

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CORROSÃO DE ARMADURAS EM MEIOS AQUOSOS E POROSOS DE
ARGAMASSAS COM AGREGADOS ALTERNATIVOS (ACBC E LETA)

Mariana de Almeida Motta Rezende

São Carlos - SP

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CORROSÃO DE ARMADURAS EM MEIOS AQUOSOS E POROSOS DE
ARGAMASSAS COM AGREGADOS ALTERNATIVOS (ACBC E LETA)

Mariana de Almeida Motta Rezende

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos como um dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil.

Orientador: prof. Dr. Almir Sales

São Carlos - SP

2022




UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

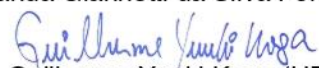
Folha de Aprovação

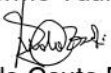
Defesa de Tese de Doutorado da candidata Mariana de Almeida Motta Rezende, realizada em 15/06/2022.

Comissão Julgadora:


Prof. Dr. Almir Sales (UFSCar)


Profa. Dra. Fernanda Giannotti da Silva Ferreira (UFSCar)


Prof. Dr. Guilherme Yuuki Koga (UFSCar)


Prof. Dr. Fernando do Couto Rosa Almeida (UFMG)


Prof. Dr. Gilson Rocha Meira (UFPB)

À minha família, por me dar todo o amor de que eu preciso.

AGRADECIMENTOS

Estes agradecimentos não poderiam começar se não ao professor Almir Sales, meu orientador desde 2012, por ter me guiado nesta carreira acadêmica com generosidade e grande amizade. Obrigada por ser presente e apoiar todas as minhas ideias. Serei eternamente grata por ter me guiado na realizar desse sonho.

Aos meus pais, Renato e Beatriz, para os quais eu sei que posso voltar. Obrigada por me proporcionarem experiências inesquecíveis, acreditarem que a minha educação era prioridade e entenderem minha escolha profissional, eu sei que isso é difícil. Obrigada à minha mãe por fazer tudo por mim e ao meu pai, por estar sempre por perto.

Ao meu irmão, Renato, por ser meu amigo para a vida e estar sempre por perto. Obrigada por existir e ter se tornado um adulto íntegro e atencioso. Eu te amo.

Aos meus avós, obrigada por terem se doado tanto por mim. Seu amor me tornou forte para alcançar tudo o que desejo. Obrigada por estarem sempre adivinhando todas as minhas vontades e percebendo todas as minhas aflições. Jamais serei capaz de retribuir todo o amor que recebi.

À toda minha família que me apoia de diversas formas. Sentir que sou amada por todos vocês me faz querer continuar. Especialmente, obrigada à tia Ana, por ser uma grande incentivadora, estar sempre por perto e ser minha grande amiga. Também, à Ana Clara, por incitar em mim um amor tão profundo e genuíno.

Ao Erico, meu namorado e companheiro de vida, por ser meu grande incentivador, por acreditar que eu posso ser muito maior do que eu mesma imagino. Obrigada por estar ao meu lado, a vida se tornou muito mais leve desde que te conheci.

À professora Lúcia Helena Mascaro e à pesquisadora Patrícia Corradini, do Departamento de Química da UFSCar, por terem aberto as portas do Laboratório Interdisciplinar de Eletroquímica e Cerâmica e me auxiliado sobremaneira nas análises eletroquímicas deste trabalho. Sou muito grata pela imensa ajuda e grande disposição que obtive das duas. Este trabalho não teria sido realizado sem seu apoio.

Aos meus colegas do Laboratório de Materiais e Componentes da UFSCar. José Roberto, obrigada por ser o técnico dos sonhos para o nosso laboratório, pelos nossos cafés e almoços. Juliana Moretti, que sempre me co-orientou extraoficialmente, obrigada por ter me acolhido e ensinado tudo o que eu sei no laboratório desde 2012. Thiago Hemkemeier e Carla Dal Ri, obrigada por nossa equipe de trabalho que, com muito empenho, resultou em ótimas experiências. A todos os outros colegas que conheci no laboratório, sou muito grata por todas as amizades do LMC e as levarei para a vida toda com muito carinho.

À professora e aos professores que compuseram minha banca de defesa: Fernanda Giannotti, Guilherme Koga, Gibson Meira e Fernando Almeida, pelas grandes contribuições dadas às análises desta tese. Especialmente, obrigada à professora Fernanda por ter acompanhado minha trajetória desde a graduação e me inspirado a ser uma pesquisadora melhor.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e à Capes, por fazerem possível a realização deste trabalho.

Ao grupo Movimenta CCET, ao Programa Institucional de Modernização da UFSCar, à Capes e à Fulbright, que me proporcionaram uma aprendizagem incrível no âmbito da modernização curricular das Engenharias. Obrigada às professoras Alessandra Lucas e Ana Paula da Luz e à Maria Angélica Zanotto, pela paciência e pelo valoroso aprendizado pedagógico.

Ao professor Upul Attanayake, que me recebeu na *Western Michigan University*, nos Estados Unidos, para um estágio docente e dividiu comigo toda sua experiência de ensino e pesquisa, sem medir esforços para auxiliar meu projeto. Obrigada também à professora Kanchani Basnayake, da mesma universidade, por ter compartilhado sua expertise de ensino e suas experiências pedagógicas.

À Universidade Federal de São Carlos, por ter sido a casa que me proporcionou a graduação, o mestrado e, agora, o doutorado. Vivi experiências inesquecíveis na universidade. Farei o que estiver ao meu alcance para sempre defender o ensino público de qualidade que recebi desta universidade.

Aos meus fiéis amigos e a todos os que torcem por mim. Muito obrigada.

“Nothing in life is to be feared, it is only to be understood. Now is the time to understand more, so that we may fear less.” (Marie Curie)

REZENDE, M. A. M. Corrosão de armaduras em meios aquosos e porosos de argamassas com agregados alternativos (ACBC e LETA). Tese (Doutorado). Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2022.

RESUMO

Cerca de 4% do PIB dos países industrializados é destinado à manutenção de materiais deteriorados por corrosão e a corrosão de armaduras contribui para uma parcela significativa desse percentual. Outro problema da construção civil é o uso exacerbado de recursos naturais, como areia e brita, utilizados como agregados para produção de concretos. Ao longo do tempo, esses recursos foram se tornando escassos e a utilização de agregados reciclados, necessária. O grupo de pesquisa da autora trabalha com resíduos ecoeficientes há duas décadas e, aliou-se esse conhecimento ao objetivo geral deste trabalho, que foi avaliar a corrosão de armaduras em compósitos cimentícios com incorporação de dois resíduos separadamente: areia de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (ACBC) e lodo de estação de tratamento de água (LETA), ambos utilizados como agregado miúdo em soluções de poros de concreto (SPC) e em amostras de compósitos cimentícios. A inovação deste trabalho encontra-se no uso da técnica de avaliação de corrosão em SPC para concretos com resíduos. Para isso, amostras de aço-carbono foram imersas em soluções de poros de compósitos cimentícios com ACBC e LETA em soluções puras e soluções contaminadas com agentes agressivos às armaduras (cloretos e carbonatos). Em célula eletroquímica, foi realizado o monitoramento do potencial de circuito aberto, a espectroscopia de impedância eletroquímica e a polarização linear de varredura para verificar a corrosão do aço nas diversas soluções estudadas. Além disso, os resultados obtidos foram comparados aos resultados de avaliação similar em compósitos cimentícios dos mesmos traços de LETA e ACBC. Pelas análises realizadas, foi possível concluir que a incorporação de ACBC é benéfica quanto à resistência à corrosão de armaduras, podendo ser utilizada como agregado miúdo em substituição de 30% em massa pela areia natural em concretos para fins estruturais em ambientes marinhos. Entretanto, 3% de LETA em substituição à areia natural em concretos fez com que o filme de passivação não se formasse adequadamente nas armaduras. Portanto, neste caso, o concreto com essa porcentagem de LETA não pode ser recomendado para fins estruturais em ambiente marinho.

Palavras-chave: “concreto armado”, corrosão, resíduos, armadura, “soluções de poros de concreto”.

REZENDE, M. A. M. Reinforcement corrosion in aqueous and porous media of mortars with alternative aggregates (SBAS and WTS). Thesis (Doctorate). Federal University of São Carlos. São Carlos, 2022.

ABSTRACT

About 4% of the GDP of industrialized countries is destined to the maintenance of materials deteriorated by corrosion and the corrosion of reinforcements contributes to a significant portion of this percentage. Another problem in civil construction is the exacerbated use of natural resources, such as sand and gravel, used as aggregates for the production of concrete. Over time, these resources became scarce and the use of recycled aggregates became necessary. The author's research group has been working with eco-efficient waste for two decades, and this knowledge was combined with the general objective of this work, which was to evaluate the corrosion of reinforcement in cementitious composites with the incorporation of two residues separately: sugarcane bagasse ash sand (SBAS) and water treatment sludge (WTS), both used as fine aggregate in concrete pore solutions (CPS) and in cement composite samples. The innovation of this work lies in the use of the corrosion assessment technique in CPS for concrete with residues. For this, carbon steel samples were immersed in pore solutions of cementitious composites with SBAS and WTS in pure solutions and solutions contaminated with aggressive agents to the reinforcement (chlorides and carbonates). In an electrochemical cell, the monitoring of the open circuit potential, the electrochemical impedance spectroscopy and the linear scanning polarization were carried out to verify the corrosion of the steel in the different solutions studied. In addition, the results obtained were compared to the results of similar evaluation on cementitious composites of the same traces of WTS and SBAS. Based on the analyzes carried out, it was possible to conclude that the incorporation of SBAS is beneficial in terms of corrosion resistance of reinforcements, and can be used as a fine aggregate to replace 30% by mass with natural sand in concrete for structural purposes in marine environments. However, 3% of LETA replacing natural sand in concrete caused the passivation film not to form properly on the reinforcement. Therefore, in this case, concrete with this WTS percentage cannot be recommended for structural purposes in a marine environment.

Keywords: "Reinforced concrete", corrosion, passivation, reinforcement, "concrete pore solutions".

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – CURVAS DE POLARIZAÇÃO ANÓDICA DE AMOSTRAS DE AÇO IMERSAS EM 10 DIFERENTES SOLUÇÕES POR PELO MENOS 14 DIAS	10
FIGURA 2 - VARIAÇÃO NO FORMATO DA SEÇÃO TRANSVERSAL DOS PITES	24
FIGURA 3 - IMAGEM DE TEM OBTIDA DO FILME PASSIVO ÓXIDO FORMADO NO AÇO APÓS IMERSÃO EM SPC.....	27
FIGURA 4 - VOLTAMETRIA CÍCLICA DE AÇO IMERSO EM SPC COM CONCETRAÇÃO DE 0,80 M NAOH	29
FIGURA 5 - MODELO ESQUEMÁTICO MOSTRANDO O DESENVOLVIMENTO DO FILME PASSIVO NA SUPERFÍCIE DA ARMADURA EXPOSTA À SPC	29
FIGURA 6 - RESULTADO DE ANÁLISE DE MOTT-SCHOTTKY MOSTRANDO A EVOLUÇÃO DAS PROPRIEDADES ELETRÔNICAS DO FILME PASSIVO DO AÇO IMERSO EM SPC	31
FIGURA 7 - DIAGRAMA DE POURBAIX PARA O SISTEMA Fe - H ₂ O A 25 °C E 1 ATM	33
FIGURA 8 - TIPOS DE AÇO UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL NO BRASIL	39
FIGURA 9 - ESTRUTURAS CRISTALINAS CÚBICA DE CORPO CENTRADO (A) E CÚBICA DE FACE CENTRADA (B)	41
FIGURA 10 - DIAGRAMA DE EQUILÍBRIO DAS LIGAS FERRO-CARBONO	45
FIGURA 11 - MODELO DE FORMAÇÃO DA DUPLA CAMADA ELÉTRICA (MODELO DE GRAHAME)	52
FIGURA 12 - MODELO DE GRÁFICO DE MONITORAMENTO DE POTENCIAL DE CIRCUITO ABERTO (EM VOLTS <i>VERSUS</i> O POTENCIAL DE UM ELETRODO DE REFERÊNCIA) AO LONGO DO TEMPO (EM UNIDADE DE TEMPO)	53
FIGURA 13 - MODELO DE CURVAS DE POLARIZAÇÃO	54
FIGURA 14 - MODELOS DE DIAGRAMA DE NYQUIST (A) E DIAGRAMAS DE BODE (B) PARA UM CIRCUITO RC.....	58
FIGURA 15 – MODELO DE GRÁFICOS DE MOTT-SCHOTTKY	59
FIGURA 16 - SEÇÃO DE UM CONTORNO DE GRÃOS COM ENFOQUE PARA O SULCO SUPERFICIAL E SUPERFÍCIE ATACADA QUIMICAMENTE À ESQUERDA E À DIREITA A MICROSCOPIA COM O CONTORNO DE GRÃOS REVELADOS	61
FIGURA 17 - AREIA DE CINZA DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR (ESQUERDA), AREIA FINA (CENTRO) E LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (DIREITA).....	71
FIGURA 18 - CINZA DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR COLETADA NA USINA DE JAÚ	72
FIGURA 19 - DECANTADORES ONDE O LETA É DEPOSITADO NA ETA DE SÃO CARLOS	75
FIGURA 20 - SOLUÇÃO DE POROS DE CONCRETO SIMULADA DURANTE AGITAÇÃO ELETROMAGNÉTICA	79
FIGURA 21 - FILTRAGEM DE SOLUÇÃO DE POROS DE CONCRETO SIMULADA CONTENDO 3,5% DE NaCl	79
FIGURA 22 - ELETRODO DE TRABALHO CONFECCIONADO DE AÇO CA-60	80
FIGURA 23 - ELETRODO DE Hg/HgO (A) E SCE (B) CONFECCIONADOS	80
FIGURA 24 - CORPO DE PROVA DE COMPÓSITO CIMENTÍCIO DE LETA COM ARMADURA	81
FIGURA 25 - CÉLULA ELETROQUÍMICA UTILIZADA INSERIDA NA GAIOLA DE FARADAY	84
FIGURA 26 - PROGRAMA EXPERIMENTAL PARA AS AMOSTRAS DE AÇO EM SPC	85
FIGURA 27 - CÉLULA ELETROQUÍMICA MONTADA COM AMOSTRA DE COMPÓSITO CIMENTÍCIO, RE, WE E CE NA SOLUÇÃO ALCALINA	88
FIGURA 28 - PROGRAMA EXPERIMENTAL PARA A ARMADURA EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS.....	89

FIGURA 29 - A) MONITORAMENTO DO OCP, B) GRÁFICOS DE PARETO PARA RESULTADOS DE OCP; C) CURVAS LSV A 1 MV.S-1, D) GRÁFICOS DE PARETO PARA E_{COR} E E) GRÁFICOS DE PARETO PARA J_{COR} . SOLUÇÕES: I) REF-S; II) REF-S + CARBONATOS; III) REF-S + NaCl; IV) REF-S + CARBONATO + NaCl MÁXIMA CONCENTRAÇÃO E, V) CONDIÇÃO CENTRAL REF-S + CARBONATO + NaCl. EXPERIMENTO A: PRESENÇA DE CO ₂ , EXPERIMENTO B: PRESENÇA DE CLORETOS; EXPERIMENTO A*B: INTERAÇÃO CO ₂ E CLORETOS.	94
FIGURA 30 - A) DIAGRAMA DE NYQUIST E B) GRÁFICOS DE BODE I) REF-S; II) REF-S + CARBONATOS; III) REF-S + NaCl; IV) REF-S + CARBONATO + NaCl MÁXIMA CONCENTRAÇÃO E, V) CONDIÇÃO CENTRAL REF-S + CARBONATO + NaCl; C) CIRCUITO EQUIVALENTE PARA AJUSTE DAS MEDIDAS DE EIS PARA SOLUÇÕES I, II, IV E V. D) CIRCUITO EQUIVALENTE PARA AJUSTE DAS MEDIDAS DO EIS PARA A SOLUÇÃO III.	99
FIGURA 31 - MONITORAMENTO DE POTENCIAL DE CIRCUITO ABERTO, B) GRÁFICOS DE PARETO PARA MONITORAMENTO DO OCP; C) CURVAS LSV A 1 MV/S, D) GRÁFICOS DE PARETO PARA E_{COR} E E) GRÁFICOS DE PARETO PARA J_{COR} . SOLUÇÕES: I) ACBC-S; II) ACBC-S + CARBONATOS; III) ACBC-S + NaCl; IV) ACBC-S + CARBONATO + NaCl NA MÁXIMA CONCENTRAÇÃO E, V) ACBC-S + CARBONATO + NaCl. EXPERIMENTO A: PRESENÇA DE CO ₂ , EXPERIMENTO B: PRESENÇA DE CLORETO; EXPERIMENTO A*B: INTERAÇÃO CO ₂ E CLORETO.	103
FIGURA 32 - A) DIAGRAMA DE NYQUIST E B) GRÁFICOS DE BODE PARA I) ACBC-S; II) ACBC-S + CARBONATOS; III) ACBC-S + NaCl; IV) ACBC-S + CARBONATO + NaCl MÁXIMA CONCENTRAÇÃO E, V) CONDIÇÃO CENTRAL ACBC-S + CARBONATO + NaCl. ...	105
FIGURA 33 - A) MONITORAMENTO DE POTENCIAL DE CIRCUITO ABERTO, B) GRÁFICOS DE PARETO PARA MONITORAMENTO DO OCP; C) CURVAS LSV A 1 MV/S, D) GRÁFICOS DE PARETO PARA E_{COR} E E) GRÁFICOS DE PARETO PARA J_{COR} . SOLUÇÕES: I) LETA-S; II) LETA-S + CARBONATOS; III) LETA-S + NaCl; IV) LETA-S + CARBONATO + NaCl NA MÁXIMA CONCENTRAÇÃO E, V) LETA-S + CARBONATO + NaCl. EXPERIMENTO A: PRESENÇA DE CO ₂ , EXPERIMENTO B: PRESENÇA DE CLORETO; EXPERIMENTO A*B: INTERAÇÃO CO ₂ E CLORETO.	107
FIGURA 34 - DIAGRAMAS DE A) NYQUIST E B) BODE PARA I) LETA-S; II) LETA-S + CARBONATOS; III) LETA-S + NaCl; IV) LETA-S + CARBONATO + NaCl NA MÁXIMA CONCENTRAÇÃO E, V) LETA-S + CARBONATO + NaCl.....	109
FIGURA 35 - VALORES DE (A) POTENCIAL DE CIRCUITO ABERTO, (B) POTENCIAL DE CORROSÃO E (C) DENSIDADE DE CORRENTE DE CORROSÃO EM REF-S, ACBC-S E LETA-S, PARA I) SOLUÇÃO PURA; II) SOLUÇÃO COM CARBONATO/BICARBONATO; III) SOLUÇÃO COM NaCl; IV) SOLUÇÃO COM MISTURA EM MÁXIMA CONCENTRAÇÃO DE CARBONATO/BICARBONATO E NaCl E, V) SOLUÇÃO DE MISTURA NA CONDIÇÃO DO PONTO CENTRAL.	111
FIGURA 36 - POTENCIAL DE CIRCUITO ABERTO DE ARMADURAS EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REF, ACBC E LETA	113
FIGURA 37 - DIAGRAMAS DE NYQUIST (A) E BODE (B) PARA REF-A-CC E DIAGRAMAS DE NYQUIST (C) E BODE (D) PARA ACBC-A-CC, TODOS EM SOLUÇÃO DE Ca(OH) ₂ . TODAS AS MEDIDAS FORAM FEITAS AOS 1, 3, 7, 15 E 21 DIAS APÓS A MOLDAGEM DOS COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS.....	115
FIGURA 38 - CIRCUITO EQUIVALENTE UTILIZADO PARA TRATAR OS DADOS DE EIS PARA REF-A-CC E ACBC-A-CC.....	117
FIGURA 39 - (A) RESISTÊNCIA À POLARIZAÇÃO (R_p), (B) RESISTÊNCIA DO COMPÓSITO CIMENTÍCIO (R_b), (C) ELEMENTO DE FASE CONSTANTE (CPE) E (C) VALORES DE CAPACITÂNCIA (C) OBTIDOS APÓS AJUSTE DO CIRCUITO EQUIVALENTE ADOTADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE IMERSÃO.	118
FIGURA 40 - SIMULAÇÃO DO GRÁFICO DE NYQUIST PARA AS RESPOSTAS MÉDIAS (DA FIGURA 39) DAS AMOSTRAS (A) REF-A-CC E ACBC-A-CC NA SOLUÇÃO DE Ca(OH) ₂ . CIRCUITO EQUIVALENTE REPRESENTADO NA FIGURA 38.	119

FIGURA 41 - IMAGENS SEM DE (A) AÇO CONFORME RECEBIDO; (B) REF-A-CC 7º DIA; (C) ACBC-A-CC 7º DIA; (D) REF-A-CC 21º DIA E; (E) ACBC-A-CC 21º DIA DE IMERSÃO EM $Ca(OH)_2$ SATURADO.....	120
FIGURA 42 - SEM COM MAPEAMENTO ELEMENTAR (Fe, Si, O, Ca) DE (A) REF-A-CC AOS 7 DIAS, (B) ACBC-A-CC AOS 7 DIAS, (C) REF-A-CC AOS 14 DIAS E (D) ACBC-A-CC AOS 14 DIAS EM SOLUÇÃO SATURADA DE $Ca(OH)_2$	122
FIGURA 43 - PERCENTUAL EM PESO DE CARBONO, OXIGÊNIO, SILÍCIO, CÁLCIO E FERRO EM REF-A-CC E ACBC-A-CC AOS 7 E 14 DIAS DE IMERSÃO EM SOLUÇÃO SATURADA DE $Ca(OH)_2$	123
FIGURA 44 - DIAGRAMAS DE NYQUIST (A) E BODE (B) PARA REF-A-CC E DIAGRAMAS DE NYQUIST (C) E BODE (D) PARA ACBC-A-CC, EM SOLUÇÃO DE NaCl 3,5 p.%. TODAS AS MEDIÇÕES FORAM FEITAS AOS 1, 70 E 191 DIAS DE EXPOSIÇÃO À SOLUÇÃO.....	125
FIGURA 45 - EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO COM A IDADE DA (A) ACBC-A-CC, (B) REF-A-CC, (C) LOGARITMO DA RESISTÊNCIA DO COMPÓSITO CIMENTÍCIO, (D) RESISTÊNCIA DE POLARIZAÇÃO, (E) ELEMENTO DE FASE CONSTANTE (CPE) E (F) VALORES DE CAPACITÂNCIA (C) DAS AMOSTRAS REF-A-CC E ACBC-A-CC OBTIDOS PELO AJUSTE DO CIRCUITO EQUIVALENTE DA FIGURA 38, EM FUNÇÃO DO TEMPO DE IMERSÃO EM SOLUÇÃO DE NaCl 3,5 p.%.	127
FIGURA 46 - EVOLUÇÃO DA MÉDIA DE TRÊS VALORES MEDIDOS DE POTENCIAIS DE CIRCUITO ABERTO (OCP) EM FUNÇÃO DO TEMPO DE IMERSÃO DE REF-A-CC E ACBC-A-CC EM SOLUÇÃO DE NaCl 3,5 p.%.	128
FIGURA 47 - SEM COM MAPEAMENTO ELEMENTAR (Fe, Si, O, Ca) DE (A) REF 14 DIAS, (B) SBAS 14 DIAS, (C) REF 60 DIAS, (D) SBAS 60 DIAS, (E) REF 191 DIAS E (F) SBAS 191 DIAS EM SOLUÇÃO DE NaCl A 3,5%.....	130
FIGURA 48 - PERCENTUAL EM PESO DE CARBONO, OXIGÊNIO, SILÍCIO, CÁLCIO, FERRO E CLORO DESTACADOS NA REF-A-CC E ACBC-A-CC AOS 14, 60 E 191 DIAS DE IMERSÃO EM SOLUÇÃO DE NaCl 3,5 p.%.	131
FIGURA 49 - DIAGRAMAS DE NYQUIST PARA (A) REFA-CC E (B) LETA-A-CC, AMBOS EM SOLUÇÃO DE $Ca(OH)_2$. (C) REPRESENTAÇÃO DO CIRCUITO EQUIVALENTE UTILIZADO PARA AJUSTAR OS DADOS DE EIS.....	132
FIGURA 50 - VALORES DE RESISTÊNCIA DO COMPÓSITO CIMENTÍCIO (R_2) E RESISTÊNCIA À CORROSÃO DO AÇO (R_3) OBTIDOS AJUSTANDO O CIRCUITO EQUIVALENTE (FIG. S1c) EM FUNÇÃO DO TEMPO DE IMERSÃO EM SOLUÇÃO DE $Ca(OH)_2$	133
FIGURA 51 - IMAGENS SEM DE (A) AMOSTRA EM BRANCO, (B) REF-A-CC 7º DIA, (C) REF-A-CC 21º DIA, (D) LETA-A-CC 7º DIA E (E) LETA-A-CC 21º DIA	134
FIGURA 52 - PERCENTUAL EM PESO DE CARBONO, OXIGÊNIO, SILÍCIO, CÁLCIO E FERRO EM REF-A-CC E LETA-A-CC AOS 7, 14 E 21 DIAS DE IMERSÃO EM SOLUÇÃO SATURADA DE $Ca(OH)_2$	135
FIGURA 53 - VARIAÇÃO DA MASSA DOS CORPOS DE PROVA REF-C E LETA-CC DURANTE OS CICLOS DE ENVELHECIMENTO (IMERSÃO EM 3,5 p.% NaCl E SECAGEM). VALORES MAIS ALTOS (MAIS BAIXOS) REFEREM-SE A CONDIÇÕES SATURADAS (SECAS).	136
FIGURA 54 - EVOLUÇÃO DO POTENCIAL DE CIRCUITO ABERTO DE ELETRODOS DE TRABALHO EM REF-CC E LETA-CC <i>VERSUS</i> Ag/AgCl KClSAT.	138
FIGURA 55 - IMAGENS SEM DE (A) REF-A-CC E (B) LETA-A-CC APÓS O FINAL DOS EXPERIMENTOS.....	139
FIGURA 56 - RESISTÊNCIA À POLARIZAÇÃO DO AÇO EM REF-CC, ACBC-CC E LETA-CC AO LONGO DO TEMPO DE MEDIÇÃO DE EIS..	140

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CONCENTAÇÃO DOS COMPOSTOS QUÍMICOS ADICIONADOS ÀS SOLUÇÕES DO TRABALHO DE GHODS <i>ET AL.</i> (2009)	11
TABELA 2 - TIPOS DE ATAQUES AGRESSIVOS QUE AFETAM O CONCRETO ARMADO	16
TABELA 3 - POTENCIAL DE ELETRODOS DE REFERÊNCIA EM SOLUÇÃO AQUOSA A 25 °C EM V vs. NHE	20
TABELA 4 - ESPONTANEIDADE DAS REAÇÕES DE CORROSÃO (ENERGIA LIVRE DE GIBBS PADRÃO)	22
TABELA 5 - PROCESSOS MECÂNICOS, TRATAMENTOS TÉRMICOS, ASPECTOS MICROESTRUTURAIS, CARACTERÍSTICAS E CLASSIFICAÇÃO DE AÇOS DESTINADOS À ARMADURA PARA CONCRETO	46
TABELA 6 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE DIFERENTES LOTES DE CA-60	48
TABELA 7 - EXPERIMENTOS REALIZADOS POR AUTORES QUE AVALIARAM A CORROSÃO DE ARMADURAS DE CONCRETO	50
TABELA 8 – SINOPSE DOS PRINCIPAIS ARTIGOS RELACIONADOS À CORROSÃO DE ARMADURAS DE AÇO-CARBONO EM SOLUÇÕES DE POROS DE CONCRETO SIMULADAS	63
TABELA 9 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA ACBC IN NATURA E APÓS 240 MIN DE MOAGEM	73
TABELA 10 - PH DE AMOSTRAS DE ACBC E DAS AREIAS	74
TABELA 11 - CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DO LETA DE SÃO CARLOS DISPONIBILIZADAS POR CORDEIRO (2001)	76
TABELA 12 - NOMENCLATURA DAS AMOSTRAS CONFORME CADA TRAÇO UTILIZADO	77
TABELA 13 - QUANTIDADE DE MATERIAIS UTILIZADOS PARA PRODUÇÃO DAS SOLUÇÕES DE POROS DE CONCRETO SIMULADAS	78
TABELA 14 - TRAÇOS UNITÁRIOS DOS COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS UTILIZADOS NESTA PESQUISA	82
TABELA 15 - PROPRIEDADES FÍSICAS DOS COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS UTILIZADOS NESTA PESQUISA	82
TABELA 16 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS AOS 28 DIAS UTILIZADOS NESTE TRABALHO	83
TABELA 17 - CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS ESTUDADAS NO PLANEJAMENTO FATORIAL PARA CORROSÃO DE AÇO	86
TABELA 18 - CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS DO PLANEJAMENTO FATORIAL DESTA PESQUISA	87
TABELA 19 - CARACTERIZAÇÃO (PH E CONDUTIVIDADE) DAS SOLUÇÕES DE POROS SIMULADAS	91
TABELA 20 - VALORES DE POTENCIAL DE CIRCUITO ABERTO, POTENCIAL DE CORROSÃO E DENSIDADE DE CORRENTE DE CORROSÃO (J _{COR}) PARA REF-S	95
TABELA 21 - PARÂMETROS OBTIDOS A PARTIR DO TRATAMENTO DE DADOS DE EIS OBTIDOS NO OCP PARA A REF-S E SUAS MODIFICAÇÕES, UTILIZANDO O CIRCUITO EQUIVALENTE COM MODELO DE DUAS CONSTANTES DE TEMPO (2T), REPRESENTADO NAS FIGURA 30C E FIGURA 30D	101
TABELA 22 - VALORES DE POTENCIAL DE CIRCUITO ABERTO (OCP), POTENCIAL DE CORROSÃO (E _{COR}) E DENSIDADE DE CORRENTE DE CORROSÃO (J _{COR}) PARA ACBC-S E SOLUÇÕES DERIVADAS EM SBAS E SBAS	104
TABELA 23 - PARÂMETROS OBTIDOS A PARTIR DO TRATAMENTO DE DADOS DE EIS OBTIDOS NO OCP PARA O ACBC-S E SUAS MODIFICAÇÕES, UTILIZANDO O CIRCUITO EQUIVALENTE DA FIGURA 30C	105
TABELA 24 - VALORES DE POTENCIAL DE CIRCUITO ABERTO (OCP), POTENCIAL DE CORROSÃO (E _{COR}) E DENSIDADE DE CORRENTE DE CORROSÃO (J _{COR}) PARA LETA-S E SOLUÇÕES DERIVADAS.	108
TABELA 25 - PARÂMETROS OBTIDOS A PARTIR DO TRATAMENTO DE DADOS DE EIS OBTIDOS NO OCP PARA O LETA-S E SUAS MODIFICAÇÕES, UTILIZANDO O CIRCUITO EQUIVALENTE DA FIGURA 30C E FIGURA 30D	110

TABELA 26 - TABELA SINÓPTICA DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: PRINCIPAIS ARTIGOS QUE APRESENTARAM ESTUDOS SOBRE CORROSÃO DE ARMADURAS EM SOLUÇÃO DE POROS DE CONCRETO SIMULADA.....	161
--	-----

LISTA DE SIGLAS

ACBC – Areia de cinza de bagaço de cana-de-açúcar

AFM – *Atomic force microscopy*

Al – alumínio

ASTM – *American Society for Testing and Materials Standards*

B – Coeficiente de Stern-Gearn

C₃A – Aluminato tricálcico

Ca – Cálcio

CaCl₂ – Cloreto de cálcio

CaO – Óxido de cálcio

Ca(OH)₂ – Hidróxido de cálcio

Ca(SO)₄ – Sulfato de cálcio

CE – *Counter electrode*

Cl⁻ – Íon de cloro (cloreto)

CLSM – *Confocal laser scanning microscopy*

CO₂ – Dióxido de carbono

CP – Curva de polarização

CPE – *Constant phase element*

CSH – Silicatos de cálcio hidratado

CTV – *Chloride threshold value*

CV – *Cyclic voltametry*

DCE – Dupla camada elétrica

Dp – Desvio padrão

DoE – *Design of experiments*

E_{cor} – Potencial de corrosão

EDS – *Energy-dispersive X-ray spectroscopy*

EELS – *Electron energy loss spectroscopy*

EIS – *Electrochemical impedance spectroscopy*

EPMA – *Electronic probe microanalysis*

EQCM – *Electrochemical quartz crystal microbalance*

ETA – Estação de tratamento de água

Fe - Ferro

$\text{Fe}(\text{OH})_2$ – Hidróxido de ferro (II)

FeOOH – Óxido de ferro (III) hidratado

Fe_2O_3 – Óxido de ferro (III)

Fe_3O_4 – Óxido de ferro (II, III)

FIB – *Focused ion beam microscopy*

FM – *Fluorescence microscopy*

FTIR – *Fourier-transform infrared spectroscopy*

GDEOS – *Glow-discharge optical emission spectroscopy*

GD-OES – *Glow-discharge with an optical emission spectrometer*

GESEC – Grupo de Estudos em Sustentabilidade e Ecoeficiência em Construção Civil e Urbana

GPC – *Gel permeation chromatography*

HNO_3 – Ácido nítrico

H_2O – Água

J_{corr} – Densidade de corrente

K – Potássio

KCl – Cloreto de potássio

K₂O – óxido de potássio

KOH – Hidróxido de potássio

LETA – Lodo de estação de tratamento de água

LEIS – *Localized electrochemical impedance spectroscopy*

LMC – Laboratório de materiais e componentes

LPR – *Linear polarization resistance*

LSV – *Linear sweep voltametry*

Mg – magnésio

MgCl₂ – Cloreto de magnésio

MgSO₄ – Sulfato de magnésio

M-IR – *Infrared microscopy*

MS – Espectroscopia de impedância de Mott-Schottky

Na – Sódio

NaCl – Cloreto de sódio

Na₂O – Óxido de sódio

NaOH – Hidróxido de sódio

Na₂SO₄ – Sulfato de sódio

NHE – *Normal hydrogen electrode*

(NH₄)₂SO₄ – Sulfato de amônio

O₂ – Gás oxigênio

OM – *Optical microscopy*

OCP – *Open circuit potential*

PIB – Produto interno bruto

pH – Potencial hidrogeniônico

RE – *Reference electrode*

RILEM – *Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages*

Rp – Resistência à polarização

S – Enxofre

SCE – *Saturated calomel electrode*

SEM – *Scanning electron microscopy*

Si – Silício

SIMS – *Secondary-ion mass spectrometry*

SKPFM – *Scanning Kelvin probe force microscopy*

SMRE – *Scanning micro-reference electrode*

(SO₄)²⁻ – Sulfato

SPC – Solução de poros de concreto

SVET – *Scanning vibrating electrode technique*

TEM – *Transmission electron microscopy*

TG-DSC – *Thermogravimetry differential scanning and calorimetry*

WE – *Working electrode*

XFS - *X-ray fluorescence spectroscopy*

XPS – *X-ray photoelectron spectroscopy*

XRD – *X-ray diffraction*

PZC – *Point of zero charge*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE SIGLAS	14
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA	4
1.2 PROBLEMAS DE PESQUISA	5
1.3 HIPÓTESES.....	5
1.4 OBJETIVOS.....	6
2. REFERENCIAL TEÓRICO	7
2.1 SOLUÇÕES DE POROS DE CONCRETO.....	7
2.1.1 Composição de soluções de poros de concreto simuladas.....	8
2.1.2 Filtragem de soluções de poros de concreto simuladas.....	14
2.1.3 Deaeração das soluções de poros de concreto simuladas	14
2.1.4 Simulação de penetração de agentes agressivos nos poros do concreto	15
2.2 CORROSÃO	17
2.2.1 Passivação do aço-carbono	25
2.2.2 Fatores que influenciam na inicialização de processos corrosivos	31
2.2.3 Corrosão para os diferentes aços da construção civil.....	38
2.2.4 Técnicas eletroquímicas de avaliação da corrosibilidade de metais	50
2.3 SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	62
3. MATERIAIS E MÉTODO	70
3.1 MATERIAIS	70
3.1.1 Agregados miúdos reciclados	70
3.2 NOMENCLATURA DAS AMOSTRAS	77
3.3 PREPARAÇÃO DA SOLUÇÃO DE POROS DE CONCRETO SIMULADA	77
3.4 PREPARAÇÃO DOS ELETRODOS E DA CÉLULA ELETROQUÍMICA	79
3.5 CORPOS DE PROVA DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS	81
3.5.1 Propriedades físicas e mecânicas dos compósitos cimentícios com agregados reciclados	82
3.6 MÉTODOS	84
3.6.1 Armadura em solução de poros de concreto simulada alcalina e contaminada com cloreto e carbonatos	84
3.6.2 Armadura em compósitos cimentícios em meio alcalino e em meio de cloreto	87

4. RESULTADOS E ANÁLISES.....	90
4.1 ARMADURA EM SOLUÇÃO DE POROS DE CONCRETO SIMULADAS	90
4.1.1 Armadura no meio de referência.....	93
4.1.2 Armadura no meio contendo ACBC	102
4.1.3 Armadura no meio contendo LETA	106
4.1.4 Suscetibilidade à corrosão de armaduras em REF-s, ACBC-s e LETA-s.....	110
4.2 ARMADURA EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS.....	112
4.2.1 Armadura em compósito cimentício com ACBC.....	114
4.2.2 Armadura em compósito cimentício com LETA	131
4.2.3 Suscetibilidade à corrosão de armaduras em compósitos cimentícios com ACBC e LETA	139
5. CONCLUSÕES	141
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	143
REFERÊNCIAS	144
APÊNDICE A.....	161

1. INTRODUÇÃO

A manutenção de materiais deteriorados pela corrosão representa uma média de gasto de 4% de todo o produto interno bruto (PIB) dos países industrializados. Certamente a corrosão de armaduras contribui para uma parcela significativa desse percentual, pois pode ser considerada uma das principais causas da deterioração prematura de estruturas de concreto armado em todo o mundo (FRANÇOIS; LAURENS; DEBY, 2018).

A compreensão do fenômeno da corrosão de aços para concreto, porém, apresenta parâmetros específicos, resultando numa grande dificuldade para a comunidade científica em termos de caracterização do fenômeno, tais como: condições de iniciação, cinética dos mecanismos corrosivos, predição de vida útil, entre outros.

Na físico-química/ eletroquímica, procedimentos experimentais para avaliação da corrosibilidade de metais são padronizados e executados há muitos anos com diferença apenas na acuracidade dos equipamentos utilizados. Entretanto, a utilização dessas técnicas na armadura do concreto é dificultada pelo fato de o concreto ser um eletrólito sólido e, portanto, de resistividade elevada. Embora haja essa dificuldade, experimentos em amostras de concreto armado são executados desde a década de 1960 (FRANÇOIS; LAURENS; DEBY, 2018).

A partir da publicação da norma americana C876-91 (ASTM, 1991), de avaliação do potencial de corrosão de armaduras de concreto, muitas pesquisas foram realizadas no sentido de verificar a taxa de corrosão de aços de construção civil em diferentes tipos de compósitos cimentícios. Além das intrínsecas dificuldades de entender o processo eletroquímico do sistema metal | filme passivo | eletrólito | face do compósito cimentício (KOGA; ALBERT; NOGUEIRA, 2018), a corrosão no concreto armado não é diretamente acessível por meio de sondas. Por essa razão, o protocolo

da ASTM C876 (ASTM INTERNATIONAL, 2015) recomenda uma solução empírica para o problema por meio da comparação de potenciais de corrosão obtidos em um sistema e os potenciais de parâmetro da respectiva norma.

Embora tenha sido um grande avanço para o estudo da corrosão em concreto armado, a norma americana apresenta limitações, pois há muitos parâmetros que influenciam na corrosibilidade de um material complexo como a armadura no concreto, tais como: tipo de cimento (o experimento normativo seria para avaliar apenas compósitos de cimento Portland) e suas características, processo construtivo, as condições de serviço, entre outros. Sendo assim, é difícil utilizar apenas os parâmetros dessa norma para avaliar a corrosão de armaduras.

Apesar disso, a técnica apresentada pela ASTM C876 continua a ser utilizada por muitos pesquisadores, mas associada a outros experimentos, como as curvas de polarização baseadas nas recomendações da RILEM TC 154-EMC (RILEM, 2003), ou a espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) (FRAZÃO *et al.*, 2019; GUPTA *et al.*, 2019; HOU *et al.*, 2019; KOGA *et al.*, 2019; LIANG *et al.*, 2019; SIDDIQUE *et al.*, 2019; SU *et al.*, 2019; TAJI *et al.*, 2019; UTHAMAN *et al.*, 2019; ZHU *et al.*, 2019). Outros autores apenas utilizam o protocolo da ASTM C876 (ASTM INTERNATIONAL, 2016) como guia para produção de corpos de prova ou modelo de base para medição do potencial de corrosão, já que essa norma pode ser utilizada apenas para compósitos cimentícios convencionais de cimento Portland e esses pesquisadores estudaram novos materiais (adições ou incorporações) (DING; POURSAEE, 2017; FIGUEIRA *et al.*, 2017; BABAEE; CASTEL, 2018; KOGA *et al.*, 2018; LIU *et al.*, 2018; CHALHOUB; FRANÇOIS; CARCASSES, 2019; GHORBANI *et al.*, 2019; TANG *et al.*, 2019; XU *et al.*, 2019). Porém, a tendência é não mais seguir a normalização americana, já que ela possui muitas limitações e incertezas associadas em seu protocolo experimental (JIN *et al.*, 2019; KARTHICK *et al.*, 2019; MA *et al.*, 2018; RENGARAJU; NEELAKANTAN; PILLAI, 2019; TAHERI, 2019).

Fato é que a ASTM C876 foi um marco para a avaliação da corrosão de armaduras de concreto, especialmente por ser um método não-destrutivo, mesmo que apresente limitações. Entretanto, além dos problemas inerentes ao procedimento experimental da ASTM C876 (ASTM INTERNATIONAL, 2016), o fato de o concreto ser um material heterogêneo e um eletrólito sólido dificulta as medidas eletroquímicas realizadas no sistema do concreto armado. A resistividade do concreto é muito alta, de forma a produzir uma queda ôhmica que é difícil ser considerada e quando não o é, a medida de potencial realizada não reflete a realidade do que ocorre no sistema eletroquímico formado no concreto armado.

Para tentar resolver o problema da incerteza das medidas eletroquímicas e da alta resistividade do concreto armado, em meados da década de 1990, alguns pesquisadores iniciaram o estudo de corrosão do concreto armado através do uso de eletrodos de trabalho feitos de aço de construção civil imersos em soluções de poros de concreto (SPC). A ideia surgiu de uma técnica proposta por Longuet; Burglen e Zelwer (1973) e foi utilizada para extrair soluções de poros de concretos por meio de um dispositivo pressurizador com o objetivo de caracterizar as soluções presentes nos poros do concreto. A técnica, porém, depende de um equipamento sofisticado e a quantidade de solução extraída de cada amostra é muito pequena. Por esse motivo, Mammoliti *et al.* (1996) propôs a simulação de solução de poros de concreto por meio da preparação de soluções de pH similares aos dos poros do concreto feitas de Ca(OH)_2 saturado ou solução simulada de concreto feitas de NaOH, KOH e Ca(OH)_2 , uma vez que esses compostos são os mais abundantes na solução de poros do concreto. Dessa forma, amostras de aço são preparadas e imersas nessas soluções alcalinas, facilitando a execução de medidas eletroquímicas. A partir desse estudo, vários pesquisadores utilizaram a preparação de SPC para estudar a corrosão do aço, principalmente a partir da década de 2010.

No contexto de dificuldade de avaliação do potencial de corrosão e análise de formação de filme passivo do aço em amostras de compósitos cimentícios, a presente pesquisa teve como objetivo a utilização de técnicas eletroquímicas no aço de

construção civil imerso em soluções de poros de compósitos cimentícios convencional, com areia de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (ACBC) e com lodo de estação de tratamento de água (LETA).

A ACBC e o LETA são resíduos em estudo pelo Grupo de Estudos em Sustentabilidade e Ecoeficiência na Construção Civil e Urbana (GESEC), de forma que foi possível ratificar os resultados já obtidos pelo grupo e aprofundar o conhecimento acerca da passivação e corrosão de armaduras em solução de poros de compósitos cimentícios com esses resíduos.

1.1 Justificativa

Os estudos eletroquímicos em amostras de compósitos cimentícios, exceto para potencial de meia-célula (C876-15 (ASTM INTERNATIONAL, 2016)) e curvas de polarização (T154-EMC (RILEM, 2003)), não são normatizados. Portanto, uma das justificativas para execução desta pesquisa é a falta de um procedimento de ensaios com parâmetros associados para avaliação do potencial corrosivo tanto de amostras de compósitos cimentícios quanto de amostras SPC.

Quanto à utilização de SPC, nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science*, até o final do ano de 2021, apenas quatro artigos foram encontrados nos quais os autores realizaram a comparação dos resultados da corrosibilidade do aço-carbono em SPC e corpos de prova de compósito cimentício (MAMMOLITI; HANSSON; HOPE, 1999; POURSAEE; HANSSON, 2007; DUFFÓ; FARINA, 2016; FENG *et al.*, 2017). Nesses estudos, porém, foram utilizadas as técnicas de monitoramento de potencial de circuito aberto em meia-célula, resistência à polarização linear e cíclica potencioestáticas e EIS apenas quando o aço está em ambiente contaminado com cloretos. Dessa forma, observa-se a ausência de experimentos que possam ratificar se o aço imerso em SPC apresenta o mesmo comportamento que o aço moldado em uma amostra sólida de compósito cimentício, contaminados ou não por cloretos ou outros agentes agressivos.

Outra justificativa para a realização do presente trabalho é o fato de Moretti (2018), membro do GESEC, grupo de estudos da autora, ter iniciado o estudo de passivação do aço em compósito cimentício produzido com ACBC utilizando SPC e observado que a incorporação de ACBC em compósitos cimentícios melhora qualitativamente o filme passivo do aço imerso nesse meio. Ainda, um estudo em desenvolvimento do GESEC avalia o potencial corrosivo de armaduras em compósitos cimentícios com incorporação de LETA em compósitos cimentícios e, até onde pôde-se observar, esse resíduo reduz a resistência à polarização do aço imerso nesse meio. Assim, na presente pesquisa, utilizou-se compósitos cimentícios convencional e com incorporação de ACBC e LETA em soluções de poros simuladas de compósitos cimentícios e verificou-se a incorporação desses resíduos na melhoria da qualidade do filme passivo formado no aço imerso nesses meios comparativamente a um aço imerso em SPC de compósito cimentício convencional.

1.2 Problemas de pesquisa

Ao final deste trabalho, foi possível responder a dois problemas de pesquisa:

- 1) É possível avaliar a resistência à corrosão de armaduras de concretos com incorporação de resíduos utilizando solução de poros de concreto?
- 2) A incorporação de areia de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e de lodo de estação de tratamento de água em compósitos cimentícios alteram a resistência à corrosão de armaduras em relação a um compósito cimentício convencional?

1.3 Hipóteses

Esta pesquisa possui três hipóteses:

- 1) É possível utilizar solução de poros de concreto para avaliar a corrosão de armaduras de concretos com incorporação de resíduos utilizando solução de poros de concreto;

- 2) A incorporação de areia de cinza de bagaço de cana-de-açúcar em compósitos cimentícios melhora a resistência à corrosão do aço imerso nesse meio em relação a um meio convencional;
- 3) A incorporação de lodo de estação de tratamento de água em compósitos cimentícios diminui a resistência à corrosão do aço imerso nesse meio em relação a um meio convencional.

1.4 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho foi verificar a possibilidade de utilizar solução de poros de concreto para avaliar a corrosão do aço em compósitos cimentícios com incorporação de resíduos. Para isso, alguns objetivos específicos foram traçados:

- 1) Verificar a diferença entre as soluções de poros de concreto com e sem incorporação de resíduos;
- 2) Verificar se a incorporação de ACBC e LETA (dois resíduos incorporados separadamente) modificam a resistência à corrosão do aço em compósitos cimentícios com esses resíduos;
- 3) Verificar se os resultados obtidos em solução de poros de concreto são condizentes com os resultados obtidos em compósitos cimentícios com as mesmas incorporações de resíduos.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A corrosão do aço é uma das causas mais importantes de degradação de estruturas de concreto armado antes do final de sua vida útil em escala internacional. Uma vez que foi verificado um alto custo total para manutenção corretiva devido à corrosão de armaduras, as consequências técnicas, financeiras e sociais ocasionadas por esse problema devem ser consideradas. Especificamente na Engenharia Civil, a corrosão de armaduras é um tema cuja importância é dada há pelo menos quatro décadas (FRANÇOIS; LAURENS; DEBY, 2018).

Embora haja grande preocupação em se compreender as causas e consequências acerca da corrosão de armaduras de concreto e inúmeros artigos publicados com essa temática no ambiente acadêmico, essa questão, no mercado da construção civil, é, geralmente, negligenciada. Na prática, observam-se muitas construções que apresentam manifestações patológicas decorrentes de corrosão de armaduras. Essencialmente, nota-se que há falta de conhecimento dos engenheiros e arquitetos na construção civil, bem como falta de familiaridade dos engenheiros nas técnicas eletroquímicas necessárias para estudar o fenômeno da corrosão de armaduras.

Como este trabalho visou a comparação de análises eletroquímicas para avaliar a corrosão de aços da construção civil em solução de poros de concreto simulada (SPC) e em relação aos corpos de prova, neste capítulo será explorada a revisão da literatura que forneceu a base para a escolha desses parâmetros, iniciando com a exploração das soluções de poros simuladas e finalizando com conceitos acerca da corrosão.

2.1 Soluções de poros de concreto

Como mencionado, a utilização de SPC para avaliação de processos químicos de compósitos cimentícios foi idealizada para facilitar as análises eletroquímicas.

Entretanto, são diversas as formas de se analisar as transformações ocorridas no aço imerso em SPC. Por isso, uma extensa revisão bibliográfica foi realizada para embasar as escolhas metodológicas do presente trabalho.

Ao final deste capítulo, foi apresentada a Tabela 8, que contempla principais trabalhos bibliográficos referenciados nesta Tese. No Apêndice A, encontra-se a Tabela 26, que é uma síntese da revisão bibliográfica realizada, com os principais artigos científicos publicados em periódicos indexados encontrados acerca do tema: avaliação da corrosibilidade de armaduras de concreto imersas em solução de poros de concreto simuladas – palavras de busca utilizadas “*concrete pore solution*” AND “*corrosion*”. Esses artigos foram obtidos nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science*, sendo considerados artigos até o ano de 2021.

Nessa tabela, observam-se que os estudos eletroquímicos em SPC têm início na década de 1990. Entretanto, como se intensificaram apenas a partir da década de 2010, ainda há algumas controvérsias sobre sua utilização. Neste item, portanto, será apresentado o embasamento teórico para a escolha da SPC utilizada no programa experimental da presente pesquisa.

2.1.1 Composição de soluções de poros de concreto simuladas

Em sua maioria, os autores simplesmente adotam um tipo de composição de SPC, sem mencionar o motivo da escolha da composição química de suas SPC. Alguns pesquisadores, porém, realizaram estudo preliminar para escolher a melhor composição de SPC para suas análises. Esses estudos foram utilizados, neste trabalho, para embasar a escolha do procedimento experimental utilizado nas análises da armadura em SPC.

Como pode ser observado pela tabela de síntese bibliográfica (Tabela 26), há várias formas de produção de solução que os pesquisadores utilizam para compor a SPC. Embora com o passar dos anos os autores tenham optado por utilizar uma solução mais complexa, a maioria utiliza solução saturada de Ca(OH)_2 para simular

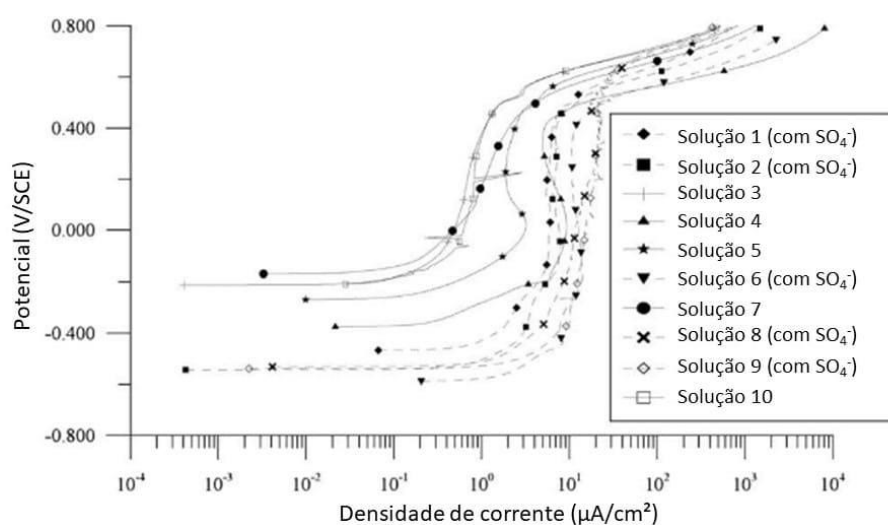
os poros do concreto (CHEN *et al.*, 2019; LIU *et al.*, 2019; MOSER *et al.*, 2019; XU *et al.*, 2019; ZUO *et al.*, 2019).

Veleva *et al.* (2002) testaram soluções de Ca(OH)_2 saturada e solução de cimento e água 1:1, ambas com pH 12,7. Além disso, os pesquisadores avaliaram a diferença entre o estudo do filme passivo crescido naturalmente nas soluções alcalinas e o filme crescido por polarização anódica. Observaram que um filme passivo mais resistente é formado no aço imerso na solução de cimento, devido à composição distinta das soluções. Para o aparecimento do pico característico de oxirredução, foram necessárias várias horas em solução de cimento polarizada anodicamente, enquanto na solução saturada de hidróxido de cálcio, foram necessários alguns minutos. A análise de espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios-X (XPS) mostrou que o Ca presente na superfície do aço é cerca de 10 vezes mais espesso na solução de Ca(OH)_2 que na solução de cimento. Além disso, o filme passivador formado nesta solução contém Si e S, elementos presentes no cimento. Pela análise de microscopia de força atômica (AFM) e microscopia óptica (OM), foi constatado que o filme passivador formado no aço imerso em solução de cimento cobre a superfície do metal de forma completa e homogênea, enquanto na solução de Ca(OH)_2 , o filme formado é grosseiro e cristalino e localiza-se em regiões específicas. Além de mostrarem que os filmes formados nas diferentes soluções apresentam características diferentes, os autores concluíram também que o filme passivador deve ser formado naturalmente para análise, pois o filme formado por polarização anódica é menos resistente que o crescido naturalmente, não simulando a realidade da forma mais verossímil possível.

Ghods *et al.* (2009) estudaram a influência da composição da SPC na formação do filme passivo de óxidos em aços inoxidáveis. Em sua pesquisa, utilizaram 10 soluções saturadas de Ca(OH)_2 com diferentes concentrações de NaOH, KOH e $\text{Ca(SO)}_4+2\text{H}_2\text{O}$ (Tabela 1), que são os principais compostos do cimento Portland, e diferentes valores de pH. As curvas de polarização anódica obtidas pelos pesquisadores (Figura 1) são relativamente diferentes entre si, indicando que as

características dos óxidos do filme passivo formado no aço nas várias soluções podem não ser as mesmas. É possível observar, por exemplo, analisando o ponto de inflexão das curvas de polarização (densidade de corrente passiva), que há uma diferença entre as curvas de mais de duas ordens de magnitude. Ao notarem que o valor da ordem de grandeza não se relaciona somente com o pH, a condutividade e a oxigenação das SPC, os autores sugerem que a qualidade dos filmes passivos pode ser afetada dependendo dos compostos da solução. Concomitantemente a essa análise, os pesquisadores observaram que a densidade de corrente passiva para óxidos crescidos em soluções com $(\text{SO}_4)^{2-}$ foram sempre maiores que os crescidos em soluções sem $(\text{SO}_4)^{2-}$. Os resultados de EIS confirmaram que os filmes de óxidos crescidos no aço em soluções sem $(\text{SO}_4)^{2-}$ são mais resistivos.

Figura 1 – Curvas de polarização anódica de amostras de aço imersas em 10 diferentes soluções por pelo menos 14 dias



Fonte: adaptado de Ghods *et al.* (2009)

Tabela 1 – Concentração dos compostos químicos adicionados às soluções do trabalho de Ghods *et al.* (2009)

Solução #	Compostos adicionados (g/l)			
	Ca(OH) ₂	NaOH	KOH	Ca(SO) ₄ +2H ₂ O
1	sat.	4,00	11,22	13,77
2	sat.	8,00	22,44	27,55
3	sat	0,40	0,56	0,00
4	sat	8,00	22,44	0,00
5	sat	0,40	22,44	0,00
6	sat	0,40	22,44	27,55
7	sat	8,00	0,56	0,00
8	sat	8,00	0,56	27,55
9	sat	0,40	0,56	27,55
10	sat	0,00	0,00	0,00

Fonte: adaptado de Ghods *et al.* (2009)

Jiang *et al.* (2012) estudaram a influência do tipo de sal (KCl, NaCl, CaCl₂ e MgCl₂) no valor limite de inicialização da corrosão de aços em SPC. As soluções utilizadas pelos autores foram: 1) solução saturada de Ca(OH)₂ e 2) solução de cimento feita dissolvendo 20 g de cimento Portland em 2 l de água destilada. Amostras do aço utilizado na pesquisa foram imersas por sete dias em cada uma das soluções, para garantir que estivessem passivadas antes de serem atacadas por cloretos. O pH das soluções foi medido após a adição dos sais, sendo possível observar que não há grande diferença no comportamento da variação do pH com adição de cada um dos cloretos nas soluções 1 e 2. Porém, como a solução 2, devido à hidratação do cimento Portland, contém uma série de íons (Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Al³⁺ e (SO₄)²⁻), os íons cloro são fisicamente adsorvidos pelo CSH e o C3A liga quimicamente os cloretos para produção do sal de Friedel (C₃A.CaCl₂.10H₂O), o que garante ao aço um menor risco à corrosão, pois promove a remoção de uma parcela dos íons cloro da solução. Na solução saturada de Ca(OH)₂, o único inibidor de corrosão é a concentração de hidroxila, que determina o limite de cloretos para iniciar a corrosão do aço. Dessa

forma, os autores concluem que a solução de cimento é mais representativa da realidade.

Williamson; Isgor (2016) avaliaram o efeito da composição da solução de poros de concreto simulada e de cloretos nas propriedades eletrônicas do filme passivo de armaduras. Produziram três eletrólitos diferentes para suas análises: 1) solução saturada de Ca(OH)_2 (pH 12,5); 2) solução saturada de Ca(OH)_2 com Ca^+ , K^+ e Na^+ (pH 13,4) e 3) solução saturada de Ca(OH)_2 com Ca^+ , K^+ e Na^+ e adição de CaSO_4 (pH 13,3). Os íons adicionados na solução 3 deste trabalho foram os íons mais abundantes no cimento Portland, encontrados nas formas de Na_2O e K_2O . Pequenas quantidades de sulfatos também são encontradas nos poros do concreto após o desaparecimento da etringita inicial e do monossulfato durante a fase inicial de hidratação. Embora essas sejam as espécies mais abundantes no cimento, não representam o total de espécies iônicas encontradas. Os autores realizaram o monitoramento do potencial de circuito aberto (OCP) do aço nas três soluções por 10 dias e o comportamento e potencial de estabilização da amostra de aço nas soluções foi similar. Na análise de EIS, foi observado que o aço nas soluções 2 e 3 apresentaram comportamento similar, enquanto o aço na solução 1, pelo ângulo de fase, é menos passivo que nas outras soluções. Esse resultado é consistente com o fato de as soluções 2 e 3 apresentarem pH maior que a solução 1. Williamson; Isgor (2016) também avaliaram o comportamento do aço passivado nas soluções 1 e 2 estudadas com adição de NaCl incrementalmente até o limite de cloreto que inicia o processo corrosivo. Observaram que para a solução 1, o limite de cloretos foi de 0,5 M, rompendo o filme passivador entre o terceiro e o quarto dia, e de 2,5 M para a solução 2, rompendo o filme passivador entre os dias sete e oito. Em suma, os experimentos realizados pelos autores comprovaram mais uma vez como o comportamento do aço é diferente conforme a composição da SPC.

Peng *et al.* (2018) realizaram experimentos de voltametria linear de varredura (LSV), EIS e espectroscopia de impedância de Mott-Schottky (MS), além de XPS e microscopia de escaneamento eletrônico (SEM) em amostra de aço imersa em

solução de cimento filtrada (CF) e solução contendo 0,19 M NaOH e 0,02 M Ca(OH)₂ (SP). Os pesquisadores observaram que, devido à diferença de composição das soluções, particularmente devido à presença de (SO₄)²⁻ na CF, o tempo de formação do filme passivo nesta solução é mais longo (demoraram 9 dias para se formar, enquanto na SP demoraram 16 h). As análises de EIS mostraram que o filme passivo formado na CF é mais resistivo e mais estável que o formado na SP. Ademais, a densidade de doadores, calculada pelas equações de Mott-Schottky, da CF é menor que a da SP, ou seja, o filme formado na CF é mais reforçado, tem menos defeitos e melhor estabilidade. O espectro de XPS mostrou que a composição do filme passivador formado no aço em SP é de Fe(OH)₂, FeOOH e Fe₂O₃, enquanto na CF, é apenas de Fe₃O₄ e FeOOH. Os autores concluíram, portanto, que, embora o filme óxido passivador formado no aço nas duas soluções seja de Fe, não são exatamente os mesmos filmes, devido à diferença de composição das soluções. Dessa forma, a CF é mais representativa da solução de poros de concreto, corroborando com os resultados obtidos pelos outros autores citados.

Aproximando-se da realidade de produção do concreto, Kapat; Pradhan; Bhattacharjee (2005) sugeriram a elaboração de solução de poros de concreto simulada através da mistura de todos os componentes do concreto (água, agregado graúdo e miúdo e cimento) com uma maior quantidade de água para que a hidratação do cimento não fosse suficiente para solidificar a mistura. Pradhan; Bhattacharjee (2007) e Shaheen; Pradhan (2016), extraíram o pó de corpos de prova de concreto curados e misturaram esse pó em água para extrair os compostos solúveis e produzir a solução de poros simulada. Acredita-se, portanto, que esses três trabalhos sejam mais próximos da realidade de serviço, pois utilizam todos os componentes do concreto para produzir as SPC. Ainda que os agregados sejam considerados potencialmente inertes em alguns casos, sabe-se que não há como garantir que não haja nenhuma parcela solúvel desses materiais em água.

2.1.2 Filtragem de soluções de poros de concreto simuladas

Um outro aspecto que pode influenciar na análise de corrosão em SPC é a filtragem da solução. Uma vez que a maior parcela da SPC é de Ca(OH)_2 , naturalmente as soluções apresentam sobrenadante de CaO , o qual alguns pesquisadores retiram por meio de filtragem da solução, conforme pode ser observado na Tabela 26.

Mammoliti *et al.* (1996) prepararam SPC de Ca(OH)_2 saturadas seguidas ou não de filtragem. Ao serem adicionados cloretos nas duas soluções, os autores observaram que a solução não filtrada propicia uma melhor proteção do aço, possivelmente devido ao pH maior dessa solução. Concluíram ainda que utilizar solução saturada de hidróxido de cálcio, especialmente quando filtrada, não representa a realidade.

Em geral, os autores adotaram um procedimento de preparação de SPC e não destacando se a filtraram ou como a filtraram. Alguns pesquisadores, porém, relatam que filtraram em papel filtro Whatman® de 0,2 μm (VELEVA *et al.*, 2005), 110 mm (LEE *et al.*, 2018a) número 15 (GHOSH; SINGH, 2007; SINGH; GHOSH, 2008; HUSSAIN *et al.*, 2014), número 40 (SINGH; YADAV, 2007), número 1 (KAPAT; PRADHAN; BHATTACHARJEE, 2005; PRADHAN; BHATTACHARJEE, 2007; SHAHEEN; PRADHAN, 2015).

Não há, portanto, um padrão de filtragem adotado pela maioria dos pesquisadores analisados, ficando difícil concluir com base na literatura, a menos da medida comparativa de Mammoliti *et al.* (1996), se a filtragem influencia na medida de corrosão do aço em SPC.

2.1.3 Deaeração das soluções de poros de concreto simuladas

Por fim, um último aspecto, aqui abordado, que pode influenciar na corrosibilidade do aço em SPC é a deaeração da solução. Em região catódica, aconselha-se a remoção do oxigênio atmosférico dissolvido nas soluções, pois ele é eletroativo e produz duas ondas polarográficas nessa região (ALEIXO, 2018). A

primeira onda, em meio alcalino e neutro, consiste na reação da Equação 1 e a segunda, também em meio alcalino ou neutro, na reação da Equação 2.



Como consequência a essas reações, quando se faz uma medida voltamétrica na presença de O_2 , a corrente de fundo é alta e mascara a corrente produzida pelo próprio sistema. Para remover o gás oxigênio, é necessário passar um gás inerte isento de O_2 , como o N_2 por exemplo, borbulhando na solução este gás por alguns minutos (ALEIXO, 2018).

Como pode ser observado na Tabela 26, poucos autores, dentre os trabalhos analisados, relataram terem desaerado a SPC antes de realizarem medidas eletroquímicas (MAMMOLITI; HANSSON; HOPE, 1999; GARCÉS *et al.*, 2005; KAPAT; PRADHAN; BHATTACHARJEE, 2005; PRADHAN; BHATTACHARJEE, 2007; ADDARI; ELSENER; ROSSI, 2008; TAN; WIJESINGHE; BLACKWOOD, 2014; TIAN *et al.*, 2017; PENG *et al.*, 2018). Entretanto, acredita-se que a prática de deaeração da SPC seja essencial para obtenção de medidas mais precisas do sistema, pois limita a ação do O_2 no processo eletroquímico.

2.1.4 Simulação de penetração de agentes agressivos nos poros do concreto

O concreto armado é um componente considerado durável, desde que seja adequadamente projetado para o ambiente ao qual será exposto e seja adequadamente executado e curado. Entretanto, o concreto armado está suscetível a ataques físicos e químicos, listados na Tabela 2, que são causados por sua exposição a diferentes tipos de meios, e causam a diminuição da vida útil da estrutura.

Tabela 2 - Tipos de ataques agressivos que afetam o concreto armado

Ataque físico	Ataque químico
Congelamento e descongelamento	Lixiviação e eflorescência
Molhagem e secagem	Ataque por sulfatos
Cristalização de sais	Água do mar
Expansão térmica e contração	Ataque ácido
Fissuração por contração	Ação de gases
Resistência ao fogo	Reações álcali-agregado
Desgaste e abrasão	Corrosão de metais incorporados

Fonte: adaptado de Mindess (2019)

Alguns dos ataques químicos geram a oxidação das armaduras do concreto, como a ação da água do mar, a penetração de dióxido de carbono e o ataque por sulfatos. Tendo isso em vista, é necessário simular a presença dos agentes agressivos nas soluções de poros de concreto para avaliar a influência desses agentes na corrosibilidade do aço.

Muitos autores estudam apenas a influência de solução simulando a água do mar em SPC, pois a ação de cloretos é a causa mais frequente de corrosão de armaduras de concreto. Em geral, os autores produzem essas soluções que simulam a água do mar com base na C876-15 (ASTM INTERNATIONAL, 2016), que orienta uma solução de água deionizada com concentração de NaCl de 3,5% (YANG *et al.*, 2019; JIN *et al.*, 2018; LEE *et al.*, 2018b; FAZAYEL; KHORASANI; SARABI, 2018). Outros autores, tem o objetivo de estudar o limite de adição de cloretos que faz com que o aço saia do estado de passividade e passe para o estado de corrosão ativada. Dessa forma, vão adicionando à SPC concentrações cada vez maiores de cloreto de sódio até que o aço entre em zona ativa de corrosão (LIU *et al.*, 2019; TIAN *et al.*, 2017; LIU *et al.*, 2017a).

Para simular a penetração de dióxido de carbono (CO₂) no concreto, são adicionados carbonatos e bicarbonatos na SPC. Como não há referência normativa, cada autor adota uma concentração suficiente para diminuir o pH da SPC de forma que ele fique similar ao pH de um concreto carbonatado (aproximadamente 9). Por exemplo, Xu *et al.* (2019) estudaram a influência dos diferentes tipos de sulfatos na passivação do aço em SPC. Para isso, produziram SPC contendo 0,01 mol/l de Na₂SO₄, CaSO₄, (NH₄)₂SO₄ e MgSO₄ separadamente. Chen *et al.* (2019) produziram

SPC com adição de 0,03 mol/l, 0,05 mol/l e 0,10 mol/l de Na_2SO_4 para avaliar a influência do ataque por sulfatos em SPC na corrosibilidade do aço.

Outros pesquisadores simularam a ação combinada de agentes agressivos. Anwar *et al.* (2017) combinaram água do mar da cidade de Jakarta (Índia) com 0,03 M de NaHCO_3 e 0,0015 M Na_2CO_3 . Zuo *et al.* (2019) produziram SPC com 0,3 mol/l de NaCl combinado com 3% de NaHCO_3 . Zhao *et al.* (2019) combinaram 0,24 mol/l com 0,25 mol/l de NaCl .

Portanto, exceto para a simulação da água do mar, a qual existe a norma americana que padroniza uma concentração de cloreto de sódio, os autores adotam concentrações conforme o objetivo de seu estudo.

2.2 Corrosão

Como já mencionado, a manutenção de materiais deteriorados pela corrosão representa uma média de gasto de 4% de todo o PIB dos países industrializados, sendo a corrosão de armaduras uma parcela significativa desse percentual (FRANÇOIS; LAURENS; DEBY, 2018). Os custos econômicos relativos à corrosão de materiais abrangem a substituição de peças ou equipamentos corroídos (incluindo energia e mão-de-obra) e a manutenção de processos de proteção (proteção catódica, pintura, recobrimentos etc.) (GENTIL, 1996). Ademais, faz-se necessário considerar os custos indiretos associados ao problema, tais como paralisações de produção ou fornecimento de energia, perdas de produtos ou combustíveis, diminuição de eficiência produtiva, contaminações, entre outros.

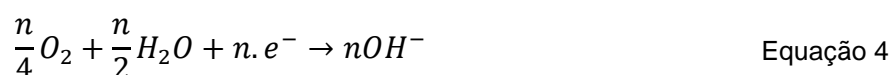
Corrosão indica uma deterioração na superfície de um material ou metal exposto a um ambiente agressivo. É um processo químico ou eletroquímico de oxidação, no qual o metal transfere elétrons para o ambiente, conseqüentemente elevando sua carga de valência de zero para valores positivos. O ambiente em questão pode ser um líquido, gás ou híbrido sólido-líquido e é chamado de eletrólito, pois possui sua própria condutividade por transferência de elétrons (PEREZ, 2004).

Um eletrólito é uma solução (ou análogo) condutiva, que contém cargas positivas (cátions) e negativas (ânions). Essas cargas são carregadas por íons, átomos que perderam ou ganharam elétrons. Assim, um processo corrosivo, químico ou eletroquímico, devido a um fluxo de corrente, ocorre com a presença de duas reações que acontecem simultaneamente: a oxidação (ânodo) e a redução (cátodo). A reação anódica (Equação 3), de dissolução do metal é única (RIBEIRO *et al.*, 2018).



Entretanto, existem várias reações catódicas, de redução de oxigênio, que podem ocorrer (RIBEIRO *et al.*, 2018). Abaixo serão listadas as possíveis reações catódicas.

1) Redução do oxigênio em meio neutro ou alcalino:



2) Redução do oxigênio em meio ácido:



3) Redução do íon H^{+} em meio ácido não aerado:



4) Redução do íon H^{+} em meio neutro não aerado:



5) Redução do Cl_2 :



Espera-se que a reação que ocorra no concreto, considerado como eletrólito, seja a reação da Equação 4, pois o concreto propicia um ambiente alcalino.

O fenômeno da oxirredução é simultâneo. Sempre que há perda de elétrons por uma espécie, há ganho de elétrons por outra.

Em sistemas eletroquímicos, há interesse em estudar os fatores que afetam a transferência de cargas na interface do eletrodo (condutor elétrico) e do eletrólito

(condutor iônico). Fundamentalmente, segundo Bard; Faulkner (2001), espera-se que o eletrólito seja suficientemente pouco resistivo ou muito condutivo para que seja possível realizar previsões sobre o sistema eletroquímico. No contexto desta pesquisa, como já exposto, objetivou-se utilizar um eletrólito menos resistivo (solução de poros de concreto simulada) que o concreto armado para avaliação da corrosão a fim de minimizar esse problema.

Para realizar medições em sistemas eletroquímicos, são necessárias células eletroquímicas que armazenam um sistema que contém, basicamente, dois eletrodos separados por um eletrólito.

Não é possível medir um potencial por si, mas a diferença de potenciais. Naturalmente, quando se lê medida de potencial, sugere-se que seja uma medida de um eletrodo de trabalho (WE) em relação a um eletrodo de potencial conhecido, ao qual denomina-se eletrodo de referência (RE), que é feito de fases de composição constante.

Existem vários tipos de eletrodos de referência e todos os valores de potenciais de RE são baseados no potencial do eletrodo padrão de hidrogênio (NHE), cujo potencial foi adotado como zero. Esse eletrodo é constituído de um fio de platina coberto com negro de platina (fio de platina finamente dividido), que absorve uma quantidade grande de hidrogênio, podendo ser considerado um eletrodo de hidrogênio. Esse fio é colocado em um tubo com gás hidrogênio borbulhado sob 1 atm e imerso em uma solução de íons hidrogênio com concentração de 1 M, por exemplo, 1 M de ácido sulfúrico ou ácido clorídrico. A célula eletroquímica do NHE é representada por $Pt/H_2/H^+$, sendo que Pt é o metal platina e H^+ é a solução que contém esses íons. Entre parênteses deve aparecer a concentração da solução iônica do eletrodo (BARD; FAULKNER, 2001).

Na Tabela 3 podem ser observados alguns eletrodos de referência com seu respectivo potencial em relação ao NHE. Em seguida, serão apresentados detalhes dos RE mais utilizados na eletroquímica, conforme Bard; Faulkner (2001).

Tabela 3 - Potencial de eletrodos de referência em solução aquosa a 25 °C em V vs. NHE

Eletrodo	Reação de equilíbrio	Potencial vs. NHE
Calomelano	$Hg_2Cl_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2Hg + 2Cl^-$	0,1 M → +0,3337 V 1,0 M → +0,2800 V Saturado → +0,2415 V
Mercúrio-óxido de mercúrio	$HgO + H_2O + 2e^- \rightleftharpoons 2Hg + 2OH^-$	0,1 M → +0,0977V
Prata-cloreto de prata	$AgCl + e^- \rightleftharpoons Ag + Cl^-$	0,1 M → +0,2881 V 1,0 M → +0,2224 V
Cobre-sulfato de cobre	$Cu^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Cu$	Saturado → +0,3180 V

Fonte: adaptado de Gentil (1996) e Bard; Faulkner (2001) e baseada nas recomendações da IUPAC (do inglês, *International Union of Pure and Applied Chemistry*)

O eletrodo de calomelano saturado (SCE) é um dos eletrodos mais utilizados na avaliação de potenciais de corrosão em engenharia, pois é o eletrodo citado na C876-15 (ASTM INTERNATIONAL, 2016). O SCE é composto de mercúrio em contato com cloreto de mercúrio e uma solução de cloreto de potássio, sendo representado por $Hg, Hg_2Cl_{2(s)}/KCl_{(aq)}$. Ligando o mercúrio à solução de cloreto de potássio, normalmente coloca-se um fio de platina. Embora utilizado na maioria dos trabalhos de avaliação de passivação e corrosão de armaduras de concreto armado (alcalino), o SCE não é indicado para meios alcalinos, pois não é estável nesse meio.

O eletrodo de mercúrio-óxido de mercúrio é estável em meio alcalino. Para sua produção, é colocado mercúrio em contato com óxido de mercúrio. O contato elétrico do mercúrio também é feito normalmente de platina. É representado por $Hg, HgO_{(s)}/KOH_{(aq)}$.

Para produção de um eletrodo de prata-cloreto de prata, utiliza-se um fio de platina revestido de prata, que por sua vez é convertido parcialmente em AgCl quando este é imerso em solução de ácido clorídrico diluído. Em seguida, o eletrodo é imerso em solução de cloreto. É representado por $Ag, AgCl_{(s)}/KCl_{(aq)}$.

O eletrodo de cobre-sulfato de cobre não é um eletrodo de referência considerado preciso pela literatura (GENTIL, 1996), entretanto é utilizado pois é resistente a choques e é menos sujeito a erros quanto à polarização. Normalmente, é utilizado para medir o potencial de tubulações enterradas e para controle de sistemas de proteção catódica.

Quando dois eletrodos se ligam através de um eletrólito, forma-se uma pilha eletroquímica, capaz de transformar energia química, liberada pelas reações de oxirredução, em energia elétrica (processo espontâneo). Se aplicado um potencial nas pilhas, são capazes de transformar energia elétrica, fornecida pela fonte de corrente elétrica, em energia química para provocar a reação de oxirredução (processo não-espontâneo) (GENTIL, 1996).

A característica principal de uma pilha eletroquímica é a diferença de potencial que existe entre seus eletrodos (E_{pilha}), denominada potencial de circuito aberto ou força eletromotriz (fem). O OCP é dado pela Equação 9.

$$E_{pilha} = E_{cátodo} - E_{ânodo} \quad \text{Equação 9}$$

Por exemplo, nos sistemas eletroquímicos de armadura de concreto armado com um RE, o OCP do sistema é dado pela diferença entre o OCP do WE (armadura) e o OCP do RE.

Segundo Perez (2004), a energia elétrica que pode ser obtida por meio de uma equação química é igual à variação de energia livre na reação, o que termodinamicamente significa que o potencial de oxirredução da reação é relacionado à variação da energia livre de Gibbs (ΔG). Essa energia é utilizada para prever se um processo químico é espontâneo ou não, e é dada pela Equação 10, na qual n é o número de elétrons envolvidos na reação do eletrodo, F é a constante de Faraday (96500 coulombs) e E é o potencial do eletrodo em volts.

$$\Delta G = -nFE \quad \text{Equação 10}$$

Normalmente, a energia livre de Gibbs é expressa quando os eletrodos estão a 25 °C e 1 atm de pressão atmosférica, sendo, então, chamada de energia livre de Gibbs padrão (ΔG^0), considerando um potencial de eletrodo nas condições padrão (E^0).

Dessa forma, tem-se:

$E^0 < 0 \rightarrow \Delta G^0 > 0$: reação não-espontânea;

$E^{\circ} > 0 \rightarrow \Delta G^{\circ} < 0$: reação espontânea.

Foi elaborada uma tabela de espontaneidade de reações de corrosão, que fornece a ΔG° para as reações mais frequentes nos processos corrosivos. Para este trabalho, é importante mencionar a ΔG° do ferro (Tabela 4), pois é o principal elemento encontrado no aço para construção civil. Pela tabela, é possível notar que a corrosão do tipo oxigênio para o Fe, independentemente da espécie sólida, é sempre espontânea.

Tabela 4 - Espontaneidade das reações de corrosão (energia livre de Gibbs padrão)

Metal	Produto sólido	Corrosão tipo hidrogênio ($P_{H_2} = 1 \text{ atm}$)		Corrosão tipo oxigênio ($P_{O_2} = 0,21 \text{ atm}^*$)	
		E (V)	ΔG° (cal/mol)	E (V)	ΔG° (cal/mol)
Fe	Fe ₃ O ₄	+0,082	-5,000	+1,300	-80,000
	Fe(OH) ₂	+0,049	-2,300	+1,270	-58,500
	Fe(OH) ₃	+0,070	+4,700	+1,150	-80,000

Fonte: adaptado de Gentil (1996)

*o valor de 0,21 atm para a pressão de O₂ é devido ao fato de essa ser a pressão parcial do O₂ no ar seco, estando sob pressão de 1 atm.

O conhecimento das formas de corrosão é importante para compreender os processos corrosivos. São classificadas conforme a aparência ou forma de ataque. Segundo Gentil (1996), pode-se ter corrosão segundo:

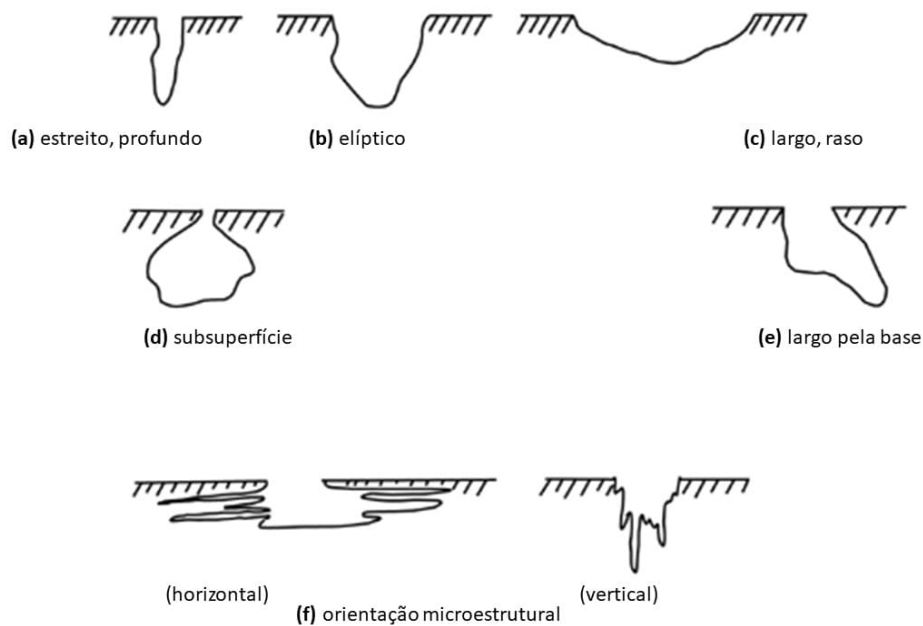
- “Morfologia: uniforme, por placas, alveolar, puntiforme ou por pite, intergranular ou intercrystalina, filiforme, por esfoliação, gráfitica, por dezincificação, em torno de cordão de solda e empolamento pelo hidrogênio;
- Causas ou mecanismos: por aeração diferencial, eletrolítica ou por correntes de fuga, galvânica, associada a solicitações mecânicas (corrosão sob tensão fraturante), em torno de cordão de solda, seletiva (gráfitica e por dezincificação), empolamento ou fragilização pelo hidrogênio;
- Fatores mecânicos: sob tensão, sob fadiga, por atrito, associada à erosão;
- Meio corrosivo: atmosférica, pelo solo, induzida por micro-organismos, pela água do mar, por sais fundidos;
- Localização do ataque: por pites, uniforme, intergranular, transgranular.”

Os tipos de corrosão que acometem as armaduras do concreto armado normalmente são classificados por morfologia como sendo localizada ou uniforme. A corrosão localizada é do tipo por pites, causada por um mecanismo extremamente localizado, que causa pontos destrutivos no aço, normalmente causada por penetração de cloretos na matriz cimentícia. A corrosão uniforme é do tipo líquido-metal, normalmente causada pela penetração de gás carbônico na matriz cimentícia.

A corrosão uniforme é aquela que se apresenta em toda a superfície do metal, com perda uniforme de espessura. Pode ser chamada de corrosão generalizada, embora essa terminologia tenha caído em desuso por ser inadequada para caracterizar o fenômeno, uma vez que se pode ter corrosão generalizada por pites, alveolar etc. (GENTIL, 1996).

A norma estadunidense G46-94 (ASTM, 2018) classifica os pites por formato e profundidade, como pode ser observado na Figura 2. Os pites são cavidades que normalmente apresentam fundo anguloso com profundidade maior que o diâmetro, de forma que fica difícil avaliar o dano associado ao aparecimento de pites apenas de maneira visual. Ademais, a corrosão por pites é considerada um tipo de corrosão muito perigosa, pois pode levar à rápida perda de seção do metal, perfurando-o e diminuindo sua resistência mecânica, aumentando a possibilidade de fratura.

Figura 2 - Variação no formato da seção transversal dos pites



Fonte: adaptado de G46-94 (ASTM, 2018)

Em princípio, a formação do pite no aço é lenta, mas em seguida inicia-se um processo autocatalítico que garante condições para que o pite continue a crescer, especialmente em presença de cloreto. A explicação para esse processo se dá devido ao fato de, na área anódica, dentro do pite, ocorrer oxidação do aço e formação de Fe^{2+} , Cr^{2+} e Ni^{2+} , gerando um excesso de cargas positivas no local. Dessa forma, os íons cloro adentram o pite, pois têm maior mobilidade que a hidroxila, e ocorre o aumento de concentração do FeCl_2 , que sofre hidrólise, formando HCl . A presença de HCl gera aumento de concentração de H^+ , diminuição do pH, acelerando o processo corrosivo. Assim, alimenta-se a reação catalítica que aumenta a profundidade do pite (GENTIL, 1996).

A ocorrência de corrosão em metais, porém, só se inicia quando há quebra do filme passivador que se forma naturalmente nos metais estabilizados.

Tendo esse fundamento exposto, este capítulo tem como propósito apresentar o fenômeno de passivação do aço, metal de estudo desta pesquisa, os fatores que influenciam na inicialização de processos corrosivos, o processo corrosivo nos

diferentes tipos de aço da construção civil e as técnicas eletroquímicas utilizadas para avaliação de corrosão e passivação de metais.

2.2.1 Passivação do aço-carbono

Em aços passivados, para que seja iniciado um processo corrosivo, é necessário que ocorra o rompimento do filme passivador. A qualidade do filme passivo e sua composição são importantes para determinar a resistividade elétrica do aço. No estado de serviço, uma vez que o pH dos poros do concreto é conhecido como tendo valores entre 12 e 13, o aço encontra-se passivado, conforme o Diagrama de Pourbaix para o sistema Fe – H₂O, que será explorado adiante.

Alguns metais apresentam estado de passivação, ou seja, em determinadas condições, não podem ser oxidados, como é o caso do ferro, mas também do alumínio e cromo. Em situação de passividade, os metais apresentam potencial menos ativo que normalmente se encontram, sofrendo oxidação mais lenta, o que implica que, nas condições de passividades, esses metais apresentam comportamento eletroquímico de um metal menos ativo ou nobre. Sendo assim, resiste à corrosão em meios em que os metais normalmente recebem energia suficiente para ocorrência de oxidação (GENTIL, 1996).

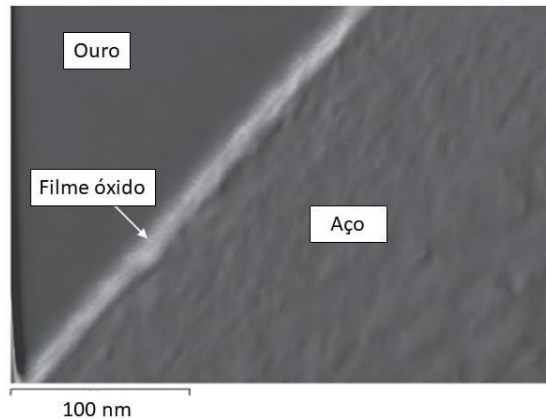
Como a passivação melhora a resistência à corrosão, por vezes é objetivo produzir um metal ou liga metálica passivada, pois esses metais não se passivam naturalmente. Para passivar o Fe por exemplo, pode-se polarizar o metal ou colocá-lo em solução concentrada de HNO₃. A presença de nitrato possibilita a formação de óxidos passivos na superfície do Fe. Entretanto, como já mencionado, o Fe, na liga que compõe as armaduras de aço, devido ao fato de o pH ser alcalino nos poros do concreto, encontra-se naturalmente em zona de passivação, não sendo necessário realizar nenhum procedimento.

Para caracterizar o filme passivador formado no aço, é necessário um estudo em escala nanométrica. Embora esse tipo de estudo seja muito utilizado para caracterizar óxidos de metais e ligas metálicas, sua aplicação em aço-carbono em ambientes

alcalino é limitada, uma vez que a maioria dos trabalhos avaliam a corrosibilidade do aço, deixando de estudar o processo de formação do filme passivador.

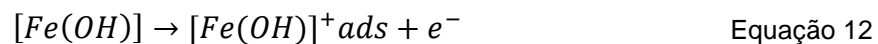
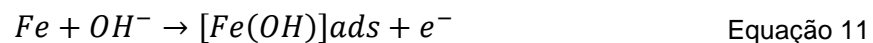
Ghods *et al.* (2013) fizeram um estudo do filme passivo óxido formado no aço-carbono utilizando microscópio de transmissão eletrônica (TEM). Para isso, prepararam amostras de aço com 0,26% de carbono e 10 mm de diâmetro, embutidas em resina epóxi e polidas com pasta de diamante de 1 μm . As amostras de aço foram recobertas com uma fina camada de ouro para melhorar o contato elétrico e ficaram imersas em SPC por 15 dias para garantir que o filme passivo fosse formado. Os autores obtiveram imagem do filme óxido formado do aço após a imersão (Figura 3). Nessa imagem, é possível ver a superfície do aço, o fino filme passivador óxido e a camada de ouro de recobrimento. A espessura do filme óxido obtido foi encontrada entre 8 e 13 nm. Essa variação pode ser explicada pelo fato de a finalização da superfície por meio do polimento ter variação topográfica de 5 nm. A análise de espectroscopia de dispersão de raios-X (EDS) registrou a presença de ferro e oxigênio, comprovando que o filme é formado por óxido de ferro. A análise foi executada em vários pontos da amostra e resultou em uma concentração atômica de Fe e O praticamente constante. Ghods *et al.* (2012), com as mesmas amostras fizeram análise de XPS na superfície do aço passivado e observaram um filme de espessura 4 nm. Além disso, também verificaram que o filme não aumenta de espessura ficando mais tempo imerso na SPC.

Figura 3 - Imagem de TEM obtida do filme passivo óxido formado no aço após imersão em SPC

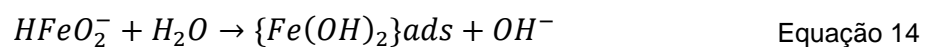
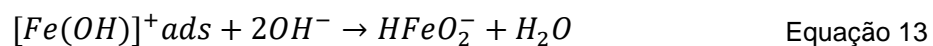


Fonte: adaptado de Ghods *et al.* (2013)

As reações químicas que envolvem a passivação do aço podem ser observadas por voltametria cíclica (CV). Na Figura 4, podem ser observados os voltamogramas cíclicos (10 ciclos) de um aço-carbono com 0,21% de carbono, imerso em SPC contendo 0,80 M de NaOH, polarizado de -1,2 V a 0,5 V, realizados por Mundra *et al.* (2017). Pelo gráfico, é possível observar que a oxidação que dá origem ao filme passivador no aço é complexa. Cada pico de densidade de corrente, simbolizado por números romanos, representa um processo individual de oxirredução ocorrendo na superfície do eletrodo. Ao pico número I é atribuído à adsorção do $[Fe(OH)]^+_{ads}$, uma reação de dois passos, representada pelas Equação 11 e Equação 12, segundo os autores. Essa reação depende diretamente da concentração de OH^- , que depende do aumento da densidade de corrente.



O pico II corresponde à formação de $Fe(OH)_2$, conforme Equação 13 e Equação 14. A formação do produto intermediário $HFeO_2^-$ pode ser observado através do diagrama de Pourbaix para o Fe em água a 25 °C e 1 atm, pela sua exposição à solução altamente alcalina.



De forma simétrica, o pico V simboliza a redução das equações de oxidação ocorridas nos picos I e II, quando o ferro retorna para sua forma metálica.

A reação catódica do pico III indica a oxidação do Fe^{2+} para Fe^{3+} . Esse pico é consideravelmente maior que os picos I e II devido ao aumento do volume da camada de óxidos passivadores com o incremento dessa espécie, ocorrido devido ao aumento da densidade de corrente. Como o aumento da oxidação indicada no pico III depende da ocorrência das oxidações indicadas nos picos I e II, que por sua vez dependem da concentração de hidroxila, Mundra *et al.* (2017) acreditam que o produto óxido do pico III seja $FeOOH$, embora não haja um consenso na literatura. A formação desse produto é uma reação de três passos, expressas nas Equação 15, Equação 16 e Equação 17. Ao final da anodização da amostra em SPC, tem-se a formação do filme passivador formado por óxidos e hidróxidos de Fe (II) e Fe (III). Ou seja, as reações que correspondem aos picos I, II e III são as chamadas reações de passivação do aço. A reação do pico IV é associada à reação anódica de redução correspondente à reação do pico III.

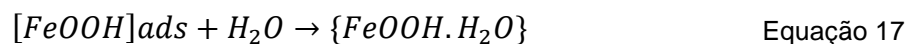
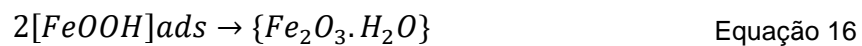
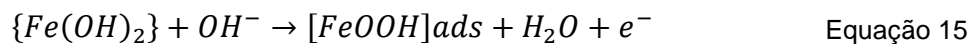
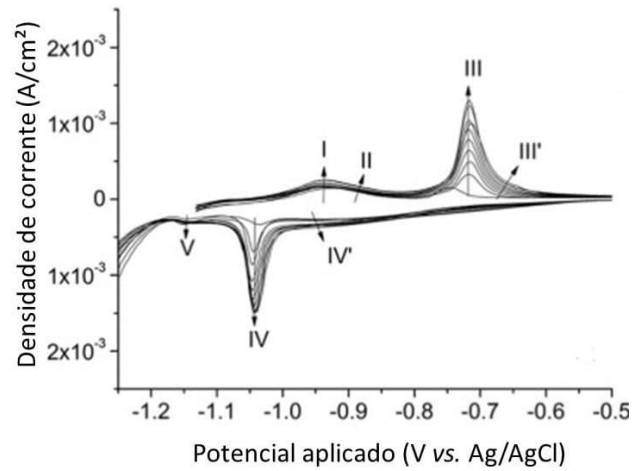


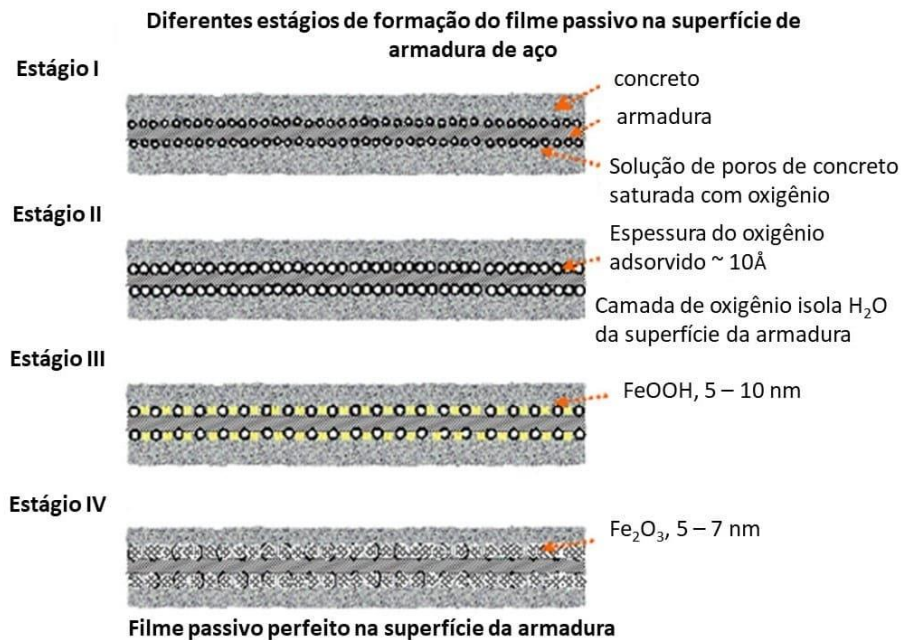
Figura 4 - Voltametria cíclica de aço imerso em SPC com concentração de 0,80 M NaOH



Fonte: adaptado de Mundra *et al.* (2017)

Na Figura 5 pode-se observar um modelo esquemático de formação do filme passivador no aço imerso em SPC proposto por Singh; Singh (2011). Nesse modelo, é possível observar a formação de um filme óxido duplo na superfície do aço, ratificando o que já foi exposto pelas equações químicas de passivação.

Figura 5 - Modelo esquemático mostrando o desenvolvimento do filme passivo na superfície da armadura exposta à SPC

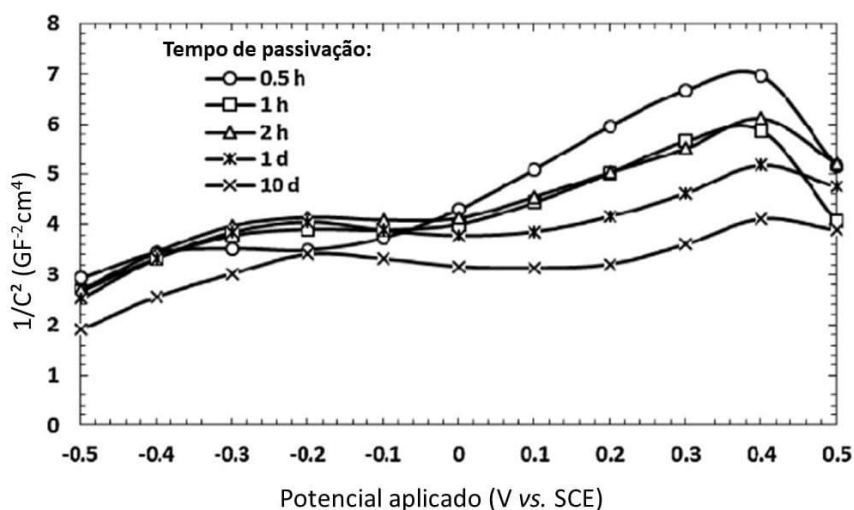


Fonte: adaptado de Singh; Singh (2011)

Diz-se que o filme passivador formado no aço tem propriedades semicondutoras (FENG *et al.*, 2016; ZHIYONG *et al.*, 2016; DING; POURSAEE, 2017; ZHENG *et al.*, 2018), fato que se pode concluir por meio de análise do comportamento eletrônico do aço-carbono pela MS, que foi melhor descrita no item 2.2.4.4 (a frente). Um material semicondutor é aquele que possui ora propriedades condutoras, ora propriedades isolantes. Especificamente sobre aços-carbono em SPC, pouco se estuda acerca das propriedades eletrônicas relacionadas ao mecanismo de oxidação desse aço, pois a análise de MS em aços-carbono demanda um número grande de considerações: formação do filme passivo, tempo de passivação, a varredura de potencial, extensão de potencial e frequência adotada durante a medição de MS (NEVILLE, 2016).

Williamson; Isgor (2016), investigando o efeito do tempo de passivação de aço carbono (0,26% de C) em SPC, realizaram análise de MS entre -0,5 V e 0,5 V a 18 mV/s e 1 kHz. Os autores concluíram que o filme óxido formado no aço é semicondutor do tipo n, ou seja, o portador de carga majoritária na camada de carga espacial é um elétron e os estados de impurezas presentes no filme são estados doadores. Isso pode ser observado pelo declive presente nos vários tempos de passivação formados conforme o aumento do potencial aplicado (Figura 6). Outra evidência para caracterizar esse filme como semicondutor do tipo n é a presença de duas regiões separadas de declive positivo. Se o filme fosse simplesmente condutor do tipo n, seria possível ver apenas um declive positivo.

Figura 6 - Resultado de análise de Mott-Schottky mostrando a evolução das propriedades eletrônicas do filme passivo do aço imerso em SPC



Fonte: adaptado de Williamson; Isgor (2016)

Outra observação que pode ser feita através do gráfico da Figura 6 é que, conforme aumenta o tempo de passivação, aumenta o pico de capacitância. Em suma, Williamson; Isgor (2016) conseguiram, com a análise eletrônica, mostrar a existência de um filme duplo de passivação, ratificando o que já foi explicado nesta seção. Compactuando com esse estudo, Gunay *et al.* (2013) propuseram que um filme óxido inicial de Fe (II), de aproximadamente 2 nm, se forma rapidamente durante a passivação, ratificando a curva de passivação de 0,5 h da Figura 6, que possui apenas um pico. Segundo o autor, esse filme é denso e compacto. Depois desse filme formado, um filme óxido de Fe (III) mais poroso se forma sobre o filme denso, contribuindo para a passivação do aço.

Portanto, observa-se um consenso sobre como se dá a formação do filme passivador em aço-carbono: ocorre em duas etapas e depende do tempo para sua completa formação.

2.2.2 Fatores que influenciam na inicialização de processos corrosivos

Alguns fatores influenciam na inicialização de processos corrosivos. Dentre eles, os fatores que são relevantes para o estudo de corrosão de armaduras em SPC são:

o valor de pH, a composição da SPC, a filtragem da SPC e a deaeração da SPC. Estes três últimos foram explorados nos itens 2.1.1, 2.1.2 e 2.1.3 respectivamente. Então, nos itens seguintes serão explorados o pH e a condição de superfície do aço.

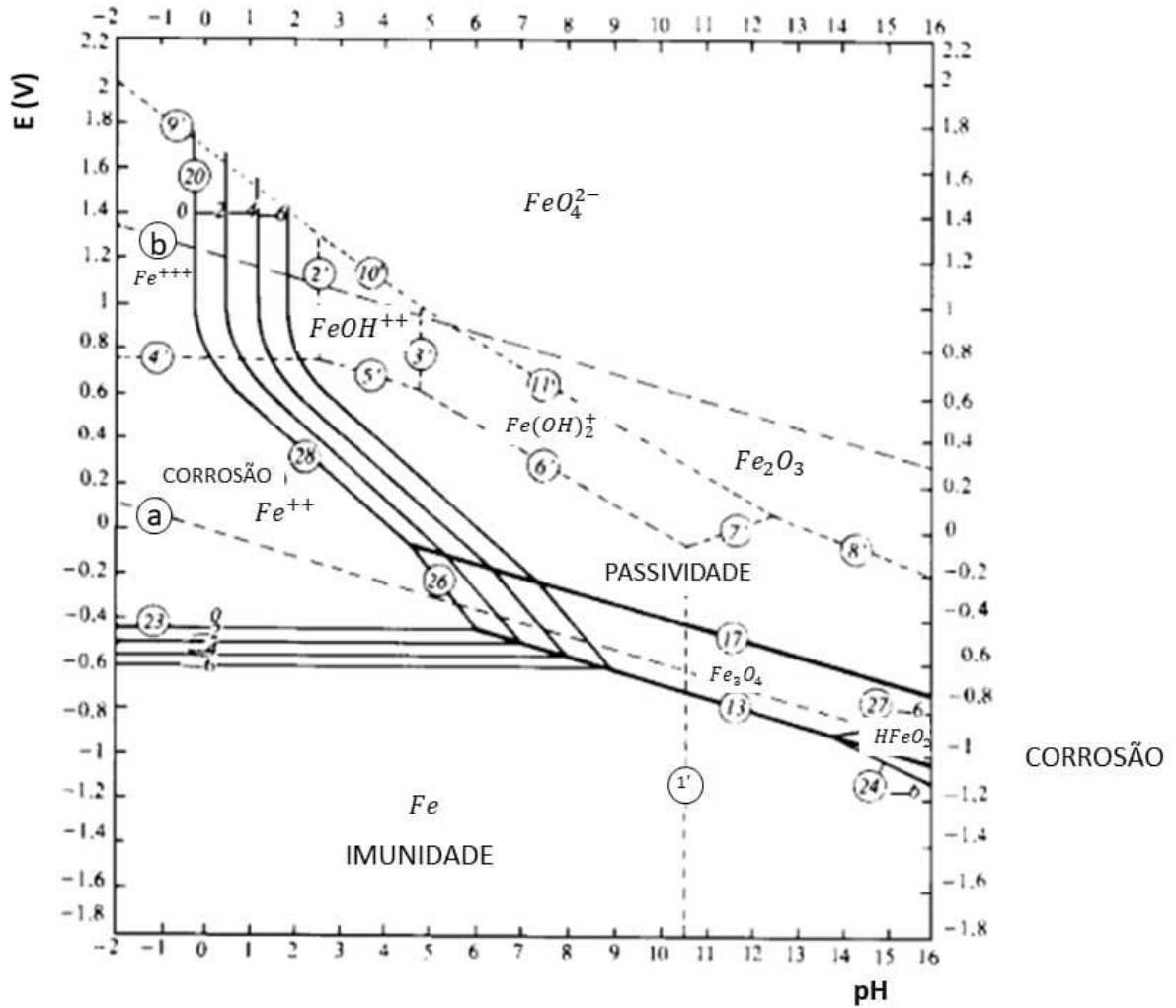
2.2.2.1 Potencial hidrogeniônico

O potencial hidrogeniônico (pH) é determinante na inicialização de processos corrosivos. Um gráfico de potencial de eletrodo *versus* pH, conhecido por diagramas de Pourbaix foi desenvolvido pelo pesquisador de mesmo nome em 1938. Esses diagramas são mapas eletroquímicos que estabelecem os limites de estabilidade de íons, óxidos e hidróxidos. Os mapas fornecem o poder de oxidação em um sistema eletroquímico, por meio da medida de potencial, e da acidez ou alcalinidade das espécies, por meio do valor de pH. Dessa forma, é possível projetar a situação de um sistema eletroquímico através de áreas delimitadas de corrosão, passivação e imunidade (PEREZ, 2004). É importante salientar que os diagramas de Pourbaix são construídos para condições padrão de temperatura a 25 °C e pressão de 1 atm e não podem ser usados para prever velocidade de reações de corrosão.

No diagrama de Pourbaix, as reações que dependem apenas do pH são representadas por retas paralelas ao eixo ordenado e as que dependem apenas do potencial, por retas paralelas em relação à abscissa e inclinadas em relação aos eixos coordenados. As retas inclinadas possuem coeficiente angular de 0,0591 V/pH, devido à equação de Nernst, mas são válidas apenas se não há substâncias gasosas ou dissolvidas na solução (H⁺).

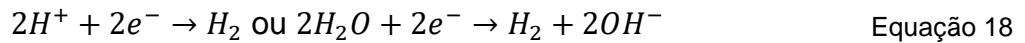
Como o ferro é o principal elemento que compõe o aço, material de estudo desta pesquisa, o diagrama de Pourbaix para o ferro no sistema Fe - H₂O a 25 °C e 1 atm será utilizado para explicar os componentes do diagrama, baseando-se no livro de Gentil (1996). Normalmente apresenta-se o diagrama de Pourbaix simplificado, mas para explicar sua composição, o diagrama da Figura 7 é completo para o sistema Fe – H₂O.

Figura 7 - Diagrama de Pourbaix para o sistema Fe - H₂O a 25 °C e 1 atm



Fonte: adaptado de Gentil (1996)

No diagrama da Figura 7, as linhas inclinadas paralelas a e b possuem inclinação de -0,0591 V/pH e representam as equações de equilíbrio da Equação 18 (linha a) e Equação 19 (linha b).



Sob a linha a, em $p_{H_2} = 1 \text{ atm}$, a água se decompõe por oxidação, conforme a Equação 19. A região entre as linhas a e b corresponde ao domínio de estabilidade termodinâmica da água.

1', 2', ..., 11' são linhas tracejadas que representam os limites de predominância relativa dos corpos dissolvidos. Como exemplo, a linha 4' simboliza as condições de igualdade de atividade das espécies Fe^{2+} e Fe^{3+} , como mostra a reação da Equação 20. Essa reação tem condições de equilíbrio $E_0 = 0,771 + 0,0591 \cdot \log \frac{Fe^{3+}}{Fe^{2+}}$. Abaixo da linha 4', o íon de ferro Fe^{2+} predomina, enquanto acima, predominam os íons Fe^{3+} .



As linhas contínuas 13 e 17 separam os domínios de estabilidade relativa de Fe, Fe_3O_4 e Fe_2O_3 . As linhas 20, 28, 26 e 23 representam as condições de equilíbrio de corpos sólidos e dissolvidos para $\log (M) = 0, -2, -4$ e -6 , sendo M a concentração do metal em análise, representando linhas de solubilidade de corpos que normalmente encontram-se sob a forma dissolvida.

Pelo diagrama da Figura 7 é possível observar as regiões em que o Fe está dissolvido, principalmente como íons Fe^{2+} , Fe^{3+} e $HFeO_2^-$. Ainda, observam-se as regiões em que o Fe é estável na forma sólida como metal puro ou como algum de seus óxidos. Quando o pH e o potencial do eletrodo na interface metal|solução correspondem à região onde é estável o íon Fe^{2+} , o Fe se dissolve até que a solução atinja a concentração de equilíbrio indicado no diagrama. Isso corresponde à corrosão do metal. Se as condições correspondem à região na qual o metal é estável, o Fe é imune à corrosão. Por fim, se as condições do sistema levam à região de estabilidade de um óxido e, se esse óxido estiver aderente à superfície do metal e compacto como um filme de proteção, portanto, encontra-se na região de passivação.

Especialmente sobre o Fe, o diagrama de Pourbaix permite afirmar, segundo Gentil (1996), que:

- 1) Na presença de soluções aquosas isentas de oxigênio ou de outras espécies oxidantes, o Fe tem potencial de eletrodo situado abaixo da linha a, onde indica-se o desprendimento de hidrogênio. Nessa situação, quanto mais ácida ou mais alcalina for a solução, mais o Fe corrói por redução de H^+ . Entretanto, com pH compreendido entre 9,5 e 12,5 aproximadamente, o Fe tende a se transformar em Fe_3O_4 , com desprendimento de hidrogênio, estando em zona de passivação;
- 2) Quando há oxigênio na solução, o Fe tende a ter seu potencial aumentado. Com pH menor que 8, o aumento do potencial não é capaz de levar à passivação como é em pH superior a 8, com formação de filme óxido protetor para soluções sem Cl⁻;
- 3) Quando se realiza proteção catódica do Fe por metal de sacrifício ou polarização, abaixa-se o potencial para deixar o Fe na zona de imunidade, bastando manter o potencial abaixo das linhas 13, 23 e 24, conforme o pH do meio;
- 4) Quando é feita proteção anódica, ou seja, por passivação, pretende-se recobrir o metal com óxidos estáveis (Fe_3O_4 ou Fe_2O_3 , conforme o pH). É possível que a passivação não seja perfeita, dependendo de como os óxidos recobrirão a superfície do Fe. Esse tipo de proteção é contraindicado em meios contendo cloretos.

O valor do pH da solução de poro do concreto pode ser superior a 13 devido à presença de KOH, NaOH e $Ca(OH)_2$ dissolvidos em solução, sendo o $Ca(OH)_2$ um dos principais produtos de hidratação do cimento Portland. Dessa forma, conforme o Diagrama de Pourbaix, o aço imerso em SPC encontra-se em estado de imunidade ou passividade, dependendo do seu potencial.

O pH é determinante para inicialização de processos corrosivos em metais. Mammoliti *et al.* (1996) realizaram resistência à polarização linear (LPR) em aços de construção em SPC de $Ca(OH)_2$ saturada (pH 12,5) e $Ca(OH)_2$ saturada com NaOH e KOH (pH 13,3). Constataram que a alta alcalinidade da solução, de pH 13,3, mesmo

em concentrações de NaCl superiores a 10%, forneceu proteção suficiente ao aço para que ele não corroesse. Na SPC de pH 12,5 em concentrações de Cl⁻ maiores que 5% iniciou-se o processo corrosivo com o aparecimento de pites nas amostras de aço.

Os compósitos cimentícios comumente possuem pH elevado, garantindo que o filme passivador seja formado no aço, fornecendo uma barreira química, que protege o metal, e física, que dificulta a penetração de agentes agressivos. Portanto, a corrosão é iniciada quando o pH baixa sobre toda a superfície do metal ou localmente (GARCÉS *et al.*, 2005).

2.2.2.2 Condição da superfície do aço

A condição de superfície dos metais também é um fator determinante para iniciar os processos corrosivos. Normalmente, nos ensaios eletroquímicos para avaliação da corrosão, utiliza-se metais polidos para permitir a repetibilidade dos experimentos. Entretanto, alguns estudos mostram que há grande diferença de inicialização de processos corrosivos em aços sem nenhum tratamento e em aços com superfície polida. Mammoliti *et al.* (1996) concluíram que os aços polidos possuem taxa de corrosão aproximadamente 100% menores que as taxas de corrosão de aços sem tratamento de superfície.

Ghods *et al.* (2009) realizaram sua pesquisa em aços sem nenhum tratamento de superfície. Entretanto, apenas para ratificar que o tratamento de superfície altera os resultados encontrados, realizaram polarização anódica em duas amostras de aço que tiveram sua superfície lateral lixada e polida para tirar as deformidades de fábrica. Dessa forma, obtiveram densidades de corrente mais baixas (aproximadamente uma década menor) em relação às densidades das barras ensaiadas como recebidas. Concluíram que tratar a superfície do aço resulta em condições não representativas de serviço desse material.

Ding; Poursaee (2017) estudaram a influência do jateamento de areia no aço como preparação da superfície na corrosibilidade da armadura em SPC contaminada

com cloreto. Foram analisadas amostras de aço em quatro tempos de jateamento de areia: 0 min, 5 min, 10 min e 15 min. Os autores concluíram que o jateamento aumentou a resistência à corrosão do aço na solução agressiva. O jateamento por 15 min, na análise de Mott-Schottky, resultou num aço considerado semicondutor do tipo n altamente desordenado, com inclinações maiores que as dos outros tempos de jateamento. A investigação microscópica da pesquisa mostrou que o jateamento aumenta a rugosidade da superfície da amostra, levando à formação de uma camada nanocristalina rica em cálcio quando o aço foi imerso em SPC. Em suma, o tratamento dado ao aço por meio do jateamento faz com que a armadura em SPC se comporte de uma forma mais protetora quanto à corrosão do que uma amostra sem tratamento.

Figueira *et al.* (2017) avaliaram a influência da rugosidade da superfície do aço na determinação do limite máximo de cloretos para iniciar a corrosão do aço em SPC. Os estudos foram feitos em amostras de aço-carbono (0,142% de C) sem tratamento (T), lixado na lixa 500 (P500), lixado e polido com pasta de diamante (D) e pré-oxidado (DH). As medidas eletroquímicas realizadas pelos autores mostraram que, em relação ao valor limiar de cloreto para iniciar a corrosão, abaixo do qual ocorre corrosão por *pitting*, as amostras podem ser ranqueadas como: D > DH > P500 > T. Os resultados foram obtidos por meio de ensaios de concentração de cloretos, LPR e monitoramento do OCP e comprovados por OM. Dessa forma, comprovaram, ratificando os estudos expostos anteriormente, que a situação da superfície do aço influencia na inicialização de processos corrosivos.

Embora os estudos apresentados levem à conclusão de que o aço sem tratamento é mais fiel à realidade de serviço, em laboratório, é difícil conseguir boa repetibilidade dos experimentos sem ao menos lixar o WE. Isso ocorre porque o aço de construção civil é muito heterogêneo, conseqüentemente, a rugosidade de sua superfície é heterogênea ao longo da amostra. Portanto, em geral, o lixamento da superfície é sempre necessário, embora o polimento nem sempre o seja.

2.2.3 Corrosão para os diferentes aços da construção civil

Na construção civil, os aços para concreto armado são classificados segundo a NBR 7480 (ABNT, 2007) conforme sua resistência característica ao escoamento (f_{yk}). Assim, o aço CA-60 tem $f_{yk} = 600 \text{ MPa}$; o CA-50, $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$ e o CA-25, $f_{yk} = 250 \text{ MPa}$. Ainda, outra classificação usual para os aços é a classificação AISI/ SAE (*American iron and steel institute/ Society of automotive engineers*). Nesta, os aços que são interessantes para a construção civil são chamados de aço-carbono e possuem classificação do tipo 10XX, na qual 10 refere-se ao tipo de aço e XX é a porcentagem de carbono média em centésimos de uma unidade percentual em massa (aproximação de 0,01%). Por exemplo, o AISI/ SAE 1008 possui 8% de C.

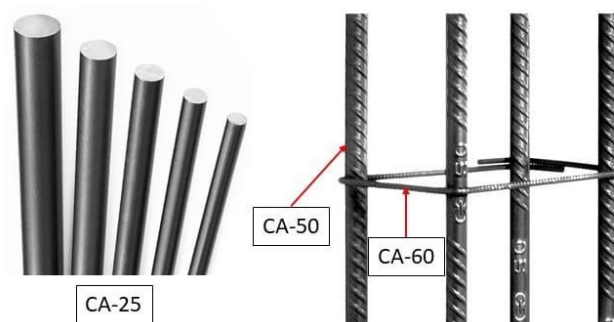
É importante mencionar o processo de fabricação dos aços-carbono fabricados no Brasil, pois influencia na corrosibilidade desses aços. A saber, os aços CA-50 e CA-25 são laminados a quente e o CA-60, trefilado a frio. Em resumo, as matérias-primas para obtenção do aço são minério de ferro e carvão mineral. Coloca-se o carvão na coqueria, onde o carvão fica sobre destilação sem ar, liberando substâncias voláteis a aproximadamente $1300 \text{ }^\circ\text{C}$. Dessa queima, resulta o coque, um resíduo composto basicamente por carbono, com elevada resistência mecânica. De forma similar, o minério bruto de ferro sofre sinterização, ou seja, aglutinação da parte fina do minério por meio da queima do material com outros materiais finos (finos de calcário, areia etc.). Com esse processo, obtém-se o sinter, uma partícula sólida. A combinação coque e sinter é colocada em alto-forno, formando o ferro-gusa, produto primário do ciclo de produção do aço, com teor de carbono entre 3,5 e 4,5%. A produção da aciaria final é feita com o ferro-gusa e resíduos gerados para produção de outras ligas de ferro. Esses componentes são calcinados para obtenção do aço, que é refinado para adequação da composição e passa, em seguida, por um processo de lingotamento para moldar o aço em formato paralelepípedo. Por fim, os aços passam por conformação mecânica (laminação a quente ou trefilação a frio) (CASCUDO; HELENE, 2000).

Todos os aços destinados à armadura de concreto passam por laminação a quente, que consiste em reaquecer os paralelepípedos de aço e submetê-los à compressão lateral e, em seguida, diametral para transformá-lo em barra cilíndrica. O aço é aquecido até 1200 °C, adquirindo a cor rubra, e forçado a passar pelos trens de laminação, um jogo de cilindros que exerce força lateral na barra, moldando-a. É nessa etapa que é dada a nervura à barra de aço CA-50. Ainda, esse tipo de aço sofre o tratamento de têmpera, propiciando ao aço ter uma estrutura martensítica, através do brusco resfriamento dos vergalhões logo após a saída da laminação à quente (CASCUDO; HELENE, 2000), o que pode gerar tensões na microestrutura do material.

A trefilação à frio é o processo de conformação da barra de aço CA-60. Basicamente, consiste em submeter a barra ao estiramento do aço, forçando-a a passar pelos anéis de conformação mecânica. Dessa forma, o aço sofre deformação microestrutural na qual seus grãos são alongados devido ao esforço de tração. Segundo Cascudo; Helene (2000), com a trefilação a frio, a microestrutura do aço fica severamente distorcida, de forma a contribuir para o acúmulo de tensões.

A Figura 8 possibilita a comparação visual dos três tipos de aços utilizados na construção civil no Brasil.

Figura 8 - Tipos de aço utilizados na construção civil no Brasil



Fonte: adaptado de Gerdau ([s.d.])

Atualmente o aço CA-25 não é muito utilizado na construção civil, enquanto o aço CA-50 é comumente utilizado como armadura longitudinal e o aço CA-60, armadura transversal.

2.2.3.1 Microestrutura dos aços-carbono

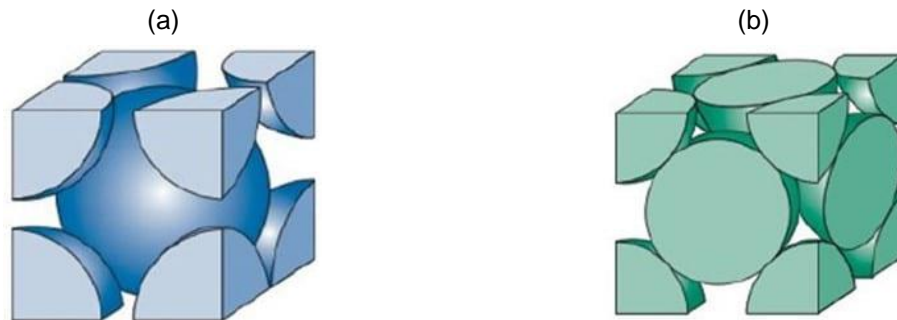
Neste item será abordada a microestrutura do aço-carbono e, para isso, foi necessário tratar primeiramente a microestrutura do ferro. Essa abordagem é tradicional e amplamente difundida. No presente trabalho, foi utilizado como base o livro de Ciência e Engenharia dos Materiais de Callister Jr.; Rethwisch (2012).

O aço possui estrutura cristalina, ou seja, com disposição dos átomos organizada e com repetições nas três dimensões de uma unidade básica (célula unitária, cuja repetição resulta no sistema cristalino). O aço, por ter o ferro como principal constituinte, tem sistema cristalino cúbico, ou seja, uma repetição de série de cubos.

Como neste trabalho foi utilizado o aço-carbono, algumas considerações específicas acerca desse tipo de aço são importantes serem mencionadas: a alotropia do ferro, as fases constituintes do aço-carbono e o diagrama de equilíbrio ferro-carbono.

O ferro é alotrópico e varia sua estrutura entre o sistema cúbico de corpo centrado (CCC) e o cúbico de face centrada (CFC). A estrutura CCC (Figura 9a) apresenta um átomo de ferro em cada vértice e um centrado, ou seja, cada átomo de ferro é cercado por outros oito átomos. Assim, a estrutura apresenta uma regularidade geométrica com dois átomos em cada célula unitária (um centrado e oito oitavos de outros átomos de ferro nos vértices). O fator de empacotamento de CCC a temperatura ambiente é 0,68. A estrutura CFC (Figura 9b) apresenta um átomo em cada vértice da célula unitária e mais um centrado em cada uma das faces. Portanto, nessa estrutura, tem-se quatro átomos no total (oito oitavos em cada vértice e seis metades, uma em cada face). O fator de empacotamento da CFC a temperatura de 912 °C é de 0,74.

Figura 9 - Estruturas cristalinas cúbica de corpo centrado (a) e cúbica de face centrada (b)



Fonte: Callister Jr.; Rethwisch (2012)

Quando o átomo de ferro se encontra em estado de fusão (acima de 1538 °C), os átomos se encontram desordenados. Com o resfriamento e solidificação, a estrutura cristalina se torna cúbica. Abaixo do ponto de fusão e até 1394 °C, o ferro se cristaliza em CCC (nomeado ferro delta ou ferro- δ). Entre 1394 °C e 912 °C, a estrutura do ferro se transforma em CFC (nomeado ferro gama, ferro- γ ou austenita). Abaixo de 912 °C até a temperatura ambiente, a estrutura cristalina do ferro volta a ser CCC, mas passa a ser nomeado ferro alfa, ferro- α ou ferrita. É importante mencionar a transformação que ocorre no chamado ponto Curie, aos 770 °C, quando abaixo dessa temperatura o ferro passa a ter propriedades magnéticas devido ao rearranjo dos *spins* dos elétrons.

Como exposto, então, dependendo da temperatura, o ferro se apresenta em uma fase e, agora, será melhor explicada cada uma dessas fases, juntamente com outras que constituem o aço-carbono.

- Austenita (ferro- γ)

A austenita é a fase alotrópica do ferro- γ , portanto estável entre 912 °C e 1394 °C. Como sua estrutura cristalina é CFC, os espaços entre os átomos de ferro são menores que o átomo de carbono, causando uma deformação na estrutura. Por esse motivo, o limite de solubilidade do carbono no ferro é de 2% em massa na fase austenita. A austenita é mole e dúctil, sendo ideal para processos de fabricação. É nessa fase que se lamina o aço.

- Ferrita (ferro- α)

A ferrita é a fase alotrópica do ferro- α , portanto possui estrutura cristalina CCC, estável de temperatura ambiente até 912 °C. Essa estrutura apresenta espaço interatômico pequeno e alongado, sendo ainda pior que a austenita para acomodar o átomo de carbono e produzindo mais deformações. A ferrita é mole e dúctil e apresenta propriedades ferromagnéticas a temperaturas abaixo de 770 °C.

- Ferro- δ :

O ferro- δ possui estrutura cristalina CCC, como a ferrita, mas a solubilidade de carbono maior, pois está a uma temperatura maior. Essa fase não tem importância prática.

- Cementita ou carboneto de ferro (Fe_3C):

Quando há mais carbono presente no ferro que o limite máximo de solubilidade, forma-se uma fase chamada cementita, que corresponde a uma célula unitária ortorrômbica com 12 átomos de ferro e quatro átomos de carbono (6,67% de carbono). A cementita é dura e quebradiça e é responsável pela alta dureza e resistência dos aços com alto teor de carbono. Também, confere a esses aços menor ductilidade.

- Perlita:

A constituição bifásica em lamelas alternadas de ferrita e cementita constitui a perlita, que é obtida através da transformação de austenita eutetoide (com 0,77% de carbono) de ferrita (cerca de 88% em massa) e cementita (cerca de 12% em massa). As lamelas de ferrita e cementita são possíveis de serem vistas apenas por microscópio. A perlita apresenta propriedades mecânicas de magnitude entre a ferrita e a cementita.

- Martensita:

Quando o aço está em forma austenítica sofre resfriamento rápido. Devido a esse rápido resfriamento, não há condições para a difusão do carbono, nem precipitação da cementita ou perlita. O que ocorre é a dissolução forçada de carbono na rede cristalina da ferrita com alto acúmulo de tensões e conseqüente aumento da

dureza do aço. A martensita é, então, a fase resultante do tratamento térmico de têmpera e é uma fase formada em forma de agulhas, pois não há tempo suficiente para mudança de composição da austenita, mas ocorre cisalhamento dos grãos. Diferente da perlita, a martensita é monofásica. Sua formação acarreta numa fase dura, resistente e não-dúctil com alta resistência à abrasão e deformação.

O diagrama de equilíbrio Fe-C (Figura 10) é utilizado para saber, em função da temperatura e do teor de carbono, qual(is) fase(s), das mencionadas anteriormente, encontram-se no aço-carbono. Os pontos de transformação das fases do aço foram obtidos experimentalmente por resfriamento lento a pressão de 1 atm.

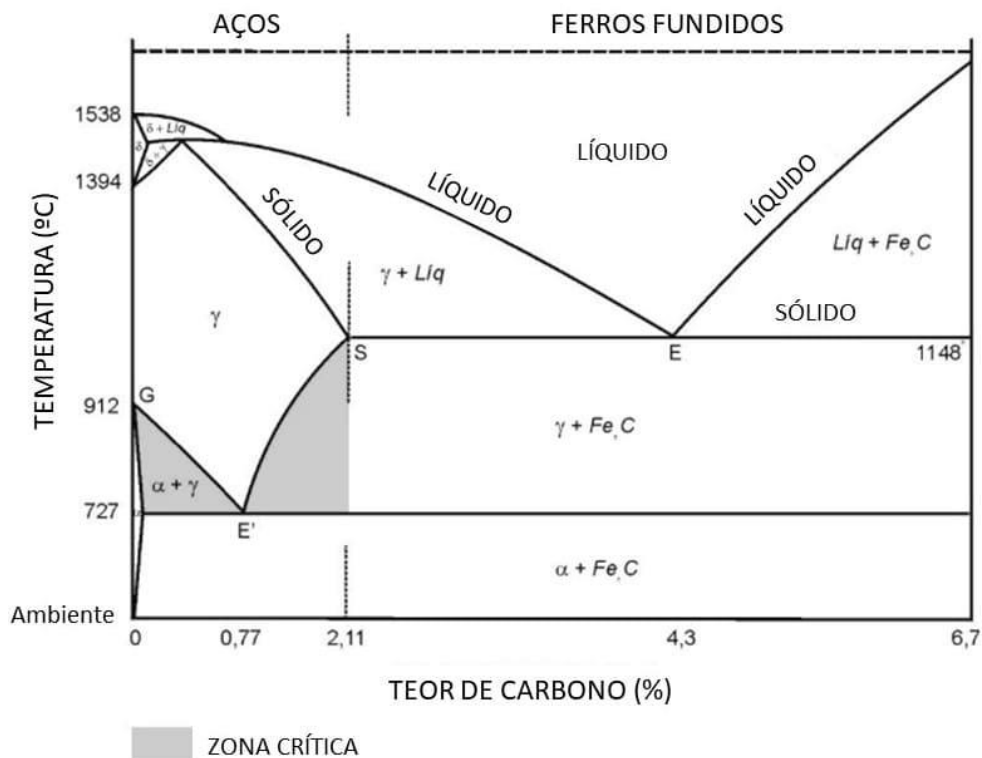
Sobre o trecho de 0 a 2%, que é o trecho do aço, Colpaert (2008) faz as seguintes considerações:

- 1) Acima da linha “LÍQUIDO”, o carbono encontra-se totalmente dissolvido na massa líquida de ferro (solução homogênea);
- 2) Entre as linhas “LÍQUIDO” e “SÓLIDO” o aço se encontra parte sólido, parte líquido, e acima e abaixo dessas linhas, encontra-se totalmente líquido ou sólido;
- 3) Entre o seguimento GE', E'S e a linha “SÓLIDO”, o ferro apresenta sua forma alotrópica ferro- γ (austenita), com o carbono todo solubilizado nos interstícios do ferro;
- 4) Chamam-se linhas de transformação as linhas GE', E'S e a horizontal de 727 °C, pois são o início e o fim das transformações no estado sólido. Exatamente em cima dessas linhas, está a zona crítica;
- 5) A solubilidade máxima do carbono no ferro- γ é delimitada pela linha SE' e depende da temperatura, pois tem limite máximo de solubilidade a 1148 °C e 2,11% de carbono e limite mínimo de 727 °C e 0,77% de carbono. À direita e abaixo do segmento SE' ocorre a precipitação da cementita;
- 6) Abaixo da zona crítica e entre 0,77% e 2,11% ocorre a transformação do ferro- γ para ferro- α (ferrita). Como já exposto, a solubilidade do carbono na ferrita é

menor que na austenita, então o carbono excedente também se precipita em forma de cementita. Entretanto, nesse caso a cementita se dispõe em lamelas, formando perlita. Em suma, nessa região o aço se constitui de grãos de perlita envoltos por cementita mais espessos quanto mais próximo de 2,11% e menos espessos quanto mais próximo de 0,77%;

- 7) Entre os teores de carbono de 0 e 0,77% ocorre a transformação de ferro- γ em ferro- α iniciando no segmento GE'. Abaixo dele, a austenita vai se transformando em ferrita, que, por sua vez, vai se precipitando no contorno dos grãos de austenita e das inclusões de sulfeto. Em temperaturas inferiores a 727 °C e teor de 0,77% de carbono, a austenita se transforma em perlita. Assim, abaixo da zona crítica, entre 0 e 0,77% de C, com resfriamento lento, o aço é constituído de ferrita e perlita. Quanto mais próximo de 0,77%, mais perlítico e, quanto mais próximo de 0%, mais ferrítico;
- 8) O ponto E' é denominado ponto eutetoide. Ou seja, acima dele, o aço é sólido e, abaixo dele, o aço é polifásico, com pelo menos duas fases presentes. Os aços com teor de carbono de 0,77% são chamados eutetoides. Acima desse percentual, hipereutetoides e, abaixo, hipoeutetoides.

Figura 10 - Diagrama de equilíbrio das ligas ferro-carbono



Fonte: adaptado de Colpaert (2008)

Como a microestrutura do aço interfere diretamente na inicialização de processos corrosivos é importante conhecer a metalografia dos aços estudados, conforme foi explanado nos próximos itens.

2.2.3.2 Tratamentos térmicos aplicados a armaduras para concreto

Como já mencionado, os tratamentos térmicos dados aos aços destinados a armaduras para concreto interferem na microestrutura do aço, que interfere na corrosão desses. A Tabela 5 apresenta um resumo de processos mecânicos, tratamentos térmicos, aspectos microestruturais, características e classificação dos três tipos de aços encontrados na construção civil.

Dentre os tratamentos térmicos presentes na Tabela 5, tem-se a normalização, o tratamento térmico de têmpera, o revenido e o alívio de tensões.

Tabela 5 - Processos mecânicos, tratamentos térmicos, aspectos microestruturais, características e classificação de aços destinados à armadura para concreto

	Armadura		
	CA-25	CA-50	CA-60
Aspectos estruturais	Bifásico Não-encruado	Monofásico Não-encruado	Bifásico Encruado
Fases constituintes	Ferrita + perlita	Martensita (núcleo pode ser ferrita- perlita)	Ferrita + perlita
Classificação quanto ao teor de carbono	Aço doce Hipoeutetoide	Aço doce Hipoeutetoide	Aço doce Hipoeutetoide
Classificação AISI/SAE	1012	1026	1012
Classificação NBR 7480 (ABNT, 2007)	Barra	Barra	Fio
Tratamentos térmicos	Normalização	Têmpera Revenido (facultativo)	Normalização Alívio de tensões (facultativo)
Processos mecânicos	Laminação a quente	Laminação a quente	Laminação a quente + trefilação
Aspectos superficiais externos (microscópicos)	Liso	Nervurado	Entalhado

Fonte: adaptado de Cascudo (2000)

A barra de CA-25 sofre apenas normalização, que é um caso especial de recozimento, mas de mais rápido resfriamento. É um tratamento de resfriamento ao ar livre, para obtenção de grãos mais finos, aumentando ligeiramente a dureza e os limites de escoamento e resistência (CASCUDO; HELENE, 2000).

A barra de CA-50 sofre tratamento térmico de têmpera e, em alguns casos, também revenido. A têmpera, como já mencionado, consiste em aquecer o aço acima da zona crítica e depois resfriar bruscamente o aço em água ou óleo. Assim, forma-se martensita, elevando consideravelmente a dureza, resistência mecânica e ductilidade. Entretanto, o excesso de tensões acumuladas devido ao rápido resfriamento, leva ao surgimento de fissuras, que favorecem a corrosão. Para evitar esse problema, pode ser aplicado o tratamento de revenido, que consiste em reaquecer a barra após a têmpera, até uma temperatura abaixo da zona crítica e esfriá-la novamente. O revenimento faz com que o aço tenha sua dureza diminuída, assim como o escoamento e a resistência, mas evita o aparecimento de fissuras (CASCUDO; HELENE, 2000).

O aço CA-60 sofre normalização e, eventualmente, alívio de tensões. A normalização é igual à realizada no CA-25. O alívio de tensões é um caso especial de recozimento, chamado recozimento subcrítico, no qual se eleva a temperatura do aço abaixo da zona crítica ($< 727\text{ }^{\circ}\text{C}$). É feito apenas para aliviar as tensões que ocorrem durante a solidificação na conformação mecânica (CASCUDO; HELENE, 2000).

Com base no exposto sobre microestrutura e tratamentos térmicos dos aços destinados à utilização como armadura de concreto, observa-se que os aços CA-50 e CA-60 estão mais suscetíveis à corrosão comparados ao CA-25. O aço CA-50 por sofrer tratamento térmico de têmpera, quando não acompanhado de revenimento, leva ao acúmulo de tensões em torno dos grãos. O aço CA-60 por ser trefilado a frio, acumula tensões de deformação mecânica na barra. Entretanto, não é possível dizer qual desses aços é mais suscetível à corrosão. Para isso, é necessário avaliar caso a caso com auxílio de metalografias, além dos ensaios específicos para avaliação de corrosão do aço. Ademais, a composição química também interfere na corrosão, além da microestrutura.

2.2.3.3 Efeito da composição química do aço na corrosão

Até o momento, em relação à composição química do aço, foi abordada apenas a influência do ferro (principal constituinte do aço) e do carbono. Entretanto, sabe-se que o aço destinado a armaduras é composto por outros elementos, principalmente manganês, fósforo e enxofre, além de silício, cromo, níquel, molibdênio e cobre. Os teores desses elementos no aço-carbono variam consideravelmente mesmo para aços do mesmo tipo, pois, como já dito, o aço-carbono é fabricado com matéria-prima de escória.

Cascudo; Helene (2000) estudaram os três tipos de aço de um mesmo fabricante brasileiro e obtiveram composições químicas diferentes. Para efeito de comparação, na Tabela 6 está apresentada a composição química do aço CA-60 obtida por Cascudo; Helene (2000), a obtida por Moretti (2018) e a obtida por Rezende (2019), que utilizou o mesmo aço que a presente pesquisa. Por essa tabela é possível

observar a variabilidade de composição química do aço CA-60 por meio do desvio padrão (Dp), especialmente avaliando o carbono e o manganês (para os três lotes) e o silício para os lotes de Moretti (2018) e Rezende (2019).

Tabela 6 - Composição química de diferentes lotes de CA-60

Elemento	Lote Moretti (2018)	Lote Rezende (2019)	Literatura*	Dp
	(% massa)	(% massa)	(% massa)	
Fe	98,69	99,098	99,05	0,22
C	0,15	0,054	0,12	0,05
Mn	0,66	0,384	0,78	0,20
P	0,02	0,027	0,02	0,00
S	0,015	0,036	0,031	0,01
Si	0,21	0,081	-	-
Cr	0,09	0,077	-	-
Ni	0,04	0,059	-	-
Mo	0,01	0,014	-	-
Cu	0,12	0,170	-	-

*Cascardo; Helene (2000)

Alguns elementos merecem destaque no que se refere à avaliação da corrosão de aços-carbono: carbono, manganês, fósforo, enxofre, cromo e cobre.

Como já mencionado, elevados teores de carbono não são benéficos no que se refere à resistência à corrosão do aço. O aumento da quantidade de carbono, como a célula unitária do ferro não comporta bem esse átomo, faz com que haja precipitação de carboneto de ferro no contorno dos grãos. Assim, o material fica heterogêneo, gerando diferença de potencial e, conseqüentemente, favorecendo a corrosão (COLPAERT, 2008).

Quanto ao manganês, segundo Colpaert (2008) sua presença favorece a formação de inclusões de MnS entre os grãos do aço, causando imperfeições na microestrutura (heterogeneidade) e, assim com a presença de cementita, diminui a resistência à corrosão do aço.

A presença de fósforo e cobre na liga de aço-carbono propiciam a formação de CuS e CuSO_4 , retirando sulfeto disponível para formação de inclusões de MnS . Dessa forma, atuam de forma benéfica quanto à corrosão do aço (CASCUDO, 2000).

As ligas de cromo são eficazes para melhorar a resistência à corrosão do material. Não por acaso, os aços inoxidáveis possuem um elevado teor de Cr. Ogunsanya; Hansson (2019) avaliaram as propriedades condutoras de filmes passivadores de aços austeníticos e duplex inoxidáveis em SPC. O teor de Cu do aço austenítico utilizado pelos autores foi de aproximadamente 0,6%, cerca de 10 vezes maior que o teor encontrado nos aços da Tabela 6.

Poucas pesquisas têm o objetivo de avaliar a influência da microestrutura na corrosão de aços para concreto armado. López *et al.* (2003) avaliaram a influência da microestrutura do aço-carbono na corrosão desse aço no concreto. Para isso, realizaram tratamentos térmicos diferentes (elevando temperatura até 890 °C e 700 °C) em amostras de aço e concluíram que as amostras recozidas apresentaram maior resistência à corrosão, corroborando com a análise já realizada sobre esse tratamento.

Torbati-Sarraf; Poursaee (2018) avaliaram dois aços-carbono de fabricantes diferentes, no concreto: um aço A, galvanizado martensíticos temperado e um aço B, comum ferrítico-perlítico. Quanto à corrosão, o aço B apresentou menor resistência. Os dois aços apresentaram óxidos devido à corrosão por cloretos, mas o aço A apresentou a formação de óxidos fragmentados, enquanto o B, um filme óxido uniforme de corrosão. Os autores não enfatizaram o tipo de tratamento térmico dado aos aços.

Portanto, observa-se mais um fator que dificulta a análise de corrosão de armaduras: a composição química do aço que, na construção civil, é heterogênea e não segue um padrão de fabricação para um mesmo tipo de aço nesse aspecto.

2.2.4 Técnicas eletroquímicas de avaliação da corrosibilidade de metais

Muitos métodos eletroquímicos já são amplamente utilizados e sua aplicação depende do conhecimento de princípios fundamentais de reações no eletrodo e de propriedades elétricas da interface eletrodo|solução. Ademais, atualmente, as análises de superfície feitas por imagens são essenciais para entender o comportamento dos materiais. A Tabela 7 apresenta todas as técnicas utilizadas pelos autores cujos trabalhos foram analisados na síntese da revisão bibliográfica (Tabela 26), contendo todos os artigos científicos publicados em periódicos indexados encontrados acerca do tema: avaliação da corrosibilidade de armaduras de concreto imersas em solução de poros de concreto simuladas.

Tabela 7 - Experimentos realizados por autores que avaliaram a corrosão de armaduras de concreto

Experimentos eletroquímicos	Espectroscopias	Análises de imagem
CV	XPS	AFM
OCP	EIS	OM
LSV	Espectroscopia de Raman	SEM
Varredura com microeletrodo de referência (SMRE)	Difração de raios-X (XRD)	Microscopia de força Kelvin (SKPFM)
Ruído eletroquímico	EDS	Microscopia com feixe de ions focados (FIB)
Análise em Microbalança eletroquímica de cristal de quartzo (EQCM)	MS	TEM
Microanálise de sonda eletrônica (EPMA)	Espectroscopia de perda de energia eletrônica (EELS)	Metalografia
Varredura por eletrodo vibratório (SVET)	Descarga luminescente com espectroscopia de emissão óptica (GD-OES)	Microscopia confocal de varredura a laser (CLSM)
Potencial de carga zero (PZC)	Espectroscopia de impedância eletroquímica localizada (LEIS)	Microscopia de fluorescência (FM)
Termogravimetria e calorimetria de varredura diferencial (TG-DSC)	Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)	Estereoscopia
	Espectrometria de íons secundários (SIMS)	Microscopia de infravermelho (M-IR)
	Cromatografia de permeação em gel (GPC)	SEM
	Descarga luminescente com espectrômetro de emissão óptica (GDEOS)	

Como é possível observar pela tabela, são inúmeras as técnicas eletroquímicas, espectroscopias e análises de imagem utilizadas para avaliar a formação do filme passivador e a corrosão do aço em SPC. Entretanto, em geral, algumas delas são

suficientes para fazer essa avaliação e são utilizadas pela maioria dos autores: monitoramento de OCP, LSV, EIS, MS, OM e SEM com EDS. Dessa forma, neste item serão expostos os equipamentos e procedimentos utilizados para essas técnicas, bem como os parâmetros mais utilizados na literatura.

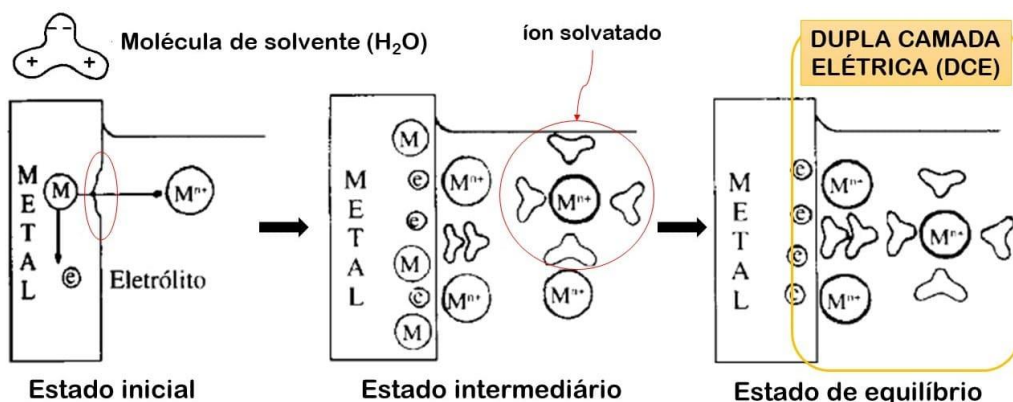
2.2.4.1 Monitoramento de potencial de circuito aberto

O monitoramento de OCP é uma técnica eletroquímica utilizada para iniciar a maioria das análises em materiais, especialmente quando pretende-se avaliar a formação de filmes óxidos passivadores ou óxidos corrosivos sobre um metal. É um dos métodos mais simples e fundamentais da eletroquímica e o mais utilizado na engenharia civil para avaliar o potencial de corrosão pela C876-15 (ASTM INTERNATIONAL, 2016).

A técnica consiste em medir a diferença de potencial entre um RE e o WE, imersos em um eletrólito de interesse, ao longo do tempo. Para isso, pode-se utilizar um dispositivo simples, como um multímetro ou um mais elaborado, como o potenciostato/ galvanostato. Como já mencionado, quando um metal é imerso em uma solução eletrolítica, ocorre uma diferença de potencial eletroquímica (de natureza elétrica e química) entre as duas fases, a líquida e a sólida. Essa diferença de potencial surge entre as camadas de carga de cada fase, ou seja, na interface metal|solução e é explicada pela teoria da dupla camada elétrica (modelo de Grahame). Segundo essa teoria, a região da interface apresenta moléculas de dipolo, que se orientam de acordo com o sinal da carga da superfície do metal, onde ficam adsorvidos. Na superfície do metal também ficam adsorvidos íons dissolvidos da solução (do metal ou do solvente). Analisando o modelo de dupla camada, que pode ser observado na Figura 11, em um estado inicial, tem-se íons metálicos produtos da oxidação do metal indo para o eletrólito. No estado intermediário, os dipolos presentes na interface vão se orientando de acordo com o sinal das cargas e, então, na superfície do metal, serão adsorvidos íons existentes na solução e o íon metálico que foi pra solução é solvatado pela molécula de solvente (no caso da Figura 11, moléculas de água). Por fim, o sistema entra em estado de equilíbrio dinâmico,

formando a dupla camada elétrica (DCE), no qual há transferência constante de carga elétrica. Em suma, a diferença de potencial medida por meio das técnicas eletroquímicas é o trânsito de íons na DCE (GENTIL, 1996; BARD; FAULKNER, 2001).

Figura 11 - Modelo de formação da dupla camada elétrica (modelo de Grahame)

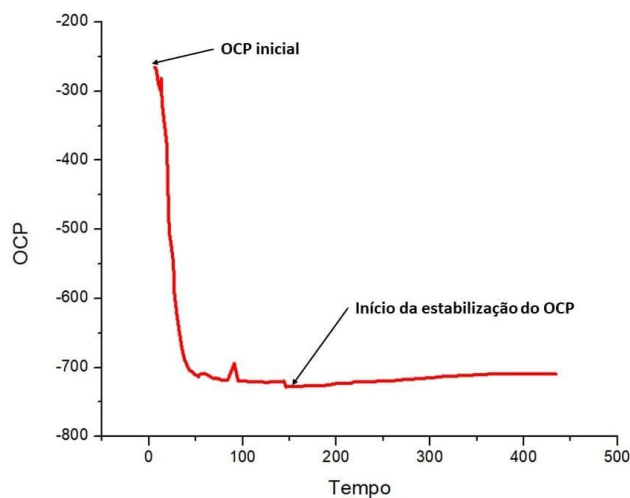


Fonte: adaptado de Gentil (1996)

Com a medida de OCP, é possível traçar um gráfico similar ao gráfico da Figura 12, que apresenta as medidas de potencial de circuito aberto em volts *versus* um eletrodo de referência (eixo ordenado) em cada unidade de tempo (eixo das abcissas). Como dito, antes da formação completa da DCE, o sistema ainda não está em equilíbrio. No caso da oxidação de metais no OCP, ocorre primeiramente mais oxidação que redução. Assim, o OCP varia constantemente até que o estado de equilíbrio dinâmico seja atingido. Nesse estado, as reações químicas se equilibram e o OCP deixa de variar, ficando constante.

Quando o objetivo é avaliar a formação do filme passivador, considera-se um indício de que o filme se encontra totalmente formado sobre a superfície do metal quando o OCP está constante dependendo da faixa de potencial. Por isso, é essencial que o monitoramento do OCP seja feito logo nos primeiros instantes de imersão do eletrodo no eletrólito.

Figura 12 - Modelo de gráfico de monitoramento de potencial de circuito aberto (em volts *versus* o potencial de um eletrodo de referência) ao longo do tempo (em unidade de tempo)



Fonte: adaptado de Rezende (2019)

Esse experimento não é quantitativo, mas serve de parâmetro termodinâmico indicando possível corrosão ou passivação do sistema.

A maioria dos autores realizam essa medição com base na C876-15 (ASTM INTERNATIONAL, 2016), pois têm intenção de avaliar a corrosão da armadura em ambiente agressivo (OGUNSANYA; HANSSON, 2019; YANG *et al.*, 2019; ZHAO *et al.*, 2019). Assim, esses autores utilizam o eletrodo de referência recomendado pela norma, o SCE. Quando o objetivo do pesquisador é avaliar a formação do filme passivador, é recomendado um monitoramento automático em um intervalo de tempo curto (no máximo uma hora), para observar a mudança de comportamento eletroquímico do sistema. Ademais, não se deve utilizar SCE para medidas de formação do filme, pois esse eletrodo não é estável em meio altamente alcalino, como é o caso da SPC (PENG *et al.*, 2018). Recomenda-se a utilização de Hg/HgO ou Ag/AgCl.

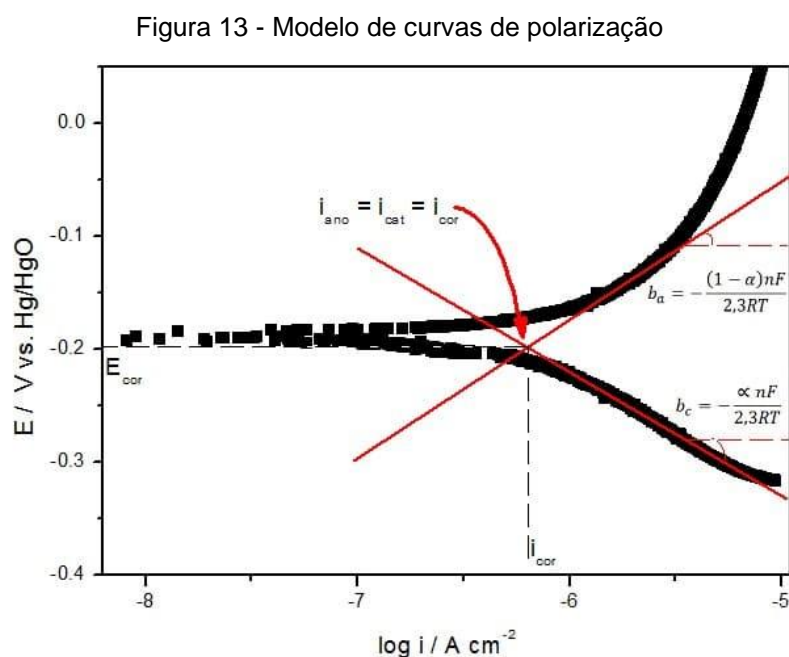
2.2.4.2 Voltametria linear de varredura

Para a técnica de LSV utilizam-se um WE, um RE e um contra-eletrodo (CE) imersos em um eletrólito. Então, aplica-se uma faixa de potencial, do menor para o maior, monitorando a corrente de resposta ao longo da varredura. Basicamente, a

aplicação de potencial pretende simular a corrosão, mas de forma acelerada, para entender o comportamento do metal.

Para realizar a varredura do potencial, a maioria dos autores opta por aplicar um potencial entre ± 10 mV e ± 20 mV em relação ao OCP (MUNDRA et al., 2017; BRIZ; BIEZMA; BASTIDAS, 2018; WANG; ZUO; TANG, 2018a). Em potenciais abaixo do OCP, denomina-se a curva de polarização (CP) como curva catódica e, para potenciais acima do OCP, curva anódica.

As CP são obtidas traçando um gráfico de potencial aplicado em volts *versus* um eletrodo de referência (eixo ordenado) contra o logaritmo da densidade de corrente em A/cm² (eixo das abcissas), conforme pode ser observado no modelo de gráfico da Figura 13.



Fonte: Rezende (2019)

O objetivo da obtenção de CP é encontrar a resistência à polarização (R_p) do sistema. Para isso, são traçadas retas tangentes auxiliares sobre as curvas (retas de Tafel). Os coeficientes angulares dessas retas (b_a para a curva anódica e b_c para a catódica) podem ser calculados conforme as equações do gráfico da Figura 13.

Obtidos esses coeficientes, calcula-se o coeficiente de Stern-Gearn (B), conforme a Equação 21 (BARD; FAULKNER, 2001).

$$B = \frac{b_a b_c}{2,303(b_a + b_c)} \quad \text{Equação 21}$$

Assim, a R_p pode ser calculada por meio da Equação 22.

$$R_p = \frac{B}{i_{cor}} \quad \text{Equação 22}$$

A R_p , como já mencionado, é um parâmetro muito importante que diz sobre quanto o sistema está suscetível à corrosão. Sendo assim, essa medida é muito utilizada pelos pesquisadores da área.

2.2.4.3 Espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS)

A técnica de EIS é uma técnica poderosa para avaliação de sistemas corrosivos, fornecendo parâmetros eletroquímicos que permitem detalhar a interface eletrodo|solução. Também é uma técnica utilizada para o cálculo da R_p , mas por meio dessa técnica é possível obter uma resposta com menor erro experimental, já que ela distingue todas as resistências do sistema, diferentemente da LSV. Outra diferença entre EIS e LSV é que na EIS o sistema é mantido no estado estacionário (em equilíbrio, no OCP), enquanto na LSV o sistema é perturbado para sair do equilíbrio. Dessa forma, tem-se mais uma vantagem da técnica, pois o sistema polarizado de forma acelerada pode não resultar uma medida condizente com a realidade. A maior vantagem dessa técnica, porém, é poder utilizar um circuito elétrico equivalente ao sistema eletroquímico em análise para avaliar o sistema. Dessa forma, o WE, a solução, o filme passivador óxido e a DCE podem ser tratados como componentes elétricos (resistores, capacitores, indutores etc.) e calcula-se os parâmetros específicos de cada componente (PEREZ, 2004).

Para obtenção do espectro da EIS, através de um potenciostato com três eletrodos (WE, RE e CE) é aplicada uma varredura de frequência no OCP. A maioria dos autores estudados utilizam a faixa de frequência entre 10 mHz e 100 kHz com

uma amplitude de onda de 10 mV para armaduras em SPC (XIONG et al., 2018; CHEN et al., 2019; LIU et al., 2019).

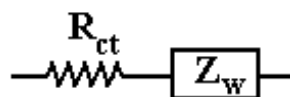
Para realização da medida, aplica-se na célula eletroquímica uma voltagem sinusoidal $E = E_0 \sin wt$, sendo E_0 a amplitude máxima aplicada em volts e w a frequência em rad/s. A resposta do sistema é a corrente elétrica (I), $I = I_0 \sin(wt + \varphi)$, na qual φ é o ângulo de fase entre a perturbação e a resposta. A impedância (Z) corresponde ao fator de proporção entre E e I e consistem em resistências, reatâncias e indutâncias (BARD; FAULKNER, 2001).

Qualquer célula eletroquímica pode ser representada através de um circuito elétrico equivalente, o qual deve conter, pelo menos, os seguintes componentes: um condensador de capacidade (C_d); impedância do processo faradaico (Z_f); resistência não compensada (R_s), que é a resistência da solução entre os eletrodos de trabalho e de referência. A impedância (Z_f) pode ser subdividida de dois modos equivalentes (BARD; FAULKNER, 2001):

- 1) Uma resistência R_s , proveniente da solução e processos de eletrodo, em série com uma pseudocapacitância (C_s), proveniente do eletrodo de trabalho, de acordo com o esquema:



- 2) Uma resistência proveniente da transferência de carga (R_{ct}), e uma impedância que mede a dificuldade de transporte de massa das espécies eletroativas, a qual é denominada impedância de Warburg (Z_w):



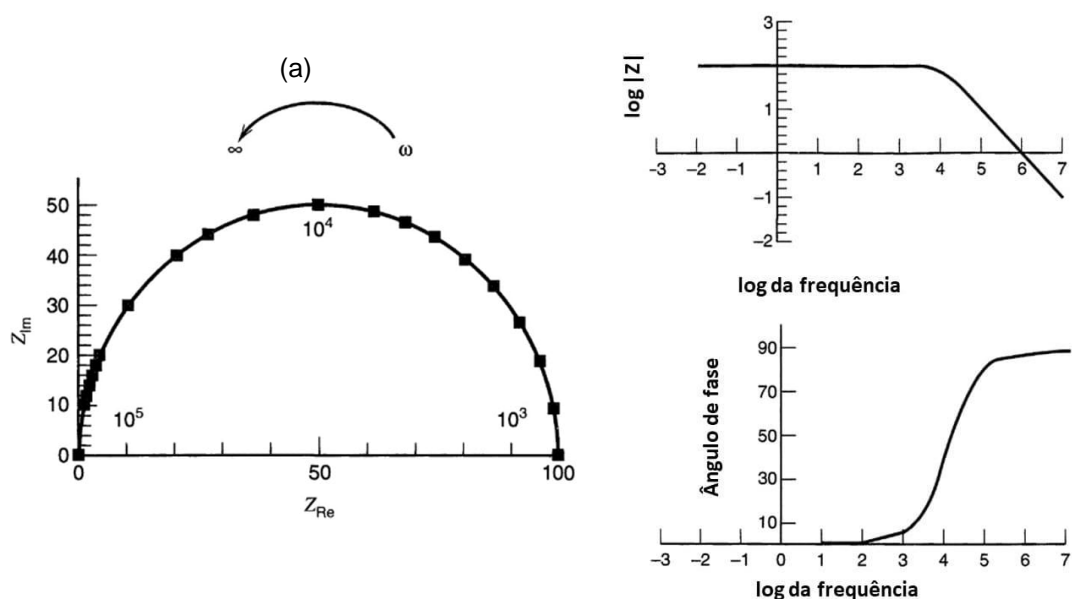
Nos casos em que se têm reações cineticamente favorecidas $R_{ct} \rightarrow 0$ e Z_w predomina, e quando se têm reações desfavorecidas $R_{ct} \rightarrow \infty$ e R_{ct} predomina. No caso de uma resistência pura, R , a lei de Ohm $E = RI$ conduz a $I = \frac{E_0}{R}$ e, como $E_0 = 0$, não há diferença de fase entre potencial e corrente. No caso de um capacitor puro, C ,

tem-se que $I = C \frac{\partial E}{\partial t}$. Assim, $I = \frac{E_0}{X_c \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})}$, na qual X_c é o inverso da capacitância, ou seja, a reatância do sistema (BARD; FAULKNER, 2001).

Para fazer a análise por meio de um circuito equivalente, associam-se fenômenos observados no sistema físico com componentes elétricos em um circuito. Por exemplo, uma DCE pode ser associado um capacitor, devido ao arranjo das cargas, enquanto que um filme formado sobre um metal pode ser representado por um resistor. Para verificar se um circuito equivalente representa realmente um sistema físico basta fazer a simulação de um espectro de impedância utilizando esse circuito. Quanto mais próxima dos dados experimentais for a simulação, mais representativo é o circuito proposto.

Com a medição de EIS obtém-se respostas sobre a impedância do sistema (real e imaginária) e o ângulo de fase. Com isso, podem ser traçados os dois gráficos tradicionais da EIS: o diagrama de Nyquist e o diagrama de Bode. O diagrama de Nyquist (Figura 14a) apresenta os diferentes pontos obtidos de uma varredura em diferentes frequências, ou seja, é um diagrama de Argand (diagrama de números complexos apresentados como vetores) expandido. Já os diagramas de Bode (Figura 14b) apresentam o logaritmo do módulo da impedância (em Ohm) e o ângulo de fase (em graus) em função da frequência. Esse tipo de diagrama facilita a visualização de informações que nem sempre são facilmente identificadas no diagrama de Nyquist.

Figura 14 - Modelos de diagrama de Nyquist (a) e diagramas de Bode (b) para um circuito RC



Fonte: adaptado de Bard; Faulkner (2001)

Especificamente no diagrama de Nyquist observa-se a formação de semicírculos, cada qual representante de uma resistência do sistema. Por exemplo, em um sistema de aço no concreto, normalmente formam-se três semicírculos, correspondentes à resistência do aço, resistência do filme e resistência da dupla camada.

2.2.4.4 Espectroscopia de impedância de Mott-Schottky

A medida de MS é similar à EIS, mas em vez de variar a frequência no potencial de circuito aberto, faz-se o contrário: estipula-se uma faixa de varredura em torno do OCP e fixa-se uma frequência. Essa medida só pode ser utilizada para semicondutores, que é o caso dos filmes óxidos formados no aço-carbono.

A relação de Mott-Schottky é dada pela Equação 23, na qual ϵ_0 é a permissividade do vácuo ($8,85 \times 10^{-14}$ F/cm), ϵ é a constante dielétrica do filme passivador (considerado como 15,6 para o aço), q é a carga elétrica ($1,602 \times 10^{-19}$ C), k é a constante de Boltzman ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K) e ND é a densidade de doares do filme

passivador (coeficiente angular do gráfico de $1/C^2$ vs. E). E_{FB} é o potencial de banda plana e T, a temperatura absoluta.

$$C^{-2} = \frac{2}{\varepsilon_0 \varepsilon q N_D} \left(E_{ap} - E_{FB} - \frac{kT}{q} \right) \quad \text{Equação 23}$$

O método de Mott-Schottky permite, a partir das inclinações do gráfico ($1/C^2$ vs. E) calcular a densidade de doadores e aceptores nos semicondutores e determinar o potencial de banda plana pela extrapolação de $1/C^2$ tendendo a zero (FENG *et al.*, 2017b; JIANG *et al.*, 2017a). No caso, C é a capacitância e E, o potencial.

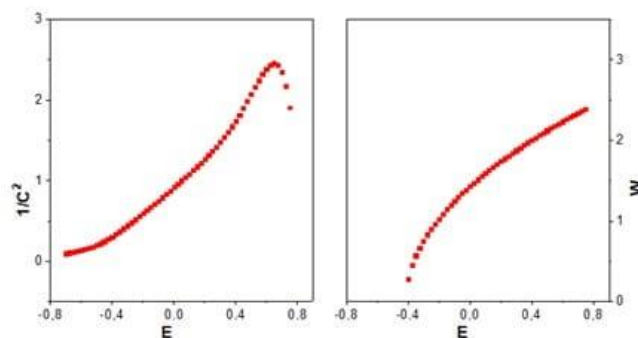
Para a avaliação de filmes de passivação, o método é importante pois pode-se dizer que quanto maior é a densidade de doadores, maior é a susceptibilidade de ocorrer corrosão por pite, ou corrosão localizada (FREIRE *et al.*, 2010).

Ainda, a derivação da Equação 23 fornece a espessura do filme passivador (W) em função do potencial aplicado, como expresso na Equação 24.

$$W = \frac{2\varepsilon^0 \varepsilon}{q N_D} \left[\left(E_{ap} - E_{FB} - \frac{kT}{q} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad \text{Equação 24}$$

Os gráficos resultantes da MS são expressos na forma do inverso da capacitância ao quadrado ou espessura do filme no eixo ordenado *versus* a varredura de potencial aplicado no eixo das abcissas. Um modelo desses gráficos pode ser observado na Figura 15.

Figura 15 – Modelo de gráficos de Mott-Schottky



Fonte: Rezende (2019)

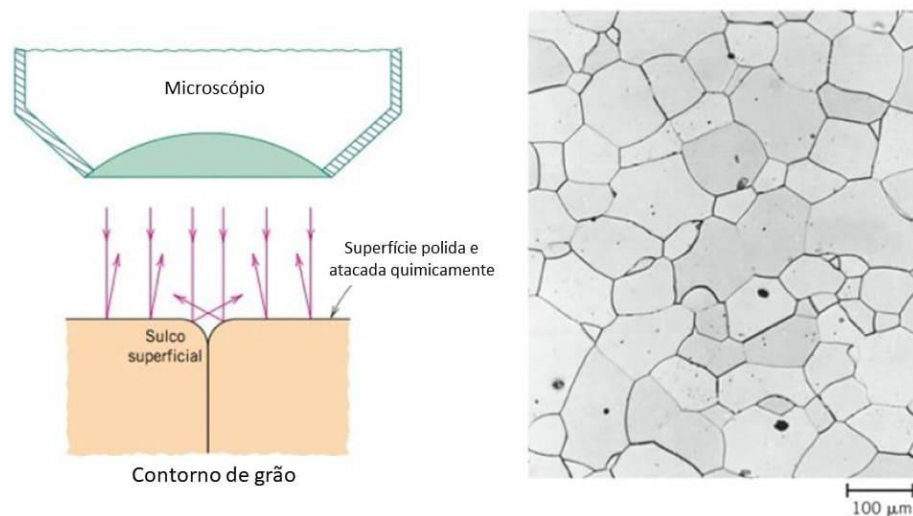
Para avaliação da corrosibilidade de aços em SPC, há grande variabilidade de parâmetros adotados pelos autores, mas todos em cerca de -0,5 V a 1,5 V de varredura em velocidade de 10 mV/s a 50 mV/s a uma frequência de 1 kHz (WILLIAMSON; ISGOR, 2016; DING; POURSAEE, 2017; ZHAO *et al.*, 2019). Williamson; Isgor (2016) alertam que, assim como na LSV, a aplicação do potencial pode alterar as propriedades do filme passivo. Dessa forma, deve ser adotada uma velocidade de incremento de potencial tão pequena quanto for possível para o potenciostato utilizado.

2.2.4.5 Microscopia óptica

A OM é uma das microscopias mais simples que existem, uma vez que o microscópio óptico tem um funcionamento simples. A OM permite muita versatilidade e, para avaliação da corrosão de aços, tem aumento suficiente para ver a formação de óxidos. Entretanto, como já mencionado, para avaliação de filmes passivadores são necessários microscópios que atinjam escala nanométrica.

O microscópio óptico é o equipamento utilizado para realização de metalografias, essencial para o estudo da microestrutura de aços-carbono, como mencionado anteriormente. Entretanto, para obtenção dessa imagem é necessário um preparo do material, pois o aço é um material opaco, assim como todos os metais. Para preparar o aço, sua superfície é lixada e polida e, em seguida, é aplicado um ataque químico (normalmente solução de nital 3%). O ácido entra no sulco superficial existente entre os grãos do aço e revela o contorno desses grãos. Um modelo do ataque químico e de como fica a imagem microscópica do aço após a revelação de grãos pode ser observado na imagem da Figura 16.

Figura 16 - Seção de um contorno de grãos com enfoque para o sulco superficial e superfície atacada quimicamente à esquerda e à direita a microscopia com o contorno de grãos revelados



Fonte: adaptado de Callister Jr.; Rethwisch (2012)

É através da revelação de grãos que se pode identificar as fases microscópicas do aço, que foram abordadas no item 2.2.3.1.

2.2.4.6 Microscopia eletrônica de varredura com espectroscopia de dispersão de raios-X

A SEM é uma técnica que permite o aumento de até 50 mil vezes. Consiste em varrer a amostra com um feixe de elétrons de forma que o feixe de elétrons refletido é coletado e forma a amostra ampliada. Para isso, portanto, é necessário que a amostra seja condutora ou recoberta de material condutor (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2012).

Quando o SEM é acoplado de equipamento capaz de realizar EDS, um ponto da imagem obtida pelo microscópio é escolhido e, através da emissão de raios-X na amostra e interpretação da energia de retorno característica de cada elemento é possível dizer os elementos presentes na amostra. Ainda, é possível realizar um mapeamento de uma imagem de SEM, colorindo cada elemento com uma cor específica, de forma a ser possível saber onde os elementos estão concentrados na amostra.

2.3 Síntese da revisão bibliográfica

A Tabela 8 compreende a síntese da revisão bibliográfica com os principais artigos científicos publicados em periódicos indexados encontrados acerca do tema: avaliação da corrosibilidade de armaduras de aço-carbono de concreto imersas em solução de poros de concreto simuladas. A tabela completa, que contempla todos os artigos indexados que foram encontrados até o final da redação deste trabalho, encontra-se no Apêndice A (Tabela 26).

Tabela 8 – Sinopse dos principais artigos relacionados à corrosão de armaduras de aço-carbono em soluções de poros de concreto simuladas

Título	Autor(es) (ano)	Objetivo(s)	Eletrodo de trabalho	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
The influence of surface finish of reinforcing steel and pH of the test solution on the chloride threshold concentration for corrosion initiation in synthetic pore solution	Mammoliti; Brown; Hansson; Hope (1996)	Verificar se a situação da superfície da armadura e a concentração de Cl^- influenciam na iniciação do processo corrosivo.	Barras de aço para construção civil embutidas em resina epóxi, desengorduradas, lixadas (#600) e polidas metalograficamente.	- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ saturada (pH 12,5); - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ saturada contendo NaOH e KOH (pH 13,3).	CV.	- O pH das SPC é determinante na iniciação da corrosão mesmo com concentrações de $\text{Cl}^- > 10\%$; - A condição da superfície do aço é essencial para definir o valor limite de concentração de Cl^- para iniciar a corrosão (CTV).
A study on chloride-induced depassivation of mild steel in simulated concrete pore solution	Saremi; Mahallati (2002)	Estudar o efeito da concentração de cloreto na estabilidade do filme passivo no aço imerso em SPC.	Aço lixado.	Solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ saturada associada a várias concentrações de cloreto.	- CV; - EIS.	- A corrente de pico é máxima no CTV; - O potencial de corrosão e a corrente de pico são reduzidas no CTV, pois o metal entra em corrosão generalizada; - A inclusão de Cl^- na SPC causa grande decréscimo de R_p , devido à quebra do filme passivo; - A capacitância do filme passivador aumenta significativamente quando o filme passivador é quebrado.
Corrosion of reinforcing steel in simulated concrete pore solutions effect of carbonation and chloride content	Moreno; Morris; Alvarez; Duffó (2004)	Avaliar os efeitos da concentração de cloretos em SPC quanto à polarização e taxa de corrosão do aço.	Aço embutido em resina epóxi desengordurada.	Várias soluções contendo cloreto e carbonatos.	- OCP; - LPR.	- Em solução altamente alcalina e em solução mais concentrada de carbonatos, o aço permanece passivo mesmo em potencial de evolução de hidrogênio; - O aumento do pH e de carbonatos aumenta a resistência à corrosão do aço quanto à corrosão localizada.
Corrosion of reinforcing steel in neutral and acid solutions simulating the electrolytic environments in the micropores of concrete in the propagation period	Garcés; Andrade; Saez; Alonso (2005)	Avaliar a corrosão generalizada e por pites em diversas soluções com pH e $[\text{Cl}^-]$ diferentes.	Aço desengordurado e lixado.	Várias soluções contendo cloretos com diferentes valores de pH.	- LSV; - LPR; - EIS.	A $[\text{Cl}^-]$ influencia significativamente na taxa de corrosão em região alcalina. Quando o pH é baixo, a $[\text{Cl}^-]$ não exerce influência na taxa de corrosão.

Tabela 8 – Sinopse dos principais artigos relacionados à corrosão de armaduras de aço-carbono em soluções de poros de concreto simuladas

Título	Autor(es) (ano)	Objetivo(s)	Eletrodo de trabalho	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
Reinforcing steel passivation in mortar and pore solution	Poursaeed; Hanson (2007)	Determinar o tempo de formação do filme passivo no aço.	Aços sem tratamento e aços lixados.	Solução contendo: NaOH, KOH, CaSO ₂ .2H ₂ O, Ca(OH) ₂ e água deionizada.	- LPR; - Potencial de meia célula; - Espectroscopia de Raman.	- O aço imerso na SPC precisa de um tempo significativo para passivação, simulando o que acontece na realidade; - Na SPC o potencial do aço estabiliza mais rápido que na argamassa. Isso possivelmente se deve ao fato de que o pH na SPC é constantemente alcalino e na argamassa é inicialmente neutro e vai aumentando conforme ocorrem as reações de hidratação do cimento.
The effect of concrete pore solution composition on the quality of passive oxide films on black steel reinforcement	Ghods; Isgor; McRae; Miller (2009)	Relacionar a qualidade do filme passivo em aço-carbono com a composição da SPC.	Aço-carbono embutido em resina epóxi, desengordurado e lixado.	10 soluções de Ca(OH) ₂ saturadas com concentrações diferentes de Ca(OH) ₂ , Na(OH), K(OH) e Ca(SO) ₂ +2H ₂ O.	- LSV; - EIS; - SEM.	- Ions comumente encontrados em poros de concretos (Ca ²⁺ , Na ⁺ , K ⁺ e (SO ₄) ²⁻) podem afetar o filme passivo de óxidos formados em aço-carbono; - São necessários ao menos oito dias para estabilização do OCP em amostras de aço não-tratadas.
Study on the corrosion behavior of reinforcing steel in simulated concrete pore solutions using in situ Raman spectroscopy assisted by electrochemical techniques	Chen; Du; Ye; Zhu; Lin (2010)	Estudar o comportamento corrosivo do aço para construção em SPC.	Amostras de aço para concreto armado embutidas em resina epóxi e lixadas.	Solução saturada de Ca(OH) ₂ com cloreto.	- Espectroscopia de Raman; - EIS; - LSV; - SEM.	- A espectroscopia de Raman <i>in situ</i> juntamente com técnicas eletroquímicas se mostraram efetivas para estudar o comportamento corrosivo de aços para construção em SPC; - Mesmo em baixa quantidade de NaCl a espectroscopia de Raman mostrou picos de FeCO ₃ na superfície do aço, indicando que o aço foi corroído.
The nature of rusts and corrosion characteristics of low alloy and plain carbon steels in three kinds of concrete pore solution with salinity and different pH	Singh; Singh (2011)	Estudar a relação entre a corrosão e a natureza dos óxidos formados em aços de baixa liga e carbono expostos em SPC com diferentes valores de pH.	Amostras de aço de baixa liga e aço-carbono.	Solução contendo 0,1 M NaOH + 0,175 M KOH com adição de NaCl.	- Espectroscopia de Raman; - XRD; - EIS.	- O aço de baixa liga demora entre 2 a 3 vezes menos para corroer que o aço-carbono, devido a maior presença de Cu e Cr em sua composição; - O XRD mostrou que os óxidos formados sobre o aço de baixa liga são mais estáveis.

Tabela 8 – Sinopse dos principais artigos relacionados à corrosão de armaduras de aço-carbono em soluções de poros de concreto simuladas

Título	Autor(es) (ano)	Objetivo(s)	Eletrodo de trabalho	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
Corrosion behavior of steel in simulated concrete pore solutions treated with calcium silicate hydrates	Tang; Miao; Zuo; Zhang; Wang (2011)	Estudar a influência do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) na concentração de Cl ⁻ em SPC com diferentes valores de pH.	Amostra de aço lixada e desengordurada.	Várias soluções com valores de pH diferentes e adição de Al e C-S-H.	- LSV; - EIS	- O C-S-H pode absorver cloreto na SPC; - Em SPC com pH entre 12,5 e 11,9, o pH decresce depois da adição de C-S-H (diminui a Rp do aço); - Em SPC com pH entre 10 e 9,3, após a adição de C-S-H o pH aumenta (aumenta a Rp).
Threshold chloride level and characteristics of reinforcement corrosion initiation in simulated concrete pore solutions	Yu; Chiang; Yang (2011)	Investigar a concentração limite de Cl ⁻ para não ativar a corrosão de aços para concreto.	Amostras de aço sem tratamento e expostas ao ambiente da Flórida por 6 dias e amostras de aço lixadas.	Várias soluções contendo cloreto.	- LPR.	- A resistência à corrosão de ambas amostras de aço (tratada e não) pode ser aumentada com o aumento do pH da SPC, sendo o aumento da amostra lixada maior; - Depois de iniciada a corrosão, pites mais severos foram observados em amostras lixadas, mas isso não pôde ser relacionado com a concentração de Cl ⁻ .
Influence of chloride salt type on threshold level of reinforcement corrosion in simulated concrete pore solutions	Jiang; Huang; Xu; Zhu; Mo (2012)	Estudar o limite de concentração de KCl, NaCl, CaCl ₂ e MgCl ₂ para não iniciar a corrosão em aços imersos em SPC.	Amostra de ao para concreto armado embutida em resina epóxi lixada e desengordurada.	- Solução de Ca(OH) ₂ saturada; - Solução de cimento.	- LPR; - EIS.	- A adição de MgCl ₂ e CaCl ₂ reduz significativamente o pH das duas soluções estudadas; - Com o aumento da concentração de KCl, NaCl, CaCl ₂ e MgCl ₂ , o potencial de corrosão do aço diminui e a densidade de corrente aumenta; - Em solução contendo apenas Ca(OH) ₂ saturada, o único inibidor de corrosão é a concentração de hidroxila. Na solução de cimento, além da concentração de hidroxila, as ligações de cloretos podem afetar, sendo mais adequado para simular as soluções dos poros do concreto.
EIS analysis on chloride-induced corrosion behavior of reinforcement steel in simulated carbonated concrete pore solutions	Ye; Hu; Dong; Zhang; Hou; Du; Lin; Pan (2012)	Estudar a concentração de cloreto que inicia a corrosão do aço em SPC através de EIS.	Amostra de aço embutida em resina epóxi, desengordura e lixada.	Solução de Ca(OH) ₂ saturada com adição de NaHCO ₃ (pH 10).	- LPR; - EIS; - SEM.	- EIS é uma técnica poderosa para investigar quando se inicia a corrosão no aço imerso em SPC; - Em solução de pH 10, a concentração de Cl ⁻ crítica é de 0,01 mol/l e pelas imagens de SEM foi possível observar que em concentrações acima desse valor, o filme passivador é tão fino que se inicia um processo de corrosão localizada.

Tabela 8 – Sinopse dos principais artigos relacionados à corrosão de armaduras de aço-carbono em soluções de poros de concreto simuladas

Título	Autor(es) (ano)	Objetivo(s)	Eletrodo de trabalho	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
Nano-scale study of passive films and chloride-induced depassivation of carbon steel rebar in simulated concrete pore solutions using FIB/TEM	Ghods; Isgor; Carpenter; McRae; Gu (2013)	Estudar a composição estrutural do filme passivo formado no aço para concreto em SPC.	Amostra de aço embutida em resina epóxi desengordurada, lixada e polida.	- Solução de Ca(OH)_2 saturada (pH 12,5); - Solução saturada de Ca(OH)_2 contendo NaOH, KOH e CaSO_4 (pH 13,3).	- FIB; - TEM e EDS.	- A espessura do filme passivo no aço é entre 5 e 13 nm em ambas as soluções estudadas; - A adição de cloreto em concentração abaixo do CTV não muda a morfologia do filme passivador no aço, apenas diminui o crescimento de óxidos na superfície; - O filme óxido na superfície do aço é composto de nano-cristais de FeOOH com célula unitária prismática; - As lamelas de cementita são a região preferencial de iniciação de corrosão por pites.
Characterization of atomic structure of oxide films on carbon steel in simulated concrete pore solutions using EELS	Gunay; Ghods; Isgor; Carpenter; Wu (2013)	Uso da técnica de EELS para identificar a composição química de óxidos formados no aço-carbono em ambiente alcalino.	Amostra de aço-carbono embutida em resina epóxi desengordurada, lixada e polida.	Soluções de: 1) Ca(OH)_2 saturada (pH 12,5); 2) Ca(OH)_2 saturada contendo NaOH, KOH e CaSO_4 (pH 13,3).	- TEM; - FIB; - EELS.	- O filme óxido formado no aço em ambiente alcalino é praticamente composto de Fe(II)O , um óxido instável quando exposto a Cl^- ; - Na presença de cloreto, Fe(III)/Fe(II) aumentam e a camada de óxido diminui.
Influence of carbonation on chloride-induced reinforcement corrosion in simulated concrete pore solutions	Liu; Jiang; Xu; Xiong; Song (2014)	Examinar a influência da carbonatação na corrosão de armadura induzida por cloreto em SPC.	Amostra de aço embutida em resina epóxi, lixada, polida e desengordurada.	Solução de: 1) $\text{Ca(OH)}_2 + \text{KOH} + \text{NaOH}$; 2) Solução de cimento. Ambas com cloreto e várias concentrações de bicarbonato de sódio.	- EIS.	- Na solução de $\text{Ca(OH)}_2 + \text{KOH} + \text{NaOH}$, altas concentrações de bicarbonato aumentam a estabilidade do filme e a resistência à corrosão do aço. Na solução de cimento nenhuma relação entre o bicarbonato e o início da corrosão foi observado; - A solução de cimento é mais corrosiva, sendo mais representativa da realidade.
The inhibitive effect of bicarbonate and carbonate ions on carbon steel in simulated concrete pore solution	Tan; Wijesinghe; Blackwood (2014)	Elucidar sobre o comportamento corrosivo do aço em SPC carbonatada e com presença de cloreto.	Amostra de aço-carbono desengordurada e lixada.	Solução de Ca(OH)_2 saturada com adição de NaCl e NaHCO_3 .	- LPR; - CV; - EIS; - SEM.	A presença de carbonatos aumenta a polarização e a resistência à transferência de carga do aço-carbono, sendo a polarização e transferência de carga o dobro para pH 9 em relação ao pH 10 e pH 11 em alta concentração de cloreto. Aparentemente, os carbonatos ajudam a estabilizar o Fe(II) presente no filme passivo.

Tabela 8 – Sinopse dos principais artigos relacionados à corrosão de armaduras de aço-carbono em soluções de poros de concreto simuladas

Título	Autor(es) (ano)	Objetivo(s)	Eletrodo de trabalho	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
Electrochemical characterization of mild steel in alkaline solutions simulating concrete environment	Volpi; Olietti; Stefanoni; Trasatti (2014)	Caracterizar o aço imerso em solução alcalina que simula a solução de poros do concreto.	Amostra de aço embutida em resina epóxi escovada com esponja de aço.	Solução de Ca(OH)_2 saturada e 1 M de NaOH.	- CV; - LSV; - EIS.	- A voltametria cíclica se mostrou uma boa ferramenta para investigar os processos eletroquímicos que ocorrem na superfície do aço imerso em solução alcalina, que envolvem as transformações do Fe(II) e do Fe(III); - A polarização anódica indicou que, ao passar do tempo do aço imerso em solução alcalina, a transferência de carga diminui (formação de óxidos que propiciam a passivação aumenta).
Electrochemical behaviour of steel in mortar and in simulated pore solutions: Analogies and differences	Duffó; Farina (2016)	Determinar até que ponto o uso de soluções simuladas de poros permite prever o comportamento de vergalhões embutidos no concreto/ argamassa.	Amostras de aço para concreto armado desengorduradas.	Solução saturada de Ca(OH)_2 contendo 7,4 g de NaOH e 35,6 g de KOH por litro de Ca(OH)_2 (pH 13,2).	- Monitoramento de OCP; - LSV.	- Nas CP observou-se um comportamento semelhante ao aço nas argamassas e na SPC, mas com valores e parâmetros eletroquímicos diferentes; - Uso de SPC é útil para comparar diferentes tipos de aço, mas o comportamento não pode ser extrapolado para argamassas.
Corrosion behavior of steel submitted to chloride and sulphate ions in simulated concrete pore solution	Liu; Zhang; Ni; Huang (2016)	Investigar o efeito da adição de cloreto e sulfato no aço imerso na SPC.	Amostra de aço lixada e desengordurada embutida em resina epóxi.	Solução saturada de Ca(OH)_2 com 0,01 mol/l de NaCl ou Na_2SO_4 .	- EIS.	- A CTV na SPC é de 0,05 a 0,06 mol/l de cloreto e 0,02 a 0,03 mol/l de sulfato; - O sulfato induz a formação de um filme no aço não-passivante muito poroso; - A adição de cloreto e sulfato concomitantemente aumenta a densidade de corrente e a taxa de corrosão do aço.
Influence of sulfate ion and associated cation type on steel reinforcement corrosion in concrete powder aqueous solution in the presence of chloride ions	Shaheen; Pradhan (2016)	Avaliar a corrosão de aço em solução de concreto com cimento Portland e com cimento Portland pozolânico.	Amostra de aço para concreto armado embutido em resina epóxi limpo com bucha.	Várias soluções feitas de pó de concreto contendo cloretos e sulfato.	- LSV; - XRD; - FTIR.	- A zona passiva do aço é maior em solução de concreto com cimento Portland do que com cimento pozolânico; - Concreto feito de cimento Portland performa melhor contra o sulfato de magnésio enquanto o cimento pozolânico performa melhor contra o sulfato de sódio em ambiente com cloreto.

Tabela 8 – Sinopse dos principais artigos relacionados à corrosão de armaduras de aço-carbono em soluções de poros de concreto simuladas

Título	Autor(es) (ano)	Objetivo(s)	Eletrodo de trabalho	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
The effect of simulated concrete pore solution composition and chlorides on the electronic properties of passive films on carbon steel rebar	Williamson; Isgor (2016)	Investigar os efeitos da composição eletrolítica, pH e tempo de passivação nas propriedades eletrônicas dos filmes passivos que se formam no aço carbono em SPC.	Amostra de aço-carbono desengordurada, lixada e polida.	Soluções: 1) Saturada de Ca(OH)_2 (pH 12,5); 2) Saturada de Ca(OH)_2 + Ca^+ , K^+ e Na^+ (pH 13,4); 3) Saturada de Ca(OH)_2 + Ca^+ , K^+ , Na^+ e CaSO_4 (pH 13,3). Todas com adição de cloreto.	- MS; - EIS.	- Os filmes passivos formados em todas as soluções mostraram espessuras de camada máxima de carga espacial semelhantes (cerca de 0,4 nm na passivação total); - As soluções com adição de apresentaram assinatura eletrônica similares, mostrando que o sulfato não afeta as propriedades eletrônicas do filme passivador.
Study of Pitting Resistance of Rebar Steels in Jakarta Coastal Using Simulated Concrete Pore Solution	Anwar; Fadillah; Nikitasari; Oediyani; Mabruhi (2017)	Estudar a resistência à corrosão localizada em armadura exposta em SPC contendo água do mar de Jakarta com e sem carbonatos.	Amostra de aço para concreto armado embutido em resina epóxi lixada.	Várias soluções de poro de concreto simuladas contendo água do mar de Jakarta ou 3,5% de NaCl com e sem carbonatos.	- CV; - LSV.	- Dois tipos de água do mar de Jakarta e a solução com 3,5% de NaCl performaram da mesma forma eletroquimicamente; - A adição de carbonatos em todas as soluções aumentou o potencial de <i>breakdown</i> do aço.
The impact of sandblasting as a surface modification method on the corrosion behavior of steels in simulated concrete pore solution	Ding; Poursaee (2017)	Mostrar o impacto da modificação da superfície na corrosão de metais, incluindo a corrosão de aço para concreto armado.	Armadura 1) Sem tratamento; 2) Tratado com jato de areia por 5 min; 3) Tratado com jato de areia por 10 min; 4) Tratado com jato de areia por 15 min.	Solução contendo NaOH, KOH, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, Ca(OH)_2 e água deionizada contaminada ou não com NaCl.	- LPR; - CV; - EIS; - MS; - SEM com EDS.	- O jateamento de areia aumentou a resistência à corrosão do aço em SPC contaminada com NaCl; - O jateamento de areia pode melhorar a formação da camada passiva.
Chloride threshold value to initiate reinforcement corrosion in simulated concrete pore solutions: The influence of surface finishing and pH	Figueira; Sadovski; Melo; Pereira (2017)	Avaliar a influência dos acabamentos na superfície do aço e do pH da SPC no CTV.	Amostras de aço embutidas em resina epóxi: 1) Sem acabamento (T); 2) Lixadas (P500); 3) Lixadas e polidas (D); 4) Lixadas, polidas e pré-oxidadas molhando em água e deixando secar por 24h (DH).	Solução contendo diferentes concentrações de NaOH, KOH, Ca(OH)_2 e $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$.	- Monitoramento do OCP; - LSV; - SVET; - Estereoscopia; - SEM com EDS.	- Na amostra D em SPC pH 13,5 a formação de áreas ativas de corrosão para concentrações > 5% de NaCl é instantânea; - Para amostras DH, a corrosão se inicia em locais em que existiam mais óxidos; - O acabamento dado à superfície do aço e o pH da SPC influencia fortemente na inicialização da corrosão do aço.

Tabela 8 – Sinopse dos principais artigos relacionados à corrosão de armaduras de aço-carbono em soluções de poros de concreto simuladas

Título	Autor(es) (ano)	Objetivo(s)	Eletrodo de trabalho	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
Study of depassivation of carbon steel in simulated concrete pore solution using different equivalent circuits	Liu; Zhang; Wu; Huang (2017)	Investigar a despassivação de armaduras por meio do uso de alguns circuitos equivalentes na técnica de EIS.	Amostra de aço-carbono embutido em resina epóxi lixado e desengordurado.	Solução de Ca(OH)_2 saturada com 0,01 mol/l de NaCl.	EIS.	O circuito que melhor fita os resultados da EIS foi o $R(Q(R(QR)))$, mas é importante atentar para o significado físico de cada circuito para cada sistema estudado.
Chloride-induced corrosion of steel rebars in simulated pore solutions of alkali-activated concretes	Mundra, Criado, Bernal, Provis (2017)	Investigar o comportamento passivante do aço em relação à corrosão localizada quando imerso em eletrólito altamente alcalino representando a SPC.	Amostra de aço para concreto armado lixada e desengordurada.	Solução contendo 0,8 M, 0,12 M e 1,36 M de NaOH.	- CV; - EIS; - LPR.	Em soluções altamente alcalinas, o filme passivo é composto principalmente de Fe(II) e um filme menos denso de Fe(III). As espécies encontradas no filme são diretamente da alcalinidade da solução.
The micro-solution electrochemical method to evaluate rebar corrosion in reinforced concrete structures	Tian; Dong; Cheng; Wan; Wang; Xiao; Li (2017)	Estudar a corrosão no aço para concreto armado em microssolução de poros de concreto simulando uma situação de serviço real.	Amostra de aço para concreto armado desengordurado, lixado e polido.	Solução de Ca(OH)_2 saturada contendo diferentes concentrações de NaCl.	- LPR; - EIS; - OM.	A resistência à corrosão do aço na microssolução é cerca de cinco vezes maior que na solução, além de a corrente de corrosão ser menor e o potencial de corrosão mais positivo;
Effect of simulated pore solution on passivation characteristic of P110 steel	Peng; Liu; Wang; Lin; Sun; Xia (2018)	Avaliar a passivação do aço-carbono em dois tipos de solução de poros simulada.	Amostra de aço lixado e desengordurado.	- Solução de cimento; - Solução contendo 0,19 M NaOH e 0,02 M Ca(OH)_2 .	- Monitoramento de OCP; - LSV; - EIS; - MS; - XPS; - SEM.	- O tempo de passivação do aço nas diferentes soluções foi diferente. A solução de cimento requereu maior tempo para passivar o aço; - O aço na solução de cimento apresentou um filme passivo mais espesso; - Em ambas as soluções o filme passivo formado é de óxidos de Fe.
Study of the passivation of carbon steel in simulated concrete pore solution using scanning electrochemical microscope (SECM)	Torbati-Sarraf; Poursaee (2018)	Avaliar a passivação do aço-carbono em SPC usando microscópio eletroquímico de varredura.	Amostra de aço-carbono embutido em resina epóxi, lixado, polido e desengordurado.	Solução contendo 0,1 mol/l de NaOH, 0,3 mol/l de KOH, 0,03 mol/l de Ca(OH)_2 , 0,002 mol/l de $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ e 0,0005 mol/l de KCl.	Microscopia eletroquímica de varredura (SECM).	A formação de um filme passivo na superfície do aço-carbono é tempo-dependente.

3. MATERIAIS E MÉTODO

Neste item foram expostos os materiais e métodos utilizados para desenvolvimento do programa experimental desta pesquisa.

3.1 Materiais

O aço utilizado foi o vergalhão CA-60, o mesmo utilizado por Rezende (2019), cuja composição química foi exposta na Tabela 6.

Para preparação das SPC foram utilizados: água deionizada da Millipore Corporation®, modelo MILLI-Q DIRECT 8, cimento Portland CPV-ARI (alta resistência inicial) fabricado pela Holcim do Brasil S/A, areia fina e média comercializadas na cidade de São Carlos (SP), ACBC coletada em uma usina sucroalcooleira localizada na cidade de Jaú (SP) e LETA coletado na estação de tratamento de água (ETA) da cidade de São Carlos (SP). O cimento Portland CPV-ARI e as areias são os mesmos utilizados e caracterizados por Moretti (2018), com a qual a autora atuou no GESEC. Os agregados reciclados, ACBC e LETA, foram explorados mais especificamente no Item 3.2.

Além das SPC referenciais, foram produzidas soluções agressivas de SPC, contendo: 1) 3,5% de NaCl (ASTM C876-15, 2016) para simular a água do mar; 2) 0,03 M de NaHCO_3 + 0,0015 M Na_2CO_3 (ANWAR *et al.*, 2017) para simular a carbonatação do concreto; 3) misturas dessas soluções agressivas para simular as combinações de ataques por cloretos e carbonatação. Os parâmetros dessas misturas estão apresentados na Tabela 17.

3.1.1 Agregados miúdos reciclados

Neste item foi apresentada a caracterização dos agregados miúdos reciclados, que foi realizada por pesquisadores do mesmo grupo de pesquisa da autora (GESEC).

A ACBC é a mesma utilizada e caracterizada por Moretti (2018) e o LETA é o mesmo utilizado e caracterizado por Sales; Souza (2009).

Primeiramente, para fins de comparação visual com o agregado natural, pode-se observar a ABCB, a areia e o LETA na Figura 17.

Figura 17 - Areia de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (esquerda), areia fina (centro) e lodo de estação de tratamento de água (direita)



Fonte: autora

Visualmente, os agregados reciclados são distintos em cor, mas são similares em textura, já que a granulometria é similar quando comparados à areia fina natural.

3.1.1.1 Areia de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (ACBC)

A denominação areia de cinza de bagaço de cana-de-açúcar foi dada por Almeida (2013), na ocasião em que observou grande quantidade de areia, proveniente da lavoura de cana-de-açúcar, incorporada à cinza. Ademais, a ACBC é proveniente do fundo das caldeiras da usina sucroalcooleira, portanto, é uma cinza pesada, diferente da cinza volante recuperada das chaminés das usinas.

Na Figura 18 observa-se a CBC disposta na usina de Jaú, onde foi coletada em 2014, para iniciar os trabalhos de Moretti (2014) e Moretti (2018), momento em que a autora era aluna de iniciação científica e participou da coleta.

Figura 18 - Cinza de bagaço de cana-de-açúcar coletada na usina de Jaú



Fonte: autora

Essa denominação continuou a ser utilizada pelo GESEC, especialmente após o estudo realizado por Moretti (2018), no qual a autora verificou a composição química de amostras de ACBC N (in natura) e ACBC 240 (moída por 240 minutos em um moinho de bolas) por espectroscopia de fluorescência de raios-X (FXS). Observa-se que todas as amostras de ACBC apresentaram elevado teor de SiO_2 ($\geq 91,3\%$) e baixa perda ao fogo ($\leq 1,30\%$). Amostras moídas por menor período foram analisadas também, além de uma amostra com moagem micrométrica, entretanto, a autora optou pela moagem a 240 min, por ser a melhor composição cristalina encontrada com menos recursos técnicos e financeiros despendidos. Dessa forma, neste trabalho, sempre que se menciona ACBC, refere-se à ACBC moída por 240 min.

Tabela 9 - Composição química da ACBC in natura e após 240 min de moagem

Elementos	ACBC N (%)	ACBC 240 (%)
SiO₂	94,6	91,3
CaO	0,3	0,4
Fe₂O₃	2,9	3,0
SO₃	0,1	-
K₂O	0,5	0,5
TiO₂	0,9	0,9
MgO	-	0,2
Al₂O₃	-	2,3
Cr₂O₃	-	0,1
MnO	-	0,1
Perda ao Fogo	0,34	1,30

Fonte: Moretti (2018)

Aliado a isso, foi realizada uma XRD, a fim de identificar as fases cristalinas da ACBC. Com isso, foi possível observar que a ACBC apresenta 96% de quartzo em sua composição. A ACBC também apresentou 31,8% de material amorfo e, portanto, 68,2% de material cristalino.

Segundo Moretti (2018), a análise termogravimétrica realizada na ACBC revelou uma transição a 100 °C, relativa à perda de água. A segunda transição foi observada entre 200 e 375 °C, que pode estar associada à decomposição de compostos orgânicos da cinza (hemicelulose, celulose, lignina). Outra transição foi observada à transformação do quartzo de alfa para beta (entre 573 e 870 °C). Por fim, observou-se uma perda de massa a partir de 700 °C, que pode estar associada à transformação da magnetita em hematita na oxidação do ferro.

Ambos os resultados, da XRD e da análise termogravimétrica, corroboram com a hipótese de que a ACBC é essencialmente formada por quartzo, sendo sua massa estável ao ser aquecida até 1000 °C.

Uma característica importante de ser mencionada neste trabalho é o pH da ACBC em relação ao pH das areias naturais (Tabela 10). Segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004), Moretti (2018) classificou a ACBC em resíduo não corrosivo, pois os valores de pH encontrados encontram-se entre o limite estipulado pela norma (entre

2 e 12,5). Nota-se que a ACBC N e a ACBC 240 apresentam pH meio básico e as areias, meio ácido.

Tabela 10 - pH de amostras de ACBC e das areias

Amostra	pH	Slope do eletrodo (%)	Coefficiente de variação	Desvio padrão (%)
ACBC N	8,7	93,0	0,2	2,8
ACBC 240	9,2	94,4	0,0	0,1
Areia fina	4,9	93,9	0,3	5,4
Areia media	5,7	93,9	0,1	0,9

Fonte: Moretti (2018)

Moretti (2018) avaliou a atividade pozolânica da ACBC pelos métodos de Chapelle modificado, índice de atividade pozolânica com cal e com cimento Portland. Pelo método do Chapelle modificado, a ACBC apresentou baixo consumo de cal (132 mg Ca(OH)_2) quando comparado ao consumo mínimo de cal exigido para metacaulim (700 mg Ca(OH)_2). Entretanto, esse ensaio foi decisivo para a escolha da ACBC moída a 240 min pela autora, pois mostrou que quanto mais tempo de moagem, ou seja, quanto menor o tamanho dos grãos de ACBC, maior a reatividade desse material. A ACBC N apresentou consumo de 36 mg de Ca(OH)_2 . Embora a atividade pozolânica da ACBC 240 não chegue ao mínimo necessário, existe uma atividade que pode minimamente colaborar com a densificação da matriz com incorporação desse resíduo.

O índice de atividade pozolânica da ACBC com a cal foi de 0,39 MPa (6,5% em relação do mínimo necessário) e com o cimento Portland foi de 28,47 MPa (55% em relação ao mínimo necessário). Na avaliação de Moretti (2018), a autora também observou que o aumento do tempo de moagem fez aumentar a atividade pozolânica da ACBC, entretanto, como também não foram alcançados os índices mínimos necessários para que o material fosse caracterizado como pozolânico, a incorporação da ACBC é feita em relação ao agregado natural miúdo.

3.1.1.2 Lodo de estação de tratamento de água (LETA)

O LETA utilizado neste trabalho foi coletado na ETA da cidade de São Carlos em 2015, ocasião em que a autora atuava como aluna de iniciação científica em conjunto com outros participantes do GESEC. A coleta foi realizada em dia de limpeza

dos decantadores da ETA, que tem capacidade de tratar 500 l/s de água bruta captada do Ribeirão do Feijão, córrego do Monjolinho e córrego Santa Maria do Leme.

A fotografia da Figura 19 foi obtida no dia da coleta do LETA e, nela, observam os decantadores da ETA da cidade de São Carlos. O sistema de tratamento de água é o tradicional, com etapas de floculação, sedimentação e filtração, com coagulante de sulfato de alumínio.

Figura 19 - Decantadores onde o LETA é depositado na ETA de São Carlos



Fonte: autora

A maior parte dos resíduos produzidos pelas ETA do Brasil é o lodo retido nos decantadores. Normalmente esse lodo é descarregado em córregos no próprio município em que a ETA está instalada, como é o caso da ETA de São Carlos. Conforme relatou Souza (2006), o lodo produzido na ETA de São Carlos é despejado no córrego do Monjolinho, um descarte inadequado do resíduo.

O lodo é composto por matéria orgânica e inorgânica em estados sólido, líquido e gasoso, com composição variável em relação a suas características físicas, químicas e biológicas. A disposição irregular desse resíduo pode promover mudanças significativas para o ambiente, especialmente considerando que o Brasil possui cerca de 7500 ETA (ACHON; BARROSO; CORDEIRO, 2013). Com produção de mais de

1500 m³ de LETA por ano, a disposição correta desse resíduo é um desafio para os gerentes da ETA da cidade de São Carlos.

Ao ser detectada a necessidade de limpeza dos decantadores da ETA de São Carlos, o mais sujo dos três decantadores da estação é desativado e os outros dois permanecem em funcionamento. Dessa maneira, foi possível coletar o lodo e levar ao Laboratório de materiais e componentes (LMC), onde o material foi preparado para ser utilizado como agregado.

O lodo foi deixado em repouso em badejas metálicas e deixado ao ar livre por conter grande quantidade de água. À temperatura ambiente, o lodo passou por um processo de pré-secagem por 48 h. Em seguida, foi completamente seco em estufa a 110 °C por 24 h para, então, ser moído até que seus grãos atingissem a dimensão máxima característica de 2,36 mm.

As características físico-químicas do LETA da ETA de São Carlos foram obtidas por Cordeiro (2001) e constam na Tabela 11.

Tabela 11 - Características físico-químicas do LETA de São Carlos disponibilizadas por Cordeiro (2001)

Concentração de sólidos (%)	4,68
pH	7,20
Demanda química por oxigênio (mg/l)	4800
Sólidos totais (mg/L)	58,630
Sólidos suspensos (mg/L)	26,520
Sólidos dissolvidos (mg/L)	32,110
Al (mg/L)	2,16
Zn (mg/L)	4,25
Pb (mg/L)	1,60
Cd (mg/L)	0,02

Nota: segundo Cordeiro (2001), não faz sentido determinar a turbidez e a cor em lodo concentrado.

Na época da coleta do LETA utilizado nesta pesquisa, não foi possível realizar a caracterização física e química do material. Entretanto, a caracterização feita por Cordeiro (2001) é de um LETA coletado na mesma ETA que o material utilizado nesta

pesquisa. Especialmente, por se tratar de uma pesquisa sobre corrosão de armaduras, o pH é um parâmetro importante e foi medido novamente com o material utilizado neste trabalho, conforme exposto no capítulo 4.

3.2 Nomenclatura das amostras

A Tabela 12 traz a nomenclatura das amostras conforme cada traço utilizado. A saber: REF-cc é o compósito cimentício de referência; REF-a-cc é o aço moldado no interior do REF-cc; REF-s é a SPC de referência; REF-a-s é o eletrodo de trabalho de aço imerso na REF-s. A mesma lógica foi utilizada para as amostras com incorporação de ACBC e LETA.

Tabela 12 - Nomenclatura das amostras conforme cada traço utilizado

Amostra	Compósito cimentício	Aço no compósito cimentício	SPC	Aço na SPC
Referência	REF-cc	REF-a-cc	REF-s	REF-a-s
Com ACBC	ACBC-cc	ACBC-a-cc	ACBC-s	ACBC-a-s
Com LETA	LETA-cc	LETA-a-cc	LETA-s	LETA-a-s

Essa nomenclatura foi elaborada para facilitar o entendimento quando as amostras foram referenciadas ao longo do texto.

3.3 Preparação da solução de poros de concreto simulada

Com base na revisão da literatura, como muitos autores relataram não conseguirem reproduzir fielmente a solução presente nos poros de uma estrutura de concreto armado por meio de síntese de soluções, optou-se, nesta pesquisa, por simular a solução de poros do concreto com os próprios materiais constituintes dos traços de concreto deste estudo. Os traços utilizados de concreto foram: um traço de referência (REF, concreto convencional), um traço contendo o teor ótimo de ACBC estabelecido por Moretti (2018) (30% em massa de substituição de areia natural por ACBC) e um traço contendo o teor ótimo de LETA estabelecido por Sales; Souza (2009) (3% em massa de substituição de areia natural por LETA). Entretanto, não foi utilizado o mesmo teor água/cimento, pois não seria possível obter quantidade significativa de solução. Para isso, foi adotado o teor de material seco:água igual a

3:10 (PACEWSKA *et al.*, 2002), limitando a quantidade de água a 250 ml, pois observou-se que quantidades maiores de água não possibilitaram uma boa agitação da mistura. O método de obtenção das SPC aqui descrito foi o mesmo utilizado por Gromboni *et al.* (2020), trabalho do qual a autora participou. Na Tabela 13 está apresentado o quantitativo de materiais utilizados para produção das SPC.

Tabela 13 - Quantidade de materiais utilizados para produção das soluções de poros de concreto simuladas

Traço	Água deionizada (ml)	Cimento (g)	Areia média (g)	Areia fina (g)	ACBC (g)	LETA (g)
REF	250	18,7500	30,9375	25,313	-	-
ACBC	250	18,7500	30,9375	17,8125	7,6825	-
LETA	250	18,7500	30,9375	24,5536	-	0,7594

O procedimento de obtenção das soluções é o mesmo para os três tipos de SPC e constam abaixo:

- 1) Pesagem do material seco;
- 2) Mistura do material seco com 250 ml de água deionizada através de um agitador eletromagnético por 24 h;
- 3) Filtragem a vácuo da solução para separação do material inerte;
- 4) Caracterização da solução através de medida de pH e condutividade;
- 5) Condicionamento das soluções em recipientes fechados.

Como exemplo, na Figura 20 pode ser observada a SPC durante a agitação eletromagnética em um béquer de plástico de 600 ml. Foi necessária a utilização de béquer de plástico pois soluções altamente alcalinas, como é o caso da SPC, atacam o vidro. No caso de produção de solução agressiva, após o procedimento anterior, é adicionada a quantidade de reagente agressivo necessária, misturada à solução manualmente e filtrada novamente. A solução foi caracterizada medindo seu pH e sua condutividade, pois esses parâmetros mudam após a adição de agentes agressivos. Na Figura 21 pode ser observada uma SPC contendo 3,5% de NaCl sendo filtrada a vácuo.

Figura 20 - Solução de poros de concreto simulada durante agitação eletromagnética



Figura 21 - Filtragem de solução de poros de concreto simulada contendo 3,5% de NaCl



Fonte: autora

Após a preparação de todas as soluções, estas foram armazenadas e identificadas em recipientes de plástico para não serem confundidas, uma vez que todas têm aparência similar (transparente) após a filtragem.

3.4 Preparação dos eletrodos e da célula eletroquímica

Para a produção dos WE de aço CA-60, uma barra de aço CA-60 de 5 mm foi limpa conforme a normalização americana G1-03 (ASTM INTERNATIONAL, 2011). A limpeza foi realizada em uma solução decapante de hexametenotetramina 3,5 g/l em uma mistura de HCl:H₂O 1:1 v/v, durante 10 min. Em seguida, as barras foram lavadas com água deionizada, para a retirada da solução decapante, e imersas em acetona por dois minutos. Após este processo as barras foram secas com um soprador térmico. Os aços foram, então, embutidos em resina epóxi transparente fornecida pela POLIPOX (resina RL-3028 e catalisador EL-3041), que foi deixada curando por 24 h. Após esse período, foram cortados três pedaços de aço embutidos de aproximadamente 3 cm. A superfície do aço foi lixada e foi feito um contato elétrico por meio de soldagem de uma haste de latão. Essa haste foi, então, protegida com resina isolante impermeabilizante (QUIMATIC TAPMATIC). A face exposta do aço foi

lixada com lixas de carbeto de granulometrias 120, 240, 400, 600, 1200, 1500 e 2000. Antes de toda medida eletroquímica o WE foi lixado na lixa 2000. Na Figura 22 pode ser observado o WE finalizado.

Figura 22 - Eletrodo de trabalho confeccionado de aço CA-60



Fonte: autora

Foram utilizados dois RE: um de $\text{Hg}/\text{HgO}|\text{KOH}_{(\text{aq.})}$ (Figura 23a) para medidas de passivação (alta alcalinidade) e um SCE para medidas em SPC com agentes agressivos (menor alcalinidade), que pode ser observado na Figura 23b. A montagem dos eletrodos foi feita conforme exposto no item 2.2. O CE utilizado foi uma chapa de platina de aproximadamente 2 mm x 5 mm.

Figura 23 - Eletrodo de Hg/HgO (a) e SCE (b) confeccionados



Fonte: autora

A célula eletroquímica também teve de ser confeccionada com recipiente plástico, devido ao ataque alcalino proporcionado pela SPC no vidro, material comumente utilizado para confecção de células eletroquímicas. Na tampa da célula foram feitos quatro furos, para serem alocados o RE, o WE, o CE e a mangueira pra deaeração da solução com gás nitrogênio. Aproximadamente 30 ml de SPC foi o

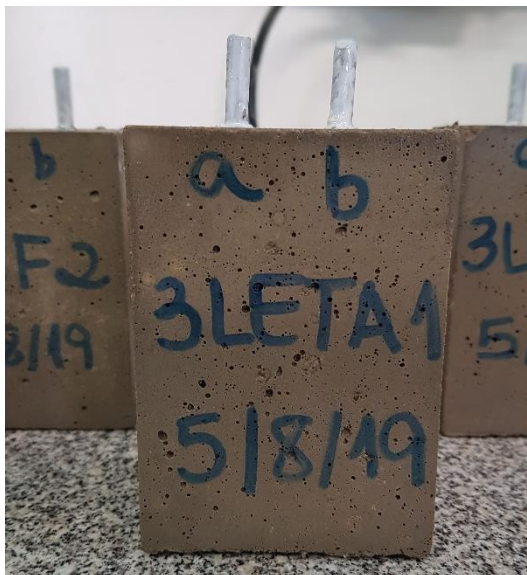
suficiente para realizar cada uma das análises dentro da célula eletroquímica. Ao final de cada medida, a solução foi descartada e a célula foi higienizada e seca.

3.5 Corpos de prova de compósitos cimentícios

Também foram moldadas amostras de compósitos cimentícios com armadura dos traços estudados. Para isso, os vergalhões de aço CA-60 foram cortados em barras de 10 cm cada uma e limpas conforme a norma americana G1-03 (ASTM INTERNATIONAL, 2017). Uma área de 4 cm (altura) x 5 mm (diâmetro) no meio das barras foi deixada exposta para sofrer oxidação e o restante foi isolado com fita isolante líquida.

Em seguida, o compósito cimentício foi moldado conforme a sequência de mistura estabelecida por Moretti (2018). Ao final da moldagem, as amostras foram acondicionadas em câmara seca a $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ por 24 h, quando os CPs foram então desmoldados, ficando conforme o exemplo da Figura 24.

Figura 24 - Corpo de prova de compósito cimentício de LETA com armadura



Fonte: autora

Após a preparação das amostras, estas foram imersas totalmente em solução saturada de Ca(OH)_2 .

3.5.1 Propriedades físicas e mecânicas dos compósitos cimentícios com agregados reciclados

Neste item serão apresentadas as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos cimentícios com incorporação de ACBC e LETA, pois essas características podem interferir ou estar relacionadas ao comportamento desses compósitos frente à corrosão de armaduras.

Os traços REF-cc e ACBC-cc (30% de substituição em massa de areia fina natural por ACBC) foram dosados por Moretti (2018). Embora a porcentagem de LETA incorporado no traço LETA-cc (3% de substituição em massa de areia natural fina por LETA) seja a estabelecida por Sales; Souza (2009), optou-se por utilizar o mesmo traço dosado por Moretti (2018) para moldagem dos corpos de prova, conforme consta na Tabela 14.

Tabela 14 - Traços unitários dos compósitos cimentícios utilizados nesta pesquisa

Traços	Cimento	Areia fina	Areia média	ACBC	LETA	Relação a/c
REF-cc*	1,000	1,350	1,650	0,000	0,000	0,550
ACBC-cc*	1,000	0,946	1,650	0,413	0,000	0,550
LETA-cc**	1,000	1,310	1,650	0,000	0,041	0,550

Fonte: *Moretti (2018) e **Sales; Souza (2009)

Observam-se na Tabela 15 as propriedades físicas dos compósitos cimentícios sem incorporação e com incorporação de ACBC e LETA.

Tabela 15 - Propriedades físicas dos compósitos cimentícios utilizados nesta pesquisa

Traço	Absorção de água			Índice de vazios			Massa específica		
	Valor médio (%)	DP ^a (%)	CV ^b (%)	Valor médio (%)	DP ^a (%)	CV ^b (%)	Valor médio (g/cm ³)	SD ^a (%)	CV ^b (%)
REF-cc*	5,00	0,3	6	11,90	0,6	5	2,37	0,17	0
ACBC-cc*	5,00	0,2	4	11,90	0,4	3	2,35	0,11	0
LETA-cc**	5,09	0,2	3	11,99	0,3	3	2,36	0,0	0

^a Desvio padrão; ^b Coeficiente de variação

Fonte: *Moretti (2018) e **Sales; Souza (2009)

Quanto à absorção de água, LETA-cc apresenta absorção de água 1,8% maior, portanto, similar à encontrada para REF-cc e ACBC-cc. Ching *et al.* (2021) observaram o mesmo comportamento em concreto substituindo cimento Portland por 2-8% de LETA e, quanto maior a quantidade de LETA, maior a absorção de água e a porosidade do compósito cimentício. Analogamente, a razão entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra de concreto (índice de vazios) para o LETA-cc é 2,6% menor que as outras amostras. Em relação à massa específica, os compósitos cimentícios com ACBC e LETA apresentaram um valor médio menor que o REF-cc, embora muito próximo. Não foi analisado por Sales; Souza (2009) e por Moretti (2018) se essa diferença é estatisticamente significativa. Se for, possivelmente a diferença ocorreu porque ACBC e LETA atuaram como fíler, compactando melhor o compósito cimentício.

Tabela 16 – Resistência à compressão dos compósitos cimentícios aos 28 dias utilizados neste trabalho

Traço	Resistência à compressão		
	Valor médio (MPa)	DPa (%)	CVb (%)
REF-cc*	45,75	1,0	2
ACBC-cc*	45,68	1,7	3
LETA-cc**	26,50***	0.7	3

^a Desvio padrão; ^b Coeficiente de variação

***Nota: a resistência à compressão de LETA-cc foi obtida por Sales; Souza (2009) na dosagem que os autores utilizaram em sua pesquisa, não na dosagem utilizada por Moretti (2018) e que foi utilizada nesta pesquisa.

Fonte: *Moretti (2018) e **Sales; Souza (2009)

Observa-se que a resistência à compressão de ACBC-cc e REF-cc é praticamente a mesma (menos de 1% de diferença no valor médio). Entretanto, a resistência à compressão de LETA-cc é consideravelmente mais baixa, embora não seja possível a comparação direta com os outros traços já que a dosagem desse compósito cimentício não é a mesma.

3.6 Métodos

Neste item serão expostos os métodos que serão utilizados para avaliar a corrosão de armaduras.

3.6.1 Armadura em solução de poros de concreto simulada alcalina e contaminada com cloreto e carbonatos

As SPC foram sempre utilizadas filtradas na célula eletroquímica, para que os sobrenadantes não interferissem na polarização do aço. Além disso, o WE foi lixado ao final de cada medição antes de ser iniciada uma nova medição.

Para avaliar a corrosão do aço imerso em SPC, primeiramente a célula eletroquímica foi montada com inserção da SPC, do WE, do RE (Hg/HgO/KOH 1 mol/l em meio alcalino e SCE em meio contaminado com cloreto e carbonatos) e do CE (rede de platina), além das mangueiras de entrada de N₂ e saída de ar. O sistema foi conectado a um potenciostato/ galvanostato Autolab-PGSTAT20 com módulo FRA32 acoplado. Em seguida, a célula foi colocada em uma gaiola de Faraday, conforme a Figura 25. O ambiente permaneceu a 23 °C durante todas as medidas.

Figura 25 - Célula eletroquímica utilizada inserida na gaiola de Faraday



Fonte: autora

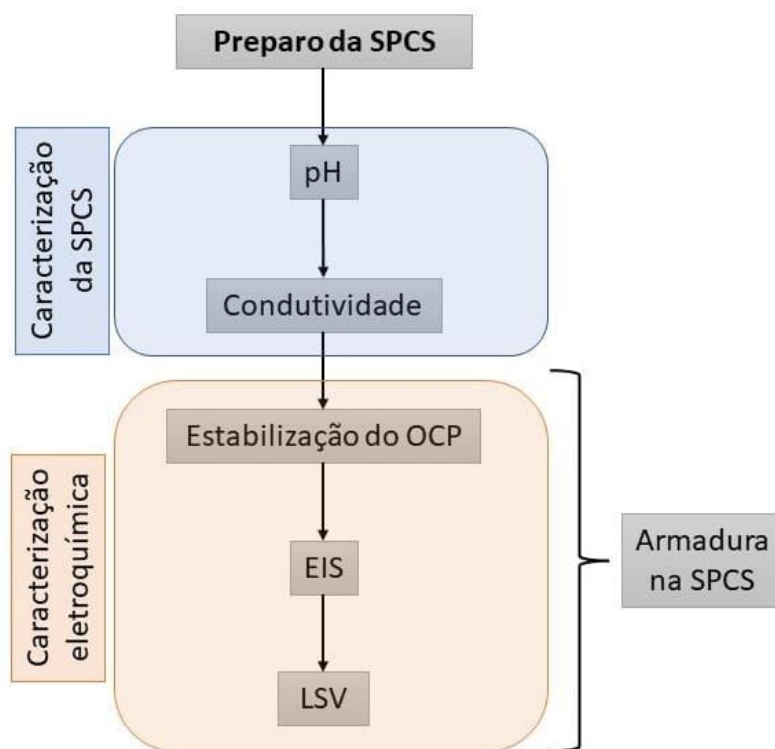
Após o fechamento da gaiola de Faraday, foi deixado o OCP se estabilizar por 1 h, precedendo a medida de EIS, que se iniciou automaticamente após esse período. Para a EIS, a amplitude adotada foi a de 10 mV, entre 10 kHz e 10 mHz, com seis

pontos por década. Finalizada essa medida, iniciou-se a LSV de -800 mV a 1000 mV *versus* o OCP com velocidade de 0,15 mV/s. Esse procedimento foi adotado para todas as preparações de SPC, para que fosse possível comparar os resultados obtidos ao final da pesquisa.

A caracterização *ex-situ* dos WE foi realizada para as diferentes amostras com imagens de MEV com EDS da superfície do eletrodo após estabilização do OCP no tempo necessário para passivação do eletrodo, de modo a permitir a observação da superfície de óxidos formada no WE.

O programa experimental acima descrito foi sintetizado no esquema da Figura 26 para facilitar o entendimento.

Figura 26 - Programa experimental para as amostras de aço em SPC



Fonte: autora

Devido à pandemia de Covid-19, o programa experimental desta pesquisa foi interrompido em março de 2020. Devido a isso e à vastidão de condições possíveis de contaminação das soluções por carbonatos e cloretos, optou-se por seguir um

planejamento experimental (DoE), adotado conforme a literatura (ANTONY, 2003; BEG *et al.*, 2019). Ademais, o DoE permite observar relações de causa e efeito entre os fatores observados.

Neste trabalho, foi escolhido um planejamento fatorial de 2^2 (ANTONY, 2003b). Os fatores avaliados foram a contaminação das soluções por NaCl e por carbonato e bicarbonato de sódio e dois níveis de cada fator foi testado. A faixa de cada condição foi escolhida com base na literatura e as condições experimentais estudadas estão apresentadas na Tabela 17.

Tabela 17 - Condições experimentais estudadas no planejamento fatorial para corrosão de aço

Contaminantes	Experimento	Nível baixo	Nível alto	Referência
Carbonatos	A	0%	NaHCO ₃ 0,03 mol.l ⁻¹ e Na ₂ CO ₃ 0,0015 mol.l ⁻¹	Moreno <i>et al.</i> (2004)
NaCl	B	0%	3,5 p.% (0,6 mol.l ⁻¹)	ASTM C876 (ASTM INTERNATIONAL, 2016)

Nesse caso, foram feitos experimentos nas condições explicitadas na Tabela 18. O experimento A, é para a SPC contaminada com carbonato e bicarbonato de sódio e o B, com cloreto de sódio, ambos na concentração já mencionada anteriormente. O sinal negativo (-) representa o nível baixo de valores, ou seja, a condição em que não há contaminantes na SPC. O sinal positivo (+), por outro lado, representa a situação de nível alto, ou seja, condição em que há 100% do conteúdo de contaminantes (nas concentrações mencionadas). (0) é a condição do ponto central, quando os contaminantes são adicionados pela metade da concentração proposta. Outras combinações são explicadas na Tabela 18.

Tabela 18 - Condições experimentais do planejamento fatorial desta pesquisa

Experimento A (carbonato e bicarbonato de sódio)	Experimento B (cloreto de sódio)	Observação
-	-	SPC sem contaminantes
+	-	SPC + NaHCO ₃ 0,03 mol.l ⁻¹ and Na ₂ CO ₃ 0,0015 mol.l ⁻¹
-	+	SPC + 3,5% NaCl
+	+	SPC + NaHCO ₃ 0,03 mol.l ⁻¹ and Na ₂ CO ₃ 0,0015 mol.l ⁻¹ + 3,5% NaCl
0	0	SPC + NaHCO ₃ 0,0075 mol.l ⁻¹ and Na ₂ CO ₃ 0,0015 mol.l ⁻¹ + 1,75% NaCl
0	0	“
0	0	“

Todas as condições foram feitas em triplicata e cada SPC foi caracterizada conforme o procedimento experimental mencionado anteriormente.

3.6.2 Armadura em compósitos cimentícios em meio alcalino e em meio de cloreto

As amostras de compósitos cimentícios foram avaliadas utilizando o mesmo potenciostato mencionado no item 3.6.1. Uma célula eletroquímica foi montada com um béquer de plástico de capacidade de 600 ml, com a amostra dentro e imersa em solução saturada de Ca(OH)₂, o RE (mesmos utilizados em SPC) inserido em um furo feito entre as armaduras de WE e o CE cilíndrico de titânio ao redor, similar à célula da Figura 27.

Figura 27 - Célula eletroquímica montada com amostra de compósito cimentício, RE, WE e CE na solução alcalina



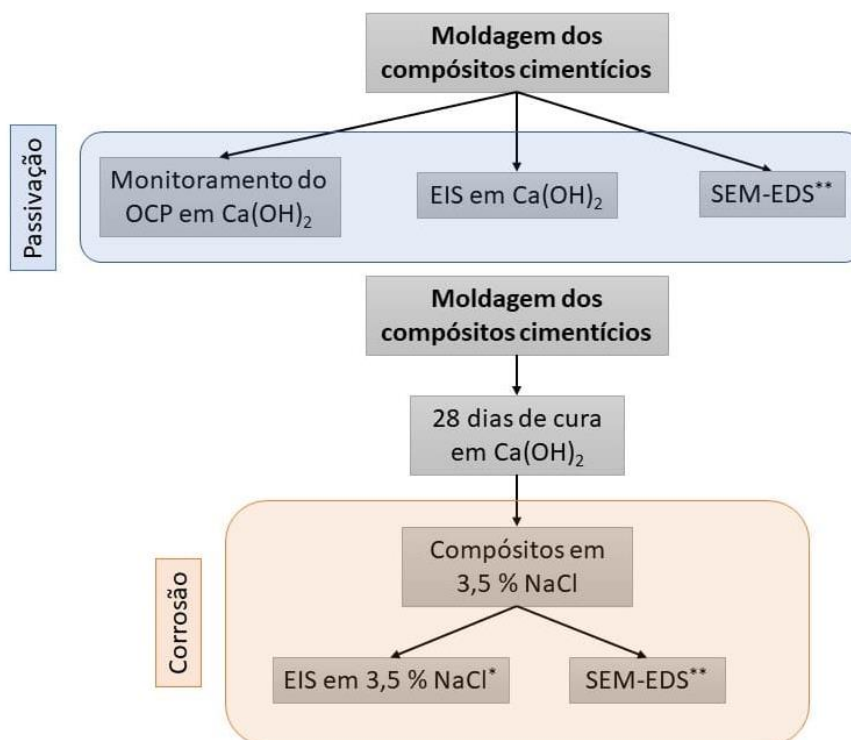
Fonte: Rezende (2019)

Os compósitos cimentícios foram avaliados pelo monitoramento do OCP e do potencial de corrosão, pela EIS e por variação de massa. Em alguns casos, essa avaliação já havia sido realizada pelo GESEC, casos em que foi mencionado o referido trabalho e incluídos os resultados nesta tese a fim de auxiliarem a alcançarem os objetivos da presente pesquisa.

Na Figura 28 está apresentado um esquema que sintetiza o programa experimental para as amostras de compósitos cimentícios. O OCP das amostras foi monitorado por 20 dias consecutivos na solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, com auxílio de uma placa acoplada a um circuito em Arduíno®. EIS foi executada no OCP entre 100 kHz e 10 mHz de frequência, com amplitude 10 mV e seis pontos por década. Os espectros de EIS tanto para SPC quanto para compósitos cimentícios foram tratados utilizando o *software* Nova 2.1.4. Em solução alcalina, foram obtidos espectros entre um e 24 dias de idade das amostras. Em solução contaminada com cloretos, entre um e 191 dias de imersão em solução de 3,5% NaCl para as amostras REF-a-cc e ACBC-

a-cc. Por fim, foi realizada caracterização da superfície do aço com SEM-EDS para as amostras REF-a-cc e ACBC-a-cc e apenas SEM para as amostras LETA-cc.

Figura 28 - Programa experimental para a armadura em compósitos cimentícios



* Não foi possível realizar nos compósitos cimentícios com LETA

** Nos compósitos cimentícios com LETA foi possível realizar SEM sem EDS

Fonte: autora.

Como não foi possível realizar EIS em LETA-a-cc, uma avaliação do potencial de corrosão feita pelos preceitos da norma americana C876 (ASTM INTERNATIONAL, 2016) foi apresentada. Esses ensaios foram realizados pela autora, em conjunto com seu grupo de pesquisa (GESEC), na ocasião de sua iniciação científica, em 2015.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos na presente pesquisa, bem como as análises necessárias. Primeiramente, foram apresentados os resultados de avaliação de corrosão de armaduras em SPC, explorando separadamente as análises em REF-s, ACBC-s e LETA-s, seguido de um comparativo entre elas. Depois, os resultados da avaliação de corrosão de armaduras em compósitos cimentícios foram apresentados, separando os resultados entre um comparativo de REF-cc e ACBC-cc e, em seguida, REF-cc e LETA-cc, também seguidos de uma comparação entre os resultados.

4.1 Armadura em solução de poros de concreto simuladas

Após a preparação e filtragem das SPC, estas foram caracterizadas quanto ao pH e à condutividade elétrica. Foram necessárias sete preparações de REF-s, oito de ACBC-s e duas de LETA-s, de 250 ml cada. O motivo da maior quantidade de ACBC-s e REF-s é que estas amostras foram preparadas para execução de testes de filtragem e medidas preliminares para adequar a célula eletroquímica aos experimentos pretendidos. Salienta-se que, embora sejam usados apenas 30 ml de solução para cada medida, muitas vezes as soluções tiveram de ser descartadas por falhas experimentais, como medidas fora do padrão ou variação da rede elétrica do laboratório (ruído). Além disso, após cada medição a solução foi descartada para colocação de nova solução na célula e execução de novas medições.

Os resultados de pH e condutividade das amostras encontram-se na Tabela 19. Observa-se, a respeito dos valores obtidos de pH, que as médias são similares: 12,60 para as REF-s, 12,27 para as ACBC-s e 12,26 para as LETA-s, de forma que se espera que essas diferenças não sejam significativas para distinguir o comportamento da armadura imersa nos três tipos de solução.

Tabela 19 - Caracterização (pH e condutividade) das soluções de poros simuladas

Experimento A (carbonato e bicarbonato de sódio)	Experimento B (cloreto de sódio)	pH			Condutividade (mS/cm)		
		REF-s	ACBC-s	LETA-s	REF-s	ACBC-s	LETA-s
-	-	12,6	12,3	12,5	12,86	16,79	16,39
+	-	12,2	12,1	12,2	9,79	45,00	8,23
-	+	12,6	11,9	12,5	242,50	47,67	55,00
+	+	12,3	11,5	11,8	*	50,00	72,00
0	0	12,1	12,1	12,4	*	56,50	35,00
0	0	12,4	12,2	12,4	*	56,50	35,00
0	0	12,3	12,2	12,4	*	56,50	35,00

*Alta variação do valor de condutividade apresentado no condutímetro

O pH de uma solução contendo apenas ACBC e outra contendo apenas LETA foi medido. Nesse caso, observou-se que o pH da solução de ACBC foi 9,2 (MORETTI, 2018) e da solução de LETA, 6,46. Portanto, observa-se que o pH de uma solução de cimento, cerca de 12,5 pela literatura (MEHTA; MONTEIRO, 2014), predomina e ACBC-s e LETA-s não são, em termos de pH, influenciadas pela presença dos resíduos. Isso ocorre porque os pH observado nas soluções sem contaminantes de REF-s, ACBC-s e LETA-s são de 12,6, 12,3 e 12,5, respectivamente (Tabela 19). Ou seja, não houve grande variação de pH com a incorporação dos resíduos.

Os resultados obtidos de pH foram similares aos de Gromboni *et al.* (2020), os quais utilizaram os mesmos materiais para execução de REF-s e ACBC-s. Outros autores, que utilizaram soluções de cimento Portland ordinário para avaliar a corrosão de armaduras em SPC, obtiveram valores semelhantes: Jiang *et al.* (2012) com SPC de a/c = 100 obtiveram pH de 12,72 e Peng *et al.* (2018) com SPC de a/c = 0,44 (filtrada a vácuo logo após amassamento de pasta de cimento) obtiveram pH de 12,5. Já Liu *et al.* (2014) com SPC de a/c = 10 obtiveram pH de 12,95; Shaheen; Pradhan (2016) obtiveram pH de 13,4.

O valor de pH é uma medida muito sensível às condições ambientais (BARD; FAULKNER, 2001), o que dificulta a garantia de que a variação de pH em SPC seja causada por diferentes composições de cimento. Ademais, não foi possível monitorar

se ocorreram variações do pH das SPC ao longo das medidas eletroquímicas realizadas, o que também poderia ocasionar diferentes comportamentos das espécies eletroquímicas.

Importante notar que as soluções carbonatadas não apresentaram pH pouco alcalino, como era desejado. Como mencionado no capítulo 2 do presente trabalho, no processo de carbonatação do concreto armado, o pH da solução de poros diminui para cerca de 9, o que acarretaria na quebra do filme passivador da armadura, propiciando o início da corrosão. Entretanto, para todas as soluções carbonatadas, o pH variou de 11,5 a 12,6. Infelizmente, devido a limitações de agenda no período pandêmico do Laboratório Interdisciplinar de Eletroquímica e Cerâmica, que, gentilmente, autorizou a realização de alguns ensaios para essa pesquisa, não foi possível refazer as soluções de poros carbonatadas para tentar novas maneiras de diminuição do pH das soluções. Essa limitação, porém, foi levada em consideração nas análises dos resultados desta pesquisa.

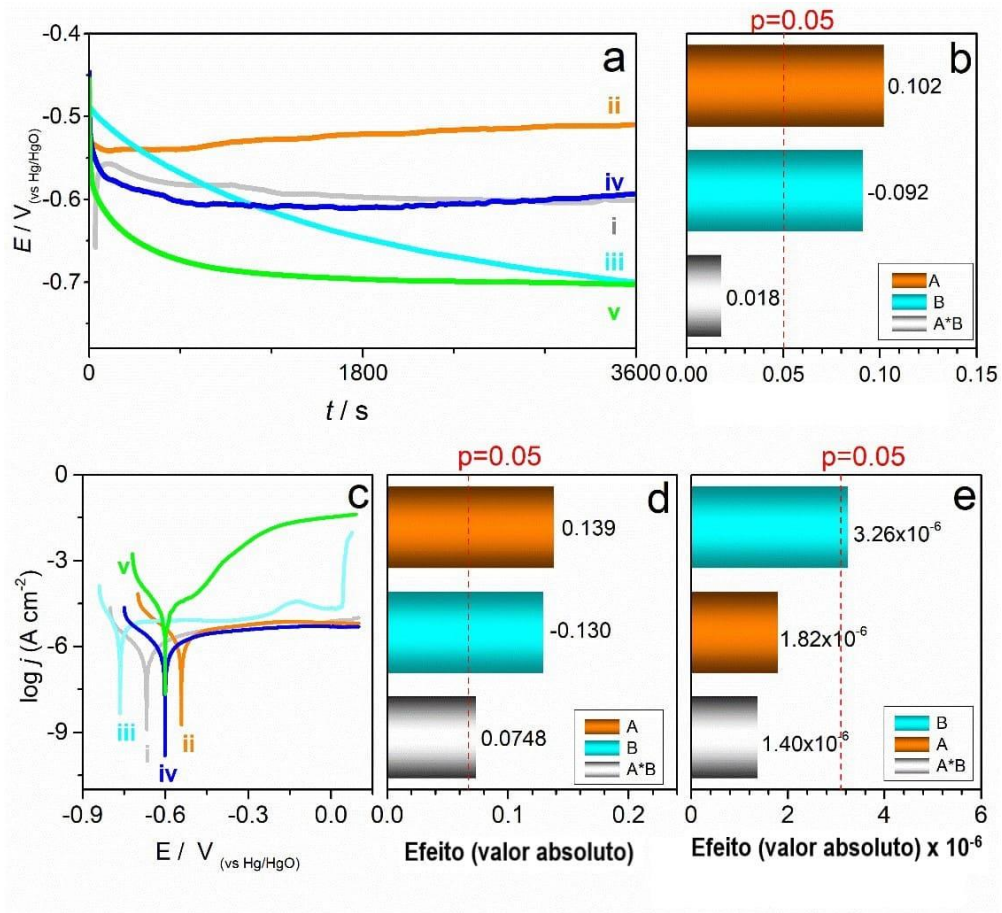
Em relação aos valores obtidos de condutividade elétrica, observou-se que apresentaram grande variação no período de medição. Em algumas situações, conforme observado na Tabela 19, não foi possível anotar um valor de condutividade, pois a variação no equipamento era grande. Poucos autores na literatura expuseram medidas de condutividade elétrica de SPC. Dentre os autores que avaliaram a corrosão de armaduras em SPC feitas diretamente com cimento, apenas Shaheen; Pradhan (2016) mediram a condutividade elétrica dessa solução. No caso, os pesquisadores obtiveram o valor de 5,5 mS/cm, aproximadamente metade dos valores obtidos na presente pesquisa, comparando as soluções brancas. O que é evidente nos valores obtidos neste trabalho é o aumento da condutividade com a adição de NaCl, carbonato e bicarbonato de sódio. Certamente, esse fator influencia no processo corrosivo, que será explicado adiante, pois o aumento da condutividade acarreta na maior movimentação iônica na solução, auxiliando o processo de oxidação do aço.

4.1.1 Armadura no meio de referência

Neste item serão apresentados os resultados experimentais para REF-s após realizada a rotina de planejamento fatorial.

O OCP das armaduras em REF-s está representado no gráfico da Figura 29a. O valor de OCP apresentou baixa variação, indicando boa estabilização durante o período avaliado. O OCP adotado nos experimentos foi o último valor registrado (após 3600 s/ 1 h). Todas as medidas de OCP estão apresentadas na Tabela 20. Para REF-s o valor de OCP foi de $(-0,61 \pm 0,06)$ V. A adição de carbonato e bicarbonato de sódio promoveu um aumento no valor do OCP, de $(-0,59 \pm 0,10)$ V, enquanto a presença de cloreto de sódio promoveu o efeito contrário, uma queda no valor do OCP $(-0,68 \pm 0,03)$ V. Esse resultado é esperado, já que os efeitos da presença de carbonatos e de cloretos nas soluções de poros do concreto são distintos, produzidos por mecanismos diferentes.

Figura 29 - a) Monitoramento do OCP, b) Gráficos de Pareto para resultados de OCP; c) curvas LSV a 1 mV.s-1, d) Gráficos de Pareto para E_{corr} e e) Gráficos de Pareto para J_{corr} . Soluções: i) REF-s; ii) REF-s + carbonatos; iii) REF-s + NaCl; iv) REF-s + carbonato + NaCl máxima concentração e, v) condição central REF-s + carbonato + NaCl. Experimento A: Presença de CO_2 , Experimento B: Presença de cloretos; Experimento A*B: interação CO_2 e cloretos.



Fonte: autora

O efeito mais esperado da presença de CO_2 é a mudança no pH da solução de poros do concreto. De acordo com a Tabela 19, a acidificação da REF-s com carbonatos não foi muito expressiva. De acordo com o diagrama de Pourbaix (~ 0,75 V vs. NHE), nesta faixa de variação, o HCO_3^- está disponível (INABA; KIMURA; YOKOKAWA, 1996), o que afeta a formação do filme passivador no aço.

Tabela 20 - Valores de potencial de circuito aberto, potencial de corrosão e densidade de corrente de corrosão (J_{cor}) para REF-s.

Solução	Concentração de carbonatos	Concentração de NaCl	REF-s		
			OCP / V	E_{cor} / V	J_{cor} / $\mu\text{A cm}^{-2}$
i	-	-	$-0,61 \pm 0,06$	$-0,62 \pm 0,05$	$0,34 \pm 0,01$
ii	NaHCO_3 0,03 mol/l e Na_2CO_3 0,0015 mol L ⁻¹	-	$-0,59 \pm 0,10$	$-0,54 \pm 0,01$	$0,76 \pm 0,18$
iii	-	3,5 p.%	$-0,68 \pm 0,03$	$-0,81 \pm 0,05$	$2,21 \pm 0,01$
iv	NaHCO_3 0,03 mol/l e Na_2CO_3 0,0015 mol/l	3,5 p.%	$-0,62 \pm 0,05$	$-0,58 \pm 0,02$	$5,40 \pm 3,60$
v	NaHCO_3 0,015 mol/l e Na_2CO_3 0,00075 mol/l	1,75 p.%	$-0,65 \pm 0,08$	$-0,62 \pm 0,06$	$0,36 \pm 0,04$

Os cloretos não afetaram o pH de REF-s, mas podem afetar a formação do filme passivador, inclusive promovendo a quebra desse filme. Neste caso, pelo contrário, o diagrama de Pourbaix estima que, para um pH de 12,1 (presença de cloretos), promove-se a formação de $\text{Fe}(\text{OH})_2$, favorecendo a passivação do aço (REFAIT; ABDELMOULA; GÉNIN, 1998).

Algo interessante aconteceu quando carbonatos e cloretos foram misturados: para a concentração máxima estudada, a média de valor de OCP foi próxima à da REF-s. O mesmo ocorreu para a solução de média concentração (ponto central), embora o valor de OCP tenha sido ligeiramente menor, próximo à situação com presença de carbonatos.

Para entender como carbonatos, cloretos e sua mistura afeta o OCP, o gráfico de Pareto foi apresentado na Figura 29b. Este gráfico representa o teste de estatística-t para cada componente avaliado e o resultado de sua interação. A barra horizontal é proporcional ao efeito padronizado, estimado pela razão de erro padrão. A linha vertical auxilia no julgamento dos efeitos que são estatisticamente significativos. Qualquer barra que ultrapasse a linha vertical corresponde a um efeito significativo de nível de confiança de 95%. Tradicionalmente, o gráfico de Pareto apresenta os componentes em ordem decrescente de importância, mas para facilitar a leitura, as cores das barras foram mantidas as mesmas neste trabalho (para todos os gráficos de Pareto): laranja para o efeito do CO_2 , ciano para o efeito de cloretos e cinza para

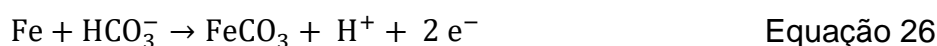
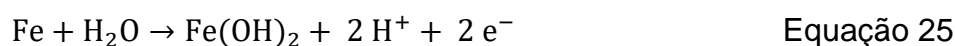
a mistura dos componentes. Foi interessante observar que os efeitos de carbonatos e do cloreto estão muito próximos dos valores normalizados, mas possuem sinais opostos. O sinal positivo indica um aumento do valor com o aumento da concentração do componente, enquanto o valor negativo, um aumento do valor com a diminuição da concentração do componente. Portanto, a presença de carbonato/ bicarbonato acarretou um aumento no OCP enquanto o cloreto acarretou uma diminuição. Mas a mistura destes não teve um efeito significativo no valor do OCP. A literatura indica que, em pH muito alcalinos, como foi o caso dessas amostras, mesmo em altas concentrações de NaCl (> 10%), o filme passivador se mantém no aço imerso em SPC (MAMMOLITI *et al.*, 1996).

Outra forma de avaliar os parâmetros da corrosão é pela análise de LSV no OCP, como ilustrado na Figura 29c. Como explicado no capítulo 3, por esse gráfico, são obtidos o E_{cor} e a J_{cor} , cujos valores estão expostos na Tabela 20.

Como observado na Figura 29d, um aumento do conteúdo de carbonato/ bicarbonato acarreta um aumento no E_{cor} e o oposto ocorre com o aumento do conteúdo de cloretos. O mesmo comportamento é relatado na literatura (MORENO *et al.*, 2004; ANWAR *et al.*, 2017). É claro que o carbonato/ bicarbonato, cloretos e sua mistura são significativos na análise do E_{cor} , mesmo que o efeito seja oposto, o que é esperado pois esses agentes agressivos atuam de formas distintas promovendo a corrosão de armaduras. Como a adição de carbonato/ bicarbonato e a adição da mistura de carbonato/ bicarbonato e cloretos promove o aumento do E_{cor} , fica evidente que o carbonato/ bicarbonato influenciam mais que os cloretos. De fato, como pode ser observado na Tabela 19, o pH não cai consideravelmente para a mistura (12,6 para 12,3). Outra relação interessante é que quando se avalia a J_{cor} (Figura 29e), apenas a adição de cloretos apresenta uma variação estatisticamente significativa. Apesar do aumento do E_{cor} causado pela presença de carbonato/ bicarbonato, isso não afetou a densidade de corrente no material.

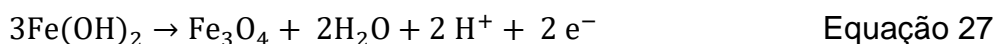
Os resultados obtidos em REF-s permitem afirmar que, para um mesmo conteúdo de carbonato/ bicarbonato e pH constante, o comportamento perante à corrosão do aço varia com a concentração de íons. A taxa de corrosão instantânea e os valores de E_{cor} medidos na solução contendo altos níveis de carbonato/ bicarbonato sugeriram que uma película passiva protetora foi formada na superfície do metal no potencial de corrosão livre.

Alguns pesquisadores relataram um aumento na estabilidade do filme passivo de Fe^{3+} no aço com o aumento da concentração de carbonato/ bicarbonato. Estudos com curvas potenciométricas mostraram a ocorrência de dois processos possíveis na superfície do aço: a formação de camada pseudopassiva de $Fe(OH)_2$ (Equação 25) e/ ou $FeCO_3$ (Equação 26) (MORENO *et al.*, 2004):

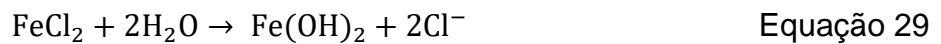


Para baixas concentrações de HCO_3^- , o filme de $FeCO_3$ pode ser obtido pela saturação local de Fe^{2+} e CO_3^{2-} . O $FeCO_3$ atua como um filme pseudopassivo e seu poder protetor está relacionado à concentração de carbonato/ bicarbonato no meio. Nas concentrações estudadas, observou-se que o equilíbrio foi mantido e o filme de $FeCO_3$ atua de forma protetora ao aço, pois atua na alteração do E_{cor} , mas não na sua J_{corr} .

O filme pseudopassivo pode levar à formação do filme passivador aumentando o potencial varrido (maior que 0,1 V vs. NHE), segundo Moreno *et al.*, 2004, como pode ser observado na Equação 27.



A presença de íons cloreto também provoca uma variação de potencial no eletrodo. Isso é comumente observado na literatura: a presença de Cl^- promove um aumento da corrosão do aço e até mesmo dos produtos da oxidação do aço pela presença de cloretos alimentam a corrosão, como pode ser observado pelas Equação 28, Equação 29 e Equação 30 (RIBEIRO *et al.*, 2018).



Muitos autores relatam que a presença de cloretos faz com que o aço esteja mais suscetível à corrosão em meio básico, não apenas causada pela degradação do filme passivador, mas pelas mudanças na composição e estrutura do filme passivo, que favorecem a dissolução desse filme.

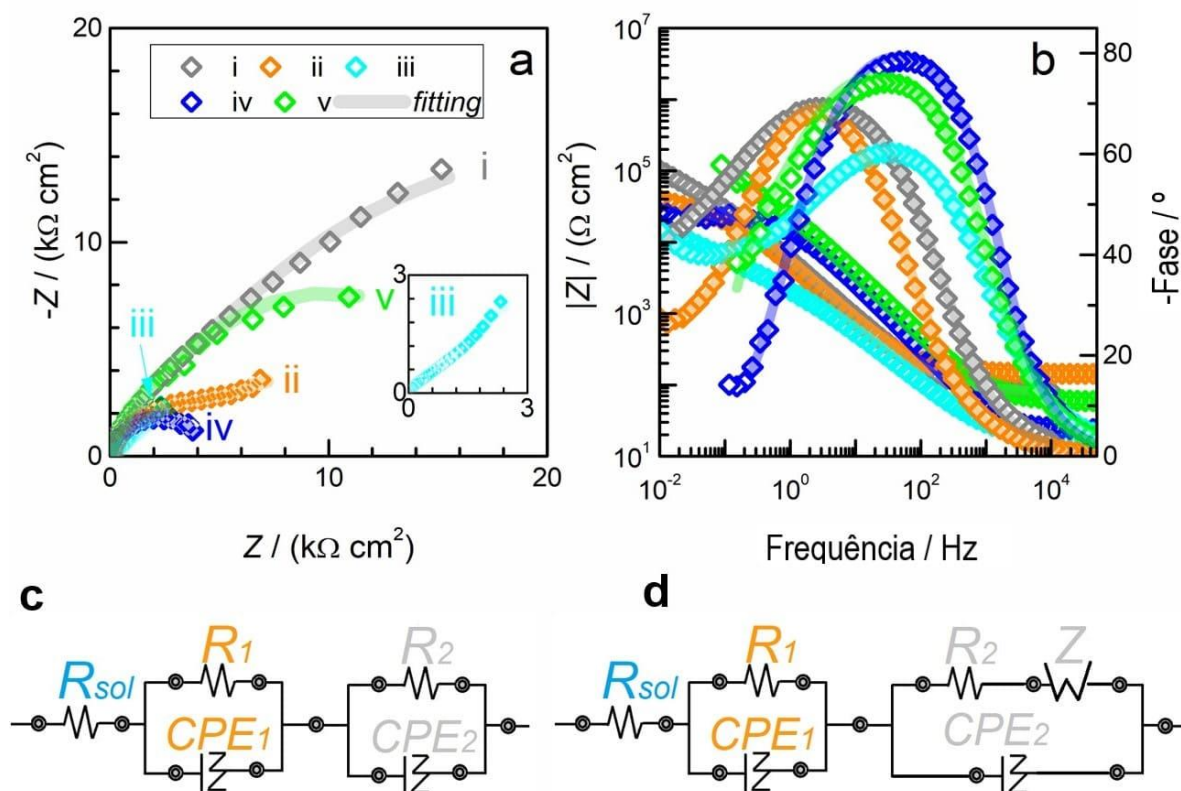
A concentração de íons cloro também é muito significativa no processo, pois a corrosão por pites é diferente em soluções concentradas e diluídas. Para soluções diluídas, o início do processo de formação de pites ocorre por uma quebra localizada no filme passivo de uma superfície metálica. Em solução concentrada de cloretos, o processo de pite não se limita à superfície passivada do metal, podendo levar à corrosão generalizada (MORENO *et al.*, 2004). Os dados apresentados corroboram com a literatura, pois maiores concentrações de cloreto promoveram maiores taxas de corrosão.

Para o aço carbono em REF-s com carbonato/ bicarbonato, o filme óxido é a camada pseudopassiva de $\text{Fe}(\text{OH})_2$ e/ ou FeCO_3 formada na superfície do metal em potenciais inferiores a 0,1 V (MORENO *et al.*, 2004). Conforme observado, a mistura do meio resultou em aumento no E_{cor} , mas não impactou na J_{cor} , indicando que o aço está passivado no intervalo do estudo.

Para entender melhor os processos de interface, foram realizadas medições EIS em cada meio na REF-s. No gráfico de Nyquist (Figura 30a), os raios dos semicírculos estão correlacionados com a resistência do sistema elétrico: quanto maior o raio, menos corrosivo é o meio. Assim, observa-se que todas as modificações (adição de cloreto, carbonatos e sua mistura) promovem um aumento de corrosividade. No gráfico de Bode (Figura 30b), as mudanças do módulo de impedância são analisadas com o ângulo de fase, o que auxilia na observação dos componentes elétricos do sistema, como a junção R-CPE (Resistência – Elemento de fase constante)

representada por um pico até ângulos próximos a 90°C, ou elementos de difusão, representados por linhas retas próximas a 45°C. Juntando as informações dos dois gráficos, é possível aproximar o sistema eletroquímico de um circuito elétrico e tentar correlacionar os elementos do circuito com os fenômenos de interface solução|aço.

Figura 30 - a) Diagrama de Nyquist e b) Gráficos de Bode i) REF-s; ii) REF-s + carbonatos; iii) REF-s + NaCl; iv) REF-s + carbonato + NaCl máxima concentração e, v) condição central REF-s + carbonato + NaCl; c) Circuito equivalente para ajuste das medidas de EIS para soluções i, ii, iv e v. d) Circuito equivalente para ajuste das medidas do EIS para a solução iii.



Fonte: autora

O modelo de circuito equivalente obtido para quase todas as condições é apresentado na Figura 30c. Em altas frequências ($> 10^6$ Hz), existe uma resistência de solução (R_{sol}). Nas frequências médias (10^2 Hz a 10^6 Hz), o processo de transferência de carga é representado por uma resistência (R_1) e uma

pseudocapacitância (CPE_1) correlacionadas ao filme protetor formado. Em baixas frequências (10^{-3} Hz a 10 Hz), é identificado outro sistema R_2 - CPE_2 , associado à interface filme/eletrólito, onde ocorre o fenômeno da corrosão. Para quase todos os meios (i, ii, iv e v – ver legenda da Figura 30), esta representação do circuito representou os processos observados. Na Tabela 21 estão apresentados todos os valores para cada elemento elétrico. A resistência do filme apresentou maior valor para a condição de presença apenas de carbonato/ bicarbonato ($1347 \Omega \cdot \text{cm}^2$). Na presença de cloreto, o valor de R_1 reduziu significativamente para $386 \Omega \cdot \text{cm}^2$. Algo interessante aconteceu quando os dois componentes foram misturados: para a concentração máxima de ambos (cloreto e bicarbonato/ carbonato), R_1 apresentou o valor de $329 \Omega \cdot \text{cm}^2$ - próximo ao valor de REF-s apenas com cloretos. Isso indica que a presença de cloretos afeta a formação do filme passivador, como pode-se observar pela Equação 25. Esse efeito é ainda mais pronunciado no ponto médio das contrações, no qual R_1 apresentou o menor valor. Provavelmente a concentração de carbonato/ bicarbonato não foi capaz de formar um filme resistivo, impactado pela presença de cloretos. Em relação à resistência à corrosão R_2 , observa-se que, para esta concentração intermediária (solução iv), apresentou maior proteção. Algo a ser notado é o papel positivo dos carbonatos na proteção da armadura. Conforme discutido, a presença de cloretos apresenta um efeito negativo de íons promovendo uma grande diminuição na resistência, principalmente para concentrações superiores a 1,75 p.%. Para meio com 3,5 p.% de cloreto, outro elemento elétrico é necessário para descrever o sistema: a difusão de Warburg, representada por Z (Figura 30d). Esse comportamento aparece quando há baixa locomoção de íons no filme, ou alguma força de transporte iônico, como difusão, migração ou uma combinação de ambos (MEYER *et al.*, 2022).

Tabela 21 - Parâmetros obtidos a partir do tratamento de dados de EIS obtidos no OCP para a REF-s e suas modificações, utilizando o circuito equivalente com modelo de duas constantes de tempo (2T), representado nas Figura 30c e Figura 30d

Sol.	Concent. de carbonatos	Concent. de NaCl	R_{sol} ($\Omega.cm^2$)	R_1 ($\Omega.cm^2$)	CPE_1 ($mF.cm^{-2}$) ^a	R_2 ($\Omega.cm^2$)	CPE_2 ($mF.cm^{-2}$) ^a	Z_W ($\mu\Omega.cm^2$)	χ^2
i	-	-	16	3143	0,45	40564	0,80	-	$1,31 \times 10^{-2}$
ii	NaHCO ₃ 0,03 mol/l and Na ₂ CO ₃ 0,0015 mol/l	-	26	1347	1,31	8600	3,22	-	$2,05 \times 10^{-2}$
iii	-	3,5 p. %	3	386	1,15	135	0,23	48	$6,41 \times 10^{-3}$
iv	NaHCO ₃ 0,03 mol/l and Na ₂ CO ₃ 0,0015 mol/l	3,5 p. %	5	329	0,14	3957	0,05	-	$7,59 \times 10^{-2}$
v	NaHCO ₃ 0,015 mol/l and Na ₂ CO ₃ 0,00075 mol/l	1,75 p. %	9	60	0,64	29474	2,28	-	$2,1 \times 10^{-2}$

Zhang *et al.* (2020) avaliaram a interação de CO₂ e íons cloreto na corrosão de aço carbono. Eles observaram os mesmos produtos de corrosão nas superfícies de aço (FeCO₃) para todas as razões Cl⁻/CO₂, mas diferenças significativas nas morfologias dos filmes. A presença de cloreto reduz a concentração de CO₂ dissolvido, impactando na formação de filmes porosos de FeCO₃. Eles explicaram que a interação de CO₂ e cloretos favorece a corrosão localizada, porque a área coberta pelo FeCO₃ atua como um cátodo, enquanto a superfície exposta às soluções atua como o ânodo e a transferência de massa entre os pites de corrosão formados e as soluções é facilitada.

No meio REF-s, o comportamento descrito na literatura foi confirmado. Pode-se observar o efeito benéfico do carbonato e bicarbonato, que aumenta a resistência à corrosão, mas que, em meio clorídrico, essa proteção pode ser prejudicada.

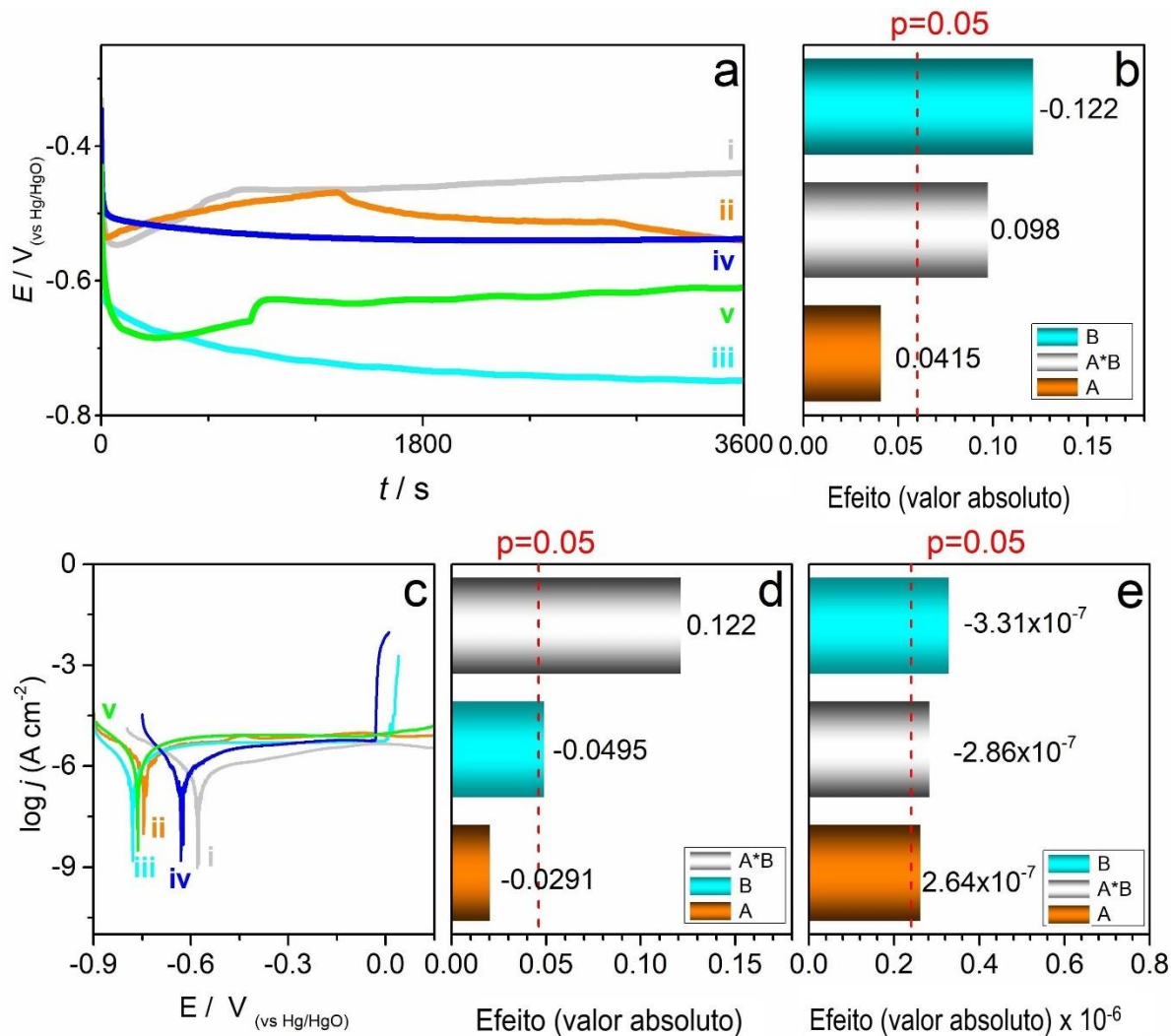
4.1.2 Armadura no meio contendo ACBC

A Figura 31a e a Figura 31b apresentam as curvas de monitoramento de OCP e gráficos de Pareto para valores de OCP em ACBC-s. A ACBC-s pura apresenta $(-0,50 \pm 0,05)$ V de valor médio de OCP (Tabela 22) e pH de 12,3. A adição de carbonato e bicarbonato e a adição de ambos contaminantes em máxima concentração promoveram uma pequena variação do valor médio de OCP, de $(-0,51 \pm 0,07)$ V (pH de 12,1) e $(-0,52 \pm 0,09)$ V (pH de 11,5), respectivamente. Na condição do ponto central, houve diminuição do valor de OCP $(-0,59 \pm 0,06)$ V e, no meio apenas com adição de cloretos, o valor do meio OCP atingiu o menor potencial $(-0,63 \pm 0,09)$ V. Diferente de REF-s, o gráfico de Pareto (Figura 31b) mostra que a presença de cloreto afeta mais significativamente os valores de OCP: quanto maior a concentração de Cl⁻, menor o OCP. De fato, este é um comportamento esperado pela maior condutividade elétrica favorecida pela presença dos íons cloro. A presença de carbonato/bicarbonato não causou efeito estatístico significativo no OCP da ACBC-s. Em relação à presença da combinação carbonato/bicarbonato e cloretos, nota-se pelo gráfico que quanto maior a concentração da mistura, maior o OCP, o que seria um efeito benéfico no que se refere à proteção do meio ao aço. Dessa maneira, hipotetiza-se que o carbonato/bicarbonato influenciam mais na ACBC-s, já que a presença de cloretos não foi suficiente para baixar o OCP na solução da mistura de agentes agressivos.

As LSV e os gráficos de Pareto correspondentes ao E_{cor} e a J_{cor} encontram-se representados nas Figura 31c, Figura 31d e Figura 31e respectivamente. Observa-se que a mistura de carbonato/bicarbonato e cloretos influencia significativamente no valor de E_{cor} e J_{cor} , mas, curiosamente, de maneiras opostas. Ou seja, quanto maior a concentração da mistura, maior a E_{cor} e maior a J_{cor} . A presença de cloretos na ACBC-s também influencia nos dois parâmetros, de forma que, quanto maior a concentração de cloretos, menor a E_{cor} e menor a J_{cor} . Esse dado corrobora com o observado no comportamento do OCP, mostrando que realmente a armadura estará mais exposta à corrosão nesse meio. A presença de carbonato/bicarbonato na ACBC-s não teve influência significativa no E_{cor} , mas quanto maior a concentração de carbonato/

bicarbonato, maior a J_{cor} (Figura 31e), atingindo quase 2,5 vezes a J_{cor} obtida na ACBC-s pura.

Figura 31 - Monitoramento de potencial de circuito aberto, b) Gráficos de Pareto para monitoramento do OCP; c) curvas LSV a 1 mV/s, d) Gráficos de Pareto para E_{cor} e e) Gráficos de Pareto para J_{cor} . Soluções: i) ACBC-s; ii) ACBC-s + Carbonatos; iii) ACBC-s + NaCl; iv) ACBC-s + Carbonato + NaCl na máxima concentração e, v) ACBC-s + Carbonato + NaCl. Experimento A: Presença de CO_2 , Experimento B: Presença de cloreto; Experimento A*B: interação CO_2 e cloreto.



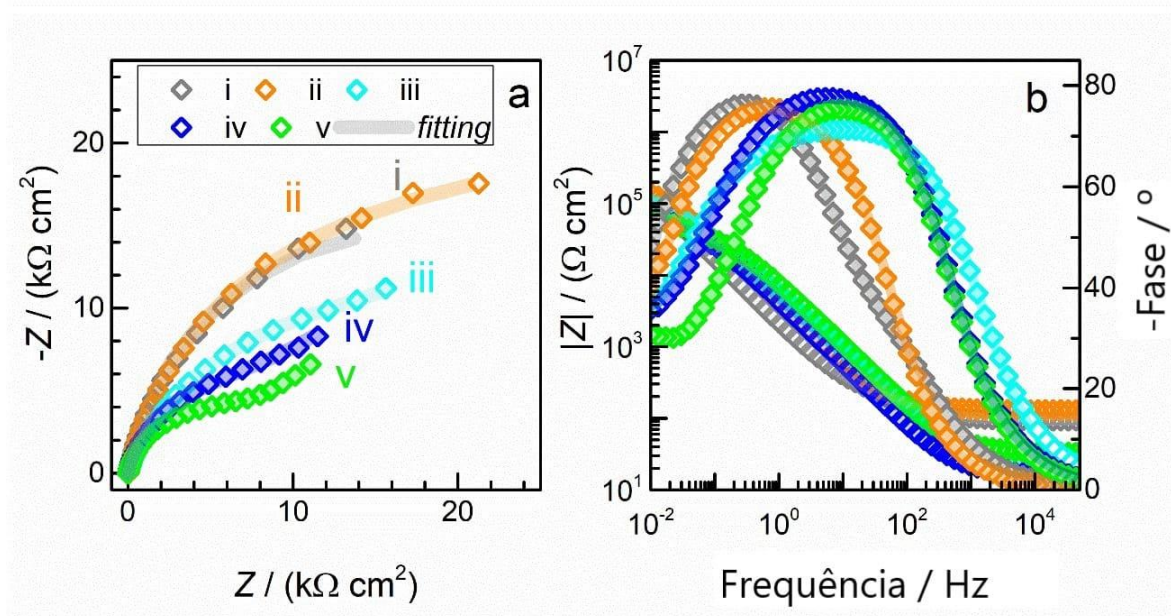
Fonte: autora

Tabela 22 - Valores de potencial de circuito aberto (OCP), potencial de corrosão (E_{cor}) e densidade de corrente de corrosão (J_{cor}) para ACBC-s e soluções derivadas em SBAS e SBAS

Solução	Concentração de carbonato e bicarbonato	Concentração de NaCl	ACBC-s		
			OCP / V	E_{cor} / V	J_{cor} / $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$
i	-	-	$-0,50 \pm 0,05$	$-0,57 \pm 0,01$	$0,38 \pm 0,05$
ii	NaHCO_3 0,03 mol/l e Na_2CO_3 0,0015 mol/l	-	$-0,51 \pm 0,07$	$-0,729 \pm 0,02$	$0,93 \pm 0,06$
iii	-	3,5 p.%	$-0,63 \pm 0,08$	$-0,717 \pm 0,05$	$0,33 \pm 0,02$
iv	NaHCO_3 0,03 mol/l e Na_2CO_3 0,0015 mol/l	3,5 p.%	$-0,52 \pm 0,09$	$-0,60 \pm 0,07$	$0,31 \pm 0,05$
v	NaHCO_3 0,015 mol/l e Na_2CO_3 0,00075 mol/l	1,75 p.%	$-0,59 \pm 0,06$	$-0,73 \pm 0,01$	$0,50 \pm 0,16$

Os gráficos de Nyquist e Bode são mostrados nas Figura 32a e Figura 32b, respectivamente. O comportamento eletrônico do WE em ACBC-s pura e em condição com adição de carbonato/bicarbonato foram semelhantes. Nestas condições, o circuito $R_{sol}(R_1-CPE_1)(R_2-CPE_1)$, apresentado na Figura 30c, foi o mais adequado para representar a interface metal|eletrólito. A Tabela 23 apresenta os valores para cada elemento do circuito. Uma diferença marcante de valores foi observada em R_1-CPE_1 , que tem relação com o filme passivador. Possivelmente, um filme mais espesso de FeCO_3 se formou no aço na ACBC-s com adição de carbonato/bicarbonato. Algo interessante de se notar é que o cloreto afetou tanto os sistemas (R_1-CPE_1) quanto (R_2-CPE_1), principalmente para filmes formados no aço em misturas de CO_2 e Cl^- . No ACBC-s, a ação do cloreto é mais evidente não apenas como agente corrosivo, mas também como influenciador no processo de passivação do aço na formação do FeCO_3 . Essa interferência é tão prejudicial que o meio que continha uma mistura de CO_2 e Cl^- (iv e v) apresentou resistência menor do que o meio que continha apenas cloreto (iii – ver Tabela 23).

Figura 32 - a) Diagrama de Nyquist e b) Gráficos de Bode para i) ACBC-s; ii) ACBC-s + carbonatos; iii) ACBC-s + NaCl; iv) ACBC-s + carbonato + NaCl máxima concentração e, v) condição central ACBC-s + carbonato + NaCl.



Fonte: autora.

Tabela 23 - Parâmetros obtidos a partir do tratamento de dados de EIS obtidos no OCP para o ACBC-s e suas modificações, utilizando o circuito equivalente da Figura 30c.

Sol.	Concent. de carbonatos	Concent. de NaCl	R_{sol} ($\Omega.cm^2$)	R_1 ($\Omega.cm^2$)	CPE_1 ($mF.cm^{-2}$) ^a	R_2 ($\Omega.cm^2$)	CPE_2 ($mF.cm^{-2}$) ^a	Z_w ($\mu\Omega.cm^2$)	χ^2
i	-	-	16,1	9,4	0,16	56195	0,11	-	$5,87 \times 10^{-3}$
ii	NaHCO ₃ 0,03 mol/l and Na ₂ CO ₃ 0,0015 mol/l	-	25,3	3412,0	1,00	43304	0,91	-	$8,11 \times 10^{-3}$
iii	-	3,5 p.%	3,1	33,3	3,41	19340	0,28	16,2	$3,75 \times 10^{-3}$
iv	NaHCO ₃ 0,03 mol/l and Na ₂ CO ₃ 0,0015 mol/l	3,5 p.%	3,0	0,6	0,10	9185	0,25	16,1	$1,49 \times 10^{-3}$
v	NaHCO ₃ 0,015 mol/l and Na ₂ CO ₃ 0,00075 mol/l	1,75 p.%	6,3	0,9	0,09	7125	0,12	18,9	$1,98 \times 10^{-3}$

A partir do diagrama Nyquist é possível notar que os filmes passivos foram formados em todas as ACBC-s, mas é mais protetor ao aço em ACBC-s pura e ACBC-s + carbonato/bicarbonato. A condição do meio ACBC-s + mistura carbonato/bicarbonato e cloreto é relativamente menos protetora para o aço, mas

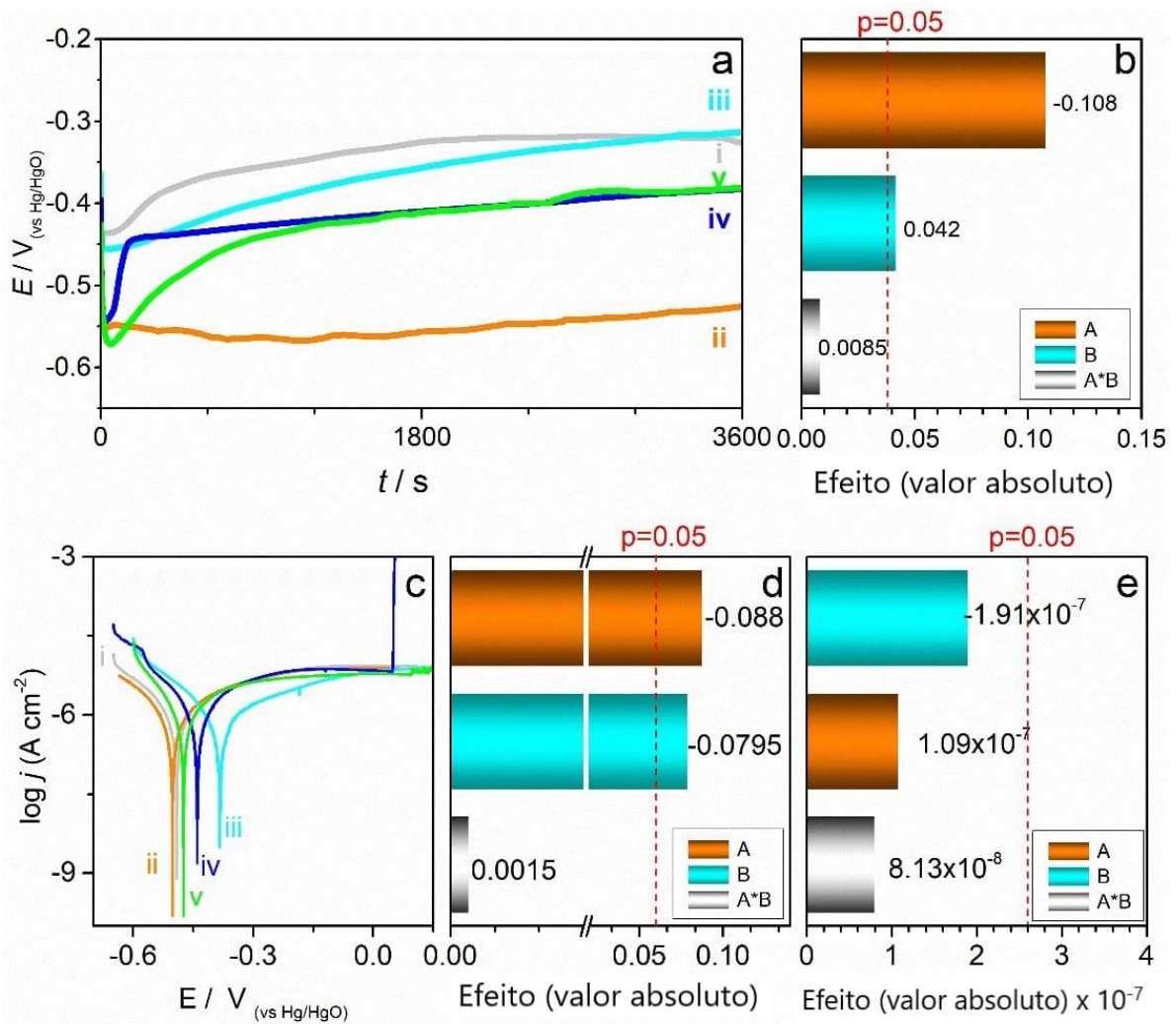
mais protetora do que a mesma condição para REF-s. Aparentemente, portanto, a adição de ACBC na solução interfere positivamente na resistência à corrosão das armaduras.

4.1.3 Armadura no meio contendo LETA

Neste item serão apresentados os resultados da análise eletroquímica em SPC com adição de LETA. A Figura 33a mostra os resultados de monitoramento do OCP. Para LETA-s pura e com adição de NaCl, os valores médios de OCP foram semelhantes: $(-0,38 \pm 0,09)$ V (Tabela 24). Valores semelhantes de OCP foram obtidos para adição de carbonato/bicarbonato e NaCl em concentrações mais altas e médias (próximo de $(-0,41 \pm 0,01)$ V, Tabela 24), enquanto o menor valor foi obtido para adição de LETA-s e carbonato/bicarbonato.

O gráfico de Pareto (Figura 33b) mostra que a presença de carbonato/bicarbonato afeta mais significativamente os valores de OCP e quanto mais concentrada desses agentes agressivos, menor o OCP, ou seja, mais suscetível à corrosão estará a armadura. O efeito estatístico da presença de cloretos existe, embora seja menor. Neste caso, curiosamente, os resultados mostraram que quanto maior a concentração de NaCl, maior o OCP. Possivelmente, isso aconteceu porque o pH dessa solução estava a 12,5, não tendo ocorrido o rompimento do filme passivador. Não foi significativo o efeito da mistura de carbonato/bicarbonato com cloretos na LETA-s.

Figura 33 – a) Monitoramento de potencial de circuito aberto, b) Gráficos de Pareto para monitoramento do OCP; c) curvas LSV a 1 mV/s, d) Gráficos de Pareto para E_{cor} e e) Gráficos de Pareto para J_{cor} . Soluções: i) LETA-s; ii) LETA-s + Carbonatos; iii) LETA-s + NaCl; iv) LETA-s + Carbonato + NaCl na máxima concentração e, v) LETA-s + Carbonato + NaCl. Experimento A: Presença de CO_2 , Experimento B: Presença de cloreto; Experimento A*B: interação CO_2 e cloreto.



Fonte: autora.

Na Figura 33c observam-se as LSV das amostras de LETA-s e as Figura 33d e Figura 33e, os gráficos de Pareto para o E_{cor} e a J_{cor} , respectivamente. Observa-se que quanto maior a concentração de carbonato/bicarbonato e quanto maior a concentração de cloretos, menor o E_{cor} , ou seja, maior o risco de corrosão nessas

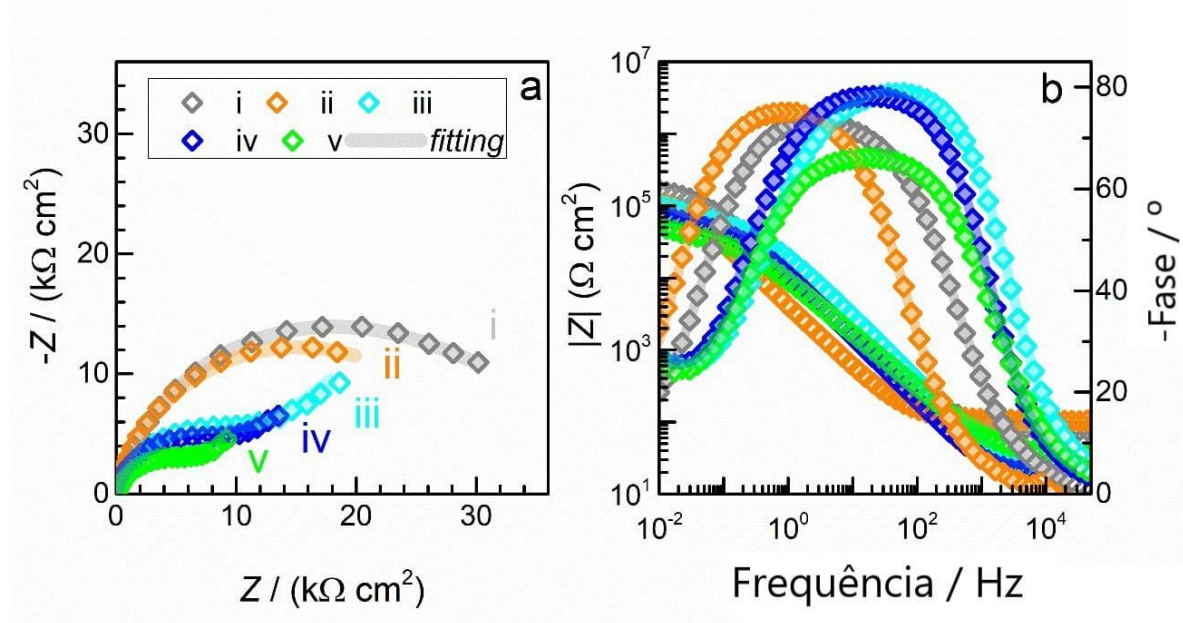
situações. Entretanto, não houve influência significativa da mistura desses componentes no E_{cor} . Ademais, não houve influência significativa de nenhuma das condições experimentais na J_{cor} , levando a considerar que a LETA-s não é um ambiente deveras agressivo para as armaduras.

Tabela 24 - Valores de potencial de circuito aberto (OCP), potencial de corrosão (E_{cor}) e densidade de corrente de corrosão (J_{cor}) para LETA-s e soluções derivadas.

Solução	Concentração de carbonato/bicarbonato	Concentração de NaCl	LETA-s		
			OCP / V	E_{cor} / V	J_{cor} / $\mu\text{A cm}^{-2}$
i	-	-	$-0,38 \pm 0,06$	$-0,43 \pm 0,06$	$0,52 \pm 0,26$
ii	NaHCO_3 0,03 mol/l e Na_2CO_3 0,0015 mol/l	-	$-0,51 \pm 0,05$	$-0,52 \pm 0,03$	$0,55 \pm 0,01$
iii	-	3,5 p.%	$-0,38 \pm 0,09$	$-0,35 \pm 0,03$	$0,25 \pm 0,01$
iv	NaHCO_3 0,03 mol/l e Na_2CO_3 0,0015 mol/l	3,5 p.%	$-0,41 \pm 0,02$	$-0,44 \pm 0,01$	$0,44 \pm 0,08$
v	NaHCO_3 0,015 mol/l e Na_2CO_3 0,00075 mol/l	1,75 p.%	$-0,42 \pm 0,03$	$-0,49 \pm 0,02$	$0,64 \pm 0,14$

Para entender melhor os fenômenos da interface aço|LETA-s e variações de LETA-s, foram realizadas medidas de EIS e os gráficos de Nyquist e Bode são apresentados na Figura 34a e Figura 34b, respectivamente. O circuito equivalente utilizado para tratar os dados foi o mesmo apresentado na Figura 30c. Neste caso, porém, a adição de carbonato/bicarbonato não alterou a resistência R_1 -CPE1, em relação ao filme, possivelmente composto por $\text{Fe}(\text{OH})_2$ e FeCO_3 . A adição de cloretos promoveu o aparecimento de um componente difusional, representado pela linha de 45° no gráfico de Nyquist (Figura 34a). Utilizando o circuito representado na Figura 30d, observa-se que a adição de cloreto promoveu redução em R_1 e R_2 . Ao avaliar a influência do cloreto e carbonato, observa-se que a corrosão é agravada, ao invés de ser minimizada, corroborando os dados obtidos para os demais meios (REF-s, ACBC-s).

Figura 34 – Diagramas de a) Nyquist e b) Bode para i) LETA-s; ii) LETA-s + Carbonatos; iii) LETA-s + NaCl; iv) LETA-s + Carbonato + NaCl na máxima concentração e, v) LETA-s + Carbonato + NaCl.



Fonte: autora.

A Tabela 25 apresenta os valores dos parâmetros obtidos a partir do tratamento de dados de EIS no OCP para cada uma das condições de LETA-s estudadas. Para essas situações, observa-se que a R_{sol} aumentou com a adição de carbonato/bicarbonato, mas a adição de cloretos, em todas as condições, fez com que a resistência da solução diminuísse. Conforme esperado, como consequência, a resistência do filme passivador (R_1) também diminuiu com a adição dos agentes agressivos, o que poderia culminar no rompimento desse filme e início do processo de corrosão na armadura.

Tabela 25 - Parâmetros obtidos a partir do tratamento de dados de EIS obtidos no OCP para o LETA-s e suas modificações, utilizando o circuito equivalente da Figura 30c e Figura 30d.

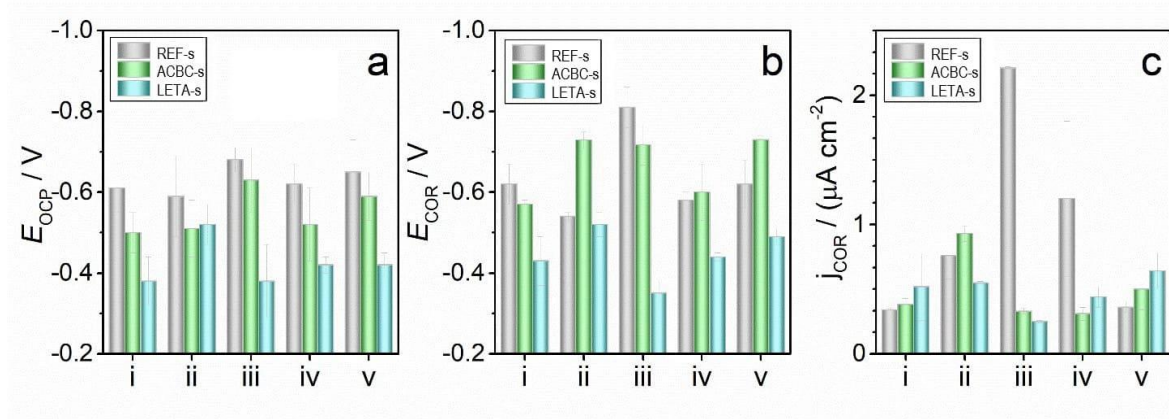
Sol.	Concent. de carbonatos	Concent. de NaCl	R_{sol} ($\Omega.cm^2$)	R_1 ($\Omega.cm^2$)	CPE_1 ($mF.cm^2$) ^{-α}	R_2 ($\Omega.cm^2$)	CPE_2 ($mF.cm^2$) ^{-α}	Z_w ($\mu\Omega.cm^2$)	χ^2
i	-	-	15,0	17565	0,92	20974	0,15		$1,68 \times 10^{-3}$
ii	NaHCO ₃ 0,03 mol/l and Na ₂ CO ₃ 0,0015 mol/l	-	19,9	14706	1,21	12099	0,16		$5,31 \times 10^{-3}$
iii	-	3,5 p.%	3,4	440,5	0,18	9254	0,07	15,1	$9,48 \times 10^{-3}$
iv	NaHCO ₃ 0,03 mol/l and Na ₂ CO ₃ 0,0015 mol/l	3,5 p.%	3,5	503,1	0,40	8344	0,09	18,8	$3,43 \times 10^{-3}$
v	NaHCO ₃ 0,015 mol/l and Na ₂ CO ₃ 0,00075 mol/l	1,75 p.%	6,7	110,1	0,23	6424	0,10	28,6	$1,43 \times 10^{-3}$

Portanto, como foram observados comportamentos distintos nas três soluções avaliadas neste trabalho (REF-s, ACBC-s e LETA-s), a comparação entre o comportamento das diversas combinações dessas soluções frente à presença de resíduos ou não, será discutida em seguida.

4.1.4 Suscetibilidade à corrosão de armaduras em REF-s, ACBC-s e LETA-s

Após a apresentação de todos os resultados dos meios, algumas discussões interessantes puderam ser traçadas sobre a comparação da corrosão das armaduras em soluções sem e com adição de resíduos ACBC e LETA. Na Figura 35 estão apresentados os valores de OCP, E_{cor} e J_{cor} para todas as soluções analisadas neste trabalho.

Figura 35 - Valores de (a) potencial de circuito aberto, (b) potencial de corrosão e (c) densidade de corrente de corrosão em REF-s, ACBC-s e LETA-s, para i) solução pura; ii) solução com carbonato/bicarbonato; iii) solução com NaCl; iv) solução com mistura em máxima concentração de carbonato/bicarbonato e NaCl e, v) solução de mistura na condição do ponto central.



Fonte: autora

Em relação ao valor de OCP nas diferentes condições, observa-se que em REF-s, a armadura sempre está em maior risco de corrosão, pois o OCP é sempre menor nessa condição. Como esperado pelo trabalho de Gromboni *et al.* (2020), a ACBC-s é um ambiente mais protetor ao aço que o ambiente de referência. Entretanto, por essa análise, LETA-s mostrou-se mais protetor ou com mesma proteção que ACBC-s em todas as condições.

Quando se observa o E_{cor} , no entanto, não é possível observar um padrão de comportamento entre as soluções. Na condição pura e na condição de adição de cloretos às soluções, REF-s apresenta um ambiente de maior probabilidade de corrosão. Entretanto, na condição de adição de carbonato/bicarbonato e na condição do ponto central, ACBC-s apresenta-se como um ambiente menor protetor ao aço quanto à corrosão. Neste contexto também, LETA-s apresentou-se como um ambiente mais protetor ao aço em todas as condições analisadas.

Quanto à J_{cor} , dentro do erro associado às medidas, não houve diferença nas soluções puras e pouca diferença nas soluções contendo carbonato/bicarbonato e contendo a mistura no ponto central. Já em relação à presença de cloretos, REF-s

mostrou-se um ambiente muito agressivo para as armaduras e não houve diferença significativa entre ACBC-s e LETA-s. Com a concentração máxima de carbonato/bicarbonato misturado com cloretos, possivelmente levada pela influência da presença de cloretos, REF-s também se mostrou um ambiente muito agressivo ao aço, também não havendo diferença significativa entre ACBC-s e LETA-s.

Uma hipótese que pode justificar essa variação nos resultados é que o filme passivador não está estabilizado no momento em que as medidas foram realizadas, pois a estabilização durou apenas 1 h e os ensaios como um todo duraram cerca de 4 h para cada solução. De acordo com Gromboni *et al.* (2020), a estabilização do filme passivante em aço em REF-s e ACBC-s pode demorar 7 e 5 dias, respectivamente, e isso pode ter causado alterações nas medidas de corrosão apresentadas neste trabalho.

Como foi mencionado, devido à pandemia, não foi possível seguir os experimentos em períodos mais longos para entender completamente o processo de formação do filme passivador e a inicialização do processo corrosivo nas armaduras. Entretanto, os resultados aqui expostos, nas condições delineadas, deixam claro que a adição de ACBC e LETA em SPC são benéficas, mantendo um ambiente mais protetor à armadura que um ambiente convencional quanto à corrosão.

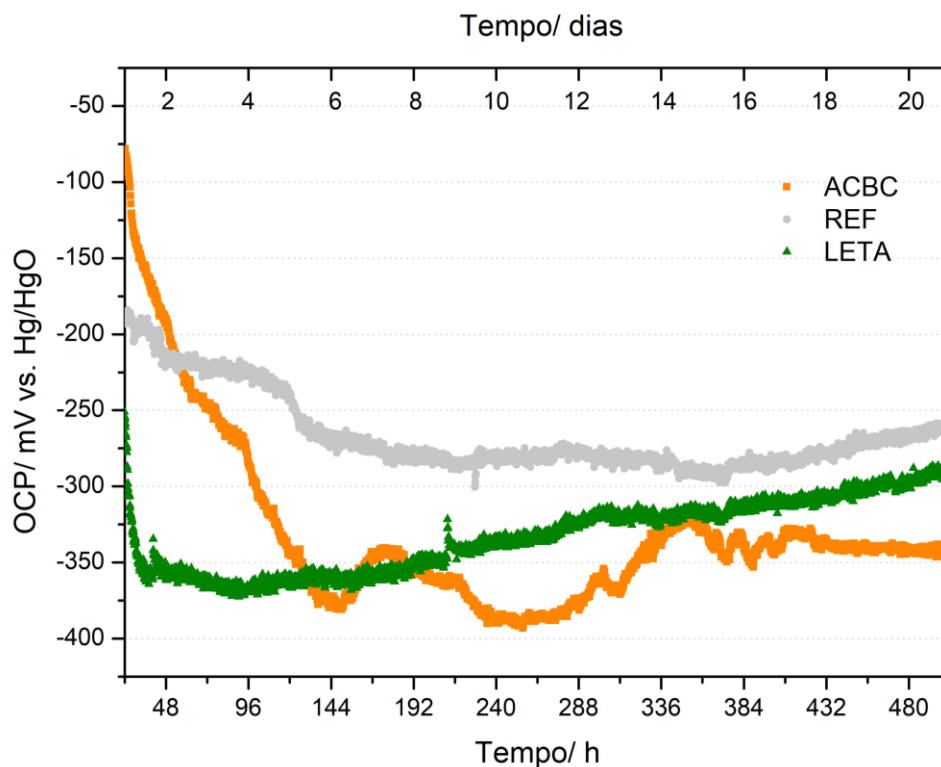
4.2 Armadura em compósitos cimentícios

Como foi mencionado no item 3.6.2, os compósitos cimentícios com amostras de CA-60 foram imersos em solução saturada de Ca(OH)_2 para serem realizadas análises eletroquímicas, já que o compósito cimentício sólido é muito resistivo. Saturando os poros do concreto, é possível realizar algumas medidas eletroquímicas nas armaduras com certa confiabilidade.

O gráfico da Figura 36 apresenta os valores da média de três medidas de OCP das armaduras dos compósitos cimentícios ao longo de 21 dias. Observa-se que, para as três amostras, o OCP iniciou-se em um patamar diferente e diminuiu antes de se estabilizar. O OCP decaindo em soluções alcalinas não indica um aumento do

processo corrosivo, mas é associado à dificuldade de transporte de massa do oxigênio em matrizes cimentícias (RIBEIRO; LABRINCHA; MORELLI, 2012; ALMEIDA *et al.*, 2019), o que, naturalmente, não ocorre quando o OCP é avaliado em WE em SPC (GROMBONI *et al.*, 2020).

Figura 36 - Potencial de circuito aberto de armaduras em compósitos cimentícios REF, ACBC e LETA



Fonte: autora.

Para REF-a-cc, o OCP se iniciou próximo à -175 mV e, pelas primeiras 138 h, apresentou um decréscimo de -2,5 mV/h, quando se observou uma pequena variação de -0,08 mV/h de 120 h a 504 h, estabilizando-se até o final da medida a uma média de -497 mV (-594,7 mV vs. NHE). O OCP de ACBC-a-cc também apresentou um grande decréscimo, no início, de -2,5 mV/h, mas nas primeiras 127 h. De 127 h a 409 h, cresceu a uma baixa taxa, de 0,14 mV/h, quando se estabilizou a aproximadamente -345 mV (-442,7 mV vs. NHE) até o final da medida. LETA-a-cc apresentou OCP inicial

de aproximadamente -250 mV, quando decaiu a -4,5 mV/h nas primeiras 24 h, chegando a -360 mV e, estabilizando-se nesse valor até cerca de 170 h. Desse momento em diante, o OCP de LETA-a-cc aumentou lentamente até o final da medida, chegando a aproximadamente -300 mV (-397,7 mV vs. NHE) a 0,17 mV/h.

Não foi possível medir exatamente o pH das soluções dos poros dos compósitos cimentícios, mas considera-se que seja similar à solução de Ca(OH)_2 saturada na qual esses compósitos foram imersos, a saber, $\text{pH} = 11,67$. Considerando esse valor de pH, os potenciais encontrados para REF-a-cc, ACBC-a-cc e LETA-a-cc e o diagrama de Pourbaix (Figura 7), ao final da medida, todas as amostras de aço encontravam-se em situação de passivação. Esse resultado é importante no âmbito da construção civil pois permite afirmar que ao final do tempo de cura do concreto, considerado como 28 dias, a armadura encontra-se passivada não somente nos compósitos cimentícios de referência, como era de se esperar, como nos compósitos cimentícios com resíduos de ACBC e LETA. Portanto, para essa avaliação, os ambientes proporcionados por esses resíduos incorporados ao concreto são protetores ao aço no período inicial após a moldagem das amostras.

Com exceção do monitoramento do OCP, as análises em compósitos cimentícios com incorporação de ACBC e LETA foram feitas em momentos distintos. Por isso, deste ponto do trabalho em diante, optou-se por apresentar os resultados de forma separada. Ao final, uma comparação entre os compósitos com resíduos será realizada, assim como foi feito para SPC.

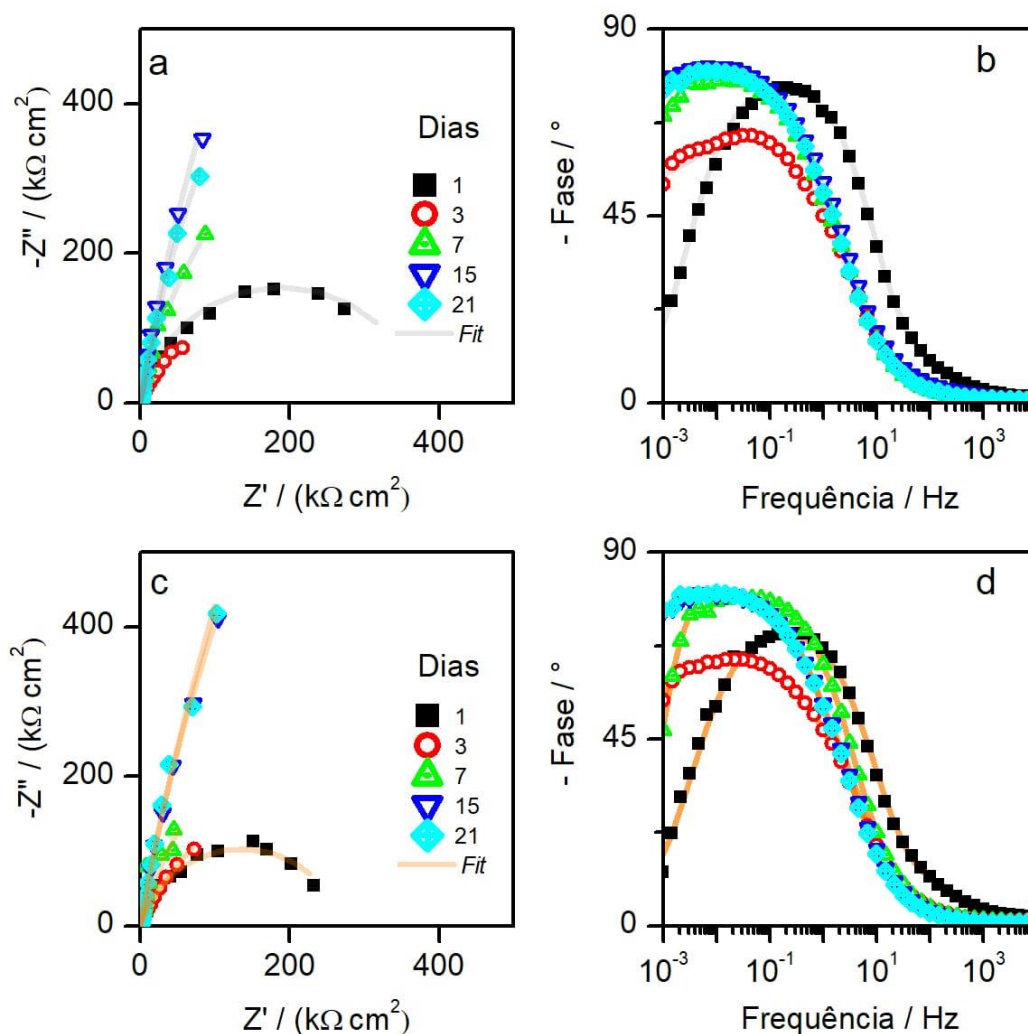
4.2.1 Armadura em compósito cimentício com ACBC

Rezende (2019) realizou análise de EIS em REF-a-cc e ACBC-a-cc em solução alcalina de Ca(OH)_2 saturado e, nesta pesquisa, os mesmos compostos cimentícios também foram avaliados em solução contendo 3,5 p.% de NaCl, com o mesmo aço e mesmos traços de compósito cimentício.

Na Figura 37a e Figura 37b, observam-se os diagramas de Nyquist e Bode para REF-a-cc e, na Figura 37c e Figura 37d, Nyquist e Bode para ACBC-a-cc, ambos em

solução saturada de Ca(OH)_2 . Pelos diagramas de Nyquist, para ambos os traços, nota-se a formação de semicírculos e, quanto menor o raio do semicírculo, maior a possibilidade de o aço estar suscetível à corrosão. O maior tempo de exposição ao Ca(OH)_2 faz com que haja um aumento no raio do semicírculo, indicando um processo de passivação ocorrendo na armadura de aço (RIBEIRO *et al.*, 2018).

Figura 37 - Diagramas de Nyquist (a) e Bode (b) para REF-a-cc e diagramas de Nyquist (c) e Bode (d) para ACBC-a-cc, todos em solução de Ca(OH)_2 . Todas as medidas foram feitas aos 1, 3, 7, 15 e 21 dias após a moldagem dos compósitos cimentícios.

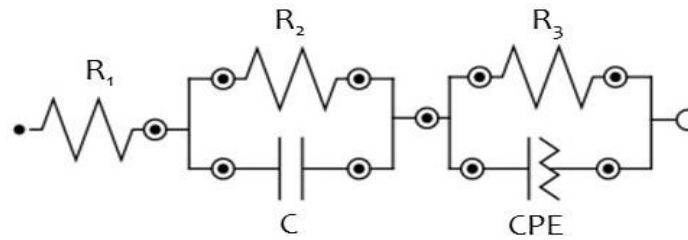


Fonte: adaptado de Rezende (2019)

Para entender melhor as interfaces eletroquímicas do sistema, os espectros foram modelados por um circuito equivalente que melhor representasse o sistema. Na Figura 38 está representado o circuito utilizado para ajustar os fenômenos ocorridos. Os últimos pontos do gráfico de Nyquist (frequências baixas -10^{-3} Hz a 10 Hz) correspondem à resistência do eletrodo (R_3), portanto, estão associados à interface do concreto com a armadura de aço, onde ocorre o fenômeno da corrosão. Quanto menor este raio, maior é a suscetibilidade à corrosão. Os fenômenos que ocorrem nas frequências médias (10^2 Hz a 10^6 Hz) correspondem à resistência do compósito cimentício (R_2) e estão associados às características da matriz que envolve e protege a armadura. Em altas frequências ($> 10^6$ Hz), há uma resistência de deslocamento (R_1) sem muito interesse para o processo e sem significado físico aparente. Em termos práticos, R_1 pode ser desprezada e a resistência da matriz de cimento pode ser estimada como $R_b = R_1 + R_2$ (CHRISTENSEN *et al.*, 1994; RIBEIRO *et al.*, 2015; GHORBANI *et al.*, 2018; KOGA *et al.*, 2019). Neste caso, a capacitância relativa à matriz de cimento comporta-se como um capacitor ideal (C), mas a relativa à armadura é como um capacitor não ideal, por isso foi adotado um elemento de fase constante (CPE).

O circuito utilizado para fitar os dados de EIS foi o que consta na Figura 38. Utilizou-se esse circuito com os dados de EIS apresentado por Rezende (2019), no qual a autora apresentou os valores que constam na Figura 39. Nesse caso, R_c é a resistência do concreto, R_f e C_f são a resistência e a capacitância do filme passivador e R_{cd} e CPE_{cd} são a resistência e a capacitância não-ideal da DCE, respectivamente.

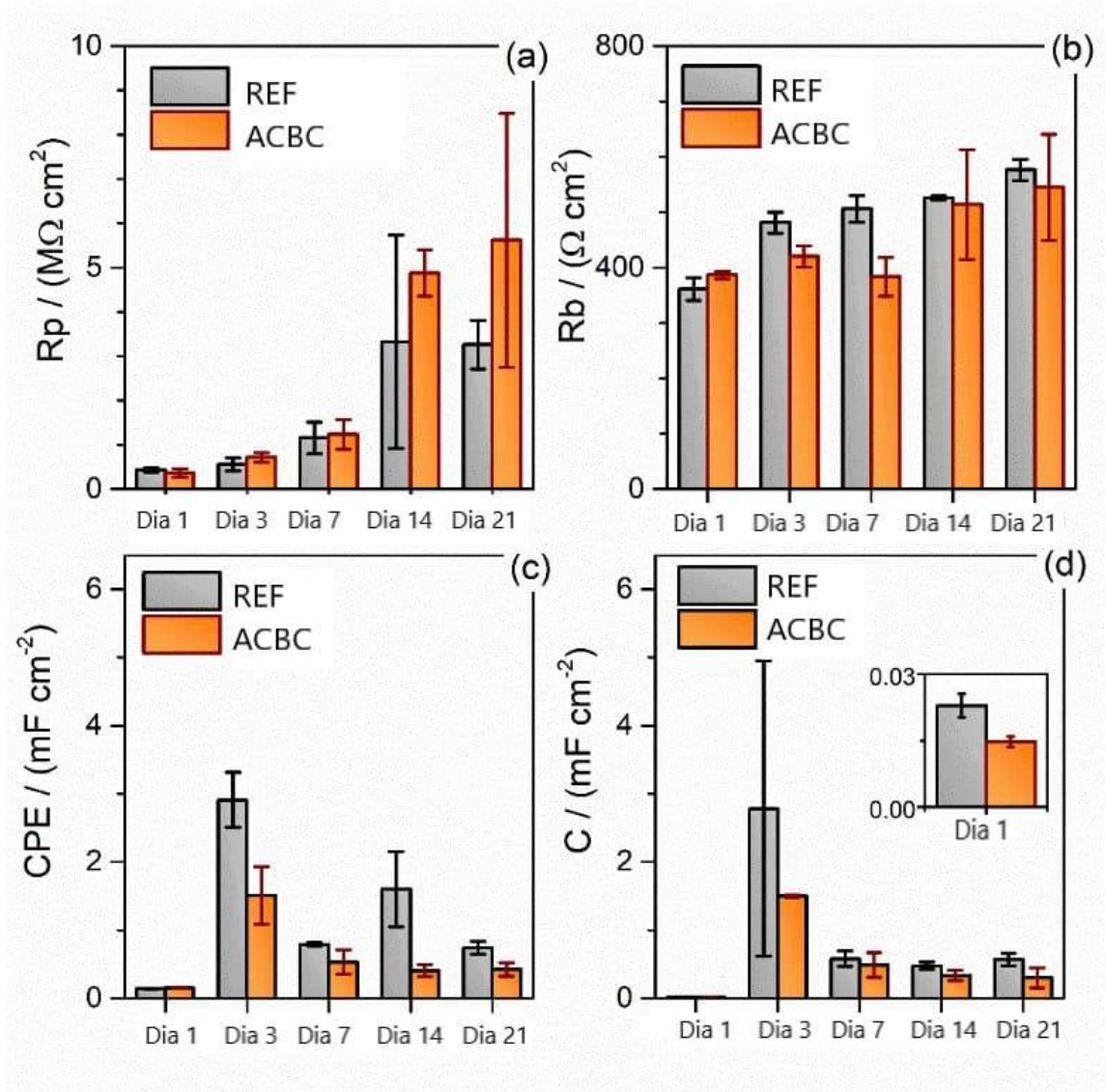
Figura 38 - Circuito equivalente utilizado para tratar os dados de EIS para REF-a-cc e ACBC-a-cc



Fonte: adaptado de Rezende (2019)

Na Figura 39 estão apresentados os valores dos parâmetros obtidos após ajustar o circuito equivalente com os dados do EIS. Os valores apresentados referem-se à média para ambos os aços em uma amostra de compósito cimentício. A resistência do concreto ($R_b = R_1 + R_2$) para ambas as amostras REF-a-cc e ACBC-a-cc permaneceu praticamente constante e apresentou os mesmos valores após o 7º dia considerando o erro associado, conforme pode ser observado na Figura 39b. Os resultados de resistência da dupla camada elétrica (R_p), entretanto, foram consistentes com a formação do filme passivador (aumentado ao longo do tempo) e não apresentaram desvio médio elevado (Figura 39a). Este parâmetro é o mais importante na análise EIS porque mostra quantitativamente a resistência à transferência de elétrons para o sistema, por exemplo, a resistência à corrosão. Além disso, R_p em amostras ACBC-a-cc é sempre maior que R_p em amostras REF-a-cc, mostrando mais evidências de que um filme passivador formado em aço em um ambiente ACBC-cc é mais protetor do que um filme formado em aço em um compósito cimentício convencional. Os valores de CPE e C após o 3º dia começaram a diminuir com o tempo nas amostras REF-a-cc e ACBC-a-cc (Figura 39c e Figura 39d), caracterizando uma superfície mais oxidada pela formação do filme de óxido passivo (YE et al., 2012). Mais uma vez, há um indicador de formação de filme passivo no aço. A amostra ACBC-a-cc também é menos capacitiva que a amostra REF-a-cc.

Figura 39 - (a) resistência à polarização (R_p), (b) resistência do compósito cimentício (R_b), (c) elemento de fase constante (CPE) e (d) valores de capacitância (C) obtidos após ajuste do circuito equivalente adotado em função do tempo de imersão.

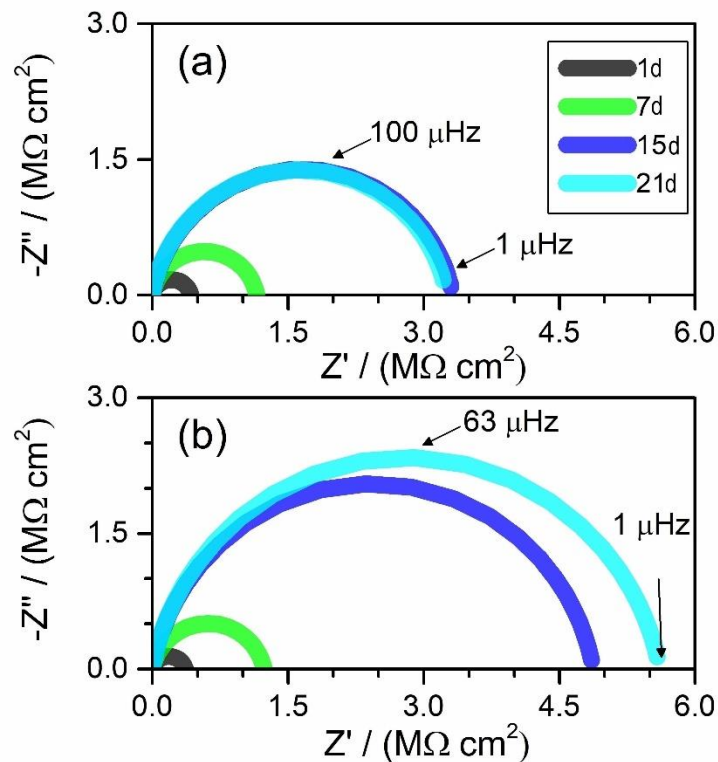


Fonte: autora.

Para melhor visualização, na Figura 40, está apresentado um gráfico de Nyquist simulado para as respostas médias das argamassas REF-a-cc (Figura 40a) e ACBC-a-cc (Figura 40b). O efeito semicírculo aumentou com o tempo de exposição, para ambas as condições. No meio ACBC-a-cc, o valor da resistência é maior que REF-a-cc para o mesmo período. Como o compósito cimentício e o aço

são materiais heterogêneos, alguns dos parâmetros estimados do EIS apresentam um alto erro associado. Alguns autores mencionam dificuldades em analisar dados de EIS nesta situação (Montemor *et al.*, 2000; Cao *et al.*, 2017), mas esta técnica é amplamente utilizada para avaliar processos corrosivos em concreto.

Figura 40 - Simulação do gráfico de Nyquist para as respostas médias (da Figura 39) das amostras (a) REF-a-cc e ACBC-a-cc na solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Circuito equivalente representado na Figura 38.

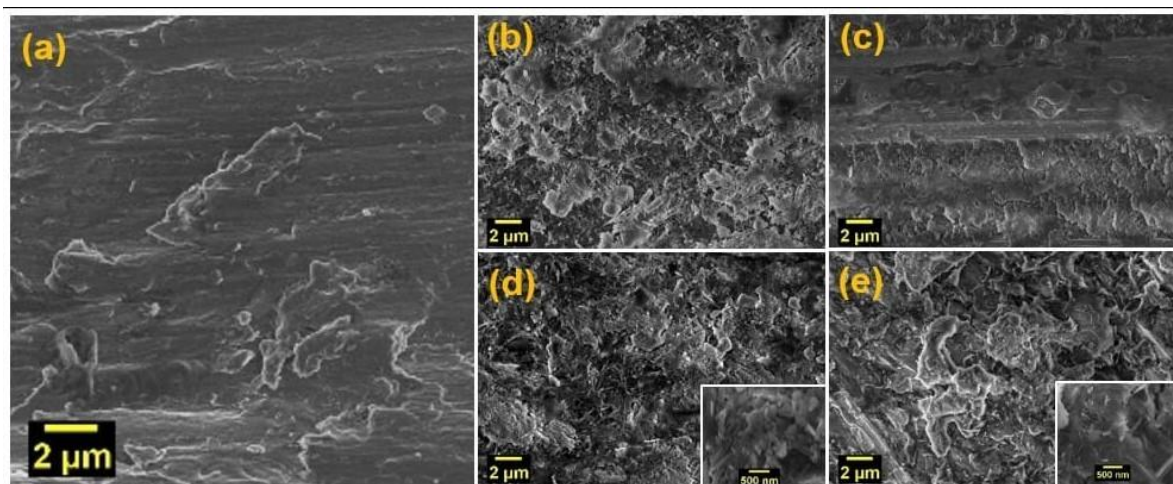


Fonte: autora

Imagens de microscopia eletrônica de varredura, obtidas de uma amostra de aço como recebida (amostra em branco) e na amostra REF-a-cc e ACBC-a-cc aos 7 e 21 dias de imersão em $\text{Ca}(\text{OH})_2$ saturado, podem ser vistas na Figura 41. Na amostra em branco (Figura 41a), apenas arranhões são visíveis, devido ao processo de limpeza do aço. A formação de uma estrutura de revestimento é claramente observada na amostra de referência do 7º dia (Figura 41b). Esta estrutura é

provavelmente o filme passivador, visto que as medidas de EIS e OCP indicaram que, nessa idade já se observava passivação do aço. Também foram observadas estruturas semelhantes à etringita, que é descrita na literatura pela idade da argamassa (SCRIVENER et al., 2019). Nas amostras ACBC-a-cc do 7º dia (Figura 41c), há um revestimento no aço menos distribuído do que na amostra REF-a-cc. Pela análise de OCP e EIS, a formação completa do filme passivador para amostras ACBC-a-cc foi observada em aproximadamente 14 dias. No 21º dia, para a amostra REF-a-cc (Figura 41d), o filme passivador recobre o aço e não há formação de etringita nesta idade. Para o ACBC-a-cc no 21º dia, há a formação de uma estrutura de sobreposição de aço. Considerando os resultados de OCP e EIS, essas estruturas na presença de ACBC-cc resultam em uma camada mais protetora do que a formada no REF-a-cc.

Figura 41 - Imagens SEM de (a) aço conforme recebido; (b) REF-a-cc 7º dia; (c) ACBC-a-cc 7º dia; (d) REF-a-cc 21º dia e; (e) ACBC-a-cc 21º dia de imersão em $\text{Ca}(\text{OH})_2$ saturado.

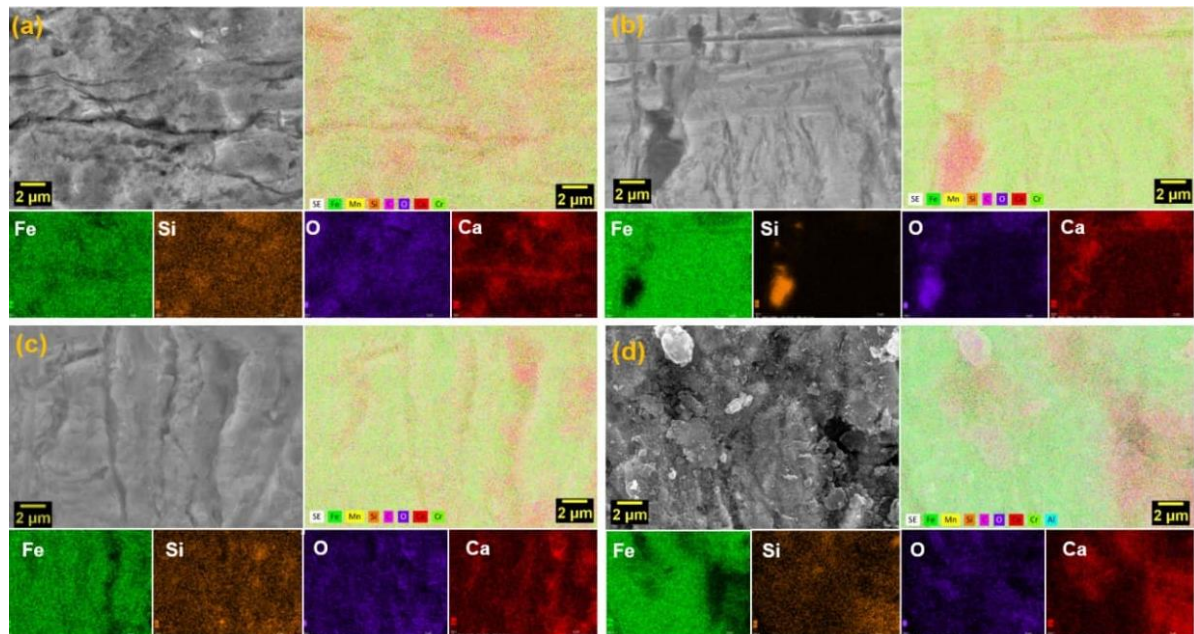


Fonte: adaptado de Rezende (2019).

As imagens SEM com mapeamento elemental (Fe, Si, O, Ca) da superfície do aço após 7 e 14 dias de imersão em $\text{Ca}(\text{OH})_2$ saturado em amostras REF-a-cc e ACBC-a-cc foram obtidas conforme mostrado na Figura 42. No 7º dia de imersão em uma solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, a amostra REF-a-cc (Figura 42a) apresentou uma superfície coberta com os quatro elementos analisados: Fe do aço, Si, da matriz cimentícia e O e Ca da solução. Como o ferro e o oxigênio estão distribuídos

uniformemente na superfície do aço, é possível associá-los à formação de filme passivador. Na amostra ACBC-a-cc imersa por 7 dias na mesma solução (Figura 42b), o ferro está distribuído na superfície, mas o oxigênio não, o que é um indicativo de que o filme passivador não estava totalmente formado nestas amostras. Ainda assim, foi observada uma área no canto inferior esquerdo da imagem formada principalmente por Si, possivelmente um pedaço de compósito cimentício incrustada na amostra de aço. Na Figura 42c e na Figura 42d, correspondentes respectivamente a REF-a-cc e ACBC-a-cc imersos por 14 dias em solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, Fe e O estão uniformemente distribuídos na superfície do aço, indicando a formação de um filme passivador na superfície, juntamente com as demais análises realizadas. Portanto, esta análise também corrobora com o que foi exposto anteriormente: aos 7 dias o filme passivador já está bem formado no aço em REF-cc, e para o ACBC-a-cc, o filme passivador é formado ao final do 14º dia. A formação posterior da película protetora no meio ACBC-cc não é um problema, pois, para fins práticos, o tempo de cura da estrutura convencional de concreto armado é normalmente de 28 dias e a estrutura de escoramento de concreto só pode começar a ser removida após 14 dias (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Figura 42 - SEM com mapeamento elementar (Fe, Si, O, Ca) de (a) REF-a-cc aos 7 dias, (b) ACBC-a-cc aos 7 dias, (c) REF-a-cc aos 14 dias e (d) ACBC-a-cc aos 14 dias em solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$

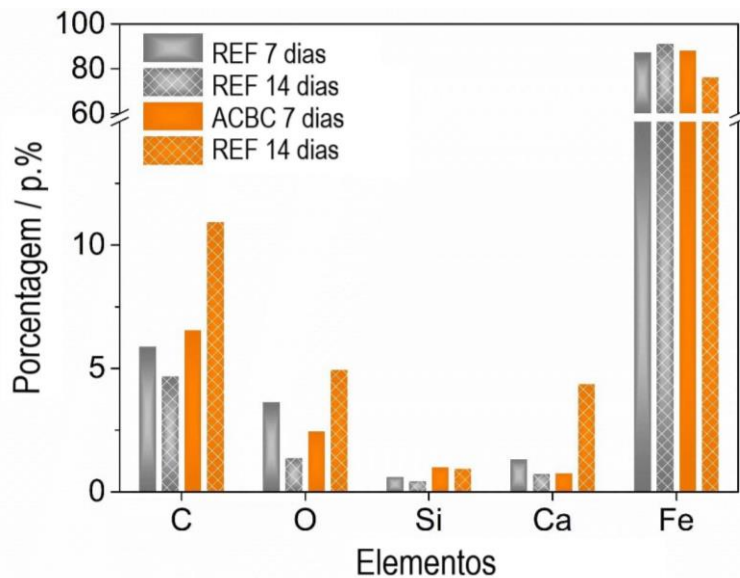


Fonte: autora.

As porcentagens atômicas de carbono, oxigênio, silício, cálcio e ferro nas amostras REF-a-cc e ACBC-a-cc aos 7 e 14 dias de imersão em solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ são apresentadas na Figura 42. A porcentagem de C nas amostras REF-a-cc diminuiu de 7 para 14 dias de imersão, assim como a porcentagem de O, Si e Ca. No entanto, a porcentagem de Fe teve um pequeno aumento. Em contrapartida, as amostras ACBC-a-cc apresentaram percentual crescente de C, O e Ca de 7 a 14 dias de imersão. A quantidade de Si permaneceu praticamente a mesma durante todo o tempo de imersão e a quantidade de Fe diminuiu de 7 para 14 dias. Esperava-se que a porcentagem de produtos formadores do filme passivador no aço (O e Fe) aumentasse entre 7 e 14 dias, juntamente com o C, pois a superfície do aço estaria coberta pelo filme passivador conforme as análises realizadas. No entanto, isso não aconteceu, pois é difícil limpar a amostra de aço que foi retirada do compósito cimentício sem danificar o filme passivador. Portanto, foi observada sujidade na

amostra de aço, devido à presença de resíduos de argamassa que não podiam ser vistos a olho nu.

Figura 43 - Percentual em peso de carbono, oxigênio, silício, cálcio e ferro em REF-a-cc e ACBC-a-cc aos 7 e 14 dias de imersão em solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.



Fonte: autora.

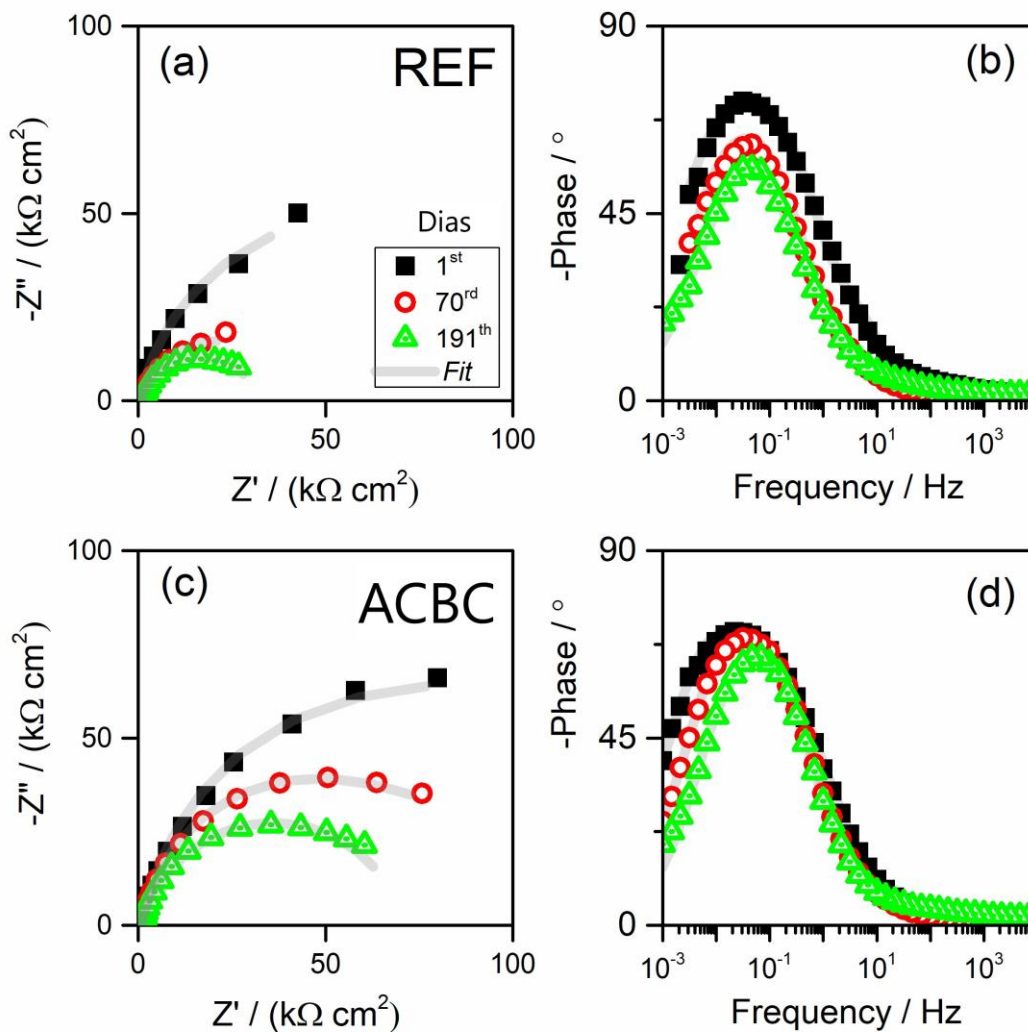
Em resumo, aos 7 dias de imersão, a amostra de aço da REF-a-cc apresenta um filme de passivação formado, enquanto a amostra de aço do ACBC-a-cc apresenta formação de filme entre 7 e 14 dias de imersão na solução. No entanto, o filme passivador formado no aço em ambiente ACBC-cc é mais protetor do que o aço em ambiente cimentício convencional. Isso também foi concluído por Gromboni *et al.*, 2020 analisando o mesmo aço em solução de poros de concreto com ACBC, embora o filme de passivação formado no aço em meio ACBC-s tenha demorado 3 dias e em meio sem ACBC, 2 dias.

Após as amostras REF-a-cc e ACBC-a-cc serem imersas por 28 dias em solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (tempo de cura do concreto convencional), elas foram totalmente imersas em solução de NaCl 3,5 p.%, simulando a água do mar, conforme recomendado pela C876 (ASTM INTERNATIONAL, 2016). Diferentemente do método

indicado pela norma, nesta pesquisa, as amostras foram monitoradas regularmente por 200 dias por EIS e OCP.

As medições de EIS para amostras em solução de NaCl a 3,5 p.% foram realizadas usando os mesmos parâmetros de medição da solução saturada de Ca(OH)_2 ; o mesmo circuito equivalente foi usado para ajustar os dados (Figura 38) porque o fenômeno físico é o mesmo. Na Figura 44a e Figura 44b estão apresentados os diagramas de Nyquist e Bode para REF-a-cc respectivamente, e na Figura 44c e Figura 44d estão relacionadas a ACBC-a-cc. Embora uma medição EIS tenha sido realizada a cada sete dias, na Figura 44 consta somente o 1º, 70º e 191º dias para facilitar a visualização da evolução da corrosão nas amostras. Os gráficos de Nyquist mostram uma diminuição no diâmetro do *loop* capacitivo com o tempo, tanto nas amostras ACBC-a-cc quanto nas de REF-a-cc, mostrando que, ao longo do tempo de exposição à solução de cloreto, a corrosão no aço aumenta. Comparando os espectros de impedância das amostras REF-a-cc (Figura 44a) e ACBC-a-cc (Figura 44c), a amostra ACBC-a-cc tem um diâmetro maior em baixas frequências, o que significa que tem uma maior resistência à polarização em comparação com a amostra REF-a-cc. A partir do diagrama de Bode para REF-a-cc (Figura 44b) e ACBC-a-cc (Figura 44d), o ângulo de fase para amostras REF-a-cc diminuiu mais ao longo do tempo do que o ângulo de fase da amostra ACBC-a-cc, mostrando também que a amostra de aço em ACBC-a-cc estava mais protegida contra corrosão.

Figura 44 - Diagramas de Nyquist (a) e Bode (b) para REF-a-cc e diagramas de Nyquist (c) e Bode (d) para ACBC-a-cc, em solução de NaCl 3,5 p.%. Todas as medições foram feitas aos 1, 70 e 191 dias de exposição à solução.

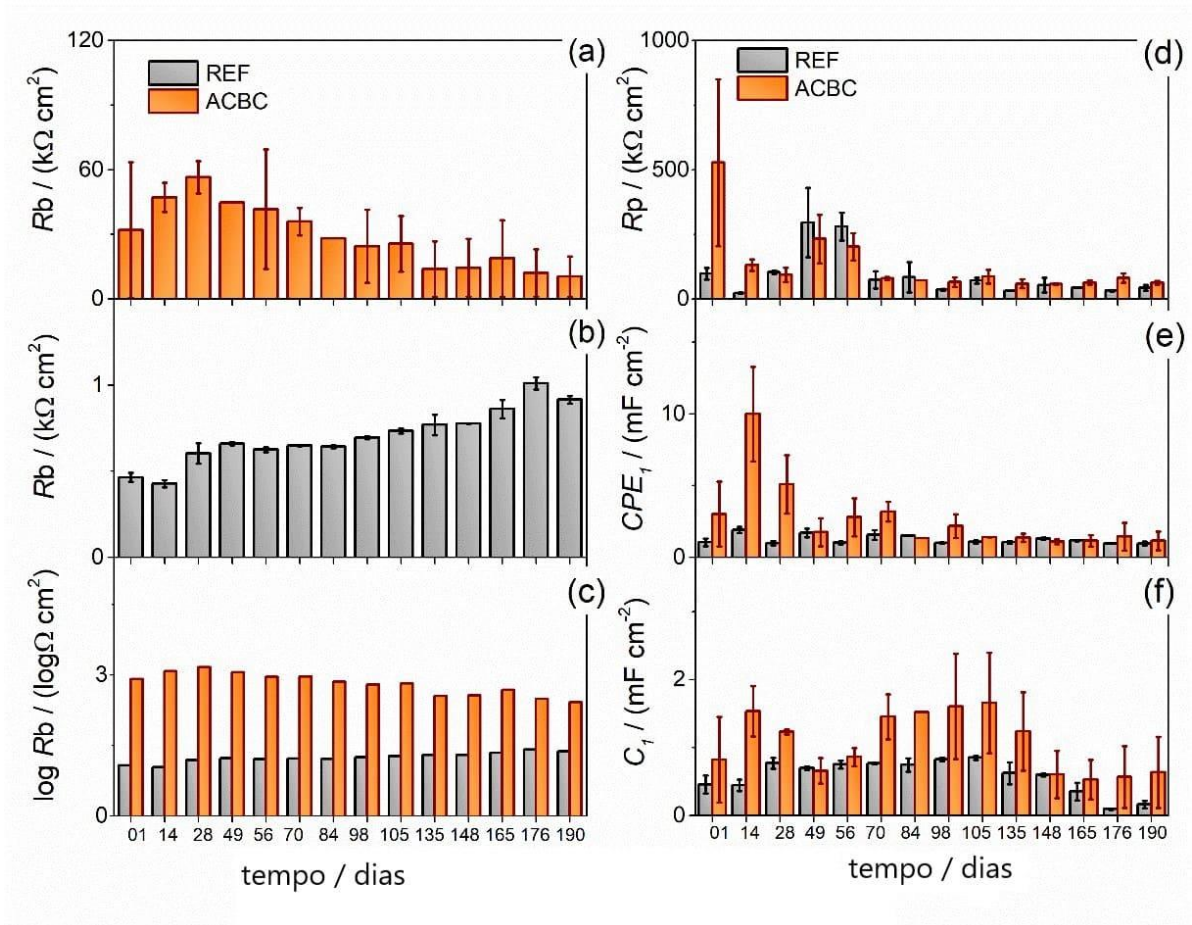


Fonte: autora.

Na Figura 45 estão apresentados os parâmetros obtidos por ajuste de dados de EIS. A resistência do concreto (R_b) das amostras REF-a-cc e ACBC-a-cc ao longo do tempo de medição são apresentadas na Figura 45a e Figura 45b, respectivamente. A Figura 45c mostra a R_b em escala logarítmica para comparar as resistências das duas amostras. A R_b do compósito cimentício com ACBC é até 6 vezes maior que o do compósito cimentício de referência. As medidas de resistência à polarização (R_p) do

REF-a-cc e ACBC-a-cc (Figura 45d) diminuíram ao longo do tempo de exposição na solução agressiva. As capacitâncias relacionadas ao processo corrosivo (CPE) e ao compósito cimentício (C) são mostradas na Figura 45e e Figura 45f, respectivamente. O CPE aumentou do primeiro ao 14^o dia e só diminuiu ao longo do tempo de imersão em solução de NaCl para ambas as amostras. Os valores de C para a amostra REF-a-cc foram constantes até o 148^o dia e então apresentaram queda. Para ACBC-a-cc, o valor apresentou uma oscilação de pequenos aumentos até o 14^o dia, seguido de um valor de C decrescente até o 49^o dia, após o qual o comportamento repetiu o processo de aumento/diminuição. Mesmo com essa variação de valor, os valores de C e CPE para ACBC-a-cc foram maiores do que para REF-a-cc, principalmente para os primeiros 90 dias. Este efeito provavelmente está relacionado à permeabilidade e difusão do cloreto no concreto. O transporte de íons cloreto depende da porosidade, diâmetro dos poros e teor de ar do concreto (AMIN, 2011; GHORBANI *et al.*, 2018). A condução elétrica está correlacionada não apenas às características da estrutura dos poros, mas também com a condutividade elétrica da solução dos poros (AMIN, 2011). Um estudo mostrou que a permeabilidade ao cloreto para concreto misturado com bagaço de cana é consideravelmente reduzida por uma substituição parcial de cimento Portland de alta resistência por areia de bagaço de cana (AMIN, 2011). No entanto, nesse caso, a permeabilidade de cloretos foi medida para longas exposições do concreto a cloretos e os valores de R_p , CPE e C são semelhantes para o concreto com e sem adição de ACBC. Um ponto de destaque é que a adição de ACBC não prejudica a resistência à corrosão da armadura, possibilitando o uso deste material para construção civil quanto a esse aspecto.

Figura 45 - Evolução da resistência do concreto com a idade da (a) ACBC-a-cc, (b) REF-a-cc, (c) logaritmo da resistência do compósito cimentício, (d) resistência de polarização, (e) elemento de fase constante (CPE) e (f) valores de capacitância (C) das amostras REF-a-cc e ACBC-a-cc obtidos pelo ajuste do circuito equivalente da Figura 38, em função do tempo de imersão em solução de NaCl 3,5 p.%.

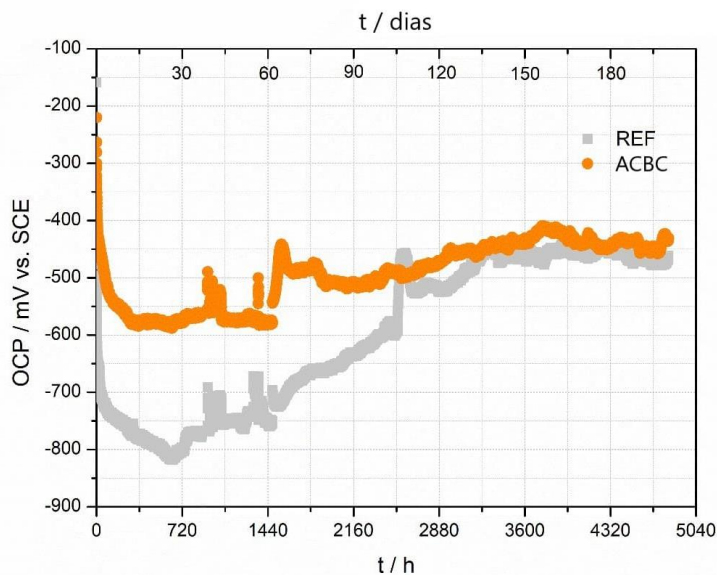


Fonte: autora.

Na Figura 46 está apresentada a média de três medições realizadas em amostras REF-a-cc e ACBC-a-cc em solução de NaCl a 3,5 p.%. Para ACBC-a-cc, o OCP começou próximo de -200 mV (vs. SCE), mas em aproximadamente duas semanas, o OCP diminuiu a -41 mV/dia estabilizando-se em um platô em torno de -575 mV, onde ficou 45 dias. Em seguida, o potencial cresceu a uma taxa de 15 mV/dia, atingindo aproximadamente -500 mV. A partir do 105º dia, o OCP teve um pequeno aumento em torno de 0,41 mV/dia, estabilizando-se aos 30 dias próximo a -440 mV

para a amostra ACBC-a-cc. Para a amostra REF-a-cc, o OCP começou em um valor semelhante ao da amostra ACBC-a-cc, mas diminuiu em cerca de -360 mV/dia até o segundo dia, quando o potencial foi de -715 mV (vs. SCE). Em seguida, o OCP diminuiu a uma taxa de -4 mV/dia, permanecendo em -810 mV no 26º dia. Entre o 26º e 135º dia, o OCP aumentou para -470 mV onde permaneceu até o final do experimento. Os valores de OCP das amostras REF (-711 mV vs. NHE) e amostras ACBC-a-cc (-681 mV vs. NHE) foram semelhantes aos 191 dias, e, para ambos os potenciais, considerando um pH de solução de 9,98 e o diagrama de Pourbaix (REFAIT; ABDELMOULA; GÉNIN, 1998), o aço estava na região de interface de imunidade/ passivação. No entanto, de acordo com a medida EIS e alguns estudos, o aço está em uma região de corrosão ativa ao final de 191 dias em uma solução de NaCl a 3,5 p.% (FRANCO-LUJÁN *et al.*, 2019; KOGA *et al.*, 2019). Além disso, as oscilações e flutuações nos valores de OCP podem ser correlacionadas a processos localizados de corrosão/passivação, típicos de meios de cloreto com baixa difusão de oxigênio no concreto (FRANCO-LUJÁN *et al.*, 2019).

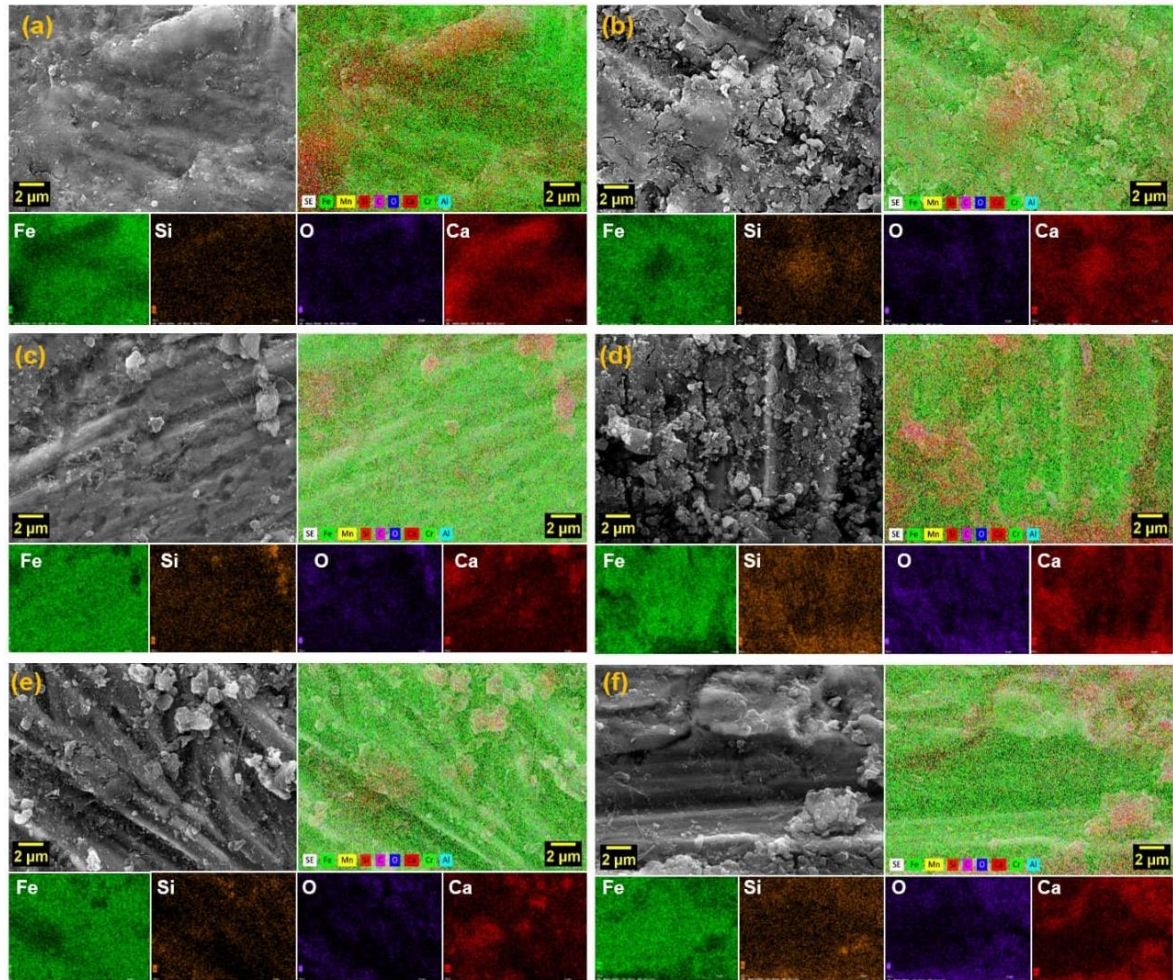
Figura 46 - Evolução da média de três valores medidos de potenciais de circuito aberto (OCP) em função do tempo de imersão de REF-a-cc e ACBC-a-cc em solução de NaCl 3,5 p.%.



Fonte: autora.

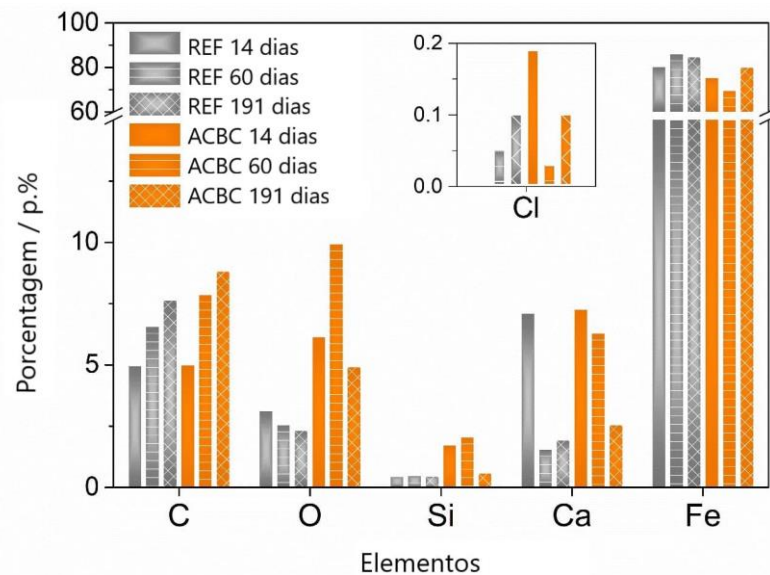
Na Figura 47 estão apresentadas as imagens SEM e mapeamento elementar obtidos de amostras REF-a-cc e ACBC-a-cc aos 14, 60 e 191 dias de imersão em solução de NaCl a 3,5 p.%. Na Figura 47a e na Figura 47b, podem ser observadas as imagens REF-a-cc e ACBC-a-cc aos 14 dias de imersão na solução, respectivamente. Em ambas as amostras, ferro e cálcio estão bem distribuídos, mas em ACBC-a-cc mais Fe é observado na superfície. Ao analisar a porcentagem em massa dos elementos encontrados em maior abundância nas amostras de aço (Figura 48), observa-se que há quantidade semelhante de carbono, cálcio e ferro no REF-a-cc e ACBC-a-cc aos 14 dias de imersão. O oxigênio e o silício são encontrados em menor quantidade no REF-a-cc do que no ACBC-a-cc. A presença de Ca e Si é atribuída a alguns resíduos de compósito cimentício que não puderam ser observados a olho nu na preparação das amostras para o microscópio. Após 60 dias de imersão, REF-a-cc apresentou aumento na quantidade de C e Fe e diminuição na quantidade de O e Ca. Si permaneceu praticamente constante. Analisando as imagens SEM, aparentemente, a camada cobre melhor as amostras ACBC-a-cc do que a REF-a-cc, sugerindo que os produtos de corrosão podem estar mais dispersos nesta amostra porque a quantidade de oxigênio na amostra REF-a-cc é menor do que na amostra ACBC-aa.

Figura 47 - SEM com mapeamento elemental (Fe, Si, O, Ca) de (a) REF 14 dias, (b) SBAS 14 dias, (c) REF 60 dias, (d) SBAS 60 dias, (e) REF 191 dias e (f) SBAS 191 dias em solução de NaCl a 3,5%.



Fonte: autora

Figura 48 - Percentual em peso de carbono, oxigênio, silício, cálcio, ferro e cloro destacados na REF-a-cc e ACBC-a-cc aos 14, 60 e 191 dias de imersão em solução de NaCl 3,5 p.%.



Fonte: autora.

As amostras que foram expostas à ação de cloretos por 191 dias apresentaram visualmente uma superfície semelhante às expostas por 60 dias para as duas amostras analisadas. No entanto, devido ao percentual de massa dos elementos, as amostras ACBC-a-cc possuem maior quantidade de oxigênio do que o REF-a-cc. Portanto, isso indica um possível sinal de ser um filme passivo mais protetor, confirmando que um ambiente com ACBC-a-cc é mais protetor ao aço.

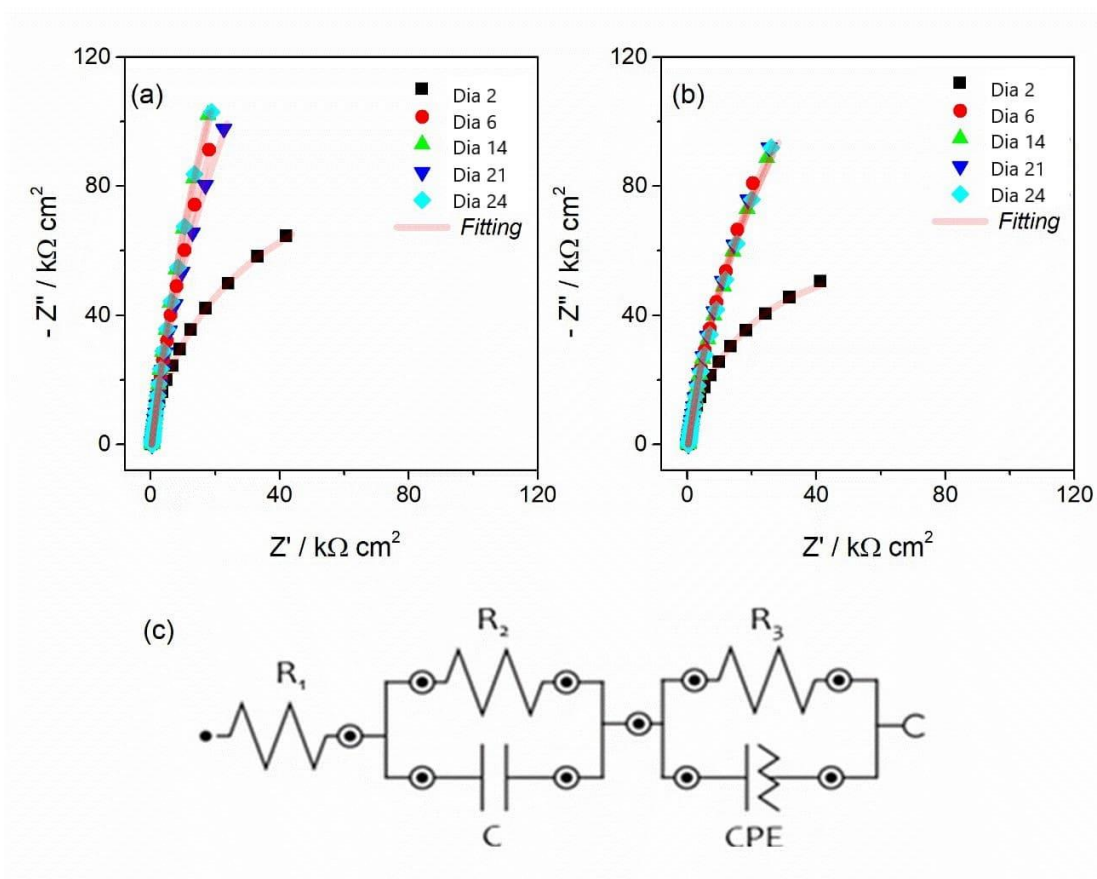
4.2.2 Armadura em compósito cimentício com LETA

Neste item, foram apresentados os resultados da análise eletroquímica das armaduras em um REF-cc, moldado em um outro momento que o moldado para as análises em ACBC, e em LETA-cc.

As medições EIS são úteis para obter informações sobre sistemas eletroquímicos, como a presença de filmes de passivação superficial, corrosão interfacial e fenômenos de transferência de massa. Desta forma, esta técnica foi utilizada para acompanhar o processo de cura – ou seja, nos primeiros 24 dias após

a moldagem dos compósitos cimentícios. Todas as medidas de EIS foram realizadas em solução saturada de Ca(OH)_2 . Os diagramas de Nyquist para REF-a-cc e LETA-a-cc são apresentados na Figura 49. Ambos os compósitos cimentícios apresentaram o mesmo comportamento: um semicírculo, indicando a ocorrência de efeitos resistivos e capacitivos. Com o passar do tempo, é possível observar que o raio do semicírculo aumenta, indicando a formação do filme passivo sobre o aço. O modelo de circuito equivalente, representado na Figura 49c, foi utilizado para ajustar os espectros EIS, mostrando o circuito utilizado para ajustar os fenômenos ocorridos.

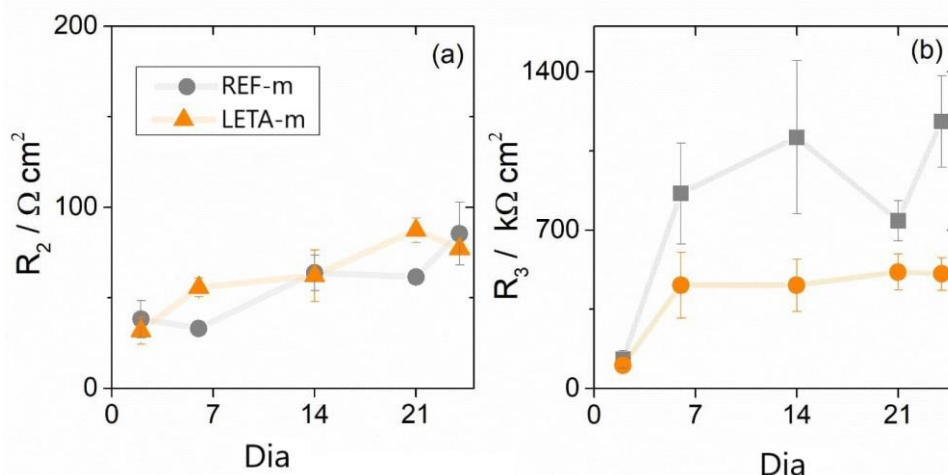
Figura 49 - Diagramas de Nyquist para (a) REFa-cc e (b) LETA-a-cc, ambos em solução de Ca(OH)_2 . (c) Representação do circuito equivalente utilizado para ajustar os dados de EIS.



Alguns trabalhos na literatura explicam todos os fenômenos elétricos envolvidos (CHRISTENSEN *et al.*, 1994; RIBEIRO; SOUZA; ABRANTES, 2015, GHORBANI *et al.*, 2018b; KOGA *et al.*, 2019c), mas neste estudo focou-se em R_2 e R_3 , que, em

termos práticos, podem estar relacionados com a resistência do compósito cimentício e resistência à corrosão do aço, respectivamente. Como pode ser observado pela Figura 50a, ao longo do tempo de medição, a resistência do compósito cimentício REF-a-cc e LETA-a-cc é similar e fica igual ao final dos 24 dias. Em relação à resistência do aço (Figura 50b), a diferença de resistência à corrosão indica que o LETA-cc pode promover uma maior suscetibilidade à corrosão da estrutura. É interessante notar que R_3 aumenta mais rápido em REF-a-cc comparado a LETA-a-cc, e aos 7 dias de imersão em solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, o aço em LETA-cc atingiu um platô de crescimento do filme de passivação. Portanto, isso sugere que o LETA-cc fornece um ambiente que torna o aço menos capaz de passivar.

Figura 50 - Valores de resistência do compósito cimentício (R_2) e resistência à corrosão do aço (R_3) obtidos ajustando o circuito equivalente (Fig. S1c) em função do tempo de imersão em solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

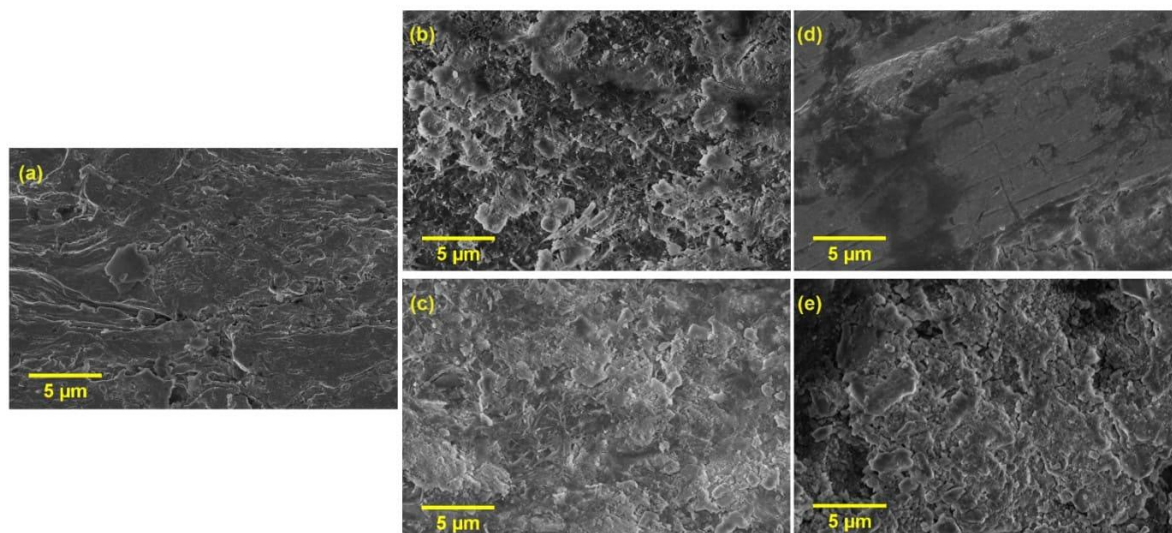


Fonte: autora.

Após a abertura dos compósitos cimentícios para remoção das barras de aço das amostras, imagens de SEM foram feitas em uma amostra de aço como recebida (amostra em branco), em aços de amostras REF-a-cc aos 7 e 21 dias de imersão em solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, e em LETA-a-cc aos 7 e 21 dias de imersão em solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, como pode ser visto na Figura 51. As medições de EDX também

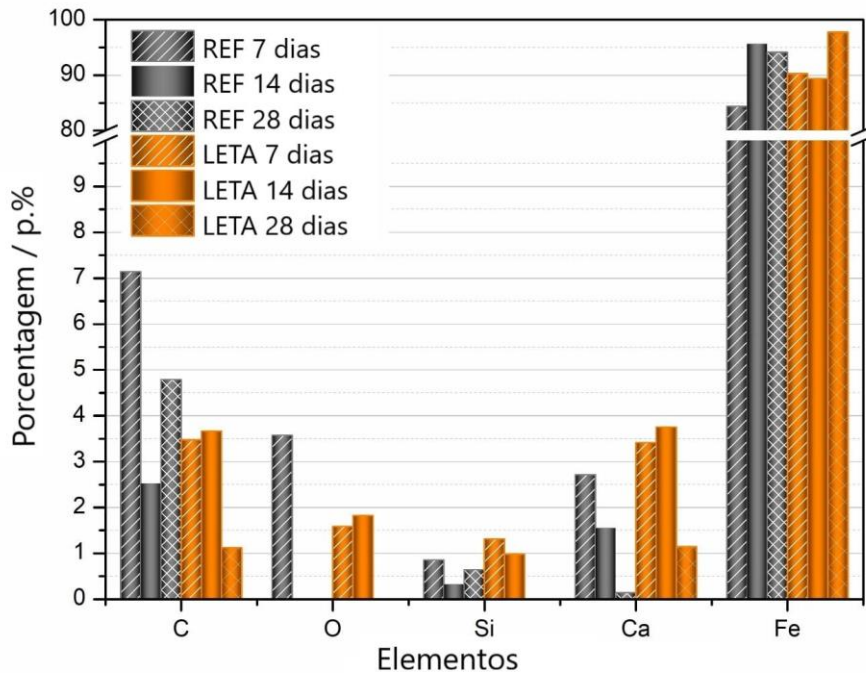
foram realizadas, e são apresentados na Figura 52. Na Figura 51a pode ser observado a amostra em branco, na qual é possível visualizar arranhões no aço resultantes do processo de limpeza da amostra. Após 7 dias de imersão em solução alcalina, a superfície do aço na Figura 51b mostra que a amostra REF-a-cc apresenta uma estrutura de revestimento formada claramente. Uma estrutura semelhante foi observada na amostra REF após 21 dias de imersão em solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Estas estruturas são provavelmente o filme passivador, uma vez que as medições EIS e OCP indicaram um processo de passivação nesta idade. Para a amostra LETA-a-cc, no 7º dia, é possível ver que uma estrutura está se formando, mas ainda não cobre bem a amostra, como aconteceu para REF-a-cc, nesta idade. No 21º dia a amostra LETA-a-cc apresentou um revestimento bem desenvolvido que cobre melhor a superfície do que antes. Apesar disso, este revestimento não cobre toda a superfície do aço, evidenciando o que foi observado no monitoramento do OCP (Figura 36) o qual permite afirmar que o filme passivador não estava bem formado após 21 dias de imersão na solução alcalina.

Figura 51 - Imagens SEM de (a) amostra em branco, (b) REF-a-cc 7º dia, (c) REF-a-cc 21º dia, (d) LETA-a-cc 7º dia e (e) LETA-a-cc 21º dia



Fonte: autora.

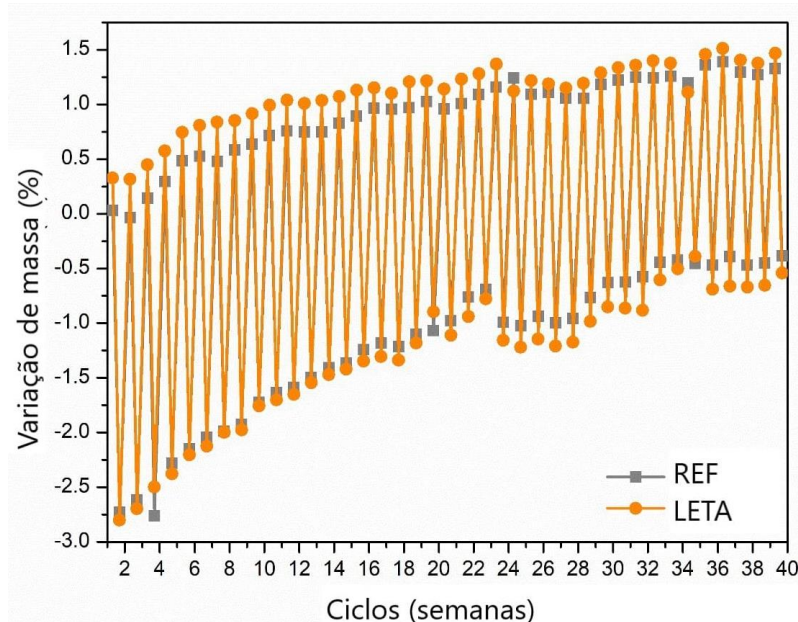
Figura 52 - Percentual em peso de carbono, oxigênio, silício, cálcio e ferro em REF-a-cc e LETA-a-cc aos 7, 14 e 21 dias de imersão em solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.



Fonte: autora.

Para avaliar o potencial de corrosão do aço da armadura em compósitos cimentícios com e sem LETA, os corpos de prova foram imersos a meia altura em solução de NaCl 3,5 p.% por dois dias e secos em estufa a 50 °C por cinco dias a cada semana por 39 semanas. À medida em que os compósitos cimentícios foram sendo imersas em solução de NaCl, os sais de NaCl foram cristalizando nos poros do compósito cimentício, aumentando a compacidade em todos os corpos de prova. Na Figura 53 é possível observar que à medida que os ciclos passam, as massas das amostras aumentam. Este efeito foi causado pelo acúmulo de NaCl na microestrutura do compósito cimentício e, conseqüentemente, pela retenção de água. Após cerca de 32 ciclos a variação de massa começou a se estabilizar sugerindo que os poros estavam colmatados com sal e a penetração de mais solução de NaCl se tornou difícil.

Figura 53 - Variação da massa dos corpos de prova REF-c e LETA-cc durante os ciclos de envelhecimento (imersão em 3,5 p.% NaCl e secagem). Valores mais altos (mais baixos) referem-se a condições saturadas (secas).



Fonte: autora.

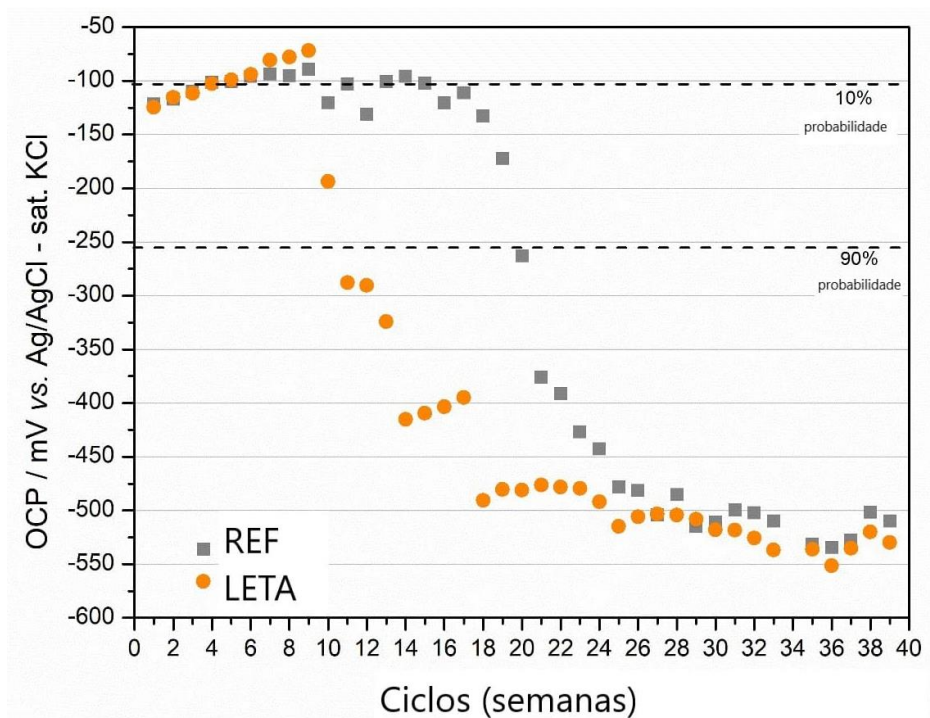
Os potenciais de corrosão do aço em REF-cc e LETA-cc foram medidos e comparados com os limites empíricos estabelecidos pela C876-15 (ASTM INTERNATIONAL, 2016) conforme observa-se na Figura 54. No entanto, os limites da norma são definidos para corpos de prova de concretos convencionais, portanto, no caso da incorporação de LETA, sua aplicabilidade pode não ser acertiva. No caso, os limites da norma são: se $OCP > -104 \text{ mV vs. Ag/AgCl|KCl sat.}$, há 90% de probabilidade de não haver atividade de corrosão no WE e se $OCP < -254 \text{ mV vs. Ag/AgCl|KCl sat.}$ há 90% de probabilidade de haver atividade de corrosão no WE. Entre esses limites, há atividade de corrosão incerta.

A partir da Figura 54, pode-se observar que os valores iniciais para REF-a-cc e LETA-a-cc são semelhantes e aumentaram 100 mV do primeiro dia ao sexto ciclo juntos, sugerindo a formação de uma camada passivadora, reduzindo o risco de corrosão. Enquanto os valores do potencial LETA-a-cc aumentam um pouco mais do sétimo para o nono ciclo, os valores do potencial REF-a-cc passaram a permanecer

constantes, próximos ao valor limite para que a corrosão se tornasse incerta de acordo com a C876-15 (ASTM INTERNATIONAL, 2016) do sétimo ao 17º ciclo. Isso significa que o filme de passivação no REF-a-cc começou a ficar instável. Os valores do potencial em LETA-a-cc diminuíram notavelmente após o sétimo ciclo, indicando uma atividade de corrosão após o 10º ciclo. REF-a-cc apresentou comportamento decrescente semelhante após o 18º ciclo, apresentando 90% de probabilidade de corrosão após o 20º ciclo. Portanto, isso pode indicar que REF-cc é um ambiente que favorece manter o filme passivador por mais tempo no aço, protegendo-o da corrosão por mais oito semanas no caso deste teste. O teste foi realizado por mais 19 semanas após as amostras apresentarem 90% de probabilidade de corrosão e após, 27 ciclos, os valores de potencial de corrosão REF-a-cc e LETA-a-cc tornaram-se semelhantes, em torno de -525 mV.

Esse comportamento foi mencionado por outros pesquisadores (RIBEIRO; LABRINCHA; MORELLI, 2012; GHORBANI *et al.*, 2018b; ALMEIDA *et al.*, 2019). O LETA-a-cc mostrou-se mais suscetível à atividade corrosiva, provavelmente causada pelo pH mais baixo do LETA (7,11 - Tabela 11), frente à maior alcalinidade do cimento (aproximadamente 12,5). Portanto, nesta proporção de material para confecção de amostras LETA não é indicado o uso deste compósito cimentício no ambiente marinho. No entanto, é importante mencionar que é indicado para ser utilizado como concreto armado estrutural em áreas urbanas pela norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014).

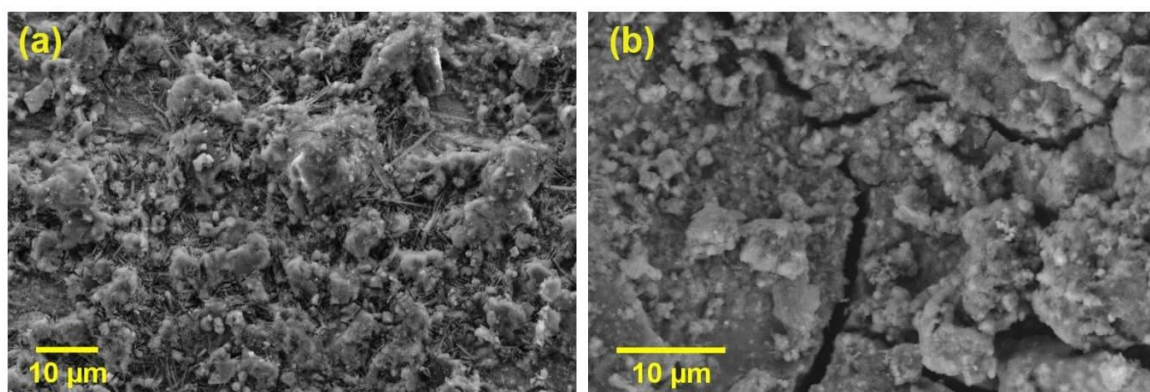
Figura 54 - Evolução do potencial de circuito aberto de eletrodos de trabalho em REF-cc e LETA-cc versus Ag/AgCl|KCl sat.



Fonte: autora.

Após 39 semanas (ciclos) de ensaios de potencial de corrosão, os compósitos cimentícios foram abertos para a retirada das barras de aço e para a realização da SEM. As imagens foram obtidas em aços de amostras REF-cc e aços de LETA-cc (Figura 55). Após este tempo de imersão em solução de cloreto, a amostra REF-a-cc apresentou nitidamente uma estrutura formada na superfície (Figura 55a), provavelmente os óxidos formados pela corrosão, conforme medições do OCP para esta idade. Para a amostra LETA-a-cc (Figura 55b), a superfície do aço apresentou trincas ao lado dos óxidos. As amostras LETA-a-cc começaram a corroer pelo menos 5 semanas antes das amostras REF-a-cc.

Figura 55 - Imagens SEM de (a) REF-a-cc e (b) LETA-a-cc após o final dos experimentos.



Fonte: autora.

Além disso, sabendo que o filme de passivação no aço em LETA-cc não se estabilizou de acordo com o monitoramento OCP em meio alcalino, é aceitável, portanto, concluir que esse filme se rompeu facilmente e o processo de corrosão ocorreu de forma mais rápida e intensa do que na amostra REF-a-cc.

Com os resultados apresentados sobre a resistência à corrosão de LETA-a-cc, não é recomendado que um concreto armado com incorporação de LETA seja utilizado para fins estruturais em ambiente marinho. Entretanto, um estudo realizado no GESEC mostrou que a carbonatação desse compósito cimentício é similar à carbonatação no meio de referência (HEMKEMEIER *et al.*, 2021). Portanto, é importante mencionar que o concreto com 3% de substituição de areia natural por LETA pode ser utilizado para fins estruturais em ambiente urbano.

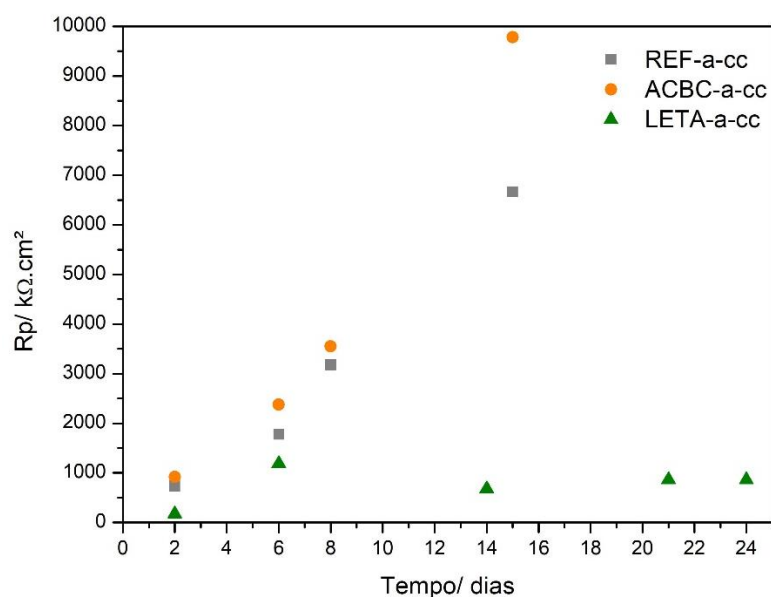
4.2.3 Suscetibilidade à corrosão de armaduras em compósitos cimentícios com ACBC e LETA

Embora os experimentos em compósitos cimentícios tenham sido feitos em momentos diferentes, é importante comparar os resultados de medições feitas de forma similar, como é o caso da EIS para as armaduras em compósitos cimentícios imersos em $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Como já mencionado, o parâmetro mais importante de EIS é a R_p . Para facilitar a visualização, os valores obtidos para esse parâmetro em REF-a-cc

(segunda medição), ACBC-a-cc e LETA-a-cc podem ser observados no gráfico da Figura 56. Claramente, ACBC-a-cc apresenta R_p crescente ao longo do tempo e sempre maior que a R_p das outras amostras. A R_p de REF-a-cc também cresce ao longo do tempo e a R_p de LETA-a-cc cresce entre dois e seis dias, sendo que nas outras medições, manteve-se estável.

Acredita-se que foi confirmada a formação qualitativa e quantitativa do filme passivador nas amostras de REF-a-cc e ACBC-a-cc. Ademais, que esse filme formado no aço em ambiente com ACBC é mais protetor que o formado na amostra em REF-cc, corroborando com os resultados de Almeida *et al.* (2015), Almeida *et al.* (2019) e Gromboni *et al.* (2020).

Figura 56 - Resistência à polarização do aço em REF-cc, ACBC-cc e LETA-cc ao longo do tempo de medição de EIS



Fonte: autora

Já para a LETA-a-cc, com as análises realizadas é possível afirmar que não apresentou um filme passivador bem formado sobre a amostra de aço ou, ao menos, esse filme é menos protetor que o formado em REF-a-cc e ACBC-a-cc.

5. CONCLUSÕES

Após a realização das análises acerca dos resultados obtidos, algumas conclusões foram traçadas. A inovação deste trabalho concentra-se no uso de solução de poros de concreto com adição de resíduos (ACBC e LETA) para estudo da corrosão de armaduras. Para isso, também foram utilizados compósitos cimentícios com esses resíduos para estudo da corrosão de armaduras.

Primeiramente, pôde-se verificar que é possível avaliar a corrosão de armaduras em concretos com incorporação de resíduos utilizando solução de poros de concreto. De fato, o uso das soluções tem limitações inerentes, pois o concreto armado em serviço é um eletrólito sólido. Entretanto, como um estudo precedido de avaliação de corrosão de armaduras em compósitos cimentícios, é interessante.

Após a realização de todos os experimentos em SPC alcalina e com agentes agressivos ao concreto armado, observou-se que, em geral, a incorporação de ACBC e LETA não afetaram negativamente a resistência à corrosão das armaduras nem a densidade de corrente no período de medição (aproximadamente 4 h). Especialmente, observou-se que a incorporação de LETA fez com que a resistência à corrosão aumentasse, bem como diminuísse a densidade de corrente, se mostrando um ambiente mais protetor ao aço nessa situação. Além disso, indícios eletroquímicos de formação do filme passivador foram encontrados nas amostras, indicando que, em princípio, nas condições delineadas no presente trabalho, os resíduos não interferem na formação do filme passivador.

Considerando o efeito eletroquímico nas armaduras após a incorporação de ACBC e LETA aos compósitos cimentícios, alguns aspectos merecem destaque. Primeiramente, durante o processo de cura do compósito cimentício, um filme passivador aparentemente se formou nas superfícies do aço em REF-cc e ACBC-cc, no período de 7 e 7-14 dias, respectivamente. Como visto pelos experimentos de EIS e SEM-EDS, o filme passivador formado no aço em ambiente com ACBC é mais

protetor do que o formado no aço na amostra cimentícia convencional e na amostra com LETA. A resistência do compósito cimentício com LETA foi similar à do REF-a-cc, mas a resistência à corrosão da armadura no meio com LETA foi inferior, levando à conclusão de que o filme passivador não foi bem formado na armadura nesse ambiente, diferentemente do que foi concluído nas análises em SPC.

Já em meio de cloretos, em longas exposições, os valores de R_p , CPE e C são semelhantes para o compósito cimentício com e sem adição de ACBC sugerindo que o aço sofre um processo de corrosão semelhante em ambos os ambientes. No caso da armadura em compósito cimentício com LETA, como o filme passivador não foi bem formado no aço, a resistência à corrosão foi consideravelmente menor comparada ao ambiente sem esse resíduo.

Portanto, além de destinar corretamente os resíduos agroindustriais, o uso do ACBC não prejudica a resistência à corrosão da armadura, possibilitando a utilização deste material para concreto estrutural. Já o uso de LETA nos compósitos cimentícios não é indicado para estruturas de concreto armado para fins estruturais em ambientes marinhos.

Embora haja essa limitação no uso do concreto com 3% LETA em substituição à areia, ressalta-se o fato de que a maioria das cidades no Brasil e no mundo não são litorâneas e, portanto, existe um grande potencial para aplicação deste compósito na construção civil. Especialmente, deve-se notar que o LETA é um resíduo que requer pouco processamento antes de ser utilizado, portanto, possui vantagens econômicas em relação à areia natural, cada vez mais escassa e de custo crescente. Além disso, é possível encontrar LETA em todas as regiões do Brasil, facilitando o acesso e reduzindo o custo e emissões relacionadas ao transporte do local de retirada ao de aplicação final.

Por todos os motivos citados, o concreto com incorporação ACBC e LETA é ecologicamente correto e pode ser aplicado na construção civil tanto em termos técnicos como científicos.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como foi mencionado ao longo deste trabalho, as medições eletroquímicas de armaduras em solução de poros de concreto deste trabalho foram feitas após 1 h de exposição do aço nas soluções, totalizando aproximadamente 4 h de medição. Acredita-se que trabalhos futuros possam realizar um estudo semelhante com diferentes tempos de imersão, por exemplo, 24 h, 48 h e 144 h, seguindo, por exemplo, o estudo de Gromboni *et al.* (2020). Dessa maneira, seria possível afirmar a qualidade do filme passivador até sua completa formação, bem como o provável rompimento desse filme no aço imerso nas soluções agressivas.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 10004 - Resíduos sólidos – Classificação**Rio de Janeiro, 2004.
- ABNT. **NBR 7480 - Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - especificação**Rio de Janeiro, 2007.
- ABNT. **NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto — Procedimento (Design of concrete structures - Procedure)**Rio de Janeiro, 2014.
- ACHON, C. L.; BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. Resíduos de estações de tratamento de água e a ISO 24512: Desafio do saneamento brasileiro. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 115–122, 2013.
- ADDARI, D.; ELSENER, B.; ROSSI, A. Electrochemistry and surface chemistry of stainless steels in alkaline media simulating concrete pore solutions. **Electrochimica Acta**, v. 53, n. 27, p. 8078–8086, 2008.
- ADEWUMI, A. A. et al. Corrosion behaviour of carbon steel and corrosion resistant steel under elevated temperature and chloride concentration in simulated concrete pore solution. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 25, n. 3, p. 452–467, 2021.
- ALEIXO, L. M. **Voltametria: conceitos e técnicas**. Disponível em: <www.chemkeys.com>. Acesso em: 5 nov. 2019.
- ALMEIDA, F. C. R. et al. **Sugarcane bagasse ash sand (SBAS): Brazilian agroindustrial by-product for use in mortar****Construction and Building Materials**, 2015.
- ALMEIDA, F. C. R. et al. Use of sugarcane bagasse ash sand (SBAS) as corrosion retardant for reinforced Portland slag cement concrete. **Construction and Building Materials**, v. 226, p. 72–82, 2019.
- ALMEIDA, F. DO C. R. **Avaliação do potencial de corrosão de armaduras em concreto com substituição parcial do agregado miúdo pela areia de cinza do bagaço de cana-de-açúcar (ACBC)**. [s.l.] Universidade Federal de São Carlos, 2013.
- ALVAREZ, S. M.; BAUTISTA, A.; VELASCO, F. Corrosion behaviour of corrugated lean duplex stainless steels in simulated concrete pore solutions. **Corrosion Science**, v. 53, n. 5, p. 1748–1755, 2011.
- AMIN, N. U. Use of bagasse ash in concrete and its impact on the strength and chloride resistivity. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 23, n. 5, p. 717–720, 2011.
- ANTONY, J. Full factorial designs. In: **Fundamentals of Design of Experiments for Engineers and Scientists**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003a. p. 54–72.
- ANTONY, J. Fundamentals of Design of Experiments. In: **Design of Experiments for Engineers and Scientists**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003b. p. 6–16.
- ANWAR, M. S. et al. Study of Pitting Resistance of Rebar Steels in Jakarta

Coastal Using Simulated Concrete Pore Solution. **Procedia Engineering**, v. 171, p. 517–525, 2017.

ASTM. **ASTM C876-91 Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete** Philadelphia, 1991.

ASTM. **ASTM G46-94 (reapproved 2018) Annual Book of ASTM Standards** Philadelphia, 2018. Disponível em: <<http://www.astm.org/Standards/G46.htm>>

ASTM INTERNATIONAL. **G1 - 03 Standard Practice for Preparing , Cleaning , and Evaluating Corrosion Test Significance** Philadelphia, 2011.

ASTM INTERNATIONAL. **C876 - 15 - Standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in concrete** Philadelphia, 2015.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C876-15 - Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete** Philadelphia, 2016.

ASTM INTERNATIONAL. **G1-03 - Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test**, 2017.

BABAE, M.; CASTEL, A. Chloride diffusivity, chloride threshold, and corrosion initiation in reinforced alkali-activated mortars: Role of calcium, alkali, and silicate content. **Cement and Concrete Research**, v. 111, n. May, p. 56–71, 2018.

BARD, A. J.; FAULKNER, L. R. **Electrochemical Methods Fundamentals and Applications**. 2nd ed. ed. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 2001.

BAUTISTA, A. et al. Changes in the passive layer of corrugated austenitic stainless steel of low nickel content due to exposure to simulated pore solutions. **Corrosion Science**, v. 51, n. 4, p. 785–792, 2009.

BEG, S. et al. Application of Design of Experiments (DoE) in Pharmaceutical Product and Process Optimization. In: **Pharmaceutical Quality by Design**. [s.l.] Elsevier Inc., 2019. p. 43–64.

BEN MANSOUR, H.; DHOUBI, L.; IDRISSE, H. Effect of Phosphate-based inhibitor on prestressing tendons corrosion in simulated concrete pore solution contaminated by chloride ions. **Construction and Building Materials**, v. 171, p. 250–260, 2018.

BENZINA MECHMECHE, L. et al. Investigation of the early effectiveness of an amino-alcohol based corrosion inhibitor using simulated pore solutions and mortar specimens. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 3, p. 167–173, 2008.

BRIZ, E.; BIEZMA, M. V.; BASTIDAS, D. M. Stress corrosion cracking of new 2001 lean–duplex stainless steel reinforcements in chloride contained concrete pore solution: An electrochemical study. **Construction and Building Materials**, v. 192, p. 1–8, 2018.

BUSARI, A. A. et al. Response Surface Analysis of the Corrosion Effect of Metakaolin in Reinforced Concrete. **Silicon**, v. 13, n. 7, p. 2053–2061, 2021.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8a edição ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros técnicos e

científicos Editora S.A., 2012.

CAO, F. et al. The corrosion inhibition effect of phytic acid on 20SiMn steel in simulated carbonated concrete pore solution. **Corrosion Science**, v. 100, p. 365–376, 2015.

CAO, Y. et al. Multifunctional inhibition based on layered double hydroxides to comprehensively control corrosion of carbon steel in concrete. **Corrosion Science**, v. 126, n. July, p. 166–179, 2017.

CASCUDO, O. **Influência das características do aço carbono destinado ao uso como armadura para concreto armado no comportamento frente à corrosão.** [s.l.] Universidade de São Paulo, 2000.

CASCUDO, O.; HELENE, P. R. L. **Produção e obtenção de barras e fios de aço para concreto armado** São Paulo Escola Politécnica da Usp/ Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia, , 2000.

CHALHOUB, C.; FRANÇOIS, R.; CARCASSES, M. Determination of chloride threshold initiating corrosion: A new set-up taking the localized aspect of corrosion into account. **Cement and Concrete Research**, v. 124, n. June, p. 105825, 2019.

CHEN, C. et al. Effect of sulfate ions on corrosion of reinforced steel treated by DNA corrosion inhibitor in simulated concrete pore solution. **Construction and Building Materials**, v. 228, p. 116752, 2019.

CHEN, M. et al. Novel Ca-SLS-LDH nanocomposites obtained via lignosulfonate modification for corrosion protection of steel bars in simulated concrete pore solution. **Applied Clay Science**, v. 211, 2021.

CHEN, W. et al. Study on the corrosion behavior of reinforcing steel in simulated concrete pore solutions using in situ Raman spectroscopy assisted by electrochemical techniques. **Electrochimica Acta**, v. 55, n. 20, p. 5677–5682, 2010.

CHING, C. Y. et al. Sustainable production of concrete with treated alum sludge. **Construction and Building Materials**, v. 282, p. 122703, 2021.

CHRISTENSEN, B. J. et al. Impedance Spectroscopy of Hydrating Cement-Based Materials: Measurement, Interpretation, and Application. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 77, n. 11, p. 2789–2804, 1994.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns.** 4a edição ed. São Paulo: Editora Blüncher, 2008.

CORDEIRO, J. S. Processamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água (ETAs). In: **Aproveitamento do Lodo Gerado em Estações de Tratamento de Água e Esgotos Sanitários, Inclusive com a Utilização de Técnicas Consorciadas com Resíduos Sólidos Urbanos.** [s.l: s.n.]. v. 2p. 121–142.

CRIADO, M. et al. Steel protection using sol-gel coatings in simulated concrete pore solution contaminated with chloride. **Surface and Coatings Technology**, v. 258, p. 485–494, 2014.

CRIADO, M. et al. Steel corrosion in simulated carbonated concrete pore solution its protection using sol-gel coatings. **Progress in Organic Coatings**, v. 88, p. 228–236, 2015.

CUBIDES, Y.; CASTANEDA, H. Corrosion protection mechanisms of carbon nanotube and zinc-rich epoxy primers on carbon steel in simulated concrete pore solutions in the presence of chloride ions. **Corrosion Science**, v. 109, p. 145–161, 2016.

DI FRANCO, F. et al. Heterogeneous crystallization of zinc hydroxystannate on galvanized steel for enhancing the bond strength at the rebar/concrete interface. **Chemical Engineering Journal**, v. 405, 2021.

DING, L.; POURSAEE, A. The impact of sandblasting as a surface modification method on the corrosion behavior of steels in simulated concrete pore solution. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 591–599, 2017.

DOBIAS, D.; POKORNY, P.; PERNICOVA, R. Evaluation of Resistance of Intermetallic Fe-Zn Coating in the Model Environment as Concrete Pore Solution. **Procedia Engineering**, v. 172, p. 226–231, 2017.

DONG, B.; WEN, X.-D.; FENG, L. Temperature Effect on Corrosion Behavior of 304LN Stainless Steel and Carbon Steel Rebars in Chloride Contaminated Concrete Pore Solution Using Electrochemical Method. **International Journal of Electrochemical Science**, v. 15, n. 11, p. 10844–10853, 2020.

DONG, Z. H. et al. The role of inhibitors on the repassivation of pitting corrosion of carbon steel in synthetic carbonated concrete pore solution. **Electrochimica Acta**, v. 56, n. 17, p. 5890–5897, 2011.

DONG, Z. H.; SHI, W.; GUO, X. P. Initiation and repassivation of pitting corrosion of carbon steel in carbonated concrete pore solution. **Corrosion Science**, v. 53, n. 4, p. 1322–1330, 2011.

DUFFÓ, G. S.; FARINA, S. B. Electrochemical behaviour of steel in mortar and in simulated pore solutions: Analogies and differences. **Cement and Concrete Research**, v. 88, p. 211–216, 2016.

ELSHAMI, A. et al. Effectiveness of corrosion inhibitors in simulated concrete pore solution. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 24, n. 13, p. 2130–2150, 2020.

ETIM, I.-I. N. et al. Effect of organic silicon quaternary ammonium salts on mitigating corrosion of reinforced steel induced by SRB in mild alkaline simulated concrete pore solution. **Journal of Materials Science and Technology**, v. 64, p. 126–140, 2021.

ETTEYEB, N. et al. Protection of reinforcement steel corrosion by phenyl phosphonic acid pre-treatment PART I: Tests in solutions simulating the electrolyte in the pores of fresh concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 55, p. 241–249, 2014.

FARINA, S. B.; DUFFÓ, G. S. Corrosion of zinc in simulated carbonated concrete pore solutions. **Electrochimica Acta**, v. 52, n. 16, p. 5131–5139, 2007.

FAZAYEL, A. S.; KHORASANI, M.; SARABI, A. A. The effect of functionalized polycarboxylate structures as corrosion inhibitors in a simulated concrete pore solution. **Applied Surface Science**, v. 441, p. 895–913, 2018.

FEI, F. L. et al. Corrosion performance of steel reinforcement in simulated concrete pore solutions in the presence of imidazoline quaternary ammonium salt corrosion inhibitor. **Construction and Building Materials**, v. 70, p. 43–53, 2014.

FENG, X. et al. The degradation of passive film on carbon steel in concrete pore solution under compressive and tensile stresses. **Electrochimica Acta**, v. 58, n. 1, p. 258–263, 2011.

FENG, X. et al. The effects of deformation on corrosion behavior of stainless steel in chlorides contaminated concrete pore solution. **International Journal of Electrochemical Science**, v. 10, n. 12, p. 10677–10688, 2015.

FENG, X. et al. The effect of deformation on metastable pitting of 304 stainless steel in chloride contaminated concrete pore solution. **Corrosion Science**, v. 103, p. 223–229, 2016.

FENG, X. et al. The corrosion inhibition efficiency of aluminum tripolyphosphate on carbon steel in carbonated concrete pore solution. **Corrosion Science**, v. 124, n. November 2016, p. 150–159, 2017a.

FENG, X. et al. The corrosion inhibition efficiency of aluminum tripolyphosphate on carbon steel in carbonated concrete pore solution. **Corrosion Science**, v. 124, n. November 2016, p. 150–159, 2017b.

FENG, X.; TANG, Y.; ZUO, Y. Influence of stress on passive behaviour of steel bars in concrete pore solution. **Corrosion Science**, v. 53, n. 4, p. 1304–1311, 2011.

FIGUEIRA, R. B. et al. Chloride threshold value to initiate reinforcement corrosion in simulated concrete pore solutions: The influence of surface finishing and pH. **Construction and Building Materials**, v. 141, p. 183–200, 2017a.

FIGUEIRA, R. B. et al. Chloride threshold value to initiate reinforcement corrosion in simulated concrete pore solutions: The influence of surface finishing and pH. **Construction and Building Materials**, v. 141, p. 183–200, 2017b.

FIGUEIRA, R. B.; SILVA, C. J. R.; PEREIRA, E. V. Hot-dip galvanized steel dip-coated with ureasilicate hybrid in simulated concrete pore solution: Assessment of coating morphology and corrosion protection efficiency. **Progress in Organic Coatings**, v. 88, p. 245–255, 2015.

FRANCO-LUJÁN, V. A. et al. Chloride-induced reinforcing steel corrosion in ternary concretes containing fly ash and untreated sugarcane bagasse ash. **Construction and Building Materials**, v. 198, p. 608–618, 2019.

FRANÇOIS, R.; LAURENS, S.; DEBY, F. **Corrosion and its consequences for reinforced concrete structures**. Londres: Elsevier Ltd, 2018.

FRAZÃO, C. et al. An experimental study on the corrosion susceptibility of Recycled Steel Fiber Reinforced Concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 96, n. November 2018, p. 138–153, 2019.

FREIRE, L. et al. The passive behaviour of AISI 316 in alkaline media and the effect of pH: A combined electrochemical and analytical study. **Electrochimica Acta**, v. 55, n. 21, p. 6174–6181, 2010.

GARCÉS, P. et al. Corrosion of reinforcing steel in neutral and acid solutions

simulating the electrolytic environments in the micropores of concrete in the propagation period. **Corrosion Science**, v. 47, n. 2, p. 289–306, 2005.

GARCÉS, P. et al. Influence of pH on the nitrite corrosion inhibition of reinforcing steel in simulated concrete pore solution. **Corrosion Science**, v. 53, n. 12, p. 3991–4000, 2011.

GARTNER, N.; KOSEC, T.; LEGAT, A. The efficiency of a corrosion inhibitor on steel in a simulated concrete environment. **Materials Chemistry and Physics**, v. 184, p. 31–40, 2016.

GENTIL, V. **Corrosão**. 2a edição ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros técnicos e científicos Editora S.A., 1996.

GERDAU. **Vergalhões Gerdau**. Disponível em: <<https://www2.gerdau.com.br/produtos/vergalhao-gerdau>>. Acesso em: 18 nov. 2020.

GHODS, P. et al. The effect of concrete pore solution composition on the quality of passive oxide films on black steel reinforcement. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 1, p. 2–11, 2009.

GHODS, P. et al. Angle-resolved XPS study of carbon steel passivity and chloride-induced depassivation in simulated concrete pore solution. **Corrosion Science**, v. 58, p. 159–167, 2012.

GHODS, P. et al. Nano-scale study of passive films and chloride-induced depassivation of carbon steel rebar in simulated concrete pore solutions using FIB/TEM. **Cement and Concrete Research**, v. 47, p. 55–68, 2013.

GHORBANI, S. et al. Mechanical and durability behaviour of concrete with granite waste dust as partial cement replacement under adverse exposure conditions. **Construction and Building Materials**, v. 194, p. 143–152, 2018a.

GHORBANI, S. et al. Improving corrosion resistance of steel rebars in concrete with marble and granite waste dust as partial cement replacement. **Construction and Building Materials**, v. 185, p. 110–119, 2018b.

GHOSH, R.; SINGH, D. D. N. Kinetics, mechanism and characterisation of passive film formed on hot dip galvanized coating exposed in simulated concrete pore solution. **Surface and Coatings Technology**, v. 201, n. 16–17, p. 7346–7359, 2007.

GROMBONI, M. F. et al. Impact of agro-industrial waste on steel corrosion susceptibility in media simulating concrete pore solutions. **Journal of Cleaner Production**, 2020.

GUNAY, H. B. et al. Characterization of atomic structure of oxide films on carbon steel in simulated concrete pore solutions using EELS. **Applied Surface Science**, v. 274, p. 195–202, 2013a.

GUNAY, H. B. et al. Characterization of atomic structure of oxide films on carbon steel in simulated concrete pore solutions using EELS. **Applied Surface Science**, v. 274, p. 195–202, 2013b.

GUPTA, T. et al. Behaviour of waste rubber powder and hybrid rubber concrete in aggressive environment. **Construction and Building Materials**, v. 217, p. 283–291, 2019.

HEMKEMEIER, T. A. et al. Carbonatação e penetração de cloretos em compósitos cimentícios com incorporação de lodo de estação de tratamento de água. **Principia IFPB**, 2021.

HOU, L. et al. Corrosion behavior and flexural performance of reinforced concrete/ultrahigh toughness cementitious composite (RC/UHTCC) beams under sustained loading and shrinkage cracking. **Construction and Building Materials**, v. 198, p. 278–287, 2018.

HUET, B. et al. Electrochemical behavior of mild steel in concrete: Influence of pH and carbonate content of concrete pore solution. **Electrochimica Acta**, v. 51, n. 1, p. 172–180, 2005.

HUSSAIN, R. R. et al. Time-dependent variation of the electrochemical impedance for thermo-mechanically treated versus plain low alloy steel rebars in contact with simulated concrete pore solution. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 283–288, 2014.

INABA, H.; KIMURA, M.; YOKOKAWA, H. An analysis of the corrosion resistance of low chromium-steel in a wet CO₂ environment by the use of an electrochemical potential diagram. **Corrosion Science**, v. 38, n. 9, p. 1449–1461, 1996.

JI, H. et al. Passivation and depassivation of HPB335 carbon steel in simulated concrete pore solution. **International Journal of Electrochemical Science**, v. 15, p. 6488–6507, 2020.

JIANG, J. Y. et al. The passive film growth mechanism of new corrosion-resistant steel rebar in simulated concrete pore solution: Nanometer structure and electrochemical study. **Materials**, v. 10, n. 4, 2017a.

JIANG, L. et al. Influence of chloride salt type on threshold level of reinforcement corrosion in simulated concrete pore solutions. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 516–521, 2012.

JIANG, L. et al. Influence of compression fatigue on chloride threshold value for the corrosion of steels in simulated concrete pore. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 699–704, 2014.

JIANG, S. et al. Deoxyribonucleic acid as an inhibitor for chloride-induced corrosion of reinforcing steel in simulated concrete pore solutions. **Construction and Building Materials**, v. 150, p. 238–247, 2017b.

JIN, M. et al. Fabrication and characterization of pseudo reference electrode based on graphene-cement composites for corrosion monitoring in reinforced concrete structure. **Construction and Building Materials**, v. 204, p. 144–157, 2019.

JIN, Z. et al. Preparation of phytic acid conversion coating and corrosion protection performances for steel in chlorinated simulated concrete pore solution. **Corrosion Science**, v. 139, n. January, p. 275–288, 2018.

JOHARI, M. et al. The effect of carboxylate compounds on controlling nitrite's environmental side effects for carbon steel corrosion protection in the simulated concrete pore solution. **Construction and Building Materials**, v. 308, 2021.

KAPAT, C.; PRADHAN, B.; BHATTACHARJEE, B. Potentiostatic study of

reinforcing steel in chloride contaminated concrete powder solution extracts. **Corrosion Science**, v. 48, n. 7, p. 1757–1769, 2005.

KARTHICK, S. et al. Reliability and long-term evaluation of GO-MnO₂ nano material as a newer corrosion monitoring sensor for reinforced concrete structures. **Cement and Concrete Composites**, v. 100, n. March, p. 74–84, 2019.

KOGA, G. Y. et al. A comparative study of mild steel passivation embedded in Belite-Ye'elimite-Ferrite and Portland cement mortars. **Electrochimica Acta**, v. 261, p. 66–77, 2018.

KOGA, G. Y. et al. Effect of endogenous chloride contamination on the electrochemical and hydration responses of reinforced Belite-Ye'elimite-Ferrite (BYF) cement mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 122, n. April, p. 212–226, 2019a.

KOGA, G. Y. et al. **Effect of endogenous chloride contamination on the electrochemical and hydration responses of reinforced Belite-Ye'elimite-Ferrite (BYF) cement mortars** **Cement and Concrete Research**, 2019b.

KOGA, G. Y. et al. Effect of endogenous chloride contamination on the electrochemical and hydration responses of reinforced Belite-Ye'elimite-Ferrite (BYF) cement mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 122, n. April, p. 212–226, ago. 2019c.

KOGA, G. Y.; ALBERT, B.; NOGUEIRA, R. P. Revisiting the ASTM C876 standard for corrosion of reinforcing steel: On the correlation between corrosion potential and polarization resistance during the curing of different cement mortars. **Electrochemistry Communications**, v. 94, n. July, p. 1–4, 2018.

KOUŘIL, M.; NOVÁK, P.; BOJKO, M. Threshold chloride concentration for stainless steels activation in concrete pore solutions. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 3, p. 431–436, 2010.

LEE, H. S. et al. Corrosion mitigation of steel rebars in chloride contaminated concrete pore solution using inhibitor: An electrochemical investigation. **Construction and Building Materials**, v. 173, p. 443–451, 2018a.

LEE, H. S. et al. Corrosion mitigation of steel rebars in chloride contaminated concrete pore solution using inhibitor: An electrochemical investigation. **Construction and Building Materials**, v. 173, p. 443–451, 2018b.

LI, M. The Effect of Environmental Conditions on Electrochemical Corrosion Behavior of AISI 1018 Low-carbon Steel in Concrete Pore Solution. **International Journal of Electrochemical Science**, v. 16, p. 1–9, 2021.

LI, S.; ZHANG, J. Effect of Silicon Addition on Electrochemical Corrosion Resistance of Carbon Steel in Concrete Pore Solution. **International Journal of Electrochemical Science**, v. 15, p. 11700–11708, 2020.

LIANG, H. et al. Electrochemical performance of corroded reinforced concrete columns strengthened with fiber reinforced polymer. **Composite Structures**, v. 207, n. May 2018, p. 576–588, 2019.

LIU, G. et al. Corrosion behavior of steel submitted to chloride and sulphate ions

in simulated concrete pore solution. **Construction and Building Materials**, v. 115, p. 1–5, 2016.

LIU, G. et al. Study of depassivation of carbon steel in simulated concrete pore solution using different equivalent circuits. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 357–362, 2017a.

LIU, M. et al. Corrosion behavior of Cr modified HRB400 steel rebar in simulated concrete pore solution. **Construction and Building Materials**, v. 93, p. 884–890, 2015.

LIU, M. et al. Corrosion behavior of low-Cr steel rebars in alkaline solutions with different pH in the presence of chlorides. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, v. 803, n. September, p. 40–50, 2017b.

LIU, R. et al. Influence of carbonation on chloride-induced reinforcement corrosion in simulated concrete pore solutions. **Construction and Building Materials**, v. 56, p. 16–20, 2014.

LIU, W. et al. Discussion and experiments on the limits of chloride, sulphate and shell content in marine fine aggregates for concrete. **Construction and Building Materials**, v. 159, p. 725–733, 2017c.

LIU, X. et al. Effect of dissolved oxygen, temperature, and pH on polarization behavior of carbon steel in simulated concrete pore solution. **Electrochimica Acta**, v. 366, 2021.

LIU, Y. et al. Effect of ginger extract as green inhibitor on chloride-induced corrosion of carbon steel in simulated concrete pore solutions. **Journal of Cleaner Production**, v. 214, p. 298–307, 2019.

LONGUET, P.; BURGLIN, L.; ZELWER, A. La phase liquide du ciment hydrate. **Rev mater constr**, 1973.

LÓPEZ, D. A. et al. The influence of carbon steel microstructure on corrosion layers: An XPS and SEM characterization. **Applied Surface Science**, v. 207, n. 1–4, p. 69–85, 2003.

LUO, H. et al. Passivation and electrochemical behavior of 316L stainless steel in chlorinated simulated concrete pore solution. **Applied Surface Science**, v. 400, p. 38–48, 2017a.

LUO, H. et al. Effect of cold deformation on the corrosion behaviour of UNS S31803 duplex stainless steel in simulated concrete pore solution. **Corrosion Science**, v. 124, n. February, p. 178–192, 2017b.

MA, X. et al. Automatic detection of steel rebar in bridge decks from ground penetrating radar data. **Journal of Applied Geophysics**, v. 158, p. 93–102, 2018.

MAMMOLITI, L. HANSS.; HANSSON, C. M.; HOPE, B. B. Corrosion inhibitors in concrete Part II: effect on chloride threshold values for corrosion of steel in synthetic pore solutions. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 10, p. 1583–1589, 1999.

MAMMOLITI, L. T. et al. The influence of surface finish of reinforcing steel and pH of the test solution on the chloride threshold concentration for corrosion initiation in synthetic pore solution. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 4, p. 545–550,

1996.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 4ª edição ed. São Paulo: Ibracon, 2014.

MENNUCCI, M. M. et al. Evaluation of benzotriazole as corrosion inhibitor for carbon steel in simulated pore solution. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 6, p. 418–424, 2009.

MEYER, Y. A. et al. EIS Investigation of the Corrosion Behavior of Steel Bars Embedded into Modified Concretes with Eggshell Contents. **Metals**, v. 12, n. 3, p. 417, 2022.

MINDESS, S. Resistance of Concrete to Destructive Agencies. In: **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**. 5. ed. [s.l.] Elsevier Ltd., 2019. p. 251–283.

MING, J.; SHI, J.-J. Chloride resistance of Cr-bearing alloy steels in carbonated concrete pore solutions. **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**, v. 27, n. 4, p. 494–504, 2020.

MONTEMOR, M. F.; SIMÕES, A. M. P.; SALTA, M. M. Effect of fly ash on concrete reinforcement corrosion studied by EIS. **Cement and Concrete Composites**, v. 22, n. 3, p. 175–185, 2000.

MORENO, M. et al. Corrosion of reinforcing steel in simulated concrete pore solutions effect of carbonation and chloride content. **Corrosion Science**, v. 46, n. 11, p. 2681–2699, 2004.

MORETTI, J. P. **Estudo da viabilidade técnica da utilização da ACBC e do RCC na composição de concretos**. [s.l.] Universidade Federal de São Carlos, 2014.

MORETTI, J. P. **Incorporação de resíduo agroindustrial em matrizes cimentícias**. [s.l.] Universidade Federal de São Carlos, 2018.

MOSER, R. D. et al. Chloride-induced corrosion resistance of high-strength stainless steels in simulated alkaline and carbonated concrete pore solutions. **Corrosion Science**, v. 57, p. 241–253, 2012.

MOSER, R. D. et al. Crevice corrosion and environmentally assisted cracking of high-strength duplex stainless steels in simulated concrete pore solutions. **Construction and Building Materials**, v. 203, p. 366–376, 2019.

MUNDRA, S. et al. Chloride-induced corrosion of steel rebars in simulated pore solutions of alkali-activated concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 100, n. October 2016, p. 385–397, 2017.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5ª edição ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

OGUNSANYA, I. G.; HANSSON, C. M. The semiconductor properties of passive films and corrosion behavior of stainless steel reinforcing bars in simulated concrete pore solution. **Materialia**, v. 6, n. April, p. 100321, 2019.

PACEWSKA, B. et al. Modification of the properties of concrete by a new pozzolan - A waste catalyst from the catalytic process in a fluidized bed. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 1, p. 145–152, 2002.

PENG, Y. et al. Effect of simulated pore solution on passivation characteristic of

P110 steel. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 167, n. February, p. 949–956, 2018.

PEREZ, N. **Electrochemistry and corrosion science**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2004. v. 111

POURSAEE, A.; HANSSON, C. M. Reinforcing steel passivation in mortar and pore solution. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 7, p. 1127–1133, 2007.

PRADHAN, B.; BHATTACHARJEE, B. Corrosion zones of rebar in chloride contaminated concrete through potentiostatic study in concrete powder solution extracts. **Corrosion Science**, v. 49, n. 10, p. 3935–3952, 2007.

PRASAD, N. K. et al. On the novel approach of sacrificial cathodic protection of mild steel in simulated concrete pore solution and concrete mortar by high phosphorus pig iron anodes. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 14, p. 582–608, 2021.

QIU, J. et al. Effect of Temperature on Corrosion of Carbon Steel in Simulated Concrete Pore Solution under Anoxic Conditions. **Corrosion Science**, v. 175, 1 out. 2020.

QU, L. et al. Chloride corrosion resistance of double-layer anticorrosive coating in simulated concrete pore solution. **Construction and Building Materials**, v. 295, 2021.

REFAIT, P. H.; ABDELMOULA, M.; GÉNIN, J.-M. R. Mechanisms of Formation and Structure of Green Rust One in Aqueous Corrosion of Iron in the. **Corrosion Science**, v. 40, n. 9, p. 1547–1560, 1998.

RENGARAJU, S.; NEELAKANTAN, L.; PILLAI, R. G. Investigation on the polarization resistance of steel embedded in highly resistive cementitious systems – An attempt and challenges. **Electrochimica Acta**, v. 308, p. 131–141, 2019.

RESS, J. et al. pH-Triggered Release of NaNO₂ Corrosion Inhibitors from Novel Colophony Microcapsules in Simulated Concrete Pore Solution. **ACS applied materials & interfaces**, v. 12, n. 41, p. 46686–46700, 14 out. 2020.

RESS, J. et al. Protection of carbon steel rebars by epoxy coating with smart environmentally friendly microcapsules. **Coatings**, v. 11, n. 2, p. 1–12, 2021.

REZENDE, M. DE A. M. **Matriz cimentícia produzida com resíduo agroindustrial: reação álcali-agregado, ataque por sulfatos e passivação do aço**. [s.l.] Universidade Federal de São Carlos, 2019.

RIBEIRO, D. V.; SOUZA, C. A. C.; ABRANTES, J. C. C. Use of Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) to monitoring the corrosion of reinforced concrete. **Revista Ibracon de estruturas e materiais**, v. 8, n. 4, p. 529–546, 2015.

RIBEIRO, D. V. et al. **Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto: Teoria, Controle e Técnicas de Análise e Intervenção**. 2a edição ed. São Paulo: Elsevier Brasil, 2018.

RIBEIRO, D. V.; LABRINCHA, J. A.; MORELLI, M. R. Effect of the addition of red mud on the corrosion parameters of reinforced concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 1, p. 124–133, 2012.

RILEM. **RILEM TC 154-EMC - Half-cell potential measurements - Potential mapping on reinforced concrete structures** Londres, 2003.

RUAN, T. et al. The impact of fire and fire extinguishing method on the corrosion behavior of the steel bars in concrete pore solution. **Fire Safety Journal**, v. 78, p. 196–201, 2015.

SALES, A.; DE SOUZA, F. R. Concretes and mortars recycled with water treatment sludge and construction and demolition rubble. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 6, p. 2362–2370, 2009.

SALES, A.; SOUZA, F. R. Concretes and mortars recycled with water treatment sludge and construction and demolition rubble. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 6, p. 2362–2370, 2009.

SÁNCHEZ, M. et al. Anodic growth of passive layers on steel rebars in an alkaline medium simulating the concrete pores. **Electrochimica Acta**, v. 52, n. 1, p. 47–53, 2006.

SÁNCHEZ, M. et al. Electrochemical impedance spectroscopy for studying passive layers on steel rebars immersed in alkaline solutions simulating concrete pores. **Electrochimica Acta**, v. 52, n. 27 SPEC. ISS., p. 7634–7641, 2007.

SAREMI, M.; MAHALLATI, E. A study on chloride-induced depassivation of mild steel in simulated concrete pore solution. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 12, p. 1915–1921, 2002.

SCOTT, A.; ALEXANDER, M. G. Effect of supplementary cementitious materials (binder type) on the pore solution chemistry and the corrosion of steel in alkaline environments. **Cement and Concrete Research**, v. 89, p. 45–55, 2016.

SCRIVENER, K. et al. Advances in understanding cement hydration mechanisms. **Cement and Concrete Research**, v. 124, n. August, p. 105823, 2019.

SHAHEEN, F.; PRADHAN, B. Effect of chloride and conjoint chloride-sulfate ions on corrosion of reinforcing steel in electrolytic concrete powder solution (ECPS). **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 99–112, 2015.

SHAHEEN, F.; PRADHAN, B. Influence of sulfate ion and associated cation type on steel reinforcement corrosion in concrete powder aqueous solution in the presence of chloride ions. **Cement and Concrete Research**, v. 91, p. 73–86, 2016.

SHANMUGAPRIYA, S.; PRABHAKAR, P.; RAJENDRAN, S. Corrosion Resistance Property of Mild Steel in Simulated Concrete Pore Solution Prepared in Well Water by Using an Aqueous Extract of Turmeric. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 2, p. 8789–8795, 2017.

SHI, J. et al. Influence of chloride concentration and pre-passivation on the pitting corrosion resistance of low-alloy reinforcing steel in simulated concrete pore solution. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 805–813, 2016.

SHI, J. et al. Role of red mud in natural passivation and chloride-induced depassivation of reinforcing steels in alkaline concrete pore solutions. **Corrosion Science**, v. 190, 2021.

SHUBINA HELBERT, V. et al. Rhamnolipids as an eco-friendly corrosion inhibitor

of rebars in simulated concrete pore solution: evaluation of conditioning and addition methods. **Corrosion Engineering Science and Technology**, v. 55, n. 2, p. 91–102, 2020.

SIDDIQUE, S. et al. Sustainable utilisation of ceramic waste in concrete: Exposure to adverse conditions. **Journal of Cleaner Production**, v. 210, p. 246–255, 2018.

SINGH, D. D. N.; GHOSH, R. Molybdenum-phosphorus compounds based passivator to control corrosion of hot dip galvanized coated rebars exposed in simulated concrete pore solution. **Surface and Coatings Technology**, v. 202, n. 19, p. 4687–4701, 2008.

SINGH, D.; YADAV, S. Role of tannic acid based rust converter on formation of passive film on zinc rich coating exposed in simulated concrete pore solution. **Surface and Coatings Technology**, v. 202, n. 8, p. 1526–1542, 2007.

SINGH, J. K.; SINGH, D. D. N. The nature of rusts and corrosion characteristics of low alloy and plain carbon steels in three kinds of concrete pore solution with salinity and different pH. **Corrosion Science**, v. 56, p. 129–142, 2011.

SONG, Z. et al. Using ultrasonic wave to trigger microcapsule inhibitor against chloride-induced corrosion of carbon steel in simulated concrete pore solution. **Construction and Building Materials**, v. 311, 2021.

SOUZA, F. R. DE. **Estudo da eco-eficiência de argamassas e concretos reciclados com resíduos de estações de tratamento de água e de construções e demolições**. [s.l.] Universidade Federal de São Carlos, 2006.

SU, M. NI et al. A solution for sea-sand reinforced concrete beams. **Construction and Building Materials**, v. 204, p. 586–596, 2019.

TAHERI, S. A review on five key sensors for monitoring of concrete structures. **Construction and Building Materials**, v. 204, p. 492–509, 2019.

TAJI, I. et al. Application of statistical analysis to evaluate the corrosion resistance of steel rebars embedded in concrete with marble and granite waste dust. **Journal of Cleaner Production**, v. 210, p. 837–846, 2018.

TAN, Y. T.; WIJESINGHE, S. L.; BLACKWOOD, D. J. The inhibitive effect of bicarbonate and carbonate ions on carbon steel in simulated concrete pore solution. **Corrosion Science**, v. 88, p. 152–160, 2014.

TANG, F. et al. Electrochemical behavior of enamel-coated carbon steel in simulated concrete pore water solution with various chloride concentrations. **Electrochimica Acta**, v. 92, p. 36–46, 2013.

TANG, W. C. et al. Influence of red mud on mechanical and durability performance of self-compacting concrete. **Journal of Hazardous Materials**, v. 379, n. March, p. 120802, 2019.

TANG, Y. M. et al. Corrosion behavior of steel in simulated concrete pore solutions treated with calcium silicate hydrates. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 252–256, 2011.

TANG, Y.; ZHANG, G.; ZUO, Y. The inhibition effects of several inhibitors on

rebar in acidified concrete pore solution. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 327–332, 2011.

TENG, W.; LI, X. Comparative Study on Electrochemical Corrosion Behavior of B500SD Carbon Steel and 2205 Duplex Stainless Steel Exposed to Concrete Pore Solution Containing Chloride Ions. **International Journal of Electrochemical Science**, v. 16, n. 7, p. 1–9, 2021.

TEYMOURI, F. et al. A comprehensive study on the inhibition behaviour of four carboxylate-based corrosion inhibitors focusing on efficiency drop after the optimum concentration for carbon steel in the simulated concrete pore solution. **Construction and Building Materials**, v. 296, 2021.

TIAN, Y. et al. The micro-solution electrochemical method to evaluate rebar corrosion in reinforced concrete structures. **Construction and Building Materials**, v. 151, p. 607–614, 2017.

TIAN, Y. et al. The effect of nickel on corrosion behaviour of high-strength low alloy steel rebar in simulated concrete pore solution. **Construction and Building Materials**, v. 246, 2020.

TORBATI-SARRAF, H.; POURSAEE, A. Corrosion of coupled steels with different microstructures in concrete environment. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 680–687, 2018a.

TORBATI-SARRAF, H.; POURSAEE, A. Study of the passivation of carbon steel in simulated concrete pore solution using scanning electrochemical microscope (SECM). **Materialia**, v. 2, n. May, p. 19–22, 2018b.

TORBATI-SARRAF, H.; POURSAEE, A. The influence of phase distribution and microstructure of the carbon steel on its chloride threshold value in a simulated concrete pore solution. **Construction and Building Materials**, v. 259, 30 out. 2020.

UTHAMAN, S. et al. Enhanced seawater corrosion resistance of reinforcement in nanophase modified fly ash concrete. **Construction and Building Materials**, v. 221, p. 232–243, 2019.

VELEVA, L. et al. Comparative cyclic voltammetry and surface analysis of passive films grown on stainless steel 316 in concrete pore model solutions. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, v. 537, n. 1–2, p. 85–93, 2002.

VELEVA, L. et al. Voltammetry and surface analysis of AISI 316 stainless steel in chloride-containing simulated concrete pore environment. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, v. 578, n. 1, p. 45–53, 2005.

VERBRUGGEN, H. et al. Molybdate-phosphate conversion coatings to protect steel in a simulated concrete pore solution. **Surface and Coatings Technology**, v. 361, n. December 2018, p. 280–291, 2019.

VERBRUGGEN, H.; TERRY, H.; DE GRAEVE, I. Inhibitor evaluation in different simulated concrete pore solution for the protection of steel rebars. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 887–896, 2016.

VOLPI, E. et al. Electrochemical characterization of mild steel in alkaline solutions simulating concrete environment. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, v. 736, p.

38–46, 2014.

WANG, P. et al. Effectiveness protection performance of an internal blending organic corrosion inhibitor for carbon steel in chloride contaminated simulated concrete pore solution. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 18, n. 3, p. 116–128, 2020.

WANG, X.-P. et al. Study on effect of chloride ions on corrosion behavior of reinforcing steel in simulated polluted concrete pore solutions by scanning micro-reference electrode technique. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, v. 895, 2021.

WANG, Y. et al. The adsorption and inhibition effect of calcium lignosulfonate on Q235 carbon steel in simulated concrete pore solution. **Applied Surface Science**, v. 379, p. 98–110, 2016.

WANG, Y. QI et al. Inhibitive effect of sodium molybdate on the corrosion behavior of galvanized steel in simulated concrete pore solution. **Construction and Building Materials**, v. 162, p. 383–392, 2018.

WANG, Y.; ZUO, Y. The adsorption and inhibition behavior of two organic inhibitors for carbon steel in simulated concrete pore solution. **Corrosion Science**, v. 118, p. 24–30, 2017.

WANG, Y.; ZUO, Y.; TANG, Y. Inhibition effect and mechanism of sodium oleate on passivation and pitting corrosion of steel in simulated concrete pore solution. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 197–204, 2018.

WILLIAMSON, J.; ISGOR, O. B. The effect of simulated concrete pore solution composition and chlorides on the electronic properties of passive films on carbon steel rebar. **Corrosion Science**, v. 106, p. 82–95, 2016.

WU, M.; MA, H.; SHI, J. Enhanced corrosion resistance of reinforcing steels in simulated concrete pore solution with low molybdate to chloride ratios. **Cement and Concrete Composites**, v. 110, 2020.

WU, M.; SHI, J. Beneficial and detrimental impacts of molybdate on corrosion resistance of steels in alkaline concrete pore solution with high chloride contamination. **Corrosion Science**, v. 183, 2021.

XIONG, C. et al. Preparation of phytic acid conversion coating and corrosion protection performances for steel in chlorinated simulated concrete pore solution. **Corrosion Science**, v. 139, n. May, p. 275–288, 2018.

XIONG, L. et al. Corrosion behaviors of Q235 carbon steel under imidazoline derivatives as corrosion inhibitors: Experimental and computational investigations. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 14, n. 2, 2021.

XU, H. et al. Corrosion behavior of reinforcing steel in simulated concrete pore solutions: A scanning micro-reference electrode study. **Electrochimica Acta**, v. 54, n. 16, p. 4067–4072, 2009.

XU, P. et al. Influence of sulfate salt type on passive film of steel in simulated concrete pore solution. **Construction and Building Materials**, v. 223, p. 352–359, 2019.

XU, P. et al. Corrosion inhibition efficiency of compound nitrite with D-sodium

gluconate on carbon steel in simulated concrete pore solution. **Construction and Building Materials**, v. 288, 2021.

YANG, H. et al. Preparation of corrosion inhibitor loaded zeolites and corrosion resistance of carbon steel in simulated concrete pore solution. **Construction and Building Materials**, v. 225, p. 90–98, 2019.

YE, C. Q. et al. EIS analysis on chloride-induced corrosion behavior of reinforcement steel in simulated carbonated concrete pore solutions. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, v. 688, p. 275–281, 2012.

YU, H.; CHIANG, K. T. K.; YANG, L. Threshold chloride level and characteristics of reinforcement corrosion initiation in simulated concrete pore solutions. **Construction and Building Materials**, v. 26, n. 1, p. 723–729, 2011.

YUAN, X. et al. Natural passivation behavior and its influence on chloride-induced corrosion resistance of stainless steel in simulated concrete pore solution. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 6, p. 12378–12390, 2020.

ZHANG, F.; PAN, J.; LIN, C. Localized corrosion behaviour of reinforcement steel in simulated concrete pore solution. **Corrosion Science**, v. 51, n. 9, p. 2130–2138, 2009.

ZHANG, M. Crack-free Sol-Gel Coatings for Corrosion Protection of Carbon steel in concrete pore solution: An electrochemical corrosion investigation. **International Journal of Electrochemical Science**, v. 16, p. 1–8, 2021.

ZHANG, S. et al. A study on the interaction between chloride ions and CO₂ towards carbon steel corrosion. **Corrosion Science**, v. 167, n. July 2019, p. 108531, 2020.

ZHANG, Z. Influence of threshold chloride concentration on corrosion behavior of low-alloy steel rebar in concrete pore solutions. **International Journal of Electrochemical Science**, v. 15, p. 9864–9873, 2020.

ZHAO, Y. et al. Corrosion inhibition efficiency of triethanolammonium dodecylbenzene sulfonate on Q235 carbon steel in simulated concrete pore solution. **Corrosion Science**, v. 158, n. February, p. 108097, 2019.

ZHENG, H. et al. Influence of calcium ion in concrete pore solution on the passivation of galvanized steel bars. **Cement and Concrete Research**, v. 108, n. October 2017, p. 46–58, 2018a.

ZHENG, H. et al. Influence of chloride ion on depassivation of passive film on galvanized steel bars in concrete pore solution. **Construction and Building Materials**, v. 166, p. 572–580, 2018b.

ZHIYONG, A. et al. Passive behaviour of new alloy corrosion resistant steel Cr10Mo1 in simulating concrete pore solutions with different chloride contents. **Key Engineering Materials**, v. 711, p. 1053–1060, 2016.

ZHU, J. H. et al. Effectiveness of a dual-functional intervention method on the durability of reinforced concrete beams in marine environment. **Construction and Building Materials**, v. 222, p. 633–642, 2019.

ZUO, J. et al. Preparation of MgAl layered double hydroxides intercalated with

nitrite ions and corrosion protection of steel bars in simulated carbonated concrete pore solution. **Corrosion Science**, v. 152, n. March, p. 120–129, 2019.

APÊNDICE A

A Tabela 26 compreende a síntese da revisão bibliográfica, ou seja, todos os artigos científicos publicados em periódicos indexados encontrados acerca do tema avaliação da corrosibilidade de armaduras de concreto, até a data de redação deste texto.

Tabela 26 - Tabela sinóptica da revisão bibliográfica: principais artigos que apresentaram estudos sobre corrosão de armaduras em solução de poros de concreto simulada

Título	Autores (ano)	Objetivo(s)	Armadura	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
The influence of surface finish of reinforcing steel and pH of the test solution on the chloride threshold concentration for corrosion initiation in synthetic pore solution	Mammoliti; Brown; Hansson; Hope (1996)	Verificar se a situação da superfície da armadura e a concentração de Cl^- influenciam na iniciação do processo corrosivo.	- Barra de aço para construção embutida em resina epóxi e desengordurada; - Barra de aço para construção embutida em resina epóxi desengordurada e lixada na lixa 600; - Barra de aço para construção embutida em resina epóxi, desengordurada, lixada e polida metalograficamente.	- $Ca(OH)_2$ saturada (pH 12,5); - $Ca(OH)_2$ saturada contendo NaOH e KOH (pH 13,3).	- CV.	- O pH das SPC é determinante na iniciação da corrosão mesmo com concentrações de $Cl^- > 10\%$; - A condição da superfície do aço é essencial para definir o valor limite de concentração de Cl^- na iniciação da corrosão.
Corrosion inhibitors in concrete Part II: effect on chloride threshold values for corrosion of steel in synthetic pore solutions	Mammoliti; Hansson; Hope (1999)	Avaliar inibidores de corrosão através da determinação da quantidade de cloreto tolerável para não iniciar a atividade corrosiva.	- Barra de aço para construção embutida em resina epóxi e desengordurada; - Barra de aço para construção embutida em resina epóxi desengordurada e lixada na lixa 600; - Barra de aço para construção embutida em resina epóxi, desengordurada, lixada e polida metalograficamente.	$Ca(OH)_2$ saturada contendo NaOH e KOH (pH 13,3) com inibidores e deaerada com N_2 e aerada com O_2 .	- CV.	- Inibição de corrosão depende mais da interação do inibidor com o compósito cimentício que com o aço, pois o inibidor não foi efetivo em SPC e foi em corpos de prova.

Título	Autores (ano)	Objetivo(s)	Armadura	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
Comparative cyclic voltammetry and surface analysis of passive films grown on stainless steel 316 in concrete pore model solutions	Veleva; Alpuche-Aviles; Graves-Brook; Wipf (2002)	Obter informações sobre o filme passivo formado em aço inoxidável com dois tipos de SPC.	Amostra de aço embutida em resina epóxi desengordurada, lixada e polida.	- Ca(OH) ₂ saturada (pH 12,7); - Solução de cimento (pH 12,7).	- CV; - AFM e OM; - XPS.	- O filme passivador formado na solução de cimento é mais protetor que o da solução de Ca(OH) ₂ (mais homogêneo e cobre o metal completamente); - O filme passivador formado na solução de cimento possui Si e S, compostos do cimento; - A formação de filmes passivadores em armaduras deve ser natural, não por meio de polarização, pois a polarização gera filmes mais resistentes que os formados naturalmente.
A study on chloride-induced depassivation of mild steel in simulated concrete pore solution	Saremi; Mahallati (2002)	Estudar o efeito da concentração de cloreto na estabilidade do filme passivo no aço imerso em SPC.	Amostra de aço lixada.	Solução de Ca(OH) ₂ saturada associada a várias concentrações de cloreto.	- CV; - EIS.	- A corrente de pico é máxima no limite da concentração de Cl ⁻ que mantém o filme passivo; - O potencial de corrosão e a corrente de pico são reduzidas na maior concentração de Cl ⁻ , pois o metal entra em corrosão generalizada; - A inclusão de Cl ⁻ na SPC causa grande decréscimo de Rp, devido à quebra do filme passivo; - A capacitância do filme passivador aumenta significativamente quando o filme passivador é quebrado.
Corrosion of reinforcing steel in simulated concrete pore solutions effect of carbonation and chloride content	Moreno; Morris; Alvarez; Duffó (2004)	Avaliar os efeitos da concentração de cloretos em SPC nas características de polarização e taxa de corrosão do aço.	Amostra de aço embutida em resina epóxi desengordurada.	Várias soluções contendo cloreto e carbonatos.	- OCP; - LPR.	- Em solução altamente alcaline e em solução mais concentrada de carbonatos, o aço permanece passivo mesmo em potencial de evolução de hidrogênio; - O aço em solução de cloreto sofre corrosão por pite e, em solução de carbonato, generalizada; - O aumento do pH e aumento de carbonatos aumenta a resistência à corrosão do aço quanto à corrosão localizada.

Título	Autores (ano)	Objetivo(s)	Armadura	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
Voltammetry and surface analysis of AISI 316 stainless steel in chloride-containing simulated concrete pore environment	Veleva; Alpuche-Aviles; Graves-Brook; Wip (2005)	Investigar as diferenças existentes entre o aço inoxidável imerso em SPC e o aço inoxidável imerso em SPC com cloreto.	Amostra de aço embutida em resina epóxi desengordurada, lixada e polida.	- Ca(OH) ₂ saturada (pH 12,7); - Solução de cimento (pH 12,7).	- CV; - AFM.	O aço imerso em solução de Ca(OH) ₂ apresentou corrosão generalizada enquanto o aço imerso em solução de cimento apresentou corrosão por pites, mostrando que a solução de Ca(OH) ₂ não representa a realidade.
Electrochemical behavior of mild steel in concrete: Influence of pH and carbonate content of concrete pore solution	Huet; L'Hostis; Miserque; Idrissi (2005)	Avaliar a despassivação do aço em SPC carbonatada.	Amostra de aço (%C <0,02% - aço ferrítico) embutida em resina epóxi desengordurada e lixada.	Várias soluções contendo cloreto e carbonatos.	- LSV; - XPS.	- A passivação do aço em soluções de pH entre 10 e 13 ocorreu após 1 dia de imersão; - Análise de XPS mostrou que o filme formado tem menos de 10 nm de espessura e é composto principalmente por Fe ³⁺ ; - A transição do estado passivo para o ativo de corrosão não deve ser investigada em termos de pH, mas em termos de potencial de eletrodo e efeito tampão de carbonato.
Corrosion of reinforcing steel in neutral and acid solutions simulating the electrolytic environments in the micropores of concrete in the propagation period	Garcés; Andrade; Saez; Alonso (2005)	Avaliar a corrosão generalizada e por pites em diversas soluções com pH e concentrações de Cl ⁻ diferentes.	Amostra de aço com área de exposição definida por fita adesiva, desengordurada e lixada.	Várias soluções contendo cloretos com diferentes valores de pH.	- LSV; - LPR; - EIS.	A concentração de Cl ⁻ influencia significativamente na taxa de corrosão em região alcalina. Quando o pH é mais baixo, a concentração de Cl ⁻ não exerce influência na taxa de corrosão.
Potentiostatic study of reinforcing steel in chloride contaminated concrete powder solution extracts	Kapat; Pradhan; Bhattacharjee (2005)	Avaliar as zonas de corrosão (ativa, passiva, de pite e semi-imune) de três tipos de aços imersos em solução de pó de concreto.	- Amostra de aço trefilado a frio embutido em resina epóxi; - Amostra de aço tratado termomecanicamente com cobre embutido em resina epóxi; - Amostra de aço tratado termomecanicamente com cobre e cromo embutido em resina epóxi.	Solução de água deionizada, pó extraído de corpo de prova de concreto e CaCl ₂ .	- LSV.	A partir de curvas traçadas de potencial vs. concentração de cloreto, observa-se que a quantidade de cloreto influencia fortemente na situação do aço em relação às zonas de corrosão, independentemente do tipo de aço.

Título	Autores (ano)	Objetivo(s)	Armadura	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
Anodic growth of passive layers on steel rebars in an alkaline medium simulating the concrete pores	Sánchez; Gregori; Alonso; García-Jareño; Vicente (2006)	Estudar a aplicabilidade da teoria do modelo de defeito pontual (PDM) para analisar a impedância eletroquímica de filmes passivos crescidos anodicamente em armadura imersa em solução alcalina.	Amostras de aço cobertas com tinta cataforética, embutidas em resina epóxi e desengorduradas.	Solução de Ca(OH)_2 saturado com adição de 0,2M de KOH (pH 13,2).	- EIS; - CV.	A transferência de carga pode ser calculada independente do potencial no PMD e resultou no caráter semicondutor do tipo n das camadas passivas no Fe, condizente com a literatura. Consequentemente, a teoria PDM parece válida para interpretar os espectros EIS correspondentes ao estado passivo de um vergalhão de aço imerso em meio alcalino, simulando os poros do concreto.
Kinetics, mechanism and characterisation of passive film formed on hot dip galvanized coating exposed in simulated concrete pore solution	Ghosh; Singh (2007)	Estudar técnicas para o desenvolvimento de uma camada passiva protetora e ecológica correta em revestimentos de armadura galvanizados.	Amostra de aço galvanizado lixada e desengordurada.	Solução de 8,33 g/l NaOH + 2 g/l CaO + 3,36 g/l KOH com adição de NaCl 1%.	- EIS; - CV; - Espectroscopia de Raman; - SEM; - XRD.	O revestimento estudado proporcionou ao aço uma taxa de corrosão muito menor que o aço sem revestimento. Raman e XRD confirmaram a formação de uma camada de hidrozincita na superfície do aço.
Corrosion zones of rebar in chloride contaminated concrete through potentiostatic study in concrete powder solution extracts	Pradhan; Bhattacharjee (2007)	Determinar diferentes zonas de corrosão para três tipos de aço em solução de pó de concreto com cloreto, preparados a partir de três tipos diferentes de cimento, três razões a / c e duas condições de teste (com e sem deaeração).	- Amostra de aço trefilado a frio embutido em resina epóxi; - Amostra de aço tratado termomecanicamente com cobre embutido em resina epóxi; - Amostra de aço tratado termomecanicamente com cobre e cromo embutido em resina epóxi.	Solução de água deionizada, pó extraído de corpo de prova de concreto e CaCl_2 .	- LSV.	A partir de curvas traçadas de potencial vs. concentração de cloreto, observa-se que a quantidade de cloreto influencia fortemente na situação do aço em relação às zonas de corrosão, independentemente do tipo de aço. As zonas de corrosão podem ser utilizadas para identificar o potencial de mudança para imunizar um vergalhão e identificar um estado de corrosão.

Título	Autores (ano)	Objetivo(s)	Armadura	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
Electrochemical impedance spectroscopy for studying passive layers on steel rebars immersed in alkaline solutions simulating concrete pores	Sánchez; Gregori; Alonso; García-Jareño; Takenouti; Vicente (2007)	Apresentar as possibilidades de uso da técnica de EIS para estudar o crescimento de filme passivo em armaduras imersas em SPC.	Amostras de aço cobertas com tinta cataforética, embutidas em resina epóxi e desengorduradas.	Solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ saturado com adição de 0,2M de KOH (pH 13,2).	- Monitoramento de OCP; - EIS.	<ul style="list-style-type: none"> - A EIS se mostrou uma boa técnica para avaliar a formação natural de filmes passivadores no aço sob o OCP; - O circuito equivalente muda conforme a condição do sistema. No caso, verificou-se para filme crescido naturalmente ou filme crescido sob aplicação de potencial; - Embora os filmes crescidos das duas formas tenham diferentes composições, em ambos os casos quando o potencial aumenta, o filme fica menos condutivo.
Corrosion of zinc in simulated carbonated concrete pore solutions	Farina; Duffó (2007)	Avaliar o comportamento do aço galvanizado com o aço-carbono aplicando algumas técnicas eletroquímicas em SPC.	Amostras de aço galvanizado e aço-carbono sem tratamento e embutidas em resina epóxi.	Várias SPC contendo carbonatos e cloreto.	- LSV; - SEM.	<ul style="list-style-type: none"> - Em SPC carbonatadas, a suscetibilidade de corrosão do aço galvanizado depende da concentração de carbonato e bicarbonato; - Em SPC com cloreto a corrosão do aço galvanizado aumenta; - Em situações em que se sabe que a carbonatação da estrutura ocorrerá, o aço galvanizado é uma boa alternativa para evitar deterioração precoce da estrutura.

Título	Autores (ano)	Objetivo(s)	Armadura	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
Reinforcing steel passivation in mortar and pore solution	Poursaei; Hanson (2007)	Determinar o tempo de formação do filme passivo no aço.	- Amostra de aço sem tratamento; - Amostra de aço lixada.	Solução contendo NaOH, KOH, CaSO ₂ .2H ₂ O, Ca(OH) ₂ e água deionizada.	- LPR; - Potencial de meia célula; - Espectroscopia de Raman.	- O aço imerso na SPC precisa de um tempo significativo para passivação, simulando o que acontece na realidade. Ocorre que normalmente nos laboratórios esse tempo não é respeitado. - Na SPC o potencial do aço estabiliza mais rápido que na argamassa. Isso possivelmente se deve ao fato de que o pH na SPC é constantemente alcalino e na argamassa é inicialmente neutro e vai aumentando conforme ocorrem as reações de hidratação do cimento.
Role of tannic acid based rust converter on formation of passive film on zinc rich coating exposed in simulated concrete pore solution	Singh; Yadav (2007)	Avaliar a corrosibilidade de aços tratados com ácido tânico ricos em zinco.	Amostra de aço tratada com ácido tânico.	Solução contendo 8,33 g/l NaOH + 2 g/l CaO + 3,36 g/l KOH, cloreto e sulfato.	- Monitoramento de OCP; - Espectroscopia de Raman; - EIS; - SEM; - EDS.	Aços tratados com ácido tânico ricos em zinco mostraram boa resistência à corrosão. O filme passivo formado por óxidos de zinco é compacto e protetor para o aço.
Electrochemistry and surface chemistry of stainless steels in alkaline media simulating concrete pore solutions	Addari; Elsener; Rossi (2008)	Avaliar a espessura, composição e estrutura eletrônica de filmes passivos formados em aços inoxidáveis imersos em SPC.	Amostras de aço inoxidável lixadas e polidas.	Soluções contendo: - 0,1M NaOH (pH 13); - 0,1M NaOH saturado com Ca(OH) ₂ (pH 13); - 0,25M KOH+0,02M NaOH+0,01M Na ₂ SO ₄ +0,0001M Ca(OH) ₂ (pH 13,7)	- Monitoramento de OCP; - LSV; - XPS.	A alta resistência do aço inoxidável à formação de pites em soluções alcalinas pode ser explicada pela composição do filme passivo, que é enriquecido com Cr e Ni.
Investigation of the early effectiveness of an amino-alcohol based corrosion inhibitor using simulated pore solutions and mortar specimens	Benzina Mechmeche; Dhoubi; Ben Ouezdou; Triki; Zucchi (2008)	Investigar a melhor forma de usar um amino-álcool para inibição de corrosão.	Aço para construção civil lixado, polido e desengordurado.	Várias soluções contendo ou não cloreto e inibidor.	- Monitoramento de OCP; - LSV; - OM.	O inibidor de corrosão utilizado mostrou boa inibição quando inserido antes do cloreto na SPC.

Título	Autores (ano)	Objetivo(s)	Armadura	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
Molybdenum-phosphorus compounds based passivator to control corrosion of hot dip galvanized coated rebars exposed in simulated concrete pore solution	Singh; Ghosh (2008)	Avaliar a corrosibilidade de aço galvanizado tratado termodinamicante em SPC contendo inibidor de corrosão de Mo e P.	Amostra de aço galvanizado por imersão de tratamento térmico lixada e desengordurada.	Solução contendo 8,33 g/l NaOH + 2 g/l CaO + 3,36 g/l KOH e inibidor de Mo e P.	- Monitoramento de OCP; - Espectroscopia de Raman; - XRD; SEM; - EIS.	O inibidor de corrosão com Mo e P apresentou um filme passivo estável.
Changes in the passive layer of corrugated austenitic stainless steel of low nickel content due to exposure to simulated pore solutions	Bautista; Blanco; Velasco; Gutiérrez; Soriano; Palomares; Takenouti (2009)	Avaliar um novo tipo de aço inoxidável a base de cobre com baixa porcentagem de Ni e alta porcentagem de Mn exposto a SPC contaminada com cloreto e carbonato.	Amostra do aço inoxidável estudado embutidas em resina epóxi e lixadas.	Soluções contendo Ca(OH) ₂ saturada (pH 12,6) com e sem 1% de NaCl e com e sem borbulhamento de CO ₂ (pH 9).	- Monitoramento do OCP; - EIS; - XPS.	- O filme passivo formado em SPC carbonatada tem menos cromo que a na não-carbonatada; - A presença de cloreto na SPC não muda a composição do filme passivo, mas promove uma pequena diferença na taxa de corrosão mostrada pela EIS; - O novo aço inoxidável estudado apresenta piora na passivação.
The effect of concrete pore solution composition on the quality of passive oxide films on black steel reinforcement	Ghods; Isgor; McRae; Miller (2009)	Relacionar a qualidade do filme passivo em aço-carbono com a composição da SPC.	Amostra de aço-carbono embutida em resina epóxi desengordurada e lixada.	10 soluções de Ca(OH) ₂ saturadas com concentrações diferentes de Ca(OH) ₂ , Na(OH), K(OH) e Ca(SO) ₂ +2H ₂ O.	- LSV; - EIS; - SEM.	- Íons comumente encontrados em poros de concretos (Ca ²⁺ , Na ⁺ , K ⁺ e (SO ₄) ²⁻) podem afetar o filme passivo de óxidos formados em aços-carbono; - Particularmente observou-se pelas curvas de polarização e EIS que (SO ₄) ²⁻ interfere negativamente na proteção do filme passivo; - São necessários ao menos oito dias para estabilização do OCP em amostras de aço não-tratadas.
Evaluation of benzotriazole as corrosion inhibitor for carbon steel in simulated pore solution	Mennucci; Banczek; Rodrigues; Costa (2009)	Investigar a corrosibilidade do CA-50 com inibidor de corrosão benzotriazole (BTAH) utilizado normalmente como inibidor de corrosão de cobre.	Amostra de aço CA-50 embutida em resina epóxi lixada e desengordurada.	Solução contendo KOH 2,8% + NaOH 0,4% + NaCl 3,5%.	- EIS; - LSV; - Espectroscopia de Raman; - OM; - SEM.	A adição de BTAH na SPC causou aumento significativo na resistência à corrosão do CA-50, associado à formação de um composto de Fe, Cl e BTAH que age como uma barreira ao ambiente agressivo ao aço.

Título	Autores (ano)	Objetivo(s)	Armadura	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
Corrosion behavior of reinforcing steel in simulated concrete pore solutions: A scanning micro-reference electrode study	Xu; Liu; Chen; Du; Lin (2009)	Estudar o comportamento corrosivo do aço para construção em SPC com diferentes valores de pH usando a técnica de escaneamento de SMRE para encontrar o pH crítico para ocorrência de corrosão localizada.	Amostra de aço de construção embutida em resina epóxi, polida e desengordurada.	Solução de Ca(OH)_2 saturada (pH 12,56) e solução de Ca(OH)_2 para ajustar o pH entre 12,56 e 9,78.	- SMRE; - SEM; - EDS.	- A técnica de SMRE se mostrou uma ferramenta poderosa para medição de potencial <i>in situ</i> ; - O mecanismo de iniciação de propagação do processo de formação de pites é complicado e afetado por muitos fatores; - Quanto menor o pH, mais instável é o filme passivo do aço; - O pH crítico de ocorrência de corrosão localizada é entre 11,46 e 11,31.
Localized corrosion behaviour of reinforcement steel in simulated concrete pore solution	Zhang; Pan; Lin (2009)	Investigar a influência da microestrutura na passivação e corrosão localizada de aço para concreto armado em SPC por meio da técnica de SKPFM.	Amostras de aço para concreto armado lixadas e polidas.	Solução de Ca(OH)_2 saturada com 0,6 mol/l de KOH e 0,2 mol/l de NaOH com cloreto e carbonato.	- OM; - Mapeamento de SKPFM; - LSV; - EIS; - AFM.	- A dissolução localizada ocorre preferencialmente nas bordas dos grãos de ferrita e nos grãos e perlita; - Inclusões de MnS leva a iniciação da corrosão por pites no aço para concreto armado.
Study on the corrosion behavior of reinforcing steel in simulated concrete pore solutions using in situ Raman spectroscopy assisted by electrochemical techniques	Chen; Du; Ye; Zhu; Lin (2010)	Estudar o comportamento corrosivo do aço para construção em SPC.	Amostras de aço para concreto armado embutidas em resina epóxi e lixadas.	Solução saturada de Ca(OH)_2 com cloreto.	- Espectroscopia de Raman; - EIS; - LSV; - SEM.	- A espectroscopia de Raman <i>in situ</i> juntamente com técnicas eletroquímicas se mostraram efetivas para estudar o comportamento corrosivo de aços para construção em SPC; - Mesmo em baixa quantidade de NaCl a espectroscopia de Raman mostrou picos de FeCO_3 na superfície do aço, indicando que o aço foi corroído.
Threshold chloride concentration for stainless steels activation in concrete pore solutions	Kouřil; Novák; Bojko (2010)	Resumir a resistência à corrosão de tipos básicos de aços inoxidáveis em SPC com íons cloro.	Amostras de cinco tipos de aços inoxidáveis lixadas com e sem tratamento térmico.	Solução saturada de Ca(OH)_2 (pH 12,5) e solução saturada de Ca(OH)_2 com adição de KOH (pH 13,5).	- LPR.	- Quanto mais lisas as superfícies, mais resistentes à corrosão se mostraram os aços; - O aumento do pH aumenta a proteção do aço, entretanto, essa mudança é menos efetiva que o tratamento da superfície do aço.
Corrosion behaviour of corrugated lean duplex stainless steels in simulated concrete pore solutions	Alvarez; Bautista; Velasco (2011)	Estudar o comportamento corrosivo de aços inoxidáveis de produção enxuta.	Amostras de aço inoxidáveis de produção enxuta, de aço inoxidável convencional e de aço-carbono.	Várias soluções contendo cloreto e carbonatos.	- LSV; - SEM.	Os estudos eletroquímicos mostraram que a resistência à corrosão do aço inoxidável de produção enxuta é similar à do aço inoxidável comumente utilizado.

Título	Autores (ano)	Objetivo(s)	Armadura	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
Initiation and repassivation of pitting corrosion of carbon steel in carbonated concrete pore solution	Dong; Shi; Guo (2011)	Investigar o efeito do Cl ⁻ e dos produtos de corrosão na iniciação e propagação de pites em aços-carbono, além de estudar a capacidade de repassivação do nitrito pela técnica de ruído eletroquímico.	Amostras de aço-carbono embutidas em anéis de Teflon lixadas e desengorduradas.	Solução saturada de Ca(OH) ₂ com adição de 0,1 mol/l de NaCl com e sem presença de carbonato.	- OM; - Ruído eletroquímico.	- A iniciação dos pites no aço aumenta com o tempo em SPC com cloreto e carbonato, chegando a um máximo devido ao preenchimento da superfície com óxidos de ferro; - O índice de inibição sugere que o nitrito pode reduzir a taxa de iniciação de pites e acelerar a repassivação do aço. - Nitrito e TEPA aceleram a repassivação do aço, aumentando a resistência à corrosão (o nitrito age mais rápido que a TEPA); - Nitrito e TEPA diminuem a densidade de doadores no filme passivo, aumentando a estabilidade do filme na presença de Cl ⁻ .
The role of inhibitors on the repassivation of pitting corrosion of carbon steel in synthetic carbonated concrete pore solution	Dong; Shi; Zhang; Guo (2011)	Estudar a interação entre inibidores de corrosão e o filme passivo para entender a estrutura do filme passivo e a repassivação através do uso de tetraetilenopentamina (TEPA) e nitrito.	Amostras de aço-carbono embutida em anéis de Teflon lixadas e desengorduradas.	Solução saturada de Ca(OH) ₂ com adição de NaHCO ₃ para simular pouca carbonatação de SPC.	- Ruído eletroquímico; - AFM; - MS.	- A formação do filme passivador em solução de cimento é mais rápida que em solução saturada de Ca(OH) ₂ . - A passivação do aço diminui conforme aumenta a carga aplicada. Quando o aço é deformado de forma plástica, o filme passivador sobre grave danificação e a repassivação fica muito dificultada. Isso pode ser explicado porque a carga gera microfissuras no aço que podem perfurar toda a espessura do filme.
Influence of stress on passive behaviour of steel bars in concrete pore solution	Feng; Tang; Zuo (2011)	Estudar o efeito de carga no comportamento passivante do aço em SPC com foco na repassivação do aço.	Amostras de aço desengorduradas, lixadas e polidas.	Solução de cimento Portland 1:2.	- Monitoramento de OCP; - EIS; - XPS.	- A tensão aplicada sobre o aço faz com que ele tenha sua resistência à corrosão diminuída e, conseqüentemente a impedância da superfície do aço diminui. - A carga de compressão gera mais danos à formação do filme passivo que a carga de tração.
The degradation of passive film on carbon steel in concrete pore solution under compressive and tensile stresses	Feng; Zuo; Tang; Zhao; Lu (2011)	Estudar o efeito de aços-carbono sujeitos às ações de compressão e tração na formação do filme passivo.	Amostras de aço-carbono desengorduradas, lixadas e polidas.	Solução de cimento Portland 1:2.	- EIS; - SEM.	- A tensão aplicada sobre o aço faz com que ele tenha sua resistência à corrosão diminuída e, conseqüentemente a impedância da superfície do aço diminui. - A carga de compressão gera mais danos à formação do filme passivo que a carga de tração.

Título	Autores (ano)	Objetivo(s)	Armadura	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
Influence of pH on the nitrite corrosion inhibition of reinforcing steel in simulated concrete pore solution	Garcés; Saura; Zornoza; Andrade (2011)	Discutir a influência do pH e da concentração de Cl ⁻ na despassivação e na cinética de corrosão de aços imersos em SPC com inibidor de nitrito.	Amostra de aço para concreto armado desengordurada e lixada.	Várias soluções com valores de pH diferentes.	- LPR; - EIS.	- A adição de nitrito na SPC mostrou significativa inibição de corrosão do aço em SPC alcalina e neutra em [NaNO ₂] = 0,1M.
The nature of rusts and corrosion characteristics of low alloy and plain carbon steels in three kinds of concrete pore solution with salinity and different pH	Singh; Singh (2011)	Estudar a relação entre a corrosão e a natureza dos óxidos formados em aços de baixa liga e carbono expostos em SPC com diferentes valores de pH.	Amostras de aço de baixa liga e aço-carbono.	Solução contendo 0,1 M NaOH + 0,175 M KOH com adição de NaCl.	- Espectroscopia de Raman; - XRD; - EIS.	- O aço de baixa liga demora entre 2 a 3 vezes menos para corroer que o aço-carbono, devido a maior presença de Cu e Cr em sua composição; - O XRD mostrou que os óxidos formados sobre o aço de baixa liga são mais estáveis.
Corrosion behavior of steel in simulated concrete pore solutions treated with calcium silicate hydrates	Tang; Miao; Zuo; Zhang; Wang (2011)	Estudar a influência do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) na concentração de Cl ⁻ em SPC com diferentes valores de pH.	Amostra de aço lixada e desengordurada.	Várias soluções com valores de pH diferentes e adição de Al e C-S-H.	- LSV; - EIS	- O C-S-H pode absorver cloreto na SPC; - Em SPC com pH entre 12,5 e 11,9, o pH decresce depois da adição de C-S-H (diminui a Rp do aço); - Em SPC com pH entre 10 e 9,3, após a adição de C-S-H o pH aumenta (aumenta a Rp).
The inhibition effects of several inhibitors on rebar in acidified concrete pore solution	Tang; Zhang; Zuo (2011)	Avaliar o efeito do tungstato de sódio, molibdato de sódio e fitato de sódio como inibidores de corrosão em SPC acidificada em comparação com inibidores de nitrito e o comercial RSA.	Amostras de aço embutidas em resina epóxi, desengorduradas e lixadas.	- Solução saturada de Ca(OH) ₂ (pH 12,5); - Solução saturada de Ca(OH) ₂ com adição de ácido sulfonítrico (pH 8).	- LSV; - EIS; - Espectroscopia de Raman.	- Em SPC alcalina, as curvas de polarização indicam uma zona de transição ativo-passivo e, nessa condição, os inibidores testados apresentaram boa inibição de corrosão em concentrações menores que 0,045%; - Em SPC acidificada, o aço se apresenta em zona ativa de corrosão e apenas o nitrito pode passivar o aço nessa condição e em concentração de 0,045%. Os outros inibidores precisaram de concentração de até 2% para passivarem o aço.

Título	Autores (ano)	Objetivo(s)	Armadura	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
Threshold chloride level and characteristics of reinforcement corrosion initiation in simulated concrete pore solutions	Yu; Chiang; Yang (2011)	Investigar a concentração limite de Cl ⁻ para não ativar a corrosão de aços para concreto.	Amostras de aço sem tratamento e expostas ao ambiente da Flórida por 6 dias e amostras de aço lixadas.	Várias soluções contendo cloreto.	- LPR.	<ul style="list-style-type: none"> - A resistência à corrosão de ambas amostras de aço (tratada e não) pode ser aumentada com o aumento do pH da SPC, sendo o aumento da amostra lixada maior; - Depois de iniciada a corrosão, pites mais severos foram observados em amostras lixadas, mas isso não pôde ser relacionado com a concentração de Cl⁻.
Angle-resolved XPS study of carbon steel passivity and chloride-induced depassivation in simulated concrete pore solution	Ghods; Burkan Isgor; Bensebaa; Kingston (2012)	Investigar, por meio de resolução de ângulo XPS, os filmes óxidos crescidos em aço para concreto em SPC.	Amostra de aço embutido em resina epóxi polido.	Solução de Ca(OH) ₂ , NaOH, KOH e CaSO ₄ (pH 13,3).	- XPS.	<ul style="list-style-type: none"> - A espessura do filme passivo em SPC foi determinada como sendo aproximadamente 5 nm; - A composição do filme é de Fe(II) na superfície com o aço e Fe(III) na superfície externa; - A adição de Cl⁻ diminui a espessura do filme e a quantidade de Fe(II) diminui.
Influence of chloride salt type on threshold level of reinforcement corrosion in simulated concrete pore solutions	Jiang; Huang; Xu; Zhu; Mo (2012)	Estudar o limite de concentração de KCl, NaCl, CaCl ₂ e MgCl ₂ para não iniciar a corrosão em aços imersos em SPC.	Amostra de ao para concreto armado embutida em resina epóxi lixada e desengordurada.	<ul style="list-style-type: none"> - Solução de Ca(OH)₂ saturada; - Solução de cimento. 	- LPR; - EIS.	<ul style="list-style-type: none"> - A adição de MgCl₂ e CaCl₂ reduz significativamente o pH das duas soluções estudadas; - Com o aumento da concentração de KCl, NaCl, CaCl₂ e MgCl₂, o potencial de corrosão do aço diminui e a densidade de corrente aumenta; - Em solução contendo apenas Ca(OH)₂ saturada, o único inibidor de corrosão é a concentração de hidroxila. Na solução de cimento, além da concentração de hidroxila, as ligações de cloretos podem afetar, sendo mais adequado para simular as soluções dos poros do concreto.

Título	Autores (ano)	Objetivo(s)	Armadura	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
Chloride-induced corrosion resistance of high-strength stainless steels in simulated alkaline and carbonated concrete pore solutions	Moser; Singh; Kahn; Kurtis (2012)	Estudar a resistência à corrosão de diferentes tipos de microestruturas de aços inoxidáveis.	Amostras de aços inoxidáveis sem tratamento de superfície.	- Solução de Ca(OH)_2 4 g/l (pH 12,5); - Solução de Ca(OH)_2 4 g/l + 0,3 M NaHCO_3 + 0,1 M Na_2CO_3 (pH 9,5).	- Monitoramento de OCP; - CV; - EDS.	- Em solução alcalina, todos os aços inoxidáveis de alta resistência apresentaram maior resistência à corrosão; - Resistência à corrosão em SPC carbonatada diminuiu para todos os aços menos o duplex de alta resistência S32205; - Os danos devido à corrosão no aço ocorreram tanto para os austeníticos quanto para os martensíticos.
EIS analysis on chloride-induced corrosion behavior of reinforcement steel in simulated carbonated concrete pore solutions	Ye; Hu; Dong; Zhang; Hou; Du; Lin; Pan (2012)	Estudar a concentração de cloreto que inicia a corrosão do aço m SPC através de EIS.	Amostra de aço embutida em resina epóxi, desengordura e lixada.	Solução de Ca(OH)_2 saturada com adição de NaHCO_3 (pH 10).	- LPR; - EIS; - SEM.	- EIS é uma técnica poderosa para investigar quando se inicia a corrosão no aço imerso em SPC; - Em solução de pH 10, a concentração de Cl^- crítica é de 0,01 mol/l e pelas imagens de SEM foi possível observar que em concentrações acima desse valor, o filme passivador é tão fino que se inicia um processo de corrosão localizada.
Nano-scale study of passive films and chloride-induced depassivation of carbon steel rebar in simulated concrete pore solutions using FIB/TEM	Ghods; Isgor; Carpenter; McRae; Gu (2013)	Estudar a composição estrutural do filme passivo formado no aço para concreto em SPC.	Amostra de aço embutida em resina epóxi desengordurada, lixada e polida.	- Solução de Ca(OH)_2 saturada (pH 12,5); - Solução saturada de Ca(OH)_2 contendo NaOH , KOH e CaSO_4 (pH 13,3).	- FIB; - TEM e EDS.	- A espessura do filme passivo no aço é entre 5 e 13 nm em ambas as soluções estudadas; - A composição do filme é basicamente óxidos de ferro; - A adição de cloreto em concentração abaixo do limite de zona ativa de corrosão não muda a morfologia do filme passivador no aço, apenas diminui o crescimento de óxidos na superfície; - O filme óxido na superfície do aço é composto de nano-cristais de FeOOH com célula unitária prismática; - As lamelas de cementita são a região preferencial de iniciação de corrosão por pites.

Título	Autores (ano)	Objetivo(s)	Armadura	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
Characterization of atomic structure of oxide films on carbon steel in simulated concrete pore solutions using EELS	Gunay; Ghods; Isgor; Carpenter; Wu (2013)	Uso da técnica de espectroscopia de perda de energia eletrônica para identificar a composição química de óxidos formados no aço-carbono em ambiente alcalino.	Amostra de aço-carbono embutida em resina epóxi desengordurada, lixada e polida.	- Solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ saturada (pH 12,5); - Solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ contendo NaOH , KOH e CaSO_4 (pH 13,3).	- TEM; - FIB; - EELS.	- O filme óxido formado no aço em ambiente alcalino é praticamente composto de $\text{Fe}(\text{II})\text{O}$, um óxido instável quando exposto a íons cloreto; - Na presença de cloreto, $\text{Fe}(\text{III})/\text{Fe}(\text{II})$ aumentam e a camada de óxido diminui.
Electrochemical behavior of enamel-coated carbon steel in simulated concrete pore water solution with various chloride concentrations	Tang; Cheng; Chen; Brow; Volz; Koenigstein (2013)	Estudar um revestimento de esmalte aplicado em aços para concreto armado quanto ao seu comportamento corrosivo em SPC.	Amostras de aço-carbono revestidas com três tipos de esmaltes diferentes (PE, ME e DE).	Solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ saturada.	- XRD; - SEM; - LPR; - EIS.	- Os três tipos de esmaltes são estáveis em ambiente alcalino na presença de Cl^- ; - Em $[\text{Cl}^-]$ entre 0,01 mol/l e 0,05 mol/l iniciou-se a corrosão por pites no aço com revestimento ME devido à abertura de canais na superfície, deixando o aço exposto ao cloreto. Os outros revestimentos permaneceram com baixa densidade de corrente nessa concentração de Cl^- .
Steel protection using sol-gel coatings in simulated concrete pore solution contaminated with chloride	Criado; Sobrados; Sanz; Bastidas (2014)	Utilizar técnicas eletroquímicas para estudar propriedades protetivas do poli-siloxano híbrido como revestimento de aço-carbono imerso em ambiente alcalino contaminado com cloreto.	Amostras de aço-carbono com revestimento.	Solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ saturada com 3% de NaCl .	- LSV; - SEM; - EIS.	Em longa exposição do aço revestido em solução contaminada com cloreto, os filmes sofreram degradação e ficaram porosos, facilitando a penetração do íon no aço e induzindo à corrosão. Entretanto, no aço com revestimento ainda se observa proteção contra corrosão pois sua resistência sempre é maior que a do aço.

Título	Autores (ano)	Objetivo(s)	Armadura	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
Protection of reinforcement steel corrosion by phenyl phosphonic acid pre-treatment PART I: Tests in solutions simulating the electrolyte in the pores of fresh concrete	Etteyeb; Dhouibi; Takenouti; Triki (2014)	Avaliar o efeito protetivo do ácido fenil-fosfônico como tratamento contra a corrosão de aço em SPC contaminada com água do mar.	Amostra de aço embutida em resina epóxi lixada.	Solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ saturada com 0,5 M de NaCl (pH 13) e 0,1 M de ácido fenil-fosfônico.	- LSV; - EIS; - EQCM; - SEM com EDS.	- O tratamento dado ao aço diminuiu a densidade de corrente e o estado passivo do aço foi melhorado substancialmente; - O filme passivo formado no aço tratado fornece proteção estimada em 99%; - EQCM mostrou que ao longo do tempo, no aço tratado, o filme passivador sofre um espessamento; - Na superfície do aço tratado foi encontrado fósforo, indicando a presença do inibidor de tratamento do aço.
Corrosion performance of steel reinforcement in simulated concrete pore solutions in the presence of imidazoline quaternary ammonium salt corrosion inhibitor	Fei; Hu; Wei; Yu; Chen (2014)	Estudar a performance de inibição de corrosão do aço em SPC na presença de inibidor de corrosão IQS comparado à inibidores de corrosão comerciais.	Amostra de aço para concreto armado selado com resina epóxi desengordurado e lixado.	Solução contendo $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 0,003%, NaOH 0,008%, KOH 0,005% e NaCl 3,5% (pH 13,35).	- LSV; - EIS; - SEM; - XRD.	- O inibidor IQS se mostrou superior aos inibidores comerciais em SPC contendo 3,5% de NaCl, aumentando a resistência à corrosão do aço e o limite de concentração de cloreto na solução; - Após 28 dias de imersão do aço na SPC com NaCl, na concentração de 1% de IQS não foram observados produtos de corrosão na superfície do aço.
Time-dependent variation of the electrochemical impedance for thermo-mechanically treated versus plain low alloy steel rebars in contact with simulated concrete pore solution	Hussain; Alhozaimy; Al-Negheimish; Singh (2014)	Estudar variáveis dependentes do tempo eletroquimicamente em aços para concreto tratados termicamente em comparação com aços sem tratamento térmico.	Amostras de aço sem e com tratamento térmico embutidas em resina epóxi, desengorduradas, lixadas e polidas.	Solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ saturada contendo 7,4 g de NaOH, 36,6 g de KOH e 3,5% de NaCl.	- Metalografia; - Monitoramento de OCP; - EIS.	No período inicial, o aço tratado termicamente apresentou maior R_p que o aço sem tratamento. Entretanto, após longa exposição do aço em SPC com cloreto, o aço sem tratamento aparentou ter menor espessura de óxidos em sua superfície que o aço tratado.

Título	Autores (ano)	Objetivo(s)	Armadura	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
Influence of compression fatigue on chloride threshold value for the corrosion of steels in simulated concrete pore	Jiang; Liu; Chu; Zhu; Xiong; You; Xu; Zhang; Qin (2014)	Investigar a influência da fadiga por compressão no limite de concentração de Cl ⁻ para ativar a corrosão em aços para concreto armado.	Amostra de aço carbono fadigada pelo teste de fadiga, lixada e desengordurada.	Solução de Ca(OH) ₂ saturada.	- LSV; - EIS; - OM.	O aço não fadigado teve sua capacitância diminuída gradualmente ao longo da exposição à SPC com cloreto. Já o aço fadigado não apresentou regularidade na oxidação do aço, pois o filme passivador se formou na superfície de forma não padronizada.
Influence of carbonation on chloride-induced reinforcement corrosion in simulated concrete pore solutions	Liu; Jiang; Xu; Xiong; Song (2014)	Examinar a influência da carbonatação na corrosão de armadura induzida por cloreto em SPC.	Amostra de aço embutida em resina epóxi, lixada, polida e desengordurada.	- Solução de Ca(OH) ₂ + KOH + NaOH; - Solução de cimento. Ambas com cloreto e várias concentrações de bicarbonato de sódio.	- EIS.	- Na solução de Ca(OH) ₂ + KOH + NaOH, o efeito do bicarbonato no comportamento corrosivo do aço depende da concentração de bicarbonato. Altas concentrações de bicarbonato aumenta a estabilidade do filme a resistência à corrosão do aço. Entretanto, na solução de cimento nenhuma relação entre o bicarbonato e o início da corrosão foi observado; - A solução de cimento é mais corrosiva que a outra solução, sendo mais representativa da realidade.
The inhibitive effect of bicarbonate and carbonate ions on carbon steel in simulated concrete pore solution	Tan; Wijesinghe; Blackwood (2014)	Elucidar sobre o comportamento corrosivo do aço em SPC carbonatada e com presença de cloreto.	Amostra de aço-carbono desengordurada e lixada.	Solução de Ca(OH) ₂ saturada com adição de NaCl e NaHCO ₃ .	- LPR; - CV; - EIS; - SEM.	A presença de carbonatos aumenta a polarização e a resistência à transferência de carga do aço-carbono, sendo a polarização e transferência de carga o dobro para pH 9 em relação ao pH 10 e pH 11 em alta concentração de cloreto. Aparentemente, os carbonatos ajudam a estabilizar o Fe(II) presente no filme passivo.

Título	Autores (ano)	Objetivo(s)	Armadura	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
Electrochemical characterization of mild steel in alkaline solutions simulating concrete environment	Volpi; Olietti; Stefanoni; Trasatti (2014)	Caracterizar o aço imerso em solução alcalina que simula a solução de poros do concreto.	Amostra de aço embutida em resina epóxi escovada com esponja de aço.	Solução de Ca(OH) ₂ saturada e 1 M de NaOH.	- CV; - LSV; - EIS.	- A voltametria cíclica se mostrou uma boa ferramenta para investigar os processos eletroquímicos que ocorrem na superfície do aço imerso em solução alcalina, que envolvem as transformações do Fe(II) e do Fe(III); - A polarização anódica indicou que, ao passar do tempo do aço imerso em solução alcalina, a transferência de carga diminui (formação de óxidos que propiciam a passivação aumenta).
The corrosion inhibition effect of phytic acid on 20SiMn steel in simulated carbonated concrete pore solution	Cao; Wei; Dong; Ke (2015)	Estudar o efeito do inibidor de corrosão IP6 em aço para concreto armado em SPC carbonatada na presença de íons cloreto.	Amostra de aço lixada e desengordurada embutida em resina epóxi.	Solução contendo: 0,045 mol/L NaHCO ₃ + 0,005 mol/l Na ₂ CO ₃ + 0,6 mol/l NaCl + 5,30 mmol/l IP6.	- Monitoramento de OCP; - LSV; - EIS; - OM; - Espectroscopia de Raman; - XPS.	- O IP6 possibilita a proteção do aço por meio da formação de um filme passivador em SPC carbonatada e atacada com cloreto; - O filme formado na presença de IP6 possui três camadas; - O IP6 possibilita uma proteção em dois estágios: 1) processo de limitação da difusão; 2) diminui a transferência de carga.
Steel corrosion in simulated carbonated concrete pore solution its protection using sol-gel coatings	Criado; Sobrados; Bastidas; Sanz (2015)	Estudar as propriedades protetivas do revestimento de polissiloxano para o aço em SPC.	Amostras de aço-carbono com e sem revestimento.	Solução contendo 0,5 mM NaHCO ₃ + 0,1 M Na ₂ CO ₃ (pH 8).	- SEM; - LSV; - EIS.	- Todos os tipos de revestimento polissiloxanos testados melhoraram a resistência à corrosão do aço.
The effects of deformation on corrosion behavior of stainless steel in chlorides contaminated concrete pore solution	Feng; Lu; Zuo; Zhuang; Chen (2015)	Estudar o comportamento de aço inoxidável deformado em SPC contaminada com cloreto quanto à formação de pites metaestáveis.	Amostra de aço inoxidável desengordurado e lixado.	Solução de cimento 1:5 com cloretos.	- MS; - LSV.	A densidade de corrente do aço inoxidável aumenta com o aumento da deformação do aço. Os pites sempre aumentam em amostras deformadas.

Título	Autores (ano)	Objetivo(s)	Armadura	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
Hot-dip galvanized steel dip-coated with ureasilicate hybrid in simulated concrete pore solution: Assessment of coating morphology and corrosion protection efficiency	Figueira; Silva; Pereira (2015)	Avaliar a morfologia e o potencial de inibição de corrosão de um revestimento de aço galvanizado a quente com ureassilicato.	Amostras de aço galvanizado a quente com revestimento de ureassilicato em uma etapa, duas e três.	Solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ saturada e 0,2 M de KOH (pH 13,2).	- GD-OES; - SEM com EDS; - LSV; - EIS.	- Quanto mais etapas de revestimento, maior a resistência à corrosão; - Independentemente do número de etapas de revestimento, o aço galvanizado revestido possui melhor capacidade de resistir a corrosão que o aço sem revestimento; - O revestimento estudado é facilmente produzido e é estável em solução alcalina.
Corrosion behavior of Cr modified HRB400 steel rebar in simulated concrete pore solution	Liu; Cheng; Li; Jin; Liu (2015)	Estudar o efeito do cromo no comportamento corrosivo do aço-carbono com adição de cromo na liga.	Amostras de aço-carbono com adição de Cr lixados e desengordurados.	Solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.	- EIS; - XPS.	- Os aços com Cr adicionado na liga possuem maior resistência à corrosão, apresentando baixa densidade de corrente; - A composição do filme passivador formado nos aços é óxido de ferro; - O aço com adição de 5% de Cr na liga foi o que apresentou maior resistência à corrosão.
The impact of fire and fire extinguishing method on the corrosion behavior of the steel bars in concrete pore solution	Ruan; Spandley; Johnson; Poursaee (2015)	Avaliar o comportamento corrosivo do aço para concreto armado em altas temperaturas (200 °C, 500 °C e 850 °C).	Amostras de aço submetidas a alta temperatura embutidas em resina epóxi após o resfriamento.	Solução contendo 0,1 mol/l de NaOH, 0,3 mol/l de KOH, 0,03 mol/l de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e 0,002 mol/l de $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$.	- Monitoramento do OCP; - LPR; - Metalografia.	Independentemente da temperatura, as amostras de aço sujeiras à altas temperaturas apresentaram maior taxa de corrosão.
Effect of chloride and conjoint chloride-sulfate ions on corrosion of reinforcing steel in electrolytic concrete powder solution (ECPS)	Shaheen; Pradhan (2015)	Estudar o efeito da contaminação da SPC por cloreto e sulfato na corrosão do aço para concreto armado.	Amostra de armadura de aço limpa com esponja de aço e embutida em resina epóxi.	Solução de pó extraído de corpo de prova de concreto com água deionizada 1:1.	- LSV; - XRD.	- A extensão da zona de passivação do aço diminui conforme aumenta a concentração de cloreto na SPC; - A extensão da zona passiva do aço é maior quando a SPC foi contaminada com cloreto+sulfato do que apenas com sulfato.
Corrosion protection mechanisms of carbon nanotube and zinc-rich epoxy primers on carbon steel in simulated concrete pore solutions in the presence of chloride ions	Cubides; Castaneda (2016)	Avaliar a influência dos nanotubos de carbono na proteção corrosiva de armaduras revestidas com nanotubos de carbono e primer rico em zinco em resina epóxi (CNT-ZRPs).	Amostra de aço com revestimento de nanotubos de carbono dispersos em resina epóxi.	Solução contendo 0,08 M de KOH, 0,02 M de NaOH, 0,001 M $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e 0,1 M de NaCl.	- EIS; - LEIS; - SEM com EDS; - XPS.	A presença de nanotubos de carbono diminui a porosidade da resina epóxi. Dessa forma, o revestimento promoveu uma barreira mecânica e catódica ao aço, pois o zinco é um metal de sacrifício para o ferro.

Título	Autores (ano)	Objetivo(s)	Armadura	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
Electrochemical behaviour of steel in mortar and in simulated pore solutions: Analogies and differences	Duffó; Farina (2016)	Determinar até que ponto o uso de soluções simuladas de poros permite prever o comportamento de vergalhões embutidos no concreto/ argamassa.	Amostras de aço para concreto armado desengorduradas.	Solução saturada de Ca(OH)_2 contendo 7,4 g de NaOH e 35,6 g de KOH por litro de Ca(OH)_2 (pH 13,2).	- Monitoramento de OCP; - LSV.	- Nas curvas de polarização observou-se um comportamento semelhante do aço nas argamassas e na SPC, mas com valores e parâmetros eletroquímicos diferentes; - Na SPC obtêm-se resultados mais conservadores; - Uso de SPC é útil para comparar diferentes tipos de aço, mas o comportamento não pode ser extrapolado para argamassas.
The efficiency of a corrosion inhibitor on steel in a simulated concrete environment	Gartner; Kosec; Legat (2016)	Caracterizar a influência de uma versão protótipo de um inibidor de corrosão orgânico para concreto armado em SPC.	Amostra de aço para concreto armado embutido em resina epóxi lixada.	Solução contendo 0,001% de Ca(OH)_2 e KOH para dar ao pH o valor de 10,5. Adição de concentrações variadas de cloretos e inibidor.	- LSV; - EIS; - Espectroscopia de Raman; - SEM com EDS.	- A concentração limite de cloreto para não iniciar a corrosão no aço foi de 0,15 cloreto/inibidor; - A adição de inibidor fez com que a taxa de corrosão diminuísse.
Corrosion behavior of steel submitted to chloride and sulphate ions in simulated concrete pore solution	Liu; Zhang; Ni; Huang (2016)	Investigar o efeito da adição de cloreto e sulfato no aço imerso na SPC.	Amostra de aço lixada e desengordurada embutida em resina epóxi.	Solução saturada de Ca(OH)_2 com 0,01 mol/l de NaCl ou Na_2SO_4 .	- EIS.	- A concentração limite para não iniciar a corrosão no aço é de 0,05 a 0,06 mol/l de cloreto e 0,02 a 0,03 mol/l de sulfato; - O sulfato induz a formação de um filme no aço não-passivante muito poroso; - A adição de cloreto e sulfato concomitantemente aumenta a densidade de corrente e a taxa de corrosão do aço.
Effect of supplementary cementitious materials (binder type) on the pore solution chemistry and the corrosion of steel in alkaline environments	Scott; Alexander (2016)	Examinar as influências da presença de vários tipos de aglomerantes usados como material cimentício suplementar na corrosão do aço para concreto armado.	Amostra de aço embutida em resina epóxi.	Várias soluções.	- Potencial de meia célula.	As SPC são caracterizadas por um ambiente sulfeto-redutor, associado a sistemas ligantes de escória, que possibilita a formação de uma camada passivada comprometida no aço, menos capaz de resistir à corrosão que a solução de cimento puramente. Entretanto, é importante dizer que o concreto está sujeito a outras influências, como umidade, porosidade e resistividade no que diz respeito à taxa de corrosão.

Título	Autores (ano)	Objetivo(s)	Armadura	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
Influence of sulfate ion and associated cation type on steel reinforcement corrosion in concrete powder aqueous solution in the presence of chloride ions	Shaheen; Pradhan (2016)	Avaliar a corrosão de aço em solução de concreto com cimento Portland e com cimento Portland pozolânico.	Amostra de aço para concreto armado embutido em resina epóxi limpo com bucha.	Várias soluções feitas de pó de concreto contendo cloretos e sulfato.	- LSV; - XRD; - FTIR.	- A zona passiva do aço é maior em solução de concreto com cimento Portland do que com cimento pozolânico; - Concreto feito de cimento Portland performa melhor contra o sulfato de magnésio enquanto o cimento pozolânico performa melhor contra o sulfato de sódio em ambiente com cloreto.
Influence of chloride concentration and pre-passivation on the pitting corrosion resistance of low-alloy reinforcing steel in simulated concrete pore solution	Shi; Sun; Jiang; Zhang (2016)	Investigar a resistência à corrosão induzida por corrosão localizada e a morfologia de baixa liga de aço em SPC com várias concentrações de cloreto.	Amostra de aço-carbono e aço de baixa liga desengordurados, lixados e polidos.	Solução contendo 0,1 mol/l de NaOH + 0,2 mol/l de KOH + 0,1 mol/l de Ca(OH) ₂ + 0,003 mol/l de CaSO ₄ .	- EIS; - CV; - OM; - SEM com EDS; - CLSM; - EPMA.	- O filme passivador formado em ambos os aços analisados pode melhorar a resistência à indução de corrosão por cloreto; - A maior fase ferida do aço de baixa liga leva a uma formação mais fácil de caminhos para aumentar a densidade de corrente localizada em relação ao aço-carbono para concentrações abaixo de 0,1 M de NaCl; - Para concentrações acima de 0,1 M de NaCl, a camada de óxidos enriquecidos com Cr formada no aço-carbono supre a propagação de pites e este aço passa a ser mais resistente à corrosão que o aço de baixa liga.
Inhibitor evaluation in different simulated concrete pore solution for the protection of steel rebars	Verbruggen; Terry; De Graeve (2016)	Avaliação de inibidores de corrosão do aço em soluções de poros de concreto realistas.	Amostras de aço desengorduradas.	Várias soluções contendo cloreto e carbonato com adição dos inibidores analisados.	- LSV; - OM; - XPS; - SEM com EDS.	Pela pesquisa realizada, as situações críticas de corrosão do aço foram: - SPC (pH 13) com 2% de Cl ⁻ (corrosão localizada); - SPC carbonatada (pH 9) (corrosão uniforme); - SPC carbonatada (pH 9) com 0,05% de Cl ⁻ . Nesses casos, os inibidores de Mo analisados puderam aumentar a resistência à corrosão do aço.

Título	Autores (ano)	Objetivo(s)	Armadura	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
The adsorption and inhibition effect of calcium lignosulfonate on Q235 carbon steel in simulated concrete pore solution	Wang; Zuo; Zhao; Zha (2016)	Estudar a inibição de corrosão proporcionada pelo lignossulfonato de cálcio ao aço em SPC.	Amostra de aço para concreto armado lixada.	Solução de Ca(OH)_2 saturada com 0,1 mol/l de NaCl (pH 12,6).	- FTIR; - LSV; - Microscopia de fluorescência (FM); - SEM com EDS; - XPS.	Nas diferentes concentrações de cloreto na SPC testadas, com a adição do inibidor de corrosão, o aço-carbono apresentou aumento da resistividade e diminuição da corrente de corrosão. O inibidor ajuda a formar um filme passivo intacto no aço.
The effect of simulated concrete pore solution composition and chlorides on the electronic properties of passive films on carbon steel rebar	Williamson; Isgor (2016)	Investigar os efeitos da composição eletrolítica, pH e tempo de passivação nas propriedades eletrônicas dos filmes passivos que se formam no aço carbono em SPC.	Amostra de aço-carbono desengordurada, lixada e polida.	- Solução saturada de Ca(OH)_2 (pH 12,5); - Solução saturada de Ca(OH)_2 com adição de Ca^+ , K^+ e Na^+ (pH 13,4); - Solução saturada de Ca(OH)_2 com adição de Ca^+ , K^+ , Na^+ e CaSO_4 (pH 13,3). Todas com adição de cloreto.	- MS; - EIS.	- Os filmes passivos formados em todas as soluções mostraram espessuras de camada máxima de carga espacial semelhantes de cerca de 0,4 nm na passivação total; - As soluções com adição de íons e com adição de íons e sulfato apresentaram assinatura eletrônica similares, mostrando que o sulfato não afeta as propriedades eletrônicas do filme passivador.
Passive behaviour of new alloy corrosion resistant steel Cr10Mo1 in simulating concrete pore solutions with different chloride contents	Zhiyong; Jiang; Sun; Song; Ma; Zhang; Wang (2016)	Estudar a passivação da liga de aço resistente à corrosão Cr10Mo1 imerso em solução simulada de poros de concreto fresco e carbonatado.	Amostras de liga de aço resistente à corrosão lixadas, polidas e desengorduradas.	- Solução contendo 0,3 M Ca(OH)_2 + 0,5 M KOH + 0,2 M NaOH (pH 13,5); - Solução de baixo pH (12, 10,5 e 9) contendo NaHCO_3 em 0,03 M Ca(OH)_2 .	- LSV; - EIS; - MS; - XPS; - SIMS.	- A resposta eletroquímica e analítica da superfície do filme formado muda conforme varia o pH; - O filme passivo formado no aço Cr10Mo1 consiste em óxidos e hidróxidos de Fe e Cr. Quando o pH cai, embora os óxidos de Fe diminuam, os óxidos de Cr crescem. Como o aço-carbono não possui essa liga de Cr-Mo, o filme passivo no aço comum não protege tão bem o aço como na liga estudada.

Título	Autores (ano)	Objetivo(s)	Armadura	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
Study of Pitting Resistance of Rebar Steels in Jakarta Coastal Using Simulated Concrete Pore Solution	Anwar; Fadillah; Nikitasari; Oediyani; Mabruri (2017)	Estudar a resistência à corrosão localizada em aço para concreto armado exposto em SPC contendo água do mar de Jakarta com e sem carbonatos.	Amostra de aço para concreto armado embutido em resina epóxi lixada.	Várias soluções de poro de concreto simuladas contendo água do mar de Jakarta ou 3,5% de NaCl com e sem carbonatos.	- CV; - LSV.	- Dois tipos de água do mar de Jakarta e a solução com 3,5% de NaCl performaram da mesma forma eletroquimicamente; - A adição de carbonatos em todas as soluções aumentou o potencial de <i>breakdown</i> do aço.
The impact of sandblasting as a surface modification method on the corrosion behavior of steels in simulated concrete pore solution	Ding; Poursaee (2017)	Mostrar o impacto da modificação da superfície na corrosão de metais, incluindo a corrosão de aço para concreto armado.	Amostra de aço para concreto armado: - Sem tratamento; - Tratado com jato de areia por 5 min; - Tratado com jato de areia por 10 min; - Tratado com jato de areia por 15 min.	Solução contendo NaOH, KOH, CaSO ₂ .2H ₂ O, Ca(OH) ₂ e água deionizada contaminada ou não com NaCl.	- LPR; - CV; - EIS; - MS; - SEM com EDS.	- O jateamento de areia aumentou a resistência à corrosão do aço em SPC contaminada com NaCl; - O jateamento de areia pode melhorar a formação da camada passiva.
Evaluation of Resistance of Intermetallic Fe-Zn Coating in the Model Environment as Concrete Pore Solution	Dobias; Pokorny; Pernicova (2017)	Estudar a composição, espessura e resistência à corrosão de um revestimento intermetálico para o aço em SPC.	Amostras de aço com e sem revestimento intermetálico.	Solução de Ca(OH) ₂ saturada (pH 12,6).	- XRD; - SEM com EDS; - Monitoramento de OCP; - LPR.	O revestimento intermetálico analisado retarda o início da corrosão, entretanto, após iniciada, a taxa de corrosão do aço revestido é ainda maior que do aço não revestido.
The corrosion inhibition efficiency of aluminum tripolyphosphate on carbon steel in carbonated concrete pore solution	Feng; Shi; Lu; Xu; Huang; Chen (2017)	Estudar a eficiência do inibidor de corrosão de trifosfato de alumínio (ATP) em aço-carbono em SPC e corpos de prova.	Amostra de aço-carbono revestida com resina epóxi e lixada.	- Solução de cimento Portland 1:5 (pH 12,5) filtrada; - Solução de cimento Portland carbonatada (pH 9); Ambas com e sem adição de inibidor ATP.	- LSV; - EIS; - MS; - Metalografia.	- Com o aumento da concentração de ATP na SPC, a impedância e potencial de corrosão localizada aumentaram no aço, enquanto a densidade de doadores do filme passivo no aço e a densidade de corrente diminuíram; - XPS mostrou que com o aumento da concentração de ATP na SPC carbonatada, aumenta-se a quantidade de Fe ³⁺ e diminui-se a quantidade de Fe ⁰ e Fe ²⁺ , dificultando a corrosão.

Título	Autores (ano)	Objetivo(s)	Armadura	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
Chloride threshold value to initiate reinforcement corrosion in simulated concrete pore solutions: The influence of surface finishing and pH	Figueira; Sadovski; Melo; Pereira (2017)	Avaliar a influência dos acabamentos na superfície do aço e do pH da SPC no valor limite de cloreto que inicia a corrosão da armadura.	Amostras de aço embutidas em resina epóxi: - Sem acabamento (T); - Lixadas (P500); - Lixadas e polidas (D); - Lixadas, polidas e pré-oxidadas molhando em água e deixando secar por 24h (DH).	Solução de cimento contendo várias concentrações de NaCl.	- Monitoramento do OCP; - LSV; - SVET; - Estereoscopia; - SEM com EDS.	- Na amostra D em SPC pH 13,5 a formação de áreas ativas de corrosão para concentrações > 5% de NaCl é instantânea; - Para amostras DH, a corrosão se inicia em locais em que existiam mais óxidos; - O acabamento dado à superfície do aço e o pH da SPC influencia fortemente na inicialização da corrosão do aço.
Deoxyribonucleic acid as an inhibitor for chloride-induced corrosion of reinforcing steel in simulated concrete pore solutions	Jiang; Jiang; Wang; Jin; Bai; Song; Yan (2017)	Avaliar a eficiência de moléculas de DNA utilizadas como inibidor de corrosão do aço na SPC.	Amostras de aço para concreto armado embutido em resina epóxi e lixado.	Soluções de Ca(OH) ₂ saturada com várias concentrações diferentes de DNA.	- Estereoscopia; - LPR; - EIS; - XPS.	DNA variando de 20 a 80 bases se mostrou um excelente inibidor de corrosão para o aço em SPC com concentrações de NaCl de 0,01 mol/l a 0,1 mol/l. Inicialmente o DNA inibiu a reação catódica e mais tardiamente, com o aumento da concentração de NaCl, inibiu a reação anódica.
Study of depassivation of carbon steel in simulated concrete pore solution using different equivalent circuits	Liu; Zhang; Wu; Huang (2017)	Investigar a despassivação de armaduras por meio do uso de alguns circuitos equivalentes na técnica de EIS.	Amostra de aço-carbono embutido em resina epóxi lixado e desengordurado.	Solução de Ca(OH) ₂ saturada com 0,01 mol/l de NaCl.	EIS.	O circuito que melhor fita os resultados da EIS foi o R(Q(R(QR))), mas é importante atentar para o significado físico de cada circuito para cada sistema estudado.
Corrosion behavior of low-Cr steel rebars in alkaline solutions with different pH in the presence of chlorides	Liu; Cheng; Li; Lu (2017b)	Avaliar o comportamento corrosivo do aço-carbono e do aço modificado com Cr em SPC contendo NaCl.	- Amostra de aço-carbono; - Três amostras de aço-carbono de baixa liga de Cr. Ambas embutidas em resina epóxi, desengorduradas e lixadas.	Solução saturada de Ca(OH) ₂ com várias concentrações de NaCl e NaHCO ₃ .	- CV; - LSV; - EIS; - MS; - OM; - SEM com EDS.	- A estabilidade do filme passivo diminui conforme diminui o pH. O filme no aço modificado com Cr é mais estável; - A presença de Cr efetivamente reduz a propagação de pites no aço; - Os aços modificados com Cr em SPC carbonatada apresentam baixa taxa de corrosão.

Título	Autores (ano)	Objetivo(s)	Armadura	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
Passivation and electrochemical behavior of 316L stainless steel in chlorinated simulated concrete pore solution	Luo; Su; Dong; Li (2017)	Avaliar o comportamento passivamente do aço inoxidável 316L em SPC com valores diferentes de pH.	Amostra de aço inoxidável 316L desengordurado, lixado e polido.	- Solução saturada de Ca(OH)_2 e KOH; - Solução saturada de Ca(OH)_2 e KOH carbonatada com borbulhamento de CO_2 . Ambas com e sem contaminação de NaCl.	- CV; - LSV; - EIS; - XPS; - SIMS.	- Quando o pH aumenta de 8,5 para 12,5 observa-se um aumento do potencial de corrosão do aço 316L, mas se aumentar para até 14, diminui o potencial de corrosão; - No aço 316L é formado um duplo filme composto de óxidos de Cr, Fe e Mo e o tipo de óxido muda conforme muda o pH; - A presença de Cr no aço melhora o filme passivo e a presença de Mo aumenta a estabilidade do filme.
Effect of cold deformation on the corrosion behaviour of UNS S31803 duplex stainless steel in simulated concrete pore solution	Luo; Wang; Dong; Xiao; Li (2017b)	Avaliar o comportamento corrosivo do aço duplamente inoxidável UNS S31803 deformado a frio em SPC.	Amostra de aço inoxidável UNS S1803 temperado com alguns níveis de deformação a frio, lixado e polido.	Solução saturada de Ca(OH)_2 contaminada ou não com 3,5% de NaCl.	- Monitoramento de OCP; - CV; - LSV; - EIS; - MS; - XPS.	- A deformação fria modifica o tamanho dos grãos do aço e foi observado que essa deformação é crucial para a inicialização do processo de corrosão localizada; - A corrosão se iniciação entre as fases austenita e ferrita do aço estudado; - Quanto maior a deformação a frio do aço, menos protetivo é o filme passivo formado dele.
Chloride-induced corrosion of steel rebars in simulated pore solutions of alkali-activated concretes	Mundra, Criado, Bernal, Provis (2017)	Investigar o comportamento passivante do aço em relação à corrosão localizada quando imerso em eletrólito altamente alcalino representando a SPC.	Amostra de aço para concreto armado lixada e desengordurada.	Solução contendo 0,8 M, 0,12 M e 1,36 M de NaOH.	- CV; - EIS; - LPR.	Em soluções altamente alcalinas, o filme passivo é composto principalmente de Fe(II) e um filme menos denso de Fe(III). As espécies encontradas no filme são depende diretamente da alcalinidade da solução.
Corrosion Resistance Property of Mild Steel in Simulated Concrete Pore Solution Prepared in Well Water by Using an Aqueous Extract of Turmeric	Shanmugapriya; Prabhakar; Rajendran (2017)	Investigar a corrosão do aço em SPC preparada com água de poço, na ausência e presença de inibidor de corrosão feito de extrato aquoso de açafrão.	Amostra de aço desengordurado, lixado e polido.	- Solução saturada de Ca(OH)_2 , NaOH e KOH (pH 13,5); - Solução saturada de Ca(OH)_2 (pH 13,5).	- LPR; - EIS.	Na presença de extrato de açafrão, a Rp do aço aumenta, a densidade de corrente diminui, resistência de transferência de carga aumenta e a capacitância da DCE diminui.

Título	Autores (ano)	Objetivo(s)	Armadura	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
The micro-solution electrochemical method to evaluate rebar corrosion in reinforced concrete structures	Tian; Dong; Cheng; Wan; Wang; Xiao; Li (2017)	Estudar a corrosão no aço para concreto armado em microsolução de poros de concreto simulando uma situação de serviço real.	Amostra de aço para concreto armado desengordurado, lixado e polido.	Solução de Ca(OH)_2 saturada contendo diferentes concentrações de NaCl.	- LPR; - EIS; - OM.	- A resistência à corrosão do aço na microsolução é cerca de cinco vezes maior que na solução, além de a corrente de corrosão ser menor e o potencial de corrosão mais positivo; - A diferença verificada entre a taxa de corrosão na solução e na microsolução é devido à polarização anódica na microsolução, causada pela maior concentração de Fe^{2+} ; - O método eletroquímico na solução não é uma boa técnica quantitativa para taxa de corrosão.
The adsorption and inhibition behavior of two organic inhibitors for carbon steel in simulated concrete pore solution	Wang; Zuo (2017)	Estudar o efeito de adsorção e inibição de corrosão de dois inibidores de corrosão orgânicos para aço-carbono em SPC.	Amostra de aço-carbono lixado e polido.	Solução de Ca(OH)_2 saturada contendo 0,1 mol/l de NaCl contendo inibidores de lignossulfato de cálcio (CLS) e oleato de sódio (SO).	- LPR; - M-IR.	Os inibidores de corrosão testados inibiram a corrosão localizada no aço em estágio inicial.
Effect of Phosphate-based inhibitor on prestressing tendons corrosion in simulated concrete pore solution contaminated by chloride ions	Ben Mansour; Dhouibi; Idrissi (2018)	Testar o efeito do inibidor de corrosão fosfato trissódico (TSP) na corrosão de tendões pré-estressados da microestrutura do aço em SPC com vários teores de cloreto.	Amostra de aço hiper-eutetoide com microestrutura perlítica e totalmente orientada, lixadas e desengorduradas.	Solução saturada de Ca(OH)_2 com e sem 5% de TSP e cloreto.	- LSV; - OM; - EIS; - CV.	- A adição do inibidor RSP aumenta consideravelmente a razão crítica $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$ de 0,4 para 5; - O aprimoramento dos valores de potencial de corrosão e diminuição da corrente de corrosão indicaram que o TSP é um inibidor anódico.
Stress corrosion cracking of new 2001 lean–duplex stainless steel reinforcements in chloride contained concrete pore solution: An electrochemical study	Briz; Biezma; Bastidas (2018)	Analisar a susceptibilidade à corrosão de dois aços inoxidáveis (DSS e LDSS) fissuradas por estresse de corrosão em SPC contendo cloreto.	Amostras de aços inoxidáveis DSS e LDSS trincados com um entalhe em V de 2 mm de profundidade, 1,5 mm de largura a 60 °.	SPC não especificada contendo 3,5% de NaCl.	- LPR; - SEM.	- O LDSS tem densidade de corrente três vezes maior que o DSS, mesmo assim não excede o limite de baixo-alto nível de corrosão; - LDSS apresentou pites de 1,5 a 2,3 mm de profundidade após polarização anódica, enquanto o DSS não apresentou sinal de corrosão localizada.

Título	Autores (ano)	Objetivo(s)	Armadura	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
The effect of functionalized polycarboxylate structures as corrosion inhibitors in a simulated concrete pore solution	Fazayel; Khorasani; Sarabi (2018)	Avaliar o poder de inibição de corrosão de estruturas de poliacarboxilato funcionais em solução simulada de poro de concreto para o aço.	Amostra de aço-carbono lixada e desengordurada.	Solução contendo Ca(OH)_2 e 1,8% e 3,5% de NaCl com e sem adição do inibidor de corrosão (pH 12,7).	- GPC; - FTIR; - LPR; - EIS; - SEM com EDS; - AFM.	Os inibidores de estrutura de poliacarboxilato avaliados protegem o aço da corrosão, especialmente da corrosão localizada, por meio da expansão da região de passivação das curvas de polarização e adiando o ponto de <i>breakdown</i> do filme.
Corrosion mitigation of steel rebars in chloride contaminated concrete pore solution using inhibitor: An electrochemical investigation	Lee; Yang; Singh; Prasad; Yoo (2018)	Estudar o efeito do hexametáfosfato de sódio em conjunto com benzoato de sódio e o benzotriazol na mitigação da corrosão de armaduras de concreto em solução agressiva de poros de concreto.	Amostra de aço embutido em resina epóxi e lixado.	Solução contendo 8,33 g/l de NaOH + 3,36 g/l de KOH + 2 g/l CaO com inibidores de corrosão em análise e 3,5% de NaCl.	- Monitoramento de OCP; - LSV; - EIS.	- EIS mostrou que após 24 h de exposição do aço na solução com inibidor, a resistência de transferência de significativamente alta, protegendo o metal devido à adsorção do inibidor, enquanto sem inibidor o aço apresenta corrosão localizada; - A eficiência do inibidor é de 89 a 96% após 1 h de exposição.
Effect of simulated pore solution on passivation characteristic of P110 steel	Peng; Liu; Wang; Lin; Sun; Xia (2018)	Avaliar a passivação do aço-carbono em dois tipos de solução de poros simulada.	Amostra de aço lixado e desengordurado.	- Solução de cimento; - Solução contendo 0,19 M NaOH e 0,02 M Ca(OH)_2 .	- Monitoramento de OCP; - LSV; - EIS; - MS; - XPS; - SEM.	- O tempo de passivação do aço nas diferentes soluções foi diferente. A solução de cimento requereu maior tempo para passivar o aço; - O aço na solução de cimento apresentou um filme passivo mais espesso; - Em ambas as soluções o filme passivo formado é de óxidos de Fe.
Study of the passivation of carbon steel in simulated concrete pore solution using scanning electrochemical microscope (SECM)	Torbati-Sarrafi; Poursaee (2018)	Avaliar a passivação do aço-carbono em SPC usando microscópio eletroquímico de varredura.	Amostra de aço-carbono embutido em resina epóxi, lixado, polido e desengordurado.	Solução contendo 0,1 mol/l de NaOH, 0,3 mol/l de KOH, 0,03 mol/l de Ca(OH)_2 , 0,002 mol/l de $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ e 0,0005 mol/l de KCl.	Microscopia eletroquímica de varredura (SECM).	A formação de um filme passivo na superfície do aço-carbono é tempo-dependente.

Título	Autores (ano)	Objetivo(s)	Armadura	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
Corrosion of coupled steels with different microstructures in concrete environment	Torbati-Sarraf; Poursaee (2018b)	Avaliar e comparar a passivação e corrosão de barras de aço com diferentes microestruturas.	Amostras de três tipos de aço (A – tratado termomecânicamente, B - convencional e A+B) embutidas em resina epóxi, lixadas e polidas.	Solução contendo 0,1 mol/l de NaOH, 0,3 mol/l de KOH, 0,03 mol/l de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e 0,002 mol/l de $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$.	- LPR; - CV; - Metalografia; - SEM.	- Individualmente, o aço A apresentou resistência à corrosão superior à dos outros aços; - Quando acoplados, o aço B apresentou melhor passivação, pois o aço A se torna o ânodo e sua atividade eletroquímica aumenta; - A morfologia do filme passivador nos dois aços é similar, mas o filme no aço A é mais fragmentado.
Inhibitive effect of sodium molybdate on the corrosion behavior of galvanized steel in simulated concrete pore solution	Wang; Kong; Che; Zhang (2018)	Estudar o efeito inibido de corrosão do molibdato de sódio em aço galvanizado imerso em SPC.	Amostra de aço galvanizado desengordurado.	Solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ contendo 0,2 M de KOH (pH 13,2), molibdato de sódio e contaminada com cloreto.	- SEM; - XPS; - XRD; - LPR.	A presença de inibidor de molibdato de sódio fez com que a resistência à corrosão do aço aumentasse e a evolução de hidrogênio fosse suprimida pela presença desse inibidor. O filme passivador formado tem Mo em sua composição ocorreu nos estágios iniciais da imersão do aço na SPC contendo o inibidor.
Inhibition effect and mechanism of sodium oleate on passivation and pitting corrosion of steel in simulated concrete pore solution	Wang; Zuo; Tang (2018)	Estudar o efeito de inibição de corrosão do oleato de sódio (SO) na corrosão e passivação do aço-carbono em SPC.	Amostra de aço-carbono embutido em resina epóxi, lixado e desengordurado.	Solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ contendo 0,1 mol/l de NaCl e SO (pH 12,5).	- LSV; - PZC; - SEM com EDS; - XPS; - M-IR.	A presença do SO efetivamente aumentou o potencial de breakdown de pite do aço e a densidade de corrente diminuiu mais de 10 vezes com a presença do inibidor.
Preparation of phytic acid conversion coating and corrosion protection performances for steel in chlorinated simulated concrete pore solution	Xiong; Li; Jin; Gao; Wang; Tian; Han; Song; Jiang (2018)	Estudar a proteção à corrosão dada pelo revestimento de conversão de ácido fítico (PACC) aplicado em armaduras de aço em SPC contaminada com cloreto.	Amostra de aço-carbono desengordurado e embutido em resina epóxi, tratado com PACC e lixado.	Solução contendo 0,2 M de NaOH, 0,06 M de KOH, 0,001 M de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e 3,5% de NaCl (pH 12,6).	- Monitoramento de OCP; - LPR; - EIS; - SEM com EDS; - FTIR.	O PACC promove proteção do aço quanto à corrosão em SPC contaminada com cloreto.

Título	Autores (ano)	Objetivo(s)	Armadura	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
Influence of chloride ion on depassivation of passive film on galvanized steel bars in concrete pore solution	Zheng; Dai; Li; Poon (2018)	Investigar a influência de íons cloro na despassivação de aço galvanizado usado como armadura de concreto imerso em SPC.	Amostra de aço galvanizado selado com silicone e lixado.	Solução saturada de Ca(OH)_2 com várias concentrações de NaCl.	- LPR; - EIS; - MS; - XRD; - SEM com EDS.	- O valor crítico de cloreto para despassivação do aço em SPC foi encontrado como 0,2 M; - Após o início da corrosão localizada, o aço galvanizado os produtos de corrosão inibem a continuação de ingresso de cloretos no aço.
Influence of calcium ion in concrete pore solution on the passivation of galvanized steel bars	Zheng; Dai; Poon; Li (2018b)	Investigar a influência do íon cálcio na passivação do aço galvanizado imerso em SPC.	Amostra de aço galvanizado selado com silicone e lixado.	Solução saturada de Ca(OH)_2 com várias concentrações de Ca^+ .	- Monitoramento de OCP; - SEM com EDS; - XRD; - EIS; - CV.	- Nas soluções preparadas com 3,5 g/l (pH 12,5) e 1,6 g/l de Ca(OH)_2 (pH 13,15) ocorreu corrosão vigorosa acompanhada de evolução de hidrogênio durante a passivação; - Não foi possível formar camada passiva contínua nas soluções preparadas com KOH ou baixas concentrações de Ca(OH)_2 (pH = 12,5). Mesmo assim, foram obtidas boas propriedades passivas; - A presença de íons cálcio acelerou a corrosão do aço galvanizado durante o processo de passivação de soluções de pH 13,15.
Effect of sulfate ions on corrosion of reinforced steel treated by DNA corrosion inhibitor in simulated concrete pore solution	Chen; Jiang, Guo; Xu; Chen; Zha (2019)	Avaliar o efeito de inibição de corrosão de DNA com comprimento de 20 a 80 nucleotídeos em armaduras de aço para concreto armado em SPC contaminada com sulfato.	Amostra de aço-carbono embutido em resina epóxi e lixado.	Solução saturada de Ca(OH)_2 contaminada com 0,02, 0,05 e 0,1 mol/l de Na_2SO_4 e 0,615 g/l de DNA.	- LPR; - EIS; - XPS.	- A presença de baixa concentração de SO_4^{2-} em Cl^- presente de forma abundantemente reduz a eficiência do inibidor de corrosão, enquanto altas concentrações de SO_4^{2-} tem um efeito insignificante na eficiência do inibidor; - O DNA se mostrou um inibidor mais eficiente que os inibidores comerciais de fosfato de sódio.
Effect of ginger extract as green inhibitor on chloride-induced corrosion of carbon steel in simulated concrete pore solutions	Liu; Song; Wang; Jiang; Zhang; Guo; Song; Xu (2019)	Avaliar o efeito de inibidor de corrosão para o aço usado em concreto armado feito com extrato de gengibre em relação a outros três inibidores comerciais.	Amostra de aço-carbono embutida em resina epóxi, lixada e desengordurada.	Solução saturada de cal com adição diária de 0,01 mol/l de NaCl por 10 dias consecutivos com a presença de inibidores de extrato de gengibre e comerciais.	- LSV; - LPR; - EIS; - Análise estereomicroscópica - ATR-FTIR; - XPS.	As análises executadas foram suficientes para confirmar que o extrato de gengibre é um inibidor de corrosão eficiente para o aço carbono imerso em solução de cloreto, com dosagem ótima de 2% da SPC.

Título	Autores (ano)	Objetivo(s)	Armadura	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
Crevice corrosion and environmentally assisted cracking of high-strength duplex stainless steels in simulated concrete pore solutions	Moser; Singh; Kahn; Kurtis; Niño; McClelland (2019)	Estudar a corrosão por fendas e fissuração de aços inoxidáveis duplex de alta resistência em soluções de poros de concreto simulada.	Amostra de ligas de aço inoxidáveis S32205 e S32304.	- Solução contendo 4 g/l de Ca(OH)_2 ; - Solução contendo 4 g/l de Ca(OH)_2 , 0,3 M de NaHCO_3 e concentrações de NaCl maiores que 1 M.	- CV; - OM.	- O encordoamento reduziu a resistência à corrosão das amostras S32304 devido à corrosão por fendas, mas as amostras S32205 continuaram totalmente resistentes à corrosão por Cl^- ; - A análise de superfície da fratura mostrou que a fratura frágil havia ocorrido apenas na superfície da amostra, com o restante da fratura sendo dúctil.
The semiconductor properties of passive films and corrosion behavior of stainless steel reinforcing bars in simulated concrete pore solution	Ogunsanya; Hansson (2019)	Analisar as propriedades semicondutoras do filme passivo formado em três aços austeníticos e dois aços inoxidáveis duplex usados como armadura para concreto em ambientes contaminados com cloreto.	Amostra de aços inoxidáveis e aço-carbono lixados	Solução de KOH + NaOH + Ca(OH)_2 (pH 13,6).	- LPR; - MS; - CV; - OM.	- O impacto positivo do Cr nas barras de aço inoxidável é atribuído às densidades de defeitos significativamente mais baixas, por 1 ou 2 ordens de magnitude, de seu filme passivo do que o das barras de aço carbono; - O filme passivo formado nas superfícies de aço sem tratamento apresentou maior densidade de defeitos que os de aço polido; - A MS mostrou que o cloreto afeta o filme rico em Cr mais que o filme rico em Fe.
Molybdate-phosphate conversion coatings to protect steel in a simulated concrete pore solution	Verbruggen; Baert; Terry; Graeve (2019)	Analisar o comportamento corrosivo de aços revestidos com base molibdato-fosfato (em diferentes porcentagens de cada um) em SPC.	Amostras de aço revestidos com base molibdato-fosfato.	Solução contendo 0,3 M de KOH, 0,1 M de NaOH, 0,01 M de Ca(OH)_2 e 0,002 M de NaSO_4 (pH 14) contaminada com NaCl.	- GDEOS; - XPS; - Espectroscopia de Raman; - SEM; - LSV.	- A formação do filme de molibdato-fosfato ocorre em dois estágios: 1) dissolução do aço da superfície pelo ácido fosfórico; 2) precipitação de molibdato formando o revestimento. Se a porcentagem de fosfato for bem maior que a de molibdato, o revestimento apresenta falhas; - Apenas o revestimento sem falhar promove uma proteção à corrosão para o aço.

Título	Autores (ano)	Objetivo(s)	Armadura	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
Influence of sulfate salt type on passive film of steel in simulated concrete pore solution	Xu; Jiang; Guo; Zha; Chen; Chen; Xu (2019)	Estudar a influência de diferentes sais de sulfato catiônicos na formação do filme passivo de aços em SPC.	Amostra de aço-carbono embutido em resina epóxi, lixado, polido e desengordurado.	Solução saturada de Ca(OH)_2 contendo sulfatos de magnésio, amônio, sódio e cálcio.	- EIS; - CV; - Espectroscopia de Mott Schottky.	- Os diferentes tipos de sulfato influenciam de forma diferente na formação do filme passivo do aço; - O limite de concentração de cloreto para dar início ao processo corrosivo no aço é, em ordem crescente, maior para os sulfatos de magnésio < amônio < sódio, sendo que o de cálcio não apresentou limite; - Como os sulfatos de magnésio e amônio reduzem significativamente o pH da solução, eles destroem o filme passivo do aço.
Preparation of corrosion inhibitor loaded zeolites and corrosion resistance of carbon steel in simulated concrete pore solution	Yang; Li; Liu; Liu; Hang; Ding; Li; Zhang; Wang; Xiong (2019)	Avaliar a performance de inibidores de corrosão para aço-carbono feitos por meio de zeólitos.	Amostra de aço-carbono desengordurado e embutido em resina epóxi.	Solução contendo 0,02 M de NaOH, 0,06 M de KOH, 0,001 M de Ca(OH)_2 e 3,5% de NaCl, com adição dos inibidores em estudo.	- Monitoramento de OCP; - EIS; - SEM com EDS; - TEM; - FTIR.	Os inibidores sintetizados por carregamento de zeólitos apresentam melhor eficiência de inibição de corrosão no aço-carbono. Eles ajudam na promoção de filmes passivos mais compactos, aumentando a resistência à corrosão.
Corrosion inhibition efficiency of triethanolammonium dodecylbenzene sulfonate on Q235 carbon steel in simulated concrete pore solution	Zhao; Pan; Yu; Chen (2019)	Estudar a eficiência de inibição de corrosão do dodecilbenzeno sulfonato de trietanolamônio (TDS) do aço em SPC.	Amostra de aço-carbono desengordurado e lixado.	Solução contendo 0,06 mol/l de KOH, 0,2 mol/l de NaOH, 0,01 mol/l de Ca(OH)_2 e 0,24 mol/l de NaHCO_3 , contaminada com 0,25 mol/l de NaCl e diferentes concentrações de TDS.	- Monitoramento de OCP; - LPR; - EIS; - MS; - XRD; - XPS.	- Quanto maior a concentração de TDS, maior o potencial de <i>breakdown</i> e a resistência de transferência de carga, enquanto a densidade de corrente e a capacitância da dupla camada diminuem; - A adição de TDS reduz a densidade de doadores do filme passivo, indicando a formação de um filme mais passivo.
Preparation of MgAl layered double hydroxides intercalated with nitrite ions and corrosion protection of steel bars in simulated carbonated concrete pore solution	Zuo; Wu; Luo; Dong; Xing (2019)	Avaliar os efeitos do MgAl- NO_2 -LDH sintetizado por diferentes métodos na proteção anticorrosiva do aço carbono na solução de poros de concreto carbonatado por meio de medidas eletroquímicas.	Amostra de aço-carbono embutida em resina epóxi, lixada e desengordurada.	Solução saturada de Ca(OH)_2 com adição de 3% de NaHCO_3 , 0,3 mol/l de NaCl e 15 g/l de LDH.	- FTIR; - SEM; - TG-DSC; - EIS; - LPR.	Com a adição de LDH a resistência à transferência do aço na solução carbonatada aumentou, mesmo com longo tempo de imersão.

Título	Autores (ano)	Objetivo(s)	Armadura	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
The influence of phase distribution and microstructure of the carbon steel on its chloride threshold value in a simulated concrete pore solution	Torbati-Sarraf; Poursaeed (2020)	Entender o papel da microestrutura do aço carbono e suas diferentes morfologias de fases na iniciação da corrosão e no valor limite de cloretos.	Aço-carbono submetido a 1) 60 min a 1020 °C e resfriado a temperatura ambiente e 2) 60 min a 810 °C e resfriado a temperatura ambiente e depois 30 min a 710 °C e resfriado a temperatura ambiente.	Solução contendo NaOH, KOH, Ca(OH) ₂ e CaSO ₄ .2H ₂ O	- SEM-EDS; - Micrografias de elétrons retroespalhados; - CV; - EIS.	Demonstrou-se que a perlita é a fase mais suscetível à iniciação e propagação da corrosão.
Effect of Temperature on Corrosion of Carbon Steel in Simulated Concrete Pore Solution under Anoxic Conditions	Qiu, J., Li, Y., Wu, A., Macdonald, D. (2020)	Verificar o comportamento do aço-carbono frente à corrosão como função da temperatura em soluções de poros de concreto utilizando o Modelo de Potencial Misto (MPM).	Aço-carbono P355 QL2 lixado e polido.	Solução contendo Ca(OH) ₂ , NaOH e NaCl.	- CV; - EIS.	A espessura, densidade de defeitos e difusividade de defeitos do filme passivo no aço carbono aumentam com o aumento da temperatura. A densidade de corrente anódica em estado estacionário é independente da tensão aplicada e aumenta com o aumento da temperatura.
Effect of Silicon Addition on Electrochemical Corrosion Resistance of Carbon Steel in Concrete Pore Solution	Li, S.; Zhang, J. (2020)	Avaliar a eficiência do Si em microligas de aço carbono quanto à corrosão em solução de poros de concreto.	Aço-carbono contendo diferentes porcentagens de Si.	Solução saturada de Ca(OH) ₂ .	- EIS; - LSV; - SEM.	Os resultados eletroquímicos mostraram que o aumento da concentração de Si na liga de aço-carbono fez com que a resistência à corrosão aumentasse em solução de poros de concreto.
Rhamnolipids as an eco-friendly corrosion inhibitor of rebars in simulated concrete pore solution: evaluation of conditioning and addition methods	Helbert, V. S.; Gaillet, L.; Chaussadent, T.; Gaudefoy, V.; Cresu, J. (2020)	Avaliar a eficiência de dois inibidores de corrosão biomoleculares para armaduras em solução de poros de concreto.	Aço-carbono lixado e polido.	Solução 0,027 M de Ca(OH) ₂ com 3% de NaCl.	- Monitoramento do OCP; - LSV; - EIS; - SEM-EDS.	Os métodos condicional e adicional não foram eficientes na avaliação da corrosão dos inibidores propostos.
Effectiveness of corrosion inhibitors in simulated concrete pore solution	Elshami, A.; Bonnet, S.; Khelidj, A.; Sail, L. (2020)	Estudar o mecanismo básico de inibidores de corrosão de armaduras para concreto em soluções de poros de concreto simuladas.	Aço carbono.	Solução saturada de Ca(OH) ₂ e com adição de inibidor de corrosão.	- Monitoramento do OCP; - LSV; - CV; - EIS; - SEM-EDS.	Os inibidores à base de nitrato de cálcio, monofluorofosfato de sódio e etanolamina apresentaram reduções nas taxas gerais de corrosão após os tratamentos inibitórios.
Natural passivation behavior and its influence on chloride-induced corrosion resistance of stainless steel in simulated concrete pore solution	Yuan, X.; Wang, X.; Cao, Y.; Yang, H. (2020)	Estudar a formação natural do filme passivador no aço austenítico e ferrítico.	Aço austenítico 304 e aço ferrítico 430 SS.	Solução saturada de Ca(OH) ₂ .	- EIS; - XPS; - LPR; - MO; - SEM-EDS.	Após 100 h de imersão, um filme passivo natural completo pode ser formado na superfície do aço e o comportamento de passivação natural está intimamente relacionado ao elemento de liga e microestrutura dos aços.

Título	Autores (ano)	Objetivo(s)	Armadura	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
Enhanced corrosion resistance of reinforcing steels in simulated concrete pore solution with low molybdate to chloride ratios	Wu, M.; Ma, H.; Shi, J. (2020)	Investigar a resistência à corrosão de aço-carbono convencional e liga de Cr em solução de poros de concreto com baixa porcentagem de molibdato e cloretos.	Aço-carbono e aço de 10%-Cr lixados.	Solução de Ca(OH) ₂ saturada com adição de 10, 30 e 100 mM de Mo e 1 M de NaCl.	- EIS; - LSV; - XPS; - OM; - SEM-EDS; - CV	A adição de baixa concentração de molibdato pode melhorar a resistência à corrosão do aço-carbono, bem como o aço 10% Cr é mais resistente à corrosão. Além disso, a resistência à corrosão de ambos os aços pode ser melhorada com o aumento das razões de molibdato/ cloreto, o que foi verificado pelo aumento da eficiência de inibição.
The effect of nickel on corrosion behaviour of high-strength low alloy steel rebar in simulated concrete pore solution	Tian, Y.; Dong, C.; Wang, G.; Cheng, X.; Li, X. (2020)	O objetivo deste artigo é investigar o desempenho abrangente de um novo aço de baixa liga contendo níquel que pode ser aplicado em grandes estruturas marítimas.	Aço-carbono e aço-níquel lixados.	Ambiente de concreto agressivo simulado com 3,5 p.% NaCl e 7 p.% NaHCO ₃ .	- PC; - EIS; - OM; - Monitoramento do OCP; - XPS; - Mott-Schottky.	Uma diminuição da taxa de corrosão superior a uma ordem de magnitude foi encontrada para aços contendo níquel no ambiente agressivo. A principal razão para a melhoria da resistência à corrosão e a redução da suscetibilidade à corrosão pela adição de Ni foi a formação de um filme de óxido de alta qualidade.
pH-Triggered Release of NaNO₂ Corrosion Inhibitors from Novel Colophony Microcapsules in Simulated Concrete Pore Solution	Ress, J.; Martin, U.; Bosch, J.; Bastidas, D. M. (2020)	Desenvolver uma nova microcápsula pelo método de emulsão dupla usando colofônia ecologicamente correta para melhorar o desempenho de inibidores de corrosão NaNO ₂ para concreto armado.	Aço-carbono.	Solução de Ca(OH) ₂ saturada com adição de inibidor de corrosão.	- CV; - FT-IR; - LPR; - EIS; - XPS.	A liberação do inibidor de corrosão de NaNO ₂ aumentou com ambientes de pH mais altos, em oposição ao desencadeamento de pH ácido ou desencadeamento de íons visto em outros estudos, tornando as microcápsulas ideais para a entrega de inibidor de corrosão de armaduras.
Chloride resistance of Cr-bearing alloy steels in carbonated concrete pore solutions	Ming, J.; Shi, J. (2020)	Avaliar a resistência ao cloreto de dois aços contendo Cr em soluções simuladas de poros de concreto. Além disso, o efeito da carbonatação na resistência ao cloreto de ligas de aço foi investigado.	Aço de baixo-C, baixo-Cr e médio-Cr.	Solução não-carbonatada e solução carbonatada de poros de concreto.	- LSV; - EIS; - SEM-EDS.	A quantidade de Cr influencia na resistência à corrosão dos aços em solução carbonatada e não-carbonatada, sendo o aço de médio-Cr mais eficiente neste aspecto.

Título	Autores (ano)	Objetivo(s)	Armadura	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
Influence of Threshold Chloride Concentration on Corrosion Behavior of Low-Alloy Steel Rebar in Concrete Pore Solutions	Zhang (2020)	Avaliar o efeito do teor de cloretos, valor do pH e tempo de exposição no comportamento à corrosão de armaduras de baixo-carbono em solução de poros de concreto simuladas.	Aço de baixa-liga e aço de baixo-carbono.	Solução contendo 0,2 M NaOH, 0,5 M KOH e 0,3 M Ca(OH) ₂ .	- EIS; - SEM.	A camada passiva formada na superfície do vergalhão de aço pode aumentar a resistência à corrosão induzida por cloreto de aços de baixo carbono e baixa liga em solução de poros de concreto com diferentes concentrações de cloreto.
Temperature Effect on Corrosion Behavior of 304LN Stainless Steel and Carbon Steel Rebars in Chloride Contaminated Concrete Pore Solution Using Electrochemical Method	Dong, B.; Wen, X.; Feng, L. (2020)	Investigar potenciais de corrosão causados por variações de temperatura de aço carbono e aço inoxidável.	Aço-carbono e Aço inoxidável 304LN.	Solução contendo Ca(OH) ₂ , KOH e NaOH.	- Monitoramento do OCP; - LSV; - EIS; - SEM.	A taxa de corrosão de todas as amostras aumentou com o aumento das temperaturas de exposição de 25 °C para 55 °C. Houve maior resistência à corrosão do vergalhão 304LN SS sob calor, o que pode ser atribuído à formação de camada de óxido estável, fina e passiva causada pelo cromo nas estruturas inoxidáveis.
Effectiveness Protection Performance of an Internal Blending Organic Corrosion Inhibitor for Carbon Steel in Chloride Contaminated Simulated Concrete Pore Solution	Wang, P.; Wang, Y.; Zhao, T.; Xiong, C.; Xu, P.; Zhou, J.; Fan, Z. (2020)	Investigar o desempenho de proteção e o mecanismo de um tipo de cor orgânica como inibidor de corrosão para aço carbono em solução de poros de concreto simulada.	Aço-carbono Q235 lixado e polido.	Solução saturada de Ca(OH) ₂ com 3,5% NaCl e diferentes concentrações de inibidor (0, 1%, 2%, 3% e 4%)	- EIS; - LSV; - SEM-EDS; - XPS; - FTIR.	O inibidor orgânico fornece proteção para aço em solução de poros de concreto simulado contendo cloretos. A eficiência de proteção do inibidor aumenta com o aumento da concentração nas soluções. Quando o teor do inibidor foi de 4%, a eficiência máxima atingiu 89,07%.
Passivation and Depassivation of HPB335 Carbon Steel in Simulated Concrete Pore Solution	Ji, H.; Zhao, R.; Jin, N.; Jin, X.; Tian, Z.; Yan, D.; Ye, H. (2020)	Investigar o limiar de cloreto e o fenômeno de passivação e despassivação do aço carbono sob diferentes ambientes de pH e cloretos.	Aço-carbono HPB335 lixado.	Solução contendo NaOH, KOH, Ca(OH) ₂ e NaHCO ₃ .	- Monitoramento de OCP; - LSV; - Mott-Schottky.	O filme passivo de aço carbono em solução altamente alcalina é de dupla camada e o pH tem grande influência na qualidade do filme passivo. As características do filme passivo e o pH ambos têm uma relação com o limiar de cloreto, a correlação entre pH e resistência é próxima ao cloreto limite.
Effect of Silicon Addition on Electrochemical Corrosion Resistance of Carbon Steel in Concrete Pore Solution	Li, S.; Zhang, J. (2020)	Avaliar a eficiência da adição de microligas de Si em aço-carbono na resistência à corrosão de armaduras eletroquímicas.	Aço-carbono com microliga de Si.	Solução de Ca(OH) ₂ contendo 3,5 p.% de NaCl.	- EIS; - LSV; - SEM-EDS.	Os resultados eletroquímicos mostram que a microliga de Si na barra de aço-carbono melhorou sua resistência à corrosão por cloreto.

Título	Autores (ano)	Objetivo(s)	Armadura	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
Novel Ca-SLS-LDH nanocomposites obtained via lignosulfonate modification for corrosion protection of steel bars in simulated concrete pore solution	Chen M., Cai Y., Zhang M., Yu L., Wua F., Jiang J., Yang H., Bi R., Yu Y. (2021)	Preparar nanocompósitos com lignossulfonato modificado de sódio para avaliar a possibilidade desse compósito inibir a corrosão de aço em solução de poros de concreto simuladas.	Aço Q235 desengordurado com acetona por ultrassom e lixado.	Solução de Ca(OH) ₂ saturada com adição diária de 0,01 mol/l de NaCl até o limite de cloretos para iniciar a corrosão.	- Monitoramento do OCP; - LPR; - EIS; - SEM.	Testes eletroquímicos (OCP, LPR, EIS) mostraram que o inibidor modificado teve um melhor efeito de inibição de corrosão em solução de poros do que o não modificado, o que melhorou o valor limite de cloreto para iniciar a corrosão de barras de aço em solução.
Study on effect of chloride ions on corrosion behavior of reinforcing steel in simulated polluted concrete pore solutions by scanning micro-reference electrode technique	Wang, X.; Shao, M.; Ye, C.; Dong, S.; Du, R.; Lin, C. (2021)	Estudar o comportamento da corrosão do aço em soluções de poros de concreto poluído simulado com diferentes concentrações de Cl ⁻ .	Aço-carbono Q235 limpo e lixado.	Solução saturada de Ca(OH) ₂ ajustando seu pH para 11,50 com uma solução de NaHCO ₃ 0,8 M e ajustando diferentes concentrações de NaCl (0-0,100 M).	- LSV; - EIS; - SEM-EDS	O fator chave da ocorrência e desenvolvimento da corrosão localizada foi a iniciação e propagação da corrosão por pite nos locais de inclusão de MnS, onde o Cl ⁻ foi preferencialmente adsorvido e acumulado.
The effect of carboxylate compounds on controlling nitrite's environmental side effects for carbon steel corrosion protection in the simulated concrete pore solution	Johari, M.; Allahkaram, S. R.; Teymouri, F.; Azamian, I.; Shekarchi, M. (2021)	Avaliar o efeito sinérgico de nitrito de sódio e tartarato de sódio-potássio e citrato trissódico como inibidores de corrosão de armaduras.	Aço-carbono lixado e desengordurado.	Solução saturada de Ca(OH) ₂ contendo 0,05 mol/l KOH e 0,05 mol/l NaOH.	- EIS; - LSV; - Monitoramento de OCP; - SEM; - AFM; - XPS.	O uso simultâneo do tartarato de sódio-potássio e a baixa concentração de nitrito de sódio (seis vezes menor) demonstraram 91% de eficiência nos resultados do EIS, que foi superior ao de cada um desses inibidores, e mesmo ao longo do tempo, a eficiência de inibição do inibidor combinado melhorou.
Corrosion inhibition efficiency of compound nitrite with D-sodium gluconate on carbon steel in simulated concrete pore solution	Xu, P.; Zhou, J.; Li, G.; Wang, P.; Wang, P.; Li, F.; Zhang, B.; Chi, H. (2021)	Investigar a eficácia da inibição e mecanismo de adsorção do composto nitrito com D-gluconato de sódio em aço-carbono em solução simulada de poros de concreto.	Aço-carbono Q235 lixado.	Solução de Ca(OH) ₂ contendo 3,5 p.% de NaCl.	- EIS; - LSV; - SEM; - AFM; - XPS.	Com o aumento do teor do inibidor de corrosão na solução dos poros do concreto, o potencial de pite e a resistência à transferência de carga aumentaram, enquanto a densidade de corrente e a capacitância de dupla camada mostram o contrário.
Effect of organic silicon quaternary ammonium salts on mitigating corrosion of reinforced steel induced by SRB in mild alkaline simulated concrete pore solution	Etim, I.; Dong, J.; Wei, J.; Nan, c.; Pokhael, D. B.; Umoh, A. J.; Xu, D.; Su, M.; Ke, Wei. (2021)	Investigar o processo de corrosão de armaduras sob o efeito de acoplamento de inibidor SRB.	Aço 20SiMn lixada e desengordurada com etanol.	Solução com 0,1 M NaHCO ₃ , ajustado com 0,05 M Na ₂ CO ₃ e autoclavado a 121 °C por 20 min para esterilização da solução.	- SEM-EDS; - LSV; - XRD; - XPS; - Monitoramento do OCP; - EIS.	Foi possível observar a eficiência do inibidor de corrosão SRB e executar um esquema de formação do filme passivador do aço com esse filme.

Título	Autores (ano)	Objetivo(s)	Armadura	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
Response Surface Analysis of the Corrosion Effect of Metakaolin in Reinforced Concrete	Busari, A. A.; Kupolati, W. K.; Ndambuki, J. M.; Sadiku, E. R.; Snyman, J.; Tolulope, L.; Keren, O.; Oluwaseun, A. (2021)	Avaliar o efeito do metacaulim na solução de poros de concreto pelo método de perda de massa.	Aço comercial de construção.	Solução de poros de concreto extraída de amostras com substituição de 5-20% de cimento por metacaulim.	- Método de perda de massa.	Uma redução na taxa de corrosão foi observada na adição de maior percentual de metacaulim o que significa uma melhora na inibição do concreto desenvolvido.
Effect of dissolved oxygen, temperature, and pH on polarization behavior of carbon steel in simulated concrete pore solution	Liu, X.; MacDonald, D.; Xu, Y. (2021)	Examinar os efeitos de concentração de oxigênio dissolvido, pH e temperatura nas propriedades de polarização do aço-carbono em solução de poros simuladas.	Aço-carbono P355 QL2 lixado e desengordurado com etanol.	Solução de Ca(OH)_2 e NaOH.	- Monitoramento de OCP; - LSV.	A curva anódica parcial independente do pH para o aço no estado ativo é atribuída à eletrodissolução do ferro, enquanto o deslocamento na direção negativa com o aumento do pH ou T no solução desaerada (< 0,1 ppm OD) é atribuída à reação parcial de redução de água.
Corrosion behaviors of Q235 carbon steel under imidazoline derivatives as corrosion inhibitors: Experimental and computational investigations	Xiong, L.; Wang, P.; He, Z.; Chen, Q.; Pu, J.; Zhang, R. (2021)	Avaliar o comportamento do aço-carbono com inibidor de corrosão imidazolina.	Aço-carbono Q235 lixado e desengordurado.	Solução contendo 0,2 M NaOH, 0,6 M KOH e saturada de Ca(OH)_2 com 3,5 p.% de NaCl.	- EIS; - Espectroscopia de IR; - Raman; - Monitoramento de OCP; - LSV; - SEM-EDS; - ATR-FTIR.	O inibidor é do tipo ânodo e pode formar um filme de adsorção na superfície do aço. As moléculas inibidoras de corrosão formaram película protetora na superfície do aço, o que também impediu a transferência de carga. A molécula inibidora pertence ao ânodo.
A comprehensive study on the inhibition behaviour of four carboxylate- based corrosion inhibitors focusing on efficiency drop after the optimum concentration for carbon steel in the simulated concrete pore solution	Teymouri, F.; Allahkaram, S. R.; Shekarchi, M.; Azamian, I.; Johari, M. (2021)	Avaliar quatro inibidores de corrosão a base de carboxilato.	Aço-carbono Q235 lixado, polido e desengordurado.	Solução de Ca(OH)_2 , KOH e NaOH com 0,5 M de NaCl, adicionando os quatro tipos de inibidores carboxilatos.	- EIS; - Mott-Schottky; - XPS.	Perto da superfície, derivados de carboxilato, ao formar complexos com íons Fe, podem prevenir ataques de íons cloreto criando barreiras físicas e repulsão eletrostática.
On the novel approach of sacrificial cathodic protection of mild steel in simulated concrete pore solution and concrete mortar by high phosphorus pig iron anodes	Prasad, N. K.; Pathak, A. S.; Kundu, S.; Panchal, P.; Mondal, K. (2021)	Avaliar o desempenho do HPPI (ferro gusa com alto teor de P) com diferentes teores de P (1,5-8%) em solução simulada de poros de concreto com e sem contaminação por cloreto e sob ambos ambientes arejados e desaerados.	Ferro gusa com alto teor de P (1,5-8%).	Solução de 0,1 mol/l de NaOH, 0,3 mol/l de KOH, 0,03 mol/l de Ca(OH)_2 e 0,002 mol/l de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.	- SEM-EDS; - Monitoramento de OCP; - LSV; - Raman; - EIS.	Todas as três diferentes amostras de ferro gusa mostram um potencial mais ativo em comparação com o aço-carbono em solução de poros aerada e desaerada.

Título	Autores (ano)	Objetivo(s)	Armadura	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
Role of red mud in natural passivation and chloride-induced depassivation of reinforcing steels in alkaline concrete pore solutions	Shi, J.; Li, M.; Wu, M.; Ming, J. (2021)	Estudar o comportamento passivação natural de duas armaduras em solução de poros de concreto com lama vermelha na presença de cloretos.	Aço-carbono e aço inoxidável.	Solução extraída do cimento com lama vermelha.	- Monitoramento do OCP; - EIS; - Mott-Schottky; - XPS; - SEM-EDS; - AFM.	Apesar da formação de um filme passivo defeituoso, a maior resistência à corrosão por pite foi identificada para o aço-carbono em solução de extrato de lama vermelha com NaCl 1 M, o que possivelmente foi causado pela adsorção competitiva de partículas de lama carregadas negativamente e íons cloreto na superfície de aço.
Using ultrasonic wave to trigger microcapsule inhibitor against chloride-induced corrosion of carbon steel in simulated concrete pore solution	Song, Z.; Liu, Y.; Jiang, L.; Pei, C.; Xu, N.; Chu, H.; Guo, M. (2021)	Avaliar a eficiência do inibidor de corrosão NaNO ₂ -E51/UF no aço-carbono.	Aço-carbono HPB235 lixado.	Solução contendo inibidor NaNO ₂ -E51/UF encapsulado.	- LSV; - EIS.	Foi revelada a viabilidade de medidas de disparo de ultrassom para fornecer uma nova direção para promover as possibilidades de aplicação da tecnologia de microcápsulas em materiais cimentícios.
Beneficial and detrimental impacts of molybdate on corrosion resistance of steels in alkaline concrete pore solution with high chloride contamination	Wu, M.; Shi, J. (2021)	Investigar o impacto do molibdato na resistência à corrosão do aço-carbono e do aço 10% Cr resistente à corrosão quando exposto a solução de poros de concreto.	Aço-carbono e aço com 10% de Cr lixado.	Solução saturada de Ca(OH) ₂ .	- Monitoramento de OCP; - EIS; - AFM; - SEM-EDS; - Mott-Schottky.	A resistência à corrosão do aço 10% Cr foi significativamente maior do que a do aço-carbono na condição de alta concentração de cloreto, que foi determinada principalmente pela formação de uma camada protetora de óxido/hidróxido de Cr.
Chloride corrosion resistance of double-layer anticorrosive coating in simulated concrete pore solution	Qu, L.; Wang, Q.; Xu, S.; Wang, N.; Shi, Z. (2021)	Estudar a ação anticorrosiva de aços super-hidrofóbicos de baixo-carbono em solução de poros de concreto simulado contendo cloreto.	Aço-carbono.	Solução contendo Ca(OH) ₂ , NaOH e KOH.	- SEM-EDS; - FT-IR; - XRD; - EIS; - LSV.	Foi formada uma dupla camada anticorrosiva no aço por tratamento super-hidrofóbico que, espera-se, desempenhe um papel significativo na proteção contra corrosão de estruturas de concreto armado.
Crack-free Sol-Gel Coatings for Corrosion Protection of Carbon steel in concrete pore solution: An electrochemical corrosion investigation	Zhang, M. (2021)	Investigar a resistência à corrosão de armaduras com pintura Sol-Gel em solução de poros de concreto.	Aço-carbono revestido com Sol-Gel.	Solução contendo 11,22 g de KOH para 1 l de uma solução saturada de Ca(OH) ₂ .	- EIS; - LSV; - SEM.	Uma pintura contendo 10% em peso revestido de sílica em armaduras de aço foi necessário para o melhor desempenho de resistência à corrosão.

Título	Autores (ano)	Objetivo(s)	Armadura	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
Comparative Study on Electrochemical Corrosion Behavior of B500SD Carbon Steel and 2205 Duplex Stainless Steel Exposed to Concrete Pore Solution Containing Chloride Ions	Teng, W.; Li, X. (2021)	Investigar a influência do pH, temperatura e teor de cloreto na resistência à corrosão do aço-carbono e aço inoxidável em uma solução de poros de concreto contendo ions cloreto.	Aço-carbono B500SD e aço inoxidável 2205 duplex.	Solução contendo 0,3 M Ca(OH) ₂ , 0,5 M KOH e 0,2 M NaOH.	- EIS; - SEM.	O valor da capacitância da dupla camada foi diminuído à medida que o valor do pH aumentou gradualmente, o que revela que o tamanho do filme passivo foi aumentado, causando uma melhora na capacidade de proteção. A resistência à corrosão de ambas as armaduras de aço foi aumentada por uma queda de temperatura de 45 °C para 20 °C.
Protection of Carbon Steel Rebars by Epoxy Coating with Smart Environmentally Friendly Microcapsules	Ress, J.; Martin, U.; Bosch, J.; Bastidas, D. M. (2021)	Estudar o comportamento quanto à corrosão de um novo revestimento epóxi contendo microencapsulamento de inibidores lateados em solução de poros de concreto.	Aço-carbono revestido com inibidor microencapsulado.	Solução de poros de concreto contendo 3,5% de NaCl.	- SEM-EDS; - EDX; - EIS; - LSV.	O revestimento estudado se mostrou um método eficaz para melhorar a proteção contra corrosão de armaduras em solução de poros de concreto com cloretos. Portanto, o revestimento de microcápsulas apresenta um potencial significativo no aumento da vida útil e durabilidade das estruturas de concreto armado.
The Effect of Environmental Conditions on Electrochemical Corrosion Behavior of AISI 1018 Low-carbon Steel in Concrete Pore Solution	Li, M. (2021)	Considerar os efeitos da temperatura e do oxigênio dissolvido (OD) sobre o comportamento à corrosão do aço-carbono em solução de poros de concreto.	Aço-carbono AISI 1018 limpo e desengordurado.	Solução contendo NaOH (0,2 mol/l), Ca(OH) ₂ (0,3 mol/l) e KOH (0,5 mol/l), com diferentes níveis de OD.	- LSV; - EIS; - SEM.	A taxa de corrosão dos aços aumentou com o aumento da temperatura ambiente. A resistência à corrosão foi maior na solução de poros de concreto com menores concentrações de OD. A análise SEM mostra que a taxa de dissolução do metal foi mais intensa na solução com maiores níveis de OD.
Corrosion behaviour of carbon steel and corrosion resistant steel under elevated temperature and chloride concentration in simulated concrete pore solution	Adewumi, A. A.; Maslehuiddin, M. Dulaijan, S. U. A.; Shameem, M. (2021)	Avaliar a resistência à corrosão de aço-carbono e dois aços especiais (aço 316LN SS e aço A/M), sob diferentes temperaturas e concentrações de cloreto.	Aço-carbono, Aço 316LN SS e aço A/M.	Solução contendo 2 g de Ca(OH) ₂ , 14 g de KOH e 10 g de NaOH em 974 ml.	- SEM-EDS; - LSV.	As menores taxas de corrosão dos aços especiais sobre as barras de aço-carbono indicam sua utilidade em ambientes quentes e marítimos.

Título	Autores (ano)	Objetivo(s)	Armadura	Soluções de poros	Medidas	Principais conclusões
Chloride corrosion resistance of double-layer anticorrosive coating in simulated concrete pore solution	Qu, L.; Wang, Q.; Xu, S.; Wang, N.; Shi, Z. (2021)	Estudar a ação anticorrosiva de aços super-hidrofóbicos de baixo carbono (LCS) em solução de poros de concreto simulada.	Aço baixo-carbono lixado e desengordurado.	Solução saturada de Ca(OH)_2 contendo 0,1 mol/l de NaOH, 0,2 mol/l de KOH e 3,5 p.% de NaCl.	<ul style="list-style-type: none"> - SEM-EDS; - FT-IR; - XRD; - LSV. 	O aço super-hidrofóbico de baixo carbono apresentou melhor resistência à corrosão em relação ao aço de baixo carbono original. Essa estratégia anticorrosiva dupla da camada de Zn e da camada super-hidrofóbica melhorou significativamente a eficiência anticorrosiva do aço carbono na solução de poros de concreto simulada.