



De 17/07/2024 a 20/07/2024
Fortaleza, Ceará.
DOI: 10.5281/zenodo.12743983

Congresso Brasileiro de Patologia das Construções

AVALIAÇÃO DA AUTOCICATRIZAÇÃO DE DIFERENTES CONCRETOS COM VISTAS À PENETRAÇÃO ACELERADA DE CLORETOS

Heitor Antonio Tschaen Rangel^{1*}, Leonnardo Postighel Barreto²; Érica Batista Santos Assis³;
Gabriel Agrisi Paigel⁴, Geilma Lima Vieira⁵ e Denise Carpena Coitinho Dal Molin⁶

*Autor de contato: heitor1003@hotmail.com

^{1,2,3,4} Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santos, Vitória – ES, Brasil

⁵ Professora Doutora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santos, Vitória – ES, Brasil.

⁶ Professora Doutora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, Brasil

RESUMO

A problemática das fissuras em estruturas de concreto, permite a entrada de agentes deletérios como os íons cloreto, que propícia o surgimento de outras manifestações patológicas. A autocicatrização do concreto armado, que promove o fechamento de fissuras, é vista como um meio de aumentar a vida útil das edificações, e assim gerar benefícios econômicos frente ao dispêndio de sua reabilitação. Com isso, este trabalho buscou analisar o fenômeno de autocicatrização em diferentes tipos de concreto com vistas à penetração acelerada de íons cloreto, realizado por meio do ensaio regido pela ASTM C1202:2022. Para a realização da avaliação, foram realizadas duas faixas de fissuração induzidas nos corpos de prova dos concretos estudados, sendo eles: 1 - Concreto de CP-V ARI (referência); 2 – Concreto com adição de cinza volante (50%); 3 - Concreto com adição de sílica ativa (10%). Após o ensaio, o resultado da carga passante total foi associando ao desempenho de autocicatrização e da resistividade elétrica do concreto referência e das adições. Visualmente observou-se que a autocicatrização ocorreu em todos os concretos, com o selamento de fissuras inferiores a 0,07mm. Analisou-se que o concreto com adição de sílica ativa (10%) obteve o melhor resultado para fissuras de 0,2mm a 0,4mm comparado aos demais e o concreto com adição de cinza volante (50%) obteve o melhor resultado para fissuras inferiores a 0,1mm comparado aos demais concretos.

Palavras-chave: Concreto; Autocicatrização; ASTM C1202; Penetração de íons cloreto.

ABSTRACT

The problem of cracks, one of the main pathological manifestations of concrete, allows the entry of harmful agents such as chloride ions, which promote the emergence of other pathological manifestations. The self-healing of reinforced concrete, which promotes the closure of cracks, is seen as a means of increasing the useful life of buildings, and thus generating economic benefits compared to the expense of their rehabilitation. Therefore, this work sought to analyze the phenomenon of self-healing in different types of concrete with a view to the accelerated penetration of chloride ions, which was carried out using the test governed by ASTM C1202:2022. To carry out the evaluation, two bands of induced cracking were carried out in the specimens of the concrete studied, namely: 1 - CP-V ARI concrete (reference); 2 – Concrete with the addition of fly ash (50%); 3 - Concrete with added silica fume (10%). After the test,

the result of the total passing load was associated with the self-healing performance and electrical resistivity of the reference concrete and the additions. Visually, it was observed that self-healing occurred in all concretes, with the sealing of cracks smaller than 0.07mm. It was analyzed that the concrete with the addition of silica fume (10%) obtained the best result for cracks of 0.2mm to 0.4mm compared to the others and the Concrete with the addition of fly ash (50%) obtained the best result for cracks less than 0.1mm compared to other concretes.

Keywords: Concrete; Self-healing; ASTM C1202; Penetration of chloride ions.

1. INTRODUÇÃO

Nas estruturas de concreto armado, a ocorrência de fissuras está entre as manifestações patológicas mais recorrentes e podem surgir em diferentes estágios ao longo da sua vida útil. Elas atuam como uma porta de entrada para água, ar e outros agentes deletérios. Isto leva a uma redução da durabilidade das estruturas, pois torna mais suscetível a ocorrência de outras manifestações patológicas como a corrosão das armaduras, que sem as devidas intervenções podem promover o colapso estrutural (El-Newihy, 2018, p.1).

Segundo Helene *et al.* (2018, p.1) “a razão predominante da deterioração das estruturas de concreto armado está relacionada com a capacidade de resistência contra a penetração de agentes agressivos”. O envelhecimento e a degradação do concreto estão diretamente ligados à sua estrutura porosa e são promovidos pela inevitável propensão do concreto à fissuração que tende a acelerar o processo (De Belie *et al.*, 2018, p.1).

Assim, a autocicatrização dessas manifestações patológicas, torna-se uma área de grande atração para pesquisadores como Helene *et al.* (2018) e Pacheco (2018), que apontam esta como sendo uma alternativa viável para a proteção das armaduras de aço frente a agressividade do meio. Para Helene *et al.* (2018, p.1), a autocicatrização pode favorecer a elevação da estanqueidade de elementos de concreto, e assim reduzir a difusividade dos concretos, tornando-os menos suscetíveis ao ingresso de íons cloreto, por exemplo.

A avaliação da autocicatrização dos concretos ocorreu pelo de método experimental regido pela American Society for Testing and Materials - ASTM C1202 (ASTM, 2022), e por meio desta norma, que testa a penetração acelerada de íons cloreto, buscou-se aferir a carga passante total nas diferentes amostras associando os resultados com a autocicatrização dos concretos, e a capacidade de resistência ao ataque de íons cloreto.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Surgimento de fissuras no concreto

Diversos fatores, como sobrecarga, retração química, ataques ambientais podem produzir fissuras no concreto. As causas das fissuras podem ser classificadas como intrínsecas ou extrínsecas, sendo no primeiro caso surgidas pela retração plástica, deficiência de projeto e execução, retração térmica e assentamento plástico do concreto, bem como as ocasionadas pela movimentação de fôrmas e escoramentos. Já na segunda classificação elas podem ser devido ao assentamento de apoios e fundações, variações térmicas, sobrecargas, corrosão das armaduras, reação álcali-agregado e ataque por sulfatos. O que se verifica é que as matrizes cimentícias possuem baixa capacidade de suporte para resistirem a esforços de tração, sendo estas solicitações uma das principais causas de fissuras nesses materiais (Silva, 2021, p.1).

Todos os anos, uma parcela significativa de recursos financeiros é reservada para a reabilitação de estruturas. Acredita-se que nos Estados Unidos e os países asiáticos serão exigidos cerca de US\$ 22b e US\$ 20b em reparos estruturais nos próximos cinco anos, respectivamente, um impacto negativo na economia, e que geralmente tem pouco efeito no prolongamento da vida útil de uma estrutura (Meraz *et al.*, 2023, p.666).

2.1.1 Ação dos íons cloreto

As fissuras podem reduzir notavelmente a durabilidade das estruturas de concreto, porque fornecem acesso para umidade e íons agressivos ao interior, acelerando a corrosão das barras de aço, que por sua vez, expandem e aceleraram ainda mais a destruição do concreto (Joshi *et al.*, 2023, p.2). Principalmente em locais que possuam classe de agressividade ambiental elevada, conforme ABNT NBR 6118:2023, pois se torna mais fácil de agentes deletérios como os íons cloreto acessarem o interior do concreto e ataquem as armaduras.

Para Joshi *et al.* (2023, p.2), um dos fatores de deterioração mais agressivos conhecidos, os íons cloreto, podem acessar o concreto por meio de fontes internas (proveniente de agregados, aditivos ou água da produção contaminada) e externas (proveniente de sais de descongelamentos, ambiente marinho – água e névoa marítima), contudo com o surgimento de trincas e fissuras, o ataque de íons cloreto, possuiria entrada facilitada e promoveria alterações irremediáveis nas estruturas de concreto armado de forma mais rápida. Assim, a penetração de íons cloreto na matriz do concreto, que é poroso e não consegue barrar a sua entrada, em conjunto com água e oxigênio, desestabilizam pontualmente a capa passivadora do aço, propiciando a instauração do processo corrosivo do vergalhão, resultando na chamada corrosão induzida por cloreto.

2.2 Autocicatrização

RILEM 221-SHC (2011 *apud* Pacheco, 2018, p.58) conceitua a autocicatrização como sendo um processo realizado pelo próprio material com a recuperação e melhoria na performance após dano por algum processo. O concreto possui dois grupos de autocicatrização: cicatrização autógena (natural) e a cicatrização autônoma (promovida). A diferença fundamental entre os dois processos, é que a cicatrização autógena se dispõe apenas de materiais presentes no próprio sistema, ao passo que na cicatrização autônoma é induzida como consequência de adições introduzidas no concreto, sendo que ambas necessitam estar na presença de água para ocorrerem (Moreira, 2016, p.38).

Para Fronczyk *et al.* (2023, p.1), são conhecidos quatro mecanismos em que o concreto promove o selamento autógeno de fissuras dentro da matriz, sendo:

- 1- Formação de carbonato de cálcio (CaCO_3) - carbonatação como a reação do Ca(OH)_2 com o CO_2 da atmosfera resultando na formação de CaCO_3 para preencher a fissura;
- 2- Hidratação contínua após contato com a umidade - porções não hidratadas (cimento anidro) do cimento antes do surgimento da fissura e que se hidratam e selam com produtos da hidratação *a posteriori*;
- 3- Inchaço da matriz de cimento – expansão (aumento de volume) devido à saturação da matriz de cimento;
- 4- Sedimentação de detritos que eventualmente faz com que o concreto ganhe certas propriedades mecânicas ou de durabilidade - fluxo de água através do compósito cimentício resultando na vedação de fissuras através da deposição de sólidos.

De Belie *et al.* (2018, p.3), considera a autocicatrização autônoma como uma área de maior interesse em pesquisas em comparação aos mecanismos autógenos, pois devido à restrição em relação ao tamanho das fissuras, que são efetivamente cicatrizadas, entre 0,01 e 0,1 mm, a autocicatrização autógena possui eficácia reduzida.

A autocicatrização autônoma do concreto é na verdade mais uma busca de promover a sua longevidade, e assim ela vem sendo buscada em diferentes materiais, em vertentes físicas, químicas e biológicas. Diversos mecanismos têm se mostrado factíveis de promoverem a autocicatrização autônoma, como, por exemplo AS adições minerais como cinza volante e com bactérias do gênero bacillus, em que ocorreram fechamentos de até 0,59mm no estudo de Sakar *et al.* (2022, p.7). Existem ainda os aditivos cristalizantes, estudado Li *et al.* (2023, p.14), que mostraram que a precipitação de hidróxido de cálcio promoveu o fechamento das fissuras e diminui a permeabilidade do concreto;

2.3 Tipos de concretos

2.3.1 Concreto produzido com CP-V ARI (Referência)

Neste trabalho, o Cimento Portland-V de Alta Resistência Inicial foi usado para produzir um concreto utilizado como referência para as análises da autocicatrização. Espera-se neste concreto a ocorrência de autocicatrização autógena, ou seja, natural aos compostos do próprio.

2.3.2 Concreto com adição cinza volante (50%)

Cinzas volantes são minerais produzidos a partir da queima de carvão mineral. A combustão se dá em altas temperaturas, entre 1200 e 1600 °C, resultando em um composto de silício e alumínio, baixos teores em ferro, entre outros. A inserção de material pozolânico, a exemplo das cinzas volantes de origens de termoelétricas garante ao cimento maior impermeabilidade, durabilidade (maior resistência a ataque de íons cloreto e sulfatos) e baixo calor de hidratação, sendo este último um dos maiores causadores das fissuras nas primeiras idades (Mehta, Monteiro, 1994 *apud* Duarte *et at.*, 2008, p.5).

Para Mehta e Monteiro (2014 *apud* Silva *et at.*, 2021, p.211) as reações pozolânicas podem consumir a portlandita e produzir C-S-H (Silicato de Cálcio Hidratado), tornando a matriz mais densa. O autor afirma ainda que “a calcita ou carbonato de cálcio (CaCO_3) provém, entre outras fontes, da carbonatação do hidróxido de cálcio (CH, formula abreviada de Ca(OH)_2) disponível como produto de hidratação na matriz de cimento”, e que (De Nardi *et al.*, 2017 *apud* Silva *et at.*, 2021, p. 211) o fenômeno de autocura está diretamente associado ao teor de CH proveniente da hidratação do cimento.

2.3.3 Concreto com adição de sílicas ativa (10%)

A sílica ativa é considerada uma adição pozolânica, pela sua composição de sílica amorfa de elevada área superficial, que é capaz de produzir concretos com propriedades bastante melhoradas. Ela é um subproduto industrial da produção de silício metálico, ligas de ferrosilício ou outros produtos silicosos a partir do quartzo de elevada pureza e carvão em fornos elétricos à arco, a temperaturas da ordem de 2000 °C. Existe na sua inserção um efeito físico (microfíler) e um efeito químico (pozolânico) durante o processo de hidratação do cimento, atuando na formação de uma

microestrutura mais densa, homogênea e uniforme (Mehta & Monteiro, 1994; Neville, 1997 *apud* Hoffmann, 2001, p.24-25).

O efeito físico é causado pela extrema finura e pela forma esférica das partículas, sendo responsáveis pela redução do espaço disponível para a água, maior número de pontos de nucleação, torna a mistura mais coesiva, diminui a segregação e aumenta a viscosidade e coesão interna, reduz o tamanho dos poros e canais capilares e eliminação do efeito parede do agregado devido ao empacotamento mais eficiente das partículas finas na superfície do agregado. Já o efeito químico da sílica ativa tem-se uma diminuição do teor de Ca(OH)_2 e formação de compostos mais resistentes como o C-S-H ocasionando uma melhor aderência entre pasta/agregado e pasta/armadura (Isaia, 1995; Neville, 1997 *apud* Hoffmann, 2001, p.24-25).

De acordo com Sasanipour *et al* (2019, p.8) a incorporação da sílica ativa promove no concreto aumento da resistividade elétrica no ensaio da ASTM C 1202. Ele acredita que a sílica reduz a atividade de íons, e que em seu experimento ela não permitiu que a temperatura dos ensaios se elevasse.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho possuiu como variável dependente, a carga passante total do ensaio da ASTM C1202 e duas variáveis independentes, sendo os tipos de concretos avaliados (três níveis referente a cada tipo de concreto) e a faixa de fissuração induzida (dois níveis – Faixa 01 que compreendem fissuras de até 0,2mm e; Faixa 02 que compreendem fissuras de 0,2mm até 0,4mm).

Já as variáveis de controle neste trabalho, observou-se quatro, sendo: 1 -Relação a/c dos concretos; 2 – Idade e dias de cura úmida; 3 - Aparato de abertura; 4 - Voltagem de 30 V no ensaio – O ensaio padronizado da ASTM C1202 (ASTM, 2022), orienta que seja utilizado uma voltagem de 60V, porém não é previsto a utilização de corpos de prova de concreto fissurados, e sim íntegros. Conforme Mehta e Monteiro (2014, p.20) a voltagem recomendada pela norma é demasiada, sendo encontrados na literatura relatos de elevação da temperatura dos fluídos do sistema, como em Sasanipour *et al* (2020, p.9) que afirma que “quanto maior for a temperatura das soluções durante o experimento, mais atividade e penetração de íons cloreto haverá”, o que propiciaria ruídos no ensaio provocados pelo aquecimento das soluções e do corpo de prova por efeito Joule. Além disso, foram considerados dois fatores de ruídos neste trabalho: 1- Possíveis vazamentos e a; 2 - Calibração dos equipamentos.

3.1 Materiais

Este trabalho é fruto de uma parceria de pesquisa entre a Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS e a Universidade Federal do Espírito Santo - UFES. A preparação e confecção dos corpos de prova ocorreu no laboratório da UFRGS, utilizando em todas as amostras cimento CP-V ARI, relação a/c de 0,6, e agregados constantes. Após a preparação, a UFRGS enviou as amostras para a UFES, onde foram realizados os ensaios.

Para o ensaio, foram necessários equipamentos como 6 (seis) multímetros, uma fonte de alimentação digital regulável (*Data Logger* que induzirá a voltagem no ensaio), bomba a vácuo, impermeabilizante (utilizado da marca Revestik Branco), 12 (doze) células de acrílico (moldes

conforme norma da ASTM C1202:2012), água deionizada, hidróxido de sódio (concentração 0,1M) e cloreto de sódio (concentração de 3%).

3.2 Métodos

O procedimento da norma ASTM C1202 consiste em posicionar um corpo de prova cilíndrico de aproximadamente 50 mm de espessura e 100 mm de diâmetro entre dois recipientes (células de acrílico), sendo que em um deles será injetado uma solução de cloreto de sódio, com uma concentração de 3% (ânodo) e no outro de uma solução de hidróxido de sódio com concentração de 0,1 M (cátodo), formando uma espécie de pilha. É aplicado uma corrente elétrica de 30 V e medidas a correntes passantes a cada 30 minutos durante um período de 6 horas. Ao término dos ensaios, insere-se os valores das leituras em uma fórmula, que permite se obter a carga passante total.

3.2.1 Moldagem e preparação dos corpos de prova de concreto

Após 28 dias da confecção, os corpos de prova passaram pelo procedimento de fissuração induzida, que consiste em anexar os corpos de prova no molde metálico (já patenteado), que promove a fissuração com auxílio da prensa hidráulica, conforme a Figura 1 a seguir. Foram necessários produzir 3 (três) corpos de prova para cada faixa de fissuração, conforme orienta a norma. A Figura 1 ainda traz um registro fotográfico de dois corpos de prova Faixas 01e 02 após fissuração. Na sequência das fissurações, todos eles foram armazenados em câmara úmida do Laboratório de Materiais de Construção Civil – LEMAC da UFES por mais um período de 28 dias, conforme orienta a norma, até a data em que ocorreu os ensaios.

Figura 1- Procedimento de fissuração induzida e mensuração para devida classificação, respectivamente.



Fonte – Próprio autor.

Ainda no processo de preparação dos corpos de prova de concreto, foi realizada a impermeabilização lateral para evitar vazamentos, e posteriormente eles foram submetidos a câmara a vácuo por 3 horas, inicialmente livre de líquido, conforme Figura 2 a seguir. Após esse período é introduzido água deionizada, que preencherá os poros vazios do concreto, saturando-o. Deve-se manter o vácuo por mais uma hora, e na sequência deixar os corpos de prova submersos por um período de (18 ± 2) horas.

Figura 2 - Corpos de prova impermeabilizados, no vácuo e na sequência inserção da água deionizada.



Fonte – Próprio autor.

3.2.2 Montagem dos equipamentos

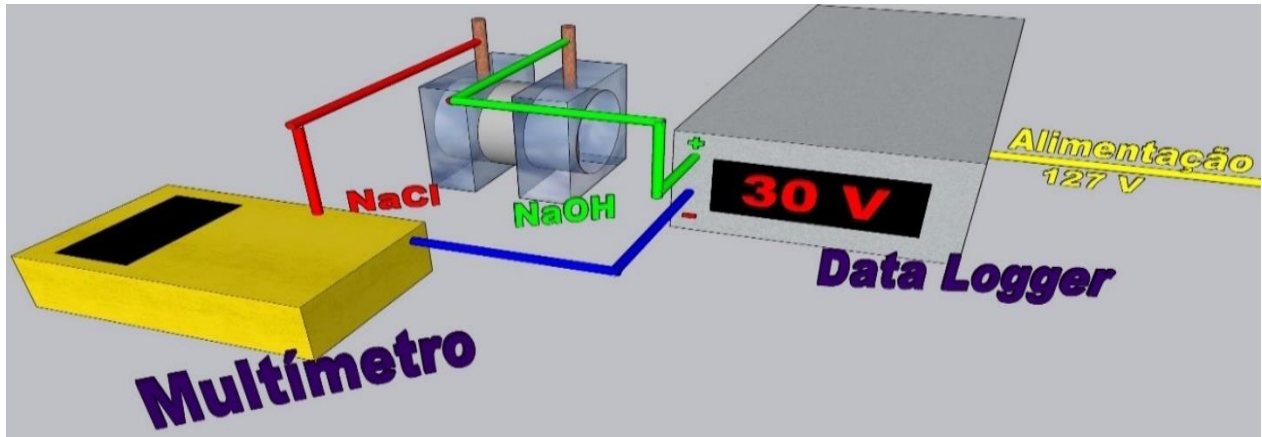
Após a saturação, foram montadas as células de acrílico aos corpos de prova com espumas de poliuretano e silicone neutro para garantir a vedação do sistema. Após, foi inserido o cátodo em um dos lados (cloreto de sódio) e ânodo do outro (hidróxido de sódio a 0,3M). Foram conectados os cabos que ligam o *data logger* e multímetros às hastes de cobre que ficam em contato com as soluções, conforme Figura 3 a seguir, e Figura 4 na página seguinte em que foi criado um esquema com o auxílio do programa *sketchup* para demonstrar o mecanismo do ensaio.

Figura 3 - Aparato da ASTM C1202.



Fonte – Próprio autor.

Figura 4 – Modelo esquemático da ASTM C1202.



Fonte – Próprio autor.

3.2.3 Medições das correntes passantes e temperatura conforme ASTM C1202

A temperatura foi monitorada devido aos impactos potenciais na resistência elétrica. O ensaio possuiu duração de 6 horas e as leituras foram realizadas a cada 30 min, conforme ASTM C1202:2022. Ao final do experimento, os dados colhidos foram inseridos na Equação 1.

$$Q = 900 (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (1)$$

Onde:

Q = Carga passante em Coulombs (C)

I_0 = Carga passante inicial em Amperes (A)

I_t = Carga passante em t (A)

Fonte: ASTM C 1202:2022.

A norma ainda trás uma orientação de ajuste de carga passante caso a diâmetro dos corpos de prova sejam diferentes de 95mm. Como o diâmetro das amostras eram de 100mm, foi necessário realizar essa adaptação da carga passante total, que é realizada pela Equação 2:

$$Q_s = Q_x \times \left(\frac{95}{x}\right)^2 \quad (2)$$

Onde:

Q_s = Carga passante (coulombs) através de um diâmetro de 95 mm de um espécime.

Q_x = Carga passante (coulombs) através de x (mm) diâmetro de um espécime, e

x = Diâmetro (mm) da amostra não padronizada

Fonte: ASTM C 1202:2022.

Os resultados foram classificados a partir dos valores da Tabela 1, que foi extraída da norma.

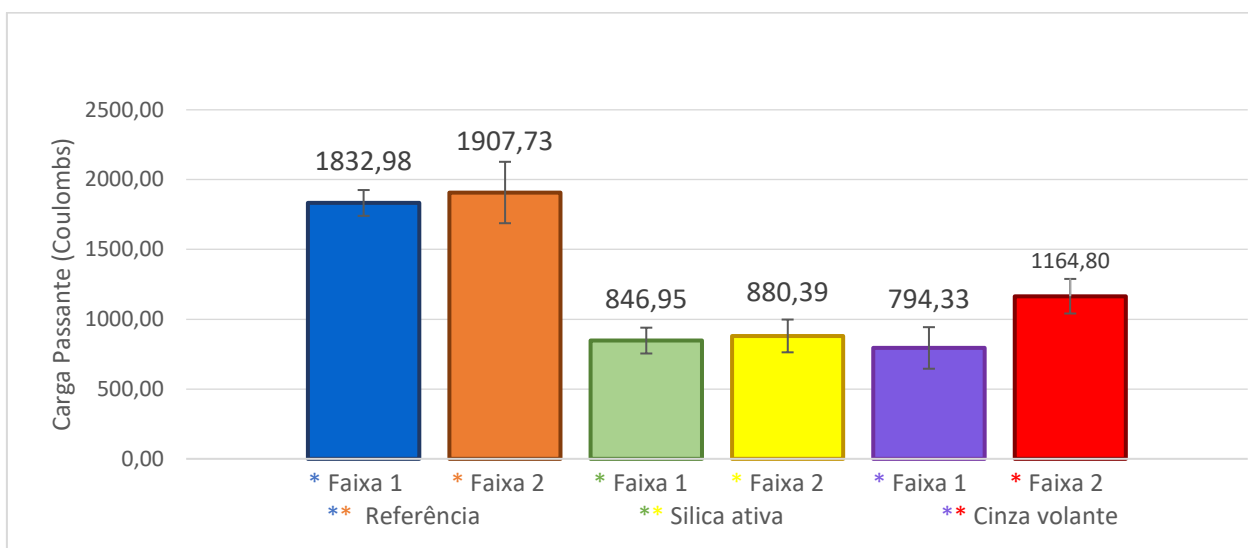
Carga Passante (Coulombs)	Penetrabilidade dos íons cloreto
> 4000	Alta
2000-4000	Moderada
1000-2000	Baixa
100-1000	Muito baixa
<100	Desprezível

Fonte: ASTM C 1202:2022.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Considerou-se que quanto maior for a carga passante, maior é a penetração de íons cloreto, e assim pior é considerado o desempenho do concreto, frente a este agente deletério. O Gráfico 1 apresenta o resultado da carga passante no ensaio de penetração cloretos para os diferentes tipos de concretos, em suas respectivas faixas de abertura de fissuras.

Gráfico 1 – Resultado da carga passante total dos concretos avaliados.



Fonte – Os autores.

A partir dos resultados apresentados no Gráfico 1, foi possível classificar os concretos em relação a penetrabilidade dos íons cloreto, conforme pode ser observado na Tabela 2, a seguir.

Tabela 2 – Classificação quanto a penetrabilidade de íons cloreto dos concretos avaliados.

Tipo de concreto	Faixa de fissuração	Penetrabilidade
CP V ARI (referência)	* Faixa 01	Baixa
	* Faixa 02	Baixa
Concreto com sílica ativa	* Faixa 01	Muito baixa
	* Faixa 02	Muito baixa
Concreto com cinza volante	* Faixa 01	Muito baixa
	* Faixa 02	Baixa

Fonte: Os autores.

Verificou-se que o concreto confeccionado com CP V ARI, utilizado com referência para este trabalho, apresentou a carga passante total mais elevada em comparação aos concretos com cinza volante e sílica ativa. A classificação quanto a penetrabilidade de íons cloreto no concreto com sílica ativa foi muito baixa, esse resultado era aguardado, pois ela promove uma maior impermeabilidade e menor difusividade de íons cloreto no concreto. Também era esperado um resultado de melhor desempenho do concreto com cinza volante quando comparado ao concreto de referência, contudo diante dos valores de penetrabilidade encontrados para o faixa 02, verificou-se um desempenho inferior ao faixa 01 do mesmo grupo, possuindo-os classificação de baixa e muito baixa penetrabilidade, respectivamente.

Ainda em relação aos resultados do Gráfico 01, foi possível constatar que o concreto com adição de cinza volante possui 56,66% e 38,94% de redução da carga passante total do faixa 01 e 02, respectivamente, comparado ao CP V ARI. Segundo Gupta, Pang e Kua (2017 *apud* Pacheco 2020, p.64-65) a utilização de pozolanas, decorre de um maior tempo de hidratação se comparado com o cimento, e por isso, nas idades iniciais ainda existe um grande número de partículas anidras disponíveis, permitindo que ocorra uma espécie de autocicatrização autônoma. Essa hipótese pode ser considerada como factível e ter propiciado ganhos de *performance* no fechamento de fissuras dos corpos de prova de faixa 01.

O valor da carga passante por faixa de fissuração também confirmou a hipótese de que quanto maior a fissura, maior a transferência de carga passante, e consequentemente a penetração dos íons cloreto. A olho nu, em todos os concretos avaliados com faixa 01 de fissuração, constatou-se fechamento parcial das fissuras da superfície. Acredita-se que tenha ocorrido o mecanismo de autocicatrização autógeno, ou seja, inerente aos compostos do cimento, e que tenha ligação com a hidratação contínua após contato com a umidade - porções não hidratadas (cimento anidro) do cimento antes do surgimento da fissura e que se hidratam e selam com produtos da hidratação *a posteriori*. Contudo, apenas foi possível constatar visualmente fechamento inferiores a 0,07mm, aproximadamente.

Também foi possível observar, que o concreto com adição sílica ativa possui 53,79% e 53,85% de redução da carga passante total do faixa 01 e 02, respectivamente, comparado ao CP V ARI. Era esperado que esse concreto teria o melhor desempenho em ambas as faixas neste trabalho devido aos ganhos nas propriedades químicas e físicas conferidas pela sílica ativa. Criou-se a hipótese de que ela poderia ser responsável por conferir aos concretos uma maior resistência a compressão, o que poderia reduzir o nível de fissuras internas dos corpos de prova, e assim reduzir a carga passante de íons cloreto no ensaio de penetração de íons, podendo ainda gerar compostos químicos que podem estar associados a um fechamento de fissuras, caracterizando uma autocicatrização.

Foi observado que os corpos de prova da faixa 02 de abertura de fissuras, dos concretos com sílica ativa tiveram a menor difusividade, comparado ao concreto com adição de cinza volante, o que permite dizer que o concreto com sílica ativa possui o melhor desempenho de autocicatrização entre 0,2mm a 0,4mm, além de apresentar uma menor diferença entre os valores da carga passante total entre os faixas 01 e 02 do mesmo tipo de concreto.

5. CONCLUSÃO

A autocicatrização do concreto tem sido estudada desde a sua descoberta, e por meio de iniciativas de pesquisas como esta, que submetem amostras a agentes deletérios como íons cloreto afim de verificar o seu comportamento, é que se tem aprimorado o nível de conhecimento de tal fenômeno. Neste estudo, verificou-se que em todas as amostras de concreto ocorreram a autocicatrização, que pode ser percebida a olho nu. A partir dos resultados obtidos observou-se que o concreto sem adições de cinza volante e sílica ativa teve uma menor capacidade de resistência a penetração acelerada de íons cloreto, mas que isso não necessariamente pode estar atrelado a menor capacidade de autocicatrização.

Como mencionado, quanto menor a carga passante total, melhor é associado o desempenho do concreto em resistir a penetração dos íons cloreto, o que também pode estar associado a uma melhor

eficiência na autocicatrização, que promove o fechamento das fissuras e redução na entrada de agentes deletérios. Contudo, somente com os resultados deste trabalho, não é possível afirmar que a autocicatrização, um fenômeno que continua sendo estudado, possa ter propiciado mais de 50% de redução da carga passante total do concreto referência faixa 01 comparados com os que recebera adições.

Dos ensaios realizados, aquele que demonstrou uma maior capacidade de conter a carga passante depois dos 28 dias imerso na água, para faixa 01 de fissuração induzida foi o concreto com adição de cinza volante e para uma faixa 02 de fissuração induzida o concreto com adição de sílica ativa. O aumento da resistividade elétrica está diretamente ligada à resistência à penetração de íons cloreto, logo, era esperado que as adições da cinza volante e sílica ativa promoveriam melhorias no desempenho da penetração acelerada de íons cloreto regido pela norma ASTM C 1202, pois é sabido que estas adições promovem tal propriedade ao concreto.

Sob esta perspectiva, recomenda-se que sejam realizados estudos mais aprofundados a respeito do fenômeno da autocicatrização, que possibilitaria o fechamento de fissuras e a redução da entrada de agentes deletérios, aumentando assim a vida útil das edificações.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos a parceria realizada entre a Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS e a Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, que integram um projeto de pesquisa desenvolvido pelo Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE), em conjunto com os Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído (LAMTAC) da UFRGS e o laboratório de materiais de construção (LEMAC) da UFES, que possibilitaram realizar este trabalho com toda a infraestrutura e materiais necessários para o sucesso da pesquisa. Também agradecemos ao CNPq, pelo apoio financeiro do projeto e à CAPES, pela bolsa de mestrado dos pesquisadores.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration: ASTM C 1202**. Philadelphia, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2023.

DE BELIE, N; AL-TABBA, A; ANTONACI, P; BAERA, C. **A Review of Self-Healing Concrete for Damage Management of Structures**. *Advanced Materials Interfaces*, v.5, p.1-28, may, 2018.

DUARTE, D; PELISSER, F; PETERSON, M. **Propriedades do concreto com adição de cinza volante e cinza pesada**. 1º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente. Bento Gonçalves – RS, p.8, out. 2008.

EL-NEWIHY, A; AZARSA, P; GUPTA, R; BIPARVA, A. **Effect of Polypropylene Fibers on Self-Healing and Dynamic Modulus of Elasticity Recovery of Fiber Reinforced Concrete**. Special Issue "Fibers and Techniques for Upgrading of Concrete and Masonry Constructions", p.17, 2018.

FRONCZYK, J; JANEK, M; SZELAĞ, M; PYZIK, A; FRANUS, W. **Immobilization of (bio-) healing agents for self-healing concrete technology: Does it really ensure long-term performance?** Composites Part B: Engineering, v. 266, p. 35, nov. 2023.

HELENE, P; GUIGNONE, G; VIEIRA, G; RONCETTI, L; MORONI, F. **Evaluation of the chloride penetration and life cycle of the self-healing concretes activated by crystalline admixture.** IBRACON Structures and Materials Journal, v. 11, n° 3, p. 554-563, 2018.

HOFFMANN, A. T. **Influência da adição de sílica ativa, relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em concretos.** 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

JOSHI, S; AHN, Y-H; GOYAL, S; M; REDDY, S. **Performance of bacterial mediated mineralization in concrete under carbonation and chloride induced corrosion.** Journal of Building Engineering, v. 69, p.16, 2023.

LI, H.-F; YU, Q.-Q; ZHANG, K; WANG, X.-Y; LIU, Y; ZHANG, G.-Z. **Effect of types of curing environments on the self-healing capacity of mortars incorporating crystalline admixture.** Case Studies in Construction Materials, v. 18, p.17, july, 2023.

MEHTA, P.K; MONTEIRO, P. J. M; **Concreto: estruturas, propriedades e materiais.** In: HASPARYK, N. P. (ed.). Concreto, microestrutura e materiais. São Paulo: IBRACON, 2014.

MERAZ, M; MIM, N. J; MEHEDI, T; BADHON BHATTACHARYA, B; AFTAB, R; BILLAH, M. **Self-healing concrete: Fabrication, advancement, and effectiveness for long-term integrity of concrete infrastructures.** Alexandria Engineering Journal, v. 73, p. 665-694, july, 2023.

MOREIRA, M. M. **Efeito do aditivo redutor de permeabilidade em concretos com diferentes tipos de cimento Portland – contribuição aos processos de autocicatrização.** 166 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília. Brasília, 2016.

PACHECO, F. **Análise da eficácia dos mecanismos de autocicatrização do concreto.** 350 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo, 2020.

SASANIPOUR, H. FARHAD ASLANI, F. TAHERINEZHAD, J. **Effect of silica fume on durability of self-compacting concrete made with waste recycled concrete aggregates.** Construction and Building Materials, v. 227, p. 12, 2019.

SILVA, D. M. G; CAPPELLESSO, V. G; GARCIA, M. G. L; MASUERO, A. B; DAL MOLIN, D. C. C. **Calcium hydroxide influence in autogenous selfhealing of cement-based materials in various environmental conditions.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 21, n. 2, p. 209-224, abr./jun. 2021.