

# RUMO AO CONCRETO DO AMANHÃ

CONCRETO AUTOCICATRIZANTE 'ENGENHEIRADO' COM CIMENTO DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO ATIVADO POR ADITIVO CRISTALINO (PRAH 4G)

POR EMILIO M. TAKAGI – MESTRE E GERENTE DE PRODUTO – INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA (ITA) / MC-BAUCHEMIE BRASIL

MARYANGELA G. LIMA – PROFESSORA DOUTORA DEPARTAMENTO DE INFRAESTRUTURA AERONÁUTICA DO INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA (ITA)

PAULO HELENE – PROFESSOR TITULAR E DIRETOR DEPARTAMENTO DE CONSTRUÇÃO CIVIL DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO / PHD ENGENHARIA

RONALDO A. MEDEIROS-JUNIOR – PROFESSOR DOUTOR – DEPARTAMENTO DE CONSTRUÇÃO CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ (UFPR)

## 1 – INTRODUÇÃO

Na última década, uma grande quantidade de artigos de pesquisa dedicou-se a autocicatrização autônoma “engenheirada”, em diferentes direções de investigação: como a autocicatrização com reforço de fibras, bactéria produtora de minerais, polímero superabsorvente, agente cicatrizante contido em cápsulas, e a adição do aditivo cristalino (PRAH 4G). No último caso, o PRAH em sua quarta geração, pertence a uma categoria de aditivos impermeabilizantes redutores da porosidade do concreto, disponível e amplamente empregada como tal no mercado de produtos químicos da construção, e classificado como *Permeability-Reducing Admixtures exposed to Hydrostatic conditions* (PRAH) de acordo com a recomendação técnica americana ACI 212.3R-10 “Relatório sobre Aditivos Químicos para Concreto” [1].

O consenso alcançado sobre o concreto autocicatrizante (CAC), entre a comunidade internacional, resultou no relatório de estado-da-arte da RILEM “Fenômeno de autocicatrização em materiais à base de cimento” publicado pelo comitê técnico 221-SHC criado em 2005. Distingue-se o mecanismo da colmatação “autógena”

(ou natural) como sendo o fechamento de fissuras devido ao próprio material componente do concreto; e a autocicatrização “autônoma” (ou de engenharia) como sendo o selamento de fissuras e a restauração de propriedades mecânicas e de permeabilidade devido tanto ao próprio material componente do concreto, e principalmente quanto de alguma adição “de engenharia”, como o cimento de escória de alto forno (EAF), sílica ativa (SA) e o PRAH [2].

O fenômeno da colmatação autógena de fissuras em concreto, já teria sido reportado pela Academia Francesa de Ciências desde 1836, e atribuída à transformação do hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) em cristais de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) como consequência da sua exposição ao dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) na atmosfera. Mais tarde, também foram observadas muitas fissuras cicatrizadas preenchidas com cristais de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), de etringita ( $\text{C}_6\text{ASH}_{32}$ ) e de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) devido ao mecanismo da autocicatrização por hidratação contínua de partículas não hidratadas de cimento e adições minerais, como cinzas volantes (CV) e escória de alto forno (EAF) residuais [3].



EMILIO M. TAKAGI



MARYANGELA G. LIMA



PAULO HELENE



RONALDO A. MEDEIROS-JUNIOR

Este artigo apresenta os resultados da autocicatrização “engenheirada” de três cimentos comerciais brasileiros CPIII, CP II-E e CPV com diferentes percentagens de EAF, com teores decrescente de 55%, 34% e 0% respectivamente, e ativado com o PRAH. Os corpos-de-prova foram carregados em compressão com 90% da sua carga de ruptura, a fim de gerar uma rede de microfissuras. Essas amostras foram posteriormente imersas em água saturada com cal para desencadear o mecanismo de autocicatrização, seguidas de vários testes após 28, 56 e 84 dias. Foi observada uma autocicatrização mais evidente nas amostras de cimento CPIII (55% de EAF) contendo o PRAH, e apesar de indicar uma inversão, maior autocicatrização nas amostras com cimento CPV (0% de EAF) comparados ao CP II-E (34% de EAF), evidenciando que as reações de autocicatrização não são função do simples aumento do teor de EAF, e que estas reações de autocicatrização são muito mais complexas [4].

Diferentes abordagens têm sido desenvolvidas para estudar um novo tipo de concreto que têm a capacidade para reparar fissuras passivas com abertura de até 0,4 mm. Dentre essas abordagens, o concreto autocicatrizante “engenheirado” possui uma capacidade de autocicatrização autônoma que potencializa o mecanismo de colmatação natural do concreto através da dosagem de um PRAH que ativa os componentes presentes na dosagem do concreto, como os cimentos e as adições mineiras. Este artigo aborda o uso do PRAH, geralmente indicado como aditivo impermeabilizante redutor de permeabilidade, adaptado como agente promotor da autocicatrização “engenheirada” do concreto.

## 2 – REFERÊNCIAS DE CONCRETO AUTOCICATRIZANTE NO BRASIL

Este artigo apresenta o desenvolvimento no Brasil da tecnologia de concreto autocicatrizante pela abordagem autônoma ou “de engenharia”. Concretos autocicatrizantes foram utilizados recentemente na laje de subpressão do Museu

da Imagem e do Som (M.I.S.) em Copacabana [5], na Cobertura Fluida do Museu de Arte do Rio (M.A.R.) no centro da cidade do Rio de Janeiro [6] e também na laje de subpressão de condomínio no Setor Nordeste em Brasília [7].

Os engenheiros BRITZ e HELENE apresentaram os desafios da nova sede do M.I.S., envolvidos na concretagem de uma laje de subpressão estanque em concreto armado, com 1,0 m de espessura, volume de 1.200 m<sup>3</sup> e taxa de armadura de aço de 105 kg/m<sup>3</sup>, situada a 50 m da orla marítima e vinculado à classe de agressividade IV. O traço do concreto com propriedades autocicatrizantes possuía um consumo por m<sup>3</sup> de 448 kg de cimento CPIII 40 RS, adição de 30 kg de SA e 4,5 kg de PRAH concentrado. O PRAH concentrado foi dosado no teor de 1,0% sobre o peso do cimento CPIII 40 RS. A relação água/aglomerante foi de 0,35, onde 100% da água de amassamento foi substituída por gelo (130 kg de gelo em cubos à -10°C + umidade de 5% da areia), e todos os concretos dos caminhões foram lançados em temperaturas entre 20°C a 25°C. Os resultados demonstraram que a composição do concreto, o plano de concretagem e os procedimentos executivos empregados foram decisivos para promover uma estrutura íntegra e com propriedades estanques, bem como algumas engenhosidades empregadas na construção dessa laje do M.I.S., dispensando, nesse caso, alternativas tradicionais e convencionais de impermeabilização [5].

Para o traço do concreto da Cobertura Fluida do M.A.R., os engenheiros ALMEIDA e CORRÊA especificaram uma composição de concreto com relação água/aglomerante 0,45 (189 litros de água) e com consumo por m<sup>3</sup> de 391 kg de cimento CPIII 40 RS, adição de 30 kg de SA, 8,0 kg de PRAH e 600 g de fibras de polipropileno (PP). O PRAH, na versão normal, foi dosado no teor de 2,0 % sobre o peso do cimento CPIII-40 RS. Esta cobertura com 800 t de peso próprio, possui as dimensões de 66 m de comprimento e 25 m de largura (1.700 m<sup>2</sup>). A laje foi calculada com uma taxa de armadura muito alta de 310 kg/m<sup>3</sup>, para apresentar um comportamento estrutural como uma casca de concreto, e possui a forma de uma onda com desníveis de até 1,75 m e gera uma impressão de fluidez com

diferentes espessuras (predominantemente de 15 cm), “flutuando” a cerca de 30 m de altura apoiada em 37 tubos de aço galvanizado. A concretagem da laje foi executada em apenas um dia, com uma concretagem ininterrupta de 13 horas, para evitar que a cobertura apresentasse junta fria de concretagem. Na concretagem dos 320 m<sup>3</sup> de concreto, 80% da água foi substituída por gelo, todos os concretos dos caminhões foram lançados em temperaturas entre 16°C a 21°C, com a trabalhabilidade necessária e retardando a pega, evitando ao máximo a fissuração. O maior desafio foi a preparação da fôrma desta cobertura fluida que foi moldada com peças com 6 m por 8 m de isopor EPS e em torno de 800 kg, pelo responsável da Festa do Boi Garantido em Parintins - AM [6].

A engenheira SILVA apresenta um estudo de caso de uma concretagem de uma laje de subpressão executado, em 3 etapas com um intervalo de 1 mês entre eles, em um condomínio misto de uso residencial e comercial, localizado no Setor Nordeste de Brasília. A laje com 2.500 m<sup>3</sup> em concreto armado com 30 cm de espessura, volume de 750 m<sup>3</sup>, possui uma taxa de armadura de 96 kg/m<sup>3</sup> em conjunto com 450 g de fibras de PP para cada m<sup>3</sup>. Foram dosados 3.000 kg de PRAH concentrado ao volume total do concreto da laje no teor de 0,8% sobre o peso de cimento CPIII-40 RS com consumo de 380 kg/m<sup>3</sup> e relação água/cimento de 0,45. O maior desafio na execução desta laje de subpressão foi a necessidade da estanqueidade do sistema com uma especificidade de projeto que não permitiria a instalação permanente de bombas de recalque da água do lençol freático por razões ambientais do entorno [7].

## 3 – A QUÍMICA DO CIMENTO DE EAF E DO PRAH NA AUTOCICATRIZAÇÃO

Em comum, as 3 obras utilizam o cimento de EAF (CPIII 40 RS) e o PRAH para a dosagem do concreto autocicatrizante “engenheirado”. Portanto, os seguintes mecanismos devem ser considerados para uma dosagem “engenheirada” de um concreto autocicatrizante robusto [4]:

- a) Mecanismo de hidratação contínua com o uso de cimento CPIII 40 RS

composto por grandes quantidades de EAF. A incorporação neste cimento de EAF com sílica ativa (SA) em teores maiores que 6% otimiza este mecanismo,

b) Mecanismo químico de cicatrização com a adição de PRAH para provocar um efeito de dissolução e recristalização de subprodutos da hidratação do cimento em formações cristalinas mais estáveis dentro das fissuras do concreto, e

c) Mecanismo de restrição da abertura da fissura utilizando uma taxa de armadura adequada e/ou com a adição de fibras dúcteis, para reforçar a matriz de cimento, de polipropileno corrugadas (PP), de vidro (resistente à álcalis) e de resina poval (álcool de polivinila).

Nos últimos anos tem havido uma tendência para usar mais cimentos Portland compostos em vez de puros. Enquanto que as escórias de alto forno dos cimentos CPII-E e CPIII são aglomerantes hidráulicos, as cinzas volantes dos cimentos CPII-Z e CPIV são materiais pozolânicos, cujo principal efeito depende do volume de CH disponível para a reação pozolânica. Cimentos de escória de alto forno têm uma resistência à penetração de cloretos mais alta que a do cimento de cinzas volantes CPII-Z e CPIV, pela formação substancialmente maior de gel de C-S-H que possui a capacidade de adsorção física dos cloretos penetrantes. A literatura refere-se com frequência ao efeito benéfico do aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) no cimento CPV, por fixar quimicamente os cloretos penetrantes.

A pesquisa de DE BELIE *et al.* demonstra que os produtos de hidratação dos grãos de cimento Portland e dos cimentos de EAF são praticamente os mesmos, exceto pelas menores quantidades de cristais de hidróxido de cálcio (CH) nos cimentos com teores mais elevados de EAF e, portanto, este concreto possui uma estrutura de poros mais refinada com uma menor quantidade de CH, o que pode,

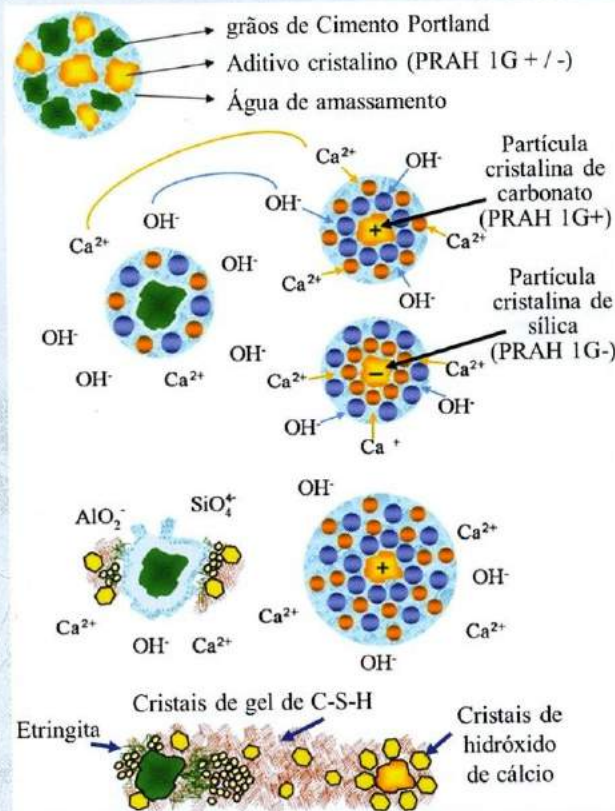


FIG. 1 - DIAGRAMA TRADUZIDO DE RAHAL ET AL (2012) DA HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND ESTIMULADO POR PARTICULAS CRISTALINAS DE SÍLICA (PRAH 1G NEGATIVO) E DE CARBONATO (PRAH 1G POSITIVO)

por consequência, contribuir para a sua maior resistência química [8].

Em investigações posteriores das capacidades de autocicatrização de compósitos cimentícios incorporando diferentes materiais suplementares cimentícios, como as cinzas volantes (CV) e as EAFs, SAHMARAN *et al.* observaram que a cicatrização foi mais evidente nas amostras que utilizavam a EAF [9]. Além disso, a elevada área específica da superfície dos grãos da EAF fornece mais locais de nucleação, bem como os íons  $OH^-$  e álcalis para o fluido dos poros quando a EAF necessita ser ativada [10].

#### 4 - A EVOLUÇÃO DA QUÍMICA DO PRAH NA REAÇÃO DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO

O PRAH consiste em uma mistura de cimento, areia e partículas cristalinas ativas de sílica e de carbonato. As partículas ampliadas em microscopia eletrônica de varredura (SEM) têm forma irregulares e tamanho na faixa de cerca de 1 a 20  $\mu m$ , e sua morfologia é semelhante à dos grãos

de cimento. A análise de espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS) confirma a presença de cálcio, oxigênio, silício, magnésio, alumínio e potássio. Este espectro é comparável ao de um cimento Portland comum, com exceção do pico de enxofre levemente maior [11].

Inicialmente, a primeira geração do PRAH (1G) mineral eram partículas cristalinas muito finas, hidraulicamente inativas e não pozolânicas, de sílica (teor de  $SiO_2$  cristalina maior que 99% e superfície específica Blaine de 4.000  $cm^2/g$ ) e de carbonato (teor de  $CaCO_3$  cristalino maior que 95% e Blaine de 3.500  $cm^2/g$ ), e eram utilizados apenas como fillers na necessidade de controlar a exsudação em concretos com baixo consumo de cimento. Estudos mostraram que estas partículas cristalinas de sílica e carbonato possuem muitas propriedades físicas e químicas que são surpreendentemente semelhantes a química dos "argilominerais". Ambas as partículas cristalinas de sílica

(PRAH 1G com carga eletrostática negativa) e de carbonato (PRAH 1G com carga eletrostática positiva) estimulam diretamente as reações de hidratação, por constituírem centros de nucleação para o hidróxido de cálcio (CH) agindo como "cristais-semente". O resultado é uma camada dupla difusa de íons mais comprimida sobre o PRAH-1G, devido ao aumento do potencial Zeta das cargas eletrostáticas de íons positivos ( $Ca^{2+}$ ) e íons negativos ( $OH^-$ ) originadas da hidratação do grão de cimento Portland e adquiridas pelas partículas conforme a hidratação avança, com o consequente aumento da floculação e aumento da taxa de precipitação de cristais de portlandita (CH), gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e das fases etringita (AFt) e monossulfato-aluminato (AFm), conforme diagrama traduzido de RAHAL (2012) e mostrado na Figura 1 [12].

A segunda geração do PRAH (2G) avança com a intercalação de ácidos carboxílicos ( $-COOH^-$ ) sobre a camada dupla difusa de nuvens de íons positivo ( $Ca^{2+}$ ) e íons negativo ( $OH^-$ ) em torno da estrutura dos

PRAH 1G, resultando em um aumento significativo do potencial Zeta das cargas eletrostáticas, que fazem com que a capacidade de dupla troca catiônica, entre seus íons intercalar de cálcio ( $Ca^{2+}$ ) por íons de sódio ( $Na^+$ ) ou potássio ( $K^+$ ), seja mais versátil e facilmente obtida, proporcionando ao PRAH 2G uma maior capacidade "quelante" para a cristalização, e também um maior poder de dispersão da partícula do PRAH 2G através das porosidades do concreto. Neste processo, o PRAH 2G precipita uma reação química para provocar um efeito de dissolução e recristalização dos subprodutos da hidratação do cimento, formando uma nova estrutura de cristais não solúveis de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), etringita ( $C_6ASH_{32}$ ) e carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ), profundamente nas fissuras e porosidades do concreto, conforme Figura 2.

A partícula cristalina de carbonato mais porosa (PRAH 1G+) é impregnada com uma solução de sais de flúor, fósforo e magnésio. Com a presença de umidade, os sais de flúor difundem-se na matriz fissurada para formar íons fluoreto. Estes íons reagem com produtos da hidratação C-S-H e CH e da carbonatação ( $CaCO_3$ ) para formações amorfas mais estáveis, análogas à *apatita* ( $CaF_2$ ), resultando em uma matriz mais densa e mais resistente à ácidos dentro de uma faixa de pH entre 3 a 11, e cristais análogos à *enstatita*

( $MgSiO_3$ ) que são bastante estáveis em larga faixa de temperatura permanente a partir de  $-32^\circ C$  até  $+130^\circ C$ , e suportando picos de até  $1.530^\circ C$ . Esta estrutura cristalina integral preenche profundamente os poros e as fissuras, tornando o concreto impermeável e protegido quimicamente. Agentes de cura química à base de fluorossilicatos de magnésio ( $MgSiF_6$ ) e ácido málico ( $C_4H_6O_5$  com duas terminações  $-COOH$ ) são utilizados para acelerar o processo de cristalização e também como inibidores de evaporação, pois cada molécula de  $MgSiF_6$  retém 300 moléculas de água [13].

A terceira geração do PRAH (3G), incorpora agentes químicos expansores a base de sulfoaluminato de cálcio (CSA) ao PRAH 2G, de modo a obter uma capacidade aprimorada de aut cicatrização "engenheirada" para fissuras com aberturas maiores que 0,3 mm e podendo chegar até 0,5 mm. SISOMPHON *et al.* relataram que uma fissura com uma abertura de até 0,4 mm pode ser completamente selada dentro de 28 a 56 dias. Produtos de cicatrização no interior das fissuras foram analisados usando microscópio eletrônico de varredura ambiental (ESEM) equipados com EDS. Os resultados da análise química mostraram que os produtos de aut cicatrização são compostos por  $CaCO_3$ , C-S-H e etringita. A proporção dos compostos minerais cicatrizados depende da condição de exposição na cura e do

tipo de materiais cimentícios utilizados. Condições de exposições de cura em ciclos úmidos / secos mostraram a melhor recuperação mecânica, enquanto que a condição de cura somente aérea não contribuiu com um fenômeno visível de cicatrização [14].

Estruturas expostas a meios aquosos agressivos, que contêm microorganismos, podem sofrer deterioração na matriz de cimento com a produção de ácidos biogênicos agressivos, e também através da formação de um biofilme na superfície, mas esses fenômenos de corrosão induzida por microorganismos (MIC) ainda não foram completamente compreendidos. A quarta geração do PRAH (4G), adiciona propriedades antimicrobianas ao PRAH 3G, que através de um mecanismo eletrofísico baseado em uma nova química de "organosilano", o PRAH 4G se liga de forma molecular aos produtos de hidratação de cimento, e rompe a membrana celular de bactérias aeróbicas (*Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus*) e anaeróbicas (*Thiobacillus novellus* e *Thiobacillus concretivorus*), cuja eficácia pode ser comprovada através da metodologia modificada ISO 22.196 "Medição da atividade antibacteriana em plásticos e outras superfícies não porosas". A formação deste biofilme sobre o concreto aut cicatrizante do PRAH 4G antimicrobiano pode atuar como uma camada protetora contra a deterioração biológica [15]. Antes do encerramento do comitê técnico 221-SHC "Fenômenos de aut cicatrização em materiais à base de cimento", foi criado em 2013, o comitê técnico 253-MCI da RILEM "Interações entre microorganismos e materiais à base de cimento", para preencher a lacuna do conhecimento da interação das bactérias com os concretos aut cicatrizantes, e o estudo da bioreceptividade dos biofilmes formados sobre este tipo de concreto.

Os PRAHs 3G são disponíveis no mercado brasileiro em duas versões: a versão normal que é dosada a 2,0 % sobre o peso de cimento (s.p.c.); e a versão mais concentrada que é empregada com a metade da dosagem, entre 0,8 a 1,0 % s.p.c. do traço do concreto. Os PRAHs 4G são disponíveis somente na versão concentrada que é empregada com a dosagem de 1,0 % s.p.c. do traço do concreto. Os PRAHs 3G podem ser fornecidos em embalagens de sacos

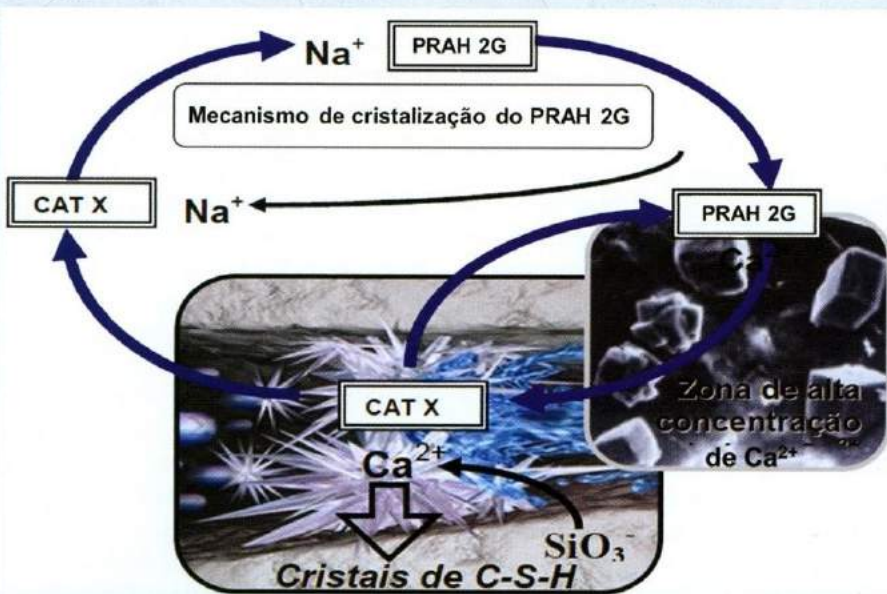


FIG. 2 – MECANISMO QUELANTE DO PRAH 2G-DE CRISTALIZAÇÃO E DE DISPERSÃO QUE PROVOCA UM EFEITO DE DISSOLUÇÃO E RECRISTALIZAÇÃO DOS SUBPRODUTOS DA HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PROFUNDAMENTE NAS FISSURAS E POROSIDADES DO CONCRETO

hidrossolúveis para facilitar e minimizar os riscos de erros na dosagem dos caminhões-betoneira na usina ou no canteiro de obra. Pigmentos fotocromáticos, que mudam de cor de forma reversível quando expostos aos raios ultravioletas ou luz negra, podem ser adicionados ao PRAH como uma forma de verificação e validação do plano de concretagem na obra, de modo a ser visível à distância, que a água de exsudação do concreto aditivado com PRAH apresenta uma coloração amarelo neon fluorescente. Procedimentos de controle de qualidade recomendados em obra para a aceitação e conformidade do concreto autocicatrizante “engenheirado” devem ser conduzidos seguindo os requisitos técnicos da norma ABNT NBR 12.655: 2015.

## 5 – PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste artigo, os ensaios realizados no concreto autocicatrizante (CAC) endurecido foram ensaios para determinar a recuperação mecânica com o ensaio de resistência à compressão axial (RCA), e a redução da permeabilidade com o ensaio de rápido de difusão ao cloreto (ERDC). Amostras de concreto com e sem a adição do PRAH 3G foram ensaiadas, utilizando três tipos de cimentos comerciais brasileiros: CPIII 40RS, CPII E40 e CPV ARI Plus, com teores distintos de EAF nas faixas de 55%, 34% e 0%, respectivamente. Os corpos de prova dos ensaios foram carregados na prensa aos 28 dias com 90% da carga de ruptura de compressão, de modo a gerar uma rede de microfissuras. As amostras fissuradas aos 28 dias foram mergulhadas em água com cal para ativar o mecanismo de cicatrização por mais 56 dias.

### 5.1 – Dosagem, preparação e moldagem do CAC

Seis traços de CAC foram preparados com as composições resumidas na Tabela 1, para todos os três tipos de cimentos, com e sem a adição do PRAH 3G. O consumo total de cimento e a relação água/cimento (a/c) de 0,5 foram mantidos constantes. Um aditivo superplastificante (SP) foi adicionado para conseguir um abatimento inicial de 80 mm; em seguida, um segundo aditivo à base de policarboxilato (PCE) foi adicionado para obter um

TABELA 1 – TRAÇO DO CAC (COMPOSIÇÃO EM KG/M³)

INGREDIENTES	QUANTIDADES	NOTA
Água	196 kg	Relação a/c = 0.5
Cimento	392 kg	CPIII / CPII-E / CPV
Aditivo cristalino (PRAH 3G)	10 kg (normal)	2.5% sobre o peso de cimento
Areia de quartzo	573 kg	70% do agregado miúdo
Areia artificial	246 kg	30% do agregado miúdo
Pedrisco 9,5 mm	651 kg	70% do agregado graúdo
Brita 1 25 mm	279 kg	30% do agregado graúdo
Superplastificante SP	2,4 ~ 3,2 kg	0,6 ~ 0,8% sobre o peso de cimento
Superplastificante PCE	4,0 kg	1,0% sobre o peso de cimento
Modificador de viscosidade	2,0 kg	0,5% sobre o peso de cimento
Fibra de vidro AR	0,9 kg	Resistente à álcalis - 12 mm

espalhamento em torno de 700 mm para todas as misturas.

A inspeção visual de concreto fresco não detectou qualquer segregação ou exsudação em qualquer uma das misturas durante os testes. Para cada uma das misturas de concreto, foram preparados corpos de prova cilíndricos de Ø100mm x 200mm para os ensaios mecânicos. Para os ensaios de permeabilidade, os corpos de prova cilíndricos foram serrados em fatias com espessuras de 50mm, e as duas fatias médias de cada amostra foram utilizadas para os ensaios.

### 5.2 – Recuperação da propriedade mecânica

Os resultados do ensaio de RCA de cada uma das misturas foram determinados antes dos 28 dias e após o pré-carregamento

de 90% da carga de ruptura, para, em seguida, sobrecarregá-las até a ruptura conforme a Figura 1. As amostras restantes foram pré-carregadas com 90% da carga de ruptura correspondente e foram, então, subsequentemente armazenadas em água saturada de cal a  $23 \pm 2$  °C, durante um período adicional de 28 dias e 56 dias. Nas amostras aditivadas com o PRAH 3G, à medida que o teor de EAF aumenta, houve um aumento significativo nas propriedades de recuperação mecânica e de redução da permeabilidade. Portanto, observa-se também que as amostras com EAF ativados com PRAH 3G são menos afetadas pelos efeitos dos carregamentos mecânicos.

### 5.3 – Redução da permeabilidade

O ensaio de rápido de difusão ao cloreto (ERDC) permite a comparação da

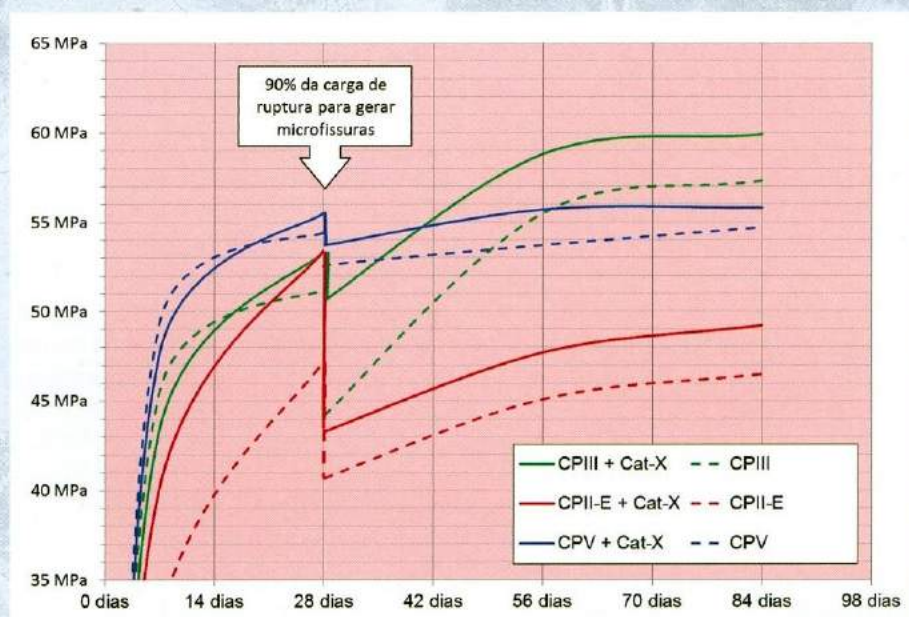


FIG. 3 – COMPORTAMENTO DA RCA DEVIDO À FISSURAÇÃO E AO EFEITO CICATRIZANTE

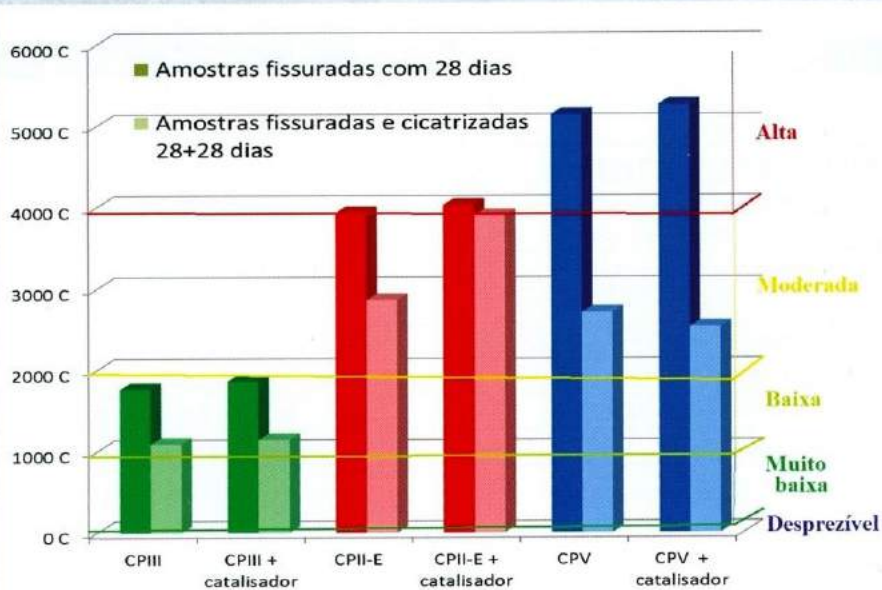


FIG. 4 – REDUÇÃO PERCENTUAL DA MIGRAÇÃO DE CLORETOS COMPARANDO OS 3 CIMENTOS

resistividade do concreto das amostras fissurada aos 28 dias com as amostras fissuradas e cicatrizadas por 56 dias para todas as misturas (Figura 2). Este valor, determinado em coulombs, está relacionado com a capacidade do concreto para resistir à penetração de íons cloreto através das amostras. A recuperação da propriedade de estanqueidade indica uma maior cicatrização nas amostras com cimento CIII, CPV e CII-E, respectivamente.

## 6 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 – Corpos de prova fissurados e não cicatrizados

Os corpos de prova fissurados foram ensaiados imediatamente após o pré-carregamento, e considera-se que não houve tempo de passar por qualquer cicatrização da fissura. Os resultados na Tabela 3 mostram que, para as amostras não cicatrizadas, a RCA e o ERDC foram influenciados pela adição do PRAH 3G e pelo teor de EAF no cimento comercial CII (34%) e CIII (55%).

### 6.2 – Efeitos da autocicatrização

O PRAH 3G influencia na melhora dos valores de RCA das amostras fissuradas e cicatrizadas em 5,9% no CIII, 5,8% no CII e 3,7% no CPV comparados ao valor de 28 dias. No ensaio ERDC, os valores foram reduzidos em 7,2% no CIII, em

3,6% no CII e em 7,8% no CPV. Estes valores mostram que o efeito de autocicatrização depende do tipo de materiais de cimento utilizado, o teor de EAF e da adição de PRAH 3G. Conclusões semelhantes também podem ser feitas para o ERDC. No entanto, deve notar-se que, comparando os resultados entre as Tabelas 3 e 4, os efeitos de autocicatrização se tornam mais visíveis. A quantidade na redução dos valores de TRPC foi de 52% para 49% no CPV, de 38% para 37% no CIII e de 21% para 20% no CII-E.

O principal mecanismo da autocicatrização autógena de uma fissura é a produção de cristais de silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Durante a hidratação do cimento, alguns grãos de cimento que contêm alita (C3S) e belita (C2S) não reagem completamente, resultando em partículas com núcleos não hidratados, envolvidos em materiais hidratados de C-S-H e de portlandita (CH).

Durante a fissuração, estas partículas encapsuladas são naturalmente expostas e começam a hidratar quando entram em contato com a água, o que provoca uma expansão volumétrica capaz de preencher completamente microfissuras.

A hidratação contínua do cimento não reagido é o mecanismo presente nos traços com cimento CPV. A reação hidráulica latente também pode ser outro mecanismo para fornecer um grau significativo de capacidade de autocicatrização para os traços com cimento que contenham

adições de escórias de alto forno (EAF) como o CII-E (34%) e CIII (55%).

Em ambientes alcalinos, nas amostras aditivadas com o PRAH, à medida que o teor de EAF aumenta, as espécies de silicatos podem dissolver-se do EAF para criar ácido silícico ( $H_4SiO_4$ ), que pode reagir com o CH dissolvido, cujo resultado são cristais de C-S-H, provocando um aumento significativo nas propriedades de recuperação mecânica e de redução da permeabilidade. Portanto, observa-se também que as amostras com EAF ativados por PRAH 3G são menos afetadas pelos efeitos dos carregamentos mecânicos.

## 7 – CONCLUSÕES

Neste artigo, foi observada uma autocicatrização mais evidente nas amostras de cimento CIII contendo o PRAH 3G e indica uma maior autocicatrização nas amostras com cimento CIII, CPV e CII-E, respectivamente. O C-S-H produzido durante a reação hidráulica latente do CIII e do CII-E pode então cicatrizar fissuras finas da mesma maneira que o C-S-H produzido a partir da hidratação de partículas não reagidas do cimento CPV. Como a velocidade da reação hidráulica latente do CIII e do CII-E é função do pH, é substancialmente mais lenta que a hidratação contínua do cimento não reagido do CPV. Portanto, a autocicatrização do cimento CPV se torna mais evidente do que o CII-E nas idades ensaiadas neste artigo.

O desempenho do PRAH com relação a recuperação mecânica, e a redução da permeabilidade varia com o tipo de cimento. Fabricantes recomendam a dosagem do PRAH concentrado em 1% s.p.c. independentemente do tipo de cimento, ou do tipo da adição mineral utilizado na dosagem do traço de concreto. Portanto, o estudo mais aprofundado entre a relação da dosagem do PRAH, o tipo de cimento e o tipo de adição mineral seja interessante para aumentar a durabilidade das estruturas de concreto, uma vez que a vida útil das estruturas pode ser estimada em décadas.

O autor sugere as seguintes dosagens de PRAH 3G ou 4G e o consumo mínimo de cimento, sendo que a Tabela 2 para obras enterradas expostas ao ataque por sulfatos, a Tabela 3 para obras expostas às

Classes de Agressividade Ambiental (CAA) e Tabela 4 para obras especiais, resultando no desenvolvimento da engenharia do

CAC com técnicas que garantam a durabilidade em longo prazo das estruturas de concreto quando submetidos à exposição

contínua de água, a estruturas submetidas a danos mecânicos repetidos, e a ataques químicos de sulfatos e ácidos.

**TABELA 2 – CONCRETO ARMADO ESTRUTURAL DE OBRA ENTERRADA EXPOSTAS AO ATAQUE POR SULFATOS: DOSAGEM DO ADITIVO CRISTALINO SOBRE O PESO DE CIMENTO (S.P.C.) E CONSUMO MÍNIMO DE CIMENTO NO TRAÇO**

Tipo de concreto armado estrutural enterrada	Dosagem do PRAH	Consumo mín. de cimento	Mecanismo de deterioração do concreto	Requisitos técnicos conferidos ao concreto
Fundação direta acima do lençol freático (<0,10% SO <sub>4</sub> ) <sup>a</sup>	0,5 % (s.p.c) do PRAH 3G	>300 kg/m <sup>3</sup> <sup>b</sup> CIII ou CII-E	Ataque fraco de sulfato por difusão e capilaridade	Proteção química à penetração e ataques de sulfatos
Fundação e estaca abaixo do lençol freático (<0,10% SO <sub>4</sub> ) <sup>a</sup>	0,8 % (s.p.c) do PRAH 3G	>350 kg/m <sup>3</sup> <sup>b</sup> CIII ou CII-E	Ataque fraco de sulfato por difusão e pressão hidrostática	Proteção química à penetração e ataques de sulfatos e redução da permeabilidade
Fundação e estaca abaixo do lençol freático (>0,10% SO <sub>4</sub> ) <sup>a</sup>	1,0 % (s.p.c) do PRAH 3G	>400 kg/m <sup>3</sup> <sup>b</sup> CIII ou CII-E	Ataque moderado de sulfato por difusão e pressão hidrostática	Proteção química à sulfatos, redução da permeabilidade, e passivação de armaduras e autocicatrização
Fundação e estaca abaixo do lençol freático (>0,20% SO <sub>4</sub> ) <sup>a</sup>	1,0 % (s.p.c) do PRAH 4G	>400 kg/m <sup>3</sup> <sup>b</sup> CIII ou CII-E +SA (>6% s.p.c.)	Ataque severo de sulfato por difusão e pressão hidrostática (H <sub>2</sub> S > 20 ppm)	Proteção química à sulfatos, passivação da armadura, redução da permeabilidade, autocicatrização e ação antimicrobiana

<sup>a</sup> Classificação fraca, moderada e severa conforme a % em massa de sulfato solúvel em água presente no solo de acordo com a tabela 4 da NBR 12.655:2015 "Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento". 29 p. Para condições severas de agressividade, devem ser obrigatoriamente usados cimentos resistentes a sulfatos

<sup>b</sup> Consumo mínimo de cimento conforme os anexos E.8, F.9, G.8, H.9, I.9, J.9, K.10, L.9 e M.9 da NBR 6122:2010 "Projeto e execução de fundações", 91 p.

**TABELA 3 – CONCRETO ARMADO ESTRUTURAL EXPOSTAS ÀS CLASSE DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL (CAA): DOSAGEM DO ADITIVO CRISTALINO SOBRE O PESO DE CIMENTO (S.P.C.) E CONSUMO MÍNIMO DE CIMENTO NO TRAÇO**

Tipo de concreto armado estrutural enterrada	Dosagem do PRAH	Consumo mín. de cimento	Mecanismo de deterioração do concreto	Requisitos técnicos conferidos ao concreto
Concreto 20 MPa de obra geral (superestrutura) CAA I	-	>260 kg/m <sup>3</sup> <sup>c</sup>	-	-
Concreto 25 MPa de obra geral (superestrutura) CAA II	0,5 % de PRAH 3G	>280 kg/m <sup>3</sup> <sup>c</sup>	Ataque por sulfato por difusão e capilaridade (carbonatação)	Proteção contra penetração e ataques químicos e redução da permeabilidade
Concreto 30 MPa de obra geral (superestrutura) CAA III	0,8 % de PRAH 3G (>3 kg/m <sup>3</sup> )	>320 kg/m <sup>3</sup> <sup>c</sup>	Ataque moderado por sulfato, cloreto por difusão e capilaridade (carbonatação)	Proteção contra penetração e ataques químicos, passivação da armadura e redução da permeabilidade
Concreto 40 MPa de obra industrial em área litorânea (superestrutura) CAA IV	1,0 % de PRAH 3G ou (PRAH 4 G)	>360 kg/m <sup>3</sup> <sup>c</sup>	Ataque intenso por sulfato, cloreto por difusão e capilaridade (biodegradação)	Proteção química, passivação da armadura e redução da permeabilidade e autocicatrização (antimicrobiana)

<sup>c</sup> Consumo mínimo de cimento correspondente a Classe de Agressividade Ambiental (CAA) conforme a Tabela 2 da NBR 12.655:2015

**TABELA 4 – CONCRETO ARMADO ESTRUTURAL DE OBRA ESPECIAIS: DOSAGEM DO ADITIVO CRISTALINO SOBRE O PESO DE CIMENTO (S.P.C.) E CONSUMO MÍNIMO DE CIMENTO NO TRAÇO**

Tipo de concreto armado estrutural enterrada	Dosagem do PRAH	Consumo mín. de cimento	Mecanismo de deterioração do concreto	Requisitos técnicos conferidos ao concreto
Concreto 35 MPa de estrutura hidráulica: cisterna, piscina, reservatório	1,0 % de PRAH 3G	>340 kg/m <sup>3</sup>	Ataque moderado por sulfato, cloreto por difusão e pressão hidrostática (carbonatação)	Proteção contra penetração e ataques químicos, passivação da armadura e redução da permeabilidade
Concreto 40 MPa de infraestrutura de ponte, túnel e barragem	1,0 % de PRAH 3G	>360 kg/m <sup>3</sup> + adição mineral (>6% s.p.c.)	Ataque intenso por sulfato, cloreto por difusão e pressão hidrostática (carbonatação)	Proteção química, passivação da armadura e redução da permeabilidade e autocicatrização
Concreto de laje de subpressão 40 MPa com acabamento polido	1,0 % de PRAH 3G	>360 kg/m <sup>3</sup> CIII + SA (>6% s.p.c.)	Ataque intenso por sulfato, cloreto por difusão e pressão hidrostática (carbonatação)	Proteção química, passivação da armadura e redução da permeabilidade e autocicatrização
Estrutura de saneamento em contato com H <sub>2</sub> S (ácido sulfúrico biogênico)	1,0 % de PRAH 4G	>360 kg/m <sup>3</sup> CIII + SA (>6% s.p.c.)	Corrosão induzida por microorganismos (H <sub>2</sub> S > 20 ppm), ataque por sulfatos e pressão hidrostática	Proteção química, passivação da armadura, redução da permeabilidade, autocicatrização e ação antimicrobiana