

A INFLUÊNCIA DE POZOLANA NA MITIGAÇÃO DA CORROSÃO DE ARMADURAS EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

**INFLUENCE OF POZOLANA ON THE MITIGATION OF STEEL
CORROSION IN CEMENT COMPOUNDS**

Marcelo Alexandrino Calado

marcelocalado23@gmail.com

João Manoel de Freitas Mota (Orientador)

mota.joaomanoel@gmail.com

Ronaldo Faustino da Silva (Coorientador)

ronaldofaus@gmail.com

RESUMO

Este estudo apresenta estado da arte sobre o uso da pozolana em compósitos cimentícios no combate à corrosão das armaduras. O objetivo deste trabalho é verificar a adição da pozolana em compósitos cimentícios como mitigação da manifestação patológica da corrosão de armaduras, considerando como análise dessa contribuição efetiva os experimentos de resistividade elétrica e potencial de corrosão. Para este fim, foram realizadas consultas a artigos, revistas, normas, monografias, dissertações, teses e livros didáticos. Resultados positivos têm sido publicados referentes a adição da pozolana no intuito de melhorar as propriedades dos produtos de matriz cimentícia e, portanto, o desenvolvimento de novos materiais e metodologias, pois o foco é melhorar o desempenho e a durabilidade dos materiais. Sabe-se que a adição de pozolana promove redução da porosidade e ganho de resistência, contribuindo com uma melhor proteção física contra a ação de agentes deletérios que estão intimamente ligados à manifestação do fenômeno da corrosão nas armaduras das edificações. A corrosão é uma das manifestações patológicas mais preocupantes da construção civil, pois a pozolana, quando utilizada nas proporções corretas em relação ao cimento Portland e aos agregados, promove compósitos cimentícios mais coesos e bem menos permeáveis, proporcionando a redução de poros interconectados. Diversos pesquisadores comprovaram experimentalmente ao longo dos anos a contribuição efetiva da pozolana em relação à durabilidade das estruturas por suas características contribuírem na mitigação de manifestações patológicas. Experimentos como resistividade elétrica e potencial

eletroquímico de corrosão foram fundamentais para que esse consenso permanecesse sólido em meio a comunidade científica.

Palavras-chave: Pozzolana. Corrosão. compósitos cimentícios. resistividade elétrica.

ABSTRACT

This study shows the state of art about the use of pozzolana in cement composites against corrosion of steel in reinforced concrete. The objective of this work is verify the addition of pozzolana in cement composites as a way to soften the pathological manifestation of the corrosion of steel in reinforced concrete, considering the analysis of experiments in electrical resistivity of corrosion and electric potential of corrosion. For this puporse, were made consultations in articles, journals, dissertations, theses, textbooks, etc. Positive results referring to the addition of pozzolan in order to improve the properties of cement matrix products have been published, arousing new methodologies and the materials development with the focus on improvement of performance and durability. It is known that the addition of pozzolan promotes porosity reduction and resistance gain, contributing with a better physical protection against the action of deleterious agents that are closely related to the manifestation of the phenomenon of corrosion in the reinforcement concrete of buildings. The corrosion is one of the most worrisome pathological manifestations of civil construction. When the pozzolana is used in the correct proportions in relation to Portland cement and to the aggregates, it promotes more cohesive and less permeable cementitious composites, providing the reduction of interconnected pores. Because of their characteristics, the pozolana contribute to the mitigation of pathological manifestations in steel. Several researchers have been experimentally proven over the years the effective contribution of pozzolana in relation to the durability of structures. Experiments in electrical resistivity of corrosion and electrochemical potential of corrosion were essential for this consensus to remain solid in the scientific community.

Keywords: Pozzolana. Corrosion. Cementitious composites. Electrical resistivity.

1 INTRODUÇÃO

A adição de minerais na matriz cimentícia se tornou algo cada vez mais comum nos produtos nacionais, fundamentalmente por apresentarem diversos benefícios em relação à durabilidade das estruturas.

O crescente aumento de estruturas com manifestações

patológicas precoce, impõe a necessidade de melhorar o planejamento desde os projetos, passando pela fiscalização, execução até a manutenção, pois o alto custo de reparo/recuperação e os transtornos causados influenciam na durabilidade (AGRA; LOBO; MONTEIRO, 2017, p. 123).

Segundo Meira (2017), a corrosão das armaduras é uma das

manifestações patológicas de maior incidência nas obras civis de estruturas de concreto e aço em todo o mundo, onde no cenário nacional essa problemática se estende em todas as regiões, com maior incidência nas zonas costeiras.

Adamantti (2016) relata que o processo pelo qual a corrosão se inicia envolve, além da despassivação da armadura, do mecanismo de transporte do CO₂ e dos íons cloreto, tendo em vista que, para todos os casos, os poros dos compósitos cimentícios governam à baila.

Mota et al. (2011) afirmam que a incorporação da pozolona tem a função de melhorar as características dos compósitos cimentícios através de dois efeitos, o físico: refinando os poros; químico: quando a pozolona reage com o hidróxido de cálcio do cimento formando moléculas de C-S-H, e, conseqüentemente aumentando a resistência da matriz.

Para Galvão (2004), é consenso do meio técnico a redução da penetrabilidade de agentes deletérios promovida pelas adições minerais, reduzindo o coeficiente de difusão de íons cloreto. Vale notar a contribuição de Santos (2006) que diz que a difusão é o processo de transporte de substâncias de um meio para o outro devido a uma diferença de concentração.

Os benefícios promovidos pelas adições minerais no estado fresco incluem redução do calor de hidratação, diminuição da exsudação e segregação; e no estado endurecido promovem aumento das resistências com baixa de permeabilidade, devido ao refinamento dos poros, melhorando a durabilidade aos ataques químicos (águas sulfatadas, expansão álcalis-agregado,

águas ácidas, águas puras) e o bom desempenho frente à ação de cloretos (SABIR; WILD; BAI, 2001 apud GALVÃO, 2004, p. 53).

Para avaliação dos benefícios da adição de pozolona frente à corrosão, Ferreira (2003) identifica os experimentos de resistividade elétrica e potencial eletroquímico de corrosão como importantes indicadores de durabilidade dos compósitos cimentícios. Assim, a importância da medição da resistividade elétrica do concreto ocorre devido que a presença do oxigênio nos poros interconectados aguça a corrosão. Já em relação ao potencial eletroquímico de corrosão, destaca-se que esse experimento permite uma indicação aproximada da situação da corrosão ou da passivação das armaduras.

Este trabalho tem o objetivo de apresentar o estado da arte a respeito da adição de Pozolona em compósitos cimentícios, levando em consideração os ensaios de resistividade elétrica e potencial de corrosão, como método de mitigação da corrosão das armaduras.

2 CORROSÃO DAS ARMADURAS: INTRODUÇÃO, MITIGAÇÃO DO FENÔMENO E ANÁLISE EXPERIMENTAL

2.1 Corrosão: origem, definição e conseqüências

Bauer (2000) afirma que a corrosão é a transformação não intencional de um metal, a partir de suas superfícies expostas, em compostos não aderentes, solúveis ou dispersáveis no ambiente em que o metal se encontra.

Segundo Mota et al. (2012), uma das formas possíveis e muito comum para que a corrosão ocorra é a quebra da proteção química, despassivação

da armadura que em geral acontece com a baixa do pH no concreto para patamares próximo de 9,2. O outro tipo de proteção existente para as armaduras frente a corrosão é a proteção física, a barreira física de material cimentício que envolve as armaduras, desta forma o concreto acaba por gerar uma dupla camada de proteção, a primeira derivada de uma reação química devido à alta alcalinidade do próprio concreto, a película passivadora, a segunda corresponde a camada física formada pelo próprio material cimentício que envolve as armaduras.

Por se tratar de um material de alta alcalinidade (pH entre 12,6 e 14,0) o concreto garante a proteção das armaduras devido à formação de uma fina camada passivadora em toda a superfície das armaduras que impede a dissolução do ferro. De acordo com CEB (Comité Euro-internacional du Beton - 1989), com a existência desta camada passivadora a corrosão das armaduras é impossível, mesmo com a presença de umidade e oxigênio, principais condições para a ocorrência da corrosão. (ROCHA, 2015, p. 10).

A norma NBR 6118 (2014) destaca os íons cloretos e a carbonatação como os principais responsáveis pela despassivação. Apesar disso, Pinheiro; Monteiro (2006), afirma que a elevada alcalinidade do concreto é alterada quando o PH é reduzido por carbonatação.

O processo de carbonatação tem início na superfície do concreto, formando uma frente de carbonatação, separando duas zonas distintas de pH. A

primeira com valores na faixa de 12 e a segunda na faixa de 8. Essa frente avança paulatinamente para o interior do material e, ao atingir a armadura, promove sua despassivação, podendo dar início a um processo de corrosão generalizada (POGLIALLI, 2009 apud BARROS, 2018, p. 38).

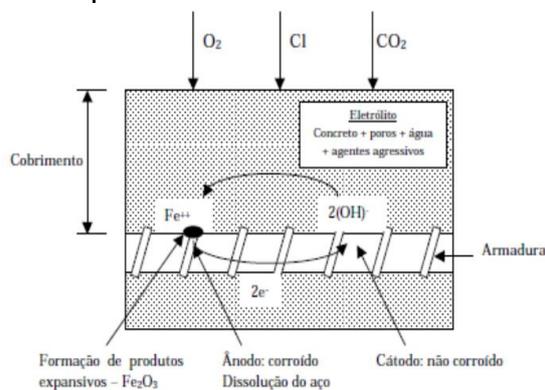
De acordo com Medeiros et al. (2017), a corrosão das armaduras provoca a diminuição da capacidade resistente das estruturas e a velocidade com que essa patologia deteriora o aço está relacionada diretamente com fatores intrínsecos à execução e utilização dessas estruturas. Outro aspecto diz respeito à permeabilidade, pois devido à presença de microfissuras, a entrada de agentes agressivos que contribuem com a despassivação é facilitada, dando início ao processo corrosivo.

Segundo Cascudo (1997) apud Liberati (2014), de acordo com o tipo da natureza do processo, a corrosão pode ser classificada em corrosão química ou eletroquímica. A corrosão que propriamente ocorre nas armaduras das construções é a eletroquímica, e está relacionada com condução de cargas (elétrons) entre regiões diferentes do mesmo metal. Ainda nesta mesma linha de considerações, os autores afirmam que a corrosão eletroquímica, também é chamada de aquosa por ocorrer em meio aquoso, resultado de uma pilha ou célula de corrosão eletroquímica. Essas pilhas eletroquímicas são constituídas obrigatoriamente dos cinco componentes descritos a seguir: Ânodo (eletrodo de reações da zona anódica de oxidação do metal), cátodo (eletrodo de reações da zona catódica de oxidação do metal), eletrólito (condutor líquido), diferença de potencial (potencial elétrico) e

condutor metálico (ligação metálica entre o ânodo e o cátodo). Se não estiver presente qualquer um desses cinco elementos, o circuito é aberto e a corrosão é paralisada.

O mecanismo de corrosão eletroquímica (Figura 1), é caracterizado pela formação de uma célula de corrosão, onde sobre a superfície do metal são geradas duas zonas, sendo uma que atua como ânodo, onde se produz a oxidação do metal, liberando elétrons, e outra que atua como cátodo, onde em função da migração de elétrons através do metal, acontece a redução do oxigênio dissolvido no eletrólito (VIEIRA, 2003, p. 13).

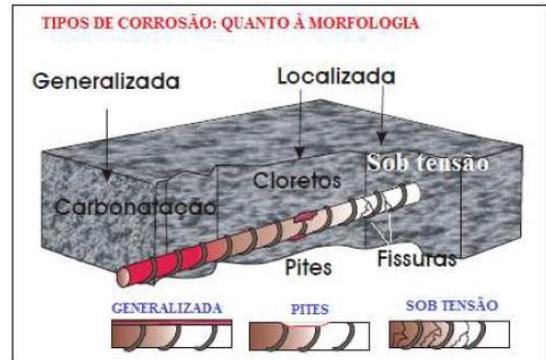
Figura 1 – Mecanismo de corrosão eletroquímica



Fonte: SANTOS (2015)

De acordo com Cascudo (1997) apud Santos (2012), classifica-se a corrosão eletroquímica do aço em três tipos mais comuns: Corrosão generalizada (ocorre em toda a superfície do metal), corrosão por pite (também chamada de puntiforme, é um tipo de corrosão mais localizada) e a corrosão sob tensão fraturante (é um tipo de tensão localizada, a qual se dá concomitantemente com uma tensão de tração na armadura) (Figura 2).

Figura 2 – Os três tipos mais comuns de corrosão eletroquímica



Fonte: SANTOS (2015)

Cunha e Helene (2001) apud Santos (2015) identificam que os produtos oriundos ou decorrentes da corrosão criam expansões nas armaduras, causando danos ao concreto. Os prejuízos que podem ser observados em concretos devido a fissuração acabam produzindo uma variação na distribuição de tensão sobre a seção e, por consequência, causam um deslocamento angular no sentido do comprimento da barra e uma redução na ligação entre a armadura e o concreto por perda de confinamento.

Mehta e Monteiro (1994) apud Santos (2015) mencionam que o processo da corrosão de armaduras é a transformação de aço metálico em ferrugem acompanhado por um aumento no volume de até 600% do volume original do metal. Esse aumento de volume é atribuído como principal causa da expansão e fissuração do concreto.

Ferreira (2003) diz que dois experimentos são capazes de verificar o nível do risco a corrosão, fazendo com que tenhamos uma análise probabilística do desenvolvimento dessa manifestação patológica na peça analisada, são eles: os experimentos de resistividade elétrica e potencial eletroquímico de corrosão.

A importância de se estudar e mensurar a

resistividade elétrica do concreto reside no fato de que juntamente com o acesso de oxigênio às barras, constituem os dois elementos principais controladores do processo eletroquímico que leva ao fenômeno da corrosão de armaduras. Dessa forma, a velocidade de corrosão do aço no concreto é em muito dependente da resistividade elétrica ou, por outro lado, da condutividade iônica do eletrólito (fase líquida do concreto) (ANDRADE, 1992; CASCUDO, 1997 apud FERREIRA, 2003, p. 42).

Segundo Barros (2018), quando realizado o ensaio de potencial eletroquímico de corrosão, utilizando do mapeamento de potenciais, esse será capaz de realizar a identificação das zonas mais, menos ou nada corroída (zonas anódicas e catódicas), possibilitando desta forma analisar a probabilidade de ocorrência de corrosão.

2.2 Adição de pozolana aos compósitos cimentícios como agente mitigador da corrosão.

A utilização de adições minerais tem contribuído para um melhor desempenho das estruturas de concreto, englobando os seguintes aspectos: econômicos, com a redução de energia na produção do aglomerante; ecológicos, quanto à utilização de subprodutos industriais; e técnicos, melhorando as propriedades do concreto e, conseqüentemente, aumentando sua durabilidade. (SABIR; WILD; BAI, 2001 apud CASTRO et al., 2016, p. 1).

Duarte et al. (2017) identificam que, apesar da excelente durabilidade do concreto armado, ele apresenta

limitações quanto ao seu desempenho, seja uma baixa resistência à tração, retração por secagem, entre outros. Tendo em vista ações para atenuar esses problemas e também melhorar a durabilidade do concreto, que decai ao longo dos anos devido ao contato com o ambiente, as adições minerais têm sido utilizadas em larga escala, pois a adição ou substituição parcial do cimento nos compósitos cimentícios, além de gerar resultados positivos no que tange à melhoria de suas propriedades, reduz consideravelmente a poluição, já que a fabricação do cimento é um dos maiores geradores de gases poluentes.

A NBR 12653/2015 relata que a pozolana é um material silicoso ou sílico-aluminoso que, quando finamente moído e na presença de água, reage com o hidróxido de cálcio presente na matriz do concreto, em temperatura ambiente, formando gel C-S-H. Junior; Gans (2017) identificam que ao misturar adições pozolânicas ao clínquer, ocorrem mudanças na matriz do concreto por causa da reação química entre os componentes do cimento e a água, podendo gerar impacto nas propriedades elétricas do concreto.

Verifica-se cada vez com maior frequência, concretos com elevado índice de manifestações patológicas. Nessa premissa, concreto cuja resistência possa ser elevada, contribui para aumento da durabilidade, haja vista redução do índice de vazios. Portanto, diversas pesquisas mostraram que a adição de pozolanas em materiais cuja matriz é cimentícia, provoca um maior empacotamento da mistura, deixando-a mais densa, gerando uma redução natural da porosidade, seja pelo efeito filler - fenômeno

físico; como pela geração de C-S-H (silicato de cálcio hidratado) – fenômeno químico (DOURADO et al., 2010, p. 1).

As adições minerais reagem com os produtos de hidratação do cimento; sendo que a reação química principal, denominada reação pozolânica, é facilitada pela dissociação da sílica amorfa (proveniente dessas adições), produzindo sílica na solução de poros, que então reage com o hidróxido de cálcio para formar gel de C-S-H. A reação pozolânica reporta fundamentalmente de três aspectos, a saber: (i) reação lenta, levando a taxa de liberação de calor e de desenvolvimento da resistência de forma lentas; (ii) reação que consome hidróxido de cálcio, o que representa uma contribuição importante para a durabilidade da pasta endurecida de cimento frente a meios ácidos; (iii) eficiente preenchimento dos espaços, tamponamento e obstrução (efeito filer) dos poros capilares grandes, melhorando assim permeabilidade do sistema (SABIR; WILD; BAI, 2001 apud CASTRO et al., 2000, p. 5).

Netto (2006) identifica que ao se adicionar pozolana na matriz cimentícia, provoca-se a seguintes reações químicas formadoras do C-S-H:

$$C_3S + H_2O \rightarrow CSH + CH \text{ (Hidratação do cimento Portland)}$$

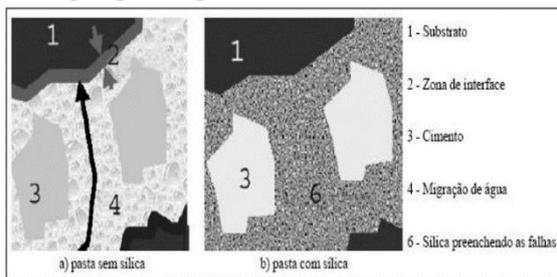
$$CH + S + H_2O \rightarrow CSH \text{ (Reação pozolânica)}$$

Onde: C = CaO, S = SiO₂, H = H₂O

Segundo Silva; Mota; Galvão (2013), as próprias características físicas das pozolanas no que se refere ao tamanho de partículas e área específica são os principais fatores que garantem a atividade pozolânica. Essa atividade, quando há substituição ou adição de pozolana em compósitos cimentícios, desenvolve alterações nas propriedades dos mesmos, promovendo: redução de tempo de pega, redução das taxas de exsudação, diminuição do calor de hidratação, aumento da resistência a compressão, aumento da resistência a tração e redução da permeabilidade.

É fato que diversas outras patologias que possam se desenvolver nos compósitos cimentícios contribuem diretamente para o desenvolvimento da corrosão das armaduras. Entre essas patologias, as reações álcalis agregados (RAA) quando progridem em peças de concreto acabam por facilitar a entrada de agentes agressores devido as rachaduras geradas pelo fenômeno. A despeito disso, Mota et al. (2011) afirmam que concretos convencionais tendem a romper na zona de transição devido ao “efeito parede”, que é originado de uma relação água/cimento elevada, resultando em extensas áreas de porosidade. Nessa mesma zona de transição, percebe-se hidróxidos de cálcio decorrentes da hidratação do cimento que acabam por se posicionar de forma perpendicular a superfície do agregado graúdo, conseqüentemente reagem com a sílica da pozolana de concretos com adição, tendo como resultado C-S-H (Silicato de cálcio hidratado) que é o composto responsável pela resistência, concomitantemente, ocorre o fenômeno físico com a ocupação de vazios (Figura 3).

Figura 3 – Zona de transição da pasta do agregado graúdo



Fonte: DOURADO (2010)

Outra patologia que contribui para a aceleração da corrosão de armaduras em compósitos cimentícios é a carbonatação. Tasca (2012) expressa suas dúvidas sobre o fato da adição de pozolana contribuir com a mitigação do fenômeno da carbonatação, pois afirma que não há consenso nos estudos sobre os efeitos das adições minerais e a carbonatação em concretos. Neville (1997) apud Tasca (2012) considera que ao longo do desenvolvimento das reações pozolânicas induzem uma redução dos teores de CH na solução dos poros do concreto, em decorrência disso, se necessita de menor quantidade de CO₂ aumentando a velocidade de carbonatação, pois a difusão do CO₂ é mais rápida devido à menor quantidade de CH.

Isto vem ao encontro do que concluiu Netto (2014), pois apesar de reconhecer que a substituição do cimento por pozolanas tem como consequência uma redução de CH em decorrência das reações pozolânicas, seu trabalho experimental demonstrou utilizando substituição quanto adição de pozolana pura, os corpos de prova sobressaíram-se mais eficientes em resistir aos efeitos da carbonatação em relação a uma argamassa padrão sem adição, evidenciando a contribuição efetiva do efeito filler ao proporcionar a redução do tamanho dos poros.

Sobre a corrosão induzida por cloretos, Basheer (2001) apud Ferreira (2003) afirma que a corrosão causada pela penetração de cloretos é um tipo de processo mais intenso e agressivo, gerando maior degradação das estruturas de concreto, pois esse fenômeno progride a taxas muito mais elevadas comparadas à carbonatação.

Ferreira (2003) destaca que a entrada de íons cloretos e outros tipos de agentes agressivos no concreto ocorrem por meio do efeito simples ou do efeito combinado dos mecanismos de transporte. Para redução dessas incorporações de agentes nocivos, as adições minerais agem reduzindo a permeabilidade devido ao refinamento dos poros.

2.3 Avaliação da tendência a corrosão através dos experimentos de resistividade elétrica e potencial de corrosão.

2.3.1 Resistividade Elétrica

A resistividade elétrica é uma importante propriedade do concreto que caracteriza a sua capacidade de resistir à passagem da corrente elétrica. Esta propriedade é fundamentalmente relacionada à permeabilidade de fluidos e à difusividade de íons dos poros do material e, no caso do concreto, está intimamente relacionada à velocidade do processo de corrosão das armaduras (SANTOS, 2006, p. 25).

Carvalho (2014) cita que uma das associações que pode-se fazer entre a resistividade elétrica de um compósito cimentício e o fenômeno da corrosão é justamente o aumento das concentrações de cloreto, que é um dos mais nocivos agentes agressores à película passivadora, na medida em que se diminui a resistividade elétrica

do compósito cimentício devido à maior condutividade proporcionada por esses íons, provocando em consequência o aumento da velocidade de corrosão das armaduras.

Os parâmetros que regulam a velocidade ou taxa de corrosão, são, dentre outros, a resistividade elétrica do meio e a disponibilidade de oxigênio, bem como a temperatura, a umidade relativa e o grau de contaminação do meio ambiente (MONTEIRO, 2002 apud Barros, 2018, p. 37).

Segundo Junior; Gans (2017), para se o controle sobre o processo eletroquímico que gera a corrosão, precisa-se ter o controle sobre a resistividade elétrica e a disponibilidade de oxigênio, ou seja, a resistividade elétrica é um indicador de durabilidade, pois quanto maior for seu valor, menor será a movimentação de íons no concreto, em decorrência, indica-se que menor é a tendência a ocorrer o processo corrosivo.

Silva (2016) afirma que a resistividade elétrica está intimamente ligada aos principais estágios da vida útil de uma estrutura. Ademais, resistividade elétrica consiste em diversos fatores intrínsecos e extrínsecos, donde destaca-se: relação água/cimento; grau de hidratação do cimento; tipos de agregados; temperatura; teores de cloretos e carbonatação; teores de adições minerais, aditivos e umidade etc.

Santos (2006) identifica que a técnica de medida da resistividade elétrica foi desenvolvida no início dos anos 90 por geólogos, com o objetivo de medir a resistividade elétrica de solos, e, posteriormente foi adaptada para o uso em concreto por Wenner,

físico norte-americano, onde acabou conhecida como o método dos quatro eletrodos. Por conseguinte, tornou-se a técnica mais utilizadas em laboratórios para esse fim, mesmo existindo outras desenvolvidas ao longo do tempo, como o método do disco ou método dos dois eletrodos.

Meira (2017) comenta que o experimento conhecido como técnica de Wenner, também chamado de técnica das quatro pontas, por conter quatro eletrodos, consiste na aplicação de uma corrente alternada entre os eletrodos externos a, a uma frequência entre 100 e 1000Hz, e que se meça a diferença de potencial (ddp) entre os eletrodos internos. Através de uma equação matemática envolvendo a ddp, a corrente elétrica e a distância entre os eletrodos, é possível se extrair um resultado numérico da resistividade que é influenciada diretamente pela porosidade do material, da composição química do aglomerante, do teor de umidade e conexão dos poros.

Assim, verifica-se a medição que representa as condições médias de exposição da estrutura, quanto maior a resistividade, menor é a saturação e a porosidade, indicando menor probabilidade de corrosão na armadura da estrutura analisada (Quadro 1).

Quadro 1 – Critérios de avaliação dos resultados de resistividade elétrica do concreto

<i>Resistividade (ohm.cm)</i>	<i>Risco de corrosão das armaduras</i>
<i>< 5000</i>	Muito Alto
<i>5000-10 000</i>	Alto
<i>10 000-20 000</i>	Baixo
<i>> 20 000</i>	Desprezível

Fonte: CEB 192 (1989)

Diversos pesquisadores que realizaram estudos sobre adições minerais em compósitos cimentícios

com objetivo de mitigar a corrosão, utilizaram o experimento de resistividade superficial para aferição se a adição mineral efetivamente promove melhorias nessa direção. Segundo Agra; Lobo; Monteiro (2017), os tipos de adições estão atrelados ao bom funcionamento estrutural em função da sua composição química, caso da pozolana, ela é capaz de diminuir o tamanho dos poros, sendo desta forma sua adição favorável no que tange à durabilidade.

Tomando como exemplo estudos como Ferreira (2003); Galvão (2004); Larceda e Helene (2004); Santos (2006), Teodore, Cascudo e Casarek (2016), entre outros, ao utilizarem do experimento de resistividade para analisar diferentes traços de argamassas ou concreto com e sem adição de pozolana, obtiveram repostas positivas após a análise dos resultados, constatando-se que os compósitos com adição da pozolana se sobressaíram consideravelmente, obtendo como resultado uma maior resistividade do que as argamassas que não continham adições minerais ou modificadas por polímeros.

A importância de se estudar e mensurar a resistividade elétrica do concreto reside no fato de que esta propriedade, juntamente com o acesso de oxigênio às barras, constituem os dois elementos principais controladores do processo eletroquímico que leva ao fenômeno da corrosão de armaduras. Dessa forma, a velocidade de corrosão do aço no concreto é em muito dependente da resistividade elétrica ou, por outro lado, da condutividade iônica do eletrólito (fase líquida do concreto) (CASCUDO apud FERREIRA, 2003, p. 42).

2.3.2 Potencial de Corrosão

A medida do potencial de corrosão é utilizada para classificar a probabilidade de corrosão de armaduras do aço carbono imersas em concreto, segundo a ASTM C 876:2015 (American Society for Testing and Materials), sendo possível sua aplicação para o monitoramento de estruturas de concreto armado ao longo do tempo (HELENE, 1993 apud MEDEIROS et al., 2017, p. 879).

Segundo Ribeiro (2009), o potencial de corrosão também é chamado de potencial misto ou potencial de circuito aberto, ele é capaz de proporcionar uma indicação aproximada da situação de corrosão ou passivação das armaduras. Essa medida é obtida por meio de uma diferença de potencial elétrico entre o aço das armaduras e um eletrodo de referência.

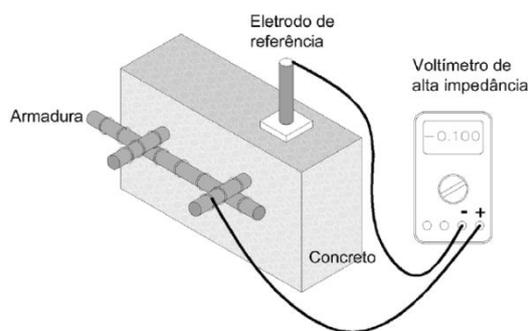
A utilização do potencial de corrosão tem a vantagem por ser uma técnica não destrutiva e de fácil aplicação, não sendo necessário o emprego de aparelhos caros e sofisticados. Porém, apresenta a desvantagem de fornecer uma ideia relativa e aproximada do processo de corrosão instalado sobre a armadura, ou seja, do seu registro não se obtém nenhum dado quantitativo da cinética de corrosão (FIGUEIREDO, 1994 apud CARVALHO, 2014, p. 64).

Meira (2017) identifica que esse tipo de medida é influenciado pelas seguintes características: Teor de umidade do concreto, espessura do revestimento da armadura, correntes

erráticas, carbonatação do concreto e a quantidade de sais no eletrólito.

Rocha (2015) descreve que o ensaio do potencial eletroquímico de corrosão, que consiste na ligação de um condutor na armadura e em um sensor que irá realizar a coleta dos dados ao longo da área. Este sensor é um voltímetro que obtém a diferença de potencial na estrutura (Figura 4).

Figura 4 – Desenho esquemático da medida de potencial de corrosão



Fonte: ASTM C 876 (2009)

Segundo a norma ASTM C 876 (2009) apud Barros (2018), a metodologia utilizada para obtenção de potenciais de corrosão em concreto ou argamassa, é adequado em experimentos laboratoriais e análises de campo. Os critérios para a interpretação dos resultados obtidos na medição estão descritos no Quadro 2, indicando a probabilidade de ocorrência da corrosão na região ensaiada.

Quadro 2 – Probabilidade de corrosão em função do potencial de corrosão

Ecorr (mV)	Probabilidade de corrosão
> -200	Menor que 10 %
entre -200 e -350	Incerta
< -350	Maior que 95 %

Fonte: ASTM C 876 (2009)

Segundo Ferreira (2003), o emprego das adições minerais promove um efeito benéfico da

redução de agentes agressivos por haver uma diminuição significativa do diâmetro dos poros do concreto ou argamassa que receberam a adição da pozolana metacaulim, com isso, potenciais menos eletronegativos são percebidos em concretos com adições. Esse experimento obtém uma margem estatística que permite ao pesquisador o quanto a estrutura pode sofrer o fenômeno da corrosão em sua armadura.

Perante as observações sobre os efeitos promovidos pela incorporação de pozolana a matriz cimentícia dos compósitos cimentícios em relação a diminuição da eletronegatividade, o experimento de potencial eletroquímico de corrosão é comprovadamente um importante método de aferição probabilístico do surgimento da manifestação patológica da corrosão nas armaduras de um compósito cimentício.

Pôde-se ser observado na bibliografia que diversos autores, como por exemplo, Ferreira (2003); Galvão (2004); Duarte et al. (2017); Barros (2018), entre outros, ao utilizarem dessa análise experimental com o objetivo de aferir o avanço do processo corrosivo em compósitos que receberam a incorporação de pozolana, em todos esses casos, a conclusão foi convergente, ao se ter incorporado pozolana aos compósitos cimentícios provocou-se uma melhora significativa na mitigação da corrosão, em comparação a argamassas ou concretos que não receberam nenhum outro tipo de adição. Essa conclusão baseou-se na aferição de um potencial menos eletronegativo para os compósitos que continham a pozolana incorporada em sua matriz cimentícia, indicando dessa forma uma menor probabilidade de corrosão, devido a maior compatibilidade dos compósitos

oriundos do efeito filler provocado pela adição da pozolana.

3 METODOLOGIA

O trabalho desenvolvido foi realizado baseando-se nos preceitos exploratórios que compõe um estado da arte, realizando pesquisas bibliográficas a respeito do tema proposto utilizando ordenadamente artigos, dissertações, teses e livros, que propuseram os estudos experimentais da influência de pozolana como mitigação da corrosão das armaduras.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Em todos os trabalhos, do tipo experimental, que foram utilizados como fonte de informações e conhecimento para formulação do presente artigo, observou-se que seus autores obtiveram resultados significativos a respeito do benefício da adição de pozolana aos compósitos cimentícios.

Todos os autores referenciados, ao analisar os resultados dos seus experimentos, tanto de resistividade elétrica quanto de potencial eletroquímico de corrosão, descreveram que a incorporação de pozolana na matriz cimentícia beneficiou a durabilidade dos compósitos devido a mitigação do surgimento ou avanço da manifestação patológica da corrosão de armaduras, não restando dúvidas de que a pozolana é uma importante adição mineral e que deve ao longo dos anos ser cada vez mais explorado o seu uso nas construções civis brasileiras.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dentre os maiores problemas com manifestações patológicas enfrentados

na construção civil, destaca-se a corrosão das armaduras. A literatura mostra que esse fenômeno é um dos mais impactantes em relação a durabilidade das estruturas, onde tem um alto grau de incidência e seu reparo exige um alto investimento financeiro. Portanto, para haver uma redução significativa desse fenômeno, é necessário que a proteção física das estruturas seja a mais compacta possível, reduzindo a porosidade e consequentemente a penetrabilidade de agentes agressores através dos poros interconectados.

Adições minerais são utilizadas com o intuito de promover maior durabilidade às estruturas, pois promove redução da porosidade nos compósitos cuja matriz seja cimentícia, haja vista maior empacotamento das misturas.

Além da redução da permeabilidade dos compostos, a sílica da pozolana através de uma reação química com o Hidróxido de Cálcio promove a formação de gel do C-S-H, aumentando a resistência dos compostos. Este fenômeno é chamado de efeito químico.

Os experimentos de resistividade elétrica e de potencial eletroquímico de corrosão, são indicadores fundamentais da durabilidade das estruturas e importantíssimos para comprovação experimental de que a pozolana contribui diretamente para mitigação da corrosão nas armaduras. É possível através desses dois experimentos, avaliar a influência das pozolanas como proteção física, e por consequência, aumento da resistividade elétrica e a eletropositividade, tornando os compósitos cimentícios que receberam adição mais coesos e mais resistentes, resultando numa diminuição do quantitativo dos elementos eletrocondutores em seus poros interconectados.

REFERÊNCIAS

ADAMATTI, Deise Santos. **Análise da eficiência de espaçadores no concreto armado: Impacto da corrosão por íons cloreto em diferentes condições de exposição**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

AGRA, T.; LOBO, E.; MONTEIRO, E. Difusão de Íons Cloreto em Cimentos de Escória de Alto-forno e Pozolânico. **Revista de engenharia e Pesquisa Aplicada**, Recife, Pernambuco, v. 2, nº 2, p. 122-127, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR-5736: **Cimento Portland Pozolânico**. Rio de Janeiro, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR-6118: **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

BARROS, Tacylla Ceci Melo Freitas de. **Análise da influência de espaçadores na corrosão de armaduras em concretos contaminados por íons cloreto**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2018.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 2000. 5ª edição. Volume 2. Editora LTC. Rio de Janeiro.

CARVALHO, Leonardo Gomes De Sá e. **Resistência à corrosão dos aços CA24 e CA50 frente à ação dos cloretos**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

CASCUDO, O. **O Controle da Corrosão de Armaduras em Concreto: Inspeção e Técnicas Eletroquímicas**. 1997. 1ª edição. Editora PINI. São Paulo.

CASTRO, A.; FERREIRA, R; LOPES, A; COUTO, A. P; BRAUN, V; CASAREK, H; CASCUDO, O. Influência das adições minerais na durabilidade do concreto. **Centro de Gestão de Tecnologia e Informação**. 2016. 8 p. Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON - CEB. **Bulletin d'Information**. Paris, 1989. n.192.

DOURADO, K. C. A; MOTA, J. M. F; BARBOSA, F. R; SILVA, A. C; SILVA, A. J. C; SILVA, E. J; FEITOSA, A. G; SANTOS, F. A. **Influência da adição de pozolana em concretos moldados na região de Caruaru** – Pernambuco – Brasil. 2010.

DUARTE, S. G. G. R.; LIMA, G. A. L.; TETI, B. S.; CALÁBRIA, I. S. **Adição da Sílica Ativa e do Metacaulim no Concreto para a Avaliação da Corrosão por Íons Cloretos**. I Conferência Nacional de Patologia e Recuperação de Estruturas. 2017. 13p. Universidade de Pernambuco. Recife. 2017.

- FERREIRA, Ricardo Barbosa. **Influência das adições minerais nas características do concreto de cobrimento e seu efeito na corrosão de armadura induzida por cloretos**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.
- GALVÃO, Simone Perruci. **Avaliação do desempenho de argamassas de reparo estrutural à base de cimento portland modificadas por polímeros e contendo adições minerais**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2004.
- GOMES, C. F.; GODINHO, D. S. S. **Análise do efeito da adição de metacaulim em Concretos submetidos a ambientes de alta Agressividade**. 2016. 25p. Trabalho de conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, Santa Catarina, 2016.
- LIBERATI, Elyson Andrew Pozo. **Modelos de confiabilidade aplicados à análise de estruturas de concreto armado submetidas à penetração de cloretos**. 2014. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.
- MANTUANO NETTO, R. **Materiais pozolânicos**. 2015. Monografia (Especialização) - Curso de Especialização em Construção, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais., Belo Horizonte, 2006.
- MEDEIROS, M. H. F.; ROCHA, F. C.; JUNIOR, R. A. M.; HELENE, P. Potencial de corrosão: influência da umidade, relação água/cimento, teor de cloretos e cobrimento. **Revista Ibracon de estruturas e materiais**, v. 10, n. 4, p.875-885, jul. 2017.
- MEDEIROS JÚNIOR, R. A.; GANS, P. S. Efeito da adição de pozolana na resistividade elétrica superficial do concreto. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, Recife, PE, v. 2, nº 3, p. 94 - 100, 2017.
- MEIRA, G. R. **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto: Fundamentos, Diagnóstico e Prevenção**. 2017, Editora IFPB, João Pessoa, Paraíba.
- MOTA, J. M.; DOURADO, K. C.; BARBOSA, F. R.; COSTA E SILVA, A. J.; SILVA, E. J.; CARVALHO, J. R. **Concretos adicionados com Metacaulim como agente de mitigação da RAA**. 53º Congresso Brasileiro de Concreto. 2011. 15p. Florianópolis, Santa Catarina.
- MOTA, J. M.; CARASEK, H.; COSTA E SILVA, A. J.; BARBOSA, F. R.; FEITOSA, A.; SANTOS, W. **Argamassas inorgânicas com adição de metacaulim**. IX Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas. 2011. 10p. Belo horizonte, Minas Gerais.
- MOTA, J. M.; BARBOSA, F. R.; COSTA E SILVA, A. J.; FRANCO, A. P. G.; CARVALHO, J. R. **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado devido ao ataque de íons cloreto**. 2012. 16p. 54º Congresso Brasileiro do concreto, Maceió, Alagoas.

PINHEIRO, H. F.; MONTEIRO, E. C. B. Análise Comparativa do desempenho de concretos com adições minerais quanto à corrosão de armaduras por íons cloretos. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, Recife, PE, v. 2, nº 1, p. 150-155, 2016.

RIBEIRO, José Luís Serra. **Contribuição para a avaliação da compatibilidade eletroquímica entre argamassas de reparo e concreto cabonatado**. 2009. 122p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

ROCHA, Bruno dos Santos. **Manifestações patológicas e avaliação de estruturas de concreto armado**. 2015. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais., Belo Horizonte, 2015.

SANTOS, A. V. MBA: Corrosão de armadura em estruturas de concreto armado devido a carbonatação. **Especialize**, Goiânia, Goiás, v. 1, 10ª edição, dezembro/2015.

SANTOS, Lourdimine. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto**. 2006. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SANTOS, Maurício Ruas Gouthier. **Deterioração das estruturas de concreto armado – estudo de caso**. 2012. Monografia (Curso de Especialização em Construção Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2012.

SILVA, F. J.; MOTA, J. M. F.; GALVÃO, S. P. **Ação da Pozolana Metacaulim em Matriz Cimentícia**. 2013. 16p. 55º Congresso Brasileiro de Concreto, Gramado, Rio Grande do Sul.

SILVA, L. M. A. **Resistividade elétrica superficial do concreto: Influência da cura**. 2016. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

TASCA, Maisson. **Estudo da carbonatação natural de concretos com pozolanas: Monitoramento em longo prazo e análise da microestrutura**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2012.

TEODORO, R.; CASCUDO, O.; CARASEK, H. **Avaliação da durabilidade do concreto com diferentes tipos de metacaulim**. 2016. 14p. II Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão. Lisboa, Portugal, 2016.

VIEIRA, Fernanda Macedo Pereira. **Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras em concretos com adição de sílica ativa**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.