversas tecnologias de MA, que utilizam diferentes materiais, tais como polímeros, metais e concreto. Dentre elas, a mais popular e amplamente adotada é a que opera por bombeamento e extrusão de materiais cimentícios, conhecida como 3DCP (*3D concrete printing*, impressão 3D em concreto) [1], que funciona de modo semelhante ao de uma impressora de extrusão de filamento polimérico (FDM), porém sem o uso de aquecimento.

As etapas do processo de fabricação incluem:

1 — o design, envolvendo modelagem, fatiamento, planejamento do percurso de impressão e simulação;
2 — a dosagem dos materiais, podendo ser usada formulações próprias ou misturas prontas para 3DCP de fabricantes de argamassas;
3 — a ativação da matriz cimentícia em misturadores pela adição de água, que pode ser produzida em lotes ou por meio de misturadores contínuos;
4 — o transporte do material, feito geralmente por meio de bombas de cavidade progressiva;
5 — a extrusão do material, por meio de cabeçote de impressão com bico extrusor acoplado ao manipulador cinético. Algumas operações incluem uma etapa de pós-processamento antes da cura.

Atualmente, existem duas principais abordagens em 3DCP, conhecidas como sistemas de um componente (1K) e de dois componentes (2K) [3]. Os sistemas

monocomponentes são ainda hoje os mais utilizados mundialmente e baseiam-se em uma formulação de maior densidade e com tensão de escoamento capaz de garantir sua construtibilidade durante a sobreposição das camadas. Os sistemas bicomponentes, de uso mais recente, baseiam-se no uso de um material mais fluido e fácil de bombear, alguns com adição de retardantes [3]. Ele será posteriormente misturado a acelerantes, em um cabeçote misturador próximo à saída do bico extrusor, logo antes da deposição do material (Figura 1). A maior parte dos sistemas trabalham com deposição de fluxo contínuo, mas há alguns exemplos de sistemas que interrompem e reiniciam a deposição de material, como é comum na impressão 3D FDM.

A MA pode ocorrer tanto *"on-site"*, diretamente no canteiro de obras, como *"off-site"*, em um ambiente de fabricação controlado. A construção *on-site* geralmente utiliza como maquinário um sistema de pórtico com abordagem 1K, que permite a extrusão de material deslocando-se nos eixos X Y Z. A movimentação cinemática nesse tipo de equipamento é semelhante à de uma impressora 3D *desktop*, constituindo-se como uma solução econômica e largamente adotada em 3DCP. Esse sistema possui a vantagem de eliminar a necessidade de logística das peças produzidas, possibilitando construir em dimensões maiores e em maior volume. Porém, a sua produtividade pode ser afetada pelas intempéries e pelo tempo de montagem do equipamento no local.

A fabricação 3DCP *off-site*, por sua vez, vale-se do princípio da pré-fabricação, produzindo partes que serão posteriormente montadas no canteiro. Em geral, utiliza-se braços robóticos industriais (Figura 2). Esse tipo de equipamento destaca-se por seus seis ou mais eixos, proporcionando maior versatilidade e possibilitando maior complexidade formal às partes. Geralmente utilizam o sistema 2K e uma menor altura das camadas impressas, inclusive podendo valer-se da deposição não planar e da variação controlada de altura e largura das camadas. Por outro lado, há desvantagens como uma menor área de produção alcançada e a necessidade de transporte e montagem das peças no canteiro, podendo encarecer e tornar o processo mais complexo em algumas situações devido à logística.

Atualmente, há empresas e *startups* do setor apostando em ambas as linhas, bem como em novas interações, tais como: o uso de robôs no canteiro de obras. Porém, há uma certa tendência ao direcionamento de serviços. Empresas que adotam o sistema *on-site*/pórtico focam na construção de edificações no canteiro de obras e as que adotam o sistema *off-site*/braços robóticos geralmente se especializam na produção de partes especiais a serem montadas. As empresas que mais possuem obras efetivamente construídas e certificadas são as do primeiro tipo.

2. VANTAGENS DA ADOÇÃO DA IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Uma das principais vantagens da manufatura por extrusão de concreto é a eliminação da necessidade do uso de fôrmas, responsáveis por grande parte do tempo e do custo associado à construção em concreto. Visto que o material é depositado apenas onde é necessário, reduz-se, em princípio, o desperdício de matéria-prima. As aberturas para a integração de esquadrias e instalações já podem ser previstas em projeto e seus vazios integrados ao processo construtivo. Outra possibilidade é a integração de diversas funções aos elementos construídos, como isolamento térmico e acústico.

Essa tecnologia abre caminho para a adoção de uma maior liberdade formal no projeto e para a personalização em massa, sem que isso gere grande impacto no custo de fabricação final. Outra vantagem é possibilidade de adoção da otimização topológica, em que o design promove a aplicação de material apenas onde ele é estruturalmente demandado pelos esforços. Isso pode reduzir significativamente a quantidade de material na fabricação de um elemento construtivo, contribuindo também para a sustentabilidade ambiental.

A 3DCP pode contribuir para aumentar a sustentabilidade e reduzir o impacto ambiental do setor da construção civil por meio de estratégias mais eficientes de design e fabricação baseadas em automação. Ela também vem buscando soluções para promover a redução de material necessário

FIGURA 2
Impressão 3D de coluna utilizando braço robótico industrial, em pesquisa liderada pelo Prof. Richard Buswell, um dos pioneiros desse campo, na Universidade de Loughborough, Inglaterra
Fonte: Autores

e de resíduos gerados, reduzindo também os custos de produção. Atualmente, há empresas tentando desenvolver processos que empreguem a MA em todos os componentes da construção, desde a fundação até a cobertura, o que pode colaborar ainda mais para potencializar seus benefícios.

Assim, a adoção de processos automatizados, como a 3DCP, pode contribuir para uma maior eficiência e rapidez construtiva, e, consequentemente, para o barateamento de custos com mão de obra, sem perder de vista a qualidade e a durabilidade do produto fabricado. Ressalve-se, porém, que aqui desconsideram-se processos iniciais de implantação da tecnologia (aquisição, treinamento, formulação, calibração...). Uma vez implantada, há relatos de empresas da área de efetivo alcance de maior rapidez em obras produzidas, com mão de obra reduzida, comparada à construção tradicional em concreto.

3. LIMITAÇÕES TÉCNICAS DA IMPRESSÃO 3D

Apesar de a liberação do uso de fôrmas se mostrar como um importante quesito em termos de produtividade e otimização de recursos, a falta de regulação específica para estruturas fabricadas com essa tecnologia cria a necessidade de uso de elementos estruturais feitos com concreto convencional. Assim, muitos dos exemplares conhecidos e efetivamente construídos são em realidade cascas impressas em 3D utilizadas como fôrmas permanentes. Ou seja, o concreto armado convencional é adotado em pilares estruturais no interior das paredes impressas, que funcionam como elemento de fechamento.

Recentes estudos situaram a 3DCP como *technology readiness* (TRL — nível de prontidão tecnológica) entre 6 e 7 [5]. Isso denota que, enquanto tecnologia, ela ainda se encontra evoluindo e possui várias questões a resolver para integrar-se plenamente ao mercado da construção civil. Por exemplo:

a) Quanto à sua capacidade construtiva: em geral, ela é utilizada apenas para construir paredes e elementos construtivos, e não a construção inteira. Ainda há a necessidade de mão de obra e de tecnologias tradicionais para a produção de todo o restante da edificação, que deve ser contabilizada no tempo total de construção.

b) Quanto ao material: apesar de se referir como impressão 3D em concreto, geralmente trata-se do uso de um micro concreto, devido à limitação de integração de agregados graúdos para o bombeamento e extrusão na maior parte dos equipamentos. Embora já comecem a aparecer alguns exemplos de equipamentos que suplantam essa limitação, permitindo o uso de agregados graúdos, eles ainda são exceção. O material cimentício precisa ser suficientemente fluido para ser bombeado, porém, uma vez depositado, ele precisa estruturar-se rapidamente para manter a forma e suportar o peso das camadas seguintes. Isso envolve uma maior complexidade no desenvolvimento de formulações especiais com vários aditivos.

c) Quanto à confiabilidade do processo de fabricação: a anisotropia característica da 3DCP impacta diretamente em sua resistência mecânica. As falhas no processo de produção podem levar a problemas como descolamento de camadas, descontinuidades do filamento e aparecimento de fissuras por retração do concreto.

d) Quanto ao sistema estrutural: ainda não há uma metodologia amplamente aceita sobre como integrar reforço estrutural à essa tecnologia. Em muitos casos, a armação é integrada de modo tradicional e as paredes impressas são utilizadas como elementos de fechamento. Há também o uso de protensão, um pós-tensionamento com o emprego de cabos de aço, geralmente utilizado na união de peças modulares. Essas são maneiras encontradas para adaptar-se às legislações estruturais dos edifícios tradicionais.

e) Quanto à sustentabilidade ambiental: apesar da otimização do uso de material, a pegada de carbono das formulações usadas em 3DCP em geral é maior devido ao uso de uma maior quantidade de cimento, o que vem sendo sanado em parte pela integração de aditivos substituindo parte do cimento e pelo uso de materiais reciclados.

4. TENDÊNCIAS GLOBAIS

Constata-se atualmente um crescimento em termos de quantidade de edifícios produzidos. De acordo com um relatório divulgado pela Cobod [6], em 2022 havia 130 edifícios feitos com essa tecnologia ao redor do mundo, 55 dos quais foram construídos nesse mesmo ano, denotando uma rápida recuperação pós-pandemia. Esse número pequeno de edificações totais, porém, evidencia que ainda há mais expectativa em torno da tecnologia do que resultados e impacto global em larga escala no setor da construção.

Porém, esses números tendem a aumentar rapidamente. No Oriente Médio, a Fundação Dubai Future prevê que a impressão 3D na construção reduzirá o trabalho de construção humana em 70% e cortará custos em 90%. Recentemente, Dubai anunciou que pretende ter 25% dos novos edifícios construídos com a tecnologia de impressão 3D até 2030. É interessante que haja iniciativas e apoio dos governos nessa adoção, criando um ambiente favorável ao seu desenvolvimento. É o caso do Reino Unido, que estabeleceu uma Estratégia Nacional para Manufatura Aditiva. Nela, estima-se que a construção em 3DCP poderia contribuir com mais de US$1 bilhão para o PIB anual do país e criar 15.000 oportunidades de empregos até 2025.

Atualmente, a maior parte das atenções talvez esteja voltada para a possibilidade dessa tecnologia ajudar a solucionar dois problemas: a crise mundial da habitação e a construção rápida em áreas que sofreram com desastres naturais ou guerras. Algumas pesquisas apontaram que a 3DCP poderia reduzir o tempo de construção em um quarto, em comparação com os métodos convencionais [7]. Diversos artigos em mídia recente indagaram se a impressão 3D poderia ajudar a resolver a crise imobiliária nos EUA. A empresa americana Icon está produzindo atualmente Wolf Ranch,

FIGURA 3
Wolf Ranch, um condomínio de 100 casas impressas em 3D no Texas, em parceria com a construtora Lennar e o escritório de arquitetura BIG. Construção da empresa Icon 3D, com maquinário próprio (Vulcan)
Fonte: https://www.dezeen.com/2022/11/11/icon-big-wolf-ranch-3d-printed-homes-austin/

um condomínio de 100 casas impressas em 3D no Texas, em parceria com a construtora Lennar e o escritório de arquitetura BIG (Figura 3). Recentemente, a empresa dinamarquesa Cobod, a maior fornecedora mundial de sistemas de pórticos com bombeamento e extrusão para impressão 3D, enviou maquinário para a construção de uma escola na Ucrânia como parte de uma ação humanitária.

Outra tendência fundamental é a pesquisa e desenvolvimento de materiais menos poluentes. O concreto é o material de construção mais utilizado no mundo, sendo, todavia, um dos maiores responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa na atmosfera. A indústria global do concreto, por meio da entidade Global Cement and Concrete Association (GCCA), anunciou no ano de 2020 a meta de atingir a neutralidade de carbono até 2050. Muitas pesquisas em 3DCP focam em diminuir a pegada de carbono do concreto, buscando desenvolver materiais alternativos, incorporar materiais locais, materiais reciclados, materiais que absorvem carbono, entre outras estratégias.

Apesar do destaque dado pela mídia ao longo dos anos, permanece certa resistência do mercado em relação à confiabilidade e à atratividade visual do produto final. Isso se deve também à falta de legislação específica que garanta sua qualidade e durabilidade, que ainda não passou pela prova do tempo. Muitas edificações construídas receberam os avais necessários para proceder a construção, porém tais leis podem valer apenas localmente, como o Decreto No. (24) de 2021 do Emirado de Dubai [8]. Atualmente, há diversos esforços em relação ao desenvolvimento de legislações e certificações a serem amplamente adotadas. Em 2020, a empresa Peri conseguiu obter aprovação para a construção da primeira casa impressa em 3D na Alemanha, a partir do desenvolvimento de testes complementares e adaptados, tais como propriedades do material, resistência e durabilidade, entre outros (Figura 4).

Para além da legislação, as limitações em relação à escala de impressão 3D também parecem vir sendo suplantadas. Em 2022, a China anunciou a construção de um projeto de grande escala, a Usina Hidrelétrica da Barragem de Yangqu, usando robôs controlados por Inteligência Artificial e impressão 3D. Ela possui 180 metros de altura e está prevista para ser concluída até 2024, sendo atualmente a maior obra a utilizar essa tecnologia.

Na Europa, América do Norte e Ásia, a 3DCP encontra-se em plena expansão [6,7], com diversos projetos de destaque tanto em edificações como em infraestrutura, integrando a maior parte dos edifícios construídos (Figura 6), bem como construtoras atuantes nessa tecnologia. Nota-se também o grande crescimento de grupos de pesquisa científica, centros de inovação e de publicações dedicadas ao tema, além de eventos de divulgação científica na área. Destaca-se, em especial, a RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication (Digital Concrete) [9], que em 2024 promove sua quarta edição.

Na América Latina, no entanto, a 3DCP ainda se encontra em fase experimental e de alcance limitado [7], com iniciativas isoladas e com apenas cinco edificações contabilizadas até 2022 (Figura 5). No Brasil, mapeou-se algumas iniciativas pontuais, como a *startup* 4Constru, que integrou as *startups* Inova House, 3D Home Construction (que construiu a primeira casa impressa do Brasil) e Domus 3D. Destaca-se também os avanços alcançados pelo Projeto HubIC 3D, ligado ao HubIC (Hub de Inovação e Construção Digital), fruto de um Convênio de Cooperação Técnica entre a USP e a ABCP, junto com o SNCI.

FIGURA 4
A primeira casa impressa em 3D da Alemanha, com dois pavimentos e uma área de cerca de 160 m² (2020). Construção do Grupo Peri, com maquinário Cobod Bod 2
Fonte: https://cobod.com/explore-designs-and-interiors-of-3d-printed-houses/

5. CONCLUSÕES

A Indústria da Construção Civil vem enfrentando a necessidade urgente de

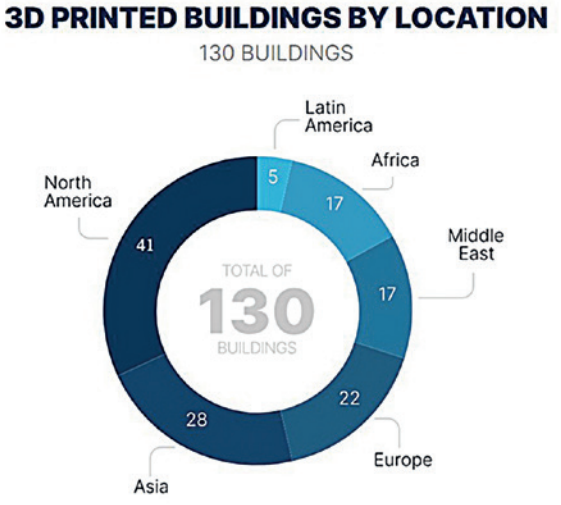


FIGURA 5
Distribuição de edificações em 3DCP por localização geográfica continental
Fonte: https://cobod.com/global-inventory-3d-printed-buildings/

melhorar sua produtividade e eficiência, ainda muito inferior em comparação a outros setores da indústria da manufatura [10]. Enquanto outras indústrias já possuem alto grau de automação e avançam na adoção de sistemas *ciber* físicos ligados à Indústria 4.0, a construção civil ainda envolve grande parte de trabalho artesanal em seus processos.

Porém, esse quadro tende a mudar. A mão de obra cada vez mais escassa pressiona a adoção de soluções mais eficientes, lastreadas pelo extenso processo de digitalização do setor no momento atual, proporcionado pela adoção do BIM e pela integração de outras tecnologias digitais como *Digital Twins*, IOT, *Big Data*, entre outras. Para além dos avanços na tecnologia da informação e na gestão, é crucial que a transformação digital agregue também os processos construtivos avançados e automatizados, menos dependentes da mão de obra manual. Nesse sentido, a 3DCP é uma das tecnologias que podem contribuir para o avanço na digitalização e integração de todo o processo construtivo, desde o projeto até a fabricação, promovendo melhorias nos índices de eficiência e produtividade e reduzindo a incorrência de erros de interpretação e retrabalho.

Atualmente, no entanto, constata-se que ainda poucas inovações construtivas foram efetivamente incorporadas pelo setor de construção, devido a questões como falta de legislação específica, necessidade de investimento e até mesmo a resistência em adotar novas soluções tecnológicas. Isso é agravado em setores especialmente resistentes a mudanças, como é o caso da Indústria da Construção Civil [11].

A adoção de novas tecnologias implica a necessidade de investir em automação e mão de obra especializada, representando um alto custo inicial de investimento em equipamento e treinamento. Pesa também o fato de que, apesar do amadurecimento tecnológico nos últimos anos, a 3DCP ainda precisa enfrentar certas limitações relativas à sua capacidade construtiva, às propriedades do material de impressão, ao sistema estrutural, à falta de legislação específica, entre outras. Isso impacta na confiabilidade do processo como um todo e em sua capacidade competitiva de mercado. Assim, ainda não há um consenso se ela poderá suplantar tais barreiras e alcançar a escalabilidade necessária para impactar a indústria.

Ademais, essa tecnologia envolve diretamente áreas como arquitetura, robótica, engenharia estrutural, ciência dos materiais, e a necessidade de interação entre todas essas disciplinas é crucial para seu sucesso. Assim, faz-se necessário investir na capacitação de profissionais a partir de uma visão multidisciplinar da construção, integrando os princípios da construção digital e da 3DCP desde a formação acadêmica, o que ainda não é realidade consolidada na maior parte dos currículos disciplinares.

Em resumo, constata-se que, apesar dos feitos até o momento, a impressão 3D utilizando concreto ainda não se consolidou como uma tecnologia competitiva e amplamente utilizada como ferramenta importante na construção tradicional e no ambiente de pré-fabricação. Porém, dada a sua rápida expansão de mercado e amadurecimento tecnológico contínuo nos últimos anos, a perspectiva de crescimento para a próxima década é promissora. Nesse sentido, vislumbra-se a consolidação da 3DCP como uma das principais tecnologias a serem adotadas na busca de uma Indústria da Construção automatizada, produtiva, eficiente e ambientalmente sustentável.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Alagoas, pelo apoio à realização de Pós-doutorado, e à CAPES, pelo apoio à realização de Doutorado sanduíche no exterior (bolsa PDSE), ambos na Loughborough University (Inglaterra), uma das instituições pioneiras em impressão 3D em concreto.

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] BUSWELL, R.A. LEAL DE SILVA, W.R. JONES, S.Z. DIRRENBERGER, J. 3D printing using concrete extrusion: a roadmap for research. Cem. Concr. Res., Vol. 112 (2018), pp. 37-49, Article 10.1016.

[2] WANGLER, T. DIGITAL CONCRETE PROCESSING: A REVIEW. 1ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON 3D CONSTRUCTION PRINTING (3DCP 2018), MELBOURNE, AUSTRALIA, NOVEMBER 25-28, 2018..

[3] WANGLER, T., PILEGGI, R., GUREL, S.,FLATT, R. J.; A chemical process engineering look at digital concrete processes: Critical step design, inline mixing, and scaleup," Cement and Concrete Research, vol. 155, p. 106782, May 2022..

[4] VANTYGHEM, G. DE CORTE, W. SHAKOUR, E. AMIR O. 3D printing of a post-tensioned concrete girder designed by topology optimization Autom. Constr., 112 (2020).

[5] MA, G. R. BUSWELL, W.R. LEAL DA SILVA, L. WANG, J. XU, S.Z. JONES. Technology readiness: a global snapshot of 3D concrete printing and the frontiers for development. Cem. Concr. Res., 156 (2022), Article 106774.

[6] COBOD INTERNATIONAL, Annual Report 2022. In: https://cobod.com/annual-report-2022/

[7] ROBAYO-SALAZAR, R. MEJÍA DE GUTIÉRREZ, M. A. VILLAQUIRÁN-CAICEDO, S. DELVASTO ARJONA. 3D printing with cementitious materials: Challenges and opportunities for the construction sector. Automation in Construction, vol. 146, Feb. 2023.

[8] EMIRATE OF DUBAI. Decree No. (24) of 2021 Regulating the Use of Three-dimensional Printing in Construction Works in the Emirate of Dubai. 2021.

[9] BUSWELL, BLANCO, CAVALARO, KINNELL (ORGS). Third RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication: Digital Concrete 2022, RILEM BOOKSERIES, Springer 2022.

[10] MCKINSEY GLOBAL INSTITUTE. Reinventing Construction: A Route to Higher Productivity. February 2017. In: https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/reinventing-construction-through-a-productivity-revolution/pt-BR

[11] LAUBIER, R WUNDER, M WITTHÖFT, S ROTHBALLER C. Will 3D Printing Remodel the Construction Industry? JANUARY 23, 2018. Boston Consulting Group. In: https://www.bcg.com/publications/2018/will-3d-printing-remodel-construction-industry

DOI – http://dx.doi.org/10.4322/1809-7197.2024.114.0003

Confiabilidade de lajes de edifício em alvenaria estrutural **na ocorrência de remoção de uma parede**

TÚLIO RAUNYR CÂNDIDO FELIPE – Ph.D – https://orcid.org/0000-0002-3958-4643 (tulio.raunyr@gmail.com) ; **LAÍS MORAES TEIXEIRA** – M.Sc ;
ÍTALO GUSMÃO SILVA – Bach. ; **HUGO LEONARDO RIBEIRO BAPTISTA DE SOUZA** – Bach. ;
WILLIAM MACEDO KOELLER – M.Sc ; **RAFAEL NUNES DO NASCIMENTO** – M.Sc ;
JOSÉ COSTA DOS SANTOS – Bach. | **Diretoria de Obras Civis da Marinha**
ANDRÉ TEÓFILO BECK – Prof. | **EESC/USP**

RESUMO

Em edifícios de alvenaria, a remoção de uma parede estrutural para aumentar ambientes sem a autorização do responsável técnico pelo projeto, ou de um engenheiro civil com a devida Anotação de Responsabilidade Técnica, aumenta a probabilidade de ocorrência de danos acidentais com graves consequências para a estrutura do edifício. Portanto, surge uma grande preocupação à respeito da ocorrência deste problema, o qual envolve riscos à vida humana, assim como prejuízos financeiros à sociedade. Neste sentido, o presente artigo tem como objetivo apresentar uma metodologia para mensurar a probabilidade de falha de lajes na ocorrência de remoção de uma parede. Para tal, emprega-se a Teoria de Charneiras Plásticas para determinar os momentos de plastificação para as configurações de ruína de laje simplesmente apoiada e laje apoiada com uma borda livre. A equação de estado limite é escrita em função do momento de plastificação e do momento resistente da seção transversal. As análises probabilísticas são realizadas por meio do método de simulação de Monte Carlo, com número de simulação igual a 10^7. Verificou-se que no estágio íntegro (sem remoção de parede), todas as lajes do pavimento tipo em estudo estão com probabilidade de falha aceitável (menores que 10^{-4}). Por outro lado, na ocorrência de remoção de parede, o valor da probabilidade de falha condicional resulta na unidade, ou seja, confiabilidade nula.

Palavras-chave: alvenaria estrutural, análise probabilística, confiabilidade estrutural, danos acidentais.

1. INTRODUÇÃO

O uso de edificações em alvenaria estrutural tem experimentado um aumento nos últimos anos no Brasil. Essa tendência visa otimizar o canteiro de obra e reduzir os custos finais, uma vez que as características de modulação e racionalização desse sistema construtivo reduz os desperdícios de materiais (1-3).

As construtoras brasileiras adotaram este método construtivo como o "carro-chefe" para projetar seus novos edifícios residenciais (4). Todavia, uma considerável parcela desses novos empreendimentos é adquirida por um cliente final que não possui o conhecimento sobre o processo construtivo da alvenaria. Isso resulta, em alguns casos, na remoção de paredes pelos usuários dos imóveis, buscando a expansão dos espaços, o que pode acarretar sérios problemas, como, por exemplo, a ruptura de uma laje. Isso porque a retirada de um elemento de apoio da laje modifica as suas condições de contorno conduzindo um aumento brusco nos esforços internos, em especial, no momento de plastificação.

Neste contexto, a remoção de uma parede exigiria a autorização do responsável técnico pela obra, ou de um engenheiro civil com a devida Anotação de Responsabilidade Técnica (ART), conforme a Lei nº 5.194 e suas alterações. Isso se deve ao fato de que a remoção de uma parede estrutural pode aumentar a probabilidade de ocorrerem danos acidentais ou até mesmo o colapso, acarretando consequências graves para a estrutura do edifício. Assim, surge uma preocupação significativa quanto à possibilidade desse problema ocorrer, resultando em riscos para a vida humana, bem como prejuízos financeiros para a sociedade. Sendo assim, o objetivo deste artigo é apresentar uma metodologia para mensurar a probabilidade de falha de lajes de edifícios de alvenaria estrutural na ocorrência de remoção de uma parede.

2. DESENVOLVIMENTO

Nesta seção, são apresentadas as equações de estado limite das lajes. São adotadas as seguintes premissas: (i) as lajes são consideradas retangulares; (ii) é utilizado o processo das forças nodais; (iii) o carregamento adotado é o uniformemente distribuído; (iv) os cálculos são implementados em Linguagem *Visual Basic for Applications* (VBA); (v) o equacionamento é baseado na Teoria das Charneiras Plásticas (TCP); (vi) não é considerado efeito de membrana e arqueamento da laje; (vii) as lajes são avaliadas isoladamente; e (viii) as paredes estruturais e as fundações não serão analisadas.

No estudo de caso apresentado na seção 4 deste artigo, é considerado o pavimento do edifício formado por lajes simplesmente apoiadas nas quatro bordas. Este procedimento é usual no pré-dimensionamentos das edificações em alvenaria estrutural (4-5). Isso porque os vãos das lajes são pequenos, o que implica baixos momentos fletores nas suas bordas. Ademais, as fissuras que surgem nas suas bordas ficam sob as paredes.

Contudo, ressalta-se que a falha ou a remoção de um elemento de apoio modifica as condições de contorno da laje,

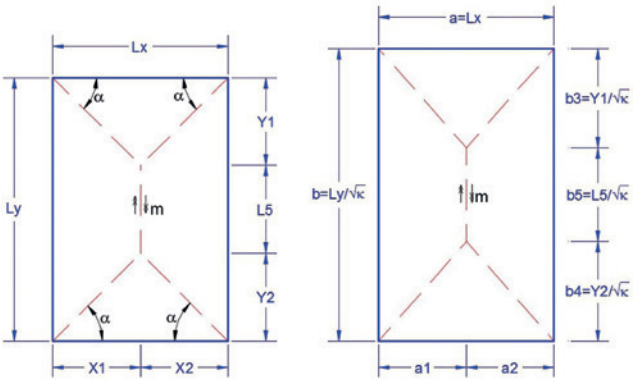


FIGURA 1
NOTAÇÃO PARA CONFIGURAÇÃO COMUM
FONTE: (5)

já que a laje ficará com uma das bordas livre. Além disso, haverá uma alteração nos esforços dos demais elementos estruturais da edificação. Esta alteração não será abordada neste artigo. Sendo assim, nas análises que seguem, faz-se necessário a determinação da equação de estado limite para duas condições de contorno: (a) laje simplesmente apoiada; e (b) laje com três bordas apoiadas e uma borda livre.

A seguir, são apresentadas as equações da TCP para essas condições de contorno. A TCP consiste de uma aplicação às placas, do Teorema do Limite Superior da Teoria da Plasticidade. Maiores detalhes sobre a TCP podem ser encontrados nos trabalhos de (6-8).

2.1. Laje simplesmente apoiada

A configuração de ruína de uma laje, por meio da TCP, é aquela associada ao maior valor de momento de plastificação (6-8). Nas lajes retangulares, a configuração de ruína mais frequente apresenta-se com a charneira central paralela ao maior vão (L_y), conforme ilustrado na Figura 1. Esta é denominada de configuração comum. Em contrapartida, quando a razão ($\lambda = \frac{L_y}{L_x}$) entre o maior e menor vão (L_x) da laje é pequena e a charneira central é paralela ao L_x, tem-se a configuração eventual, em conformidade com a Figura 2.

Para lajes com bordas simplesmente apoiadas, o grau de engastamento (φ) e o índice de ortotropia (κ) são definidos por:

$$[1] \quad \phi = \frac{\tilde{m}}{m} = 0$$

$$[2] \quad \kappa = \frac{m_y}{m_x}$$

Onde m e $\tilde{m}$ são, respectivamente, os momentos de plastificação positivo e negativo, enquanto que m_x e m_y são os momentos de plastificação positivo nas direções x e y, respectivamente. Os valores de m_x e m_y são mensurados a partir das funções de aproximação descritas no trabalho de (7).

Para obter a direção da charneira central inicialmente supõe-se que esta é paralela à L_y, por consequência, obtém-se $a = L_x$ e $b = \frac{L_y}{\sqrt{\kappa}}$. Se a ≤ b, a hipótese inicial é correta e, de fato, ocorre a configuração comum. Caso contrário, a > b, tem-se a configuração eventual, consequentemente, $a = \frac{L_y}{\sqrt{\kappa}}$ e $b = L_x$.

Determinados os valores de a e b, calcula-se m_x e m_y por:

$$[3a] \quad m = m_x = \frac{(g+q)\cdot c^2}{6}$$

$$[3b] \quad m_y = \kappa \cdot m_x$$

Sendo, g a carga permanente, q a carga variável, e o valor de c obtido pela Equação 4.

$$[4] \quad c = \frac{a}{2}\left\{\left[\left(\frac{a}{b}\right)^2 + 3\right]^{1/2} - \frac{a}{b}\right\}$$

2.2 Lajes com três bordas apoiadas e uma borda livre

A Figura 3 apresenta a notação utilizada nesta seção. Inicialmente, supõe-se que a configuração de ruína é a ilustrada na Figura 3(a). Logo, fazendo-se o equilíbrio de momentos fletores, obtém-se:

$$[5] \quad m = \frac{b^2}{24\cdot a\cdot \kappa}\left[\begin{matrix}(g+q)\cdot(3\cdot a - 2\cdot a_1) + \\ 3\cdot(P_g + P_q)\end{matrix}\right]$$

Sendo, P_g e P_q, respectivamente, a carga linear permanente e variável ao longo

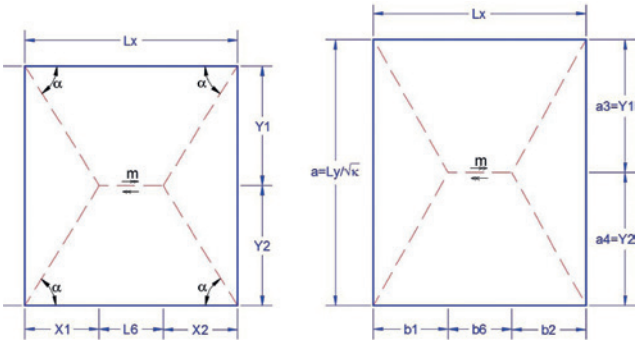


FIGURA 2
NOTAÇÃO PARA CONFIGURAÇÃO EVENTUAL
FONTE: (5)

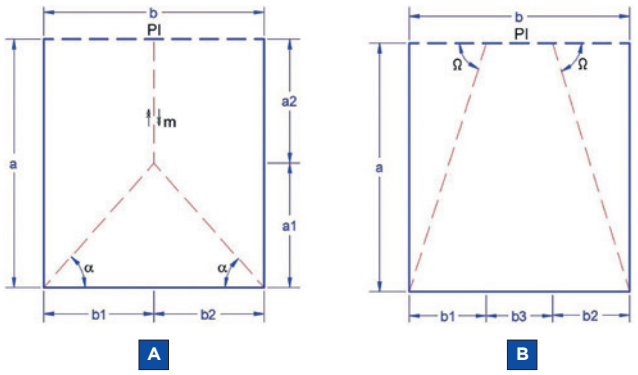


FIGURA 3
LAJE COM UMA BORDA LIVRE: (A) CONFIGURAÇÃO COMUM E (B) CONFIGURAÇÃO EVENTUAL
FONTE: (5)

TABELA 1
Probabilidade de falha alvo ($p_{f,target}$)

Medida relativa do custo de segurança	Consequência de falha leve	Consequência de falha moderada	Consequência de falha grave
Grande	$1{,}0 \cdot 10^{-3}$	$5{,}0 \cdot 10^{-4}$	$1{,}0 \cdot 10^{-4}$
Normal	$1{,}0 \cdot 10^{-4}$	$1{,}0 \cdot 10^{-5}$	$5{,}0 \cdot 10^{-6}$
Pequeno	$1{,}0 \cdot 10^{-5}$	$5{,}0 \cdot 10^{-6}$	$1{,}0 \cdot 10^{-6}$

Nota: A consequência leve considera que o risco de vida e prejuízos econômicos são pequenos ou negligenciáveis. Já a consequência moderada considera que o risco de vida e prejuízos econômicos são consideráveis. Enquanto que a consequência grave considera que o risco de vida e os prejuízos econômicos são altos.
Fonte: (10)

da borda livre e o valor de a_1 calculado pela Equação 6.

$$[6] \quad a_1 = \frac{b^2}{4 \cdot a \cdot \kappa}\left[\sqrt{1 + \frac{12 \cdot a \cdot \kappa \cdot \left[\begin{matrix} a(g+q)+ \\ (P_g + P_q) \end{matrix}\right]}{(g+q) \cdot b^2}} - 1\right]$$

Para verificar a hipótese inicial, é indispensável que $a_1 \leq a$. Caso contrário, a configuração de ruína é aquela mostrada na Figura 3(b). Logo, fazendo o equilíbrio de momentos fletores, obtém-se:

$$[7] \quad m = \frac{b_2^2}{6 \cdot a\left[\kappa - \left(\frac{b_2}{a}\right)^2\right]}\left[\begin{matrix} (g+q) \cdot \\ a + 3 \cdot (P_g + P_q) \end{matrix}\right]$$

Em que,

$$[8a] \quad b_2 = \frac{\kappa \cdot a^2}{b}\left(\frac{\sqrt{c_3} - 2 \cdot c_1}{3 \cdot c_2}\right)$$

$$[8b] \quad c_1 = (g+q) \cdot a + 3 \cdot (P_g + P_q)$$

$$[8c] \quad c_2 = (g+q) \cdot a + 2 \cdot (P_g + P_q)$$

$$[8d] \quad c_3 = 4 \cdot c_1^2 + \frac{9 \cdot b^2 \cdot c_2^2}{\kappa \cdot a^2}$$

2.2 Momento resistente da seção transversal

A solução do problema pode ser realizada fazendo-se o equilíbrio dos esforços na seção transversal, o que resulta (5):

$$[9] \quad M_R = A_s \cdot f_y\left(d - \frac{A_s \cdot f_y}{170 \cdot f_c}\right) \ [kN.cm/m]$$

Sendo MR o momento resistente da seção transversal, A_s a armadura longitudinal, f_y a tensão de escoamento do aço, d a altura útil da seção transversal e f_c a resistência à compressão do concreto. Ressalta-se que, para a formulação da equação de estado limite, os valores das propriedades dos materiais que compõem o valor do M_R devem ser avaliados com seus valores nominais.

2.3 Equação de estado limite

Na avaliação da confiabilidade de uma estrutura, é fundamental a determinação das equações de estado limite para cada modo de falha. No caso das lajes em estudo, o modo de falha predominante é a formação de charneiras plásticas (8). Este modo transforma o comportamento da laje em um mecanismo, provocando o seu colapso. Neste contexto, a equação de estado limite para esse modo de falha resulta:

$$[10] \quad g(\vec{x}) = M_R - m = A_s \cdot f_y\left(d - \frac{A_s \cdot f_y}{170 \cdot f_c}\right) - m$$

Onde m (momento de plastificação) é calculado por meio das equações apresentadas nos itens 2.1 e 2.2, sendo seu valor dependente da configuração de ruína, geometria e carregamentos atuantes na laje.

3. PROBABILIDADE DE FALHA

O problema fundamental da teoria de confiabilidade estrutural é a mensuração da probabilidade de falha definida por:

$$[11] \quad p_f = P[g(\vec{x}) \leq 0] = \int_{g(\vec{x}) \leq 0} f_x(\vec{x}) dx$$

Em que $\vec{x}$ é o vetor das variáveis aleatórias, $P[\cdot]$ é o operador probabilidade e $f_x(\vec{x})$ é a função conjunta de densidade de probabilidade.

A confiabilidade (R) é o evento complementar da p_f sendo determinada pela Equação 12.

$$[12] \quad \mathcal{R} = 1 - p_f = 1 - \int_{g(\vec{x}) \leq 0} f_x(\vec{x}) dx = \int_{g(\vec{x}) > 0} f_x(\vec{x}) dx$$

Devido à dificuldade da integração multi-dimensional, a Equação 11 não pode ser determinada analiticamente, apenas para alguns casos individuais (9). Neste artigo, a Equação 11 é resolvida por meio da Simulação de Monte Carlo (SMC). Este método foi implementado em linguagem VBA e acoplado ao algoritmo que determina o momento de plastificação das lajes por meio da TCP. Para mais detalhes da SMC, recomenda-se o trabalho de (9).

A Tabela 1 apresenta os valores alvos para p_f, conforme prescrição do código internacional de análise probabilística (10). Ressalta-se que os projetos de engenharia devem ser dimensionados para atingir, no mínimo, os valores de $p_{f,target}$ apresentados na Tabela 1, a fim de proporcionar à segurança estrutural.

4. ESTUDO DE CASO

A Figura 4 apresenta o pavimento tipo do edifício de alvenaria estrutural hipotético. As lajes são do tipo maciça com

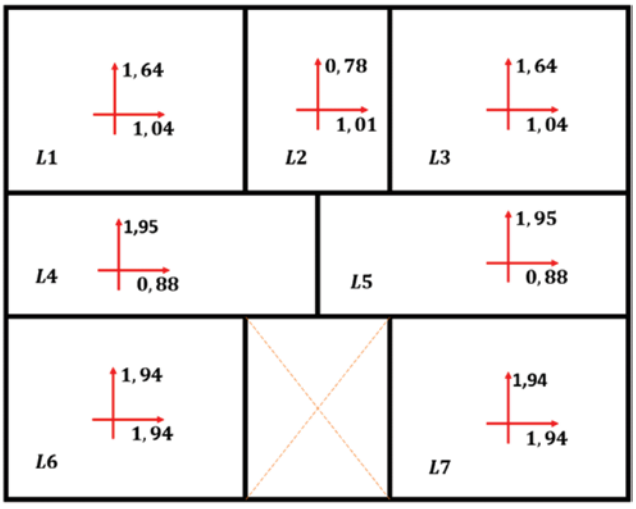


FIGURA 4
Pavimento tipo em estudo

TABELA 2
Geometria das lajes em cm

Vão	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7
L_x	315	270	315	300	300	420	420
L_y	420	315	420	555	555	420	420

Nota: As variáveis A_s, d, L_x e L_y são assumidas determinísticas

TABELA 3
Estatísticas das variáveis aleatórias

Parâmetros	f_y (kN/cm²)	f_c (kN/cm²)	g (kN/m²)	q (kN/m²)
Média	54,50	3,00	1,05 · g	q
Coeficiente de variação	0,05	0,10	0,10	0,25
Distribuição	Normal	Normal	Normal	Gumbel Max
Referência	(13)	(13)	(14)	(14)

Nota: As variáveis A_s, d, L_x e L_y são assumidas determinísticas

espessura de 10 cm, a carga permanente é igual a 3,5 kN/m² (sendo o peso próprio da laje igual a 2,5kN/m² e uma parcela de 1,0 kN/m² para considerar o peso próprio do piso, revestimento e forro), a carga variável é igual a 2 kN/m² (conforme Tabela 10 da ABNT NBR 6120 (11)), o concreto considerado é C25, o aço utilizado é CA-50 e o cobrimento nominal igual 2,5 cm. O dimensionamento das lajes é realizado, conforme prescrições da norma brasileira de concreto (12). Os valores indicados na Figura 4 são as armaduras transversais de cada laje em . Neste artigo, não é apresentado o detalhamento das taxas de armadura das lajes. Maiores detalhes, os autores recomendam a ABNT NBR 6118 (12).

A Tabela 2 mostra os vãos das lajes, enquanto a Tabela 3 apresenta as variáveis aleatórias e suas respectivas estatísticas. Para as análises de confiabilidade, utiliza-se a SMC com número de simulação (n_s) igual a 10^7.

Partindo das estatísticas dadas na Tabela 3, realiza-se a determinação da p_f. Primeiramente, calcula-se p_f considerando o Estado Íntegro (EI), sem remoção de parede, ou seja, condição de contorno de laje simplesmente apoiada. Como os valores das armaduras da seção transversal são determinados para cada direção ($A_{s,x}$,$A_{s,y}$), a p_f deve ser mensurada levando-se em conta a configuração de ruína correspondente a cada direção (Tabela 4).

Assumindo que os eventos são mutuamente exclusivos, a p_f é dada pela soma das sequências de falhas referente a $A_{s,x}$ e $A_{s,y}$. A Tabela 5 apresenta os valores de p_f e R obtidos por meio da Simulação de Monte Carlo.

Comparando os valores da Tabela 5 com a $p_{f,target}$ recomendada por (10), assumindo consequências de falha moderada e medida relativa do custo de segurança grande ($p_{f,target} \leq 5 \cdot 10^{-4}$), observa-se que todas as lajes estão com probabilidade aceitável e confiabilidade compatível com os requisitos da segurança estrutural. Além disso, verifica-se que o dimensionamento das lajes por meio da norma brasileira de concreto (11) resulta aproximadamente no mesmo nível de segurança (mesma confiabilidade), conforme mostrado na Tabela 5.

A TCP é baseada no teorema do limite superior da plasticidade. Este teorema estabelece que toda configuração de ruína cinematicamente admissível é maior ou igual à carga que provoca a ruína da peça. Portanto, verifica-se que a carga determinada por esse teorema é o limite superior para a carga efetiva de ruína. Por isso que a p_f mensurada por meio da TCP implica valores próximo a $p_{f,target}$, o que comprova que a TCP subestima a carga de ruína, sendo a favor da segurança. Além disso, resultados experimentais confirmam que a carga de ruína é geralmente maior que a determinada pela TCP (7). Isso porque o efeito de membrana e arqueamento oferece uma reserva de resistência. Contudo, tal reserva pode não ser considerada para todos os tipos de lajes.

Realizando novamente as análises de confiabilidade, agora para a estrutura no Estágio de Propagação de Dano (EPD), isto é, remoção ou falha de uma parede, determinam-se as probabilidades de falha condicionais (p_f [L_j/E_i]), que corresponde à falha da laje L_j dada à ocorrência de falha/remoção da parede E_i. Inicialmente, a parede E_i é removida de uma borda da laje L_j. Em seguida, calcula-se a p_f [L_j/E_i] para esta condição de contorno (laje apoiada com uma borda livre). Este procedimento é repetido para todas as lajes do pavimento tipo em estudo, sempre colocando de volta a parede retirada na análise anterior.

A Figura 5 apresenta a notação utilizada no código implementado. No EPD, a configuração de ruína da laje vai depender da posição da parede que foi removida. Pela condição de simetria, pode-se agrupar as bordas da laje em dois tipos: borda tipo 1 (borda paralela ao menor vão) e borda tipo 2 (borda perpendicular ao menor vão). Assim, avaliando a laje L_1 considerando a remoção da parede sob o vão menor (borda tipo 1) resulta $p_{f,x}$ [L_1/E_1] = $p_{f,x}$ [L_1/E_2] = 9,99 · 10^{-1}, $p_{f,y}$ [L_1/E_1] = $p_{f,y}$) [L1/E_2] = 6,25 · 10^{-2}, p_f [L_1/E_1] = 1 e R = 0. No caso da remoção da parede sob vão maior (borda tipo 2) resulta $p_{f,x}$ [L_1/E_3] = $p_{f,x}$ [L_1/E_4] = 9,90 · 10^{-1}, $p_{f,y}$ [L_1/E_3] = $p_{f,y}$ [L_1/E_4] = 7,36 · 10^{-1}, pf [L_1/E_3] = p_f [L_1/E_4]=1 e R = 0. As Tabelas 6 e 7 resumem os resultados de todas as lajes do pavimento tipo.

Para o EPD, obtém-se p_f [L_j/E_i] = 1, conforme Tabela 7. Por consequência, todas as lajes em estudo falham, ou seja, R = 0.

TABELA 4
Análise das lajes no EI: $p_{f,x}$ e $p_{f,y}$

Laje	$p_{f,x}$	$p_{f,y}$
L1	1,33 · 10^{-5}	1,44 · 10^{-5}
L2	1,44 · 10^{-5}	1,35 · 10^{-5}
L3	1,33 · 10^{-5}	1,44 · 10^{-5}
L4	1,25 · 10^{-5}	1,33 · 10^{-5}
L5	1,25 · 10^{-5}	1,33 · 10^{-5}
L6	1,26 · 10^{-5}	1,22 · 10^{-5}
L7	1,26 · 10^{-5}	1,22 · 10^{-5}

TABELA 5
Análise das lajes no EI: p_f e R

Laje	p_f	R
L1	2,77 · 10^{-5}	0,9999723
L2	2,79 · 10^{-5}	0,9999721
L3	2,77 · 10^{-5}	0,9999723
L4	2,58 · 10^{-5}	0,9999742
L5	2,58 · 10^{-5}	0,9999742
L6	2,48 · 10^{-5}	0,9999752
L7	2,48 · 10^{-5}	0,9999752

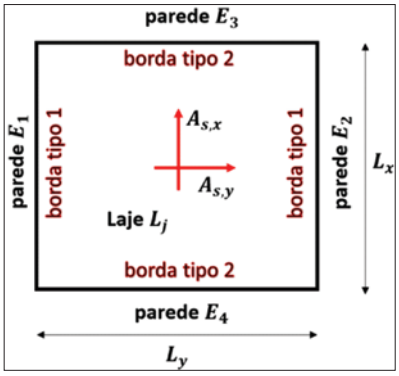


FIGURA 5
Notação utilizada no EPD

A configuração de ruína da laje devido à falha/remoção de um elemento de apoio aumenta drasticamente o momento de plastificação. Como o dimensionamento do pavimento tipo foi realizado para uma configuração que gera um momento solicitante razoavelmente baixo, as armaduras transversais calculadas não são suficientes para suportar o aumento do momento de plastificação para a configuração de ruína de borda livre. Portanto, conclui-se que uma possível solução de projeto para minimizar as falhas das lajes é a consideração da condição de contorno de laje com vinculação engastada nas suas bordas. Isso porque a configuração de ruína de uma laje engastada tem a capacidade de redistribuir melhor os momentos fletores solicitantes, transferindo parte desses esforços para as bordas engastadas. Outrossim, suas bordas possuiriam taxas de armaduras dadas pelo seu dimensionamento que iriam contribuir com o valor do momento resistente da seção transversal.

Um aspecto fundamental a considerar são as taxas de armaduras adicionais, que desempenham um papel crucial na resistência e estabilidade dos elementos estruturais. Conforme especificado nas normas ABNT NBR 16868-1 (15) e BS 5628-1 (16), essas taxas são determinadas de acordo com as cargas e exigências estruturais, garantindo a segurança e reduzindo os riscos de falhas. Além disso, os detalhes construtivos previstos nessas normas são projetados para promover a redundância, continuidade e ductilidade das estruturas. A redundância é importante para que, mesmo em caso de falha em um elemento estrutural, a carga seja redistribuída de forma segura. A continuidade, por sua vez, garante a integridade estrutural ao longo de toda a obra, minimizando os pontos fracos. Já, a ductilidade é essencial para a capacidade da estrutura de deformar-se sem rupturas bruscas, o que é crucial em situações de carregamento extremo.

Outro fator a destacar é a importância da regularização e modulação na construção de alvenaria estrutural. A regularização refere-se ao processo de correção de imperfeições e nivelamento das superfícies, garantindo uma distribuição uniforme das cargas e evitando pontos de concentração de tensão. A modulação, por sua vez, consiste na padronização das dimensões e posicionamento dos elementos construtivos, facilitando a execução e garantindo a precisão dimensional da estrutura. Somado a isso, o efeito arco, resultado da disposição e interação dos elementos estruturais, confere à alvenaria estrutural uma capacidade única de redistribuir esforços. Esse fenômeno permite que a carga seja transferida de forma mais eficiente e uniforme ao longo da estrutura, aumentando sua capacidade de suportar solicitações variadas e reduzindo a probabilidade de ocorrência de danos acidentais.

5. CONCLUSÕES

Neste artigo, uma metodologia foi proposta para avaliar a probabilidade de falha de lajes em concreto armado na ocorrência de remoção/falha de um elemento de apoio. A metodologia combina a Teoria de Charneiras Plásticas com a Confiabilidade Estrutural. Duas configurações de ruína foram avaliadas: (a) laje simplesmente apoiada e (b) laje apoiada com uma borda livre. Verificou-se que no estágio íntegro (sem remoção de parede), todas as lajes do pavimento tipo em estudo estão com probabilidade de falha aceitável. Em contrapartida, no estágio de propagação de dano (com remoção de parede), os valores das probabilidades de falhas condicionais resultam igual a 1, ou seja, confiabilidade nula. Por conseguinte, todas as lajes nesse estágio falham.

Portanto, a hipótese de considerar a laje na configuração (a) é contra a segurança. Isso porque, a laje não teria a capacidade de redistribuir os seus esforços na ocorrência de retirada/falha de uma parede. A remoção de uma parede implicaria a configuração (b). Esta configuração impõe um aumento significativo no momento de plastificação, conduzindo a sua ruptura.

No presente estudo, as análises foram conduzidas sem levar em consideração as taxas de armaduras adicionais e os detalhes construtivos prescritos pelas normas ABNT NBR 16868-1 e BS 5628-1. Além disso, o efeito arco não foi contemplado nas análises. É importante ressaltar que, devido ao caráter acadêmico do exemplo, o foco foi na apresentação da metodologia proposta. No entanto, para trabalhos

TABELA 6
Análise das lajes no EPD: $p_{f,x}$) e $p_{f,y}$

Laje	Borda tipo 1		Borda tipo 2	
	$p_{f,x}$ [$L_j/E_{1,2}$]	$p_{f,y}$ [$L_j/E_{1,2}$]	$p_{f,x}$ [$L_j/E_{3,4}$]	$p_{f,y}$ [$L_j/E_{3,4}$]
L1	$9{,}99 \cdot 10^{-1}$	$6{,}25 \cdot 10^{-2}$	$9{,}90 \cdot 10^{-1}$	$7{,}36 \cdot 10^{-1}$
L2	1,00	$1{,}55 \cdot 10^{-2}$	$9{,}97 \cdot 10^{-1}$	$1{,}44 \cdot 10^{-1}$
L3	$9{,}99 \cdot 10^{-1}$	$6{,}31 \cdot 10^{-2}$	$9{,}90 \cdot 10^{-1}$	$7{,}36 \cdot 10^{-1}$
L4	1,00	$5{,}38 \cdot 10^{-1}$	1,00	1,00
L5	1,00	$5{,}38 \cdot 10^{-1}$	1,00	1,00
L6	1,00	$3{,}33 \cdot 10^{-3}$	1,00	$3{,}33 \cdot 10^{-3}$
L7	1,00	$3{,}33 \cdot 10^{-3}$	1,00	$3{,}33 \cdot 10^{-3}$

Nota: p_f [$L_j/E_{i,k}$] = p_f [L_j/E_i] = p_f [L_j/E_k], onde i e k referem-se à parede removida

TABELA 7
Análise das lajes no EPD: p_f e R

Laje	p_f	R
L1	1,00	0,00
L2	1,00	0,00
L3	1,00	0,00
L4	1,00	0,00
L5	1,00	0,00
L6	1,00	0,00
L7	1,00	0,00

futuros ou aplicações no meio técnico, é recomendável incluir esses requisitos nas análises, pois eles desempenham um papel significativo na segurança e estabilidade das estruturas de alvenaria.

Por fim, a metodologia aqui delineada pode ser aplicada para qualquer sistema construtivo, não apenas para edificações em alvenaria estrutural, desde que seja possível escrever as equações de estado limite para seus respectivos modos de falha.

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] CORRÊA, M. R. S.; RAMALHO, M. A. Projeto de edifícios de alvenaria estrutural. São Paulo: PINI, 2004.
[2] PARSEKIAN, G. A.; HAMID, A. A.; DRYSDALE, R. G. Comportamento e dimensionamento de alvenaria estrutural. São Carlos: EdUFSCAR, 2013.
[3] MOHAMD, G. Construções em alvenaria estrutural: materiais, projeto e desempenho. São Paulo: Blucher, 2020.
[4] FELIPE, T. R. C.; HAACH, V. G. Discussion about progressive collapse of masonry building. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v.12, n.3, p.479-485, 2019.
[5] FELIPE, T. R. C. Novo método para a avaliação do risco de colapso progressivo em edifícios de alvenaria estrutural. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.
[6] INGERSLEV, A. The strength of rectangular slabs. Journal of the Institution of Structural Engineers, v.1, n.1, p.3-14, 1923.
[7] JOHANSEN, K. Moments of rupture in cross-reinforced slabs. Proc. Intern. Assoc. Bridge and Structural Eng., v.1, p.277-296, 1932.
[8] PINHEIRO, L. M. Análise elástica e plástica de lajes retangulares de edifícios. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1988.
[9] MELCHERS, R. E.; BECK, A. T. Structural reliability analysis and prediction. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2018.
[10] JOINT COMMITTE ON STRUCTURAL SAFETY. Probabilistic model code – Part 1: Basis of design. Denmark, 2001.
[11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2019.
[12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto armado. Rio de Janeiro, 2023.
[13] NOGUEIRA, C. G. Desenvolvimento de modelos mecânicos, de confiabilidade e de otimização para aplicação em estrutura de concreto armado. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.
[14] ELLIWGWOOD, B.; GALAMBOS, T. V. Probability-based criteria for structural design. Structural Safety, v.1, n.1, p.15-26, 1983.
[15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16868: Alvenaria estrutural – Parte 1: Projeto. Rio de Janeiro, 2020.
[16] BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS 5628: Code of practice for use of masonry – part 1. London, 1992.

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

DOI – http://dx.doi.org/10.4322/1809-7197.2024.114.0004

Avaliação comparativa do comportamento térmico de paredes de concreto **construídas por impressão 3D**

RODRIGO DO VAL ANDRADE – DOUT. – (rodrigo.andrade@coc.ufrj.br) ;
EDUARDO DE MORAES REGO FAIRBAIRN – PROF. – https://orcid.org/0000-0003-0321-7152 ;
OSCAR AURELIO MENDOZA REALES – PROF. – https://orcid.org/0000-0002-4241-1321 ;
ANA BEATRIZ DE CARVALHO GONZAGA E SILVA – PROF. – https://orcid.org/0000-0003-3688-3434 | **COPPE/UFRJ**

RESUMO

A TECNOLOGIA DE IMPRESSÃO 3D TEM DESPERTADO O INTERESSE NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL PELA POSSIBILIDADE DE PRODUZIR ESTRUTURAS DE CONCRETO COMPLEXAS. A LIBERDADE DE CRIAÇÃO DE DIFERENTES GEOMETRIAS INTERNAS ATRAVÉS DESSE MÉTODO PODE MELHORAR SIGNIFICATIVAMENTE O COMPORTAMENTO TÉRMICO DAS EDIFICAÇÕES, RESULTANDO POTENCIALMENTE EM UMA MENOR DEMANDA DE ENERGIA PARA CLIMATIZAÇÃO. ESTE TRABALHO TEM POR OBJETIVO ANALISAR A TRANSFERÊNCIA DE CALOR QUE OCORRE ATRAVÉS DE UMA PAREDE CONSTRUÍDA POR MEIO DE IMPRESSÃO 3D E COMPARAR OS RESULTADOS COM DOIS TIPOS DE PAREDES CONVENCIONAIS. AS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS FORAM REALIZADAS NAS TRÊS CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS, UTILIZANDO O PERFIL DE TEMPERATURA E RADIAÇÃO SOLAR DO DIA MAIS QUENTE DE 2022 NO RIO DE JANEIRO. OS RESULTADOS REVELARAM QUE ELEMENTOS DE CONCRETO CONSTRUÍDOS ATRAVÉS DA IMPRESSORA PODEM OFERECER UMA EFICIÊNCIA TÉRMICA SUPERIOR ÀS CONSTRUÇÕES CONVENCIONAIS.

PALAVRAS-CHAVE: IMPRESSÃO 3D, CONCRETO, MODELAGEM COMPUTACIONAL, COMPORTAMENTO TÉRMICO.

1. INTRODUÇÃO

A Indústria 4.0, com a impressão 3D como uma de suas principais inovações, revoluciona várias áreas de pesquisa, incluindo engenharia civil, automotiva, aeroespacial, odontologia e medicina, evidenciando seu papel transformador em diversas disciplinas. Segundo Bogue (2013), este processo de fabricação aditiva destaca-se por sua eficiência, criando objetos sólidos ao unir materiais camada por camada.

Na construção civil, a impressão 3D de concreto começa com a mistura e o bombeamento do material para a extrusora, que, guiada por modelos 3D criados por programas computacionais especializados, é controlada com precisão por braços robóticos ou estruturas em pórtico, permitindo a construção de estruturas complexas (Bhushan Jindal e Jangra, 2023). Esse método responde a desafios do setor, como melhorar a produtividade, reduzir o desperdício de materiais e oferecer liberdade geométrica aos objetos estruturais (Filgueiras, Silva e Toralles, 2021).

Embora a impressão 3D exista desde os anos 80, sua aplicação na construção civil ganhou destaque na última década (Rutkin, 2014), incentivando o aumento nas pesquisas e no desenvolvimento de novas tecnologias de construção automatizada utilizando impressão 3D em concreto.

O interesse crescente na área levou a estudos comparativos que avaliam a eficiência das estruturas impressas em 3D em relação às convencionais, abordando custos, tempos de construção e sustentabilidade (J e Singh, 2023; Ahmed, 2023), bem como desempenho estrutural e térmico (Bello e Memari, 2023). No entanto, a pesquisa sobre o comportamento térmico de paredes impressas em 3D ainda é limitada, destacando uma oportunidade de uma análise mais profunda. O comportamento térmico influencia diretamente o conforto dentro das edificações e é afetado por fatores como o método construtivo e o clima local, além dos aspectos fisiológicos, psicológicos, sociais, físicos e contextuais. Dentre esses, os físicos e contextuais estão relacionados ao clima e ao design construtivo, respectivamente (Fabi et al., 2012).

Em construções convencionais, utiliza-se as cavidades de ar internas dos materiais de construção para controlar a transmitância térmica, adaptando-se às necessidades climáticas de cada localidade. No entanto, essas construções estão muitas vezes limitadas a formas geométricas simples. A impressão 3D em concreto, por outro lado, oferece a liberdade geométrica que permite moldar diferentes configurações de cavidades de ar nas paredes, o que tem um impacto significativo na resposta térmica e, consequentemente, na eficiência energética das edificações.

Diante deste contexto, este artigo compara, através da modelagem numérica, o comportamento térmico entre uma parede maciça, uma parede de tijolo convencional e uma parede construída com tecnologia de impressão 3D em concreto, considerando as temperaturas registradas na cidade do Rio de Janeiro no dia mais quente do ano de 2022.

2. METODOLOGIA

Neste estudo, foi abordada a análise da transferência de calor de paredes construídas com tecnologia de impressão 3D em concreto, utilizando o programa computacional Diana FEA para modelagem numérica. A ferramenta computacional emprega o método dos elementos finitos, permitindo a simulação aproximada das características térmicas das paredes, de acordo com a geometria e as propriedades térmicas reais do material.

O modelo foi definido de modo a incorporar as propriedades térmicas do material, a geometria da parede e condições de contorno específicas, refletindo as características térmicas reais. Foram considerados os parâmetros de condutividade térmica (k), capacidade térmica (C) e coeficientes de transferência de calor nas faces externa (h_{ext}), interna (h_{ext}) e nas cavidades de ar (h_{cav}).

A partir disso, realizaram-se simulações para avaliar a resposta térmica sob condições climáticas extremas, representadas pelo dia mais quente do ano de 2022 na Vila Militar do Rio de Janeiro, Brasil. Esta análise abrangeu três configurações de paredes: impressa em concreto 3D, maciça e de alvenaria convencional, revelando informações importantes sobre a eficiência térmica proporcionada pela inovação na construção civil com impressão 3D.

2.1 Definição do modelo matemático

Para entender os processos térmicos que afetam materiais de construção e avaliar a eficiência térmica das paredes e a dinâmica da transferência de calor, foi considerado o modelo matemático, conforme DEL COZ DÍAZ et al., 2007, baseado na equação de calor para materiais isotrópicos (equação 1), onde a condutividade térmica é uniforme, aplicado em regime transiente:

$$[1] \quad \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{\rho c}{k}\frac{\partial T}{\partial t}$$

Onde:
$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$, $\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$ e $\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$ = 2ª derivada parcial da temperatura em relação às coordenadas x, y e z, respectivamente;
$\frac{\dot{q}}{k}$ = taxa de geração de calor dividida pela condutividade térmica do material;
ρ = Densidade do material;
c = Calor específico do material;
k = Condutividade térmica;
$\frac{\partial T}{\partial t}$ = Primeira derivada parcial da temperatura em relação ao tempo.

Para análises em regime estacionário (equação 2), onde a transferência de calor se mantém constante ao longo do tempo, a dependência temporal é removida, simplificando a equação.

$$[2] \quad \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = 0$$

Os processos de transferência de calor incluem condução, convecção e radiação. O fluxo térmico nas fronteiras é quantificado pela equação 3:

$$[3] \quad q = q_{convecção} + q_{radiação}$$

O termo q indica o fluxo de calor total na interface da parede, compreendendo uma fração devida ao calor convectivo e outra decorrente do calor radiante. A parcela do fluxo de calor atribuída à convecção é calculada através da equação 4, utilizando a Lei de Resfriamento de Newton.

$$[4] \quad q_{convecção} = h\,(T_s - T_a)$$

Onde:
h = coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m²K);
T_s = temperatura da superfície em contato com o ambiente;
T_a = temperatura do ambiente.
No que diz respeito à radiação, a contribuição para o fluxo de calor é definida pela Lei de Stefan-Boltzmann (equação 5):

$$[5] \quad q_{radiação} = \varepsilon\sigma\,(T_s^4 - T_a^4)$$

Onde:
ε = a emissividade da superfície (entre 0 e 1);
σ = constante de proporcionalidade da Lei de Stefan-Boltzmann (valor de 5,67 x 10^{-8} W/m²K⁴).

2.2 Escolha das diferentes geometrias de parede

Este tópico mostra as diferentes configurações de paredes, bem como os dados térmicos de entrada e os dados climáticos da estação meteorológica da Vila Militar, no Rio de Janeiro. Para as simulações, foram utilizados os registros de temperatura do período mais quente de 2022, destacando-se o dia 18 de janeiro, o mais quente do ano. Foi ajustada a incidência de radiação solar nos modelos, considerando-se 70% de absorção e 90% de emissividade para as superfícies de concreto. Como referência, a norma ABNT NBR 15220:2005 indica taxas entre 65% e 80% e entre 85% e 95%,

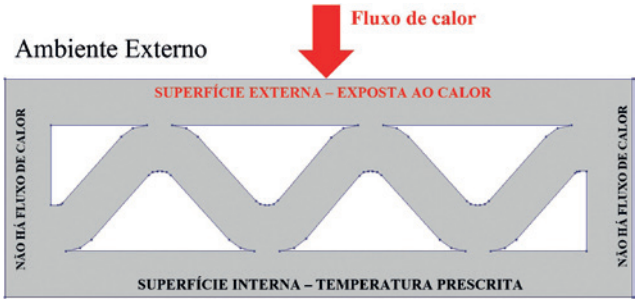


FIGURA 1
Representação do modelo de simulação numérica

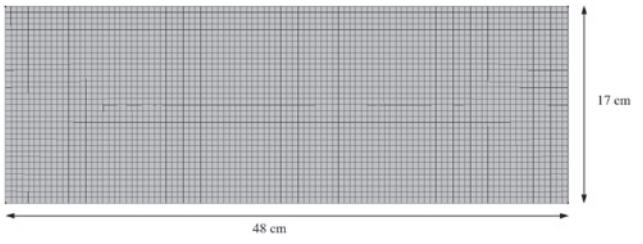


FIGURA 2
Modelo A – Parede maciça de concreto com 17 cm de espessura

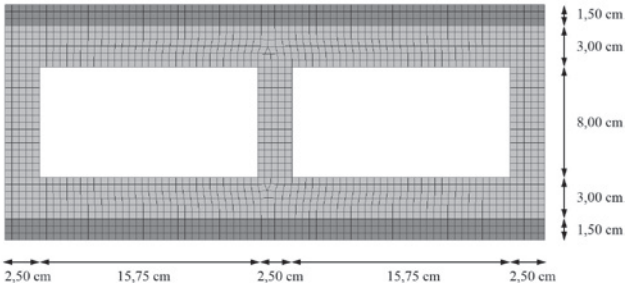


FIGURA 3
Modelo B – Parede convencional composta de bloco de concreto e argamassa, com duas cavidades

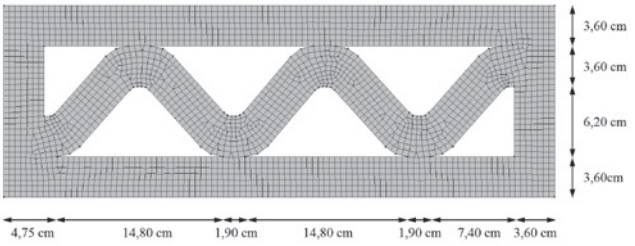


FIGURA 4
Modelo C - Parede de concreto impressa em 3D com 17 cm de espessura

respectivamente. Esse ajuste visou uma representação mais próxima das condições reais de exposição das paredes ao sol. Para simular o comportamento térmico, desenvolveu-se um modelo onde uma face da parede é exposta ao calor, simulando a incidência de energia térmica, enquanto a face oposta é configurada com uma temperatura fixa, baseada em medidas pré-determinadas, representando a ausência de exposição direta ao calor. As demais faces são tratadas como adiabáticas, impedindo o fluxo de calor através delas. A configuração desse modelo está ilustrada na Figura 1.

Foram simulados três modelos de paredes com características distintas, introduzindo uma malha de elementos finitos quadrangulares com espaçamento de 5 mm entre eles. A parede maciça de concreto (Modelo A, Figura 2) foi representada com um total de 3332 elementos, enquanto a parede convencional de blocos de concreto com argamassa e duas cavidades (Modelo B, Figura 3) foi modelada com 1649 elementos. A geometria relacionada à parede de concreto impressa em 3D (Modelo C, Figura 4) foi escolhida com base nas configurações mais frequentes mencionadas na literatura, contendo uma malha com 2527 elementos. Cada modelo foi submetido às mesmas condições climáticas para uma comparação justa de suas eficiências térmicas.

Os parâmetros de entrada do programa computacional foram definidos e disponibilizados na Tabela 1. Para as geometrias do modelo B e modelo C, foram utilizados coeficientes de transferência de calor englobando os efeitos combinados de convecção e radiação nas cavidades de ar, através de uma constante empírica c = 0,065, utilizada para o ajuste do fluxo de calor nas cavidades.

Baseando-se nos dados da simulação numérica, o programa computacional forneceu os resultados da transmitância térmica (U) e a diferença de temperatura das paredes, permitindo a análise comparativa da transferência de calor de cada geometria.

3. RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos pela simulação numérica da transferência de calor em estado transiente em diversas configurações de paredes, visando comparar e determinar qual geometria proporciona o melhor comportamento térmico. Para tal, explorou-se as paredes construídas pelos métodos convencionais e também pelo método de impressão 3D, destacando-se o impacto das cavidades de ar.

Para alimentar o modelo numérico, foram coletados os dados de temperatura máxima e radiação global da estação a cada hora, identificando o pico de temperatura em 18 de janeiro de 2022. Para refletir o comportamento térmico real das paredes, incluiu-se os dados de temperatura e radiação dos dias 16, 17, 19 e 20 de janeiro. Isso porque os dados de entrada da temperatura são diferentes da temperatura distribuída ao longo da geometria interna da parede, sendo influenciada pelo ciclo diário de aquecimento e resfriamento. A Figura 5 mostra as temperaturas externa e interna da parede maciça, que atingiram,

TABELA 1
Parâmetros térmicos dos materiais componentes de cada parede de acordo com a NBR 15220 (2005)

$k_{concreto}$ W/mK	$k_{argamassa}$ W/mK	ρ kg/m³	C J/m³K	h_{ext} W/m²K	h_{cav} W/m²K	h_{int} W/m²K
1,75	1,15	2300	2,30 x 10^6	25	25	7,69

TABELA 2
Comparação do comportamento térmico entre as geometrias simuladas

Modelo geométrico	% de área de cavidade	Temperatura máxima externa (°C)	Temperatura máxima interna (°C)	Diferença entre a temperatura externa e interna (°C)	U (W/m²K)
Maciça	0%	53,6	38,6	15,0	3,7
Bloco	38%	57,4	39,6	17,8	2,9
Impressa	25%	57,0	37,7	19,3	3,4

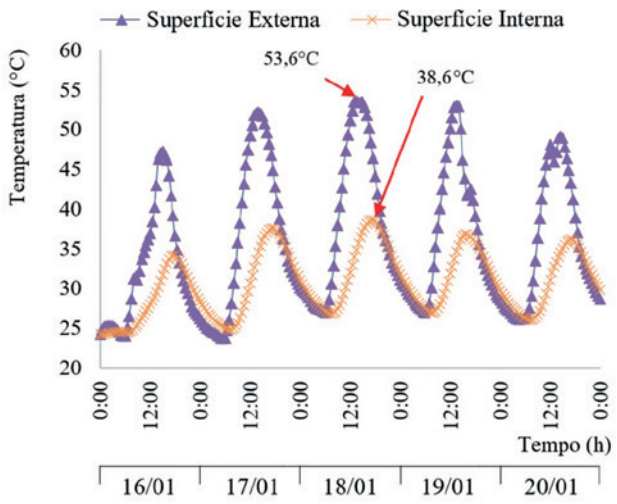


FIGURA 5
Temperatura interna e externa da parede maciça ao longo do tempo

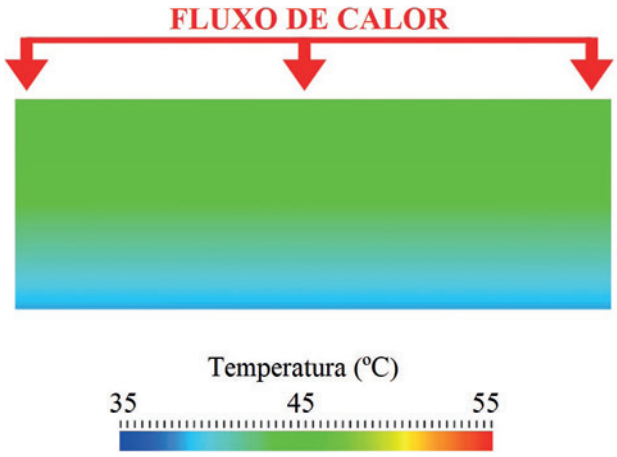


FIGURA 6
Distribuição de temperatura na parede maciça no pico de temperatura máxima

em média, 53,6 °C na superfície externa e 38,6 °C na superfície interna no dia 18 de janeiro, resultando em uma diferença de 15 °C. A distribuição térmica no pico interno é ilustrada na Figura 6.

A parede de bloco de concreto, conforme a Figura 7, registrou uma temperatura externa de 57,4 °C e uma interna de 39,6 °C, uma diferença de temperatura de 17,8 °C, atribuída às cavidades de ar que atuaram como barreira térmica, ilustrada na Figura 8.

A parede de concreto impressa mostrou temperaturas de 57,0 °C na superfície externa e 37,7 °C na superfície interna. Os resultados, ilustrados nas Figuras 9 e 10, mostram a temperatura nas superfícies interna e externa, bem como a distribuição de temperatura no momento do pico na superfície interna.

A comparação entre os resultados obtidos revela que, como esperado, a parede maciça é mais eficiente para conduzir calor, se propagando de maneira contínua através da sua estrutura uniforme até a superfície interna, enquanto as cavidades na parede de bloco criaram resistência térmica adicional, afetando a diferença de temperatura entre as superfícies interna e externa. Os resultados da parede impressa, quando comparados com a parede convencional de bloco de concreto e argamassa, mostram que a geometria da parede impressa obteve uma resposta térmica superior à da parede de bloco de concreto, apesar de ter

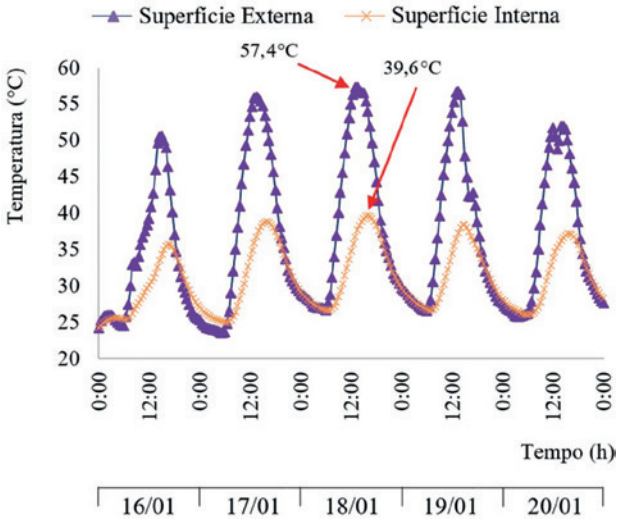


FIGURA 7
Temperatura interna e externa da parede de bloco de concreto ao longo do tempo

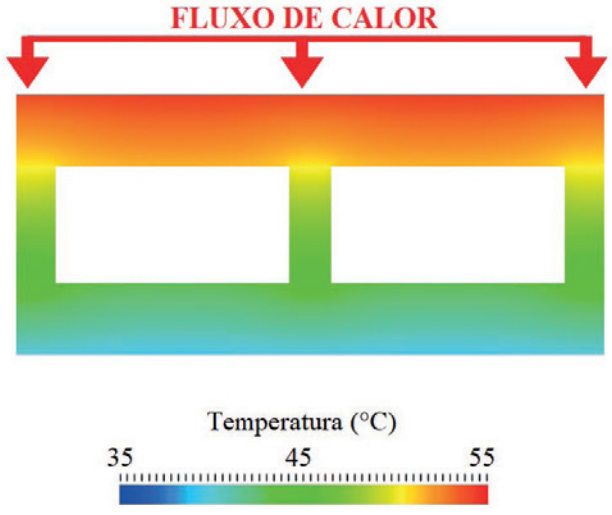


FIGURA 8
Distribuição de temperatura na parede de bloco de concreto no pico de temperatura máxima

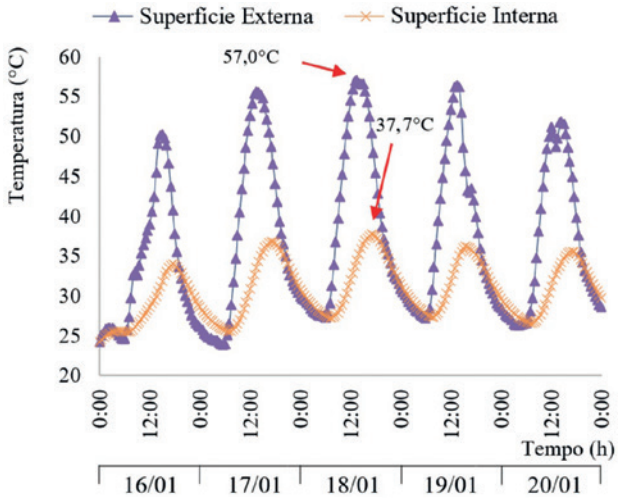


FIGURA 9
Temperatura externa e interna da parede impressa ao longo do tempo

um percentual menor de área de cavidade. Acredita-se que isso possa estar associado com a diferença de formato das cavidades e ao número de filamentos conectando as superfícies interna e externa da parede, estabelecem caminhos preferenciais para a transferência de calor que atravessam as áreas de menor resistência térmica mais rapidamente - pesquisas adicionais precisam ser feitas para confirmar essa hipótese.

A Tabela 2 ilustra a comparação do comportamento térmico entre os modelos simulados, destacando tanto a diferença de temperatura entre as faces externa e interna quanto a transmitância térmica (U) para cada configuração. Embora o modelo de bloco apresente a menor transmitância térmica, indicando teoricamente melhor isolamento, a maior diferença de temperatura observada sugere uma eficiência térmica inferior em comparação ao modelo impresso em 3D. Importante ressaltar que os valores foram obtidos através do programa computacional, pois as normas atuais não especificam o cálculo da transmitância térmica para configurações com cavidades triangulares.

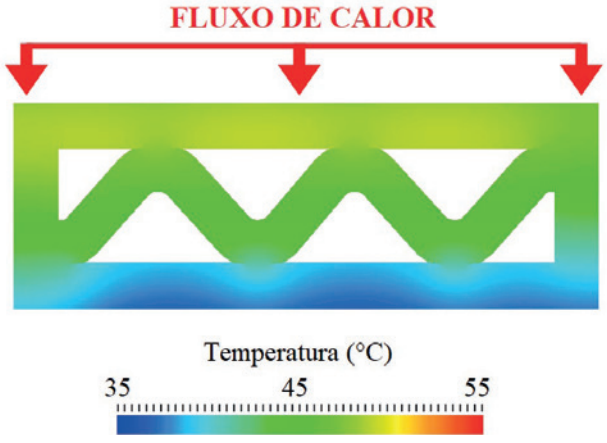


FIGURA 10
Distribuição de temperatura na parede impressa no pico de temperatura máxima

4. LIMITAÇÕES DO MODELO

É importante destacar que o modelo de simulação desenvolvido para analisar a distribuição de temperatura em paredes de concreto impressas por uma impressora 3D oferece várias vantagens, mas também possui algumas limitações que devem ser consideradas ao interpretar os resultados e ao generalizar as conclusões.

Uma das principais limitações do modelo é a falta de uma análise detalhada da dinâmica dos fluidos. O modelo se baseou em ajustes a partir de dados experimentais para simular o fluxo de calor nas cavidades de ar das paredes de concreto. Embora essa abordagem simplificada seja eficaz em muitos casos, ela não captura completamente a complexidade do comportamento do ar nas cavidades das paredes de concreto. Portanto, é importante considerar essa limitação ao aplicar os resultados em cenários com fluxos de ar complexos. A ocorrência de vórtices ou a estratificação do ar dentro das cavidades pode levar a variações que não foram capturadas pelo modelo simplificado.

Outra limitação a ser considerada é que o mesmo ajuste foi aplicado a todas as geometrias de paredes de concreto impressas por impressora 3D. Isso pode não levar em conta diferenças na consideração do fluxo de calor nas cavidades para diferentes geometrias.

Apesar disso, o uso do modelo se justifica pelo seu baixo custo computacional. Ele fornece uma boa previsão do comportamento térmico sem a necessidade de recursos computacionais excessivos, tornando-o uma ferramenta acessível para a análise térmica de estruturas de concreto impressas em 3D. Devido à sua simplicidade e eficiência computacional, o modelo permite uma rápida avaliação térmica de paredes com diferentes geometrias. Isso possibilita a avaliação de várias configurações em um curto período de tempo, acelerando o processo de análise e tomada de decisões de projeto.

Essas limitações ressaltam a importância de futuras pesquisas que possam abordar as complexidades da dinâmica dos fluidos em simulações de transferência de calor em paredes de concreto impressas em 3D, bem como investigar métodos mais específicos de modelagem para diferentes geometrias e condições operacionais.

5. CONCLUSÕES

Neste artigo, foi estabelecida uma metodologia para avaliar comparativamente a transferência de calor entre paredes impressas em 3D e paredes convencionais de concreto, utilizando simulações computacionais. Com base nos resultados obtidos, observou-se que a configuração geométrica interna da parede impressa em 3D influencia significativamente o seu comportamento

térmico. Além disso, os resultados indicaram que a parede impressa em 3D tem uma eficiência térmica superior em comparação às paredes convencionais, destacando-se pela maior diferença entre as temperaturas externa e interna (19,3 °C), em contraste com as paredes maciças (15 °C) e de bloco (17,8 °C). Essa diferença se deve aos filamentos da treliça, cuja geometria aumenta a distância que o calor precisa percorrer, conduzindo-o pelas áreas de concreto, que possuem menor resistência térmica em comparação com o ar nas cavidades. Conclui-se que existe grande potencial para melhorar o comportamento térmico de paredes de concreto construídas por impressão 3D, uma vez que a técnica construtiva tem a capacidade de criar geometrias internas customizadas e com alto grau de complexidade.

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] AHMED, G. H. A review of "3D concrete printing": Materials and process characterization, economic considerations and environmental sustainability. Journal of Building Engineering. v. 66, p. 105863, maio 2023.

[2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

[3] BELLO, N. D.; MEMARI, A. M. A Structural and Thermal Comparative Review of 3D-Printed Wall Shapes. Designs. v. 7, n. 3, p. 80, 19 jun. 2023.

[4] BHUSHAN JINDAL, B.; JANGRA, P. 3D Printed Concrete: A comprehensive review of raw material's properties, synthesis, performance, and potential field applications. Construction and Building Materials. v. 387, p. 131614, Jul. 2023.

[5] BOGUE, R. 3D printing: the dawn of a new era in manufacturing? Assembly Automation, v. 33, n. 4, p. 307–311, 23 set. 2013.

[6] DEL COZ DÍAZ, J. J. et al. Analysis and optimization of the heat-insulating light concrete hollow brick walls design by the finite element method. Applied Thermal Engineering, v. 27, n. 8–9, p. 1445–1456, jun. 2007.

[7] FABI, V. et al. Occupants' window opening behaviour: A literature review of factors influencing occupant behaviour and models. Building and Environment. v. 58, p. 188–198, dez. 2012.

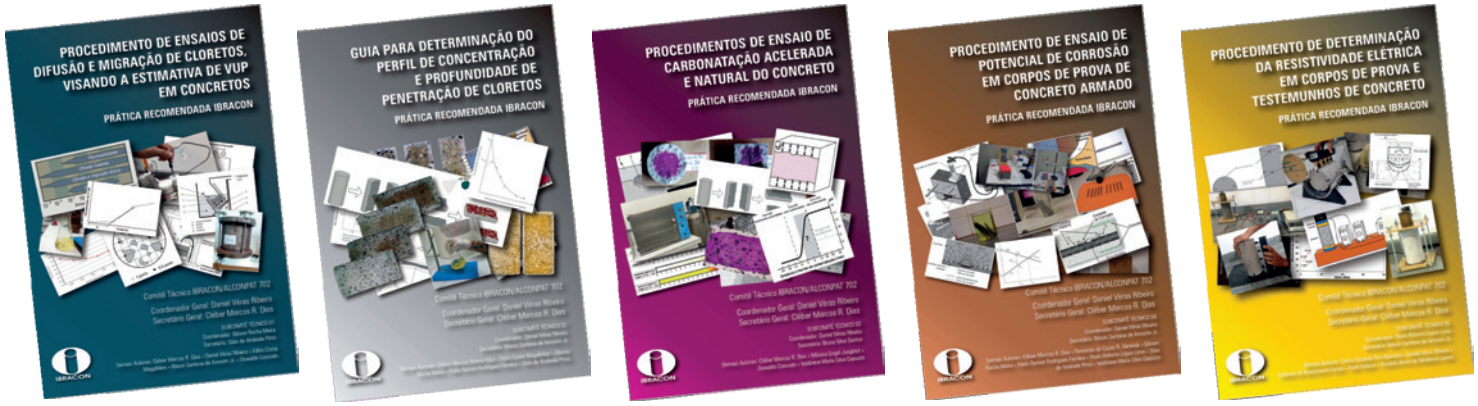
[8] FILGUEIRAS, M. DE B.; SILVA, L. F.; TORALLES, B. M. Elementos de concretos produzidos por impressão 3D com foco na aderência entre camadas: uma revisão. ENSUS, Florianópolis, v. IX, p. 583–595, 05-2021.

[9] J, V.; SINGH, P. Comparative analysis of concrete 3D printing and conventional construction technique for housing. Innovative Processes and Materials in Additive Manufacturing. Elsevier, 2023, p. 177–190.

[10] RUTKIN, A. Watch as the world's first 3D-printed house goes up. New Scientist, v. 221, n. 2960, p. 24, mar. 2014.

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

GERDAU O futuro se molda · LACROSE ENGENHARIA E ENSAIOS ESPECIAIS · PENETRON · proceq · Viapol

IBRACON

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

DOI – http://dx.doi.org/10.4322/1809-7197.2024.114.0005

Pilares curtos de concreto armado dimensionados de acordo com as normas ABNT NBR 6118:2014, ABNT NBR 6118:2023, *fib* Model Code 2020 e EN 1992-1-1:2023: Estudo da sustentabilidade

RICARDO BONI – https://orcid.org/0009-0008-3175-0660 ; **RAFAEL SILVA** | PhD Engenharia
PAULO HELENE – https://orcid.org/0000-0001-6442-7693 | PhD Engenharia

RESUMO

Este trabalho visa apresentar um estudo de sustentabilidade, focado no dimensionamento de pilares curtos de concreto armado respeitando as premissas de quatro normas técnicas consagradas: NBR 6118 (ABNT, 2014); NBR 6118 (ABNT, 2023); *fib Model Code for Concrete Structures* 2020 (*fib*, 2023) e o EN 1992-1-1:2023 (CEN, 2023). Para o dimensionamento desse tramo de pilar, foram considerados neste estudo duas taxas de armadura: uma mínima (< 0,4%) e uma máxima para emendas por traspasse (< 4,0%); duas diferentes classes de resistência do concreto, C20 e C50; com f_{ck} referido a três diferentes idades de 28, 56 e 91 dias. Tal cenário forneceu 16 diferentes possibilidades de detalhamento desse tramo de pilar. Considerou-se ainda concretos amassados com duas diferentes classes de cimentos: CR (CP V) com alto teor de clínquer (> 90%) e CS (CP III) com cerca de 30% de clínquer. A análise comparativa abordou o tema da sustentabilidade considerando apenas emissões de C_{O2eq} e a desmaterialização. Nas condições deste estudo conclui-se que, utilizando critérios do EN 1992-1-1, concretos produzidos com cimentos de classe CS (CP III) e idades de controle do f_{ck} de 56 dias sempre conduzem à maior desmaterialização e menores emissões de gases tipo estufa. Este estudo também demonstra que as decisões de projeto, combinadas com uma inteligente tecnologia de concreto, podem influenciar significativamente a sustentabilidade da estrutura acabada.

Palavras-chave: dimensionamento de pilares, desmaterialização, sustentabilidade, gases tipo estufa, emissão de CO_{2eq}.

1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Este artigo apresenta o estudo de pilar curto de concreto armado, maciço, de seção quadrada, cujos parâmetros de projeto foram baseados em dados de um caso real de um edifício residencial[1], com 2 subsolos, térreo, 24 pavimentos tipo, casa de máquinas, reservatório superior e cobertura. Considera-se, apenas, o tramo de pilar entre o 1° pavimento e 2° pavimento, com pé direito de 2,88 m, sendo a estrutura sujeita à classe de agressividade ambiental variando de CAA I para concreto C20 e CAA II para pilar com concreto C50, segundo NBR 12655 (ABNT, 2022[2]). O número total de tramos de pilar nesse edifício é de 1008 e a área do pavimento tipo é de 365 m².

A força normal total característica (N_{Sk}) considerada para o dimensionamento deste tramo de pilar empregado como exemplo representativo foi de 4000 kN e os momentos totais característicos a que estará submetido foi de $M_{xSk} = M_{ySk} =$ 120 kN.m. Considerou-se que as ações acidentais correspondem a 25% da força normal característica total.

2. MODELOS DE CÁLCULO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O modelo de cálculo da resistência à compressão prescrito para fins de projeto e dimensionamento de uma obra nova, a partir de um certo valor arbitrado de resistência característica do concreto à compressão, f_{ck}, segundo a nova versão do *fib* Model Code for Concrete Structures 2020 (*fib*, 2023), é apresentado na Equação 1:

$$[1] \quad f_{cd} = \alpha_{cc} \times \eta_{fc} \times \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

Onde:

f_{cd} → resistência à compressão de

[1] Edifício do acervo da PhD Engenharia para o qual os autores realizaram a Avaliação Técnica de Projeto (ATP).

[2] Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 12655: 2022. Concreto de cimento Portland. Preparo, controle, recebimento e aceitação-Procedimento. Rio de Janeiro, 2022. 6 p.

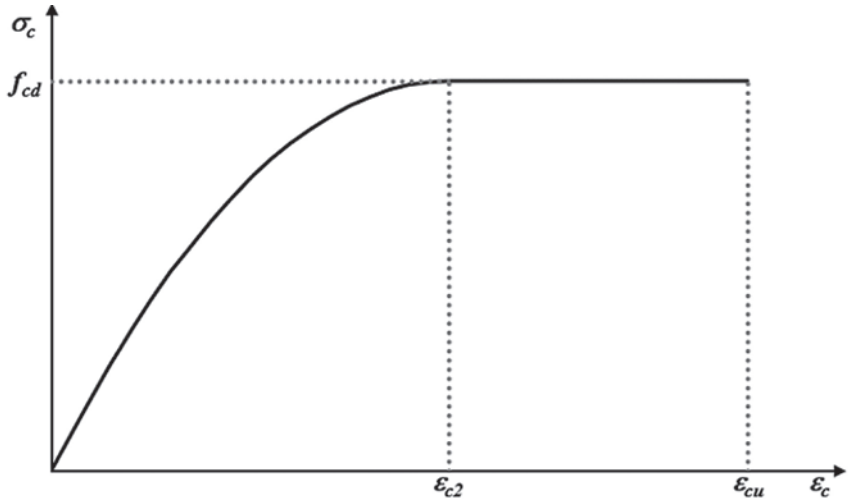


FIGURA 2.1
DIAGRAMA TENSÃO-DEFORMAÇÃO DO CONCRETO.
ADAPTADO A PARTIR DAS EQUAÇÕES APRESENTADAS NOS TEXTOS DAS NORMAS CITADAS

projeto do concreto, nas idades de 28 dias a 91 dias;

f_{ck} → resistência à compressão característica do concreto, nas idades de 28 dias a 91 dias;

γ_c → fator de minoração da resistência do concreto;

α_{cc} → coeficiente que leva em consideração os efeitos contrários, por um lado, de aumento da resistência pela hidratação do cimento, por outro, a redução dessa resistência ocasionada por carga elevada[3] de longa duração[4];

η_{fc} → fator de redução da resistência[5] que leva em consideração o aumento da fragilidade com o aumento da resistência do concreto, calculado como o apresentado na Equação 2:

[2] $$\eta_{fc} = \left(\frac{40}{f_{ck}}\right)^{1/3} \leq 1{,}0 \quad (f_{ck} \text{ em MPa})$$

Segundo o *fib* MC (2020), em situações normais de projeto, pode-se assumir que o aumento de resistência após os 28 dias compensa os efeitos de carga de longa duração, de tal forma que para obras novas, carregadas aos 28 dias ou mais, e com f_{ck} referido a 28 dias, esse coeficiente pode ser assumido como α_{cc} = 1,0. Neste estudo η_{fc} = 1,0 para f_{ck} = 20 MPa e η_{fc} = 0,93 para f_{ck} = 50 MPa.

Para estruturas carregadas a idades superiores a 90 dias e nas quais a data de referência e controle do f_{ck} seja superior a 28 dias, porém igual ou inferior a 56 dias, segundo o EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures (CEN, 2023), é correto continuar considerando α_{cc} = 1,0, sempre que a classe de cimento seja CS (CP III).

Para idades do f_{ck} superiores a 28 dias no caso do *fib* MC (2020), e para idades superiores a 56 dias no caso do EN 1992-1-1, até 91 dias, é recomendado considerar α_{cc} = 0,85. No caso da norma NBR 6118 Projeto de estruturas de concreto (ABNT, 2023), esse coeficiente é mais conservador e fixo em 0,85.

O novo texto da NBR 6118 (ABNT, 2023) introduz o coeficiente de fragilidade η_{fc} de maneira igual ao modelo do *fib* MC (2020). Ambas as versões da norma brasileira estudadas neste artigo prescrevem f_{ck} referido apenas aos 28 dias de idade.

Uma vez definida a resistência à compressão de projeto do concreto (f_{cd}), a tensão no concreto (σ_c) é obtida conforme diagrama tensão-deformação apresentado no MC 2020, NBR 6118 (ABNT, versões 2014 e 2023) e EN 1992-1-1 (CEN, 2023), representado na Figura 2.1.

[3] $$\sigma_{cd} = f_{cd} \times \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}}\right)^n\right]$$

Para concretos com resistência característica até 50 MPa segundo a NBR 6118 (ABNT, 2023), e para concretos de 12 MPa a 100 MPa, o *fib* MC (2020)

TABELA 2.1
COEFICIENTES DE SEGURANÇA PARCIAIS SEGUNDO FIB MC (2020); NBR 6118 (ABNT, 2014); NBR 8681 (ABNT, 2003); NBR 6118 (ABNT, 2023), EN 1992-1-1 (CEN, 2023) E EN 1990 (CEN, 2002)

NBR 6118 (ABNT, 2014) e NBR 6118 (ABNT, 2023)		***fib* MC (2020); EN 1992-1-1 (CEN, 2023) e EN 1990 (CEN, 2002)**	
Materiais (γ_m)	**Ações (γ_f)**	**Materiais (γ_m)[1]**	**Ações (γ_f)[1]**
γ_c (concreto) = 1,4	γ_g (ações permanentes) = 1,4	γ_c (concreto) = 1,4 a 1,6	γ_g (ações permanentes) = 1,3 a 1,4
γ_s (aço) = 1,15	γ_q (ações variáveis) = 1,4	γ_s (aço) = 1,1 a 1,175	γ_q (ações variáveis) = 1,3 a 1,7

[1] NESTE ESTUDO FOI ADOTADO: γ_c = 1,5; γ_s = 1,15; γ_g = 1,35 E γ_q = 1,5, QUE SE ENQUADRA NA CLASSE DE CONSEQUÊNCIA CC2 DO *fib* MC (2020)

[3] Não há uma definição clara do significado de cargas elevadas e de longa duração. Neste estudo os autores consideram cargas elevadas as forças normais > 0,6*f_{cd} mantidas por mais de 15 minutos.

[4] No EUROCODE 2, ou seja, na norma EN 1992-1-1 (CEN, 2023) este coeficiente é designado por k_{tc}, conforme apresentado no subitem 5.1.6 "Design assumptions" da referida norma.

[5] No EUROCODE 2, ou seja, na norma EN 1992-1-1 (CEN, 2023) este coeficiente é designado por η_{cc}, conforme apresentado no subitem 5.1.6 "Design assumptions" da referida norma.

TABELA 2.2
Proporção dos materiais utilizados nos concretos em volume

Normas	Classe de resistência	η_{fc}	α_{cc}	γ_c	γ_s	γ_f Ação permanente	γ_f Ação variável	f_{cd}/f_{ck} (%)
NBR 6118 (ABNT, 2023) 28 diaS	C20	1,00	0,85	1,4	1,15	1,40	1,40	61%
	C50	0,93	0,85	1,4	1,15	1,40	1,40	56%
fib MC (2020) 28d EN 1992-1-1 (CEN, 2023) 28d a 56d	C20	1,00	1,00	1,5	1,15	1,35	1,50	67%
	C50	0,93	1,00	1,5	1,15	1,35	1,50	62%
fib MC (2020)> 28d EN 1992-1-1 (CEN, 2023) 57d a 91d	C20	1,00	0,85	1,5	1,15	1,35	1,50	57%
	C50	0,93	0,85	1,5	1,15	1,35	1,50	53%
NBR 6118 (ABNT, 2014) 28 dias	C20	1,00	0,85	1,4	1,15	1,40	1,40	61%
	C50	1,00	0,85	1,4	1,15	1,40	1,40	61%

e o EN 1992-1-1 (CEN, 2023) prescrevem:

- ε_{c2} = 0,20%;
- ε_{cu} = 0,35%;
- n = 2.

Para concretos com resistência característica entre 55 MPa e 90 MPa, não analisados neste estudo, e somente segundo a NBR 6118 (ABNT, 2023) e sua versão anterior NBR 6118 (ABNT, 2014):

- $\varepsilon_{c2} = 0{,}20\% + 0{,}0085\% (f_{ck} - 50)^{0{,}53}$;
- $\varepsilon_{cu} = 0{,}26\% + 3{,}5\% [(90 - f_{ck})/100]^4$;
- $n = 1{,}4 + 23{,}4 [(90 - f_{ck})/100]^4$.

Estas limitações nas deformações específicas refletem a maior fragilidade dos concretos com resistência característica à compressão superiores a 50 MPa. Este conceito, somado ao coeficiente de fragilidade η_{fc}, gera uma sobreposição de efeitos no caso da NBR 6118 (ABNT, 2023).

Os fatores de segurança parciais, também conhecidos como coeficientes de ponderação, têm o objetivo de introduzir a segurança no dimensionamento de estruturas de concreto armado, por um lado majorando os esforços solicitantes e por outro minorando as resistências características dos materiais a serem utilizados.

A definição dos valores destes fatores de segurança parciais é dada principalmente pelo estudo probabilístico das condições e risco da estrutura, suas utilizações, simplificações e incertezas do modelo de cálculo e das variações destes parâmetros.

A Tabela 2.1 expressa os diferentes valores de fatores de segurança parciais recomendados pelas normas em estudo.

Na Tabela 2.2 apresentam-se as combinações consideradas neste estudo para dimensionamento de pilares curtos com 2 classes de resistência característica do concreto à compressão (C20 e C50).

Foram seguidos os critérios clássicos de dimensionamento e detalhamento de pilar, respeitadas as diferenças no cálculo das deformações específicas conforme cada norma. Adotou-se cobrimento nominal de c = 30 mm para concreto C20 e de c = 25 mm para o concreto C50.

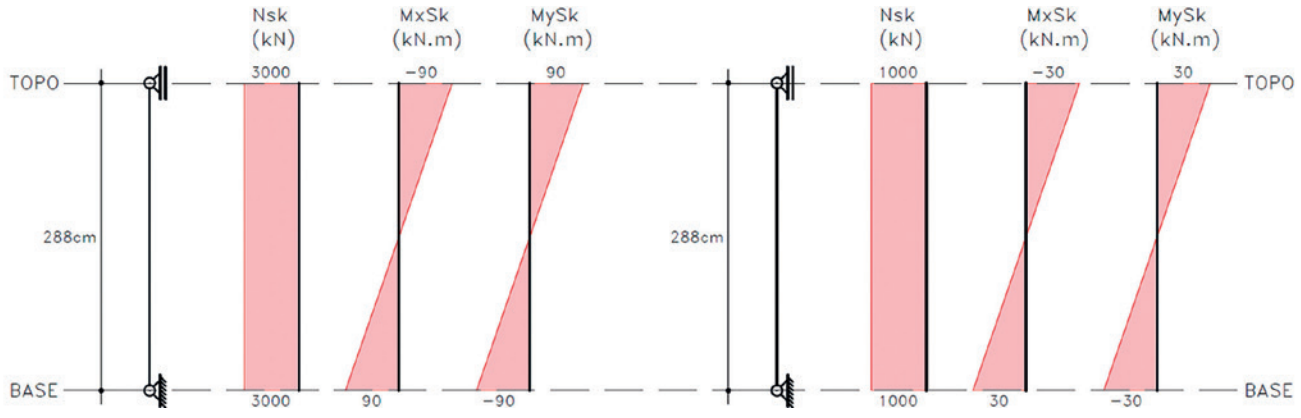


FIGURA 2.2
Carregamento nominal característico do pilar: carregamento permanente (à esquerda) e carregamento variável (à direita)

TABELA 2.3
Resumo das alternativas de detalhamento desse tramo de pilar

Normas	Classe de resistência	Dimensões (cm)	Armadura (cm^2)	Taxa de armadura	Índice de esbeltez λ	Volume de concreto (m^3)	Consumo de aço (kg)
NBR 6118 (ABNT, 2023) 28 dias	C20	69 x 69	19,63	0,41%	14	1,37	82
		49 x 49	96,51	4,02%	20	0,69	235
	C50	48 x 48	19,63	0,85%	21	0,66	65
		41 x 41	64,34	3,83%	24	0,48	160
fib MC (2020) 28 dias EN 1992-1-1 (CEN, 2023) até 56 dias	C20	66 x 66	19,63	0,45%	15	1,25	80
		48 x 48	91,07	3,95%	21	0,66	235
	C50	45 x 45	19,63	0,97%	22	0,58	55
		40 x 40	57,30	3,58%	25	0,46	144
fib MC (2020) 29 dias a 91 dias EN 1992-1-1 (CEN, 2023) 57 dias a 91 dias	C20	71 x 71	19,63	0,39%	14	1,45	82
		50 x 50	96,51	3,86%	20	0,72	236
	C50	49 x 49	19,63	0,82%	20	0,69	66
		42 x 42	64,34	3,65%	24	0,51	170
NBR 6118 (ABNT, 2014) 28 dias	C20	69 x 69	19,63	0,41%	14	1,37	82
		49 x 49	96,51	4,02%	20	0,69	235
	C50	46 x 46	19,63	0,93%	22	0,61	55
		40 x 40	64,34	4,02%	25	0,46	160

Todas as alternativas de dimensionamento desse tramo de pilar consideraram pilar prismático, de seção quadrada e curtos ($\lambda \leq 35$) com comprimento l_e = 2,88 m, onde de cada classe de resistência foram extraídos 2 (dois) detalhamentos de pilar: uma alternativa com armadura mínima próximo do limite de solicitação (≥ 0,4%) e outra com detalhamento próximo a taxa de aço máxima permitida em um lance com emenda por traspasse (cerca de 4% de A_s/A_c).

Para o carregamento nominal foi definido carregamento característico tal como o apresentado na Figura 2.2, à esquerda os esforços solicitantes característicos devido a ações permanentes definidos em força normal solicitante característica (N_{Sk}) e momentos solicitantes característicos nos eixos principais do pilar M_{xSk} e M_{ySk}, e à direita também esforços solicitantes característicos, porém devido a ações variáveis.

Na Tabela 2.3 apresentam-se as dimensões, as taxas de armadura e os índices de esbeltez, detalhados para cada alternativa possível de dimensionamento desse tramo de pilar.

O dimensionamento de armadura mínima de pilares exige que a área de aço seja pelo menos 15% da relação N_d/f_{yd}, o que conduz que a armadura de pilares para a classe de resistência C50 tenha taxa mínima em torno de 0,90% ao invés dos 0,40% do C20.

Observa-se que, para o caso em estudo, dimensionar atendendo às prescrições do *fib* MC (2020) com f_{ck} a 28 dias e do EN 1992-1-1 (CEN, 2023) com f_{ck} a 28 dias ou a 56 dias conduz a pilares mais econômicos qualquer que seja a classe de resistência considerada. As prescrições das normas brasileiras NBR 6118 (ABNT, 2014) e NBR 6118 (ABNT, 2023) conduzem a pilares mais volumosos, ou seja, são normas mais conservadoras, o que é incoerente com um país com índices socioeconômicos inferiores a países europeus.

Tendo como objetivo a sustentabilidade que visa produzir mais com menos, ou seja, é preciso desmaterializar, fica evidente, neste caso em estudo, que o ideal é utilizar concretos de alta resistência, pois independente da norma avaliada ao utilizar um concreto C50 em substituição a um concreto C20, se obteve dimensionamentos com menor volume de concreto e menor consumo de aço, como pode ser observado nas colunas que descrevem o consumo de aço e concreto da Tabela 2.3.

Resta ainda considerar a influência da data de controle ou de referência do

TABELA 3.1
Valores de s_c segundo *fib* MC (2020) e EN 1992-1-1 (CEN, 2023)

Resistência do concreto (MPa)	s_c		
	Classe CR	Classe CN	Classe CS
$f_{ck} \leq 35$	0,3	0,5	0,6
$35 < f_{ck} < 60$	0,2	0,4	0,5
$f_{ck} \geq 60$	0,1	0,3	0,4

Nota: As Classes CR, CN e CS são determinadas em função do tipo e da classe de resistência do cimento. Para determinação das Classes CR, CN e CS consultar Tabela 14.6-8 "*Strength development classes of concrete*" do MC 2020, bem como as normas *EN 197-1"Cement – Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements"* e EN 206 "*Concrete – Specification, performance and conformity*". Simplificadamente pode-se associar à condição brasileira: CR (concreto com cimento CP V); CN (concreto com cimento CP II) e CS (concreto com cimento CP III ou CP IV)

f_{ck}. Os traços de mesmos materiais, se referidos a 56 dias ou a 91 dias, para um mesmo valor de f_{ck}, conduzirão a traços de concreto com menor consumo de cimento por m^3, o que pode trazer ainda maiores benefícios à sustentabilidade, conforme demonstrado na sequência deste trabalho.

3. CONSUMO DE MATERIAIS EM FUNÇÃO DA DATA DE REFERÊNCIA DO f_{ck}

O *fib* MC (2020) e o EN 1992-1-1 (CEN, 2023) recomendam a utilização de uma expressão em formato exponencial para representar o crescimento da resistência à compressão do concreto em função do tempo, tal como o apresentado na Equação 4:

[4] $$\frac{f_{c(t)}}{f_{c(t_{ref})}} = e^{\left\{s_c * \left[1-\sqrt{\frac{t_{ref}}{t}}\right] * \left(\sqrt{\frac{28}{t_{ref}}}\right)\right\}}$$

Onde:

s_c: coeficiente adimensional que varia de 0,1 a 0,6, conforme apresentado na Tabela 3.1.

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

t: idade do concreto em dias;

t_{ref}: idade de controle e referência do f_{ck} em dias, variando de 28 a 91 dias;

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

Como premissa deste estudo, considerou-se que o concreto sempre estará a uma temperatura de $T(\Delta t_i)$ = 20°C. Ainda, por simplificação neste estudo considera-se concretos produzidos com cimentos CR (CP V) e CS (CP III) conforme o apresentado na Tabela 3.1. Adotou-se, também, como referência para a resistência do concreto [$f_{c(ref)}$], para efeito de análise comparativa, as resistências de $f_{c(28)}$, $f_{c(56)}$ e $f_{c(91)}$.

Os valores de f_{ck} adotados neste estudo foram de 20 MPa e 50 MPa. Os valores para fins de dosagem dos concretos, f_{cm} , devem ser 26,6 MPa e 56,6 MPa, respectivamente, considerando condição "A" de preparo do concreto, que prescreve desvio padrão constante e igual a 4 MPa, tal como apresenta a NBR 12655 (ABNT, 2022).

Sendo assim, foi possível determinar a resistência à compressão requerida aos 28 dias de idade para as diferentes classes de resistência estudadas (C20 e C50), para as diferentes idades de controle do f_{ck} (28, 56 e 91 dias) e para os dois tipos de cimento considerados CR (CP V) e CS (CP III), conforme detalhado na Tabela 3.2.

Para estimativa do índice de desempenho, dado em kg de cimento por MPa, foi adotada a premissa de um desempenho médio de referência de 9/10 kg de cimento/MPa para f_{cm} de 20 a 30 MPa e 7/7,5 kg de cimento/MPa para f_{cm} de 40 a 60 MPa, para os cimentos CR (CP V) e CS (CP III), respectivamente, tendo como base a experiência dos autores e traços comumente utilizados em centrais de concreto.

Sendo assim, considerando o volume de concreto utilizado em cada uma das alternativas estudadas para esse tramo de pilar, dimensionadas de acordo com critérios das diferentes normas e o índice de desempenho adotado, apresenta-se na Tabela 3.3 um resumo dos consumos de cimentos obtidos, detalhando o consumo de cimento por m^3 de concreto por cada uma das alternativas de dimensionamento do tramo de pilar em estudo.

4. EMISSÕES E INTENSIDADE DE CO_{2EQ} (IC)

Este item tem como objetivo apresentar uma análise comparativa das emissões de CO_{2eq} para as diferentes alternativas de dimensionamento consideradas neste estudo. Assim sendo, para cada uma das alternativas estudadas, foi calculada a emissão de CO_{2eq} correspondente e os indicadores de eco-eficiência em kg CO_2/MPa associados, estes últimos chamados de intensidade de $CO_{2eq.}$ (IC).

Na Tabela 4.1 estão apresentados os valores de $CO_{2eq.}$ por tonelada de material produzido no Brasil, para o caso do aço e dos cimentos e por m^2 de fôrma, considerando que esta última foi produzida em madeira compensada com 18 mm de espessura, estruturada com madeira bruta serrada (plantada) nas dimensões de 75 mm x 75 mm (pontaletes) a cada 35 cm.

Com base nos dados apresentados na Tabela 4.1 e nas quantidades de materiais (aço, cimento e fôrmas), foi possível calcular a quantidade de $CO_{2eq.}$ liberada para cada uma das alternativas de dimensionamento do tramo de pilar em estudo, bem

TABELA 3.2

Valores de resistência média à compressão aos 28 dias [$f_{cm(28)}$], calculados conforme equação 4, para as classes de resistência (C20 e C50), de acordo com a idade de controle (28, 56 e 91 dias), para concretos produzidos com cimento tipo CR (CP V) e CS (CP III)

$t_{(tref)}$ (dias)	Classe de resistência	$f_{cm(t_{ref})}$ (MPa)	Tipo de cimento	s_c (1)	$f_{cm(28)}$ (2) (MPa)
28	C20	26,6	CP III	0,6	26,6
			CP V	0,3	26,6
	C50	56,6	CP III	0,5	56,6
			CP V	0,2	56,6
56	C20	26,6	CP III	0,6	22,3
			CP V	0,3	24,4
	C50	56,6	CP III	0,5	48,9
			CP V	0,2	53,4
91	C20	26,6	CP III	0,6	20,4
			CP V	0,3	23,3
	C50	56,6	CP III	0,5	45,3
			CP V	0,2	51,8

Notas:

(1) Valor de sc obtido na Tabela 3.1.

(2) Resistência média aos 28 dias de idade obtida utilizando formulação do MC 2020 e EN 1992-1-1 (Equação 4), mediante variação do $t_{(ref)}$: 28, 56 e 91 dias.

TABELA 3.3

Consumo de materiais e economia de cimento em relação aos traços controlados aos 28 dias de idade, para as diferentes alternativas de dimensionamento

Normas	Classe de resistência do concreto (idade de controle)	Volume de concreto (m^3)[1]	Tipo de cimento	Consumo de cimento por m^3 de concreto (kg/m^3)			Massa de cimento para execução do pilar em kg		
				Traço 28 dias kg/m^3	Traço na idade de referência (28, 56 ou 91 dias) kg/m^3	Economia, em kg de cimento em relação ao traço de 28 dias[2]	Massa 28 dias kg	Massa na idade de referência (28, 56 e 91 dias) kg	Economia de cimento em relação a 28 dias[2] kg
NBR 6118 (ABNT, 2023) 28 dias	C20	1,37	CP III	266	266	0	364	364	0
			CP V	239	239	0	328	328	0
		0,69	CP III	266	266	0	184	184	0
			CP V	239	239	0	165	165	0
	C50	0,66	CP III	425	425	0	280	280	0
			CP V	396	396	0	262	262	0
		0,48	CP III	425	425	0	204	204	0
			CP V	396	396	0	190	190	0
fib MC (2020) 28 dias	C20	1,25	CP III	266	266	0	333	333	0
			CP V	239	239	0	299	299	0
		0,66	CP III	266	266	0	176	176	0
			CP V	239	239	0	158	158	0
	C50	0,58	CP III	425	425	0	246	246	0
			CP V	396	396	0	230	230	0
		0,46	CP III	425	425	0	195	195	0
			CP V	396	396	0	182	182	0
EN 1992-1-1 56 dias	C20	1,25	CP III	266	223	43	333	279	54
			CP V	239	220	19	299	275	24
		0,66	CP III	266	223	43	176	147	29
			CP V	239	220	19	158	145	13
	C50	0,58	CP III	425	367	58	246	213	33
			CP V	396	374	22	230	217	13
		0,46	CP III	425	367	58	195	169	26
			CP V	396	374	22	182	172	10
fib MC (2020) 91 dias e EN 1992-1-1 (CEN, 2023) 91 dias	C20	1,45	CP III	266	204	62	386	296	90
			CP V	239	210	29	347	304	43
		0,72	CP III	266	204	62	192	147	45
			CP V	239	210	29	172	151	21
	C50	0,69	CP III	425	340	85	293	234	59
			CP V	396	363	33	273	250	23
		0,51	CP III	425	340	85	217	173	44
			CP V	396	363	33	202	185	17
NBR 6118 (ABNT, 2014) 28 dias	C20	1,37	CP III	266	266	0	364	364	0
			CP V	239	239	0	328	328	0
		0,69	CP III	266	266	0	183	183	0
			CP V	239	239	0	165	165	0
	C50	0,61	CP III	425	425	0	259	259	0
			CP V	396	396	0	242	242	0
		0,46	CP III	425	425	0	195	195	0
				396	396	0	182	182	0

[1] Valor obtido considerando as dimensões dos pilares indicadas na Tabela 3.1 e altura de 2,88 m.

[2] Valor obtido por meio da subtração entre o consumo de cimento na idade de 28 dias – consumo de cimento na idade referência (28, 56 ou 91 dias)

TABELA 4.1
Quantidade de CO_2 liberada em kg CO_{2eq}. em função do material considerado, considerando etapas do produto A1, A2 e A3

Material	Sidac[1] (kg CO_2 eq.)	CECarbon[2] (kg CO_2 eq.)	EPD documents		
			ArcelorMittal Piracicaba (kg CO_2 eq.)[3]	Votorantim Santa Helena (kg CO_2 eq.)[4]	Gerdau Araçariguama (kg CO_2 eq.)[4]
Aço CA-50, em t.	425,9 – 1.061,0	–	786	–	1.070
Cimento CP III, em t.	235,3 – 681,7	–	–	384	–
Cimento CP V, em t.	776,4 – 994,3	–	–	852	–
Madeira Pinus, em m^2 [5]	0,3 – 0,7	–	–	–	–
Compensado de madeira, em m^2 [6]	–	6,8	–	–	–
Madeira cruzada laminada (CLT), em m^2 [7]	–	3,1	–	–	–
Madeira laminada colada, em m^2 [8]	–	3,3	–	–	–
Madeira bruta serrada (plantada), em m^3 [9]		50,6	–	–	–

[1] **Fonte:** www.sidac.org.br/busca
[2] **Fonte:** www.cecarbon.com.br
[3] **Fonte:** Declaração Ambiental do Produto n. EPD-ARC-20170124-CBD1-EM (válida até 22/03/2023), disponível em: www.ibu-epd.com. De acordo com as regras de cálculo de ACV apresentada neste documento as emissões de CO_2 indicadas são válidas para as fábricas da ArcelorMittal no Brasil localizadas em: Cariacica, Itaúna, João Monlevade, Juiz de Fora e Piracicaba, porém esta EPD está com data vencida.
[4] **Fonte:** www.environdec.com/library
[5] A quantidade de CO_2 liberada considerou uma espessura de fôrma de 18 mm. O Sidac indica, para o caso da madeira pinus, uma liberação de CO_2 variando de 19,06 kg CO_2 eq. a 39,15 kg CO_2 eq. por m^3 de madeira.
[6] A quantidade de CO_2 liberada considerou uma espessura de fôrma de 18 mm. O CECarbon indica, para o caso do compensado de madeira, uma liberação de CO_2 de 378 kg CO_2 eq. por m^3.
[7] A quantidade de CO_2 liberada considerou uma espessura de fôrma de 18 mm. O CECarbon indica, para o caso da madeira cruzada laminada, uma liberação de CO_2 de 171,12 kg CO_2 eq. por m^3.
[8] A quantidade de CO_2 liberada considerou uma espessura de fôrma de 18 mm. O CECarbon indica, para o caso da madeira laminada colada, uma liberação de CO_2 de 183,6 kg CO_2 eq. por m^3.
[9] A quantidade de CO_2 liberada considerou pontaletes com dimensões de 75 mm x 75 mm e madeira bruta serrada com massa específica de 550 kg/m^3 (conforme Tabela 1 da ABNT NBR 6120:2019 "Ações para o cálculo de estruturas de edificações, considerando madeira maciça, conífera, classe de resistência C25). O CECarbon indica, para o caso da madeira bruta serrada (plantada), uma liberação de CO_2 de 92 kg CO_2 eq. por tonelada.

como calcular a intensidade de CO_2 (IC) para cada resistência apresentados na Tabela 4.2.

Para melhor visualização dos números apresentados na Tabela 4.2, as Figuras 4.1 e 4.2 apresentam graficamente as emissões de $CO_{2eq.}$ por alternativa estudada, considerando dimensionamento com taxa mínima e máxima de armadura, respectivamente.

Conforme demonstrado, um tramo de pilar destinado à mesma função, para uma mesma carga, pode emitir desde 182 kg CO_{2eq}. (IC = 3,2 kgCO_2/MPa) a 437 kg CO_{2eq}. (IC = 16,4 kgCO_2/MPa), segundo uma decisão de projeto, adotada pelo projetista estrutural na fase de dimensionamento combinada com tecnologia de concreto na otimização do traço e diferentes cimentos. Em números relativos pode passar de 1 a 2,4 vezes, o que é muito expressivo.

Pode-se afirmar que usar cimento CP III em substituição ao cimento CP V, para qualquer situação e mesmo considerando que se necessita de 0,5 a 1kg de cimento CP III a mais por MPa, a estrutura vai emitir menos gases estufa.

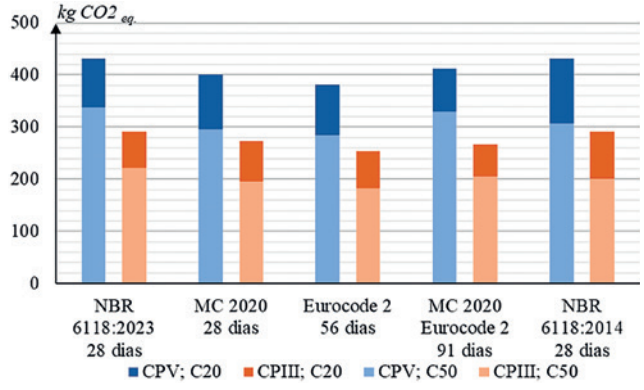


FIGURA 4.1
Gráfico de barras indicando a emissão de CO_2 em kg CO_{2eq}. por alternativa de dimensionamento do pilar com taxa mínima de armadura

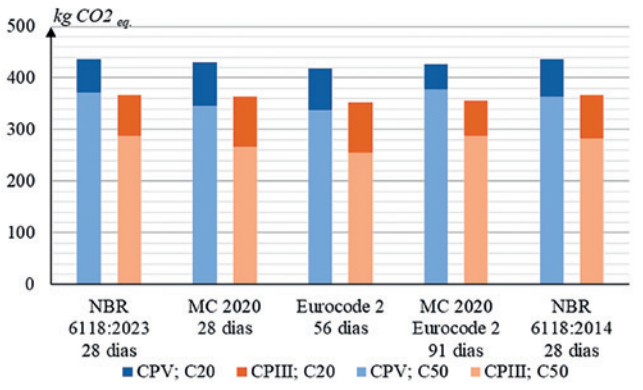


FIGURA 4.2
Gráfico de barras indicando a emissão de CO_2 em kg CO_{2eq}. por alternativa de dimensionamento do pilar com taxa máxima de armadura

Observou-se também que pilares dimensionados com taxa de armadura mínima emitem menos gases estufa.

Adotar idade de referência de controle do f_{ck} de 56 dias, ao invés de 28 dias, neste estudo, sempre conduziu a menores emissões de gases estufa.

Essa enorme vantagem obtida em apenas um tramo de pilar se extrapolada,

TABELA 4.2
QUANTIDADE DE CO_2 LIBERADA POR ALTERNATIVA ESTUDADA EM KG CO_{2EQ}

Normas	Classe de resistência	Consumo de aço (kg)[1]	Área de fôrma (m^2)[2]	Massa de cimento no pilar (kg)[3]	Emissão de CO_2 por pilar (kg $CO_{2eq.}$)	IC por pilar (kg CO_2/MPa)
NBR 6118 (ABNT, 2023) 28 dias	C20	82	7,95	364 kg de CP III	291	10,9
				328 kg de CP V	431	16,2
		235	5,64	184 kg de CP III	367	13,8
				165 kg de CP V	437	16,4
	C50	65	5,53	280 kg de CP III	221	3,9
				262 kg de CP V	337	6,0
		160	4,72	204 kg de CP III	287	5,1
				190 kg de CP V	371	6,6
fib MC (2020) 28 dias	C20	80	7,60	333 kg de CP III	274	10,3
				299 kg de CP V	401	15,1
		235	5,53	176 kg de CP III	363	13,6
				158 kg de CP V	430	16,2
	C50	55	5,18	246 kg de CP III	195	3,4
				230 kg de CP V	296	5,2
		144	4,61	195 kg de CP III	266	4,7
				182 kg de CP V	346	6,1
EN 1992-1-1 (CEN, 2023) 56 dias	C20	80	7,60	279 kg de CP III	254	9,5
				275 kg de CP V	381	14,3
		235	5,53	147 kg de CP III	352	13,2
				145 kg de CP V	419	15,8
	C50	55	5,18	213 kg de CP III	182	3,2
				217 kg de CP V	285	5,0
		144	4,61	169 kg de CP III	256	4,5
				172 kg de CP V	338	6,0
fib MC (2020) 91 dias e EN 1992-1-1 (CEN, 2023) 91 dias	C20	82	8,18	296 kg de CP III	267	10,0
				304 kg de CP V	412	15,5
		236	5,76	147 kg de CP III	355	13,3
				151 kg de CP V	427	16,1
	C50	66	5,64	234 kg de CP III	206	3,6
				250 kg de CP V	329	5,8
		170	4,84	173 kg de CP III	287	5,1
				185 kg de CP V	378	6,7
NBR 6118 (ABNT, 2014) 28 dias	C20	82	7,95	364 kg de CP III	291	10,9
				328 kg de CP V	431	16,2
		235	5,64	183 kg de CP III	367	13,8
				165 kg de CP V	437	16,4
	C50	55	5,30	259 kg de CP III	201	3,5
				242 kg de CP V	307	5,4
		160	4,61	195 kg de CP III	283	5,0
				182 kg de CP V	363	6,4

[1] DE ACORDO COM DOCUMENTO "*ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION REINFORCING STEEL BAR GERDAU GG 50*", 1.070 KG DE CO_2 POR TONELADA DE AÇO (KG CO_2 EQ.), VALOR OBTIDO POR MEIO DA SOMATÓRIA DOS VALORES DE EMISSÃO NAS ETAPAS A1 (RAW MATERIAL SUPPLY), A2 (TRANSPORTATION) E A3 (CORE PROCESS).

[2] CONSIDEROU-SE O VALOR DE 8 KG DE CO_2 POR M^2 DE FÔRMA, JUSTIFICADO NO TEXTO.

[3] DE ACORDO COM DOCUMENTO "*ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION FOR CEMENT CP III 40 RS*", 384 KG DE CO_2 POR TONELADA DE CIMENTO (KG CO_2 EQ.), VALOR OBTIDO POR MEIO DA SOMATÓRIA DOS VALORES DE EMISSÃO NAS ETAPAS A1 (RAW MATERIAL SUPPLY), A2 (TRANSPORTATION) E A3 (CORE PROCESS). DE ACORDO COM DOCUMENTO "*ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION FOR CEMENT CP V ARI*", 852 KG DE CO_2 POR TONELADA DE CIMENTO (KG CO_2 EQ.), VALOR OBTIDO POR MEIO DA SOMATÓRIA DOS VALORES DE EMISSÃO NAS ETAPAS A1 (RAW MATERIAL SUPPLY), A2 (TRANSPORTATION) E A3 (CORE PROCESS).

simplificadamente, pelo total de 1008 tramos de pilar dessa estrutura, poderia economizar 240 t de CO_{2eq}. Em outras palavras, sendo conservador, se uma análise cuidadosa de pilares conseguir reduzir apenas, por exemplo, 30 kg CO_{2eq} por tramo, a redução de gases de efeito estufa nessa estrutura poderá ser de 30 toneladas de $CO_{2eq.}$, somente em pilares.

5. CONCLUSÕES

O texto das normas *fib Model Code for Concrete Structures* (2020) (*fib*, 2023) e EN 1992-1-1 (CEN, 2023) permitiu um detalhamento com menor volume de concreto, aço e fôrma, pois prescreve o coeficiente a_{cc} = 1,0, para f_{ck} a 28 dias, sendo que o EN 1992-1-1 (CEN, 2023) prescreve a_{cc} = 1,0 até com f_{ck} a 56 dias. Por outro lado, a NBR 6118 (ABNT, versões 2014 e 2023), que adota valor fixo de a_{cc} = 0,85, levou a um detalhamento com maior consumo de materiais.

Neste estudo, para f_{ck} = 50 MPa a 56 dias, 0,9% taxa de armadura, EN 1992-1-1 (CEN, 2023), resultou o tramo de pilar com um volume de concreto de 0,58 m^3, 55 kg de aço e 5,2 m^2 de fôrma, enquanto para f_{ck} = 20 MPa a 28 dias, 0,4% taxa armadura, NBR 6118 (ABNT, 2023), resultou o tramo de pilar com 1,37 m^3 de concreto, 82 kg de aço e 7,95 m^2 de fôrma. Extrapolando grosseiramente ao total de 1008 tramos de pilar, escolher inteligentemente as opções de dimensionamento nesse edifício poderia significar uma desmaterialização, ou seja, deixar de usar, 796 m^3 de concreto, 27 t de aço e 2.772 m^2 de fôrma.

De maneira geral, as alternativas de dimensionamento desse tramo de pilar com taxa mínima de armadura, independente das normas utilizadas, resultaram em menores valores de emissão de CO_{2eq}. Especificamente o EN 1992-1-1 (CEN, 2023), que considera a_{cc} = 1,0, com f_{ck} a 56 dias, conduz a melhores indicadores de eco-eficiência (IC), para qualquer detalhamento comparado às outras normas.

O dimensionamento realizado pela atual norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2023) apresentou os piores índices IC, ou seja, neste estudo particular, foi a norma que menos contribuiu à sustentabilidade de pilares curtos, até comparativamente ao texto anterior da mesma norma, a NBR 6118 (ABNT, 2014).

Neste estudo, para f_{ck} = 50 MPa a 56 dias, 0,9% de taxa de armadura, EN 1992-1-1 (CEN, 2023), resultou o tramo de pilar com uma emissão de 182 kg CO_{2eq}. (IC = 3,2 kgCO_2/MPa), enquanto para f_{ck} = 20 MPa a 28 dias, 4% de taxa de armadura, NBR 6118 (ABNT, versões 2014 e 2023), para mesma carga, função e segurança, resultou com emissão de 437 kg CO_{2eq}. (IC = 16,4 kgCO_2/MPa) de gases de efeito estufa. Extrapolando grosseiramente ao total de 1008 tramos de pilar nesse edifício poderia significar uma redução na emissão de gases estufa de até 257 toneladas de CO_{2eq}.

Este estudo também demonstrou que a utilização de cimento de alto-forno tipo CP III, independente das diferentes normas aqui consideradas, resultou em menores emissões de CO_{2eq}, quando comparado ao cimento de alta resistência inicial CP V, mesmo sendo necessário consumir mais cimento CP III para uma mesma resistência e idade.

Na realidade, em um projeto estrutural destinado a um projeto arquitetônico definido, não há tanta liberdade como a considerada neste estudo, pois muitas vezes as restrições arquitetônicas e funcionais não permitem as dimensões ótimas do ponto de vista estrutural. Com certeza nos casos reais os ganhos serão menores, mas não podem ser desprezados nem omitidos nos estudos de verificação da segurança e otimização do projeto na fase de dimensionamento.

Este estudo procurou demonstrar que as decisões de projeto, combinadas inteligentemente com a tecnologia de concreto, podem influenciar significativamente a sustentabilidade, ou seja podem contribuir efetivamente para a desmaterialização e para a redução de emissão de gases estufa da estrutura acabada.

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118:2014. Projeto de Estruturas de Concreto-Procedimento. 3 ed. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.

[2] --- ABNT NBR 6118:2023. Projeto de Estruturas de Concreto. Rio de Janeiro, 2023. 242 p.

[3] BENTO, Ricardo C. Análise do desempenho ambiental de estruturas de concreto armado: uso da avaliação do ciclo de vida (ACV) no processo decisório do dimensionamento. 2016. Tese (Doutorado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) — Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

[4] *fib* Model Code for Concrete Structures 2020 — Final Draft. Lausanne, Switzerland, 2023. 1256 p.

[5] EUROPEAN COMMITEE FOR STANDARDIZATION. EN 1992-1-1: EN 1992-1-1: Design of concrete structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures. Brussels, 2023. 402 p.

[6] ZORZI, Antonio C. Sistemas de Fôrmas para Edifícios: recomendações para a melhoria da qualidade e da produtividade com redução de custos. 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2015. 195 p.

[7] DAMINELI, B.L; PILEGGI, R. G; JOHN, V. M. Eco eficiência do uso de cimento em concreto: estado atual, possibilidades e tendências. 54º Congresso Brasileiro do Concreto 54CBC2012. Maceió. Instituto Brasileiro do Concreto IBRACON, 2012.

[8] SIDAC. Disponível em: http://www.sidac.org.br/busca. Acesso em: nov. 2023.

[9] CECARBON. Disponível em: http://www.cecarbon.com.br. Acesso em: nov. 2023.

[10] INSTITUT Bauen und Umwelt e.V. | Das Detail im Fokus. Das Ganze im Blick. Disponível em: http://www.ibu-epd.com. Acesso em: nov. 2023.

[11] EPD LIBRARY | EPD International. Disponível em: http://www.environdec.com/library. Acesso em: nov. 2023.

DOI – http://dx.doi.org/10.4322/1809-7197.2024.114.0006

Levantamentos digitais como suporte à inspeção em edificações: **uma aplicação *no Acquário* Ceará**

BRUNA TAYNA MACEDO FIDELES – ENGª. – https://orcid.org/0009-0003-2136-8365 (brunatayna@alu.ufc.br) ;
ANTÔNIO EDUARDO BEZERRA CABRAL – PHD ;
AFONSO HENRIQUE LACERDA BRITO DE OLIVEIRA – M.SC – https://orcid.org/0009-0009-7439-8836 ;
MAYCON HANDERSON DE OLIVEIRA BESSA – ENG. – https://orcid.org/0000-0002-5633-0151 ;
ESEQUIEL FERNANDES TEIXEIRA MESQUITA – PHD | **UFC**

RESUMO

OS MÉTODOS UTILIZADOS PARA EFETUAR AS INSPEÇÕES SÃO MUITAS VEZES LENTOS E POUCO FIÁVEIS. ALÉM DISSO, PODEM SER PERIGOSOS EM AMBIENTES DE DIFÍCIL ACESSO E OBRAS DE GRANDE PORTE. POR OUTRO LADO, AS EDIFICAÇÕES ESTÃO SUJEITAS A DEGRADAÇÕES AO LONGO DO TEMPO, TORNANDO-SE FUNDAMENTAL DIAGNOSTICAR DE FORMA CORRETA POSSÍVEIS INTERVENÇÕES. RECENTEMENTE, TEM-SE DESENVOLVIDO ESTUDOS COM TÉCNICAS DE LEVANTAMENTO DIGITAIS COMO FORMA DE INSPECIONAR E CAPTAR O ESTADO IN SITU DAS ESTRUTURAS. DENTRE AS TÉCNICAS, O LASER SCANNER TERRESTRE (LST) E O VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO (VANT), PARA ADQUIRIR NUVENS DE PONTOS DENSAS E PRODUZIR INFORMAÇÃO COMO APOIO À INSPEÇÃO E FUNDAMENTAR UM POSTERIOR RELATÓRIO TÉCNICO, TÊM SIDO UTILIZADOS. ESTE ARTIGO ABORDA O USO DESSAS TÉCNICAS NO LEVANTAMENTO DA ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO DO ACQUÁRIO DO CEARÁ. COMO RESULTADOS, OBTEVE-SE UM TOUR VIRTUAL NA EDIFICAÇÃO, BANCO DE IMAGENS E A CONSTATAÇÃO EFICIENTE DO ESTADO DE CONSERVAÇÃO DA MESMA.

PALAVRAS-CHAVE: LASER SCANNER TERRESTRE, FOTOGRAMETRIA, NUVEM DE PONTOS, AQUISIÇÃO DE DADOS.

1. INTRODUÇÃO

As estruturas dos edifícios existentes de concreto armado, principalmente envelhecidas, podem sofrer deterioração ao longo do tempo devido ao uso e à influência ambiental. Tais estruturas precisam de manutenção adequada e, para isto, o diagnóstico correto para as possíveis intervenções. A engenharia utiliza ferramentas de diagnóstico relacionadas com procedimentos investigativos para realizar essas vistorias e inspeções técnicas, fase importante onde irá ser constatada a situação na qual a edificação se encontra.

A vistoria deve proporcionar elementos, tais como: caracterização da região estudada, caracterização do imóvel, constatação de danos, condições de estabilidade do prédio, fotografias, plantas do prédio e subsídios esclarecedores (1). Já, a inspeção predial, a análise isolada ou combinada dessas condições, onde propicia uma avaliação sistêmica da edificação, elaborada por profissionais habilitados e devidamente preparados; classifica não conformidades constatadas na edificação quanto à sua origem, grau de risco e indica orientações técnicas necessárias à melhoria da manutenção dos sistemas e elementos construtivos (2).

Os métodos mais comuns e tradicionais de adquirir dados referentes aos edifícios podem representar uma alternativa cara, morosa e não registrar fielmente uma edificação quanto maior for a complexidade, o nível de detalhamento e a amplitude da estrutura (3, 4). A fase de aquisição de dados torna-se fundamental para obter com exatidão as informações para determinar o estado atual da estrutura envelhecida ou os seus níveis de degradação (5). Segundo Groetelaars (6), nos últimos 10 anos houve desenvolvimento significativo da tecnologia de varredura a laser, tanto no que se refere a equipamento computacional como programa computacional, culminando no aumento das áreas de aplicação, tais como levantamento industrial, arquitetônico, documentação do patrimônio, arqueologia, planejamento urbano, geologia, energia, ferramenta de apoio à prevenção de desastres naturais, dentre outros.

FIGURA 1
LOCALIZAÇÃO DO AQUÁRIO (ACQUÁRIO CEARÁ)

Não só algumas das estruturas existentes estão em estado grave de deterioração, mas os métodos utilizados para efetuar as inspeções são lentos e por vezes pouco precisos, podendo não documentar efetivamente todos os riscos. Além disso, as inspeções visuais podem ser perigosas,

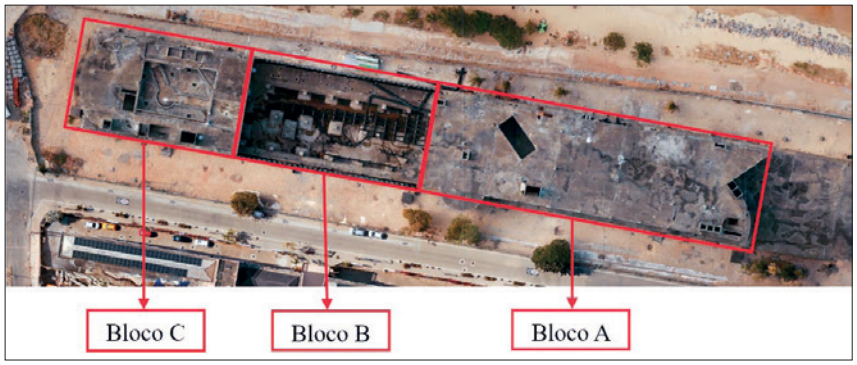


FIGURA 2
Esquema de identificação dos blocos

FIGURA 3
Laser Scanner BLK 360
Fonte: Leica Geosystems (2021)

principalmente em ambientes de difícil acesso. A utilização de fotogrametria digital e sensores de scanners laser de alta precisão, integrados em câmeras, para captar dados de superfície, automatiza parcial ou totalmente as inspeções para a localização, quantificação e documentação de anomalias, além de poder auxiliar no desenvolvimento das atuais estratégias de inspeção visual baseada em sensores (7). Essas técnicas são capazes de gerar nuvem de pontos e imagens 360°, capazes de extrair informações úteis, automatizar análises e facilitar processos de inspeção. Uma nuvem de pontos 3D compreende uma coleção de pontos num sistema de coordenadas 3D que representa com precisão a superfície de um objeto ou ambiente (8,9).

Este artigo tem o objetivo de apresentar uma aplicação prática utilizando o scanner laser terrestre e um veículo aéreo não tripulado (VANT) para produção de informação como apoio à inspeção para detecção e quantificação de anomalias na estrutura do *Acquário* Ceará, com o objetivo de fundamentar um posterior relatório técnico.

2. ESTUDO DE CASO

2.1 Introdução

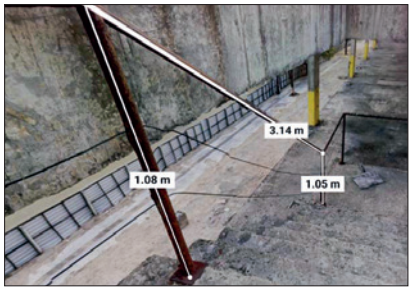
O Acquário Ceará está localizado em Fortaleza, no Ceará, na rua dos Tabajaras, na praia de Iracema, entre a Ponte dos Ingleses e a Ponte Metálica (Figura 1). É uma estrutura de grande porte composta por quatro pavimentos, sendo eles: subsolo, 1° andar, 2° andar e cobertura. Idealizado em 2008, sua construção foi iniciada em 2012, com previsão para dois anos de duração, mas as obras foram interrompidas definitivamente em 2015 (10). A obra desde então encontra-se paralisada e com seu estado de conservação afetado, devido a degradações ao longo do tempo.

Segundo o Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (11), o projeto consiste numa área total construída de 21.500,00m^2, onde prevê 15 milhões de litros de água, distribuído em 38 tanques, sendo 26 deles recintos de exibição, que abrigariam 500 espécies. O estudo de caso apresentado refere-se a uma edificação que de fato está sob estudos e ensaios a fim de constatar seu estado de conservação e anomalias presentes na estrutura. Com isso, a aplicação de levantamentos digitais auxiliou na inspeção da estrutura e na geração de dados.

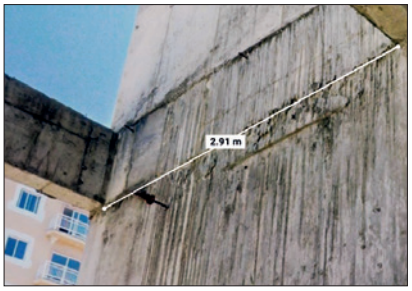
2.2 Aquisição de dados com *Laser scanner* terrestre

Esta fase incluiu o processo de levantamento digital com *laser scanner* terrestre para obtenção da nuvem de pontos. Tal fase teve duração de aproximadamente 4 dias de levantamento de toda sua área interna e externa. A Figura 2 ilustra um esquema de identificação dos blocos utilizado no aquário para o processo de varredura a laser. A aquisição foi realizada

FIGURA 4
Escaneamento 3D da estrutura do Acquário Ceará



A



B

FIGURA 5
Exemplos de medições realizadas no Matterport (a) corrosão no guarda-corpo da escada; (b) fissura em parede de concreto

FIGURA 6
VANT Phantom 4 Pro V2.0
Fonte: Dji (2024)

inicialmente no piso 1, no piso 2 e na cobertura dos blocos A e C, finalizando com o subsolo dos blocos A e C, e o bloco B, que tem apenas o nível do subsolo interligando os blocos A e C.

O equipamento utilizado foi o *laser scanner* BLK 360 da Leica Geosystems (Figura 3) que permite a digitalização em três tipos de resolução: alta, padrão e rápida (12). O domo completo gera 30 imagens, retificadas espacialmente de forma automática, com 150 Mp (megapixel) (16). No Aquário, as resoluções padrão e alta foram as utilizadas, demorando em média 3 minutos para cada captura.

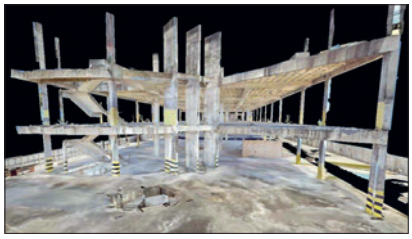
O *Laser Scanner* Leica BLK360 conta com três câmeras digitais HDR integradas, o mesmo pode coletar dois tipos de dados de imagem diferentes: uma imagem panorâmica HDR, esférica em 360° com três câmeras calibradas: uma imagem termográfica com uma câmera infravermelhos (disponível em uma variante de produto especial). A Precisão do ponto 3D na nuvem, em condições de teste padrão da Leica Geosystems é de 6mm a 10m de distância e 8mm a 20m de distância (12), podendo ser realizado a medição, no programa computacional, da propagação e extensão em metro linear, volume ou área das anomalias. A Figura 4 ilustra o processo de escaneamento digital do Acquário Ceará utilizando o BLK360.

Finalizada as capturas com o *laser scanner*, foram levadas para nuvem da plataforma *Matterport*, para ser realizado o processamento automático do tour virtual. O *Matterport* é um software para elaboração de tour virtual, fotos em 360° e pequenos vídeos. Conectado a um tablet ou celular, o *Matterport* captura as informações do ambiente e as transforma em um tour de 360 graus, gerando o gêmeo digital do ambiente [13]. Os gêmeos digitais *Matterport* tem funcionalidades como layouts detalhados, etiquetas informativas, medições precisas e análises abrangentes [13].

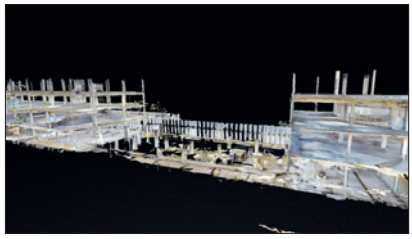
A análise dos dados obtidos representou a constatação das anomalias e incidência dos problemas com base nas observações obtidas pelos produtos do escaneamento digital, e a extração de dados quantitativos, onde foi possível gerar uma estimativa da quantidade referente a parte com manifestação patológica. As medições foram realizadas nos programas Trueview e Matterport (Figura 5).

2.3 Aquisição de dados com veículo aéreo não tripulado (VANT)

O processo de fotogrametria digital aérea permite a obtenção, a partir da aquisição e processamento de imagens 2D, de modo preciso, de grande quantidade de produtos, como medidas, desenhos, mo-



A



B

FIGURA 7
(a) e (b) Vista 3D do aquário no *Matterport*

A

B

FIGURA 8
Vistas internas. (a) subsolo bloco A, (b) piso 2 bloco C

delos geométricos, fotos retificadas, ortofotos, a depender da técnica utilizada [6], além da possibilidade de obtenção da nuvem de pontos e a vantagem de pouco tempo em campo.

Para este artigo também foi utilizado o veículo aéreo não tripulado (VANT), popularmente conhecido como drone, para captura de dados elevados e externos do aquário, como complementação de dados capturados pelo *laser scanner* terrestre, com duração de aproximadamente um dia de aquisição. O equipamento utilizado foi o Phantom 4 Pro V2.0 (Figura 6), que conta com um sensor CMOS de 1" capaz de gravar vídeos em 4K a 60fps e fotos em 20 MP [14].

Coletado os dados com o VANT, o conjunto de fotografias foi levado ao programa computacional Drone Deploy para visualização, processamento de ortoimagens e nuvem de pontos. O mesmo é capaz de realizar o planejamento, a execução de voos e o processamento de dados. O Drone Deploy é uma plataforma de computação em nuvem, desenvolvido para facilitar procedimentos ligados a captura e ao processamento de dados [15].

3. RESULTADOS

3.1 Tour virtual

Como resultados da aquisição com o *laser scanner* terrestre, foi obtido um tour virtual com as imagens 360° internas do aquário. O tempo total para o processamento no *Matterport* foi realizado em cerca de 12 horas. Na Figura 7, é possível visualizar o 3D da estrutura do aquário na plataforma *Matterport* e na Figura 8, exemplos de vista interna do subsolo pertencente ao bloco A e do segundo andar pertencente ao bloco C.

O tour virtual pode ser acessado e visualizado pelo link: https://my.matterport.com/show/?m=qNaPrcw1Mn7.

3.2. VANT

Como resultados da aquisição com o veículo aéreo não tripulado, foi obtido um banco de dados com cerca de 558 imagens tiradas em voo manual. O tempo total para o processamento no Drone Deploy foi realizado em cerca de 3 horas e 30 minutos.

A B

FIGURA 9
Imagens capturadas pelo VANT

A B

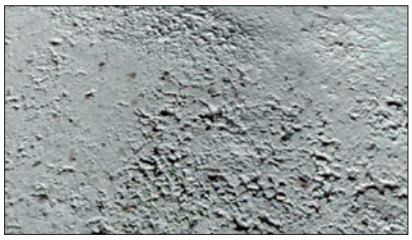
FIGURA 10
Visualização 2D do aquário no Drone Deploy. (a) Bloco B e C; (b) Bloco A

A B

FIGURA 11
Visualização 3D do aquário. (a) Fotos; (b) Drone Deploy

A B

FIGURA 12
Manchas de umidade. (a) Bloco A, piso 2, obtida pelo LST; (b) Bloco C, cobertura, obtida pelo VANT

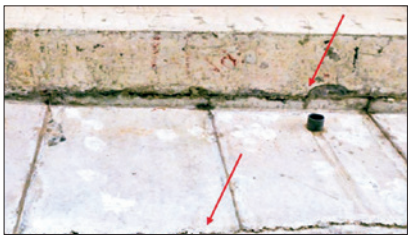


A

B

FIGURA 13
Segregação no piso de concreto (a) Bloco A, subsolo; (b) Bloco C, piso 2

A



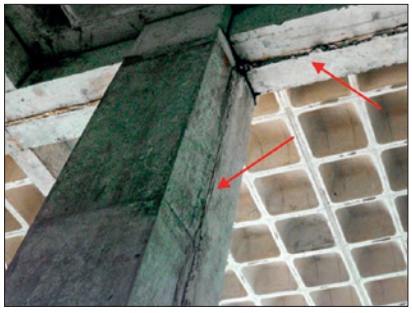
B

FIGURA 14
Fissuras. (a) Parede de concreto, subsolo Bloco A; (b) Próximo a junta, piso 2 Bloco C

A

B

FIGURA 15
Corrosão no guarda-corpo da escada. (a) Piso 1, Bloco A; (b) Piso 1, Bloco C



A

B

FIGURA 16
Junta estrutural danificada. (a) Subsolo, Bloco A; (b) Piso 1, Bloco C

Na Figura 9, observam-se exemplos de imagens adquiridas pelo drone, enquanto na Figura 10 vê-se a vista 2D do aquário no Drone Deploy.

Na Figura 11, podemos visualizar o aquário em formato 3D, produtos do banco de imagens e visualização no *Drone Deploy*.

O vídeo com a nuvem obtida pelo VANT, pode ser acessado e visualizado pelo link: https://1drv.ms/f/s!AjDtXb4ovi-6Vg6JQsrSa6BTXupKZAA?e=xBTg8s.

3.3 Anomalias constatadas usando o *tour* virtual e a nuvem de pontos

3.3.1 Blocos A e C

A partir da inspeção realizada com os produtos obtidos pelos dados do escaneamento digital, foi possível identificar os seguintes problemas nas áreas analisadas do bloco A e C: manchas de umidade, corrosão, segregação do concreto, fissura e junta de dilatação danificada. Nas Figuras 12 a 16, pode-se observar as anomalias encontradas.

3.3.2 Bloco B

No subsolo do bloco B, foi possível identificar os seguintes problemas nas áreas analisadas: presença de manchas de umidade na estrutura (Figura 17) e fissuras no piso (Figura 18).

3.4. Quantitativo das Anomalias

A estimativa de quantidades das anomalias do aquário foi realizada em cerca de 12 horas (1 dia e meio), muito inferior caso fosse realizado por vias tradicionais, com trenas e equipamentos afins. O quantitativo se limita aos setups disponíveis e com isso alguns ângulos ou face da estrutura não podem ser acessados, dificultando a medição ou identificação de alguma anomalia, isso poderia ser sanado caso fosse aumentado a quantidade de setups ao realizar a captura, distribuindo de forma que capturasse uma grande quantidade de pontos, em contrapartida o tempo de aquisição seria superior.

Tendo em vista que a estrutura do aquário está quase toda comprometida por manchas de umidade e que os setups disponíveis não abrangem completamente algumas áreas de modo a realizar a medi-

ção de manchas, foi considerado para essa anomalia, uma estimativa de quantidade de área total de piso dos pavimentos analisados. Assim como para a anomalia segregação do concreto, presente quase que na totalidade dos pisos do pavimento 1, 2 e cobertura, onde foi considerado uma estimativa de 70% da área do piso, devido à dificuldade da medição dessa anomalia em algumas áreas.

Na Tabela 1, pode ser observado os quantitativos estimados através das ferramentas de medição da nuvem de pontos: Recap Pro, True View e Matterport, a partir deles o resultado das quantidades de anomalias, identificadas como manchas de umidade (MU), segregação (SGR), fissura (FIS), corrosão (CRS) e Junta de dilatação danificada (JDL).

4. CONCLUSÕES

A aplicação das tecnologias digitais de fotogrametria aérea em conjunto com a varredura a laser se complementa, uma vez que permite fazer a aquisição da toda estrutura de forma rápida e eficiente. No estudo de caso desse artigo, foram necessárias 28 horas para aquisição de imagens pelo LST e 4 horas pelo VANT, mais 15 horas de processamento e mais 12 horas de identificação e quantificação das anomalias (1 dia e meio). Esse tempo é muito inferior caso fosse feito de forma tradicional (visita *in loco* com fotos, medições e classificação das anomalias em escritório).

Nota-se a melhoria das condições de registro geométrico das imagens e na automatização de procedimentos, vantagens no levantamento e estudo de edifícios do ponto de vista operacional, é mais seguro, sem contato, não invasivo, rápido e não precisa retornar diversas vezes ao local, o que facilita em espaços com maior complexidade ou de difícil acesso, como no subsolo do Aquário.

Para além disso, a precisão das nuvens de pontos que pode ser obtida permite o estudo detalhado para inúmeras investigações futuras que terão impacto nas medidas de conservação, intervenções de restauro, ou mesmo reconstruções. Pelos exemplos das manifestações patológicas apontadas no artigo, vê-se a grande qualidade das imagens e a possibilidade de extrair medições.

A qualidade e quantidade de dados que é possível obter de forma rápida permite o desenvolvimento de novas abordagens metodológicas para aprofundar e avançar no diagnóstico das manifestações patológicas destas construções.

AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) e Laboratório de Reabilitação e Durabilidade das Construções (LAREB), da Universidade Federal do Ceará (UFC), pelo suporte técnico.

A

B

FIGURA 17
Manchas de umidade no subsolo do Bloco B. (a) e (b) estrutura e piso

A

B

FIGURA 18
(a) e (b) Fissuras no piso do subsolo do Bloco B

TABELA 1
Quantitativo das anomalias observadas no Acquário Ceará

		Anomalias observadas				
		MU (m^2)	**SGR (m^2)**	**FIS (m)**	**CRS (m)**	**JDL (m)**
Bloco A	Subsolo	2113.62	43.88	24,81	40.90	72,30
	Piso 1	2221,58	1555,11	10,90	26,90	67,80
	Piso 2	2221,58	1555,11	14,40	37,37	67,8
	Cobertura	2221.58	1555,11	11,90	–	49,50
Bloco B	Subsolo	1316,84	–	20,70	–	–
Bloco C	Subsolo	955,50	–	22,98	47,48	110,20
	Piso 1	955,50	688,85	24,63	32,45	208,90
	Piso 2	1039,85	727,90	54	43,75	173,10
	Cobertura	782,55	547,79	–	–	–
TOTAL		13828,60	6673,75	184,32	228,85	749,60

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 13752: Perícias de engenharia na construção civil. Rio de Janeiro, 1996.

[2] IBAPE. NORMA DE INSPEÇÃO PREDIAL NACIONAL, 2012.

[3] DEZEN-KEMPTER, Eloisa et al. Escaneamento 3D a laser, fotogrametria e modelagem da informação da construção para gestão e operação de edificações históricas. Gestão e Tecnologia de Projetos, São Paulo, v. 10, n. 2, p. 113-124, 2015. Disponível em: http://dx.doi.org/10.11606/gtp.v10i2.102710.

[4] BEDIN, CARLA. Estratégias para inspeção do estado de conservação de fachadas com uso de RPAs e Laser Scanner. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação). 124 p. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2019.

[5] Shao, W., Kakizaki, K., Araki, S. Automated Two-Stage Approach for Damage Detection of Surface Defects in Historical Buildings. IEEE 46th Annual Computers Software, and Applications Conference, 2022.

[6] Groetelaars, N. J. Criação de Modelos Bim a partir de nuvens de pontos: estudo de métodos e técnicas para documentação arquitetônica. Tese (doutorado). 372f. Universidade Federal da Bahia. Faculdade de arquitetura. 2015.

[7] Erkal, B. G., Hajjar, J. F. Laser-based surface damage detection and quantification using predicted surface properties. Automation in Construction 83 (2017).

[8] X. Yang, P. Grussenmeyer, M. Koehl, H. Macher, A. Murtiyoso, T. Landes, Review of built heritage modelling: integration of HBIM and other information techniques, J. Cult. Herit. 46 (2020) 350–360, https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.05.008.

[9] Sanchez-Aparício, L.J., Blanco-Gargia, F. L. del., Villanueva-Llauradó, P., Aira-Zunzunegui, J. R., Sanz-Arauz, D., Pierdica, R., Pinilla-Melo, J., Garcia-Gago, J. Detection of damage in heritage constructions based on 3D point clouds. A systematic review. Journal of Building Engineering, 2023.

[10] Haus (2019). Obra de aquário encalha em praia famosa de Fortaleza Disponível em: <https://www.gazetadopovo.com.br/haus/estilo-cultura/acquario-ceara-obra-de-aquario encalha-em-praia-famosa-de-fortaleza/>. Acesso em 13 de out. de 2023.

[11] IPECE Informe. O projeto Acquário Ceará: aspectos gerais e plano de negócios do empreendimento. Nº 84, julho de 2015.

[12] Leica geosystems; Scanner de imagens a laser Leica BLK360, disponível em: <https://leica-geosystems.com/pt-br/products/laser-scanners/scanners/blk360>. Acesso em 12 de out. de 2023.

[13] Matterport; unlock valuable insights with Matterport's AI, disponível em: <https://matterport.com/> Acesso em 07 de fev. de 2024.

[14] Dji; Panthon 4 Pro V2.0. Inteligência visionária. Imaginação elevada. Disponível em: <https://www.dji.com/br/phantom-4-pro-v2> Acesso em: 07 de fev. de 2024.

[15] Geosense; Drone deploy: tudo o que você precisa saber antes de começar, dísponivel em: <https://geosense.net.br/2022/08/12/drone-deploy-tudo-o-que-voce-precisa-antes-de-comecar/>. Acesso em 07 de fev. de 2024.

[16] Leica geosystems. Manual do usuário: BLK360. 2021.

Prática Recomendada IBRACON/ABECE

Projeto de Estruturas de Concreto Reforçado com Fibra

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* é um trabalho pioneiro no Brasil, que traz as diretrizes para o desenvolvimento do projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras.

Baseada no *fib Mode Code 2010*, a *Prática Recomendada* estabelece os requisitos mínimos de desempenho mecânico do CRF para substituição parcial ou total das armaduras convencionais nos elementos estruturais e indica os ensaios para a avaliação do comportamento mecânico do CRF.

Patrocínio

Belgo Bekaert Arames
ArcelorMittal | BEKAERT better together
Pode confiar

OWENS CORNING

Braskem

DADOS TÉCNICOS

ISBN: 978-85-98576-26-8
Edição: 1ª edição
Formato: Eletrônico
Páginas: 39
Acabamento: Digital
Ano da publicação: 2016
Coordenador: Eng. Marco Antonio Carnio

Aquisição
www.ibracon.org.br
(loja virtual)

DOI – http://dx.doi.org/10.4322/1809-7197.2024.114.0007

Inspeção de estruturas de concreto afetadas **por reações expansivas com o uso de drone**

EDUARDO ISSAMU FUNAHASHI JÚNIOR – MEST. – https://orcid.org/0000-0002-7516-4195 (eduardo.funahashi@desek.com.br) ;
PATRÍCIA GAMBALE – MEST. – https://orcid.org/0000-0001-8219-3616 ;
PIERRE-YVES GUY – DIR. | **SENTINEL BRASIL**
SELMO CHAPIRA KUPERMAN – DOUT. – https://orcid.org/0000-0003-4186-2216 | **DESEK**
EDNA POSSAN – PROF. – https://orcid.org/0000-0002-3022-742 | **UNILA**
NICOLE PAGAN HASPARYK – DOUTORA, PESQ. – https://orcid.org/0000-0001 7576-2681 | **ELETROBRAS**

RESUMO

A INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS COM OCORRÊNCIAS DE FISSURAÇÃO E DETERIORAÇÃO DE CONCRETOS AFETADOS PELA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO (RAA) E ETRINGITA TARDIA (DEF- DELAYED ETTRINGITE FORMATION) PODE SER CONDUZIDA COM O USO DE DRONE. NESTE ESTUDO, APRESENTA-SE O POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DESTA FERRAMENTA, EM IDADES PRÉ-ESTABELECIDAS, ASSOCIADA À INSTRUMENTAÇÃO E INSPEÇÕES VISUAIS, NA AVALIAÇÃO DE PROTÓTIPOS DE CONCRETO QUE FORAM INDUZIDOS À DEF E À RAA. ESSE TIPO DE INVESTIGAÇÃO, SEGUIDO POR UM PROCESSAMENTO DETALHADO DAS IMAGENS, POSSUI ELEVADO POTENCIAL EM MENSURAR AS FISSURAS ATIVAS. ESSA TÉCNICA JÁ TEM SIDO EMPREGADA EM ESTRUTURAS DE CONCRETO DE BARRAGEM AFETADAS POR REAÇÕES EXPANSIVAS, ESPECIALMENTE PARA INSPEÇÕES EM LOCAIS DE DIFÍCIL ACESSO. OS PROCEDIMENTOS ADOTADOS INDICARAM RESULTADOS SATISFATÓRIOS E POTENCIAL DO USO DE DRONES PARA INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO AFETADAS POR REAÇÕES EXPANSIVAS.

PALAVRAS-CHAVE: REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO (RAA), ETRINGITA TARDIA (DEF), MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS, INSPEÇÃO POR DRONE, ÍNDICE DE FISSURAÇÃO.

1. INTRODUÇÃO

A deterioração de estruturas por reações expansivas devido à reação álcali-agregado (RAA), etringita tardia (*DEF-Delayed Ettringite Formation*) e ataque conjugado (DEF&RAA) é um problema para a durabilidade do concreto e vida útil de projeto, que afeta um número crescente de estruturas de concreto no Brasil e no mundo. A RAA já é um fenômeno conhecido de longa data e que tem como fatores condicionantes alguns minerais considerados potencialmente reativos presentes no agregado, álcalis e umidade (1). Já, a DEF representa um tipo de ataque interno por sulfatos e que envolve altas temperaturas decorrentes de excessivo calor de hidratação gerado a partir do contato do cimento com a água, ou mediante cura térmica, ambos acima de 60-65 °C (2).

Em (3), pode ser observada uma extensa avaliação diagnóstica que foi elaborada para avaliar um pilar e um muro de vertedouro de usina hidrelétrica brasileira com pouco mais de 80 anos de idade, que apresentavam fissuras decorrentes das reações expansivas mencionadas. Entre as diversas medidas definidas a partir deste diagnóstico, destaca-se a necessidade do monitoramento periódico da evolução das expansões e do quadro fissuratório existentes. A partir deste monitoramento, é possível programar as manutenções e eventuais intervenções a serem realizadas nestas estruturas de concreto ao longo dos anos. A prática recomendada publicada via comitê do IBRACON CT-201 (4) abrange vários dos passos principais a serem adotados no âmbito do diagnóstico, tanto em campo como em laboratório.

Porém, a avaliação precisa de fissuras (distribuição e quantificação) é um processo complexo, mas fundamental no monitoramento e manutenção de estruturas de concreto, principalmente naquelas com fissuras ativas, como é o caso da RAA, DEF ou ataque conjugado por DEF&RAA. Por meio de inspeção visual e com o uso de instrumentos manuais, como o fissurômetro, por exemplo, são feitas medidas periódicas com o objetivo de avaliar a sua atividade no tempo. Em alguns casos, este tipo de monitoramento pode ser subjetivo dependendo da experiência do leiturista, muitas vezes sendo um processo demorado e com maior custo, dependendo das áreas e das condições de acesso das estruturas a serem avaliadas.

Recentes avanços tecnológicos (hardware e software) têm possibilitado o uso de drone para inspeção e monitoramento de estruturas, sendo de especial interesse para trabalhos em altura e em locais de difícil acesso. As imagens obtidas podem ser utilizadas para o desenvolvimento de modelos estruturais tridimensionais, quantificar os avanços durante a construção de empreendimentos residenciais e de infraestrutura, inspeções de fachadas de edifícios para identificar patologias, entre outros. O uso de drone, em conjunto com o processamento digital das imagens, tem um grande potencial para o monitoramento de fissuras no concreto, independentemente das dimensões da estrutura. Com o processamento das imagens, podem ser verificados detalhes sobre as fissuras superficiais existentes nas estruturas. Com isso, é possível obter resultados satisfatórios para a identificação e quantificação das dimensões das fissuras em relação a inspeção visual.

Este artigo apresenta o monitoramento do quadro fissuratório de estruturas de concreto afetadas por DEF e RAA. Inicialmente, nos protótipos cúbicos de concreto

expostos em campo de envelhecimento desenvolvido por Furnas (5), foram realizadas inspeções visual e por drone, seguida por processamento das imagens. A inspeção por drone foi também aplicada para estruturas de concreto de uma barragem que se encontra afetada por reações expansivas. Os procedimentos adotados para as duas situações indicaram resultados satisfatórios e mostram o grande potencial do uso de drones e análise de imagens para a inspeção periódica de estruturas de concreto afetadas por reações expansivas.

FIGURA 1
Imagem ilustrativa de um ortomosaico de uma barragem obtida por drone

2. DRONE E SUAS POTENCIALIDADES

Os drones, ou Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), têm se mostrado ferramentas bastante vantajosas em substituição aos procedimentos tradicionalmente adotados em inspeções de variados empreendimentos, graças às suas características únicas. Em meados de 2017, com a regulamentação do seu uso no Brasil, a busca pela utilização desses equipamentos tem se intensificado e sido frequente, haja vista a potencialidade de obtenção de resultados mais rápidos, precisos e direcionados. As inspeções convencionais envolvem avaliações visuais, bem como EPIs e equipamentos de suporte, trazendo uma maior complexidade aos serviços.

Uma inspeção por meio de drones pode reduzir o tempo de serviço ao ser comparada àquela convencional. Claro que, na sequência, haverá a necessidade de processamento das imagens, entretanto, os aplicativos disponíveis para tal fim e a experiência comprovada do operador permitem uma análise bastante eficaz, o que traz resultados satisfatórios como mostrado por (6).

Porém, deve-se destacar a importância do envolvimento de uma equipe devidamente treinada e conhecedora do objeto a ser inspecionado, do contrário, resultados impertinentes poderão ser obtidos e prejudicar a conclusão dos trabalhos.

Os serviços realizados com essa ferramenta são variados:

- detecção, medição, classificação e monitoramento de anomalias superficiais;
- monitoramento topográfico (verificação da estabilidade de uma estrutura, seu deslocamento espacial e sua inclinação);
- escaneamento 3D a laser, criação de *Digital Twin* ("gêmeo digital") e *As Is* ("como está") para projeto BIM.

A correção de sinal com antena RTK dá ao drone uma alta precisão de geolocalização de 2-3 cm, o que permite a automatização do plano de voo. Assim, a totalidade da estrutura é sobrevoada garantindo a exaustividade das informações recolhidas de forma a auxiliar na avaliação da segurança das estruturas.

As aplicações são diversas e dentro delas cita-se o monitoramento de anomalias em barragem de concreto (Figura 1). Voando a uma distância segura de 5 m da estrutura, o drone é capaz de detectar fissuras de até 0,5 mm.

As Figuras 2 e 3 mostram a evolução das anomalias entre os anos de 2022 e 2023 e a Figura 4 mostra o mapa de densidade de fissuras do paramento jusante de uma barragem.

A análise detalhada dessas imagens permite a identificação precoce de anomalias estruturais, possibilitando intervenções corretivas antes que os problemas se agravem. Além disso, a fotointerpretação desempenha um papel fundamental no monitoramento contínuo, permitindo a avaliação da evolução dos danos ao longo do tempo e facilitando a implementação de medidas preventivas e/ou corretivas.

3. AVALIAÇÃO DA DETERIORAÇÃO DO CONCRETO

Para a avaliação da deterioração dos concretos dos protótipos afetados por reações expansivas foi determinado o índice de fissuração por inspeção visual e as fissuras foram classificadas a partir das imagens feitas por inspeção com drone.

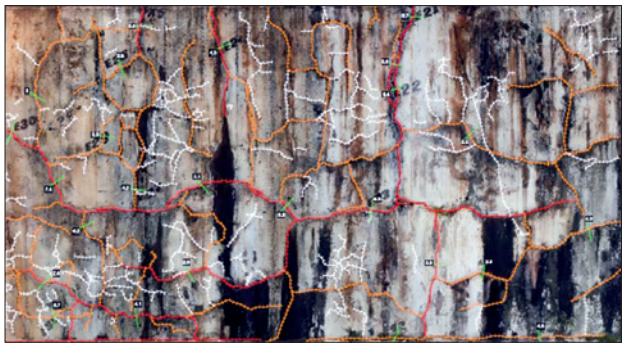


FIGURA 2
Anomalias observadas no ano de 2022

FIGURA 3
Anomalias observadas no ano de 2023. Notar a evolução das anomalias entre 2022 (Figura 2) e 2023 (em 2023 somente o aumento do comprimento foi destacado)

3.1 Índice de deterioração por inspeção visual

Para a determinação do grau de fissuração (ou índice de fissuração-IF) dos protótipos analisados (Figura 5), foi utilizado o método baseado no procedimento N° 47 do LCPC[1] (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussees*), atual IFSTAR (*Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de L'aménagement et des Réseaux*). Este método permite quantificar e monitorar a evolução do estado de fissuração superficial de uma região da estrutura de concreto que apresenta fissuração por reações expansivas.

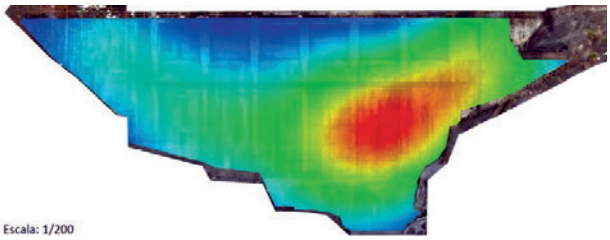


FIGURA 4
Exemplo de mapa de densidade de fissuras no paramento jusante da barragem. Notar maior concentração próxima a rocha de apoio da ombreira esquerda

FIGURA 5
Vista geral dos protótipos no campo de envelhecimento da Eletrobras (Estado: Goiás)

Segundo o método N° 47 do LCPC, é feita uma marcação sobre a superfície de concreto (Figura 6), composta por quatro eixos graduados a cada 10 cm, sendo um eixo vertical (OA) e um eixo horizontal (OB) do mesmo comprimento e dois eixos inclinados (AB e OC) de 45° em relação aos eixos horizontal e vertical em uma área de 1 m².

TABELA 1
Escala de caracterização de fissuração pelo índice de fissuração

Valor IF	Importância da fissura
0 a 0,5	Insignificante
0,5 a 1	Baixo
1 a 2	Moderado
2 a 5	Forte
5 a 10	Muito Forte
>10	Considerável

Fonte: LCPC (1997)

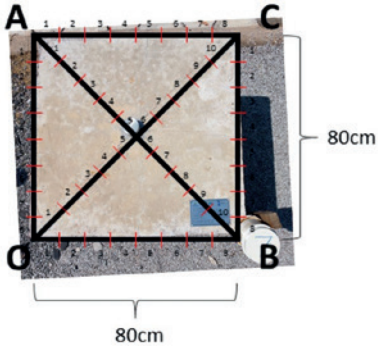


FIGURA 6
Modelo de quadrantes desenhados no concreto da face superior dos protótipos

Com quadrantes marcados e identificados pelos eixos na superfície do concreto, a leitura da abertura da fissura é feita nas proximidades do eixo perpendicular à sua direção principal. O índice de fissuração (IF) é o resultado obtido pela média global de determinações das aberturas de fissuras em elementos de concreto, por meio de medições em quadrantes pré-determinados, sendo o resultado apresentado em (mm/m).

Estudos prévios realizados pelo LCPC (1997) possibilitam classificar a importância das fissuras presentes nas estruturas de concreto após a inspeção visual, conforme Tabela 1. Todas as fissuras com abertura superior a 0,05 mm foram medidas com o auxílio do fissurômetro de 0,05 até 2 mm de abertura e de lupa micrométrica (Figura 7). Para avaliar o IF do concreto, as medidas das fissuras na face superior do protótipo foram feitas em quatro idades distintas: 1,5 anos, 2 anos, 2,5 anos e 3,5 anos.

Nas Figuras 8, 9 e 10, é possível observar o IF obtido ao longo do tempo dos protótipos analisados em comparação com o concreto de referência, sem deterioração. Os protótipos foram confeccionados com concreto do tipo bombeável, e uma dosagem contendo alto consumo

FIGURA 7
Fissurômetro e lupa micrométrica utilizados para leitura de abertura das fissuras (em mm)

[1] Méthode d'essai Nº 47 – Determinacion de l'indice de fissuration d'um parement de béton. LCPC (Laboratorie central des Ponts et Chaussées Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement. ISSN 1167-489X, França, 1997.

de cimento tipo CP V ARI (470 kg/m³) e relação água-cimento (a/c) igual a 0,46. A classe de resistência desse concreto é de 40 MPa.

Com base nos índices de fissuração determinados por meio de inspeção visual, verificou-se que o concreto do protótipo de referência se manteve abaixo de 0,5 até a idade de 2,5 anos e, após 3,5 anos, apresentou resultado igual a 0,60 podendo ser classificado com importância "insignificante" e "baixo", respectivamente. Como esperado, essas fissuras não apresentam importância significativa considerando a sua confecção com agregados comprovadamente inócuos e com temperatura máxima atingida pelas reações de hidratação do cimento igual a 53,4°C, o que impediu o risco do surgimento da RAA e DEF, respectivamente, até a idade avaliada.

O índice de fissuração do concreto do protótipo com DEF apresentou evolução ao longo do período de análise. Com 1,5 anos de idade, pode ser classificado como "moderado" devido ao índice de fissuração igual a 1,4. Após 2 anos, apresentou IF igual a 7,4 podendo ser classificado como "muito forte". Após 3,5 anos apresentou índice igual a 11,8 com importância das fissuras "considerável". Entre 1,5 e 2,5 anos, notou-se uma evolução significativa do IF, onde o índice na idade de 2,5 anos é 5 vezes maior em relação ao determinado na idade de 1,5 anos. Isto provavelmente ocorreu devido ao maior ingresso de umidade ao interior do concreto quando do aparecimento das fissuras, mostrando assim a sua maior cinética de reação devido à formação dos produtos expansivos. A temperatura máxima monitorada no interior do concreto quando da sua confecção foi bastante elevada e igual a 94,4 °C (> 60-65 °C), o que indica maior probabilidade de danos futuros por DEF, apenas, uma vez que o agregado empregado no concreto foi classificado como potencialmente inócuo pela NBR 15577/3 (2018)[2].

Para o protótipo com RAA, verificou-se uma importância de fissuração "insignificante" até os primeiros 2,5 anos de análise. Após 3,5 anos, notou-se que o IF foi igual a 1,1 sendo as fissuras classificadas com importância "moderada". Nesta idade, o índice de fissuração se mostrou 56% superior ao IF do concreto de referência. As observações realizadas e quantificação do quadro fissuratório mostrou que, apesar da menor cinética de reação da RAA em relação à DEF nos primeiros anos, a expansão provavelmente ainda irá continuar, haja vista a presença de minerais reativos presentes na rocha empregada como agregado (tipo granito potencialmente reativo). Ainda, com a evolução observada da abertura das fissuras, ocorrerá maior aporte de água e/ou umidade para o interior do concreto a partir do meio no qual o bloco está exposto, além das demais variações das intempéries. A temperatura máxima monitorada no interior deste concreto após a sua moldagem foi igual a 57,3°C, o que indica o potencial de desenvolvimento apenas da RAA pela presença de agregado reativo do tipo granito, comprovado em campo.

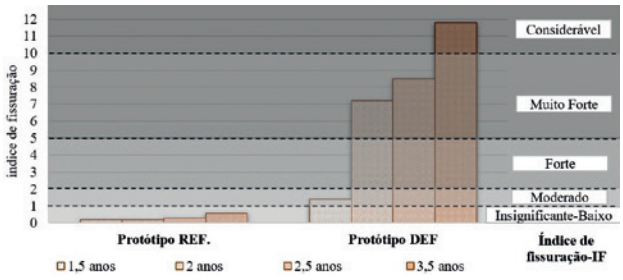


FIGURA 8
IF dos protótipos referência e com DEF

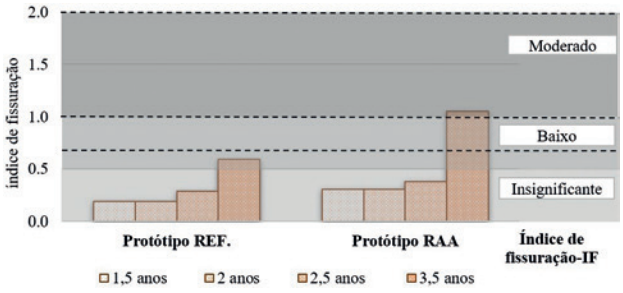


FIGURA 9
IF dos protótipos referência e com RAA

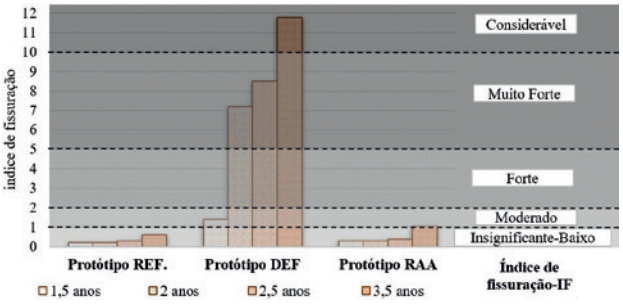


FIGURA 10
IF dos protótipos referência, com DEF e com RAA

3.2 Inspeção por drone e processamento de imagens

Nesta etapa da avaliação, foi realizada a aquisição de imagens georreferenciadas, por meio de RPAS/DRONE, para a elaboração de um modelo tridimensional de cada protótipo de concreto e mapeamento/monitoramento das anomalias existentes nas suas 5 faces expostas ao ambiente. O protocolo de trabalho foi dividido em três etapas:

1. Parâmetros de voo e de aquisição;
2. Pós-processamento e detecção das anomalias;
3. Comparação com os dados anteriores.

[2] ABNT NBR 15577-3 – Agregados – Reatividade álcali-agregado Parte 3: análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados e, presença de álcalis do concreto, 2018.

3.2.1 PARÂMETROS DE VOO E DE AQUISIÇÃO

Para realizar a medição de fissuras com uma abertura de até 0,5 mm, é preciso atingir um GSD (*Ground Sample Distance*) inferior ou igual a esse valor. A câmera utilizada no drone, de modelo P1 da marca DJI, possuiu uma lente de 24 mm de distância focal. A Equação 1 apresenta o cálculo do GSD e a Figura 11 os parâmetros.

$$[1] \quad GSD = \frac{(H \cdot S_w)}{(F \cdot imH)}$$

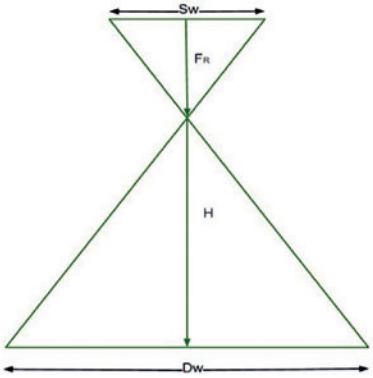
Nesse caso, a distância de voo foi pequena (1 m) e o GSD atingido foi de 0,18 mm/pix, uma vez que os estudos foram executados em protótipos na estação de envelhecimento da Eletrobras (Goiânia/GO).

Em seguida, com o software *Agisoft Metashpae*, foi criado um plano de voo automático, com 80% de recobrimento entre cada foto, para realizar a aquisição das imagens. Assim, com uma média de 60 fotos por face dos cubos de concreto, conseguiu-se uma reconstrução precisa dos protótipos e das suas anomalias.

3.2.2 PÓS-PROCESSAMENTO E DETECÇÃO DAS ANOMALIAS

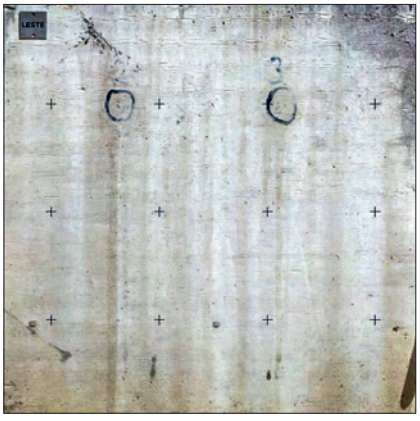
As fotos tomadas para cada face (total de 300 fotos por bloco de concreto, aproximadamente) foram compiladas no software *Agisoft Metashape* e foi elaborado um ortomosaico de cada face do protótipo.

Essa técnica permite desenvolver uma imagem 2D da face, sem nenhuma distorção ótica, além de manter as dimensões



S_w: largura do sensor da câmera em mm
S_h: comprimento do sensor da câmera em mm
F: o comprimento focal da lente da câmera
H: a altura de voo
imW: largura da imagem
imH: altura da imagem
D_w: largura da sombra da imagem no solo
D_H: altura da sombra da imagem no solo

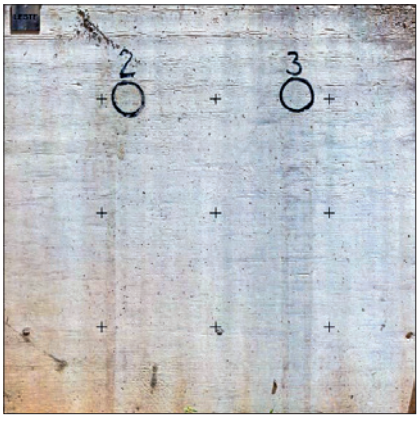
FIGURA 11
Parâmetros para cálculo do GSD



A Protótipo REF. (2022)

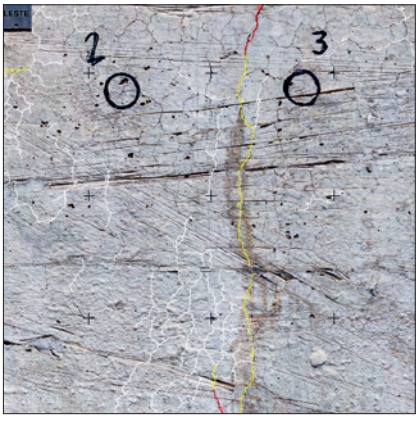
B Protótipo RAA (2022)

C Protótipo DEF (2022)



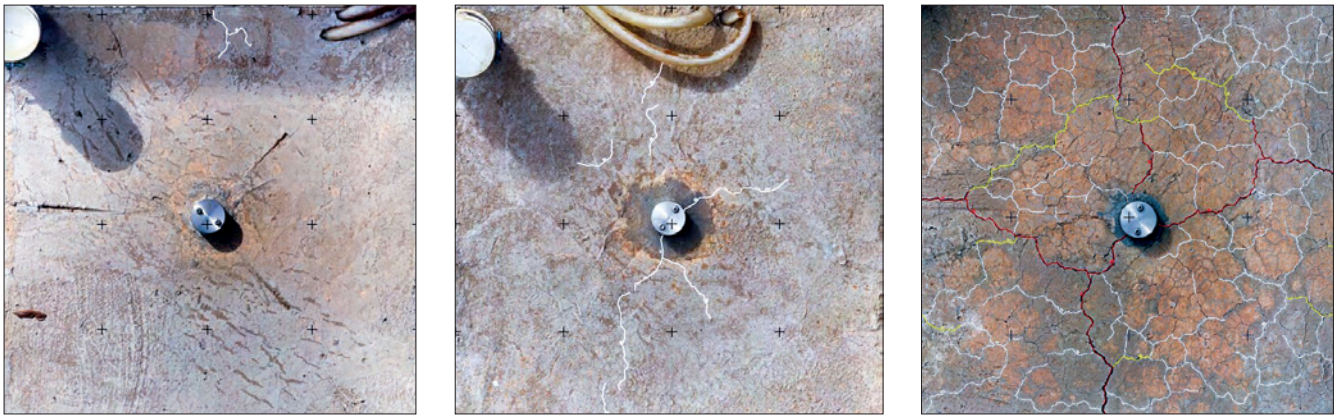
D Protótipo REF. (2023)

E Protótipo RAA (2023)



F Protótipo DEF (2023)

FIGURA 12
Ortomosaicos da face Leste dos protótipos (inspeções em 2022 e 2023)



A Protótipo REF. B Protótipo RAA C Protótipo DEF

FIGURA 13
Ortomosaicos – Topo dos protótipos – Inspeções em 2023

fidedignas das anomalias existentes. O estudo em pauta foi realizado para 14 protótipos de concreto em duas idades de análise.

Este trabalho apresenta os resultados dos estudos envolvendo três protótipos eleitos (Referência, sem ataque; atacado por RAA; atacado por DEF) e a face Leste e o topo. Na Figura 12 constam os ortomosaicos das faces (Leste) dos protótipos processadas a partir das inspeções realizadas em setembro de 2022 e de 2023.

Foi possível verificar visualmente a evolução do quadro fissuratório também no topo dos protótipos, região de maior incidência de sol e de chuvas.

Na Figura 13, constam os ortomosaicos com as imagens do topo dos 3 protótipos avaliados. É possível visualizar o avanço da DEF, e de forma mais acentuada em termos de fissuração ativa ao ser comparado com a RAA.

As fissuras foram classificadas segundo as dimensões da sua abertura média conforme mostra a Tabela 2.

TABELA 2
Classificação das fissuras em função da sua abertura média

Tipo de anomalia (Fissuras)	Largura da abertura	Cor
F1	0,2 até 1 mm	Branco
F2	1 até 2 mm	Amarelo
F3	> 2 mm	Vermelho

3.3.3 COMPARAÇÃO COM OS DADOS ANTERIORES

Após as medições de comprimento das fissuras existentes nos protótipos, os dados foram agrupados e todas as 5 faces expostas dos protótipos foram consideradas no cálculo final para cada faixa de abertura da fissura. Em seguida, foi feita uma análise comparativa entre os valores encontrados em 2022 e 2023.

Na Tabela 3, mostra-se a quantificação das fissuras existentes nas 5 faces. Com base nesta primeira análise notou-se maiores comprimentos de fissuras F1, F2 e F3 no protótipo com DEF. Verificou-se um aumento no comprimento total de fissuras nos três protótipos analisados no período de 1 ano. Este aumento foi igual a 214%, 146% e 60% para aqueles com DEF, RAA e REF, respectivamente. O protótipo com DEF apresentou número de fissuras 3,25 vezes superior em relação ao protótipo com RAA no ano de 2022 e 4,15 vezes superior no ano seguinte.

Não foram quantificadas fissuras F2 e F3 no protótipo com RAA e na REF. no ano de 2022. No protótipo de REF, foram observadas poucas fissuras F2, não sendo observadas fissuras F3. Já, para o protótipo com DEF, foram observadas fissuras F1 e F3 nas inspeções realizadas em 2022 e 2023, com um aumento de fissuras F2 de 53% entre o período analisado. A porcentagem negativa de fissuras F2 do protótipo com DEF no período analisado se explica pelo fato que algumas fissuras F2 se tornaram F3 e, por outro lado, não houve um

TABELA 3
Classificação das fissuras em função da sua abertura média e comprimento – inspeção por drone

Fissuras identificadas nos protótipos	Ano	REF	RAA	DEF
F1 (cm)	2022	65.7	297.0	968.2
	2023	105.1	731.2	3039.6
Aumento	%	60%	146%	214%
F2 (cm)	2022	0.0	0.0	256.3
	2023	26.7	0.0	142.7
Aumento	%	∞	0%	-44%
F3 (cm)	2022	0.0	0.0	118.9
	2023	0.0	0.0	182.3
Aumento	%	0%	0%	53%

aumento suficiente de fissuras que poderiam ser classificadas como do tipo F2.

Com base nos resultados das inspeções visuais e com o uso do drone com processamento das imagens, foi possível avaliar uma boa correlação entre elas para o período de analisado. O protótipo de REF foi classificado com IF "insignificante" até "baixo" com base na inspeção visual, enquanto pela inspeção por drone foram observadas apenas fissuras do tipo F1, com abertura variando de 0,20 mm até 1 mm.

Com base na inspeção por drone, o protótipo com RAA apresentou maior densidade de fissuras F1 em relação ao da REF, além de um aumento da sua quantidade no período avaliado. Não foram observadas fissuras com abertura superior a 1 mm para o período estudado. Este comportamento também foi verificado por meio da inspeção visual, onde o IF variou de "insignificante" até "moderado" entre 2022 e 2023.

Já, no caso do protótipo com DEF, por meio da inspeção visual foi classificado com IF "muito forte" em 2022 e "considerável" em 2023, indicando um aumento importante deste índice em apenas 1 ano, indicando um processo deletério mais acelerado quando comparado à RAA. O mesmo comportamento foi observado com base na inspeção realizada por drone, onde foram observadas as três faixas de fissuras (F1, F2 e F3). Além disso, por meio das imagens geradas a partir da inspeção por drone, foi verificado aumento da quantidade de fissuras F1, F2 e F3 no bloco inspecionado.

A partir das inspeções visuais e por drone, o comportamento verificado foi coerente entre essas técnicas: maior o comprimento e abertura das fissuras, maior é o índice de fissuração do concreto. As análises serão continuadas com outros protótipos, tipos de cimento e ataques, de forma a verificar novas correlações.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Essa publicação teve como o objetivo mostrar a associação de técnicas investigativas no monitoramento de estruturas de concreto acometidas por reações expansivas. O emprego do drone durante as inspeções em campo se mostra uma prática atrativa, pois, além de permitir a agilidade na obtenção das imagens e sintomas característicos, permite o acesso a regiões não possíveis de serem inspecionadas visualmente por um especialista.

Ainda, os estudos realizados com os protótipos de concreto expostos ao ambiente e induzidos aos dois tipos de reações expansivas (RAA e DEF) indicaram também a importância da determinação do índice de fissuração ao longo do tempo, por meio das inspeções visuais, além das investigações mais detalhadas por meio do processamento das imagens obtidas por drone.

Foram observadas ainda diferenças de comportamento entre a RAA e a DEF por meio das duas técnicas avaliadas, representando a DEF um processo deletério mais intenso nas idades avaliadas, tendo como base o desenvolvimento do quadro fissuratório. A RAA, com base no tempo de avaliação realizado, se mostrou mais lenta do que a DEF até a idade de 3,5 anos, como esperado. Já, a partir de 2,5 anos, esta reação apresentou um salto, atingindo o índice de fissuração de "1,1", o que indica uma potencialização e aceleração das expansões internas, haja vista o atingimento de fissuras acima do grau 1, representando uma importância de fissuração "moderada". Por outro lado, para a DEF o salto ocorreu antes, entre 1,5 e 2 anos. Após essa última idade, o crescimento do índice de fissuração foi gradativo, ao longo do tempo, chegando com 3,5 anos a um patamar bastante elevado de "12", o que representa um nível "considerável" de fissuração. A amostra de referência, sem reações instaladas e fissuração, se manteve com índice abaixo de "1" (igual a 0,6).

Em campo, a aplicação da inspeção via drone confirmou a eficácia da técnica e a coerência com os resultados obtidos a partir da inspeção visual, o que indica o seu potencial de uso para a continuidade do monitoramento de estruturas de concreto ao longo do tempo. Essas práticas, associadas aos dados de instrumentação, podem auxiliar na avaliação da evolução das reações expansivas e, por conseguinte, na tomada de ações, medidas corretivas e eventuais intervenções que se fizerem necessárias.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho teve apoio financeiro e de infraestrutura de Eletrobras/ANEEL, por meio de projeto de P&D FURNAS ANEEL nº PD 0394-1504-2015.

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] HASPARYK, N. P. Reação álcali-agregado no concreto. Capítulo 26. Concreto: Ciência e Tecnologia. Volume 2. 3ª Edição. Ed. IBRACON, 2022, 1134 p.

[2] HASPARYK, N. P. ; KUPERMAN, S. C. ; FUNAHASHI JR, E. I.; VICENTE, G. R. GAMBALE, E. A. Recomendações técnicas para a prevenção da DEF e da fissuração térmica do concreto. 1ª Edição. Goiânia, GO: Arte Interativa, 2023, 76 p.

[3] FUNAHASHI JR., E. I., HASPARYK, N. P., POSSAN, E. KUPERMAN, S. C.. Deterioração do concreto de barragens e usinas hidrelétricas devido ao ataque combinado de RAA/DEF. XXXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens. Comitê Brasileiro de Barragens-CBDB. Foz do Iguaçu, PR, 2023, 20 p.

[4] HASPARYK, N. P. et al. Prática recomendada — inspeção de estruturas de concreto visando avaliar manifestações da reação álcali-agregado (RAA) e etringita tardia(DEF). 1ª Edição. Ed. Ibracon — CT 201 — Comitê Técnico de Reações Expansivas, 2023, 50 p.

[5] HASPARYK, N. P.; KUPERMAN, S. C. , BRONHOLO, J. L.; OLIVEIRA S.; BRAGANÇA, M. O. G. P.; MEDEIROS, B. L. , PORTELLA, K. F. Concrete block sites in Brazil for assessing ASR, ISA and coupled attack over time. Proceedings of 16th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete — 16th ICAAR, Ed. LNEC, v. 1, p. 1329-1340 Lisboa, Portugal, 2022.

[6] DING, W.; YANG, H.; YU, K.; SHU; J.. . Crack detection and quantification for concrete structures using UAV and transformer. Automation in Construction. ScienceDirect, 19p., 2023.

Curso **"Problemas de concreto massa: como resolver?"**

O IBRACON realizará o curso "Problemas de concreto massa: como resolver?", no dia 22 de agosto, presencial e on-line.
O curso tem o objetivo de auxiliar na redução de problemas relacionados ao concreto massa, seja para edificações, seja para infraestrutura.
Seu instrutor é o Eng. Selmo Kuperman, diretor da DESEK, que atua há 53 anos em projeto e consultoria de obras de concreto.
Com carga horária de quatro horas, o curso conta quatro créditos no Programa MasterPEC.

Curso **"Estanqueidade de Estruturas de Concreto em Subsolos"**

Realizado durante o 65º Congresso Brasileiro do Concreto, o curso "Estanqueidade de Estruturas de Concreto em Subsolos" visa capacitar engenheiros com respeito às principais diretrizes técnicas para estanqueidade de estruturas de concreto em subsolos.
O curso será ministrado por engenheiros da Penetron, Uchoa Engenharia, Supermix e Construtora Colil.
Com carga horária de quatro horas, o curso conta quatro créditos no Programa MasterPEC.

Mais informações:
https://site.ibracon.org.br/educacao-continuada/calendario-de-cursos-2/

IPT completa **125 anos**

O IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, completa 125 anos em celebração com apresentação da Orquestra Sinfônica da USP.
A diretora-presidente, Liedi Bernucci, lembrou a missão de compartilhar conhecimento, buscar melhor qualidade de vida e um planeta saudável para as próximas gerações.
O evento contou ainda com o lançamento do livro 'IPT 125 anos: construindo o futuro com ciência, tecnologia e inovação', além de homenagens a três profissionais com 50 anos de casa.

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
concrebras ENGEMIX GRACE UNISINOS PERFORMANCE Votorantim Cimentos IBRACON

Curso para **Inspetor I**

Em sua 19ª edição, o curso "Preparatório para Inspetor I – Inspeção de Estruturas de Concreto" foi realizado de 20 a 22 de junho, na Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABCP, em São Paulo.

O curso apresentou e discutiu os conteúdos das normas ABNT NBR 16.230/2013, que regula a qualificação e certificação de pessoal para inspeção de estruturas de concreto, e a ABNT NBR 9452/2019 – Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto.

A exposição passou pelas fases de interpretação de projetos, cadastramento de elementos estruturais, coleta de informações em campo, documentação das manifestações patológicas, identificação da gravidade, coleta de amostras e acompanhamento de ensaios de campo.

Seus instrutores foram o presidente do IBRACON, Eng. Julio Timerman, vice-presidentes do IBRACON, Profs. Enio Pazini Figueiredo e Paulo Helene, e o diretor da Engeti, Eng. Rafael Timerman.

Durante o curso, além das aulas teóricas, houve aulas práticas no Laboratório da ABCP e inspeção da Ponte da Casa Verde auxiliada por drone e guiada pelo Eng. Emi Oliveira, da PhD Engenharia.

O curso faz parte do Programa Master em Produção de Estruturas de Concreto (MasterPEC), sistema de disciplinas de educação continuada do IBRACON.

Mais informações:
www.idd.edu.br

DADOS TÉCNICOS
ISBN: 978-85-98576-31-2
Formato: 18,6 x 23,3cm
Páginas: 32

PATROCÍNIO
EECEMBU

Guia de Prevenção da Reação Álcali-Agregado

COORDENADORES
Cláudio Sbrighi Neto, Eduardo Brandau Quitete e Arnaldo Forti Battagin

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

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

Aquisição: Acesse a Loja Virtual do IBRACON.
www.ibracon.org.br

Curso Preparatório para **Tecnologista do Concreto**

Com vistas a preparar profissionais para desempenhar a função de tecnologista de concreto e ensaios de seus insumos, o curso on-line preparatório para tecnologista do concreto conforme a ABNT NBR 15146 vai acontecer de 9 a 13 de setembro.

Seus instrutores serão: o supervisor dos Laboratórios em Tecnologia de Concretos e Agregados da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), Eng. Rubens Curti; o gerente técnico da Texte Engenharia e Tecnologia, Eng. Paulo César Nunes de Aquino; e o consultor em soluções em concretos especiais, Eng. Pedro Carlos Bilesky.

O programa do curso vai tratar desde segurança do trabalho e noções de acreditação, passando por ensaios de agregados, concretos frescos, cimento, aço e calda de protensão, até as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 7212, NBR 12655 e NBR 14931.

O curso faz parte do Programa MasterPEC, valendo 24 créditos.

Mais informações:
www.ibracon.org.br

Curso sobre **concreto aparente**

O curso "Concreto aparente: arquitetônico e colorido" vai trazer conceitos e estudos de caso de aplicação do concreto aparente.

A ser realizado no dia 17 de setembro, na Sika, o curso terá aulas teóricas e práticas, com uso do laboratório da empresa.

Seu programa vai tratar da especificação dos materiais, dos aspectos de dosagem, dos procedimentos executivos, das não conformidades e das boas práticas.

Seus instrutores são o diretor da Britez Consultoria, Eng. Carlos Britez, e o consultor em materiais cimentícios, Eng. Dener Altheman.

O curso tem carga horária de cinco horas, valendo cinco créditos no Programa MasterPEC.

Mais informações:
www.ibracon.org.br

PRÁTICA RECOMENDADA IBRACON/ABECE

Macrofibras de vidro álcali resistentes (AR) 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 de vidro álcali resistentes para uso estrutural em concreto.

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: 978-85-98576-28-2
Edição: 1ª edição
Formato: eletrônico
Páginas: 26
Acabamento: digital
Ano da publicação: 2017
Coordenador: Eng. Marco Antonio Carnio

Patrocínio
OWENS CORNING

CBPAT **2024**

O 6º Congresso Brasileiro de Patologia das Construções vai acontecer de 17 a 20 de julho, na UniChristus, em Fortaleza.

Fórum de debates sobre o controle da qualidade, a patologia e a recuperação de estruturas e sistemas construtivos, seja em edificações, seja em infraestrutura, o evento divulga pesquisas científicas e tecnológicas sobre esses temas.

Mais informações:
https://cbpat.org.br

15ª Concrete Show **South America**

O IBRACON vai participar do Congresso Construindo Conhecimento na 15ª edição da Concrete Show South America, feira do setor construtivo que acontece de 6 a 8 de agosto, no centro de exposição São Paulo Expo.

O Instituto vai promover o Seminário "O uso do UHPC nas construções de concreto", no dia 6, das 16h às 18h30.

Associados têm desconto de 20% na inscrição, com o cupom IBRACON20.

6º Congresso Brasileiro **de Túneis e Estruturas Subterrâneas**

O 6º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas / LAT 2025 se realizará entre os dias 10 e 12 de março de 2025 no Espaço Frei Caneca — São Paulo/SP e proporcionará uma plataforma única para especialistas, profissionais e pesquisadores compartilharem conhecimentos, experiências e avanços significativos no campo de Túneis e Estruturas Subterrâneas.

O evento é realização do Comitê Brasileiro de Túneis e da Associação Brasileira de Mecânica de Solos (CBT/ABMS).

PRÁTICA RECOMENDADA IBRACON/ABECE

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

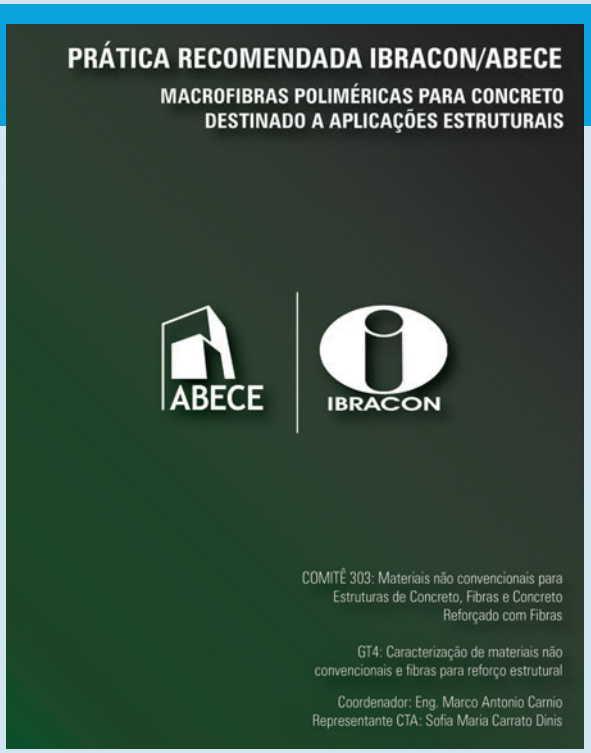
Elaborada pelo *CT 303 – Comitê Técnico IBRACON/ABECE sobre Uso de Materiais não Convencionais para Estruturas de Concreto, Fibras e Concreto Reforçado com Fibras*, a Prática Recomendada especifica os requisitos técnicos das macrofibras poliméricas para uso em concreto estrutural.

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



Patrocínio
neo MATEX
gcp applied technologies
TOPFIBRAS
Viapol

IBRACON é eleito para **Conselho Deliberativo da ABNT**

No último dia 18 de abril, o presidente do IBRACON, Eng. Julio Timerman, assinou o termo de posse para o Conselho Deliberativo da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), para um mandato de três anos, passível de reeleição.

O IBRACON foi eleito por meio de um processo eleitoral aberto e secreto, no qual podem participar os associados individuais e coletivos da ABNT. O requisito necessário para se candidatar é ser associado da entidade. O Instituto foi eleito como associado coletivo contribuinte.

O Conselho é composto por especialistas e representantes de diferentes áreas do conhecimento — engenharia, tecnologia, meio ambiente, ente outras — sendo sua função orientar a criação de normas técnicas para que atendam altos padrões de qualidade.

Presidente do IBRACON, Eng. Julio Timerman, assinando termo de posse, acompanhado pelo vice-presidente, Prof. Paulo Helene

Segundo o presidente do IBRACON, a eleição do Instituto é uma oportunidade para "para normalização de procedimentos e técnicas no uso do concreto e seus componentes, atendendo à crescente demanda da construção civil". Como exemplo, ele cita a normalização da sustentabilidade no setor construtivo, "imprescindível para se atingir as metas propostas para redução da emissão de gases do efeito estufa".

DW**2025**

O Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) realizará a Fifth International Dam World Conference (DW2025), em Lisboa, Portugal, de 13 a 17 de abril de 2025.

DURABILIDADE DO CONCRETO

→ **Editores**	Jean-Pierre Ollivier e Angélique Vichot
→ **Editora francesa**	Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées – França
→ **Coordenadores da edição em português**	Oswaldo Cascudo e Helena Carasek (UFG)
→ **Editora brasileira**	IBRACON

Esforço conjunto de 30 autores franceses, coordenados pelos professores Jean-Pierre Ollivier e Angélique Vichot, o livro "Durabilidade do Concreto: bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente" condensa um vasto conteúdo que reúne, de forma atualizada, o conhecimento e a experiência de parte importante de membros da comunidade científica europeia que trabalha com o tema da durabilidade do concreto.

A edição brasileira da obra foi enriquecida com o trabalho de tradução para a língua portuguesa e sua adaptação à realidade técnica e profissional nacional.

→ **Informações**: www.ibracon.org.br

DADOS TÉCNICOS

ISBN: 978-85-98576-22-0
Edição: 1ª edição
Formato: 18,6 x 23,3cm
Páginas: 615
Acabamento: Capa dura
Ano da publicação: 2014

Patrocínio

ENGETEC · FHECOR DO BRASIL Engenharia · l.a.falcão bauer · PhD Engenharia · weber SAINT-GOBAIN

IBRACON participa **de eventos do setor**

O IBRACON, representado por seu presidente, Eng. Julio Timerman, participou da M&T Expo, feira de máquinas e equipamentos para construção e mineração, que ocorreu de 23 a 26 de abril, na São Paulo Expo.
O presidente do IBRACON marcou também presença na reunião anual da Comissão Panamericana de Normas Técnicas (Copant 2024), que aconteceu de 28 de abril a 1º de maio, em Maceió, Alagoas.
A Copant reúne os Organismos Nacionais de Normalização das Américas, como a ABNT, para promover o desenvolvimento da normalização técnica e da conformidade nos países-membros.
Na 15ª edição do Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, ocorrido nos dias 16 e 17 de maio, em São Paulo, Julio Timerman fez entrega de uma honraria ao secretário municipal de obras de São Paulo, Marcos Monteiro, que palestrou sobre o Programa de Manutenção de Pontes e Viadutos de São Paulo.

Presidente do IBRACON, Julio Timerman, ladeado pelo secretário de obras de São Paulo, Marcos Monteiro e pela presidente-executiva da ABCIC, Íria Doniak

Anapre **completa 20 anos**

A Associação Nacional de Pisos e Revestimentos de Alto Desempenho completou 20 anos no dia 30 de abril, com um Seminário realizado no Millenium Centro de Convenções. O evento contou com palestra do economista Alexandre Schwartsman e com palestras técnicas sobre excelência e satisfação dos clientes de pisos e especificações de revestimentos de alto desempenho em projetos industriais, além de uma mesa-redonda com patrocinadores.

COMENTÁRIOS E EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DA ABNT NBR 6118:2014

A publicação traz comentários e exemplos de aplicação da nova norma brasileira para projetos de estruturas de concreto - ABNT NBR 6118:2014, objetivando esclarecer os conceitos e exigências normativas e, assim, facilitar seu uso pelos escritórios de projeto.

Fruto do trabalho do Comitê Técnico CT 301, comitê formado por especialistas do Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON) e da Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural (ABECE), para normalizar o Concreto Estrutural, a obra é voltada para engenheiros civis, arquitetos e tecnologistas.

DADOS TÉCNICOS

ISBN 9788598576244
Formato: 18,6 cm x 23,3 cm
Páginas: 480
Acabamento: Capa dura
Ano da publicação: 2020

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

Patrocínio

Apodi · ENGETI · EQUILIBRATA · gcp applied technologies · GERDAU · Votorantim · IBRACON

Programa de Mestrado da **PUC-Campinas comemora 10 anos**

O Programa de Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana da PUC-Campinas realizou evento comemorativo de seus 10 anos em 6 de maio, no auditório Campus I.
O vice-presidente do IBRACON, Prof. Paulo Helene, foi um dos palestrantes do evento, juntamente com coordenador de Área I da Capes, Prof. Romulo Dante Orrico Filho.

Workshop Descarbonização **no Setor da Construção Civil — Edificações**

O Workshop "Descarbonização no Setor da Construção Civil – Edificações" foi realizado no último dia 21 de maio de 2024, no formato híbrido, pelo Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo, por meio de seu Comitê de Meio Ambiente (COMASP).
O evento promoveu o debate com o setor e os principais agentes sobre emissões e o mercado de carbono com foco em empreendimentos imobiliários. Na ocasião, foi lançada a terceira versão da CECarbon – Calculadora de Consumo Energético e Emissões de Carbono na Construção Civil.

SIMPAVCON **em Campinas**

O I Simpósio de Pavimento de Concreto Reforçado aconteceu em Campinas nos dias 4 e 5 de junho.
Organizado pela PUC, por meio do Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, e Faculdade de Engenharia Civil, IFRC, IBTS e ABESC, contou com palestras sobre soluções de projeto de pavimentos de concreto reforçado e impactos ambientais quando comparado a outras soluções. O vice-presidente do IBRACON, Eng. Carlos Massucato palestrou sobre a sustentabilidade dos pavimentos de concreto. O presidente do IBRACON, Eng. Julio Timerman participou da homenagem póstuma ao Eng. Márcio Rocha Pitta, engenheiro com contribuições importantes no tema de pavimentos de concreto.

Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais

→ **Autores** P. Kumar Mehta e Paulo J. M. Monteiro (Universidade da Califórnia em Berkeley)

→ **Coordenadora da edição em português** Nicole Pagan Hasparyk (Eletrobras Furnas)

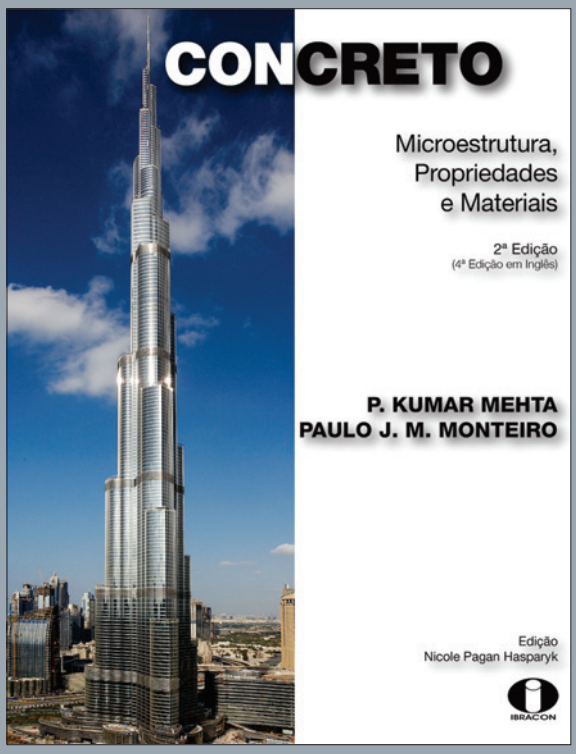
→ **Editora** IBRACON • 4ª edição (inglês) •2ª edição (português)

Guia atualizado e didático sobre as propriedades, comportamento e tecnologia do concreto, a quarta edição do livro "Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais" foi amplamente revisada para trazer os últimos avanços sobre a tecnologia do concreto e para proporcionar em profundidade detalhes científicos sobre este material estrutural mais amplamente utilizado. Cada capítulo é iniciado com uma apresentação geral de seu tema e é finalizado com um teste de conhecimento e um guia para leituras suplementares.

→ **Informações:** www.ibracon.org.br

DADOS TÉCNICOS

ISBN: 978-85-98576-21-3
Edição: 2ª edição
Formato: 18,6 x 23,3cm
Páginas: 782
Acabamento: Capa dura
Ano da publicação: 2014



Patrocínio

CIMENTO NACIONAL · Holcim · LEONARDI · IBRACON

Seminário de **Incêndio em Estruturas**

Foi realizado no último 2 de maio, no Instituto de Engenharia de São Paulo, o Seminário de Incêndio em Estruturas, que discutiu os recentes casos de incêndios em estruturas de concreto, abordando seus efeitos e formas de mitigação.

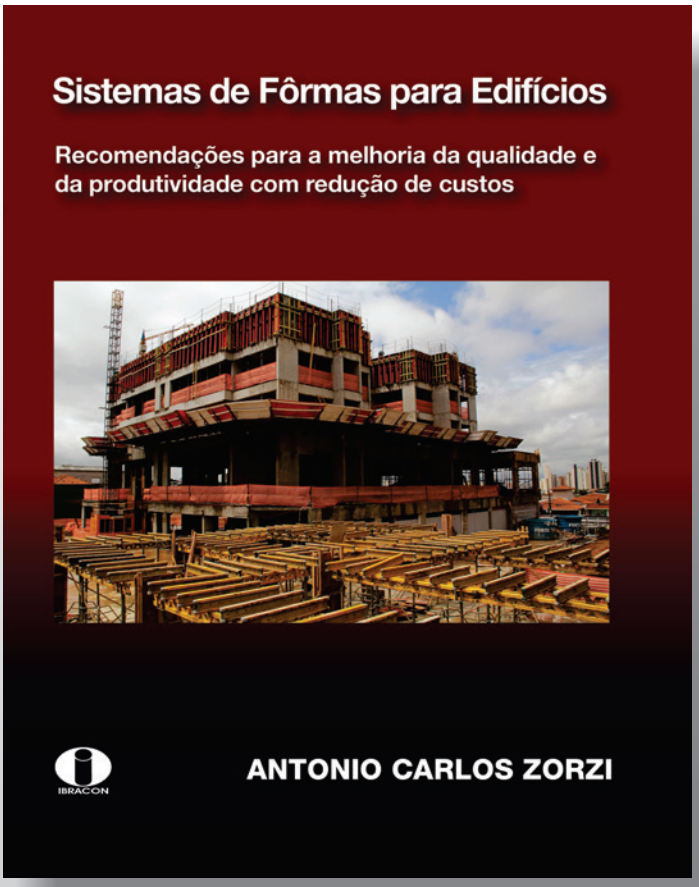
O presidente do IBRACON, Eng. Julio Timerman, apresentou o diagnóstico e recuperação estrutural do Edifício Comércio e Indústria, prédio da 25 de março, na cidade de São Paulo. Já, o Eng. Carlos Britez mostrou a resiliência deste prédio ao pegar por três dias.

Já, o vice-presidente do IBRACON, Prof. Paulo Helene, buscou explicar o colapso do edifício no Largo Paissandu, na cidade de São Paulo, em 2018.

20º Seminário **Tecnologia de Sistemas Prediais**

O Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo, por meio de seu Comitê de Tecnologia e Qualidade (CTQ), realizou a 20ª edição do Seminário de Tecnologia de Sistemas Prediais, no dia 11 de junho, no Centro de Convenções Milenium (Rua Dr. Bacelar, 1043). O evento será em formato híbrido.

O evento tratou de temas de grande atualidade em torno de projeto, tecnologia, inovação, segurança, sustentabilidade e uso e operação dos sistemas prediais nas edificações.



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
PERI®

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

Prática Recomendada sobre **pavimento urbano de concreto permeável**

O Comitê IBRACON de Pavimentos de Concreto (CT 306) acaba de lançar a Prática Recomendada "Pavimento Urbano de Concreto Permeável moldado in loco".

Caracterizado por sua elevada porosidade, decorrente de vazios que criam uma rede de poros interconectados que permite a água percolar pelo pavimento, o concreto permeável é a solução para mitigação de problemas urbanos como ilhas de calor, drenagem urbana e maior qualidade da água escoada e infiltrada para rios e lençóis freáticos.

Este tipo de concreto possui uma série de particularidades quanto à dosagem e parâmetros mecânicos e hidráulicos.

A Prática reúne informações provenientes de pesquisas desenvolvidas no Brasil capazes de fornecer orientações sobre seleção de materiais, procedimentos de dosagem, projeto, construção e manutenção de pavimentos urbanos de concreto permeável.

Seu objetivo é auxiliar engenheiros, arquitetos e urbanistas no desenvolvimento de projetos urbanos e de políticas públicas para cidades sustentáveis.

Adquira o seu na Loja Virtual do IBRACON: www.ibracon.org.br

Livro

CONCRETO: Ciência e Tecnologia

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

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

ISBN / ISSN: 978-65-89675-00-6
Edição: 3ª edição
Páginas: 2055
Formato: 15,7 x 23cm
Acabamento: capa dura
Ano de Publicação: 2022

Coordenadores: Bernardo Tutikian
Fernanda Pacheco
Geraldo Isaía e
Inês Battagin

29º Encontro Regional **do IBRACON-PA**

A Regional do Pará realizou seu Encontro Regional de 26 a 28 de Junho, na Universidade Federal do Pará, com o tema "Inovações Tecnológicas nas Construções de Concreto"

A programação contou com palestras, workshops, minicursos, concursos estudantis e visitas técnicas. O presidente do IBRACON, Eng. Julio Timerman, e o diretor de relações institucionais. Eng. Maurício Bianchini, palestraram no Encontro, que contou também com palestra do Prof. Paulo Monteiro, da Universidade de Berkeley, nos Estados Unidos. Participaram cerca de 420 pessoas.

SEMPAT no **Rio de Janeiro**

O Seminário de Patologia das Construções foi realizado no último dia 8 de maio, no campus Maracanã, da Universidade Estadual do Rio de Janeiro.

Realizado pela Associação Brasileira de Patologia das Construção (Alconpat Brasil), o seminário abordou a durabilidade das estruturas de concreto.

O vice-presidente do IBRACON, Prof. Enio Pazini Figueiredo, foi um dos palestrantes, juntamente com o diretor do Parque Tecnológico da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Prof. Romildo Dias Toledo Filho, e o diretor técnico da Holanda Engenharia, Raphael Holanda.

VIII Workshop **IBRACON-RN**

A Regional do Rio Grande do Norte realizará a oitava edição de seu workshop no dia 5 de julho, no auditório do CREA-RN.

O evento contará com palestras do vice-presidente do IBRACON, Prof. Paulo Helene, sobre segurança e sustentabilidade no projeto de estruturas de concreto, e do diretor regional, Eng. Martins Jr., sobre as práticas para produção de concreto nível 1 em parques eólicos.

SEMPAT no **Mato Grosso do Sul**

O Seminário de Patologia das Construções foi realizado no último dia 23 de maio, no complexo multiuso da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, com o tema "Desempenho das estruturas de concreto armado".

Palestraram os professores Andrés (Deformação em vigas de concreto armado: aspectos dos agregados locais), Sidiclei (Concreto com propriedades cicatrizantes para contenção de umidade) e Enio Pazini (Durabilidade, vida útil e custo das estruturas de concreto).

O evento contou com 140 inscritos.

Conecta **2024**

A Regional de Santa Catarina realizou o primeiro evento da série Conecta 2024, o Seminário Pavimento Urbano de Concreto (PUC), no dia 9 de maio último, no auditório do CREA-SC.

O Seminário foi composto pelas palestras dos engenheriso Álvaro Barbosa Júnior, da ABESC (PUC: solução sustentável, econômica e durável), Dejalma Frasson Júnior, da ABCP (Conceitos e aplicações do pavimento de concreto), Carlos Bassamino, da Concrefiber (Execução do PUC), Holger Schmidt, da MC Bauchemie (Aditivos e cura química para pavimentos de concreto), Cleiton Coelho, da Max Mohr (Tecnologia aplicada ao PUC).

Participaram 96 profissionais.

Curso de técnicas **de reparo e reforço**

A Regional no Rio de Janeiro realizou o curso "Técnicas de reparo e reforço de estruturas de concreto", com o instrutor Prof. Bernardo Tutikian, no Clube de Engenharia, nos dias 14, 15 e 16 de março.

O curso foi realizado pela parceria entre a Exemplo Engenharia e o IDD.

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

IBRACON

65º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO

22 a 25 - outubro - 2024 - Alagoas - Maceió

Participe do maior evento nacional técnico-científico sobre o Concreto

PATROCÍNIO E EXPOSIÇÃO

- Estreite relacionamentos na Feira Brasileira da Construção em Concreto
- Associe sua marca a um evento do setor com mais de 50 anos
- Apresente seus cases no Seminário de Novas Tecnologias

PROGRAMAÇÃO

- Conferências plenárias
- Seminários temáticos
- Sessões técnico-científicas
- Cursos de atualização profissional
- Concursos estudantis

Inscrições on-line e promocionais até 20 de Agosto

IBRACON

MAIS INFORMAÇÕES

www.ibracon.org.br ibracon_oficial ibraconOffice ibraconOffice office@ibracon.org.br

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