

Impactos da incorporação de aditivos no desempenho do concreto industrializado

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

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

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

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

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

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



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

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

ADITIVOS INCORPORADORES DE AR

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Foi somente nas décadas de 1950 e

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

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

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

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

concretos celulares, ampliando seu espaço de aplicação.

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

ADITIVOS REDUTORES DE ÁGUA

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

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

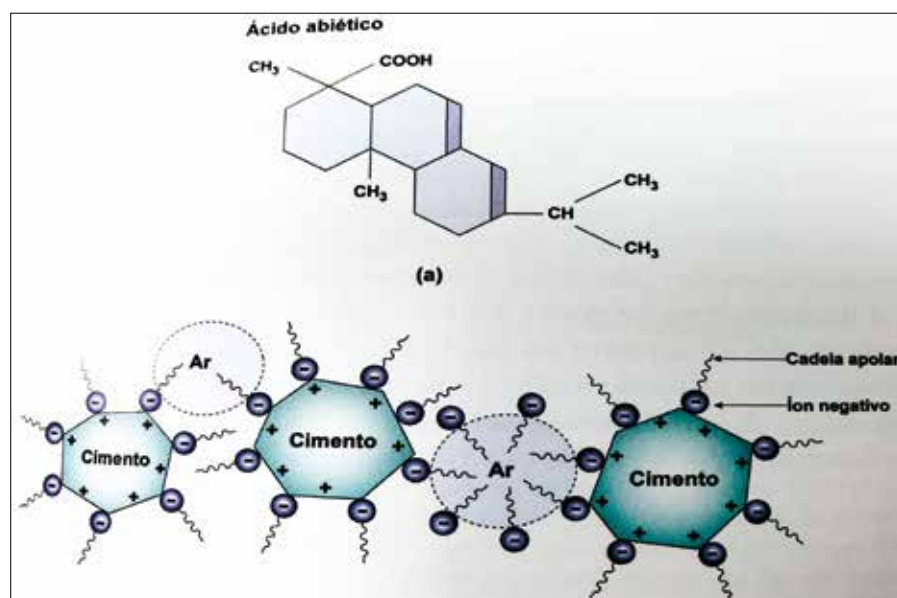


Ilustração da estrutura típica de um surfactante incorporador de ar derivado de óleo de pinho e de seu mecanismo de ação ao ser adicionado ao cimento. **Fonte:** Mehta e Monteiro (2014)

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

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

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

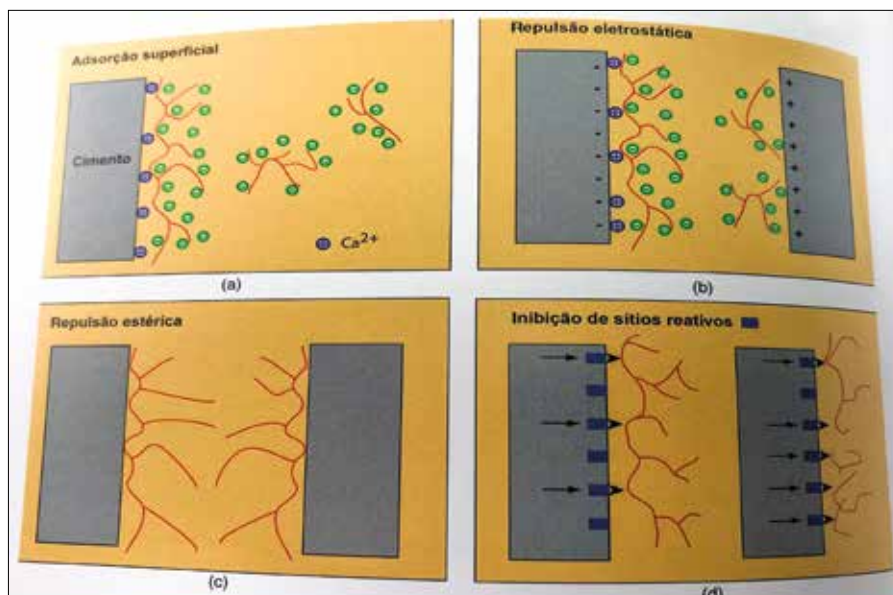


Ilustração esquemática de mecanismos por meio dos quais os plastificantes (a, b) e superplastificantes (c, d) podem dispersar partículas de cimento na mistura de concreto.

Fonte: Mehta e Monteiro (2014)

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

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

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

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

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

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

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



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

Crédito: Banco de Imagens da ABCIC

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



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

Fonte: Altheman *et al.* (2023)



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

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

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

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

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

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

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

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

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



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

Crédito: Banco de Imagens da ABCIC



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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