

Avaliação de propriedades físicas e mecânicas em concretos produzidos com materiais da cidade de Manaus com o uso de redutores de permeabilidade por cristalização

Evaluation of physical and mechanical properties of concrete with permeability-reducing crystalline admixtures in the city of Manaus.

Frank Albert Soares Araújo(1); Luciane Farias Ribas (2); Autor (3)

(1) Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Amazonas

(2) Doutorado em Engenharia civil pela Universidade Federal do rio de Janeiro e professora do Centro Univeritário Fametro

RESUMO: O concreto tem baixa resistência à fissuração o que permite que líquidos e agentes agressivos penetrem na matriz. A autocicatrização é a capacidade do concreto de reparação de pequenas fissuras de forma espontânea, sem nenhuma intervenção externa, é uma alternativa para prevenção e tratamento de fissuras. O objetivo geral deste estudo é avaliar os efeitos do aditivo redutor de porosidade por cristalização (ARPC) na durabilidade de concretos produzidos com materiais da cidade de Manaus, por meio de pesquisa experimental, analisando a cicatrização autógena. Foram produzidos quatro concretos com relação água/cimento fixa de 0,55, adição de ARPC e cimentos, utilizou-se o CII Z- 40-RS e o CP II E-32. A eficácia da cicatrização foi avaliada pela resistência à compressão aos 84 dias de concretos com microfissuras provocadas por carga de ruptura de 100% e 90% após 28 dias de cura. As propriedades físicas de: índice de vazios, absorção total, absorção por capilaridade, migração de íons cloretos e microestrutura do concreto também foram avaliadas. Como resultado foi constatado que o ARPC apresenta melhor desempenho nos concretos produzidos com o CP II Z-40 RS, principalmente, na idade de 84 dias. Os concretos com a adição do ARPC apresentaram melhor desempenho no percentual de recuperação da resistência à compressão, menores valores no índice de vazios, absorção total, absorção por capilaridade e migração de íons cloretos. A microestrutura apresentou cristais típicos de concretos autocicatrizantes como etringita e carbonato de cálcio.

PALAVRAS-CHAVE: *concreto, durabilidade, autocicatrização, permeabilidade, cristalização.*

MAPPING OF THE PEDOLOGICAL POTENTIAL OF THE PARAÍBA STATE FOR THE CULTIVATION OF SUGAR CANE (*Saccharum spp*)

ABSTRACT: Concrete has low cracking strength which allows liquids and aggressive agents to penetrate the matrix. Self-healing is the ability of concrete to repair small cracks spontaneously, without any external intervention, it is an alternative for the prevention and treatment of cracks. The objective of this study is to evaluate the effects of the crystallization porosity reducing additive (ARPC) on the durability of concrete produced with materials from the city of Manaus, through experimental research, analyzing autogenous healing. Four concretes were produced with a fixed water/cement ratio of 0.55, addition of ARPC and cements, CII Z-40-RS and CP II E-32 were used. The effectiveness of healing was evaluated by the compressive strength at 84 days of concrete with micro-cracks caused by breaking load of 100% and 90% after 28 days of curing. The physical properties of: void ratio, total absorption, capillary absorption, chloride ion migration and concrete microstructure were also evaluated. As a result, it was found that ARPC presents better performance in concretes produced with CP II Z-40 RS, mainly at the age of 84 days. The concretes with the addition of ARPC showed better performance in the percentage of recovery of compressive strength, lower values in the void index, total absorption, absorption by capillarity and migration of chloride ions. The

microstructure showed typical crystals of self-healing concretes such as ettringite and calcium carbonate.

KEYWORDS: *concrete, durability, self-healing, permeability, crystalline admixtures.*

INTRODUÇÃO

O concreto é o material de construção mais utilizado no mundo, principalmente, em função de suas características como a alta resistência à compressão e baixo custo, quando comparado aos demais materiais construtivos. Porém, sua baixa resistência à tração torna-o suscetível à formação de fissuras, onde estas podem ocorrer em qualquer fase de sua vida, sendo originárias de vários fatores como carregamento estrutural excessivo, retração por secagem, exposição ambiental severa, procedimentos de construção inadequados e efeitos térmicos. Tais fissuras são um dos principais obstáculos para a durabilidade do concreto, pois tornam-se portas de entrada para agentes nocivos como cloretos e sulfatos, assim como, aumentam de forma significativa sua permeabilidade. A penetração de agentes agressivos nas fissuras e estrutura porosa do concreto é a causa da redução da durabilidade de um elemento estrutural. O que justifica a busca por formas de produzir concretos com microestrutura mais densa e menos permeáveis, como o uso de adições minerais.

A autocicatrização também pode ser uma alternativa para garantia da durabilidade em estruturas de concreto. Segundo Muhammad e Shafaghat, et al., (2016), Zhang e Zheng et al., (2020) o concreto autocicatrizante refere-se ao composto de concreto com a capacidade de reparação de pequenas rachaduras automaticamente, sem nenhum diagnóstico externo ou intervenção humana. De acordo com Oliveira (2019), Lev, Chen (2014) e De Rooij (2013) os seguintes conceitos são utilizados para melhor categorizar este fenômeno de cicatrização:

- Autocicatrização: envolve a recuperação contra ações mecânicas, com restauração das propriedades após o fechamento das fissuras;
- Autoselamento: recuperação contra ações ambientais, com fechamento de fissuras;
- Autógeno: processo de recuperação que utiliza componentes genéricos ou originais da mistura;
- Autônomo: processo de recuperação que usa componentes externos ou materiais de engenharia, que não são originais da mistura.

Assim, a autocicatrização do concreto pode ser dividida em duas classes: a cicatrização autógena e a autônoma. A cicatrização autógena é originada de forma natural no material cimentício, enquanto a cicatrização autônoma necessita de um gatilho para a ativação do processo (PANG et al., 2016; SIDIQ; GRAVINA; GIUSTOZZI, 2019; TAKAGI, 2013; TANG; KARDANI; CUI, 2015; VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013; ZHANG et al., 2020). A eficiência dos dois mecanismos pode variar com base nas características gerais dos materiais, da matriz cimentícia, na aplicação e finalidade da estrutura.

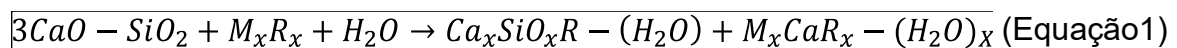
O uso de aditivos redutores de permeabilidade por cristalização pode aumentar a durabilidade de materiais à base de cimento, especialmente quando estes são expostos a ambientes agressivos, promovendo a autocicatrização (DE BELIE et al., 2018; FERRARA; KRELANI; CARSANA, 2014; FERRARA; KRELANI; MORETTI, 2016; ROIG-FLORES et al., 2016). São a base de materiais cristalinos, os quais tratam-se produtos químicos de propriedades ativas, onde a natureza hidrofílica destes faz com que a ocorra o aumento da densidade do C-S-H ou também geram depósitos que provocam o bloqueio dos poros do concreto para impedir à penetração da água.

Os aditivos cristalizantes classificados como um tipo especial de aditivos redutores de permeabilidade possuem a seguinte denominação no meio acadêmico: Permeability-Reducing Admixtures (PRAs). De acordo com estabelecido pelo o Comitê ACI 212.3R (2016), são duas categorias: aditivos redutores de permeabilidade submetidos às condições não hidrostáticas (PRAN) e aditivos redutores de permeabilidade sob pressões hidrostáticas (PRAH). Os PRAH (*waterproofing admixtures*) são recomendados para prevenir a passagem de água e selar fissuras. Por sua vez, os aditivos PRAN (*dampproofing admixtures*) são recomendados para retardar o ingresso e passagem de água pelo concreto, seja na forma líquida ou vapor, em condições de pressões menos severas por ações capilares, tornando a superfície do concreto repelente à água.

Os aditivos cristalizantes encaixam-se na categoria PRAH e são hidrofílicos que reagem facilmente com a água, enquanto os produtos repelentes à água encaixam-se entre os PRAs que ao contrário dos produtos PRAH são hidrofóbicos. A reação dos produtos químicos do aditivo cristalino

nas misturas cimentícias ocorrem na presença da umidade, em virtude na natureza hidrofílica do aditivo, o suprimento de água é fundamental para a ocorrência das reações de cristalização. De acordo com Roig-Flores (2016) e Roig-Flores et al; (2015) o comportamento desses produtos ainda é parcialmente desconhecido, segundo relatório da ACI TC 212 os compostos que reagem com estes aditivos são silicatos tricálcicos, enquanto Sisomphon; Copuroglu e Koenders (2012) indicam o hidróxido de cálcio como reativo. O consenso é que destas reações são formados produtos cristalinos capazes de preencher os poros e fissuras do concreto e assim tornar o concreto menos permeável à penetração de água e outros líquidos agressivos. As formações cristalinas produzidas pelo aditivo tornam-se uma parte permanente da matriz cimentícia (GARCÍAVERA et al., 2018; HODUL; ŽIŽKOVÁ; BORG, 2020; OLIVEIRA, 2019; SISOMPHON; COPUROGLU; KOENDERS, 2012).

A cristalização de acordo com a definição proposta pelo Comitê ACI 212.3R (2016) ocorre conforme descreve a Equação 1, em que um promotor cristalino (M_xR_x) reage com os silicatos tricálcicos e a água, isso resulta na formação de CSH mais denso e um precipitado ($M_xCaR_x-(H_2O)$) capaz de bloquear os poros da matriz. Esse processo foi estudado por diversos pesquisadores (DE BELIE et al., 2018; FERRARA; KRELANI; MORETTI, 2016; GARCÍA-VERA et al., 2018; HODUL; ŽIŽKOVÁ; BORG, 2020; OLIVEIRA, 2019; ROIGFLORES et al., 2016).



Estes aditivos não são apenas eficientes no bloqueio de poros, como também tem a capacidade de resistir a condições hidrostáticas e selar fissuras quando ativados por umidade. Como produto de reação, formam CSH modificado e dependendo do promotor cristalino, formam um precipitado a partir de moléculas de água e cálcio (DE BELIE et al., 2018; ESCOFFRES; DESMETTRE; CHARRON, 2018; FERRARA; KRELANI; MORETTI, 2016; NASIM; DEWANGAN; DEO, 2020a). Estas características podem contribuir para a recuperação das propriedades mecânicas do concreto, em função das condições de exposição e dos mecanismos de cicatrização ativados (FERRARA; KRELANI; MORETTI, 2016).

As reações de “cristalização”, que se propagam através do concreto consomem a umidade presente no concreto, porém, também podem sofrer ativação retardada, à medida que o material entrar em contato com a água novamente. Este fator é importante no preenchimento de fissuras, mesmo em idades mais avançadas do concreto (FERRARA; KRELANI; CARSANA, 2014).

O emprego de tecnologias autocicatrizantes engloba três parâmetros: custo; sustentabilidade e inovação. O prolongamento da vida útil da estrutura, especialmente em condições ambientais de elevada agressividade, implica em menores intervenções e reduções de investimentos financeiros diretos e indiretos devido a falha prematura do material cimentício. Além de diminuir a demanda por matérias primas, o consumo de energia e a emissão de gases do efeito estufa. O processo de cicatrização é ainda mais vantajoso se estiver associado à recuperação das propriedades mecânicas. Embora os materiais com propriedades cicatrizantes demandem maiores custos iniciais, a ausência de intervenções ao longo do tempo pode resultar em custos inferiores as estruturas convencionais ou de alto desempenho.

Os insumos disponíveis na região merecem atenção especial, pois o conhecimento destes é fundamental para uma dosagem racional e dos parâmetros que serão atendidos na questão da classe de agressividade, por exemplo. Apesar dos avanços da tecnologia do concreto nas últimas décadas, ainda é um grande desafio produzir concretos menos permeáveis, mesmo em regiões do país com acesso aos mais diversos insumos como agregados graúdos, miúdos, naturais ou artificiais, cimentos de diversas classes, além dos aditivos. No Estado do Amazonas, profissionais locais são desafiados a produzir concreto com os insumos disponíveis, uma vez que o acesso a variedades destes é restrita devido aos custos de extração, processamento e logística de transporte que por conseguinte impactam significativamente no preço final do produto. A restrição destes insumos diz respeito principalmente aos agregados, como alternativa tem sido utilizados o seixo rolado ou simplesmente seixo, extraído, em sua grande maioria, de jazidas localizadas nos rios Aripuanã, Japurá, Uatumã, Madeira, Solimões e Juruá. Esses agregados são retirados dos leitos desses rios e transportados por via fluvial até Manaus. O agregado miúdo, areia, também é extraído do leito dos rios da região e possuem características distintas de acordo com a área de exploração.

Em função disso, é importante ressaltar uma iniciativa conjunta entre o Instituto Brasileiro de Impermeabilização (IBI) e o Instituto Brasileiro de Concreto (IBRACON), o CT-501: Comitê Técnico de Estanqueidade das Estruturas de Concreto, criado para promover debates, pesquisas e o desenvolvimento desta área.

Dessa forma, a presente pesquisa tem como objetivo geral avaliar os efeitos do aditivo redutor de porosidade por cristalização (ARPC) na durabilidade de concretos produzidos com materiais da cidade de Manaus, analisando a cicatrização autógena.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em três etapas, e trata-se de um programa experimental para alcançar o objetivo geral de avaliar os efeitos do aditivo redutor de porosidade por cristalização (ARPC) na durabilidade de concretos produzidos com materiais da cidade de Manaus. A Etapa 1 foi realizada a caracterização dos materiais para a produção do concreto autocicatrizante, por meio de análises físicas dos materiais, identificando-se os parâmetros de dosagem. Na Etapa 2 foi realizada a avaliação do efeito do aditivo ARPC e do tipo de cimento na recuperação das propriedades mecânicas do concreto autocicatrizante, por meio de ensaio de resistência a compressão de concretos pré-fissurados aos 28 dias e rompidos aos 84 dias, analisando-se o desempenho em comparação ao concreto sem aditivo. A Etapa 3 consistiu na avaliação do efeito do aditivo ARPC e do tipo de cimento na durabilidade do concreto autocicatrizante, por meio de ensaio de absorção total, capilar e migração de íons cloretos, analisando-se a formação de compostos resultantes da autoregeneração por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

2.1 Caracterização dos materiais e produção do concreto Autocicatrizante com ARPC

Foram utilizados dois tipos de cimento Portland em função de sua disponibilidade no mercado da cidade de Manaus, o cimento com escória de alto forno (CP II-E 32) produzido pela Votorantim Cimentos e o cimento pozolânico (CP II - Z 40 RS) produzido pela Cimentos MIZU. A Figura 1 apresenta a distribuição granulométrica dos cimentos utilizados, onde é possível observar a semelhança entre as curvas granulométricas. Os parâmetros das curvas D_{10} , D_{50} e D_{90} dos cimentos o CP II-E-32 e CP II Z- 40 RS são, respectivamente: D_{10} de 3,12 e 3,51 μm , D_{50} de 16,00 e 17,08 μm e D_{90} de 54,24 e 44,43 μm , respectivamente.

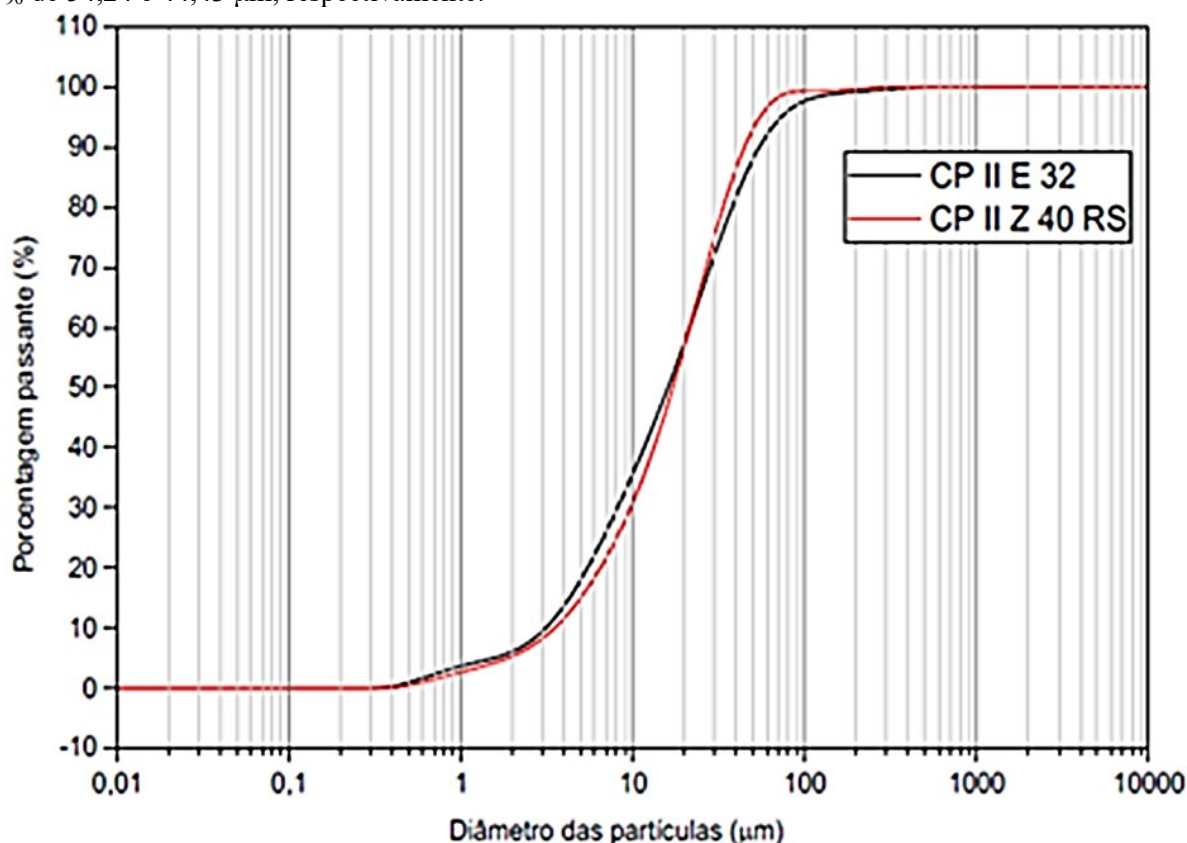


Figura 1: - Curva granulométrica dos cimentos (AUTOR, 2020)

Os agregados graúdos e miúdos utilizados foram a areia e seixo rolado provenientes do Rio Japurá, adquiridos em comércio local. Foram determinadas as propriedades físicas dos agregados e estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características dos Agregados.

Propriedades	Agregado miúdo	Agregado graúdo
Módulo de finura	2,18	6,18
Dimensão máxima (mm)	1,20	19,0
Massa específica (g/cm ³)	2,64	2,60
Massa unitária solta (kg/cm ³)	-	1970
Massa unitária compacta (kg/cm ³)	-	2010
Teor de material pulverulento (%)	-	0,23
Absorção (%)	-	1,08

O redutor de permeabilidade por cristalização (ARPC) utilizado na pesquisa é à base de cimento Portland e compostos químicos com propriedades ativas, que atua como agente cristalizante. É alcalino e não-tóxico. Quando misturado com a água de amassamento dá uma coloração “amarelo-fluorescente” no concreto, devido a existência de um rastreador químico existente em sua composição, sensível a radiação ultravioleta. Em função da patente do fabricante o nome do produto e algumas de suas características não poderão ser divulgadas. O material é comercializado em forma de pó. A distribuição granulométrica do ARPC foi determinada em granulometro à laser na Companhia de Pesquisas dos Recursos Minerais (CPRM), apresenta na Figura 12. Os parâmetros das curvas D₁₀, D₅₀ e D₉₀ são 6,23; 26,46 e 250,18 µm.

O aditivo usado na pesquisa é fabricado pela empresa GCP Technologies, conhecido comercialmente pelo nome ADVA cujo teor de sólidos é 25,39%. O uso do aditivo superplastificante à base de policarboxilato foi necessário para obtenção a trabalhabilidade do concreto desejada.

3.2 Produção e avaliação dos concretos

A resistência do concreto de referência adotado foi de 25 MPa. A Tabela 2 apresenta as porcentagens de ARPC sobre a massa de cimento utilizada nas amostras produzidas.

Tabela 2 – Porcentagem do catalisador cristalino nas amostras

CONCRETOS	Tipo de cimento	% de catalisador cristalino
AM 1 – CARPC	CP II Z – 40RS	0,8
AM 2 – SARPC	CP II Z – 40RS	0
AM 3 – CARPC	CP II E – 32	0,8
AM 4 – SARPC	CP II E – 32	0

O consumo de cimento de 314,0 kg/m³ foi e a relação água/cimento de 0,55 foram fixados para todos os traços, assim como o abatimento de 14 ± 2 cm. A partir da definição dos percentuais do catalisador cristalino foram estabelecidos 4 diferentes traços, em função do tipo de cimento e da utilização do redutor de permeabilidade. A composição padrão destes traços é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Composição dos traços utilizados na pesquisa

Materiais	Concreto de Referencia	Concreto com aditivo
Cimento (CP II - 40RS e CP II E - 32) (Kg/m ³)	314	314
Água (l)	173	173
Agregado miúdo (areia) (kg/m ³)	701	701
Agregado graúdo (seixo) (kg/m ³)	1195	1195
Aditivo superplastificante (kg/m ³)	2,5	2,5

Redutor de permeabilidade por Cristalização (kg/m ³)	0	2,5
---	---	-----

Os concretos foram produzidos em sala climatizada a $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, utilizando uma betoneira com capacidade de trabalho de 100 litros. Para a produção dos concretos foram adotados os seguintes procedimentos: Primeiramente, foi adicionado o agregado graúdo (seixo), o agregado miúdo (areia) e metade da água de amassamento, misturando por alguns minutos e em seguida o cimento e o catalisador cristalino com o restante da água de amassamento. A determinação do abatimento, executou-se a moldagem dos corpos de prova cilíndricos em acordo com a ABNT NBR 5738 (ABNT, 2019). O adensamento do concreto foi realizado de forma manual com haste metálica com 12 golpes em 2 camadas. Após a moldagem, os corpos de prova foram cobertos por uma manta úmida para impedir a perda de água para o meio externo. Após 24 horas, os corpos de prova foram retirados dos moldes, identificados e transferidos para um tanque onde foram mantidos em cura até a idade de realização.

3.3 Avaliação da recuperação mecânica e durabilidade do concreto autocicatrizante com ARPC

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados no laboratório da empresa Konkrex Engenharia de Concretos seguindo os procedimentos descritos na ABNT NBR 5739: Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos (ABNT, 2018), com a utilização de corpos-de-prova de $\text{Ø}100 \times 200 \text{ mm}$, os corpos de prova tiveram suas superfícies capeadas com enxofre para que a carga fosse uniformemente distribuída e permaneceram em cura úmida até a idade de ensaio. A prensa utilizada, foi da marca EMIC, modelo PC 200 CS, com capacidade máxima de 2000 KN e taxa de carregamento de 500mm/min. O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018) foi realizado em três grupos distintos. O primeiro consistiu no ensaio de resistência à compressão axial com 100% da carga de ruptura aos 28 dias de cura dos concretos produzidos. O segundo consistiu no ensaio de resistência à compressão axial com carregamento, aos 28 dias estes concretos foram pré-carregados com 90% da carga de ruptura média obtida para o primeiro grupo, de modo a gerar uma rede de microfissuras, e posteriormente submetidos à cura em tanque de água pelo período de 56 dias para ativar o mecanismo de cicatrização do aditivo redutor de permeabilidade por cristalização e serem submetidos a um terceiro ensaio de resistência à compressão axial desta pesquisa, com 100% da carga aos 84 dias de idade. Este procedimento de pré-fissuração dos concretos foi adotado em pesquisas de Moreira (2016), Takagi, Lima e Helene (2014) e Takagi (2013). De acordo com Moreira (2016) este método utilizado no terceiro lote de ensaios tem a finalidade de avaliar o percentual de recuperação mecânica dos concretos a partir do mecanismo de autocicatrização do ARPC. Foram utilizados 3 corpos de prova para cada concreto ensaiado.

As imagens por microscopia eletrônica de varredura foram obtidas no Laboratório Temático de Microscopia Óptica e Eletrônica (LTMOE) do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) com a utilização de um equipamento modelo Vega3 SEM®, da Tescan, à uma tensão de aceleração de 15 kV. As amostras foram obtidas a partir de fragmentos da parte interna das amostras submetidas ao ensaio de resistência à compressão aos 84 dias de idade e rompidas com 100% da carga estimada, em seguida passaram pelo processo de metalização onde receberam uma fina camada de ouro na superfície a ser observada. Este ensaio foi realizado com o objetivo de verificar o processo de autocicatrização do concreto no estado endurecido.

O ensaio de absorção total foi realizado em amostras com a idade de 84 dias, no Laboratório de Materiais da Universidade do Estado do Amazonas- UEA, foram seguidos os procedimentos descritos na ABNT NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Foram utilizados 3 corpos de prova por amostra. Após a retirada do tanque de cura e retirado o excesso de umidade com um pano seco, as amostras foram colocadas em estufa por 72 horas a temperatura de $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$, com seu peso sendo aferido a cada 24 horas com o objetivo de verificar a constância da massa das amostras. Concluída a etapa anterior as amostras foram imersas em água a uma temperatura de $(23 \pm 2^{\circ}\text{C})$ e foram mantidas durante 72 h nessa condição, sendo suas massas aferidas a cada 24 horas para verificação da constância de peso. Completada a etapa de saturação em água à temperatura de $(23 \pm 2^{\circ}\text{C})$, as amostras foram colocadas em um recipiente cheio de água, que foi progressivamente levado à ebulição. A ebulição foi mantida por um período de 5 h, onde manteve-se aproximadamente constante o volume da água. Ao final

deixou-se a água esfriar naturalmente até a temperatura de $(23 \pm 2^\circ\text{C})$. Posteriormente foi realizada a determinação da massa com auxílio de balança hidrostática (mi).

O ensaio de determinação da absorção de água dos corpos-de-prova por meio da ascensão capilar foi realizado no laboratório da empresa Konkrex Engenharia de Concretos e seguiu os procedimentos estabelecidos na ABNT NBR 9779 (ABNT, 2012) na idade de 84 dias. Após retirados do tanque de cura, os corpos de prova secaram ao ar e em seguida foram depositados para secagem em estufa à temperatura de $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ até constância de massa (ms). Concluída a etapa de secagem em estufa, os mesmos foram pesados e posicionados em um recipiente preenchido com água, de modo que o nível de água permanecesse constante a (5 ± 1) mm acima de sua face inferior, evitando a molhagem de outras superfícies. A massa saturada (msat) dos corpos de prova foi determinada com 3 h, 6 h, 24 h, 48 h e 72 h, contados a partir do contato com a água. Após este período, os corpos de prova foram rompidos por compressão diametral, anotando-se a altura da ascensão da água no seu interior e calculado o parâmetro de absorção em g/cm^2 , conforme prescrito na norma.

O ensaio de migração de íons cloretos teve como princípio a aplicação de uma diferença de potencial de 12V entre duas células: uma contendo solução de cloretos (catódica) e a outra contendo água destilada (anódica), entre as quais é colocada a amostra do concreto a ser estudado. O potencial elétrico externo força a passagem dos íons cloretos através da amostra de concreto da primeira para a segunda célula. O aparato utilizado foi adaptado da pesquisa de Santos (2006) A célula anódica foi preenchida com água destilada para evitar a corrosão pela deposição do cloro. A solução utilizada na célula catódica foi composta por cloreto de sódio (NaCl) a uma concentração de 1 M. Foram utilizadas células de PVC constituídas por um flange de 100 mm, um “T” rosqueável, com uma tampa superior para realização de medidas e uma lateral, contendo o eletrodo, devidamente selada para evitar a perda da solução. Os corpos de prova foram colocados na interface das duas células, sendo também colados com adesivo à base de silicone e auxílio de um par de abraçadeiras. Assim, a troca iônica entre as células deu-se somente por meio da área exposta da superfície do corpo de prova. A tensão de 12 Volts foi aplicada ao sistema por meio de eletrodos posicionados nas extremidades do sistema, que estavam conectados a fios de cobre provenientes de uma fonte de tensão controlada. A condutividade elétrica da solução da célula anódica, inicialmente sem cloretos, foi analisada diariamente durante todo o ensaio. Assim, obteve-se a evolução da condutividade elétrica da solução utilizando o Condutivímetro Digital Portátil tipo caneta modelo CD- 880 da marca Instrutemp e, em seguida, estes valores de condutividade obtidos foram convertidos em quantidade de NaCl em mol (M). A condutividade foi verificada a uma temperatura de 25°C e uma variação de 2% nos valores deve ser considerada para uma variação de 1°C .

Os corpos de prova utilizados foram os de dimensões 50mm x 100mm, que foram fixados em um torno e seccionados em “bolachas” de 10mm de espessura. Após cortados, tiveram suas laterais impermeabilizadas com silicone, a fim de, impedir a migração da umidade para o exterior do aparato, o que poderia prejudicar o desempenho do ensaio.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 são apresentados os valores de resistência à compressão determinada nas idades de 28 e 84 dias para os concretos produzidos e seus respectivos desvios padrão, nela constam 3 séries de dados que correspondem as seguintes características do concreto:

- 28-90%: concreto com idade de 28 dias, pré-carregado com 90% da carga de ruptura estimada para a criação de uma rede de microfissuras;
- 28-100%: concreto com idade de 28 dias, submetido a 100% da carga de ruptura
- 84-100%: concreto com idade de 84 dias, pré-fissurado com 90% da carga de ruptura aos 28 dias e rompido com 100% da carga aos 84 dias.

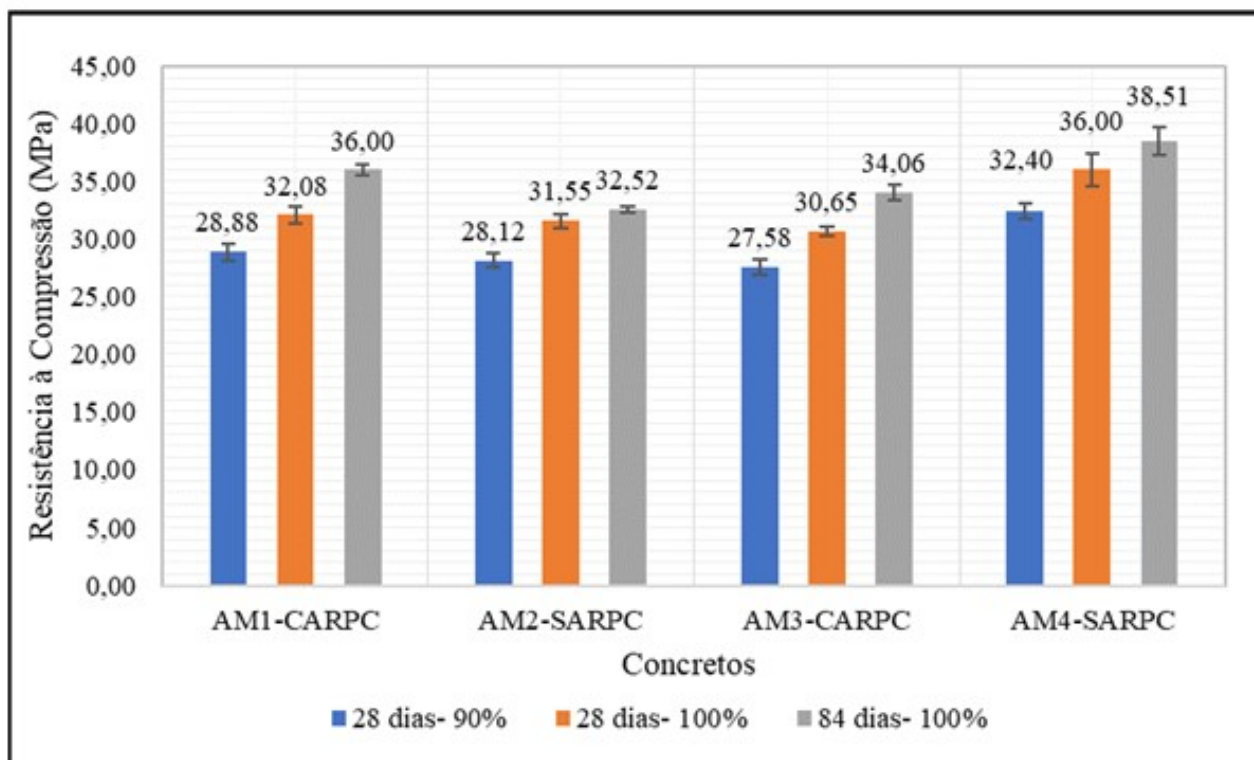


Figura 2 - Resistência à compressão dos concretos produzidos

Para análise da qualidade dos lotes de concreto produzidos foi utilizado o coeficiente de variação dos concretos, onde foram obtidos os valores entre 0,90% e 4,18%. De acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018) a avaliação da eficiência de operações de ensaio é realizada em função do coeficiente de variação, os concretos com este fator menor que 3% são considerados excelentes e entre 3 e 4% são considerados muito bons, estes são os valores predominantes nos concretos produzidos. Exceto na amostra AM4-SARPC aos 28 dias de idade e 100% da carga de ruptura que atingiu o valor de 4,18%, com o conceito de bom de acordo com a referida norma. Os resultados apresentados na Figura 2 foram analisadas por meio de análise de variância (ANOVA) para um nível de significância de 5%. Foram realizadas 4 análises comparativas, a primeira comparando-se os concretos produzidos com o CP II Z- 40 RS, a segunda com o CP II E -32. A terceira realizou-se a comparação entre concretos contendo o ARPC e na quarta foram comparados os concretos sem a adição do ARPC. Para a análise estatística da resistência à compressão dos concretos foi adotado um nível de significância de (α) de 5% no teste de hipóteses, considera-se primeiramente a hipótese nula de que todas as médias são iguais e a hipótese alternativa de que pelo menos uma média é diferente das demais. Portanto, se $p\text{-valor} < \alpha$ a hipótese nula deve ser rejeitada. Na Tabela 4 apresenta-se a análise para as misturas AM1-CARPC e AM2-SARPC nas idades e modos de carregamento utilizados.

Tabela 4 – Análise ANOVA para os concretos produzidos

Concretos	Resistência à compressão aos 28 dias (90% da carga)	Resistência à compressão aos 28 dias (100% da carga)	Resistência à compressão aos 84 dias (100% da carga)
AM1- CARPC	29,30	32,47	36,48
AM2- SARPC	28,56	32,19	32,83
Valor-p	0,2510	0,61141	0,00034
AM3- CARPC	28,29	31,12	34,78
AM4- SARPC	33,18	35,15	37,54
Valor-p	0,00091	0,00996	0,02848
AM1- CARPC	29,30	32,47	36,48
AM3- CARPC	28,29	31,12	34,78
Valor-p	0,15395	0,05463	0,02095

AM2- SARPC	28,56	32,19	32,83
AM4- SARPC	33,18	35,15	37,54
Valor-p	0,00995	0,03031	0,00334

Os resultados apresentados na Tabela 4 mostram que aos 28 dias com 90% e 100% da carga de ruptura os concretos são estatisticamente iguais. Verifica-se que aos 84 dias ocorre diferença entre os dois concretos, pois p-valor (0,00034) < 0,05. Dessa forma, para identificar o concreto que apresenta diferença foi utilizado o teste de Tukey. Verificou-se que a amostra AM2-SARPC difere da amostra AM1-CARPC, sendo a resistência a compressão desta 10% menor em relação ao concreto com a adição de ARPC. Quanto aos resultados para os concretos produzidos com o CP II E-32, observa-se que p-valor é menor que o nível de significância em todas as idades e condições de ensaio, assim há diferença estatística significativa nestes concretos. Por meio do Teste de Tukey foi possível verificar que a amostra sem ARPC, AM4-SARPC possui resistência à compressão elevada em relação a AM3-CARPC, cerca de 17,82% aos 28 dias com 90% da carga e 13% para a mesma idade com a carga em 100%. Além disso, aos 84 dias esta diferença entre os concretos chega a aproximadamente 8%. Para as análises realizadas com os dois concretos produzidos com a adição de ARPC e os dois tipos de cimento da pesquisa não foram observadas aos 28 dias, com 90% e 100% da carga de ruptura, diferenças significativas entre estes concretos, estatisticamente são iguais. Porém, observa-se que aos 84 dias a resistência à compressão do concreto AM1-CARPC, produzido com a CP II Z- 40 RS é cerca de 5% maior em relação a amostra AM3-CARPC, produzido com o CP II-E 32. Nos concretos produzidos sem o ARPC foram identificadas diferenças significativas em todas as idades e condições de ensaio, conforme Tabela 9. A amostra AM4-SARPC destaca-se da amostra AM2-SARPC, cerca de 16,18%, 9,20% e 14,35% maior para as idades de 28 dias com 90% e 100% da carga de ruptura e 84 dias com 100% da carga, respectivamente.

Ao analisar os concretos produzidos com os tipos de cimento utilizados, para o CP II Z-40 RS foi possível verificar que o ARPC conferiu maior resistência à compressão ao concreto, ao contrário do ocorrido com o CP II E-32, uma vez que o concreto sem o ARPC apresentou maior resistência. Nas análises dos efeitos do ARPC nos concretos com os dois tipos de cimento utilizados, o concreto produzido com o CP II Z-40 RS apresentou maior resistência em relação ao CP II E-32. Já para as amostras sem o ARPC destaca-se o CP II E-32. Além disso, observou-se que para todas as amostras aos 84 dias houve ganho de resistência mesmo com a indução prévia de fissuras nos concretos. Este fato pode indicar a possibilidade de atuação do ARPC da recuperação da resistência à compressão dos concretos, nas amostras sem o ARPC este fator deve-se a cicatrização natural das estruturas de concreto, porém de forma mais lenta que em concretos com o ARPC. A Figura 3 apresenta o percentual de ganho de resistência para cada concreto aos 84 dias em relação aos resultados obtidos aos 28 dias com 90% e 100% da carga de ruptura. Observa-se que para ambos os casos as amostras com a adição do ARPC, AM1-CARPC e AM3-CARPC, apresentam maior percentual de ganho de resistência em relação aos concretos sem adição do ARPC. Além disso, verifica-se que o concreto produzido com o CP II Z- 40 RS apresenta maior percentual em relação ao CP II E-32.

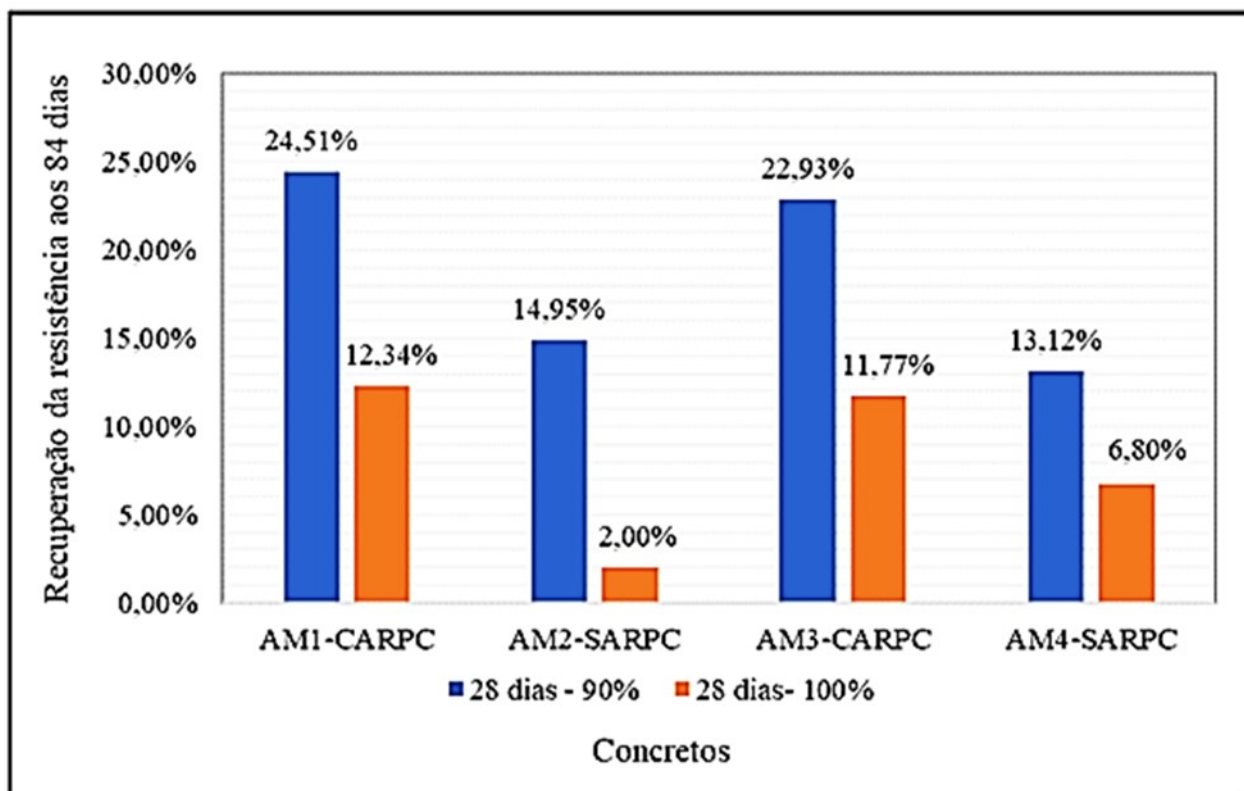
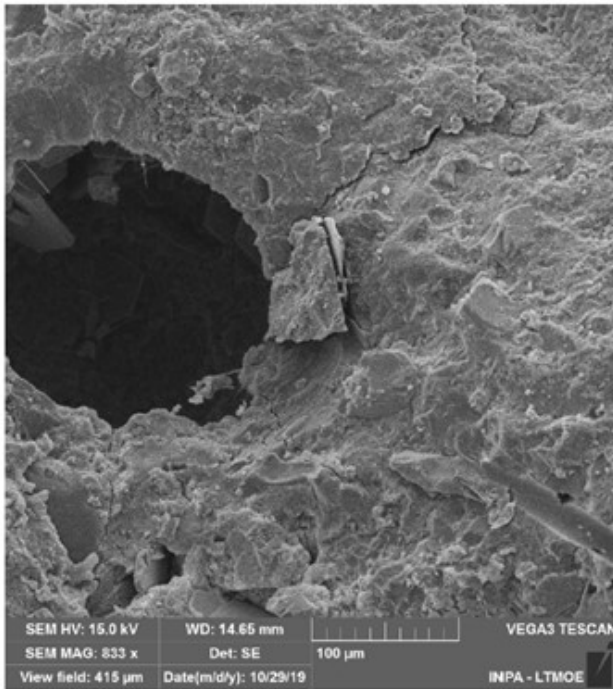


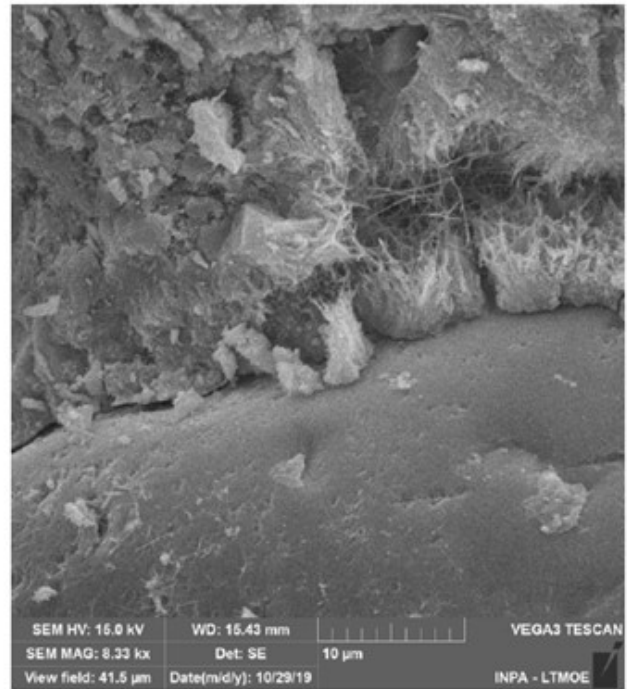
Figura 3 - Gráfico de recuperação da resistência mecânica dos concretos aos 28 dias

O aumento na resistência pode ser atribuído à cicatrização das fissuras pré-existentes e evidenciam o potencial da cicatrização de fissuras do ARPC devido à hidratação das partículas anidras do cimento e principalmente pelo efeito ativador do aditivo cristalino, nas superfícies dessas microfissuras. Esta capacidade de cicatrização dos materiais dependerá não apenas da quantidade de cicatrização das fissuras, mas também dos mecanismos de cicatrização, sejam impulsionados pela hidratação contínua produzindo cristais de CSH mais fortes ou pela carbonatação que resulta em cristais de CaCO_3 mais fracos, pela idade dos produtos de cicatrização (KRELANI; KRELANI; MORETTI, 2016).

As Figuras 4a e 4b apresentam a morfologia da matriz cimentícia da amostra AM1-CARPC, onde pode-se observar que a superfície fraturada é coberta por produtos fibrosos finos. A morfologia desses produtos é compatível com a estrutura cristalina de produtos típicos de cicatrização. Observa-se que estes produtos sugerem a presença de etringita. Estes cristais podem preencher os poros nas amostras e tornar a estrutura mais compacta, razão pela qual o aditivo redutor de permeabilidade por cristalização aumenta a resistência à compressão e reduz a permeabilidade das matrizes cimentícias (LI et al., 2019).



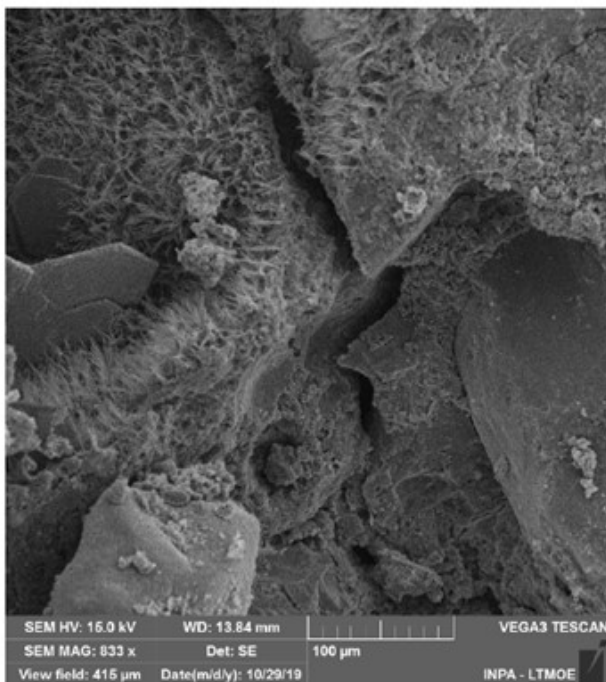
(a)



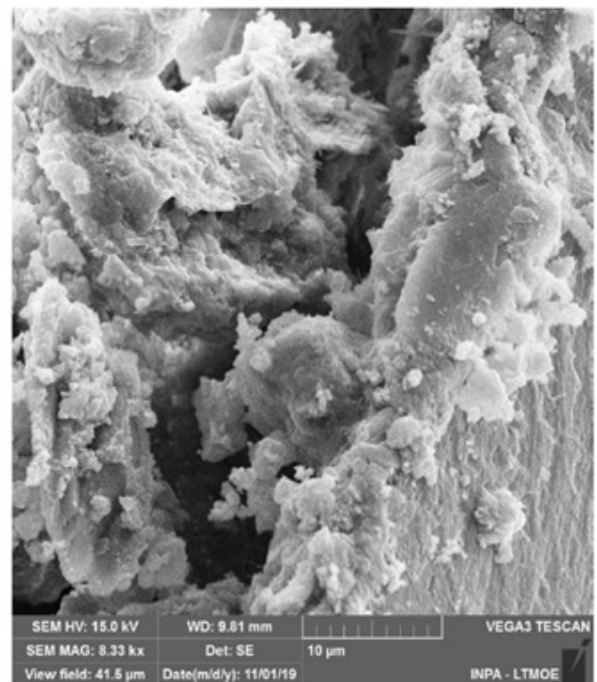
(b)

Figura 4 – Amostra AM1-CARPC com aproximação em ordem de grandeza (a) de 100 μm e (b) de 10 μm

As Figuras 5^a e 5^b apresentam a morfologia do concreto AM2-SARPC, é possível observar pelas imagens a presente do carbonato de cálcio nas bordas das fissuras, resalta-se que as amostras não contém aditivos e conforme descrito por Ferrara; Krelani e Carsana (2014) mesmo concretos comuns podem ter alguma capacidade de cicatrização quando expostos a imersão em água durante a cura, caso das amostras analisadas. Nas Figuras 6a a 6b podem ser observados produtos fibrosos que indicam a presença de CSH e partículas com formato hexagonal indicando a presença do hidróxido de cálcio.



(a)



(b)

Figura 5 - Amostra AM2-SARPC com aproximação em ordem de grandeza (a) de 100 μm e (b) de 10 μm

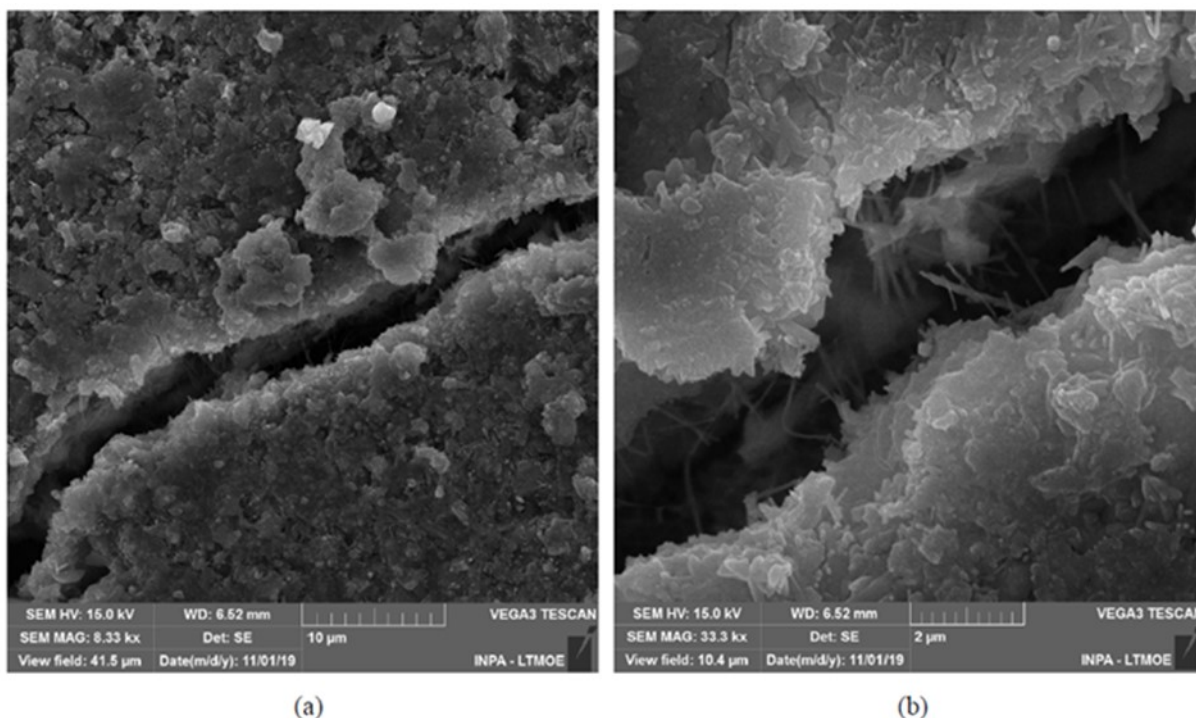


Figura 6 - a) Amostra AM3-CARPC com aproximação de 10 μm e b) Amostra AM3-CARPC com aproximação de 2 μm

As figuras 6a e 23b mostram as bordas de uma fissura presente na amostra AM3-CARPC cuja mesmas são preenchidas por cristais de carbonato de cálcio, a presença deste é comum para compostos com a presença de aditivos cristalinos (ESCOFFRES; DESMETTRE; CHARRON, 2018; ROIG-FLORES et al., 2016). Observa-se também ao fundo das fissuras cristais em formato de agulha que indicam a presença de etringita. De acordo com Nasim; Dewangan e Deo (2020b) que cristais em formato de agulha podem ser observados em concretos autocicatrizantes e podem estar relacionados com a recuperação das propriedades mecânicas.

Nas Figuras 7a e 7b apresentam a morfologia do concreto AM4-SARPC, observa-se na Figura 7b a precipitação do carbonato de cálcio na borda da fissura, além de cristais de CSH e etringita.

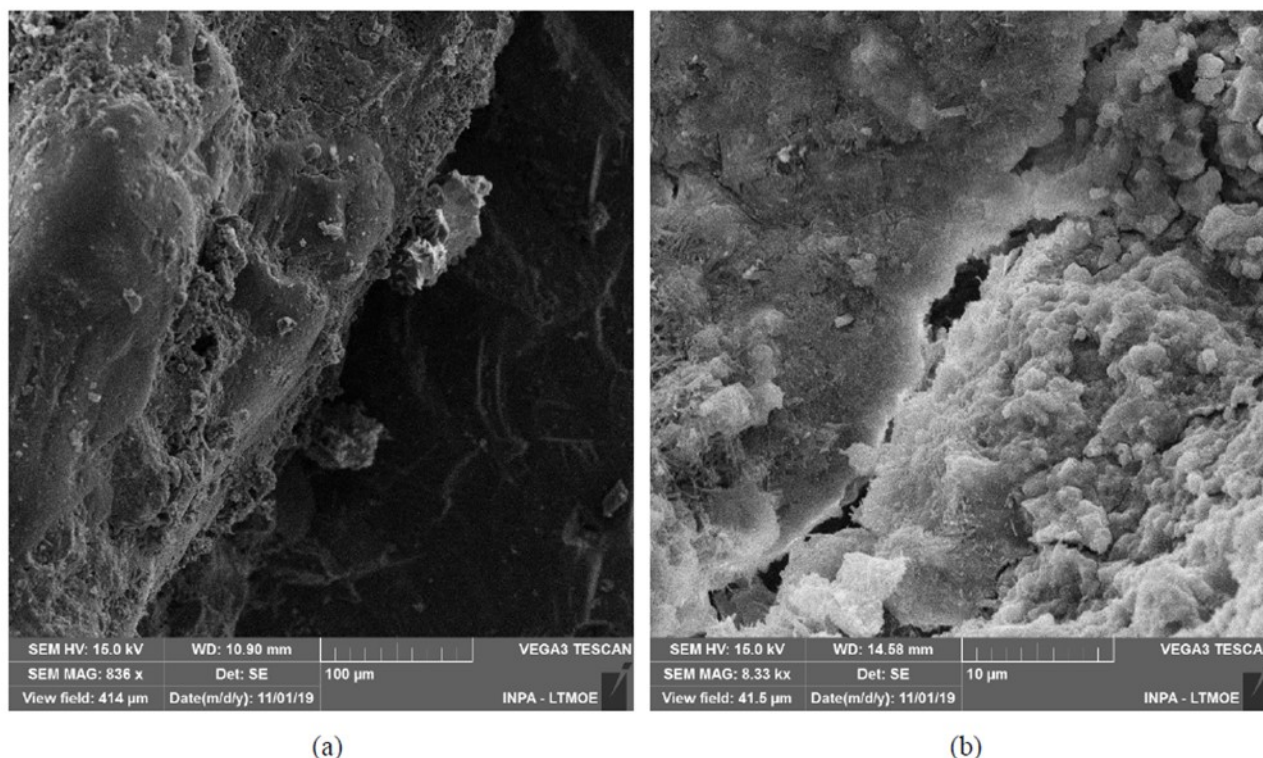


Figura 7 - Amostra AM4-SARPC com aproximação em ordem de grandeza (a) de 100 µm e (b) de 10 µm

Na Tabela 5 estão apresentados os resultados obtidos para o índice de vazios e absorção presente nos concretos aos 84 dias de idade. Foi utilizada a análise de variância Anova para o tratamento dos dados, sendo realizados 4 comparativos. O primeiro e segundo entre o mesmo tipo de cimento com ou sem adição de ARPC, o terceiro e quarto comparativo estão relacionados a presença ou não do ARPC no concreto com os cimentos utilizados.

Tabela 5 – Índice de vazios e Absorção dos concretos aos 84 dias

Amostra	Índice de vazios (%)	Desvio Padrão (%)	Valor-p	Índice de absorção (%)	Desvio Padrão (%)	Valor-p
AM1 – CARPC	6,98	0,83	0,012224676	4,81	0,62	0,017441782
AM2 – SARPC	8,19	0,10		5,67	0,18	
AM3 - CARPC	6,77	0,69	0,281182285	4,66	0,49	0,20767019
AM4 – SARPC	7,35	0,97		5,16	0,72	
AM1 – CARPC	6,98	0,83	0,653033296	4,81	0,62	0,642076527
AM3 - CARPC	6,77	0,69		4,66	0,49	
AM2 – SARPC	8,19	0,10	0,080491795	5,67	0,18	0,144459224
AM4 – SARPC	7,35	0,97		5,16	0,72	

Com o nível de significância de 95% os resultados obtidos mostram por meio de valor-p que não houve diferença significativa entre as comparações com a adição do ARPC nos concretos produzidos com CP II E-32, além disso os resultados de AM1-CARPC e AM3-ARPC produzidos com CP I Z-40 RS e CP II E-32 são estatisticamente iguais, o tipo de cimento não influenciou no índice de vazios nos concretos com adição do ARPC. O mesmo comportamento é observado na comparação entre AM 2-SARPC e AM4-SARPC pois são iguais do ponto de vista estatístico. Foi observada diferença entre as amostras AM1-CARPC e AM2-SARPC, uma vez que o índice de vazios obtido no primeiro concreto é cerca de 15% menor em relação ao concreto sem adição do ARPC. Este fato indica que para este caso houve o selamento das fissuras pré impostas e assim a redução do índice de vazios. Para os dados de índice de absorção aos 84 dias foi utilizada a análise de variância ANOVA

por meio dos dados de valor-p, com um nível de significância de 95%. As comparações realizadas entre os concretos produzidos com o CP II E-32 com e sem ARPC, nas comparações entre os concretos produzidos com os dois tipos de cimento com e sem a presença do ARPC foram obtidos dados estatisticamente iguais, ou seja, sem diferença significativa entre estes. O ARPC não influenciou o índice de absorção na comparação entre AM3-CARPC e AM4-SARPC. Nas comparações entre AM1-CARPC e AM3-CARPC, AM2-SARPC e AM4-SARPC o tipo de cimento e a presença do ARPC não influenciaram de forma significativa o índice de absorção. Verifica que na comparação entre AM1-CARPC e AM2-CARPC, ambos produzidos com o CP II Z- 40 RS há diferença estatística, tendo o primeiro concreto um índice de absorção cerca de 15% menor em relação ao concreto sem adição do ARPC.

Com o objetivo de avaliar, de forma indireta, o volume de poros nos concretos com e sem aditivo, de acordo com o tipo de cimento, realizou-se o ensaio de absorção de água por capilaridade. A Figuras 8 apresentam o comportamento da absorção capilar dos concretos em relação as amostras com e sem adição do ARPC.

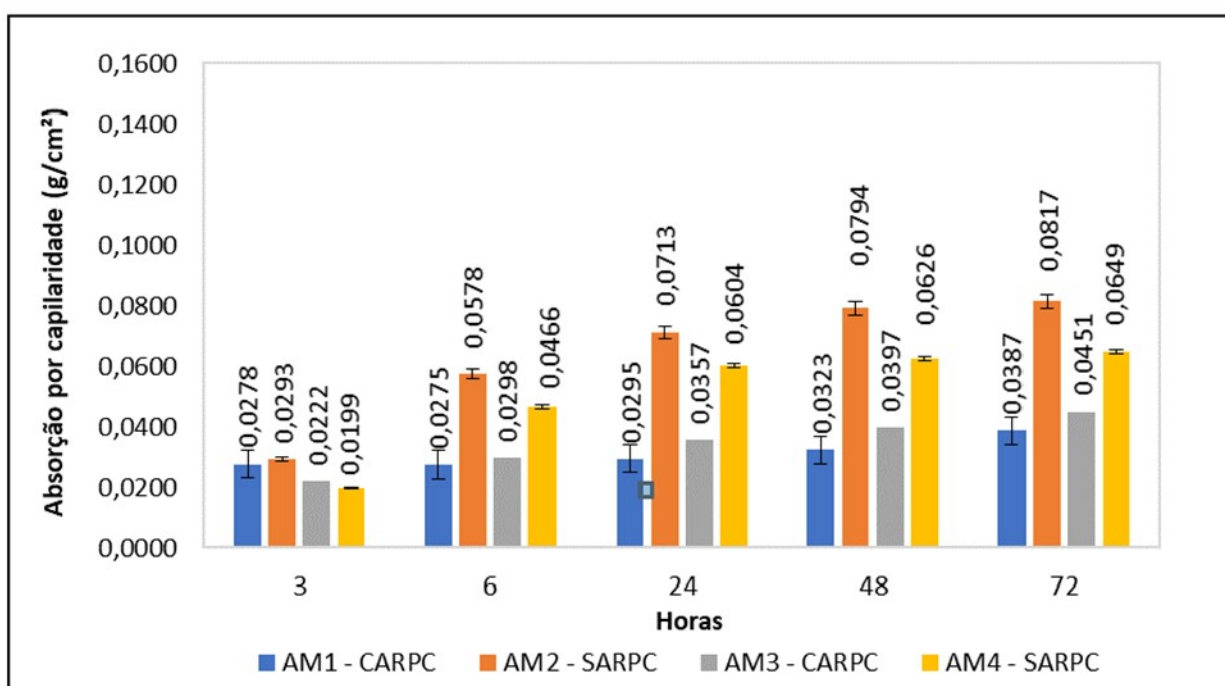


Figura 8 - Absorção de água por capilaridade das amostras produzidas

Observa-se uma baixa porcentagem de absorção de água nos concretos estudados, menor que 0,09% mesmo para as amostras sem adição do aditivo redutor de permeabilidade por cristalização. De modo geral, verifica-se que os traços sem aditivo, AM2-SARPC e AM4-SARPC, apresentam valores de absorção capilar maiores que os demais que contém o aditivo. Destes destaca-se a amostra AM2-SARPC com os maiores valores, ressalta-se que esta amostra utiliza o cimento CP II Z-40-RS. Por sua vez, os traços AM1-CARPC e AM3-CARPC apresentam valores próximos mesmo com diferentes tipos de cimento em sua composição. Observa-se que estes não sofrem grandes variações com o passar das medições no decorrer da execução do ensaio. O que indica a ação do aditivo redutor de permeabilidade por cristalização nestas amostras, uma vez foram ensaiadas aos 84 dias. Este comportamento não é observado nas amostras sem o aditivo, verifica-se variações ao longo das medições, especialmente para a amostra AM2-SARPC. Na Figura 9, são apresentadas as alturas obtidas de ascensão capilar para as amostras analisadas. Nota-se que as misturas com o ARPC possuem grande capacidade em limitar a penetração da água e microfissuras do concreto, sempre com os menores índices ao longo do ensaio longitudinal do corpo-de-prova.

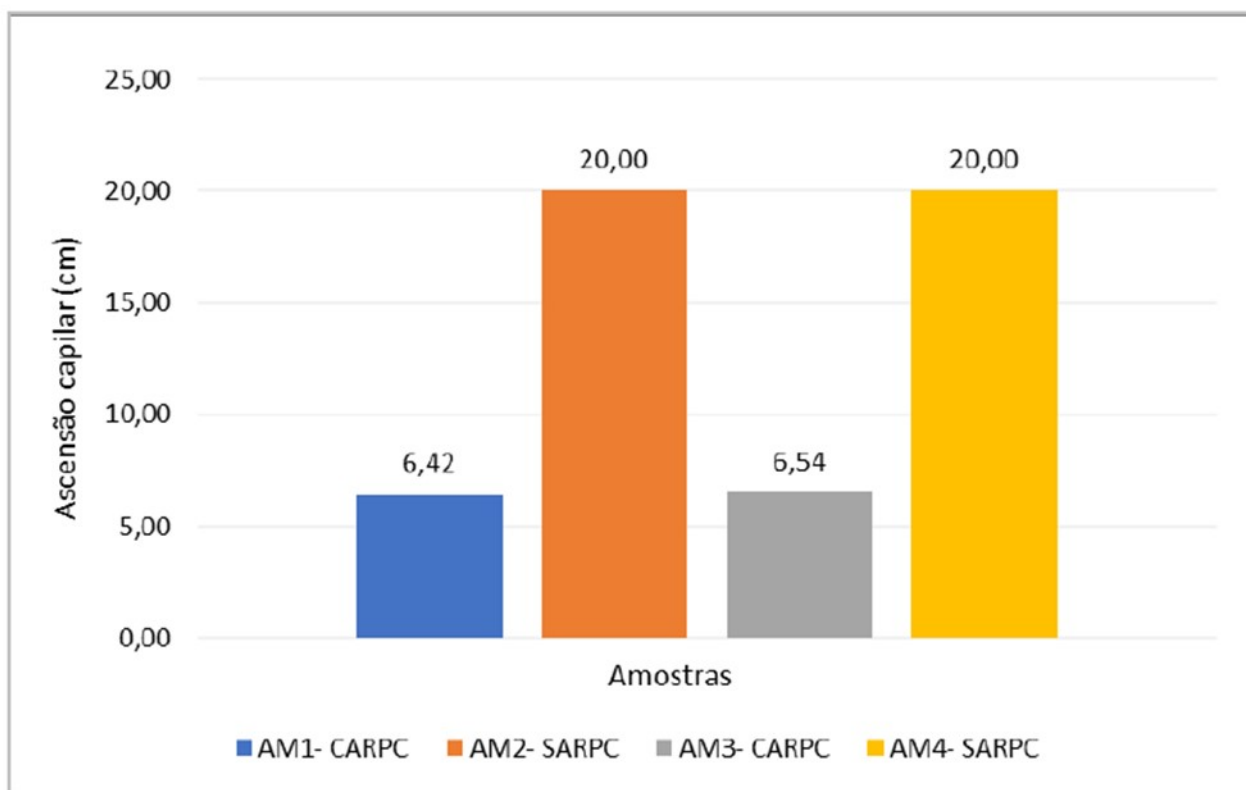


Figura 9 - Ascensão capilar das amostras analisadas

O ensaio de migração de cloretos permite mensurar a capacidade do concreto em proteger a armadura dos agentes agressivos. Utiliza-se de condutividade elétrica medidos ao longo da execução do ensaio de migração de íons cloretos para definição da concentração de íons cloretos. Na Tabela 6 estão apresentados os resultados da variação da concentração de NaCl da célula anódica medidos durante a realização do ensaio.

Tabela 6 – Evolução da concentração de NaCl durante o ensaio

Tempo (h)	AM1- CARPC	AM2- SARPC	AM3- CARPC	AM4- SARPC
24	1,49	1,73	0,72	1,36
48	1,49	1,74	0,84	1,36
72	2,50	3,28	1,13	2,24
96	3,73	5,06	1,27	2,95
120	4,97	6,83	1,41	3,67

Observa-se que a concentração de íons cloretos aumenta com o tempo para todos os concretos estudados, que a tensão elétrica é aplicada, forçando estes íons a migrarem em direção ao pólo positivo do sistema. A durabilidade das estruturas de concreto é muitas vezes reduzida pela corrosão das armaduras, que pode ser induzida pela penetração dos íons cloretos. Estes podem estar presentes nos componentes da mistura do concreto como agregados ou água. Observa-se na Tabela 6 que os concretos produzidos com o CP II Z- 40 RS apresentaram maior concentração de cloretos em relação aos concretos produzidos com o CP II E-32. Medeiros (2014) afirma que para concretos produzidos com diferentes tipos de cimento e com relação a/c fixada, é possível verificar que a composição do cimento influencia na capacidade de migração de íons cloretos. A menor concentração de cloretos nos concretos produzidos com o CP II E-32 pode ser explicada em função

da presença da escória de alto forno na composição do referido cimento, sendo este indicado para utilização em ambientes agressivos.

CONCLUSÃO

Nos concretos produzidos com CP II E-32 o ARPC não exerceu influência na resistência à compressão, sendo esta de menor valor em todas as idades ensaiadas em relação ao concreto sem adição do mesmo.

No comparativo entre os concretos com o ARPC produzidos com os 2 cimentos utilizados o CP II Z-40 RS apresentou melhores resultados aos 84 dias, isso evidencia o potencial de autocicatrização dos concretos com a adição do ARPC, na idade de 28 dias com 90% e 100% da carga de ruptura não foi observada diferença. Nos concretos sem o ARPC com os dois tipos de cimento, o CP II E-32 apresentou melhor desempenho, possivelmente devido este tipo de cimento utilizar escória de alto forno, em sua composição. Nos percentuais de recuperação da resistência aos 84 dias em relação as amostras de 28 dias com 90% e 100% da carga os concretos com a adição do ARPC apresentaram maior recuperação comparando-se aos produzidos sem a adição do mesmo. Na morfologia das amostras analisadas é possível comprovar a formação da cristalização com a presença de produtos fibrosos finos na superfície fraturada, como a etringita e do carbonato de cálcio nas bordas das fissuras. Além destes, foram encontrados o CSH e CH nos concretos. Estes cristais em formato de agulha são característicos de concretos autocicatrizantes e podem estar relacionados com recuperação das propriedades mecânicas.

Os resultados de índice de vazios, absorção, absorção capilar e penetração de ions cloretos reforçam o potencial do aditivo redutor de permeabilidade por cristalização para atuar na cicatrização de fissuras e selamento dos poros do concreto. Como sugestões para trabalhos futuros analisar a química que envolve as reações de hidratação contínua seria uma grande contribuição para a pesquisa, com a utilização de técnicas como FRX, DRX, TG, FTIR para melhor entender a cristalização e cicatrização que ocorre no concreto.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. NBR 5738: **Concreto - Procedimento para Moldagem e Cura de Corpos de Prova**, 9 págs. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. NBR 5739: **Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos de Concreto**, 9 págs. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. NBR 9779: **Argamassa e concreto endurecidos- Determinação da absorção por capilaridade**, 3 págs. Rio de Janeiro, 2012.

CAPPELLARI, E. et al. **Influence of concretes compressive strength on superficial wettability**. Revista Materia, v. 25, n. 1, 2020.

DE BELIE, N. et al. **A Review of Self-Healing Concrete for Damage Management of Structures**. Advanced Materials Interfaces, v. 5, n. 17, p. 1800074, 7 set. 2018.

DE MEDEIROS, M. H. F. et al. **Avaliação da eficiência de sistemas de proteção de superfície para concreto: Absorção de água, migração de cloretos e ângulo de contato**. Revista Materia, v. 20, n. 1, p. 145–159, 2015.

DE ROOIJ, M. et al. **Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials**. 1. ed. [s.l.] Springer Netherlands, 2013.

ESCOFFRES, P.; DESMETTRE, C.; CHARRON, J. P. **Effect of a crystalline admixture on the self-healing capability of high-performance fiber reinforced concretes in service conditions**. Construction and Building Materials, v. 173, p. 763–774, 10 jun. 2018.

FERRARA, L.; KRELANI, V.; CARSANA, M. A “fracture testing” based approach to assess crack healing of concrete with and without crystalline admixtures”. *Construction and Building Materials*, v. 68, p. 535–551, 15 out. 2014.

FERRARA, L.; KRELANI, V.; MORETTI, F. **On the use of crystalline admixtures in cement based construction materials: From porosity reducers to promoters of self healing**. *Smart Materials and Structures*, v. 25, n. 8, p. 084002, 15 jul. 2016.

GARCÍA-VERA, V. et al. **Influence of Crystalline Admixtures on the Short-Term Behaviour of Mortars Exposed to Sulphuric Acid**. *Materials*, v. 12, n. 1, p. 82, 27 dez. 2018.

HODUL, J.; ŽIŽKOVÁ, N.; BORG, R. P. **The influence of crystalline admixtures on the properties and microstructure of mortar containing by-products**. *Buildings*, v. 10, n. 9, p. 146, 1 set. 2020.

LI, L. et al. **Bacterial technology-enabled cementitious composites: A review Composite Structures**. Elsevier Ltd, , 1 out. 2019.

LV, Z.; CHEN, D. **Overview of recent work on self-healing in cementitious materials**. *Materiales de Construcción Inst. de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja*, 1 out. 2014. Disponível em: <<http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/view/1633>>. Acesso em: 22 set. 2020

MEDEIROS JUNIOR, R.A. **Estudo da resistividade do concreto para a proposta de modelagem de vida útil- corrosão das armaduras devido a penetração de íons cloretos**. 244 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Infraestrutura de Aeronáutica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo, 2014.

MOREIRA, M. M. **Efeito do aditivo redutor de permeabilidade em concretos com diferentes tipos de cimento Portland- contribuição aos processos de autocicatrização**. [s.l.] Universidade de Brasília, 2016.

MUHAMMAD, N. Z. et al. **Tests and methods of evaluating the self-healing efficiency of concrete: A review**. *Construction and Building Materials Elsevier Ltd*, , 1 jun. 2016.

NASIM, M.; DEWANGAN, U. K.; DEO, S. V. **Autonomous healing in concrete by crystalline admixture: A review**. *Materials Today: Proceedings*, 3 abr. 2020a.

NASIM, M.; DEWANGAN, U. K.; DEO, S. V. **Effect of crystalline admixture, fly ash, and PVA fiber on self-healing capacity of concrete**. *Materials Today: Proceedings*, 25 abr. 2020b.

OLIVEIRA, A. DE S. **Estudo do potencial de aditivo cristalizante como estimulador de autocicatrização de fissuras de matrizes cimentícias**. [s.l.] UFRJ, 2019.

PANG, B. et al. **Autogenous and engineered healing mechanisms of carbonated steel slag aggregate in concrete**. *Construction and Building Materials*, v. 107, p. 191–202, 15 mar. 2016.

ROIG-FLORES, M. et al. **Effect of crystalline admixtures on the self-healing capability of early-age concrete studied by means of permeability and crack closing tests**. *Construction and Building Materials*, v. 114, p. 447–457, 1 jul. 2016.

ROIG-FLORES, M. et al. **Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments**. *Construction and Building Materials*, v. 86, p. 1–11, 1 jul. 2015.

SANTOS, L. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto.** 2006. 178 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2006.

SIDIQ, A.; GRAVINA, R.; GIUSTOZZI, F. **Is concrete healing really efficient? A review.** Construction and Building Materials Elsevier Ltd, , 30 abr. 2019.

SISOMPHON, K.; COPUROGLU, O.; KOENDERS, E. A. B. **Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive.** Cement and Concrete Composites, v. 34, n. 4, p. 566–574, 1 abr. 2012.

TAKAGI, E. M. **Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto-forno ativado por catalisador cristalino.** São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2013.

TAKAGI, E. M.; LIMA, M.; HELENE, P. **Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto forno ativado por catalisador cristalino.** Revista Concreto & Construções, p. 75–79, 2014.

TANG, W.; KARDANI, O.; CUI, H. **Robust evaluation of self-healing efficiency in cementitious materials - A review.** Construction and Building Materials Elsevier Ltd, 15 abr. 2015.

VAN TITTELBOOM, K.; DE BELIE, N. **Self-Healing in Cementitious Materials—A Review.** Materials, v. 6, n. 6, p. 2182–2217, 27 maio 2013.

WHITE, S. R. et al. **Autonomic healing of polymer composites** Nature. Nature Publishing Group, 15 fev. 2001. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/35057232>>. Acesso em: 24 set. 2020

ZHANG, W. et al. **Self-healing cement concrete composites for resilient infrastructures: A review.** Composites Part B: Engineering Elsevier Ltd, , 15 maio 2020.

ZHANG, W.; WANG, D.; HAN, B. **Self-healing concrete-based composites.** In: Self-Healing. Composite Materials. [s.l.] Elsevier, 2020. p. 259–284.