

Avaliação da autocicatrização de fissura **em concreto com aditivo autocicatrizante**

RAFAELA S. ECKHARDT - CONSULTORA TÉCNICA - <https://orcid.org/0009-0008-8369-4912> (rafa_eckhardt@hotmail.com) ;

FELIPE PACHECO - COORDENADOR - <https://orcid.org/0000-0002-8152-3035> | **PENETRON**

GUILHERME C. HICKEL - Sócio | **MODULIVE**

JOÃO R. MENDES - Sócio ; **LUCAS DOS S. DE SOUZA** - Sócio | **CIVILTECH**

RESUMO

BUSCANDO-SE UMA MAIOR DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO, PRINCIPALMENTE DAQUELAS EXPOSTAS À UMIDADE, E, CONSEQUENTEMENTE, VISANDO UMA REDUÇÃO DA PEGADA DE CARBONO NAS CONSTRUÇÕES, TEM-SE UTILIZADO EM LARGA ESCALA O ADITIVO AUTOCICATRIZANTE. O CONCRETO ADITIVADO APRESENTA BAIXA PERMEABILIDADE E AUTOCICATRIZA FISSURAS PASSIVAS DE ATÉ 0,5 MM, BLOQUEANDO A ENTRADA DE AGENTES DELETÉRIOS NO INTERIOR DO CONCRETO, PELA FORMAÇÃO CRISTALINA INSOLÚVEL NOS POROS, CAPILARES E FISSURAS. A PROTEÇÃO GERADA POSSIBILITA A REDUÇÃO DE MANUTENÇÃO DAS ESTRUTURAS, POIS AUMENTA A VIDA ÚTIL DO CONCRETO, O QUE REDUZ AS EMISSÕES DE CO₂ EQUIVALENTE DA CONSTRUÇÃO. NESTE ESTUDO FOI MONITORADO O FLUXO D'ÁGUA PASSANTE EM AMOSTRAS DE CONCRETO FISSURADAS COM 0,45 E 0,2 MM, COM E SEM O ADITIVO AUTOCICATRIZANTE, SUBMETIDAS À PRESSÃO DE ÁGUA DE 4 M.C.A. OS RESULTADOS APONTAM A REDUÇÃO DA PERMEABILIDADE E O SELAMENTO DAS FISSURAS AO LONGO DO PERÍODO DE ATIVAÇÃO NAS AMOSTRAS COM O ADITIVO, ILUSTRANDO O DESEMPENHO REFERENTE À DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS TRATADAS.

PALAVRAS-CHAVE: CONCRETO, CRISTALIZAÇÃO, AUTOCICATRIZAÇÃO, IMPERMEABILIZAÇÃO, DURABILIDADE.

1. INTRODUÇÃO

As fissuras em estruturas de concreto são comuns e, segundo Yang, Lepech, Yang e Li (2009), sua formação pode estar vinculada a diversos fatores, tais como: o traço do concreto e consequentemente seu elevado calor de hidratação; à cura inadequada ou a falta dela e con-

sequentemente a retração plástica; às falhas executivas durante a concretagem; à desfôrma precoce; o carregamento mecânico extremo; o contato com o meio ambiente agressivo ou intemperismo ambiental, como sulfatos, cloretos e RAA; o gelo e degelo; e a movimentação térmica, ou seja, podem ocorrer em todas as etapas da obra, por falha de projeto, falha de material, falha de execução, falha de uso.

A principal norma referente ao concreto no país, a NBR 6118, informa as limitações de abertura de fissura, sendo a máxima de 0,4 mm, de acordo com a classe de agressividade do ambiente, porém há um agravante, onde ela informa que, em obra, pode haver eventuais fissuras maiores que as limitações estabelecidas, dados os desvios de obra, o que frisa a frequente presença de fissuração nas obras, inclusive com grandes aberturas.

A presença de tais fissuras é indesejada na estrutura, principalmente naquelas expostas à umidade, pois permitem a entrada acelerada de agentes agressivos para seu interior, o que causa sua deterioração e a corrosão das armaduras de forma precoce, reduzindo a durabilidade das estruturas de concreto e consequentemente aumentando a necessidade de manutenções e reparos.

Sendo assim, uma alternativa estudada por muitos pesquisadores para evitar tal problema é a autocicatrização do concreto, que, segundo Wang, Ding, Zhang e Xu (2023), é um fenômeno antigo, pois o próprio concreto possui características naturais e intrínsecas de selar fissuras de pequena abertura, devido à hidratação

contínua de minerais de clínquer ou à carbonatação de hidróxido de cálcio.

Tittelboom e de Beli (2013) e Azarsa, Gupta e Biparva (2019) abordam métodos científicos que visam potencializar a autocicatrização para fechamento de maiores aberturas de fissura de forma controlada, tais como: o uso de agentes cicatrizantes microencapsulados; polímeros superabsorventes; materiais de vedação em tubos quebradiços; ligas de memória de forma; concreto bacteriano; agentes expansivos e misturas minerais; materiais de memória de forma; fibras ocas; autorrecuperação desencadeada por microcraqueamento apertado autocontrolado; e o uso de misturas cristalinas, sendo esta última a atualmente utilizada em larga escala e consolidada no mercado da construção civil mundial.

Os aditivos cristalizantes, ou também conhecidos como autocicatrizantes, são materiais cimentícios incorporados ao concreto fresco que reagem com a água e os produtos de hidratação do cimento, formando cristais insolúveis no interior dos poros, capilares e fissuras do concreto, que impedem a passagem de umidade e agentes agressivos pela estrutura, mesmo sob altas pressões hidrostáticas e com potencial de selamento de fissuras passivas até 0,5 mm de abertura.

O uso dos autocicatrizantes comercializados traz um aumento no custo de *capital expenditure* (CAPEX), ou seja, nos investimentos de bens e capitais para a construção da obra, pela adição do material no concreto. Em contrapartida, a redução no custo de *operational expenditure* (OPEX), ou seja, nas despe-

Operacionais e manutenção, ao longo dos anos de uso, dado o aumento da vida útil da estrutura, tem sido grandiosa, o que gera um custo-benefício atrativo.

Outro importante benefício associado ao uso do material está vinculado com a redução da pegada de carbono das obras com concretos autocicatrizantes, isso porque há redução de manutenção das estruturas, dado o aumento da vida útil gerado pela proteção do concreto, pois este terá sua permeabilidade reduzida e suas fissuras colmatadas, impossibilitando a entrada dos agentes agressivos que deterioram o concreto, como cloretos, sulfatos e carbonatos. Tais reparos evitados não geram novo consumo de matéria-prima e emissão de e consumo de energia para sua produção e aplicação.

Neste estudo foram ensaiados concretos com o aditivo autocicatrizante, porém, para sua avaliação de desempenho há variáveis, tais como: diferentes tipos de condição de exposição para cura; diferentes pressões de água, estudado por Yang, Lepech, Yang e Li (2009); diferentes idades para fissuração, estudado por Tittelboom e de Beli (2013); diferentes tamanhos de abertura da fissura, estudado por Wang, Ding, Zhang e Xu (2023); e diferentes composições do cimento utilizado no concreto, estudado por Azarsa, Gupta e Biparva (2019). Isso influencia a análise comparativa, pois mostram diferentes resultados com relação à penetração de água sob pressão, resistividade elétrica, penetração de cloretos, resistência à compressão e autocicatrização, estando a última ainda em definição de metodologia de ensaio, pois não há normativas nacionais que orientem a execução e avaliação de ensaio.

Avaliando os resultados obtidos pelos pesquisadores citados, foram definidos os parâmetros a serem estudados e então moldadas amostras de um concreto referência, ou seja, sem uso do aditivo autocicatrizante, e um concreto com o aditivo autocicatrizante, a fim de comparar a redução da permeabilidade e o selamento de fissuras, submetendo as amostras a pressão de água.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais

Os materiais utilizados foram selecio-

ados de acordo com um traço base de concreto da classe C20, sendo composto por: cimento CP II Z (cimento Portland composto com material pozolânico), agregado graúdo (brita 0) e agregado miúdo (areia natural média). Em complemento, como base deste estudo, foi utilizado um aditivo autocicatrizante, na proporção de 0,8 % sobre o peso do cimento.

2.2 Métodos

Para avaliar a autocicatrização e a redução da permeabilidade de um concreto convencional com e sem aditivo autocicatrizante, foi realizado o monitoramento da passagem de água sob pressão de 4 m.c.a. (metros de coluna d'água), por amostras de concreto fissuradas com aberturas de 0,2 e 0,45 mm.

Para o monitoramento do fluxo d'água pelas amostras, tanto pela fissura quanto pelo maciço da amostra, foi medido o volume de saída de água ao longo do tempo, mantendo-se uma pressão constante de entrada, bem como foi realizada análise visual do selamento da fissura. Também foram verificados o abatimento e a resistência mecânica das amostras.

Foram moldados 4 corpos de prova de concreto prismáticos de 10 x 10 x 40 cm, sendo 2 de referência, ou seja, sem a utilização do aditivo autocicatrizante e 2 com a utilização do aditivo, a fim de comparar o desempenho do mesmo em relação a um concreto comum.

Além disso, foram moldados 4 corpos de prova de concreto cilíndricos de 10 x 20 cm, sendo 2 de referência e 2 com utilização do aditivo autocicatrizante, para ensaio de resistência à compressão axial.

As moldagens seguiram a NBR 5738 (2016), onde os materiais foram misturados na betoneira, nas proporções da Tabela 1, para obter um concreto da classe C20. Após a mistura obter consistência homogênea, o concreto foi despejado nos moldes metálicos vedados de 10 x 10 x 40 cm (retangular) e de 10 x 20 cm (cilíndrico), que receberam adensamento com haste metálica.

No traço com o aditivo autocicatrizante, foi utilizada a dosagem recomendada pelo fabricante de 0,8 % sobre o peso do cimento.

A primeira análise foi o ensaio de abatimento, seguindo a NBR 16889 (2020), onde foi despejado o concreto sobre o cone tronco apoiado na placa base, em camadas adensadas por 25 golpes de haste metálica até atingir o topo do cone, para então removê-lo e medir o abatimento de concreto pela diferença de altura entre o cone e o concreto adensado.

Após as moldagens, as amostras cilíndricas e prismáticas permaneceram em ambiente natural por 48 h e então foram deformadas. As amostras cilíndricas permaneceram submersas em tanque de água até completarem 28 dias de idade (período de cura do concreto) e as prismáticas foram cortadas em retífica, formando 6 amostras quadradas de 10 x 10 x 13 cm e, por fim, foram fissuradas.

Foram moldados mais corpos de prova para ensaio de autocicatrização do que seria utilizado no estudo, geralmente considera-se uma média de 50% de perda das amostras, pois, para gerar a fissura, as amostras podem quebrar durante o carregamento na prensa.

As amostras foram fissuradas aos dois dias de idade, considerando-se uma geração de fissura por retração, a qual é

TABELA 1
TRAÇO DO CONCRETO

| Material | Quantidade | |
|--------------------------|----------------|-----------------------------------|
| | Referência (R) | Com aditivo autocicatrizante (AA) |
| Areia natural | 20,82 kg | 20,82 kg |
| Brita 0 | 20,82 kg | 20,82 kg |
| Cimento | 8,33 kg | 8,33 kg |
| Água | 3,4 L | 3,4 L |
| Aditivo autocicatrizante | 0 g | 66,64 g |

FONTE: AUTORES (2023)



A



B



C

FIGURA 1

FISSURAÇÃO (A); MEDIÇÃO DA ABERTURA DA FISSURA (B);
AMOSTRAS FISSURADAS (C)

FONTE: AUTORES (2023)

recorrente em estruturas reais e ocorre nas idades iniciais do concreto. Para isso as amostras foram colocadas em carga lenta de compressão na prensa Fortest, de forma manual, objetivando-se atingir 80 a 90% da carga de ruptura da idade, apoiadas sobre barras de ferro de 5 mm de diâmetro no seu eixo central, tanto na parte superior quanto inferior, de forma alinhada, para direcionar a fissura no meio da amostra (Figura 1 a).

Posteriormente, foram verificadas as aberturas superficiais das fissuras com utilização de fissurômetro (Figura 1 b), para que não ultrapassassem 0,5 mm, sendo este o limite de colmatagem de fissuras pelo aditivo. As aberturas obtidas nas amostras com aditivo autocicatrizante foram 0,2 e 0,45 mm e nas amostras sem o aditivo também foram 0,2 e 0,45 mm, para possibilitar a análise compa-

rativa entre as amostras (Figura 1 c). As demais amostras quebraram durante o carregamento, ou apresentaram diferentes aberturas de fissura e, neste caso, foram descartadas.

Após a fissuração, as amostras foram conectadas em uma de suas faces, sobre a fissura, a uma mistura betonítica impermeável, onde foi ancorado um bico de torneira rosqueável e nele acoplado a mangueira transparente, com 1 metro de altura fixada na parede, em cada amostra separadamente.

Durante 56 dias estas mangueiras permaneceram conectadas entre si, com sistema de bombeamento (Figura 2), mantendo fluxo contínuo no circuito, a fim de ativar o autocicatrizante, pois nas idades iniciais, antes dos cristais insolúveis estarem formados nos poros e fissuras das amostras, a saída de água pelas

amostras ocorre de forma instantânea, pois os caminhos de passagem da água ainda não foram preenchidos pelo crescimento dos cristais do aditivo.

Após esse período, as mangueiras foram isoladas, mantendo-se uma mangueira por amostra, com 4 m.c.a. e foi dado início ao monitoramento do fluxo d'água passante em cada amostra. Para isso, as amostras ficaram 48 h secando em temperatura ambiente, para possibilitar a visualização do umedecimento do concreto quando submetido à carga d'água, e, após este período, as mangueiras receberam a carga de água. Foi realizado monitoramento da saída de água pelas amostras até cada mangueira esvaziar.

Aos 28 dias de idade, as amostras cilíndricas foram submetidas ao ensaio de resistência à compressão axial, seguindo a NBR 5739 (2018), onde foram colocadas na prensa Solotest e receberam carga de compressão axial até sua ruptura.

2.3 Resultados e discussões

Foi verificado no ensaio de abatimento de tronco cone que não houve alteração entre traços (com e sem aditivo



FIGURA 2

ATIVAÇÃO DO AUTOCICATRIZANTE
COM ÁGUA

FONTE: AUTORES (2023)

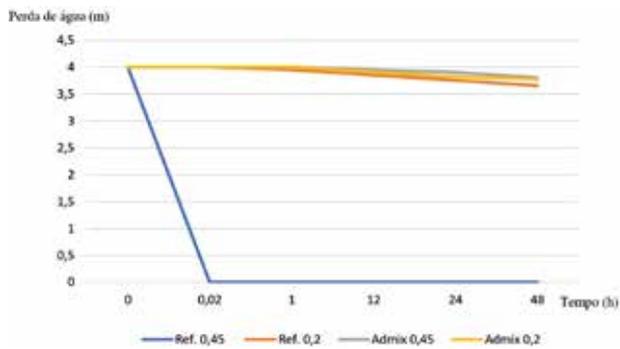


FIGURA 3
FLUXO DE ÁGUA PELAS AMOSTRAS
FONTE: AUTORES (2023)

autocicatrizante), pois ambos mantiveram resultado de 17 cm de abatimento, conforme previsto pelo traço adotado, ou seja, o aditivo não afetou esta característica do concreto fresco.

A fim de verificar a funcionalidade do aditivo autocicatrizante referente à permeabilidade de água pela fissura e pelo maciço, em comparação com o concreto de referência, ou seja, sem aditivo autocicatrizante, foi feito o controle da saída de água pelas amostras fissuradas, após sua ativação durante o período de 56 dias, onde foi mantido carga de água constante com 4 m.c.a. na mangueira. Os resultados estão ilustrados no gráfico da Figura 3.

Na amostra de referência com abertura de fissura 0,45 mm após o enchimento completo dos 4 m de mangueira, essa esvaziou, com toda a água passando ma-



FIGURA 4
AMOSTRAS COM CARGA D'ÁGUA
FONTE: AUTORES (2023)

oritariamente pela fissura em 1 minuto e 16 segundos (Figura 3). Já, as demais amostras, de referência com abertura de fissura 0,2 mm; com aditivo autocicatrizante com abertura de fissuras de 0,2 mm; e com aditivo autocicatrizante com abertura de fissuras de 0,45 mm, tiveram uma pequena redução

do nível da água na mangueira ao longo de 2 dias, dado pela evaporação, e as amostras não apresentaram vazamentos pela fissura ou pelo maciço de concreto, conforme a Figura 4.

Foi possível verificar, que no início da carga de ativação, aos 2 dias de idade, houve um volume de água expressivo passando por todas as amostras, fazendo-se necessário o uso de bomba hidráulica e, ao longo da ativação do autocicatrizante durante os 56 dias de carga d'água com 1 m.c.a, foram gerados cristais insolúveis pela reação com a água pressurizada, que preencheram os poros, capilares e fissuras com abertura menor ou igual a 0,5 mm, reduzindo a vazão de passagem da água pelas amostras tratadas com o aditivo, atingindo a permeabilidade zero.

O processo de ativação do aditivo com água é necessário e influencia o desempenho final, conforme estudado por Yang, Lepech, Yang e Li (2009), que ilustraram melhores resultados de formação cristalina na ativação com quatro a cinco ciclos de cura intercaladas (molhagem e secagem). Já Roig-Flores, Moscato, Serna

TABELA 2
RESULTADOS DA RESISTÊNCIA
À COMPRESSÃO AXIAL

| Amostra | Resistência à compressão (MPa) |
|---------------|--------------------------------|
| Referência 1 | 33,11 |
| Referência 2 | 30,62 |
| Com aditivo 1 | 37,48 |
| Com aditivo 1 | 36,87 |

FONTE: AUTORES (2023)

e Ferrara (2015) observaram a seguinte ordem de eficiência quanto à autocicatrização: imersão em água > contato com água > cura úmida > exposição ao ar.

Outro fenômeno observado no estudo foi o selamento das fissuras de até 0,2 mm nas amostras sem o aditivo. Segundo Tittelboom e De Beli (2013), isso é justificado pela autocicatrização autóloga, que é um fenômeno natural do concreto e que ocorre através da formação de carbonato de cálcio (CaCO₃), hidratação contínua em contato com a umidade, inchamento da matriz de cimento e sedimentação de detritos. Azarsa, Gupta e Bivarpa (2019) informaram que, no concreto jovem, a hidratação contínua é



FIGURA 5
VAZAMENTO PELA AMOSTRA DE REFERÊNCIA COM ABERTURA DE FISSURA DE 0,5 MM
FONTE: AUTORES (2023)

o mecanismo de cicatrização dominante devido ao seu teor bastante alto de partículas de cimento não hidratadas enquanto a formação de carbonato de cálcio se torna o principal mecanismo na idade posterior. Porém, estes processos são descontrolados e limitados a pequenas aberturas de fissuras.

Outra avaliação realizada foi a resistência à compressão axial aos 28 dias nos corpos de prova cilíndricos, onde foi possível verificar que as amostras com o aditivo podem apresentar um aumento da resistência mecânica,

em média de 15% em idades avançadas, após o período de ativação do autocicatrizante com água, justificado pelo preenchimento dos poros com cristais (Tabela 2).

3. CONCLUSÕES

Foi possível verificar a eficiência do aditivo autocicatrizante em estruturas de concreto hidráulicas, em comparação com concretos convencionais, quanto à redução da permeabilidade e autocicatrização de fissuras passivas, verificando o selamento das fissuras e dos poros do

concreto, quando há presença de água sob pressão e após seu período de ativação de 28 dias.

Impedindo a passagem de água pela amostra, principalmente pela fissura, é possível obter um concreto de alta durabilidade, sendo que não haverá a entrada de agentes agressivos pelos seus poros e fissuras.

Para potencializar o desempenho da solução, recomenda-se, para trabalhos futuros, realizar a cura nas amostras em ciclos de úmido/seco e com maior pressão de água. ☹

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AZARSA, P; GUPTA, R; BIVARPA, A. Assessment of self-healing and durability parameters of concretes incorporating crystalline admixtures and Portland Limestone Cement. *Cement and Concrete Composites*. Vol 99, p. 17-31, 2019.
- [2] ROIG-FLORES M., MOSCATO S., SERNA P., FERRARA L. Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments. *Construction and Building Materials*. Vol. 86, p. 1-11, 2015.
- [3] TITTELBOOM, K, V; DE BELI, N. Self-Healing in Cementitious Materials - A Review. *Materials*. Vol 6, p. 2182-2217, 2013.
- [4] WANG, R; DING, Z; ZHANG, Y; XU, Y. Self-healing of high-performance engineered cementitious materials with crystalline admixture in the seawater environment. *Journal of Building Engineering*. Vol 63, 2023.
- [5] YANG, Y; LEPECH, M. D; YANG, E; LI, V. C. Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet-dry cycles. *Cement and Concrete Research*. Vol. 39, p. 382-390, 2009.



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

