

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

DANIELE FERREIRA LOPES

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS ARMADAS COM ADIÇÃO
DE RESÍDUOS DA GERAÇÃO TERMELÉTRICA**

**Bagé
2021**

DANIELE FERREIRA LOPES

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS ARMADAS COM ADIÇÃO
DE RESÍDUOS DA GERAÇÃO TERMELÉTRICA**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pampa, como requisito à obtenção de título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Engenharia de Materiais e Metalúrgica

Orientadora: Profa. Dra. Sabrina Neves da Silva

Coorientadora: Profa. Dra. Luciana Machado Rodrigues

**Bagé
2021**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) por meio de do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

L864a Lopes, Daniele Ferreira

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS ARMADAS COM ADIÇÃO DE RESÍDUOS DA GERAÇÃO TERMELÉTRICA / Daniele Ferreira Lopes.
135 p.

Dissertação (Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,
MESTRADO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS, 2021.

"Orientação: Sabrina Neves da Silva".

1. Argamassa. 2. Cinza volante. 3. Subproduto. 4. Corrosão.
5. Curvas de polarização. I. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal do Pampa
DANIELE FERREIRA LOPES

AValiação DAS PROPRIEDADES DO ARGAMASSA ARMADA COM ADIÇÃO DE RESÍDUOS DA GERAÇÃO TERMELÉTRICA

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pampa, como requisito à obtenção de título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Engenharia de Materiais e Metalúrgica

Orientadora: Profa. Dra. Sabrina Neves da Silva
Coorientadora: Profa. Dra. Luciana Machado Rodrigues

Defesa de Mestrado defendida e aprovada em: 19 de fevereiro de 2021

Banca examinadora:

Profa. Dra. Sabrina Neves da Silva
Orientadora
UNIPAMPA

Profa. Dra. Luciana Machado Rodrigues
Coorientadora
UNIPAMPA

Prof. Dr. Alexandre Ferreira Galio
UNIPAMPA

Prof. Dr. César Antonio Oropesa Avellaneda
UFPEL



Assinado eletronicamente por **SABRINA NEVES DA SILVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/03/2021, às 11:25, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUCIANA MACHADO RODRIGUES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/03/2021, às 12:12, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ALEXANDRE FERREIRA GALIO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/03/2021, às 13:50, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **César Antonio Oropesa Avellaneda, Usuário Externo**, em 12/03/2021, às 14:40, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0482279** e o código CRC **BA1A4156**.

*Dedico este trabalho aos meus pais que são
os amores da minha vida | ♥*

RESUMO

O efeito de adições em argamassas e, em substituição ao cimento demonstram melhorias quanto à durabilidade de estruturas. Baseado nestes aspectos, esta pesquisa teve como objetivo geral avaliar argamassas com e sem armadura, em estado endurecido, com adições de resíduos da geração termoelétrica, cinza volante (CV) e o subproduto da dessulfurização gasosa (SP), em substituição parcial ao cimento Portland. A metodologia experimental consistiu em: a) Caracterizar os resíduos. b) Realizar ensaios mecânicos nas argamassas em diferentes tempos de cura. c) Avaliar a corrosão da armadura embutida nas argamassas. d) Estimar a redução de emissões de CO₂ ao substituir parcialmente o CP por adição mineral. Os resultados mostraram que: 1) As CV são constituídas por mullita, quartzo e hematita e caracteriza-se como um material 65% amorfo com diâmetro médio de 42,19 µm, mesoporoso e com área superficial específica 28,4 m²g⁻¹. O SP é material 40% amorfo e rico em sulfato de cálcio com diâmetro médio de 17,8 µm e área superficial específica 18,20 m²g⁻¹. 2) A adição de 6% CV melhora o desempenho mecânico da argamassa aos 28 dias de cura. 3) O estado de imunidade da armadura previsto pelo E_{corr} não foi evidenciado ao se analisar os valores da i_{corr} e a taxa de corrosão, os quais pressupõe-se uma tendência à corrosão. Com base no i_{corr} , foi demonstrado que a armadura embutida na argamassa com CV está passiva a partir de 30 dias. 4) Com a adição de 6% de CV emite-se menos 209,76 tCO₂.

Palavras-Chave: Durabilidade de estruturas. Resíduos. Adições em argamassas. Corrosão.

ABSTRACT

The effect of additions in mortars and, in place of cement, demonstrate improvements in the durability of structures. Based on these aspects, this research had as general objective to evaluate mortars with and without reinforcement, in a hardened state, with additions of residues of thermoelectric generation, AF (CV) and the by-product of gas desulfurization (SP), partially replacing Portland cement. The experimental methodology consisted of: a) Characterizing the residues. b) Perform mechanical tests on mortars at different curing times. c) Evaluate the corrosion of the built-in reinforcement in the mortars. d) Estimate the reduction of CO₂ emissions by partially replacing the with mineral addition. The results showed that: 1) CV are composed of mulite, quartz and hematite and is characterized as a 65% amorphous material with an average diameter of 42.19 μm, mesoporous and with a specific surface area 28.4 m²g⁻¹. SP is 40% amorphous material rich in calcium sulfate with an average diameter of 17.8 μm and specific surface area 18.20 m²g⁻¹. 2) The addition of 6% CV improves the mechanical performance of the mortar at 28 days of curing. 3) The state of immunity of the reinforcement predicted by the E_{corr} was not evidenced when analyzing the values of the i_{corr} and the corrosion rate, which assumes a tendency to corrosion. Based on the i_{corr}, it was demonstrated that the armor embedded in the mortar with CV is passive from 30 days. 4) With the addition of 6% CV, at 209.76 is issued.

Keywords: Durability of structures. Residues. Additions in mortars. Corrosion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura da pesquisa	22
Figura 2 – Fatores de deterioração de argamassas.....	26
Figura 3 – Abordagem holística para a DEF associada ao ataque interno de sulfatos .	27
Figura 4 – Pilha eletroquímica de corrosão na argamassa armada	31
Figura 5 – Curvas de polarização potenciodinâmica, anódica e catódica e extrapolação das retas de Tafel para determinação do valor do E_{corr} e da i_{corr} ...	35
Figura 6 – Exemplo típico de Diagrama de Nyquist, com vetor de impedância, e o circuito equivalente.....	38
Figura 7 – Diagrama de Bode representando a impedância (módulo e ângulo de fase) de um sistema eletroquímico de corrosão em função da frequência angular.....	38
Figura 8 – Diagrama de Nyquist a) Teórico e b) Medido por EIE	41
Figura 9 – Representação da separação de áreas	43
Figura 10 – Fluxograma dos procedimentos metodológicos	45
Figura 11 – Vista aérea do complexo Termelétrico de Candiota - RS.....	46
Figura 12 – Aspecto das amostras: a) CV e b) SP	47
Figura 13 – Barra de aço CA-50.....	49
Figura 14 – Tela inox AISI 304.....	49
Figura 15 – Revestimento anticorrosivo a base de Epóxi	50
Figura 16 – Pesagem dos materiais: a) areia; b) CP e c) água.....	53
Figura 17 – Corpos de prova identificados nos moldes a) e b) corpos de prova desmoldados após 24 horas.....	54
Figura 18 – Corpos de prova imersos em água saturada de cal até a idade de ruptura	55
Figura 19 – a) Barras de aço tipo CA-50 pintadas e b) no suporte para serem embutidas na argamassa	55
Figura 20 – Desenho esquemático do corpo de prova de argamassa com barra metálica	56
Figura 21 – Corpos de prova nos moldes e em cura com água saturada de cal	56
Figura 22 – a) mostra os corpos de prova antes do ensaio; b) o corpo de prova posicionado no equipamento e c) corpos de prova após as rupturas.....	57

Figura 23 – Corpos de prova em estufa a 105°C	58
Figura 24 – a) Corpos de prova apoiados sobre suportes e; b) detalhe do ensaio mostrando a ascensão de água no corpo de prova.....	59
Figura 25 – a) Corpos de prova antes do ensaio; b) Corpo de prova no equipamento e; c) corpos de prova após as rupturas	59
Figura 26 – Montagem da célula eletroquímica.....	60
Figura 27 – Microscópio Estereoscópico.....	61
Figura 28 – Curvas granulométricas dos materiais a) CV b) SP c) CP IV-32 RS e d) Areia	64
Figura 29 – Difratoograma da CV.....	67
Figura 30 – Difratoograma do SP	69
Figura 31 – Método de separação simples de áreas da CV.....	69
Figura 32 – Método de separação simples de áreas do SP	70
Figura 33 – DRX das argamassas com e sem aditivos após 200 dias.....	71
Figura 34 – Espectro Raman ($\lambda= 532$ nm) da CV	73
Figura 35 – Espectro Raman ($\lambda= 532$ nm) do SP.....	74
Figura 36 – Imagem da CV ao MEV.....	75
Figura 37 – Imagem do SP ao MEV	76
Figura 38 – Resistência à compressão	78
Figura 39 – Absorção de água por imersão	78
Figura 40 – Variação da absorção de água por capilaridade em função do tempo de imersão.....	80
Figura 41 – Corpos de prova rompidos diametralmente para aferição da ascensão de água.....	81
Figura 42 – Efeitos das adições na resistência mecânica	82
Figura 43 – Curvas de polarização demonstrativa para determinação do E_{corr} e i_{corr}	83
Figura 44 – Curvas de polarização, para análise comparativa do E_{corr} das argamassas armadas, com e sem as adições, medidas em solução de 5% de Na ₂ SO ₄ , a 25°C na velocidade de varredura de 10 mV/s em meio aerado para os tempos de (a) 0 e (b) 90 dias.....	84

Figura 45 – Curvas de polarização, para análise comparativa do E_{corr} das argamassas armadas, com e sem as adições, medidas em solução de 5% de Na_2SO_4 , a 25°C na velocidade de varredura de 10 mV/s em meio aerado para os tempos de 0 (linha cheia) e 90 (linha tracejada) dias para a argamassas.	85
Figura 46 – Curvas de polarização, das argamassas armadas, com e sem as adições, medidas em solução de 5% de Na_2SO_4 , a 25°C na velocidade de varredura de 10 mV/s em meio aerado para os tempos de (a) 0 dia; (b) 1 dia; (c) 3 dias; (d) 5 dias; (e) 10 dias; (f) 20 dias; (g) 30 dias; (h) 45 dias; (i) 60 dias e (j) 90 dias.....	88
Figura 47 – Evolução do (a) E_{corr} ; (b) i_{corr} ; (c) taxa de corrosão; (d) R_p e (e) EI (%) das argamassas armadas, com e sem as adições, medidas em solução de 5% de Na_2SO_4 , a 25°C em meio aerado para os tempos de 0 a 90 dias.	94
Figura 48 – Diagrama de Pourbaix para o sistema ferro/água a 25°C	97
Figura 49 – Desenho esquemático da tortuosidade em meio poroso	98
Figura 50 – Espectros de impedância das argamassas armadas, com e sem as adições, medido no tempo inicial (0 dia) em solução de 5% de Na_2SO_4 , a 25°C e meio aerado (a) Diagrama de Nyquist e (b) Diagrama de Bode.	100
Figura 51 – Espectros de impedância das argamassas armadas, com e sem as adições, medido após 90 dias em solução de 5% de Na_2SO_4 , a 25°C e meio aerado (a) Diagrama de Nyquist e (b) Diagrama de Bode.....	102
Figura 52 – Espectros de impedância, Diagramas de Nyquist, das argamassas armadas, com e sem as adições medidas em solução de 5% de Na_2SO_4 , a 25°C em meio aerado para os tempos de (a) 0 dia; (b) 1 dia; (c) 3 dias; (d) 5 dias; (e) 10 dias; (f) 20 dias; (g) 30 dias; (h) 45 dias; (i) 60 dias e (j) 90 dias.....	103
Figura 53 – Circuito elétrico equivalente proposto $R_s(C_{con}(R_{con}(C_{dc}R_{tc})))$	108
Figura 54 – (a) Resistência da argamassa (R_{bulk}) e (b) Condutividade efetiva (σ_{ef}) versus tempo.	109

Figura 55 – Imagens de lupa estereoscópica a) das argamassas e b) das barras. Destacam-se os pontos (1) da interface exposta/embutida e (2) corrosão na extensão da barra.....	111
Figura 56 – Variações do diâmetro das barras de aços embutidas nas a) REF; b) CV e c) SP.....	112
Figura 57 – Espectro de DRX dos produtos de corrosão	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de CP comercializados no Brasil	24
Tabela 2 – Classes de agressividade ambiental	25
Tabela 3 – Relação entre a expectativa de corrosão a partir da i_{corr}	36
Tabela 4 – Circuitos equivalentes encontrados na literatura para sistemas aço- argamassa.....	40
Tabela 5 – Composição química do CP IV-32 RS.....	47
Tabela 6 – Caracterização física do CP IV-32 RS.....	48
Tabela 7 – Composição química do aço CA-50	49
Tabela 8 – Traço convencional e traço com aditivos.....	53
Tabela 9 – Identificação das argamassas ensaiadas.....	54
Tabela 10 – Resultados dos materiais ensaiados na análise granulométrica	63
Tabela 11 – Características gerais das estruturas dos compostos presentes na CV....	65
Tabela 12 – Apresentação das celas unitárias das principais fases presentes na CV..	66
Tabela 13 – Composição das fases presentes da CV.....	66
Tabela 14 – Características gerais das estruturas dos compostos presentes no SP	67
Tabela 15 – Apresentação da cela unitária da principal fase presentes no SP	68
Tabela 16 – Composição da fase presente no SP	68
Tabela 17 – Composição do CV.....	72
Tabela 18 – Composição do SP.....	73
Tabela 19 – Classificação da durabilidade da argamassa em função da porosidade da absorção de água por imersão	79
Tabela 20 – Absorção de água por capilaridade	80
Tabela 21 – Resultados da ascensão capilar.....	81
Tabela 22 – Síntese dos resultados obtidos a partir das curvas de polarização mostradas na Figura 46.....	93
Tabela 23 – Variação da R_{bulk} e σ_{ef}	109
Tabela 24 – Resultados das pesquisas sobre emissões de CO_2 durante a produção de cimento Portland na construção de uma casa de 40m ²	114

LISTA DE SÍMBOLOS

A = Área transversal do corpo de prova (m^2)

b_a – Coeficiente (declive) de Tafel anódico

b_c – Coeficiente (declive) de Tafel catódico

C_{con} – Capacitância da argamassa

C_{dc} – Capacitância da dupla camada elétrica

C_r – Cristalinidade

E – Potencial

E_{corr} – Potencial de corrosão

EI – Eficiência de inibição

f – Frequência

I – Corrente

i – Densidade de corrente

i_{corr} – Densidade de corrente de corrosão

L = Comprimento da amostra (m)

R_{bulk} – Resistência de *bulk*

RC – Circuito resistor-capacitor

R_{con} – Resistência da argamassa

R_p – Resistência de polarização

R_s – Resistência da solução

R_{tc} – Resistência de transferência de carga

Z – Impedância

Z' – Impedância real

Z'' – Impedância imaginária

σ_{ef} – Condutividade elétrica efetiva

ϕ – Ângulo de fase

η = Sobretenção ($=E-E_{i=0}$);

LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

A – Alita

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AF – Cinza volante, da língua inglesa fly ash

B – Belita

BET – Brunauer, Emmett e Taller

BSE – Backscattered Electrons

BJH – Barret, Joyner e Halenda

C – Calcita

CEME-SUL – Centro de Microscopia Eletrônica da zona Sul

CIENTEC – Ciência e Tecnologia

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CP – Cimento Portland

CV – Cinza volante

DAEB – Departamento de Água e Esgotos de Bagé

DEF – Formação da Etringita Tardia, da língua inglesa Delayed Etringite Formation

DRX – Difração de raios-X

E – Etringita

EIE – Espectroscopia de Impedância Eletroquímica

EPH – Escala Padrão de Hidrogênio

FGD – Flue Gas Desulfurization

FEP – Fator de emissão de CO₂ devido a utilização da argamassa em edificações, em toneladas de CO₂ / tonelada de produto acabado.

FP – Fator de perda de argamassa

FURG – Universidade Federal de Rio Grande

ICSD – Inorganic Crystal Structure Database

ISO – International Organization for Standardization

LABEM – Laboratório de Ensaio Mecânicos

LRX – Laboratório de raios-X

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MT – Emissões de CO₂ devido a utilização de argamassa na obra, em toneladas de CO₂

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

QT – Quantidade de argamassa necessária na obra, em toneladas;

REF – Referência (corpo de prova)

P – Portlandita

Q – Quartzo

SINAPI – Sistema Nacional de Preços e Índices para a Construção Civil

SP – Subproduto da FGD

UFPEL – Universidade Federal de Pelotas

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

UTE's – Usinas Termelétricas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Objetivo geral	20
1.1.1	Objetivos específicos.....	20
1.2	Publicações resultantes da pesquisa.....	20
1.3	Estrutura da pesquisa.....	22
2	CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA	23
2.1	Cimento Portland.....	23
2.1.1	Tipos de CP.....	23
2.2	Argamassa armada	24
2.2.1	Durabilidade.....	25
2.2.2	Fatores de deterioração de argamassas armadas	25
2.2.2.1	Formação da Etringita Tardia.....	26
2.3	Pozolanas.....	27
2.4	Resíduos sólidos gerados por UTE's	28
2.4.1	Subproduto da FGD	28
2.4.2	CV	29
2.4.2.1	Adição de CV em argamassas	29
2.5	Corrosão em argamassas armadas	30
2.5.1	Inibidores de corrosão.....	32
2.6	Avaliação da corrosão por técnicas eletroquímicas	34
2.6.1	Polarização	34
2.6.2	Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE)	37
2.6.2.1	Interpretação dos Resultados de EIE	37
2.6.2.2	Uso da EIE para avaliação da corrosão em argamassa armada	39
2.7	Técnicas de caracterização de materiais	41
2.7.1	Análise granulométrica.....	42
2.7.2	Caracterização da estrutura porosa e da área superficial específica.....	42
2.7.3	Difração de raios-X.....	42
2.7.3.1	Estimativa da cristalinidade de materiais a partir do espectro de DRX	43

2.7.4	Espectroscopia Raman.....	44
2.7.5	Microscopia Eletrônica de Varredura	44
3	MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1	Materiais.....	46
3.1.1	Caracterização da usina	46
3.1.2	Resíduos	46
3.1.3	Aglomerante	47
3.1.4	Agregado miúdo.....	48
3.1.5	Água	48
3.1.6	Aço.....	48
3.1.7	Tela	49
3.1.8	Tinta.....	50
3.2	METODOLOGIA	50
3.2.1	Ensaio para caracterização das amostras de CV e SP	50
3.2.1.1	Análise granulométrica.....	50
3.2.1.2	Caracterização da estrutura porosa e da área superficial específica.....	51
3.2.1.2	Difração de raios-X.....	51
3.2.1.3	Espectroscopia Raman.....	52
3.2.1.4	Microscopia Eletrônica de Varredura	52
3.3	Preparação dos corpos de prova.....	52
3.4	Preparo dos corpos de prova para os ensaios eletroquímicos	55
3.5	Ensaio de compressão	57
3.6	Absorção de água por imersão.....	57
3.7	Absorção de água por capilaridade.....	58
3.8	Ensaio eletroquímico	59
3.8.1	Análise visual da corrosão e da variação diametral das barras e composição dos produtos de corrosão	61
3.9	Análise estatística	61
3.10	Estimativa da quantificação de emissões de CO₂.....	62
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
4.1	Análise granulométrica.....	63

4.2	Caracterização da estrutura porosa e da área superficial específica.....	64
4.3	Difração de raios-X.....	65
4.3.1)	CV	65
4.3.2)	SP	67
4.3.3	Grau de cristalinidade a partir do espectro de DRX.....	69
4.3.3.1)	CV	69
4.3.3.2)	SP	70
4.4	Formação da etringita tardia	71
4.5	Espectroscopia Raman.....	72
4.5.1)	CV	72
4.5.2)	SP	73
4.6	MEV.....	74
4.7	Resistência à compressão	76
4.8	Absorção de água por imersão	78
4.9	Absorção de água por capilaridade.....	79
4.10	Análise estatística	82
4.11	Ensaio eletroquímico	82
4.11.1	Polarização	83
4.12	Determinação da resistência do concreto (R_{bulk}) e da condutividade efetiva (σ_{ef}) a partir da EIE	99
4.13	Análise visual da corrosão e da variação diametral das barras e composição dos produtos de corrosão	111
4.14	Estimativa da quantificação de emissões de CO_2	114
5	CONCLUSÃO	116
	REFERÊNCIAS.....	118

1 INTRODUÇÃO

Concretos e argamassas são os materiais mais utilizados em construções no Brasil, cerca de 90%, e também no mundo pela sua versatilidade e facilidade de manuseio podendo ser aplicado em muitos segmentos da construção civil. Estes materiais, podem ser encontrados nos mais diversos ambientes e estão frequentemente sujeitos a agentes agressivos que comprometem diretamente a durabilidade da estrutura (TREVISOL *et al.*, 2017).

De acordo com Medeiros (2017), na argamassa armada, as armaduras de aço são previamente posicionadas dentro do molde e logo em seguida o material fresco é lançado para preencher a fôrma, envolvendo as armaduras. Após a cura e o endurecimento do material, a fôrma é retirada originando a peça de argamassa armada ou ferrocimento.

A corrosão é uma das principais causas de redução da vida útil de estruturas de argamassas. Esta, envolve a perda de material da superfície do aço como resultado de uma ação química. A perda material, leva a redução de área efetiva na seção transversal diminuindo a capacidade de suportar cargas (KARI *et al.*, 2014).

A formação dos produtos de corrosão, gera um campo de tensões interno, localizado na zona de interface aço-argamassa que em função da sua magnitude, leva a formação de fissuras que se propagam em direção às faces do material expostas à atmosfera (NGUYEN *et al.*, 2015).

A crescente necessidade de minimizar impactos ambientais e ainda, fabricar um produto com menor custo, incentivou o desenvolvimento de materiais alternativos que adicionados a argamassa, pudessem melhorar o seu desempenho e suas propriedades mecânicas, como cimentos com adições de materiais de descarte (CABRAL; AZEVEDO, 2016).

Resíduos gerados na queima de carvão mineral em Usinas Termelétricas, como as cinzas (leves e pesadas) e o subproduto da FGD são materiais geralmente estocados a céu aberto podendo acarretar danos à saúde humana e ao meio ambiente. Sendo assim, é inadmissível o descarte de resíduos que comprovadamente possuem características de material pozolânico e que podem ser utilizados em concretos e argamassas em substituição parcial ao cimento Portland (CP), para melhorar as propriedades mecânicas e também inibir as reações de corrosão (JUNG *et al.*, 2018).

1.1 Objetivo geral

A pesquisa tem como objetivo geral avaliar as propriedades de argamassas cimentícias com e sem armadura, com adições de resíduos da geração termelétrica.

1.1.1 Objetivos específicos

O objetivo geral abrange os seguintes objetivos específicos:

- i) Caracterizar os resíduos por análises químicas, físicas e microscópicas.
- ii) Realizar ensaios mecânicos nas argamassas em diferentes tempos de cura.
- iii) Avaliar por técnicas eletroquímicas a corrosão da armadura.
- iv) Realizar ensaios eletroquímicos nas argamassas para avaliar a corrosão da armadura.
- v) Estimar a redução da emissão de CO₂.

1.2 Publicações resultantes da pesquisa

Capítulos de livros:

Engenharia no século XXI – Editora Poisson, v. 17. 1º ed. Belo Horizonte, 2020 (formato PDF) ISBN: 978-65-86-127-91-1

- Capítulo 12: Estudo do efeito inibidor das cinzas de carvão mineral na corrosão do aço embutido em argamassa em meio a íons sulfato, p. 117-135
Autores: Daniele Ferreira Lopes, Sabrina Neves da Silva
DOI: 10.36229/978-65-86127-91-1.CAP.12

Práticas de corrosão – Editora Rfb, v. 1. 1º ed. Belém do Pará, 2020 (formato PDF)

- Capítulo 1: Desenvolvimento de revestimentos anticorrosão contendo adições de cinzas de carvão mineral
Autores: Mateus Cereza Brandão, Daniele Ferreira Lopes, Luciana Machado Rodrigues, Sabrina Neves da Silva
- Capítulo 2: Aplicação do subproduto da FGD (*flue gas desulfurization*) como aditivo anticorrosão em concreto armado e tintas.

Autores: Jéssica Martins Prado, Bruna Carvalho Antunes, Daniele Ferreira Lopes, Luciana Machado Rodrigues, Sabrina Neves da Silva

Revistas

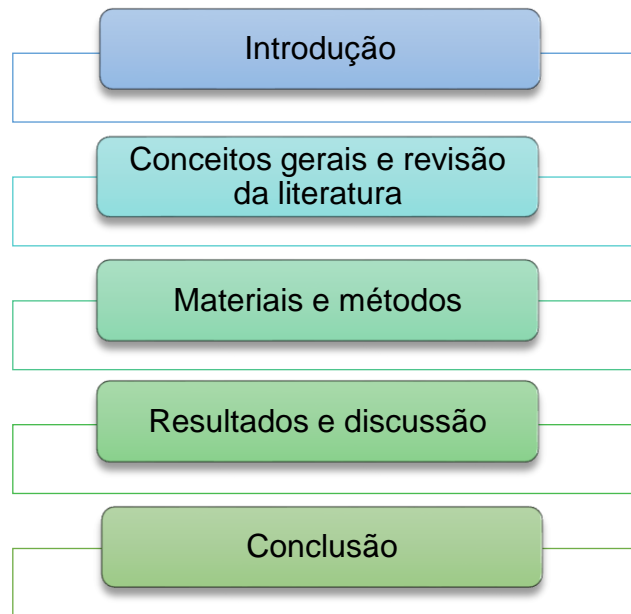
Revista Matéria - UFRJ - versão On-line ISSN 1517-7076.

- Título: Desenvolvimento de revestimentos anticorrosão contendo adições de cinzas de carvão mineral
Autores: Daniele Ferreira Lopes, Sabrina Neves da Silva, Luciana Machado Rodrigues
Data do envio: Junho de 2020
- Título: Avaliação das propriedades de argamassas cimentícias com adição de resíduos da geração termoelétrica
Autores: Daniele Ferreira Lopes, Sabrina Neves da Silva, Luciana Machado Rodrigues
Data do envio: Outubro 2020
- Título: Avaliação por Impedância Eletroquímica da resistência ao transporte de íons sulfato em argamassas armadas contendo resíduos da geração termelétrica
Autores: Daniele Ferreira Lopes, Sabrina Neves da Silva, Luciana Machado Rodrigues
Data do envio: Outubro de 2020

1.3 Estrutura da pesquisa

A pesquisa está dividida em cinco etapas, de acordo com a Figura 1.

Figura 1 – Estrutura da pesquisa



Fonte: Autora (2020)

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

Capítulo destinado a apresentar o referencial teórico da pesquisa que é fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

2.1 Cimento Portland

Joseph Aspdin foi o responsável pela patente do CP em 1824. Este cimento foi obtido a partir da queima de calcário e argila em um forno de alvenaria à elevada temperatura. O nome Portland, faz referência a rochas calcárias da Península de Portland, localizadas no sul da Inglaterra (LESSARD; AITCIN, 2019).

O CP é o material base para a execução de obras civis, sendo este um dos materiais mais utilizados no mundo de acordo com a (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAN, 2019).

Por ser o CP um aglomerante mineral, o contato com a água faz dele um ligante devido as suas propriedades hidráulicas. Com isso, esse tipo de material em composição com a água resulta em processo físico-químico tornando-se um material sólido, com grande potencial de resistência mecânica (WITZKE *et al.*, 2019).

Com os avanços da engenharia, obtém-se cada vez mais materiais eficientes e sustentáveis, a fim de obter melhores resultados e diminuição de custos. No caso do cimento, são feitas adições de materiais com o objetivo de melhorar as propriedades e produzir diferentes tipos de cimento disponíveis no mercado atualmente, conforme mencionado pela ABCP.

2.1.1 Tipos de CP

No Brasil, são produzidos diversos tipos de CP que diferem entre si, principalmente em função de sua composição. Cada um deles foi projetado e fabricado para um tipo de construção e a fórmula é completamente diferente de acordo com cada finalidade do produto. A Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 16697 (2018) expõe a constituição dos CP's produzidos a partir do produto base (clínquer + gesso), como mostra a Tabela 1, adaptado de PEREIRA (2012).

Tabela 1 – Tipos de CP comercializados no Brasil

Cimento Portland (ABNT)	Tipo	Clínquer + Gesso (%)	Material Pozolânico (%)	Calcário (%)
CP I	Comum	100	-	-
CP I – S	Comum	95-99	1-5	1-5
CP II – E	Composto	56-94	-	0-10
CP II – Z	Composto	76-94	6-14	0-10
CP II – F	Composto	90-94	-	6-10
CP III	Alto-forno	25-65	-	0-5
CP IV	Pozolânico	45-85	15-50	0-5
CP V – ARI	Alta resistência inicial	95-100	-	0-5

Fonte: Adaptado de Pereira (2012)

2.2 Argamassa armada

Couto *et al.* (2013) conceituam argamassa armada como um material de construção resultante da união de argamassas simples e de barras de aço, envolvidas por esta, com perfeita aderência entre os dois materiais, de tal maneira que resistam aos esforços a que forem solicitados.

A armadura formada por um conjunto de barras de aço, quando envolvida pela argamassa, formam a argamassa armada. Esta, alia as qualidades da argamassa (baixo custo, durabilidade, boa resistência à compressão, ao fogo e a água) com as qualidades do aço (ductilidade e excelente resistência à tração e à compressão) resultando em um material com altas resistências mecânicas. Porém, uma questão importante a ser observada é a aderência entre estes materiais, de modo que ambos trabalhem em conjunto (BASTOS, 2019).

Sendo assim, a argamassa armada pode ser considerada um tipo de concreto estrutural, contudo, sem os componentes de maior espessura como o agregado graúdo. Devido a isso, tem mais aplicação em estruturas esbeltas, ou seja, em projetos arquitetônicos mais arrojados, os quais requerem menores seções e maiores cargas aos elementos estruturais, para atender as necessidades do mercado (MIRANDA, 2016).

2.2.1 Durabilidade

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 6118 (2014), as estruturas devem ser projetadas para serem resistente e duráveis. Como parâmetro para previsão de durabilidade da estrutura, deve-se considerar o ambiente que ela está inserida. A classe de agressividade ambiental relaciona parâmetros físicos e químicos que atuam sobre as estruturas de concreto. A Tabela 2, indica a classe de agressividade ambiental (variando de I – Fraca até IV – Muito forte).

Tabela 2 – Classes de agressividade ambiental

Classes	Grau de agressividade	Classificação do ambiente	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural/submersa	Insignificante
II	Moderada	Urbana	Pequeno
III	Forte	Marinha/industrial	Grande
IV	Muito forte	Industrial/respingo de maré	Elevado

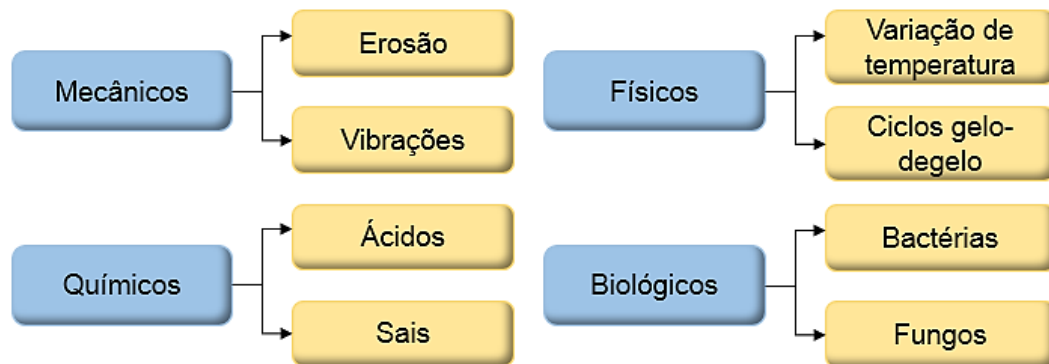
Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 6118 (2014)

2.2.2 Fatores de deterioração de argamassas armadas

A argamassa fica exposta a efeitos de um conjunto de agentes agressivos (deletérios), dependendo das condições climáticas e diferentes fatores destrutivos que podem ocorrer de forma isolada ou em conjunto. As ações ambientais que interagem com a microestrutura e as propriedades deste material, podem ocasionar mudanças ao longo do tempo (CASTRO, 2016).

A taxa de penetração de agentes deletérios nas argamassas está diretamente ligada a porosidade da pasta de cimento. É a permeabilidade que controla a taxa de ingresso e movimentação de agentes deletérios que podem comprometer física e quimicamente a estrutura interna deste material, que pode ocasionar na deterioração da sua macro e microestrutura (MELLO *et al.*, 2019). A Figura 2 apresenta o fluxograma dos principais fatores de deterioração de argamassas.

Figura 2 – Fatores de deterioração de argamassas



Fonte: Adaptado de Gentil (2011)

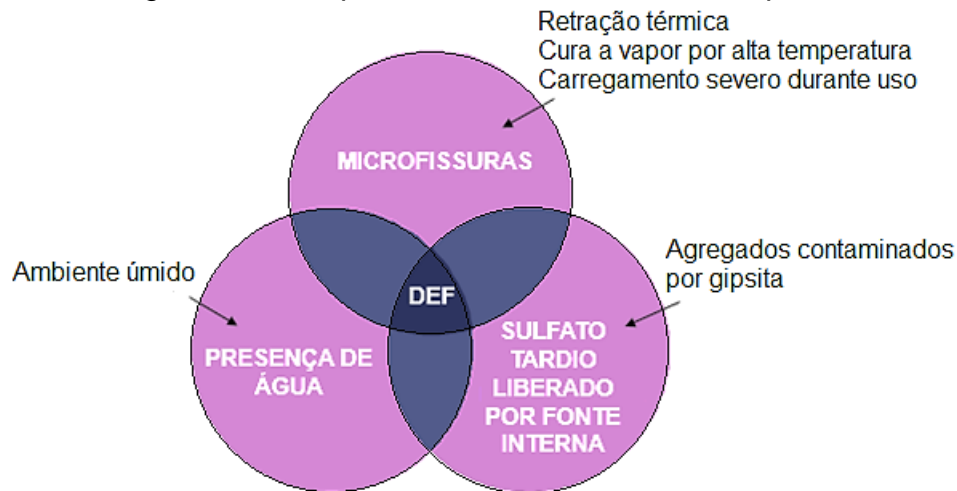
2.2.2.1 Formação da Etringita Tardia

Etringita é o nome do mineral formado por sulfoaluminato de cálcio que é normalmente encontrado no CP. A formação da DEF (Delayed Etringite Formation) é um tipo de ataque por sulfato (MELO, 2010).

Conforme (Melo, 2010) a DEF se desenvolve quando há uma inserção de sulfatos do meio externo ou uma fonte interna (do concreto), esses sulfatos são oriundos da utilização de um agregado que apresenta a gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) na sua composição ou do cimento que tenha um teor de sulfato elevado. A contaminação por gipsita pode provocar uma reação com a formação de produtos expansivos que geram fissuras na estrutura.

Pode-se minimizar a formação de DEF pela adição de substâncias contendo quartzo em substituição ao cimento na argamassa, dessa forma, tem-se uma diminuição da porosidade e, conseqüentemente, minimiza-se a penetração de sulfatos. Além disso, com as adições tem-se um menor consumo de cimento e diminuição do calor de hidratação da pasta (HOPPE *et al.*, 2015). A Figura 3 mostra uma relação entre a formação da DEF e o ataque de sulfatos.

Figura 3 – Abordagem holística para a DEF associada ao ataque interno de sulfatos



Fonte: Adaptado de Mehta *et al.* (2008)

2.3 Pozolanas

De acordo com Paiva *et al.* (2016), as pozolanas são materiais silicosos ou sílico-aluminosos finamente divididos que uma vez adicionados ao cimento, conferem interação química e física com os produtos da hidratação do clínquer ou do cimento, modificando a microestrutura do material. O efeito químico diz respeito à capacidade de reação da adição mineral com o hidróxido de cálcio, gerado durante a hidratação do cimento, para formar silicato de cálcio hidratado.

As pozolanas podem contribuir com o ganho de resistência mecânica, redução da absorção de água por capilaridade e melhoria da trabalhabilidade devido ao efeito físico das partículas na distribuição granulométrica do sistema. Um dos métodos frequentemente empregados para medir a atividade pozolânica é a evolução da resistência mecânica ao longo do tempo. A resistência e durabilidade da pozolana como material cimentante pode ser observada por meio das ruínas de obras romanas, que são relíquias que resistem ao tempo até os dias de hoje (CHOTOLI *et al.*, 2015).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 12653 (2014) classifica os materiais pozolânicos quanto a sua origem, que são divididas em três classes:

a) Classe **N**: Pozolanas de origem natural ou artificial, materiais vulcânicos, argilas calcinadas e terras diatomáceas.

- b) Classe **C**: Pozolana gerada por meio da combustão de carvão mineral oriundo de UTE's.
- c) Classe **E**: Pozolanas não enquadradas nas classes anteriores.

2.4 Resíduos sólidos gerados por UTE's

Os resíduos gerados da produção industrial que não podem ser descartados sem controle, exigem um método específico para sua eliminação. A queima de carvão mineral nas UTE's gera energia, porém produz resíduos durante o processo. Estes são classificados como escórias, cinzas de fundo pesadas ou (*botton ash*) e cinzas leves ou (*fly ash*) além de resíduo da FGD (SABEDOT *et al.*, 2011).

A intensificação do uso desta matéria-prima energética tende a elevar o problema de gestão destes resíduos gerados em vários lugares do mundo. A forma de acumulação destes resíduos se dá por decisão puramente econômica e não leva em consideração os impactos ambientais, sendo dispostas de forma inadequada dentro do perímetro urbano e em zonas rurais (TOLMASQUIM, 2016).

2.4.1 Subproduto da Flue Gas Desulfurization

O processo mais utilizado atualmente para a remoção do SO₂ é de *Flue Gas Desulfurization* (FGD). Sua utilização é essencial para que os limites de emissão de SO₂ sejam atingidos, de acordo com as resoluções impostas pelo CONAMA, nº 436 (BRASIL, 2011).

De acordo com Caillahua e Moura (2013), o processo de dessulfurização de gases permite a remoção dos gases de SO₂ pela adsorção destes, em um meio alcalino. Após a captura deste gás é gerado um material que varia de acordo com o tipo de substância utilizada como adsorvente, porém em sua maioria, o material gerado é majoritariamente composto por gipsita e somente uma parte desse resíduo é reaproveitada (30%) enquanto o restante é descartado.

Este subproduto já vem sendo utilizado em grande escala na construção civil, bem como, na estabilização do solo, tendo em vista que a maior parte do resíduo gerado apresenta características próximas ao gesso utilizado no mercado da construção, porém

sua geração ultrapassa a quantidade que o mercado consegue absorver. Neste sentido, é importante desenvolver novas formas de aplicações para este resíduo (CARVALHO, 2017).

Este material é alvo de muitos estudos, por conter cinzas, além do fato de apresentar diversas aplicações tecnológicas. Sua composição química é semelhante à de alguns materiais cerâmicos. Por esse motivo, algumas das principais aplicações têm sido na fabricação de diversos tipos de peças cerâmicas e, principalmente, como materiais para a construção civil (SANTANA 2018).

2.4.2 Cinzas Volantes

As CV's são subprodutos resultantes da combustão do carvão mineral em caldeiras. Para as empresas geradoras, este resíduo tornou-se um problema em relação ao seu descarte final, uma vez que a disposição deste em aterros oferece perigos potenciais aos mananciais hídricos, contaminando as águas superficiais e subterrâneas e ao solo, contaminam por lixiviação (CANUL *et al.*, 2016).

Um estudo realizado por Pouey (2006), mostrou que existem diferenças significativas na composição mineral das cinzas pesadas e leves geradas pelo Complexo Termelétrico de Candiota, demonstrando que as características composicionais e estruturais é que vão determinar as propriedades tecnológicas destes rejeitos e estão diretamente relacionadas com as condições de queima e características do carvão mineral.

Destaca-se, neste sentido, a importância da caracterização que tem por objetivo a definição de parâmetros físicos, químicos e mineralógicos dos rejeitos a fim de se identificar melhores alternativas para aplicação destes e contribuir para a sustentabilidade ambiental e econômica da região produtora.

2.4.2.1 Adição de CV em argamassas

Para Fraga e Albuquerque (2017), o uso de CV como adição mineral na produção de concretos e argamassas melhora a coesão e a trabalhabilidade, diminuindo a exsudação e a segregação dos componentes. Já no estado endurecido, a adição de CV

contribui para a diminuição da temperatura devido às reações de hidratação que se apresentam inicialmente de forma mais lenta.

No âmbito da sustentabilidade, o uso de CV aliado a novas tecnologias de produção, contribui de forma efetiva para redução de emissão de CO₂, principal passivo ambiental da indústria do cimento. Com este cenário, o Brasil tem se colocado em destaque com o emprego deste resíduo na produção do CP, principalmente na região sul do país, onde há maior produção desta cinza devido ao alto consumo de carvão mineral pelas UTE's em funcionamento (ALTHERMAN *et al.*, 2017).

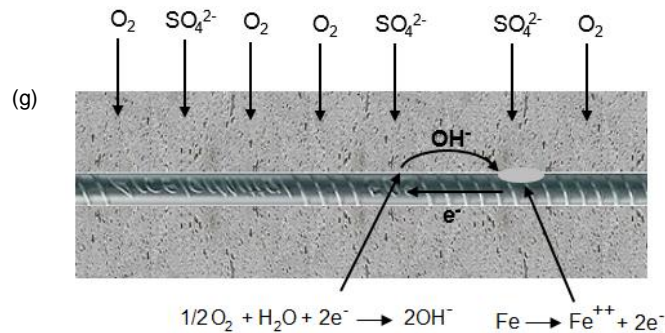
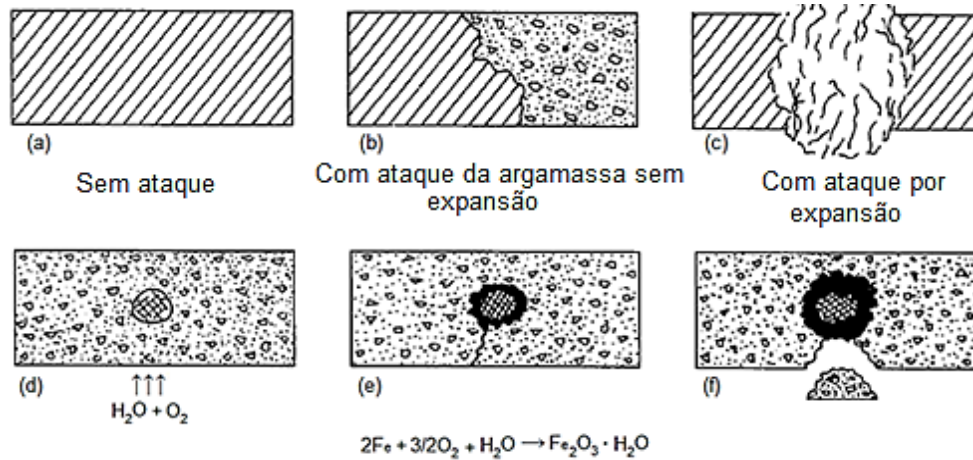
2.5 Corrosão em argamassas armadas

A corrosão das armaduras de aço em argamassas é um processo eletroquímico, causado pelas diferenças nas concentrações de íons dissolvidos, de forma que uma parte do metal se torna catódica e outra anódica, fazendo com que haja perda de volume do material, gerando produtos de corrosão, e conseqüentemente redução de capacidade de carga da estrutura (CASCUDO, 1997).

A elevada porosidade é prejudicial para a resistência à corrosão da argamassa armada, pois permite que agentes agressivos do meio ambiente penetrem na argamassa pelos poros e microfissuras. Quando os agentes atingem a superfície metálica, as condições necessárias para a iniciação do processo corrosivo são criadas ocorrendo diminuição do pH da argamassa e a quebra do filme passivo. Este filme protege a armadura da corrosão. Entretanto, o filme pode ser atacado diante da presença de íons cloretos e sulfatos e também pela diminuição da alcalinidade da argamassa. A diminuição da alcalinidade pode ocorrer devido às reações de carbonatação ou mesmo à penetração de substâncias ácidas no concreto (CASCUDO, 1997).

Sendo assim, na Figura 4 são mostrados os mecanismos de deterioração de argamassa sem armadura (a-c) e armada (d-f). Já a Figura 4(h) detalha a microcélula de corrosão, quando as reações anódica e catódica ocorrem em partes adjacentes da mesma barra metálica (HANSON; POURSAEE; LAURENT, 2006 *apud* UCHÔA, 2007).

Figura 4 – Pilha eletroquímica de corrosão na argamassa armada

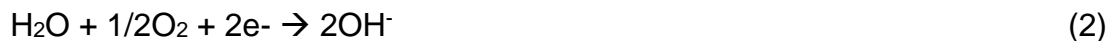


Fonte: Adaptado de Gentil (2011) e Uchôa (2007)

A zona anódica é a parte da armadura que perde massa devido à dissolução do ferro (Fe), Equação 1:



Os íons Fe^{2+} migram pelo eletrólito em direção à parte catódica da barra. Na região catódica, oxigênio (O_2) é reduzido a íon hidroxila (OH^-), Equação 2:



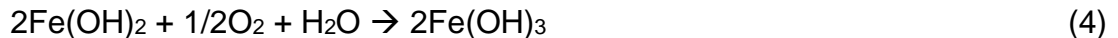
A reação entre os íons Fe^{2+} e OH^- pode acontecer em uma região intermediária, Equação 3:



O produto da reação 3 é o hidróxido ferroso, que pode se formar próximo a área catódica pois o Fe^{2+} tem mais mobilidade do que o OH^- . O $Fe(OH)_2$ pode sofrer outras transformações, gerando diversos produtos de corrosão, conforme se tenha meios mais

ou menos aerados, maior teor de íons agressivos ou variando-se a temperatura do meio (CASCUDO, 1997).

Pode ocorrer a formação de hidróxido férrico, um produto insolúvel em água, de cor marrom-avermelhada, formado pela reação descrita na Equação 4:



Outros produtos podem ser formados como o óxido férrico ou “ferrugem negra” (Fe_3O_4), e cloreto ferroso ou “ferrugem verde” (FeCl_2) e ainda outras fases de óxidos férricos e ferrosos, hidróxidos. O Fe_3O_4 e o $\text{Fe}(\text{OH})_3$ são expansivos e podem ocupar um volume de 2 a 10 vezes maior que o Fe da armadura causando assim, tensões internas de tração na argamassa. Estes produtos possuem baixa aderência provocando expansões que levam a fissuras do material, havendo o destacamento do revestimento e, conseqüentemente deixando exposta a armadura (MONTEMOR *et al.*, 2003; MELO; 2009).

Conforme Köliö *et al.* (2017), a fissuração na argamassa se origina da expansão causada pela formação dos produtos de corrosão, devido ao campo de tensões que é induzido na região entre o aço e a argamassa. Em função da magnitude das tensões de tração geradas pelos produtos de corrosão, podem surgir fissuras que facilitam o ingresso do CO_2 , afetando a durabilidade da estrutura.

Visando retardar o processo corrosivo, medidas preventivas podem ser adotadas. Entre estas, tem-se o uso de aditivos inibidores de corrosão. O uso dos inibidores só se justifica se a economia a longo prazo compensar o investimento inicial com a prevenção da corrosão. A literatura indica que o uso de aditivos e inibidores de corrosão diminui a manutenção e dependendo da agressividade do ambiente, pode mesmo vir a eliminar a necessidade desta. Aditivos inibidores, como qualquer outro aditivo, não devem mudar as características da argamassa (OLIVEIRA, 2019).

2.5.1 Inibidores de corrosão

Os inibidores de corrosão são compostos que ao serem adicionados à massa de argamassa fresca, formam um filme na superfície do material metálico, protegendo a armadura expostas a ambientes agressivos. Para o caso específico de argamassas, os inibidores, como quaisquer outros aditivos, não devem afetar de forma adversa as

propriedades da mistura, seja no estado fresco ou endurecido. Os efeitos adversos às propriedades do material podem fazer com que uma determinada substância se torne proibitiva para uso em estruturas armadas, mesmo que esta iniba o processo corrosivo (TREJO *et al.*, 2009).

É importante ressaltar, que um inibidor de corrosão tem a função de prevenir ou diminuir a taxa de corrosão e não eliminar totalmente a sua ocorrência. Os inibidores são coadjuvantes de uma boa técnica de construção que abrange desde a fase de projeto, escolha de materiais, execução e manutenção preventiva da estrutura armada. Quando utilizados de forma correta esses inibidores vão retardar possíveis intervenções em construções (UCHÔA, 2007).

A forma de atuação do inibidor sobre um processo de corrosão é utilizada para classificá-lo. Os inibidores anódicos causam um deslocamento do E_{corr} no sentido anódico de modo a minimizar a reação anódica (dissolução do metal). Os inibidores catódicos diminuem a taxa de reação catódica (redução do oxigênio), bem como, precipitam na superfície catódica, aumentando a impedância da superfície e limitando a difusão de espécies redutíveis para esta região (DONG *et al.*, 2011; GENTIL, 2011).

No caso de inibidores mistos, o deslocamento do E_{corr} acontece tanto para o lado catódico quanto para o lado anódico, atuando de maneira ativa através da formação de uma película sobre o metal (parte catódica) e de maneira passiva reduzindo a dissolução metálica (GENTIL, 2011).

As adições minerais podem melhorar as propriedades da argamassa armada, sobretudo quanto à permeabilidade, a qual está diretamente relacionada ao transporte de agentes agressivos. Para corrosão de armaduras esta característica é fundamental, pois pode retardar o início do processo corrosivo e, uma vez iniciado, diminuir a taxa de corrosão.

O retardo no início e no desenvolvimento da corrosão em argamassas contendo CV foi evidenciado por (SARAWATHY *et al.*, 2003; SUN *et al.*, 2008; JIANG *et al.*, 2004).

A relação entre a Eficiência de Inibição percentual (EI%) com a i_{corr} com e sem aditivo, conforme GENTIL (2011) é dada pela Equação 5:

$$EI = \left(1 - \frac{i}{i_0}\right) \times 100 \quad (5)$$

Onde:

i = densidade de corrente de corrosão com adição de inibidor;

i_0 = densidade de corrente de corrosão sem adição de inibidor.

2.6 Avaliação da corrosão por técnicas eletroquímicas

Os processos de corrosão são complexos e ocorrem sob condições bem diferentes, o que leva ao desenvolvimento de grande número de métodos de ensaios. Para avaliar a corrosão ou qualquer processo eletroquímico em argamassas armadas, as técnicas eletroquímicas mais utilizadas têm-se as curvas de polarização e a Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE).

Estas, além de analisar a corrosão como fenômeno eletroquímico, tem a vantagem de serem rápidas e não causar danos à estrutura no momento da medida, podendo ser aplicada tanto em campo quanto em laboratório (RIBEIRO *et al.*, 2015).

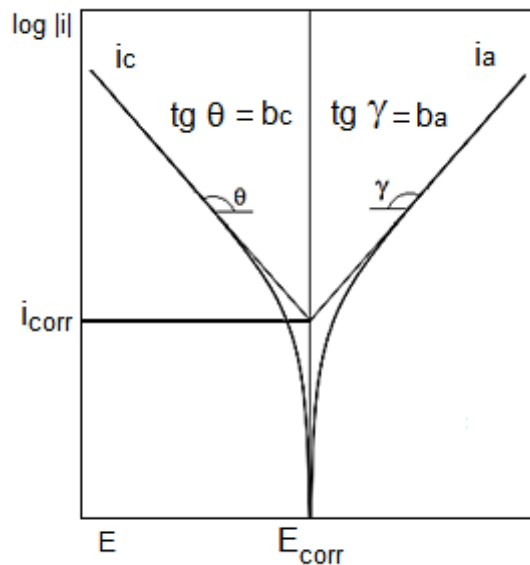
2.6.1 Polarização

A polarização potenciodinâmica é a técnica para a obtenção de curvas de polarização e prevê a varredura contínua do potencial, iniciando-se no potencial de corrosão (que é estabelecido a partir da imersão do material na solução, também chamado de potencial de circuito aberto) ou em potencial onde predominam reações catódicas (menores que o potencial de corrosão), elevando-se o potencial à taxa de varredura constante. A velocidade da varredura, a composição da solução, o tempo de imersão anterior à varredura de potencial e a temperatura de ensaio podem influenciar a forma das curvas de polarização (ZHANG *et al.*, 2009).

O princípio da polarização consiste na aplicação de sobre potenciais em relação ao potencial de corrosão (E_{corr}), nos sentidos anódico e catódico, exercendo-se assim uma polarização no metal e medindo-se, simultaneamente, a corrente (i) que circula entre o eletrodo de trabalho e o contra eletrodo e dando origem às curvas de polarização. As curvas de polarização são uma associação entre o sobre potencial *versus* a densidade de corrente (i), ou logaritmo da densidade de corrente, ($\log |i|$) (WOLYNEC, 2003).

A partir dos diagramas E versus $\log |i|$, obtêm-se os valores de i_{corr} e do E_{corr} por extrapolação da porção linear anódica e catódica, culminando na intersecção das duas retas (Retas de Tafel), conforme mostra a Figura 5. A partir da i_{corr} define-se a taxa de corrosão (MENNUCI, 2006).

Figura 5 – Curvas de polarização potenciodinâmica, anódica e catódica e extrapolação das retas de Tafel para determinação do valor do E_{corr} e da i_{corr}



Fonte: Adaptado de Souza (2005) *apud* Mennuci (2006)

A Equação de Tafel descreve uma relação linear, tanto catódica, como anódica, entre a sobretensão e o logaritmo da I , conforme a Equação 6, apresentada por BERTOLINI (2010) *apud* ALMEIDA (2013).

$$\eta = b_a + b_c \cdot \log(I) \quad (6)$$

Onde:

η = Sobretensão ($=E-E_{i=0}$);

b_a, b_c = Coeficientes (declives) de Tafel anódico e catódico respectivamente;

I = Corrente

Segundo Cascudo (1997), para traçar as retas de Tafel, é ideal considerar o intervalo de ± 250 a 300 mV em relação ao E_{corr} . A Tabela 3 mostra a relação entre a i_{corr}

e o estado de corrosão de armaduras de aço embutidas em matrizes de acordo com Andrade e Alonso (1995). Estes valores foram adotados como critério de análise nesta pesquisa.

Tabela 3 – Relação entre a expectativa de corrosão a partir da i_{corr}

i_{corr} (μAcm^{-2})	Previsão de corrosão
< 0,1	Passividade
0,1 < a < 0,5	corrosão baixa
0,5 < a < 1,0	corrosão alta
> 1	corrosão muito alta

Fonte: Adaptado de Andrade; Alonso (1995)

A relação entre a resistência de polarização (R_p) e a i_{corr} é dada pela Equação 7, conforme (STERN; GEARY, 1957 *apud* MONTEMOR *et al.*, 2003):

$$R_p = \frac{B}{A \cdot i_{corr}} \quad (7)$$

Onde:

R_p = Resistência de polarização;

$B = b_a \cdot b_c / 2,303 \cdot (b_a + b_c)$;

A = Área da armadura;

i_{corr} = Densidade de corrente de corrosão.

Andrade e Alonso (1995), relatam que o valor de B, no caso de matrizes cimentícias, varia entre 26 mV e 52 mV dependendo do estado de passividade ou de atividade da armadura. Utiliza-se frequentemente o valor de 26 mV para o caso de armadura estar no estado de corrosão e 52 mV para o estado passivo. O potencial é em relação ao eletrodo de hidrogênio.

A R_p diminui conforme o avanço da despassivação do metal, ou seja, quanto maior o R_p menor será a corrosão do material metálico. Dessa forma, pode-se relacionar a R_p com taxa de corrosão (VIEDMA *et al.*, 2006).

2.6.2 Espectroscopia de Impedância Eletroquímica

A EIE é utilizada para determinação da contribuição de processos individuais de eletrodo ou eletrólito em sistemas eletroquímicos. A impedância de um circuito elétrico representa o nível de dificuldade pelo qual um sinal elétrico de potencial ou corrente enviado a este circuito encontra ao percorrê-lo. Os elementos do circuito elétrico podem ser de resistência, capacitância e indutância (OLIVEIRA, 2012).

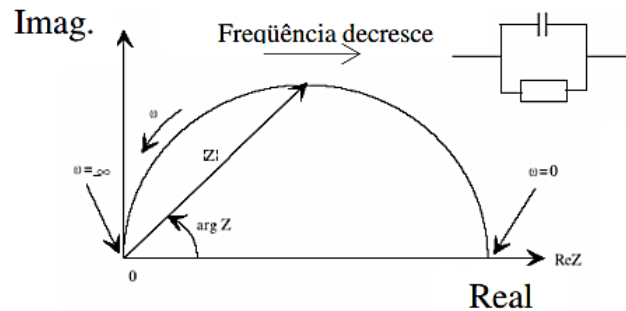
Essa técnica é cada vez mais aplicada em diversos estudos de corrosão, por possibilitar a separação de vários processos que ocorrem com cinéticas diferentes, além de permitir a identificação de propriedades que não envolvam a transferência de carga, como por exemplo, a capacitância da dupla camada elétrica (MARQUES, 2009).

A camada de passivação é caracterizada por ser uma espécie de barreira protetora entre o metal e o meio no qual este se encontra inserido e que tem como objetivo proteger o metal contra a corrosão além de ser originada, principalmente, por meio da oxidação do metal devido à perda de reatividade química de certas ligas e metais sob condições ambientais específicas (ESTEVES *et al.*, 2018).

2.6.2.1 Interpretação dos Resultados de EIE

Um espectro de impedância pode ser analisado com base em um diagrama Nyquist o qual consiste em uma série de pontos, cada um representando a grandeza e a direção do vetor de impedância para uma frequência em particular. O diagrama é um plano complexo (real *versus* imaginário) de coordenadas cartesianas, em que se tem na abscissa a parte real (termos resistivos) e na ordenada a parte imaginária (termos capacitivos ou indutivos) (WOLYNEC, 2003). Na Figura 6 têm-se a representação de um típico diagrama de Nyquist acompanhado do circuito equivalente que representa este diagrama.

Figura 6 – Exemplo típico de Diagrama de Nyquist, com vetor de impedância, e o circuito equivalente



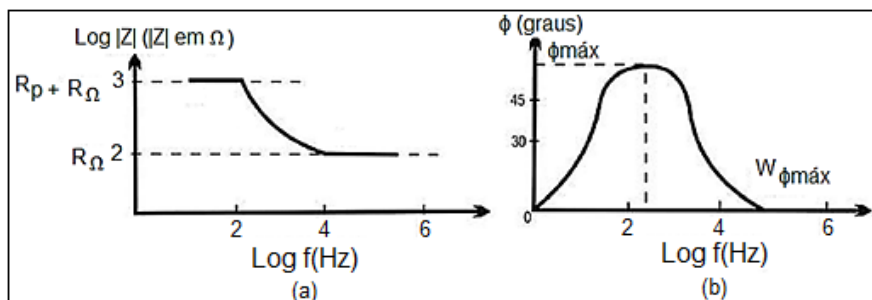
Fonte: Adaptado de Pletcher (1982), *apud* Luque; Olaya (2010)

O diâmetro do semicírculo é a R_p . Quanto maior o diâmetro deste semicírculo, maior a resistência e, conseqüentemente, menor a taxa de corrosão (AGUILAR *et al.*, 1990).

Já o diagrama de Bode consiste de um plano de eixos ortogonais o qual se tem no eixo das ordenadas o logaritmo do módulo de impedância, $\log |Z|$ e o ângulo de fase (ϕ) (ROCHA, 2017; WOLYNEC, 2003).

Ribeiro *et al.*, (2015) salientam que os diagramas de Bode apresentam algumas vantagens sobre o diagrama de Nyquist, sendo uma delas, devido a frequência estar presente em um dos eixos, ficando fácil observar como a impedância depende da frequência. Outra vantagem é o fato do diagrama de Bode para $|Z|$ representar a magnitude $|Z|$ em escala logarítmica, podendo ser representada por uma grande faixa de limites de impedância em um eixo, como mostra a Figura 7.

Figura 7 – Diagrama de Bode representando a impedância (módulo e ângulo de fase) de um sistema eletroquímico de corrosão em função da frequência angular.



Fonte: Adaptado de Ribeiro *et. al* (2015)

2.6.2.2 Uso da EIE para avaliação da corrosão em argamassa armada

Para o sistema aço-argamassa, a partir dos resultados de EIE, é possível obter informações sobre parâmetros como a presença de filmes de superfície, características da argamassa, corrosão interfacial e fenômenos de transferência de massa (RIBEIRO *et al.*, 2015).

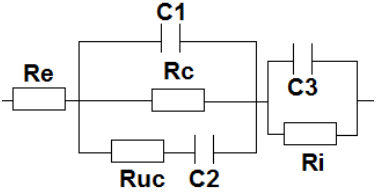
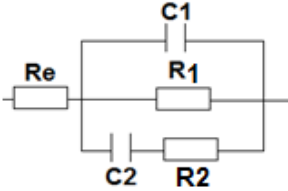
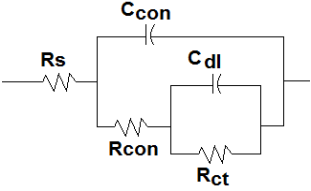
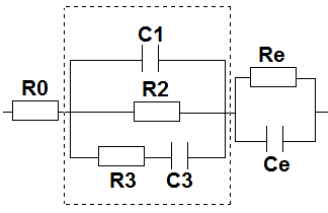
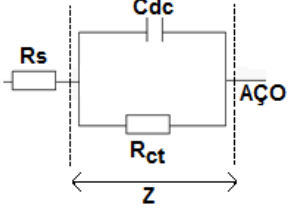
A análise dos resultados do EIE medidos em argamassas armadas é complexa devido à sobreposição de arcos provenientes de fenômenos simultâneos e ao ruído na medição, principalmente em baixa frequência, decorrentes, das heterogeneidades das amostras (RIBEIRO *et al.*, 2015).

Uma das dificuldades diz respeito à caracterização de uma armadura essencialmente passiva. Nesse estado, a transferência de carga ao longo da armadura, que denota um processo de corrosão é muito pequena. Sendo assim, os semicírculos ou arcos capacitivos de transferência de carga na dupla camada elétrica, evidenciados no Diagrama de Nyquist, são pouco desenvolvidos prejudicando a interpretação dos resultados (RIBEIRO *et al.*, 2015).

Cada componente da matriz cimentícia (compostos hidratados, compostos anidros, poros, etc.) participa como um elemento resistivo ou capacitivo. Neste caso, a pasta de cimento é eletricamente condutiva, em função da rede de poros interligados que estão preenchidos com água. E na água, estão dispersos os íons liberados pelo cimento após a sua dissolução e no início do processo de hidratação. Portanto, espera-se que um aditivo com efeito inibidor cause o aumento na impedância e, conseqüentemente, a redução na taxa de corrosão em relação ao meio sem este aditivo (SCHWARZ *et al.*, 2007).

Conforme mencionado anteriormente, a EIE parte do pressuposto que um circuito elétrico pode representar o comportamento eletroquímico. Na literatura, diversos modelos de circuito equivalentes foram utilizados para representar o sistema aço-argamassa, alguns destes são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Circuitos equivalentes encontrados na literatura para sistemas aço-argamassa

Circuito equivalente	Objetivo do estudo	Autor
	Avaliar a resistência ao transporte de cloreto em argamassas contendo escória de pó de silicato alcalino	Ravikumar, D.; Neithalath, N. 2013
	Monitoramento da migração de íons cloreto em pastas de cimento Portland	Díaz <i>et al.</i> 2013
	Analisar a resistência à corrosão em armaduras de concreto armado contendo zeólita e diatomita	Gerengi, 2013
	Investigar a corrosão do aço embutido em concreto armado e protendido	Sánchez, I.; Nóvoa, X. R. 2008
	Avaliação do efeito do molibdato de sódio adicionado no concreto armado	Tommaselli, M. A; Kuri, S. E. 2008

Fonte: Autora (2020)

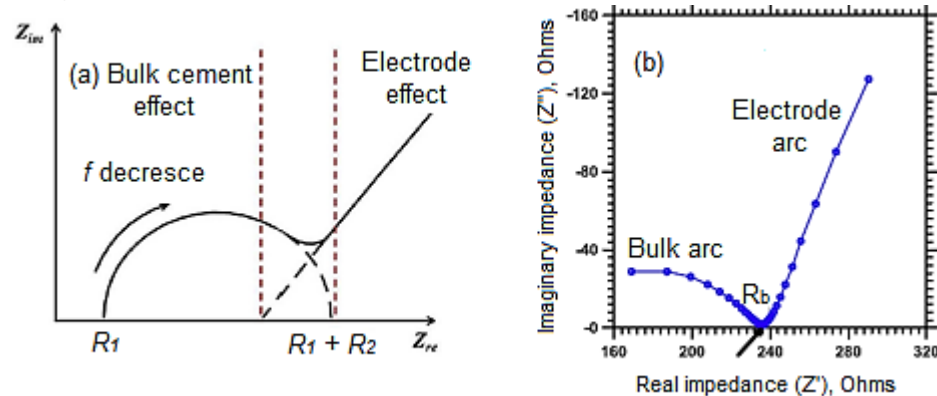
Percebe-se que os circuitos equivalentes variam muito de acordo com o autor, mas é unanimidade associar as respostas de alta frequência às propriedades do material cimentício e as de baixa frequência à interface com o aço (ANDRADE; ALONSO, 1995).

Um espectro de impedância típico para sistemas aço-argamassa consiste de arcos de alta e baixa frequência, conforme mostrado na Figura 8. Geralmente, na prática, não é observado o semicírculo ideal mostrado na Figura 8a e sim àquele mostrado em 8b (RIBEIRO, *et al.* (2015); RAVIKUMAR; NEITHALATH (2013)).

Na Figura 8a, pela interpretação de Song (2000), R_1 é associada à resistência da solução dos poros e R_2 à resistência entre as fases sólida e líquida do concreto.

Hu *et al.* (2019), atribuem o ponto o qual o valor da impedância imaginária é mínimo à resistência do concreto, em inglês *bulk*, (R_{bulk}), indicado na Figura 8b.

Figura 8 – Diagrama de Nyquist a) Teórico e b) Medido por EIE



Fonte: (a) Adaptado de Ribeiro *et al.* (2015) e (b) Adaptado de Ravikumar e Neithalath (2013)

Com base no exposto acima, pode-se relacionar a condutividade efetiva das amostras (σ_{ef}) com R_{bulk} pela Equação 8, conforme (RAVIKUMAR; NARAYANAN., 2013).

$$\sigma_{ef} = \frac{L}{R_{bulk} \cdot A} \quad (8)$$

Onde:

L = Comprimento da amostra (m);

R_{bulk} = Resistência de bulk (Ω);

A = Área transversal do corpo de prova (m^2).

2.7 Técnicas de caracterização de materiais

Neste capítulo, foram abordadas técnicas utilizadas neste estudo com o objetivo de avaliar as propriedades físicas e químicas dos agregados constituintes das argamassas a fim de auxiliar na determinação da melhor aplicabilidade para as mesmas.

2.7.1 Análise granulométrica

O principal objetivo é conhecer a distribuição granulométrica do agregado e apresentá-la através de uma curva, possibilitando assim a determinação geral de suas características físicas. Uma técnica importante, pois, a análise granulométrica dos agregados miúdos, irá impactar diretamente na consistência da argamassa, influenciando na medida de trabalhabilidade que é calculada pelo tamanho máximo do agregado, sua granulometria, forma e textura (ALMEIDA *et al.*, 2012).

2.7.2 Caracterização da estrutura porosa e da área superficial específica

A porosidade e a área superficial específica dos aditivos estão diretamente relacionadas ao desempenho de argamassas. Sabe-se que a microestrutura desse material é heterogênea, composta por componentes vazios e sólidos. O processo de hidratação da massa do cimento, forma diversos poros dentro da estrutura e esses poros são responsáveis por transportar para a parte interna do material água, gases e agentes nocivos. Portanto, para uma boa durabilidade, o ideal é que a argamassa tenha baixa porosidade. Para reduzir a porosidade da argamassa, utilize-se uma relação água/cimento baixa e/ou utiliza-se aditivos os quais podem reduzir a permeabilidade além de aumentar a resistência mecânica do material (HOPPE, 2008).

Tanto a determinação da porosidade quanto a superfície específica é obtida a partir de isotermas de adsorção e dessorção. Barret, Joyner e Halenda propuseram um método matemático denominado BJH utilizado no cálculo da distribuição dos tamanhos de poros. A análise da área superficial específica, com base na adsorção física de moléculas de gás sobre uma superfície sólida pode ser obtida a partir da equação de BET (Brunauer, Emmett e Teller) (BRANDÃO, 2007; Teixeira *et al.*, 2001).

2.7.3 Difração de raios-X

A utilização da análise de difração de raios-X para a caracterização dos agregados miúdos é importante para identificar a composição mineralógica presente nestes

materiais. A identificação e quantificação de fases cristalinas, influencia nas propriedades de argamassas (CORDEIRO, 2009).

2.7.3.1 Estimativa da cristalinidade de materiais a partir do espectro de DRX

De acordo com Ferreira *et al.*, (2015) o método de separação simples de áreas prevê a subtração da área do halo referente a contribuição não cristalina, da área total do difratograma em um intervalo de difração. A estimativa da cristalinidade é realizada pela integração dos picos cristalinos e da banda amorfa. Após a separação das áreas, o percentual de cristalinidade estimado é através da Equação 9:

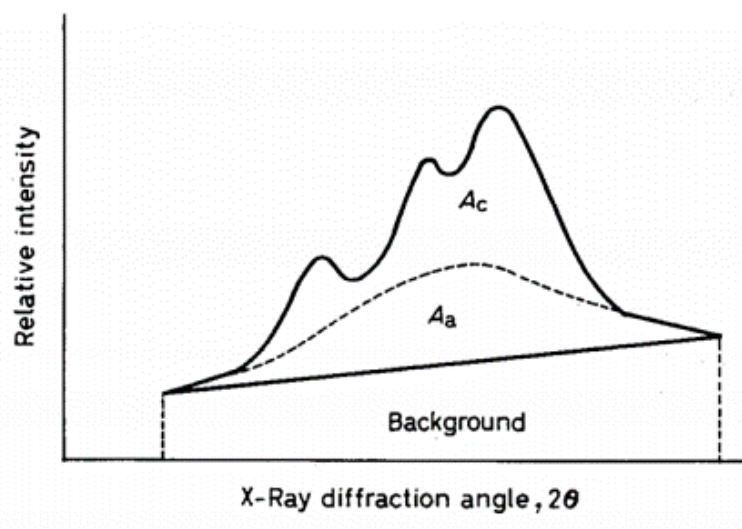
$$Cr(\%) = \frac{A_c}{A_c + A_a} \times 100 \quad (9)$$

Onde:

A_c e A_a = Áreas cristalina e não cristalina, respectivamente.

Sendo assim, a Figura 9 representa a separação de áreas, conforme (STERN, 1968 *apud* CAROLINO, 2017).

Figura 9 – Representação da separação de áreas



Fonte: Stern (1968), *apud* Carolino (2017)

2.7.4 Espectroscopia Raman

A espectroscopia Raman é útil para a identificação e caracterização química dos agregados miúdos adicionados na argamassa. Dependendo da natureza dos agregados, estes influenciam no desempenho do material alterando a trabalhabilidade. Esta técnica caracteriza qualitativamente as amostras (MARCELINO, 2015).

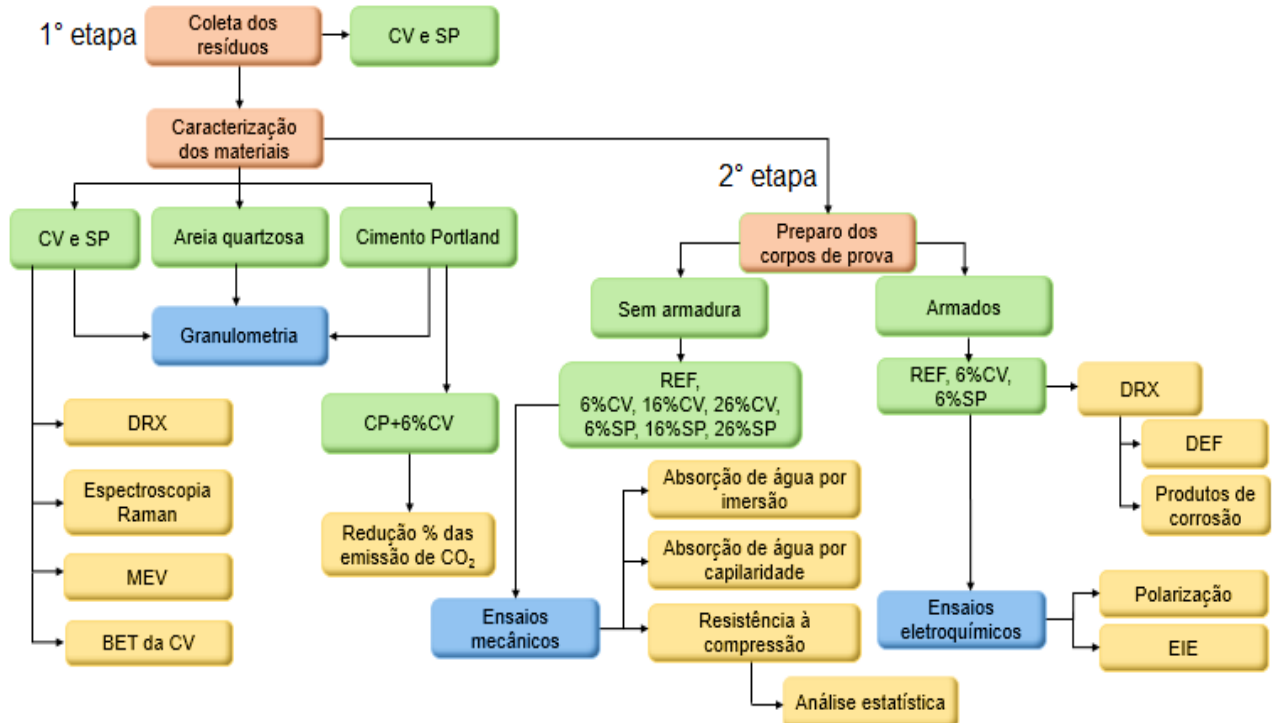
2.7.5 Microscopia Eletrônica de Varredura

Por microscopia eletrônica de varredura, analisa-se as características morfológicas dos aditivos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Capítulo destinado a apresentar os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento desta pesquisa, buscando abordar os procedimentos para caracterização e análise dos materiais e das argamassas produzidas com e sem aditivos. A Figura 10 apresenta o fluxograma com as principais atividades desenvolvidas nesta pesquisa.

Figura 10 – Fluxograma dos procedimentos metodológicos



Fonte: Autora (2020)

3.1 Materiais

3.1.1 Caracterização da usina

A empresa escolhida para a coleta dos materiais é Complexo Termelétrico de Candiota. De acordo com o boletim técnico da Fundação de Ciência e Tecnologia (CIENTEC, 2014) a relação é de 30% cinza pesada e 70% cinza leve do total de cinza gerada na combustão do carvão mineral nas Unidades da Eletrobras CGTEE. A Figura 11 mostra a vista aérea do complexo Termelétrico de Candiota – RS.

Figura 11 – Vista aérea do complexo Termelétrico de Candiota - RS

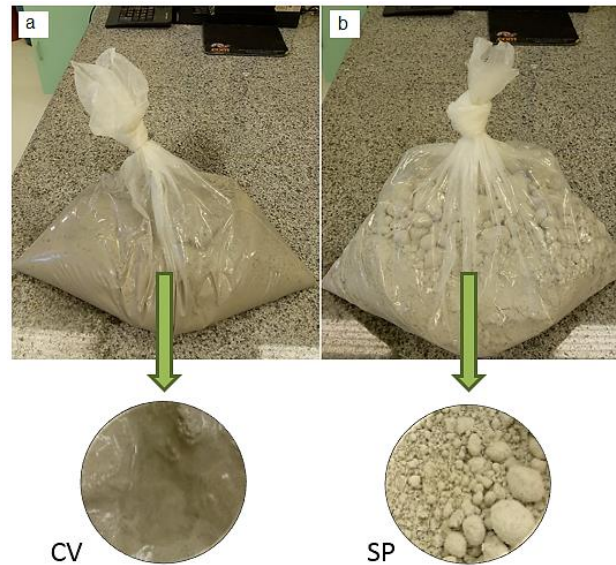


Fonte: Adaptado de Fundação de Ciência e Tecnologia (2014)

3.1.2 Resíduos

Os resíduos CV e SP utilizados neste estudo foram gentilmente cedidos pela empresa, sendo coletados no dia 25/08/2019 do local de carregamento de caminhões que as levam para a cava da mina. As amostras foram disponibilizadas em sacos de 5 kg. Não foi necessário nenhum procedimento prévio antes da utilização dos aditivos nas argamassas. A Figura 12 mostra o aspecto das amostras.

Figura 12 – Aspecto das amostras: a) CV e b) SP



Fonte: Autora (2020)

3.1.3 Aglomerante

Nesta pesquisa, utilizou-se o CP IV-32 RS. Este pode ser aplicado em vários tipos de obras. Contudo, a sua diferença está na alta resistência a sulfatos, sendo adequado para aplicação em obras que serão realizadas em ambientes ameaçados como esgotos, fundações e água marinha. A composição química e características físicas, fornecidas pelo fabricante, são apresentadas nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 – Composição química do CP IV-32 RS

Ensaio	Resultados	Normas
Perda de Fogo – PF	3,34%	NBR NM 18/2012
Dióxido de Silício – SiO_2	28,94%	NBR NM 11- 2/2009
Óxido de Alumínio – Al_2O_3	9,97%	
Óxido de Ferro – Fe_2O_3	3,72%	
Óxido de Magnésio - MgO	3,18%	
Óxido de Cálcio – CaO	45,12%	
Resíduos Insolúveis – R.I.	25,25%	NBR NM 15/2012
Óxido de Cálcio Livre	0,74%	NBR NM 13/2012

Fonte: Adaptado de Itambé (2015)

Tabela 6 – Caracterização física do CP IV-32 RS

Ensaio	Resultados	Normas
Massa específica	2,83 g/cm ³	NBR NM 23/2001
Área específica	4340 cm ² /g	NBR NM 76/1998
Finura Blaine	4,290 cm ² /g	NBR NM 11579/1991
Água da Pasta de Consistência Normal	30,3%	NBR NM 43/2003
Início de Pega	3,4 h	NBR NM 65/2003
Fim de Pega	4,25 h	
Expansividade de Le Chatelier – a Quente	0,34 mm	NBR NM 11582/2012

Fonte: Adaptado de Itambé (2015)

3.1.4 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi a areia natural quartzosa e foi obtida no mercado comercial da cidade. A areia foi submetida à análise de composição granulométrica, conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR NM 248 (2003).

3.1.5 Água

A água utilizada na produção das argamassas é proveniente da rede de abastecimento público de Bagé – RS, fornecida pelo Departamento de Água e Esgotos de Bagé (DAEB).

3.1.6 Aço

O material metálico utilizado foi o aço carbono CA-50 de 8 mm da marca Gerdau. Este é muito utilizado como aço de reforço (armadura) em argamassas armadas. A barra de aço é repleta de nervuras, o que ajuda na fixação do material de construção como concreto/argamassa e cimento.

A Tabela 7 apresenta a composição química do aço de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 7480 (2007) e a Figura 13 apresenta a barra de aço utilizada no estudo.

Tabela 7 – Composição química do aço CA-50

Elemento	(% massa)
Ferro (Fe)	98,77
Carbono (C)	0,26
Manganês (Mn)	0,91
Fósforo (P)	0,03
Enxofre (S)	0,026

Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 7480 (2007)

Figura 13 – Barra de aço CA-50



Fonte: Autora (2020)

3.1.7 Tela

Neste trabalho utilizou-se como contra eletrodo a tela de aço inox AISI 304 malha 13 fio 0,30, conforme especificação do fabricante. A Figura 14 apresenta a tela utilizada no estudo.

Figura 14 – Tela inox AISI 304



Fonte: Autora (2020)

3.1.8 Tinta

Para proteção do aço, utilizou-se o revestimento anticorrosivo à base de epóxi poliamina e alcatrão de hulha da marca Vinci, atendendo a norma da Petrobrás N-1761, conforme especificação do fabricante. A Figura 15 apresenta o revestimento utilizando na pesquisa.

Figura 15 – Revestimento anticorrosivo a base de Epóxi



Fonte: Autora (2020)

3.2 METODOLOGIA

3.2.1 Ensaios para caracterização das amostras de CV e SP

Para um conhecimento satisfatório das características dos resíduos utilizados, foram realizados os seguintes ensaios de caracterização:

- a) Análise granulométrica;
- b) Volume total de poros (BJH), tamanho de poros e área superficial específica (BET);
- c) Difração de raios-X (DRX);
- d) Espectroscopia Raman;
- e) Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

3.2.1.1 Análise granulométrica

Para a determinação das dimensões das partículas dos materiais, foi utilizado um analisador de partículas por difração a laser (Particle Size Analyser) CILAS 1190L, no Laboratório de UNIPAMPA. O ensaio foi realizado em soluções líquidas. A faixa

granulométrica analisada pelo equipamento varia de 0,04 μm a 2500,00 μm / 100 Classes. Os resultados são expressos em curvas de porcentagem acumulada de partículas (%) *versus* diâmetro das partículas (μm) e em tabelas dos diâmetros D_{10} , D_{50} , D_{90} .

3.2.1.2 Caracterização da estrutura porosa e da área superficial específica

As análises de área superficial específica pelo método BET, volume total de poros pelo método BJH e tamanho de poros foram realizadas em um analisador Quantachrome NOVA 1000e, utilizando nitrogênio à temperatura de ebulição (77 K) como adsorvente. Para a realização da análise, foi realizada degasagem prévia da amostra em estufa por 24h, a 100°C (LACERDA, 2015).

Esta análise foi realizada somente na CV no laboratório da UNIPAMPA, pois havia o risco de o SP danificar o equipamento.

3.2.1.2 Difração de raios-X

A difração de raios-X é um dos principais métodos de caracterização microestrutural de materiais. O ensaio analisa o nível de cristalinidade da amostra, permitindo a identificação de fases quanto ao seu arranjo atômico, classificando quanto amorfo ou cristalino. As análises foram realizadas no Laboratório de raios-X (LRX) da UNIPAMPA em equipamento Rigaku modelo ULTIMA IV com geometria Bragg-Brentano nas condições operacionais: 40 kV/20 mA, radiação linha k- α do cobre e passo de 0,05°/s. A identificação dos compostos presentes nos resíduos, foi realizada utilizando o software X-pert HighScore Plus, versão 2.2d de 2008, em conjunto com os padrões difratométricos da base de dados Inorganic Crystal Structure Database – ICSD.

Esta análise foi realizada nos resíduos CV e SP, e também nas argamassas secas. Além disso, a partir dos espectros de DRX determinou-se o percentual de cristalinidade dos resíduos.

3.2.1.3 Espectroscopia Raman

A técnica está fundamentada na propriedade que átomos e moléculas têm de absorver ou emitir energia em uma determinada região do espectro eletromagnético, o que oferece informações sobre a composição química da amostra (BURGIO *et al.*, 2010).

As análises foram realizadas no Laboratório de Espectroscopia da UNIPAMPA. O equipamento utilizado foi o espectrômetro Raman confocal com laser de ($\lambda = 532 \text{ nm}$), e diâmetro de feixe de $1 \mu\text{m}$. Esta análise foi realizada nos resíduos CV e SP.

3.2.1.4 Microscopia Eletrônica de Varredura

A MEV foi utilizada para aquisição de imagens dos resíduos por elétrons retroespalhados (BSE, do inglês: *Backscattered Electrons*).

As amostras foram colocadas em um porta amostra metálico (*stub*) e metalizadas com carbono. O ensaio foi realizado no Centro de Microscopia Eletrônica da zona Sul (CEME-SUL) da Universidade Federal do Rio Grande (FURG) com um equipamento Jeol, JSM – 6610LV.

3.3 Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova de argamassa foram preparados em laboratório utilizando inicialmente o traço convencional de 1:3:0,48 (cimento: areia: água/aglomerante) de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 7215 (2019).

Em seguida, foram elaborados corpos de prova com adição de CV e SP nas proporções de 6%, 16% e 26%. Os valores foram definidos pelos autores com base em trabalhos desenvolvidos por (ALTHEMAN *et al.*, 2017; BOSTANCI, 2020).

A Tabela 8 apresenta o traço convencional (sem aditivo) e o traço com teores de aditivos em massa com as respectivas substituições.

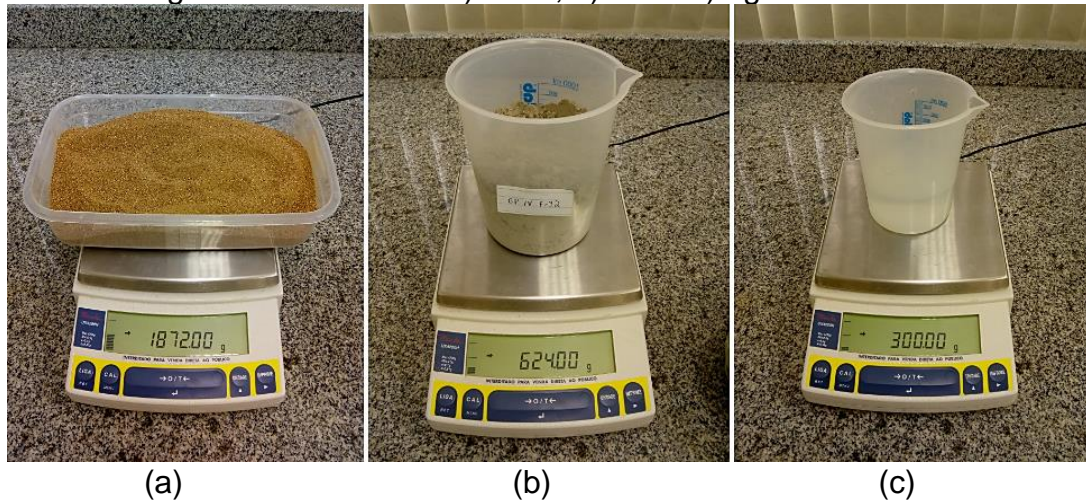
Tabela 8 – Traço convencional e traço com aditivos

Traço	Aglomerante			Areia (g)	Água (ml)	Fator água/aglomerante
	Cimento (g)	CV (g)	SP (g)			
REF	624,00	–	–	1.872 ± 0,3	300 ± 0,2	0,48
CV 6%	586,56	37,44	–	1.872 ± 0,3	300 ± 0,2	0,48
CV 16%	524,16	99,84	–	1.872 ± 0,3	300 ± 0,2	0,48
CV 26%	461,76	162,24	–	1.872 ± 0,3	300 ± 0,2	0,48
SP 6%	586,56	–	37,44	1.872 ± 0,3	300 ± 0,2	0,48
SP 16%	524,16	–	99,84	1.872 ± 0,3	300 ± 0,2	0,48
SP 26%	461,76	–	162,24	1.872 ± 0,3	300 ± 0,2	0,48

Fonte: Autora (2020)

De acordo com a Tabela 8, o traço convencional utilizado para analisar as propriedades mecânicas seguiu prescrições da Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 7215 (2019) com 0% de substituição e, em seguida as substituições. A Figura 16, mostra a pesagem dos materiais para a preparação dos corpos de prova em a) areia; b) CP e; c) água.

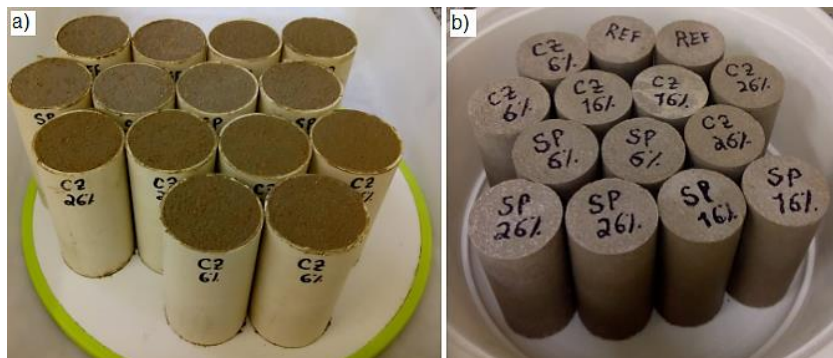
Figura 16 – Pesagem dos materiais: a) areia; b) CP e c) água



Fonte: Autora (2020)

A Figura 17 a) mostra os corpos de prova devidamente identificados nos moldes antes de serem colocados em cura úmida adaptada com 95% de umidade por 24 horas e em 17 b) são mostrados os corpos de prova desmoldados após a idade de 24 horas.

Figura 17 – Corpos de prova identificados nos moldes a) e b) corpos de prova desmoldados após 24 horas



Fonte: Autora (2020)

A Tabela 9 mostra a definição das identificações nos corpos de prova.

Tabela 9 – Identificação das argamassas ensaiadas

Argamassa	Definição
REF	Corpo de prova de referência
CZ 6%	Argamassa contendo 6% de CV
CZ 16%	Argamassa contendo 16% de CV
CZ 26%	Argamassa contendo 26% de CV
SP 6%	Argamassa contendo 6% de SP
SP 16%	Argamassa contendo 16% de SP
SP 26%	Argamassa contendo 26% de SP

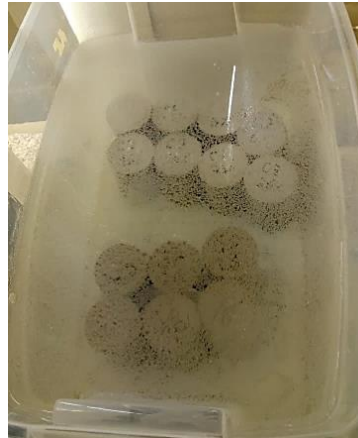
Fonte: Autora (2020)

Após este período, os corpos de prova foram desmoldados e submersos em um tanque com água saturada de cal (1,12 g/l) de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 5738 (2015). Para comprovar a qualidade de uma argamassa de CP, utiliza-se a cura úmida (saturada com cal) como procedimento padrão, onde os corpos de prova permaneceram até atingir a cura necessária, de acordo com a idade de rompimento: 7, 14 e 28 dias.

Segundo Ungericht e Piovesan (2011), a cura com cal hidratada desacelera a evaporação da água de amassamento e permite a completa hidratação do cimento, isto é, a cura adequada é fundamental para que argamassas e concretos alcancem seu

melhor desempenho, tornando-se menos porosos e mais duráveis. A Figura 18, mostra os corpos de prova imersos em água saturada de cal.

Figura 18 – Corpos de prova imersos em água saturada de cal até a idade de ruptura

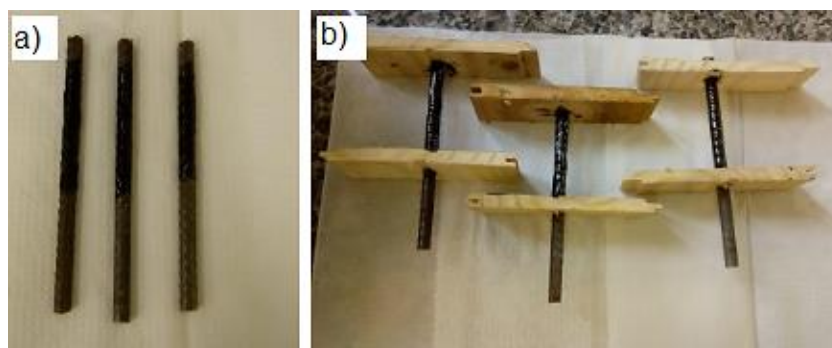


Fonte: Autora (2020)

3.4 Preparo dos corpos de prova para os ensaios eletroquímicos

As barras de aço foram pintadas com tinta epóxi comercial à base de alcatrão de hulha. A Figura 19 a) mostra as barras pintadas e b) mostra as barras pintadas nos suportes para serem inseridas na argamassa. O aço tipo CA-50 nas amostras ficou com uma área de exposição de 15,60 cm² sem receber pintura epóxi.

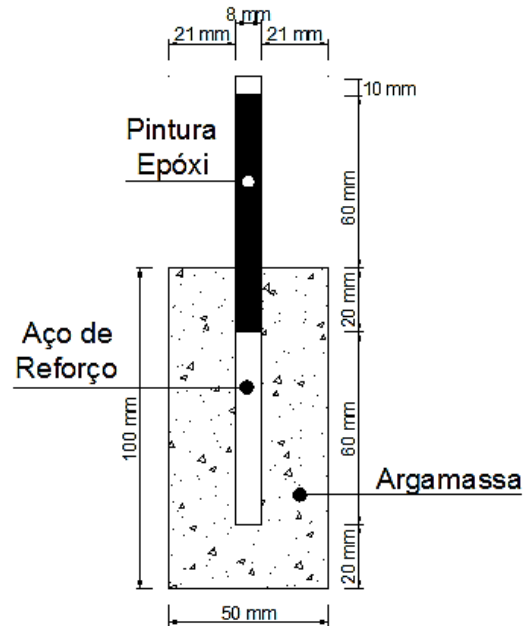
Figura 19 – a) Barras de aço tipo CA-50 pintadas e b) no suporte para serem embutidas na argamassa



Fonte: Autora (2020)

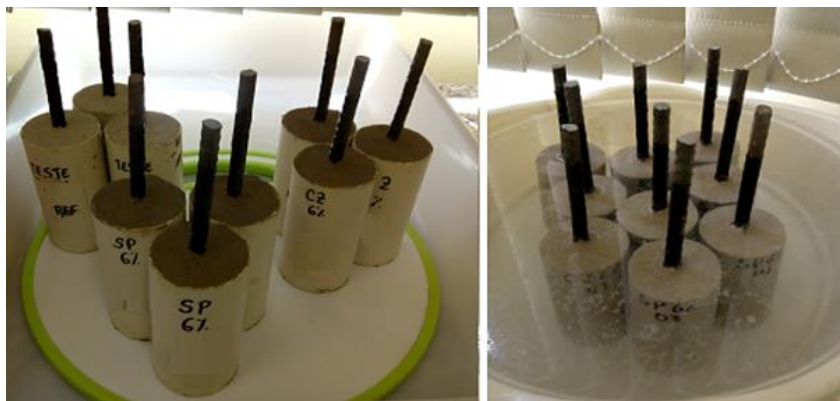
As variáveis analisadas na pesquisa foram o tipo de aditivo, sua concentração e o tempo de cura. A Figura 20 mostra o esquema do corpo de prova de argamassa com a barra metálica e a Figura 21 mostra os corpos de prova nos moldes e em cura com água saturada de cal.

Figura 20 – Desenho esquemático do corpo de prova de argamassa com barra metálica



Fonte: Adaptado de Trevisol *et al.* (2017)

Figura 21 – Corpos de prova nos moldes e em cura com água saturada de cal

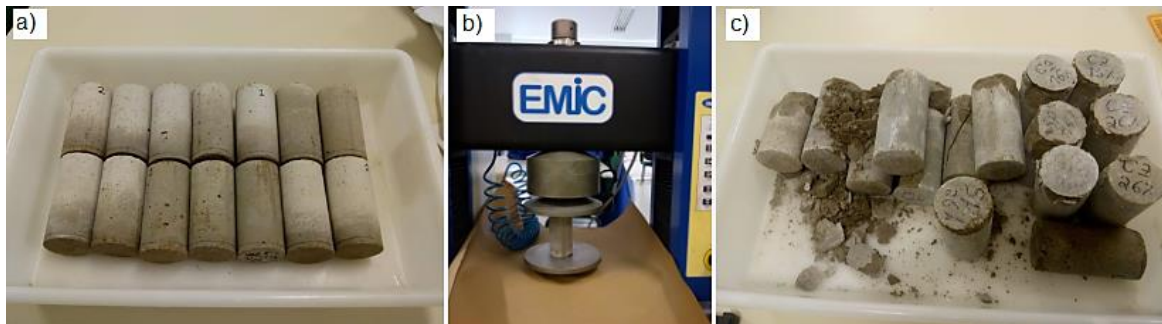


Fonte: Autora (2020)

3.5 Ensaio de compressão

Após atingir a cura de cada idade proposta, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão. Sendo assim, as amostras foram colocadas em uma máquina universal de ensaios da marca EMIC DL 10000, onde foram carregadas por compressão até a ruptura. Durante o ensaio, foi utilizado um equipamento com capacidade de carga de 100 kN, com taxa de carregamento de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s conforme prescrição da Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 7215 (2019). O ensaio foi realizado no Laboratório de Ensaio Mecânicos (LABEM) da UNIPAMPA. A Figura 22 a) mostra os corpos de prova antes do ensaio; b) o corpo de prova posicionado no equipamento e c) corpos de prova após as rupturas.

Figura 22 – a) mostra os corpos de prova antes do ensaio; b) o corpo de prova posicionado no equipamento e c) corpos de prova após as rupturas.



Fonte: Autora (2020)

Posteriormente a obtenção dos resultados do ensaio, foi calculada a média da resistência à compressão, o resultado foi arredondado para o décimo mais próximo, conforme prescrição da Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 7215 (2019).

3.6 Absorção de água por imersão

O ensaio é regido pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 9778 (2012). Inicialmente, verifica-se as massas de cada corpo de prova que até o momento estavam em cura úmida por 28 dias. Após a pesagem, os corpos de prova são secos em estufa com circulação de ar forçada a ($T=105^{\circ}\text{C}$), até a variação de massa ser menor que

0,10 g. Em seguida, a massa seca em estufa foi registrada. Na sequência, os corpos de prova foram imersos em água durante 72 horas. A taxa de absorção de água por imersão, em porcentagem, representa a diferença entre a massa da amostra após a imersão de 72 horas e sua massa seca em estufa. A Figura 23 mostra os corpos de prova em processo de secagem em estufa com circulação de ar forçada a 105°C.

Figura 23 – Corpos de prova em estufa a 105°C



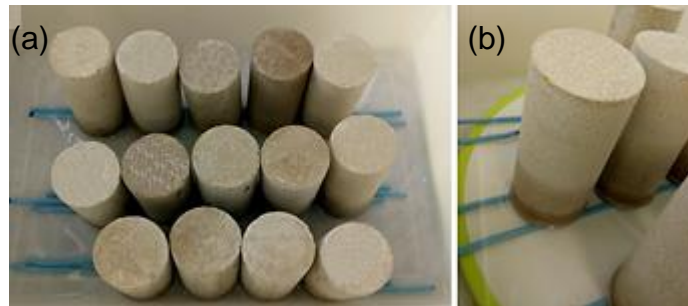
Fonte: Autora (2020)

3.7 Absorção de água por capilaridade

Este ensaio teve por objetivo monitorar o aumento da massa das amostras devido à absorção de água por capilaridade. O ensaio é iniciado com a secagem das amostras em estufa com circulação de ar forçada a ($T=105^{\circ}\text{C}$), segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 9779 (2012). Depois disso, os corpos de prova foram colocados em uma camada de água de (5 ± 1) mm, acima de sua face inferior, os mesmos foram posicionados sobre suportes e inseridos em recipientes com água no nível determinado. As massas foram aferidas após 3, 6, 24, 48 e 72 horas de exposição. Os dados obtidos foram utilizados no cálculo da absorção de água por capilaridade.

Segundo Mehta *et al.* (2008), a taxa de absorção de água por capilaridade é uma boa medida da qualidade de um concreto ou argamassa e de sua durabilidade quando exposto a locais agressivos. Valores de absorção baixos indicam que os íons agressivos terão uma maior dificuldade de penetrar na argamassa e com isso, conferem a argamassa uma maior impermeabilidade. A Figura 24 mostra os corpos de prova apoiados sobre suportes durante o ensaio de absorção de água por capilaridade.

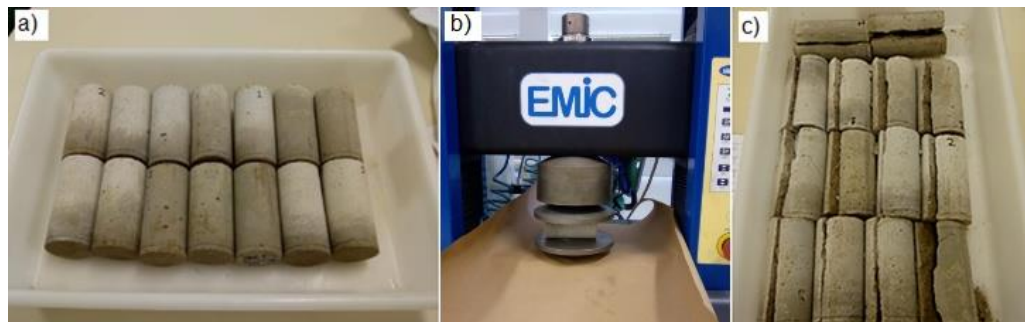
Figura 24 – a) Corpos de prova apoiados sobre suportes e; b) detalhe do ensaio mostrando a ascensão de água no corpo de prova



Fonte: Autora (2020)

Terminadas as etapas anteriores, as amostras foram rompidas diametralmente conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 7222 (2011). A Figura 25 a) mostra os corpos de prova antes do ensaio; b) o corpo de prova posicionado no equipamento e c) corpos de prova após as rupturas.

Figura 25 – a) Corpos de prova antes do ensaio; b) Corpo de prova no equipamento e; c) corpos de prova após as rupturas



Fonte: Autora (2020)

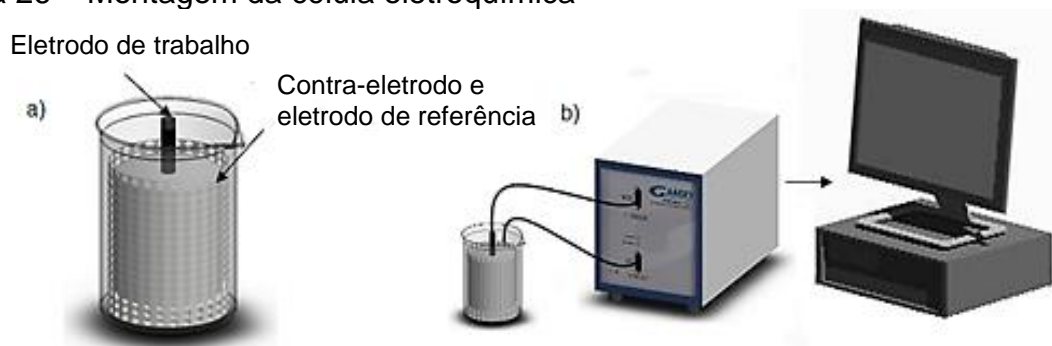
3.8 Ensaios eletroquímicos

Visando simular uma atmosfera industrial de região carbonífera, as medidas foram realizadas em solução contendo 5% em massa de sulfato de sódio (Na_2SO_4) conforme a ASTM C1012 da marca PróQuímico com pureza 99%. O equipamento utilizado para os ensaios foi o Potenciostato/Galvanostato da marca Gamry Reference 3000.

A EIE foi utilizada para análise do comportamento elétrico da corrosão na argamassa armada. Os ensaios foram realizados em corpos de prova com e sem aditivos, durante 90 dias.

Na montagem da célula eletroquímica, o arranjo utilizado foi: como contra-eletródo e eletródo de referência o aço inox 304 em forma de tela. Dessa forma, minimiza-se os ruídos obtidos em baixa frequência, atribuídos à distribuição não uniforme de linhas de corrente entre os eletrodos de trabalho e o contra-eletródo. Sendo assim, conectou-se o aço embutido na argamassa ao terminal do eletródo de trabalho enquanto que o aço inox 304 foi ligado em curto-circuito aos terminais do contra eletródo e eletródo de referência do potenciostato. Este arranjo foi baseado na metodologia de (KEDDAM *et al.*, 1997 *apud* SILVA, 2007) conforme mostra a Figura 26.

Figura 26 – Montagem da célula eletroquímica



Fonte: Autora (2020)

Para as curvas de polarização utilizou-se o intervalo de potencial de 1000 mV nos sentidos anódicos e catódicos em relação ao E_{corr} na velocidade de varredura de 10 mV/s.

As medidas de EIE foram realizadas no intervalo de frequência de 10^5 Hz até 10^{-2} Hz, medido no E_{corr} com amplitude do sinal de 10 mV. Todos os ensaios descritos na metodologia foram realizados em triplicata.

A partir das medidas eletroquímicas, realizou-se a análise da corrosão com base na mudança dos parâmetros: i_{corr} , E_{corr} , taxa de corrosão, R_p , EI (%), R_{bulk} e σ_{ef} .

Todos os potenciais foram convertidos para escala padrão de hidrogênio (EPH).

3.8.1 Análise visual da corrosão e da variação diametral das barras e composição dos produtos de corrosão

A análise morfológica das armaduras embutidas nas argamassas foi realizada em Microscópio Estereoscópico da marca Motic modelo binocular, conforme mostrado na Figura 27, em diferentes magnificações.

Figura 27 – Microscópio Estereoscópico



Fonte: Autora (2020)

A medição da variação do diâmetro das barras foi realizada em 3 pontos distintos em que se observou formação de incrustação ou perda de espessura utilizando-se um paquímetro universal analógico de 12". Realizou-se esta análise após o rompimento diametral dos blocos depois de 200 dias a partir do fim da cura de 28 dias.

Os produtos de corrosão foram removidos com o auxílio de uma espátula de PVC e a composição foi determinada por DRX com os mesmos parâmetros descritos em 3.2.1.2.

3.9 Análise estatística

Avaliar estatisticamente os resultados de resistência a compressão axial considerando-se as adições. Segundo Devore (2006), a análise da variância, ou ANOVA,

constitui um procedimento estatístico adequado para a avaliação de respostas quantitativas em experimentos planejados.

3.10 Estimativa da quantificação de emissões de CO₂

Esta análise tem por objetivo estimar a redução de CO₂ quando o consumo de cimento é reduzido. A estimativa será realizada para argamassa que apresentou o melhor desempenho nos ensaios mecânicos. O cálculo foi baseado no traço apresentado neste trabalho tendo como referência uma casa popular de 40 m², não levando em consideração a adição do agregado graúdo (brita) ao traço.

A metodologia foi adaptada de Stachera (2008) e Costa (2012) cujo cálculo das emissões de CO₂ é realizado a partir da Equação 11:

$$\text{Emissões MT} = \text{QT} \times \text{FP} \times \text{FEP} \quad (11)$$

Onde:

Emissões MT = emissões de CO₂ devido a utilização de argamassa na obra, em toneladas de CO₂;

QT = quantidade de argamassa necessária na obra, em toneladas;

FP = fator de perda de argamassa, adimensional (1,95);

FEP = fator de emissão de CO₂ devido a utilização da argamassa em edificações, em toneladas de CO₂ / tonelada de produto acabado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos dos ensaios de caracterização dos materiais estudados, bem como os resultados dos ensaios mecânicos de resistência à compressão de argamassa para obtenção do índice de desempenho do CP com e sem aditivos. E ainda, traz os resultados dos ensaios de absorção de água por imersão, capilaridade e resultados dos ensaios eletroquímicos.

4.1 Análise granulométrica

Os resultados dos ensaios estão descritos na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados dos materiais ensaiados na análise granulométrica

Materiais	D₁₀	D₅₀	D₉₀	D_{médio}
CV	99,33 µm	30,67 µm	2,44 µm	42,19 µm
SP	42,15 µm	12,10 µm	2,92 µm	17,83 µm
CP IV-32 RS	29,06 µm	11,41 µm	1,94 µm	13,68 µm
Areia	405,27 µm	196,18 µm	37,87 µm	212,94 µm

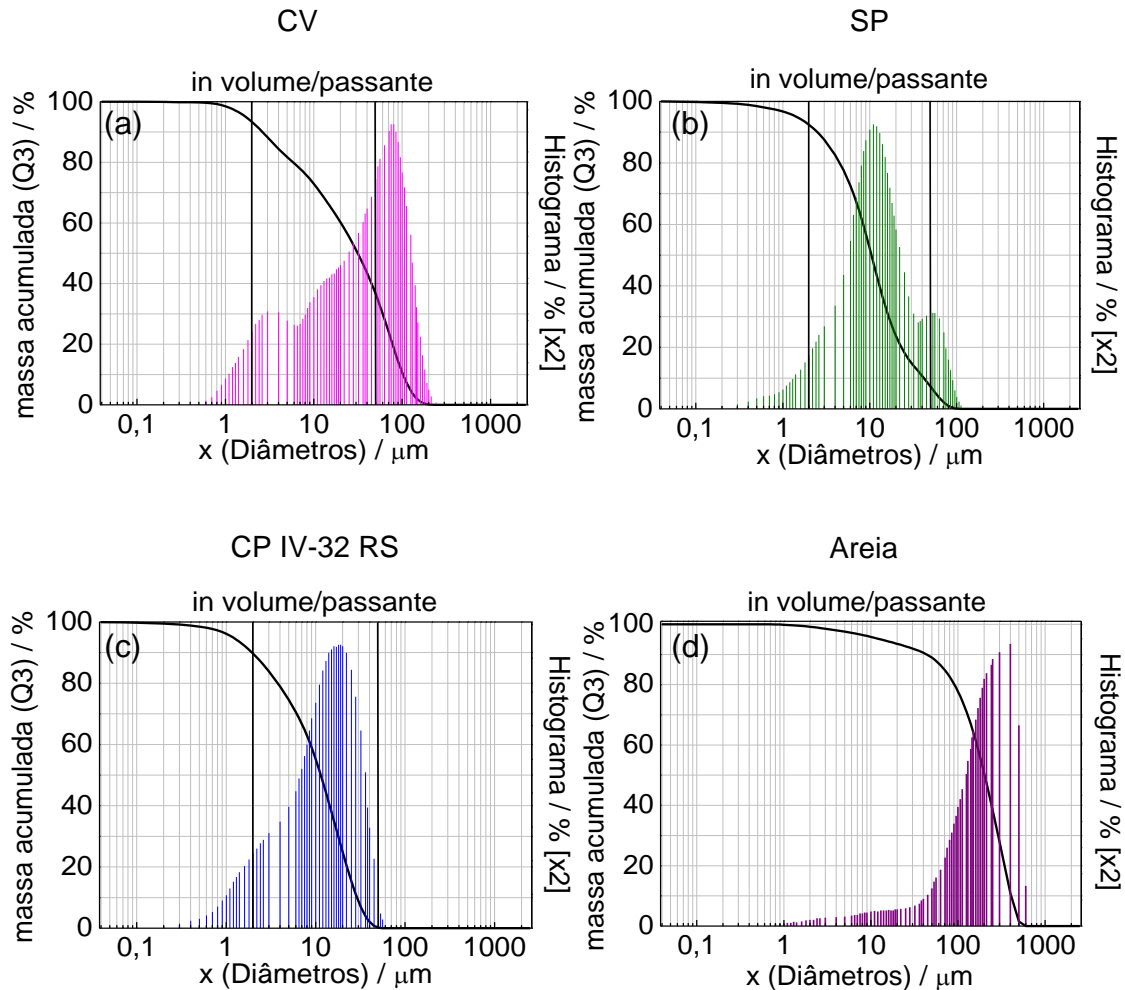
Fonte: Autora (2020)

A dispersão do tamanho das partículas, mostrou que os materiais são classificados como finos. Os valores encontrados estão de acordo com a literatura, entre 0,01 e 100 µm. Costa (2015), obteve diâmetro médio de 45,00 µm, enquanto Lacerda (2015), obteve 54,22 µm, ambos para cinzas volantes provenientes da combustão do carvão de Candiota. Estes valores estão condizentes com a granulometria encontrada, podendo tais diferenças serem atribuídas à tecnologia aplicada (gaseificação ou combustão), às condições operacionais (granulometria e composição do carvão, temperatura, etc) e metodologias de análise.

Cechella e Gastaldini (2009), atribuem às partículas de CV, menores que 10 µm, a influência no aumento da resistência mecânica até os 28 dias de idade, e às partículas com diâmetro de 10 µm a 45 µm, ganho de resistência mecânica nas idades superiores aos 28 dias, enquanto nas acima de 45 µm, nenhuma influência no ganho de resistência. A Figura 28 mostra as curvas granulométricas dos materiais analisados, sendo o eixo x

dos diagramas mostra os diâmetros em mm, no eixo y à esquerda (Q3), a massa acumulada % e no eixo y à direita o histograma.

Figura 28 – Curvas granulométricas dos materiais a) CV b) SP c) CP IV-32 RS e d) Areia



Fonte: Autora (2020)

4.2 Caracterização da estrutura porosa e da área superficial específica

O tamanho do poro da CV foi de 38 Å, sendo considerado um material mesoporoso ($26 \text{ \AA} < \text{tamanho do poro} < 500 \text{ \AA}$) com volume total de poros de $0,054 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$. A área superficial específica foi de $28,4 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$. O volume total de poros e a área superficial específica medidos, são superiores aos resultados de Lacerda (2015), encontrados para mesmo material contudo, estão de acordo com Dias *et al.* (2016). Neste trabalho, os

autores atribuem que os valores mais elevados são devido ao carbono não convertido que é arrastado junto às cinzas durante a combustão.

Nos mesoporos, ocorrem interações eletrostáticas entre as paredes dos poros e o agente permeante (água, gases e íons agressivos) minimizando o transporte de fluido através destes poros (RODRIGUES, 2004).

O tamanho da partícula e a superfície específica são importantes porque afetam a reatividade das partículas de CV. Conforme os resultados apresentados, a CV estudada possui elevada finura e valor de área superficial que corroboram para a reatividade pozolânica, reagindo mais rapidamente com o cimento (WALKER, 2011).

Para o aditivo SP, foi considerado o valor da literatura (ABREU *et al.*, 2002) 18,20 m²g⁻¹, uma vez que não foi possível realizar a análise no equipamento.

4.3 Difração de raios-X

A seguir são apresentados os espectros de DRX e, resultados relacionados à esta análise.

4.3.1) CV

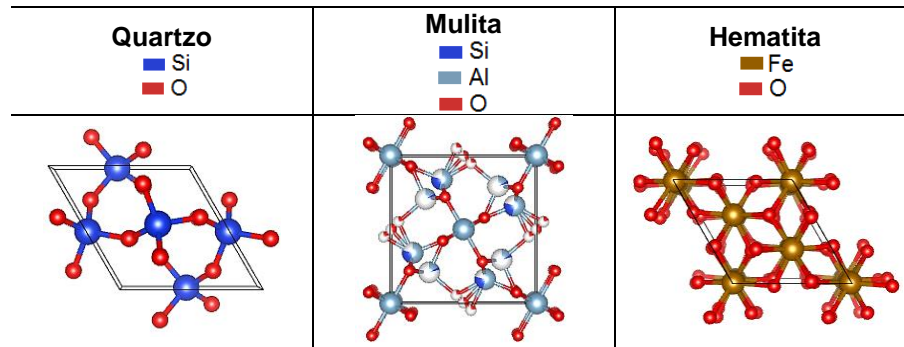
A difração de raios-X mostrou a composição mineralógica da amostra de CV, apresentando um padrão de difração característico de material amorfo. Foram identificadas fases de quartzo (SiO₂), mulita (Al₂O₃-SiO₂) e hematita (Fe₂O₃). Os resultados foram comparados com padrões da literatura (LEDESMA, 2018; LACERDA, 2015; SILVA, 2009). Através da pesquisa ao ICSD foram selecionados dados estruturais dos compostos presentes na CV. Uma súmula é apresentada na Tabela 11, com os parâmetros de rede, sistema cristalino, grupo espacial e o n° da ficha cristalográfica de cada cela unitária, que foi obtida com o auxílio do *software* Vesta versão 3.

Tabela 11 – Características gerais das estruturas dos compostos presentes na CV

Material	Composto	a(Å)	b(Å)	c(Å)	β(°)	Volume	Estrutura cristalina	Grupo espacial	n° ficha
CV	Quartzo	4,91	4,91	5,40	90	113,01	Hexagonal	P 32 21	9013321
	Mulita	7,58	7,68	2,89	90	168,01	Ortorrômbica	P b a m	9001037
	Hematita	5,04	5,04	13,75	90	301,98	Hexagonal	R-3 c	9015964

Fonte: Autora (2020)

Tabela 12 – Apresentação das celas unitárias das principais fases presentes na CV



Fonte: Autora (2020)

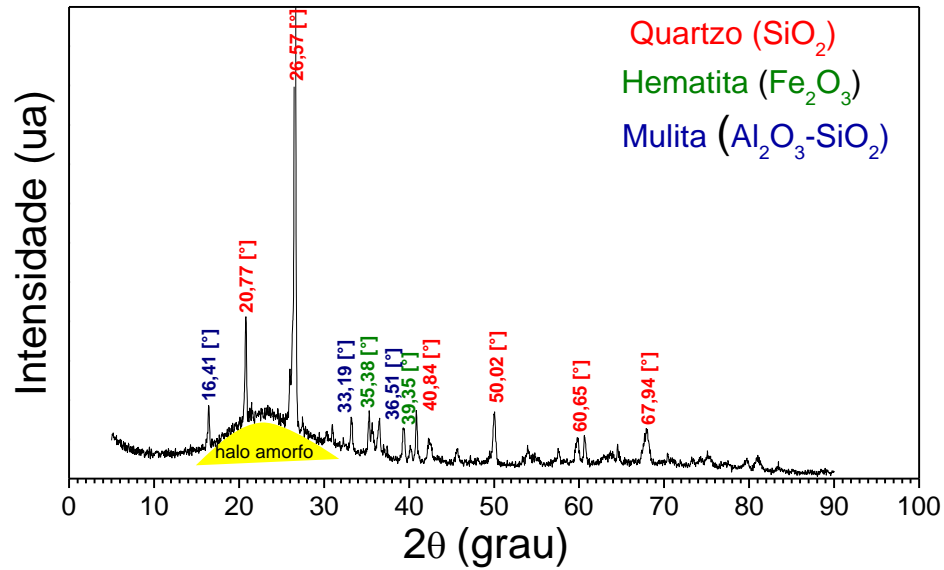
A difração da CV revelou um halo amorfo, demonstrando a reatividade deste resíduo. A formação da mulita está relacionada com a combustão do carvão mineral à temperatura acima de 1050°C (FERRET, 2004). Neste trabalho, a combustão do carvão foi 1150°C, justificando a presença deste mineral em sua composição. A Tabela 13 apresenta a composição da CV e a Figura 29 mostra o difratograma representativo da CV de Candiota – RS.

Tabela 13 – Composição das fases presentes da CV

Amostra		
Quartzo	Mulita	Hematita
2θ	2θ	2θ
20,77°	16,41°	35,38°
26,57°	33,19°	39,35°
40,84°	36,51°	
50,02°		
60,65°		
67,94°		

Fonte: Autora (2020)

Figura 29 – Difratoograma da CV



Fonte: Autora (2020)

4.3.2) SP

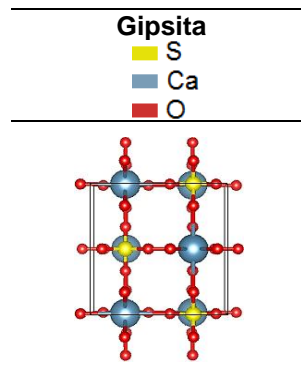
A difração de raios-X mostrou a composição mineralógica da amostra de SP, apresentando um padrão de difração característico de material cristalino. Composto majoritariamente por sulfato de cálcio (CaSO_4), na forma de gipsita. Os resultados foram comparados com padrões da literatura (PRADO *et al.*, 2016; LI *et al.*, 2015; SANTANA, 2018). A Tabela 14 apresenta informações sobre os parâmetros de rede, sistema cristalino, grupo espacial e o n° da ficha cristalográfica, bem como, a cela unitária. A Figura 30 apresenta o difratograma do SP.

Tabela 14 – Características gerais das estruturas dos compostos presentes no SP

Material	Composto	a(Å)	b(Å)	c(Å)	β (°)	Volume	Estrutura cristalina	Grupo espacial	n° ficha
SP	Gipsita	6,99	6,99	6,23	90	305,19	Ortorrômbica	A m m a	5000040

Fonte: Autora (2020)

Tabela 15 – Apresentação da cela unitária da principal fase presentes no SP



Fonte: Autora (2020)

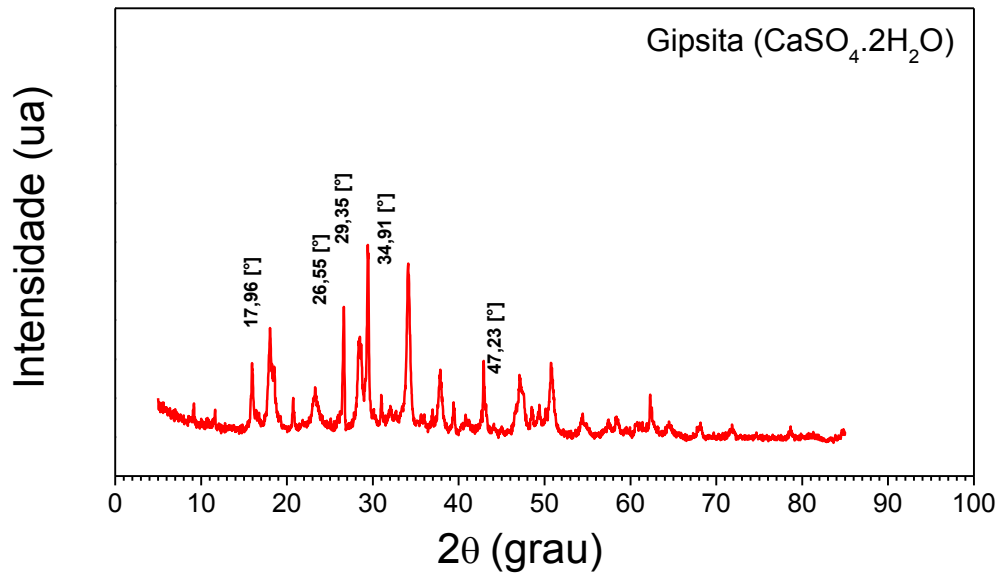
A Tabela 16 apresenta a composição do SP.

Tabela 16 – Composição da fase presente no SP

Amostra
Sulfato de cálcio (Gipsita)
2θ
17,96°
26,55°
29,35°
34,91°
47,23°

Fonte: Autora (2020)

Figura 30 – Difratoograma do SP



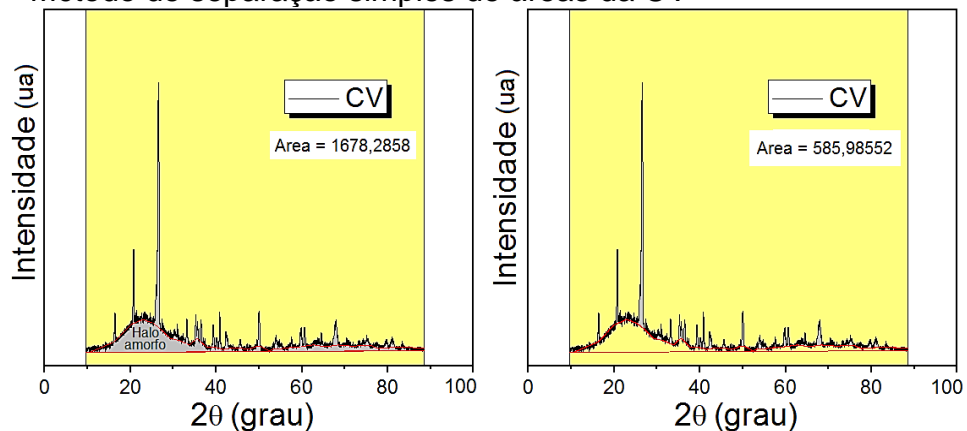
Fonte: Autora (2020)

4.3.3 Grau de cristalinidade a partir do espectro de DRX

4.3.3.1) CV

Os percentuais de cristalinidade da CV foram estimados pelo método de separação simples de áreas, descrito por Ferreira e Rambo (2015). A Figura 31 mostra as áreas selecionadas.

Figura 31 – Método de separação simples de áreas da CV



Fonte: Autora (2020)

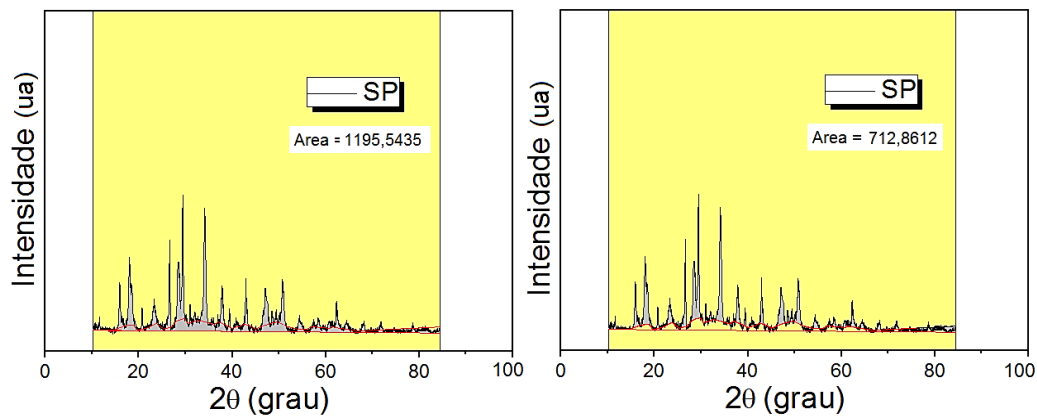
$$Cr(\%) = \frac{585,98552}{1678,2858} \times 100$$

$$Cr(\%) = 34,91\%$$

O resultado indicou que a CV se caracteriza como um material amorfo. O halo amorfo, na faixa de ângulos 2θ de 15° a 25° representa que há elementos reativos, fator importante em argamassas e cimentos, uma vez que o composto de CV deve reagir com o cimento (CORDEIRO, 2009).

4.3.3.2) SP

Figura 32 – Método de separação simples de áreas do SP



Fonte: Autora (2020)

$$Cr(\%) = \frac{712,8612}{1195,5435} \times 100$$

$$Cr(\%) = 59,63\%$$

O resultado indicou que o material é cristalino. Não apresenta reatividade (halo amorfo), não podendo ser atribuído potencialidade pozzolânica ao material. Desta forma, não é indicado como aglomerante junto ao cimento. Devido a sua natureza, este aditivo pode contribuir na formação de produtos expansivos gerando tensões internas, fissurando a argamassa e facilitando a entrada de agentes deletérios (ABRÃO, 2019).

4.4 Formação da etringita tardia

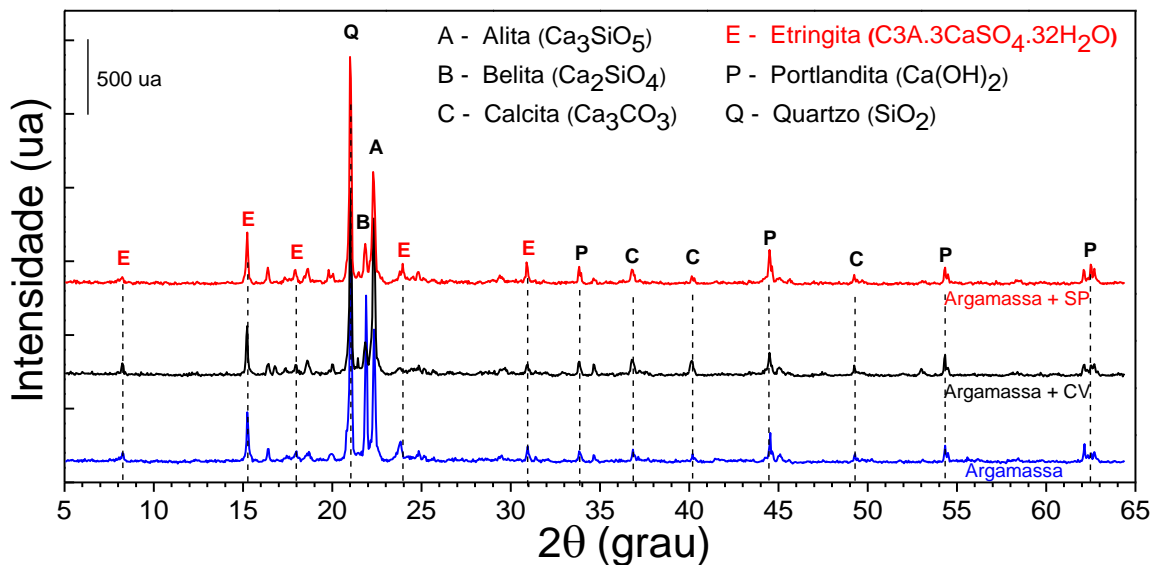
A etringita é resultante da transformação das fases anidras do cimento. Observa-se que na argamassa contendo SP os picos de etringita foram ligeiramente mais intensos, resultante da composição deste material rico em sulfato de cálcio (gipsita). O incremento da etringita também é função do consumo da gipsita (TORRES *et al.*, 2016).

Nos pós de argamassa analisados foram detectados picos de alita (A), belita (B), calcita (C), etringita (E), portlandita (P) e quartzo (Q).

A alita reage desde as primeiras horas até por volta dos 28 dias de idade, sua atividade de hidratação é muito intensa. Esta é a principal responsável pelas propriedades mecânicas nos primeiros dias. A belita apresenta reações significativas apenas em idades mais avançadas, quando começa a contribuir com a evolução das propriedades mecânicas (LOPES, 2016; NEVILLE, 2016; TAYLOR, 1992).

A Figura 33 apresenta os espectros de DRX das argamassas com e sem aditivos após 200 dias. Salienta-se que as amostras permaneceram 90 dias imersas em solução contendo 5% de Na_2SO_4 e 110 dias no dessecador.

Figura 33 – DRX das argamassas com e sem aditivos após 200 dias



Fonte: Autora (2020)

4.5 Espectroscopia Raman

A seguir são apresentados os resultados obtidos por Espectroscopia Raman dos aditivos utilizados nesta pesquisa. Os espectros Raman experimentais foram comparados com a base de dados RRUFF (<http://rruff.info/>) e com a literatura (ZYRKOWSKI, 2016; ABRANTES, 2014; EDWARDS *et al.*, 2001; RAMAN *et al.*, 1998) com o objetivo de identificar a composição dos minerais estudados.

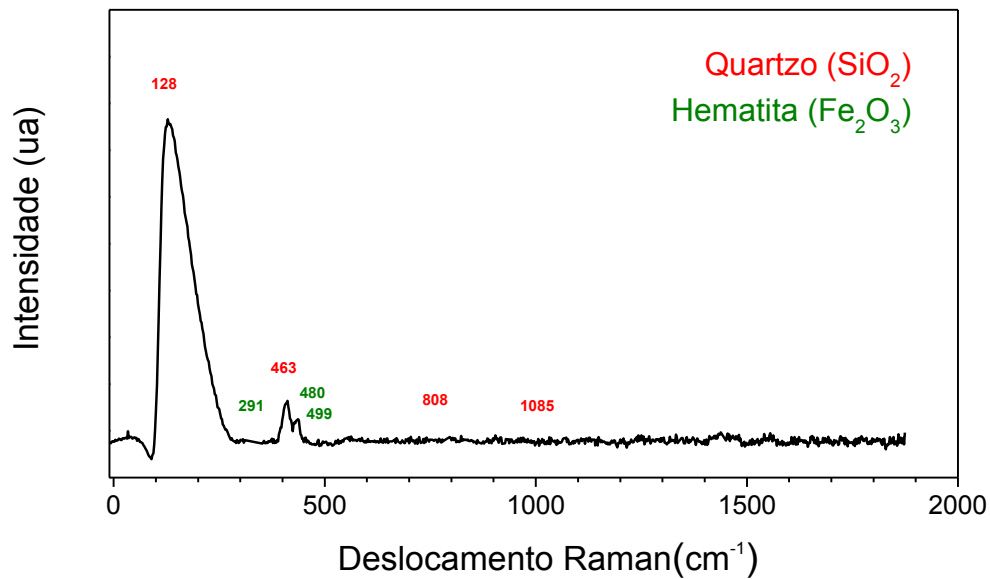
4.5.1) CV

A Tabela 17 apresenta as bandas características observadas dos minerais quartzo (RRuff ID #R040145) e hematita (RRuff ID #R040024). A Figura 34 mostra o espectro Raman da CV.

Tabela 17 – Composição do CV

Análise Espectroscopia Raman	
Quartzo	Hematita
Atribuição da banda característica (cm ⁻¹)	Atribuição da banda característica (cm ⁻¹)
128	291
463	480
808	499
1085	

Fonte: Autora (2020)

Figura 34 – Espectro Raman ($\lambda = 532 \text{ nm}$) da CV

Fonte: Autora (2020)

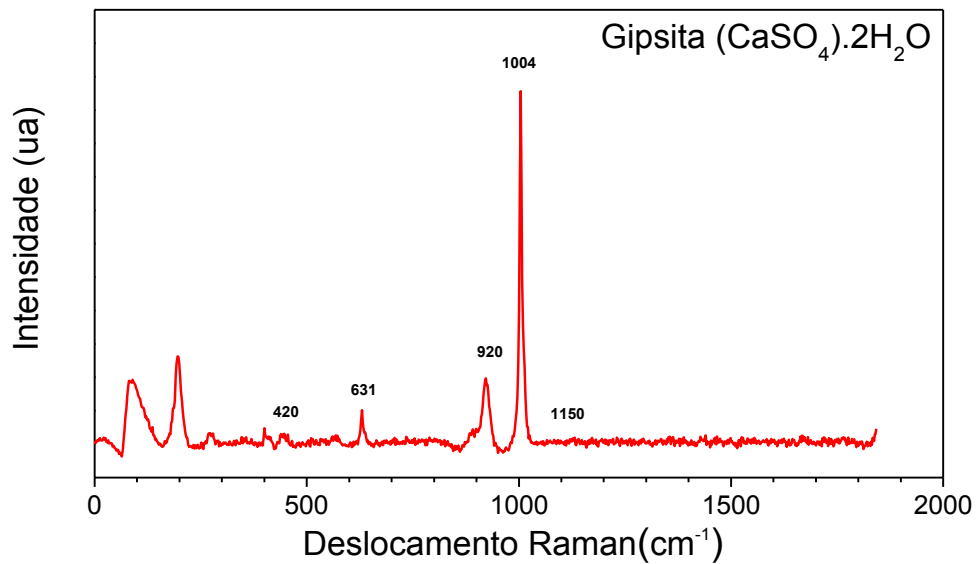
4.5.2) SP

A Tabela 18 apresenta as bandas características de gipsita (RRuff #R040029). A Figura 35 mostra o espectro Raman do SP. Os resultados foram comparados com padrões da literatura (PRADO *et al.*, 2016; EDWARDS *et al.*, 2001; RAMAN *et al.*, 1998) com a base de dados RRUFF (<http://rruff.info/>).

Tabela 18 – Composição do SP

Análise Espectroscopia Raman	
Gipsita	
Atribuição da banda característica (cm ⁻¹)	
	420
	631
	920
	1150

Fonte: Autora (2020)

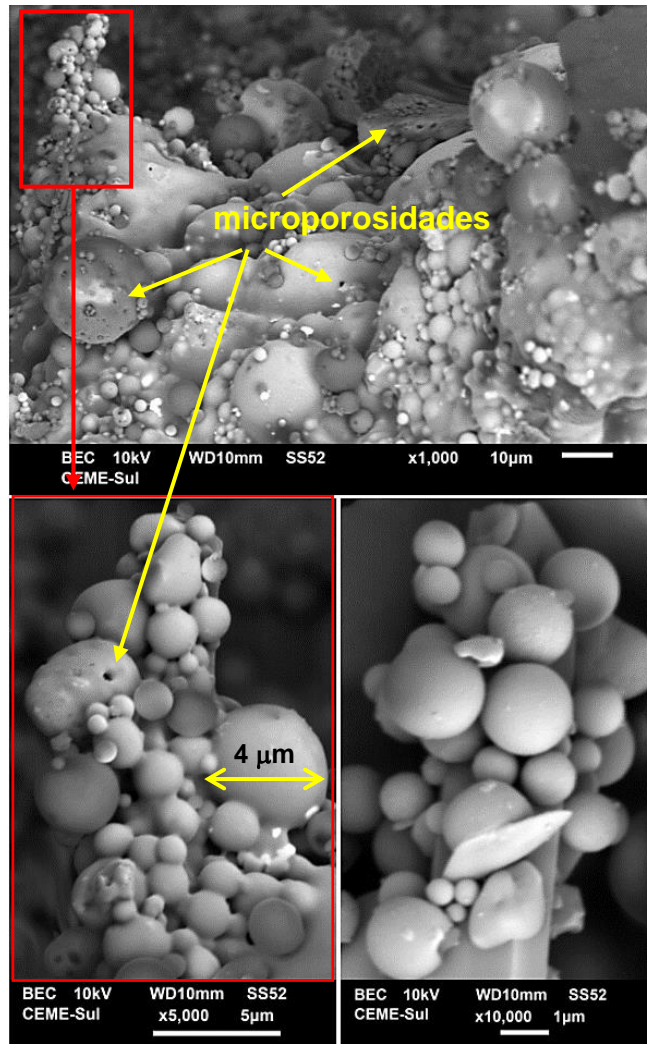
Figura 35 – Espectro Raman ($\lambda = 532 \text{ nm}$) do SP

Fonte: Autora (2020)

4.6 MEV

A Figura 36 apresenta micrografias da CV utilizada como aditivo. Pode-se observar um aglomerado de partículas esféricas com superfície lisa e, em menor quantidade, partículas contendo algumas microporosidades. Esta morfologia é relacionada a aluminossilicatos e hematita (GOBBO, 2009). As dimensões das partículas são variadas, ratificando os resultados de análise granulométrica. Para adição em argamassas, a porosidade é inadequada pois viabiliza a absorção de umidade. Neste caso a baixa porosidade, aliada à geometria esférica podem contribuir para melhorar o desempenho das argamassas.

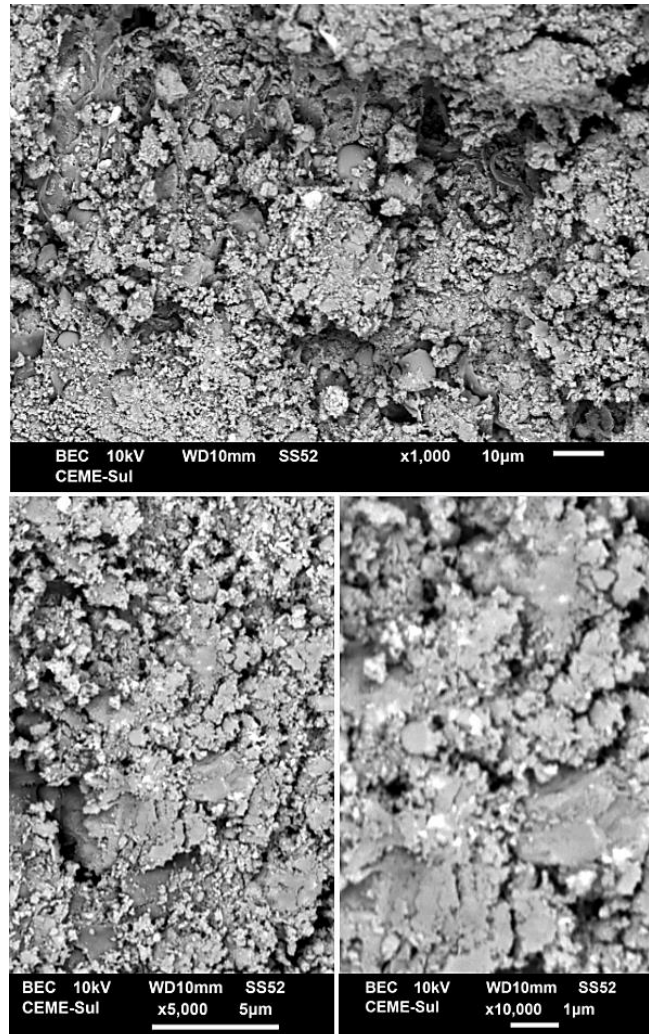
Figura 36 – Imagem da CV ao MEV



Fonte: Autora (2020)

A Figura 37 mostra micrografias do SP. Observa-se pontos claros em uma matriz escura, bem como, a presença de aglomerados com dimensão variada e distribuições heterogêneas. Este tipo de morfologia não garante um bom resultado quando o objetivo é melhorar o desempenho de argamassas.

Figura 37 – Imagem do SP ao MEV



Fonte: Autora (2020)

4.7 Resistência à compressão

No ensaio de resistência à compressão para as argamassas com adições de CV, verificou-se que quanto maior a adição de CV (16 e 26%), menor a resistência à compressão axial. Este efeito pode ser explicado pela formação de produtos de hidratação secundários, principalmente silicatos de cálcio hidratados, de baixa densidade, proporcionados pela reação entre as partículas de cinzas e $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (CEZAR, 2011), os quais substituíram os produtos que seriam formados na hidratação do CP, também silicatos de cálcio hidratados, entretanto de maiores densidades. O autor ainda

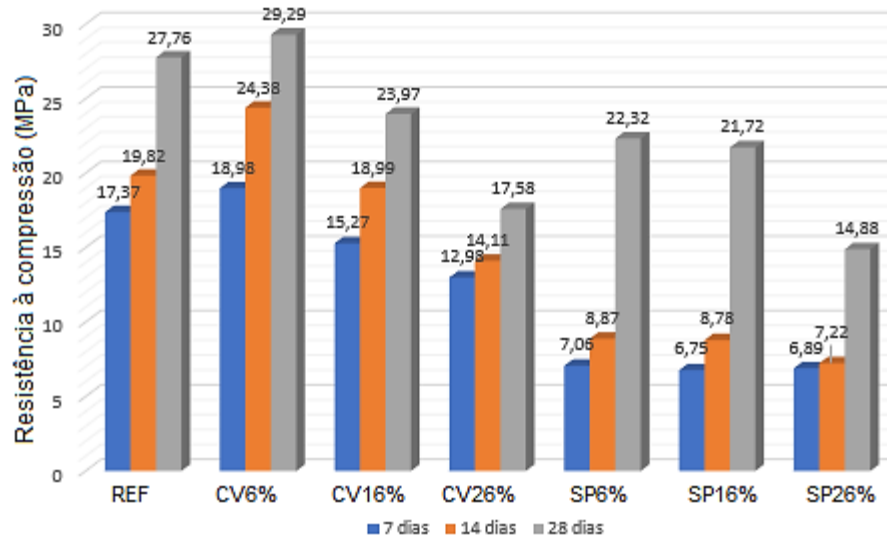
comenta que a relação entre teores maiores de cinza/redução na resistência é devido à redução nos componentes básicos do cimento, como silicatos e aluminatos de cálcio.

A argamassa contendo a adição de 6% de CV aos 28 dias, obteve desempenho superior à argamassa de referência e que à argamassa contendo SP, sendo assim, este teor de 6% de CV é ideal para substituição na argamassa com ganho de resistência mecânica. Além de uma argamassa de menor custo e ecologicamente correta pelo menor consumo de cimento, tanto pela redução do impacto ambiental - produzido pela indústria cimenteira – como pela economia de matérias primas, bem como, pelo consumo de um resíduo agressivo ao ambiente. Nesse sentido, verifica-se que a substituição parcial do CP por materiais com características pozolânicas (6% em massa) vem ao encontro dos resultados encontrados na literatura, possibilitando a melhora nas características mecânicas das argamassas produzidas.

Em relação ao SP, a resistência a compressão tende a diminuir para percentuais acima de 6%. Provavelmente há maior dispersão dos produtos hidratados, conduzindo a uma queda da ligação entre esses produtos e, conseqüentemente, diminuindo a resistência (GONÇALVES, 2000).

Caillahua e Moura (2013) e Santana (2018), avaliando a influência do resíduo da FGD em argamassas, verificaram que a substituição até 5% é viável, para adições mais altas, há uma tendência a diminuir a resistência devido à maior dispersão dos produtos de hidratação do CP e redução nos componentes básicos do cimento. A Figura 38 mostra o efeito dos aditivos na resistência à compressão das amostras.

Figura 38 – Resistência à compressão

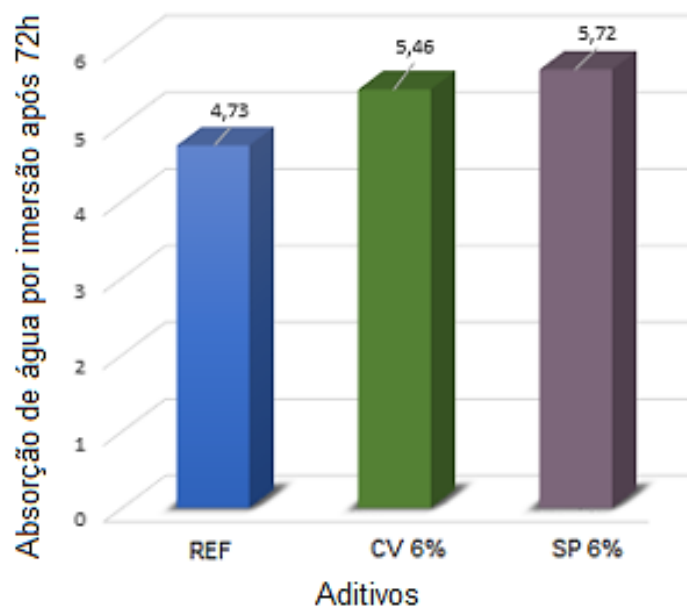


Fonte: Autora (2020)

4.8 Absorção de água por imersão

A Figura 39 apresenta a média dos valores da absorção de água por imersão após 72 horas.

Figura 39 – Absorção de água por imersão



Fonte: Autora (2020)

As argamassas contendo aditivos apresentaram índice de absorção de água por imersão maior do que a argamassa de referência, uma vez que esses corpos de prova apresentaram menor facilidade de perder água durante a secagem, em função da dimensão e tortuosidade dos poros. Resultados semelhantes foram encontrados por Bauer e Pozzan (2005), que observaram que argamassas produzidas com teores de 5% e 10% de aditivos minerais apresentaram percentuais de absorção por imersão mais elevados do que as misturas de referência. Estes autores argumentaram que o refinamento do tamanho dos poros promovido pela sílica é acompanhado por um aumento da porosidade total.

Helene (1983), propõe uma classificação, descrita na Tabela 19, relacionando a porosidade ou índice de vazios e a absorção de água por imersão com a qualidade da argamassa.

Tabela 19 – Classificação da durabilidade da argamassa em função da porosidade da absorção de água por imersão

Classificação da argamassa	Porosidade	Absorção de água
Durável – Alto desempenho	<10%	≤ 4,2%
Convencional	10 a 15%	4,2% ≤ a ≤ 6,2%
Deficiente	>15%	≥ 6,2%

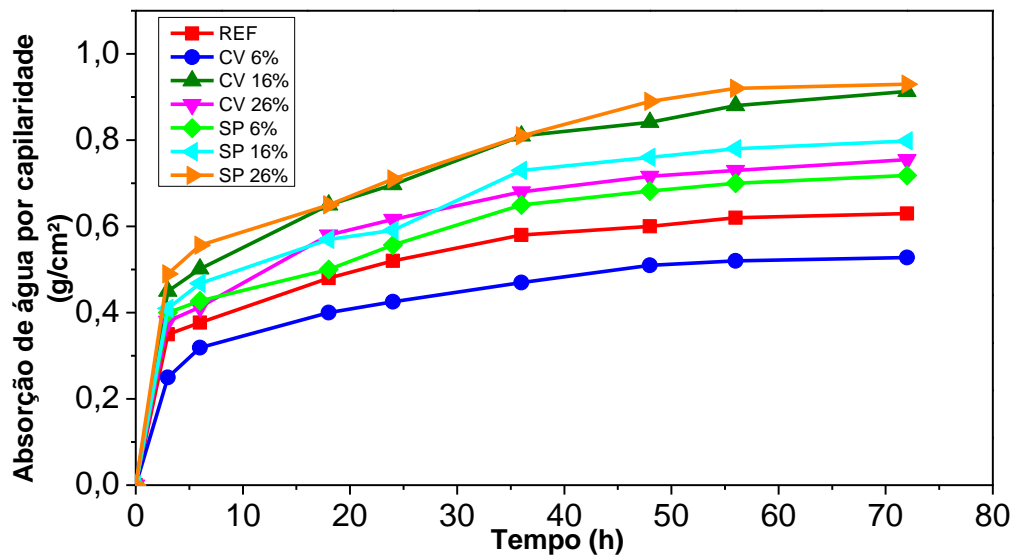
Fonte: Adaptado de Helene (1983)

De acordo com os resultados encontrados, tem-se que as argamassas utilizadas neste trabalho são consideradas como convencionais.

4.9 Absorção de água por capilaridade

Pode-se observar através da Figura 40, que o melhor desempenho foi os corpos de prova compostos por 6% de CV e 6% de SP. Observou-se que os teores mais altos mostraram pouca redução em comparação com a de referência.

Figura 40 – Variação da absorção de água por capilaridade em função do tempo de imersão



Os resultados estão apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Absorção de água por capilaridade

Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)							
Tempo (h)	REF	CZ 6%	CZ 16%	CZ 26%	SP 6%	SP 16%	SP 26%
0	0	0	0	0	0	0	0
6	0,377	0,319	0,501	0,413	0,427	0,468	0,556
24	0,52	0,425	0,697	0,616	0,557	0,591	0,71
48	0,62	0,51	0,841	0,716	0,682	0,76	0,85
72	0,63	0,528	0,913	0,755	0,718	0,798	0,93

Fonte: Autora (2020)

De acordo com a Tabela 20, a argamassa contendo 6% de CV obteve melhor desempenho em relação ao corpo de referência já que no final de 72 horas, absorveu 16,3% a menos que a argamassa de referência. Contudo, esse valor ainda não atende as prescrições da Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 16072 (2012) que define uma porcentagem mínima de redução de 50% para que uma argamassa seja considerada impermeável.

Esse comportamento pode é justificado pelo pouco tempo de ensaio, uma vez que esse tipo de aditivo é cristalizante e necessita de maior prazo para formação de cristais

compostos que trabalham no preenchimento dos poros, indicando que os resultados poderão ser melhores a longo prazo (SANTANA, 2017).

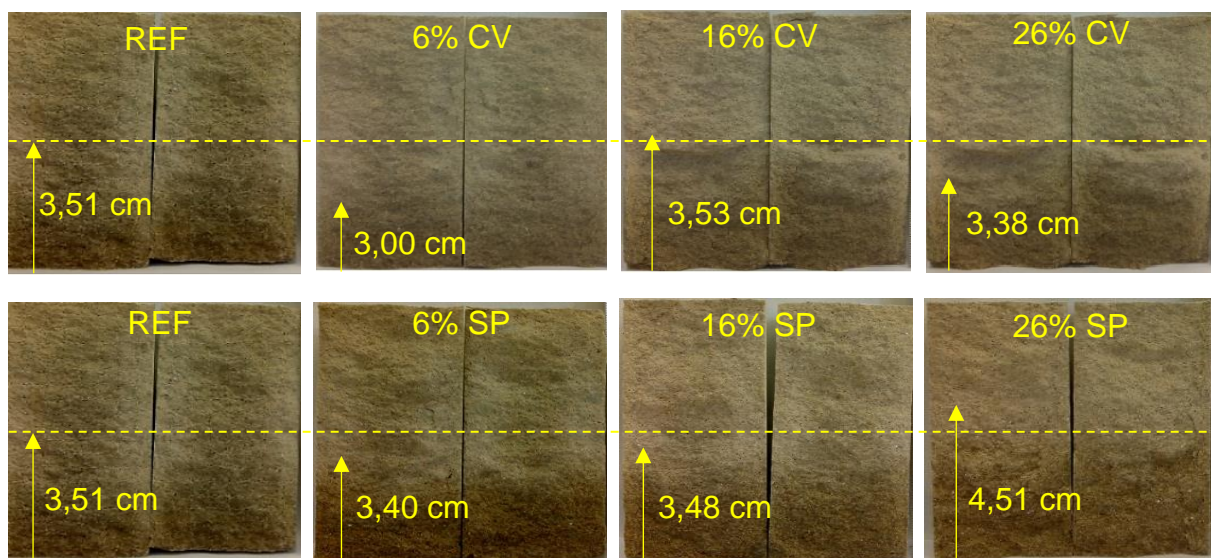
A Tabela 21 e a Figura 41 exprimem o resultado das alturas médias de ascensão capilar encontradas nas diferentes argamassas após rompimento diametral do corpo de prova cilíndrico. A argamassa contendo 6% de CV, apresentou a menor altura, enquanto a argamassa contendo 26% de SP, como esperado por motivos anteriormente explicados, apresentou a maior quantidade de água absorvida.

Tabela 21 – Resultados da ascensão capilar

Argamassa	Altura média atingida pela água (cm)
REF	3,51
CV 6%	3,00
CV 16%	4,30
CV 26%	3,60
SP 6%	3,40
SP 16%	3,60
SP 26%	4,50

Fonte: Autora (2020)

Figura 41 – Corpos de prova rompidos diametralmente para aferição da ascensão de água

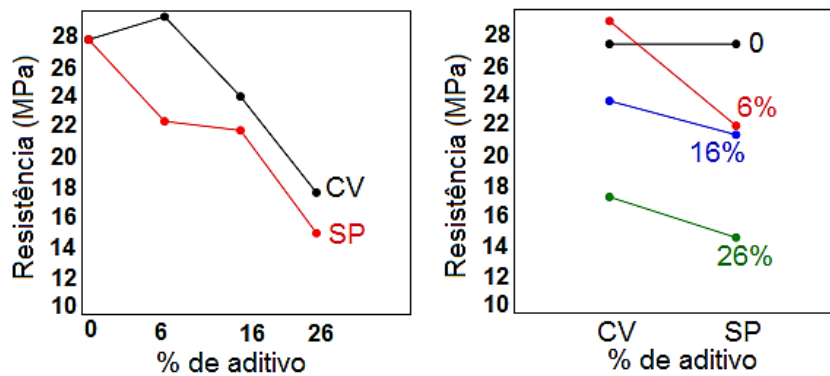


Fonte: Autora (2020)

4.10 Análise estatística

No diagrama que relaciona a variação da resistência à compressão com as adições percentuais (Figura 42a), verifica-se que a adição de 6% de CV está associada à resistência média mais alta, indicando que este efeito principal é significativo na variável resposta (ganho de resistência aos 28 dias). Percebe-se também que nas adições mais elevadas, 16 e 26%, houve decréscimo da resistência. O diagrama mostrado na Figura 42b enfatiza que para todas as adições estudadas a CV conferiu maior resistência as argamassas comparando-se com o SP e também que na argamassa contendo 6% CV obteve-se a resistência mais elevada do que todas as situações avaliadas.

Figura 42 – Efeitos das adições na resistência mecânica



Fonte: Autora (2020)

A análise estatística (ANOVA, com confiabilidade de 95%) mostra um índice $p=0,0006416$ evidenciando um efeito significativo do aditivo 6% CV no aumento da resistência a compressão.

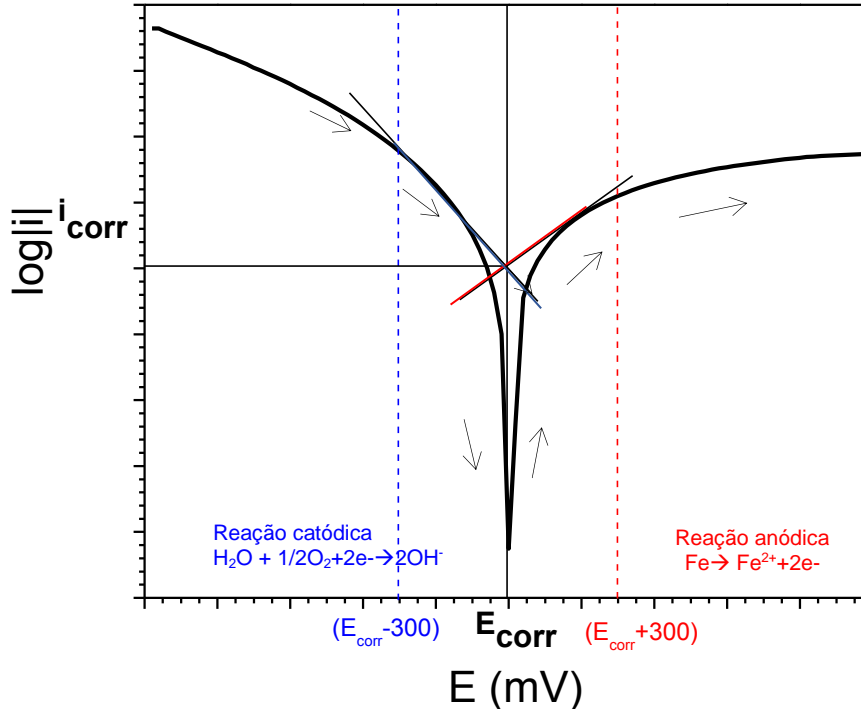
4.11 Ensaio eletroquímicos

As medidas foram realizadas durante um período de 90 dias.

4.11.1 Polarização

A Figura 43 mostra uma curva de polarização para demonstrar a forma a qual foi realizada a extrapolação gráfica da porção linear, entre ± 300 mV em relação ao E_{corr} , para determinação da i_{corr} . Para que os valores de E_{corr} e i_{corr} fossem determinados de forma mais precisa, utilizou-se o software EC-Lab versão 11.30 demo. Na curva estão indicadas as reações anódicas (oxidação da armadura) e catódica (redução do oxigênio). Se o oxigênio necessário para reação catódica é limitado, a mesma é inibida e, conseqüentemente, a oxidação da armadura é minimizada (GENTIL, 2011).

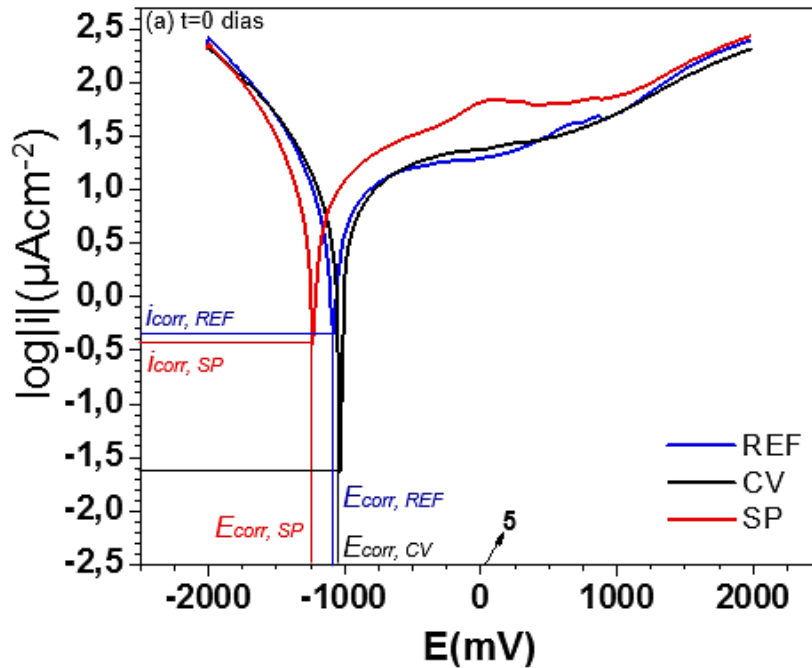
Figura 43 – Curvas de polarização demonstrativa para determinação do E_{corr} e i_{corr}



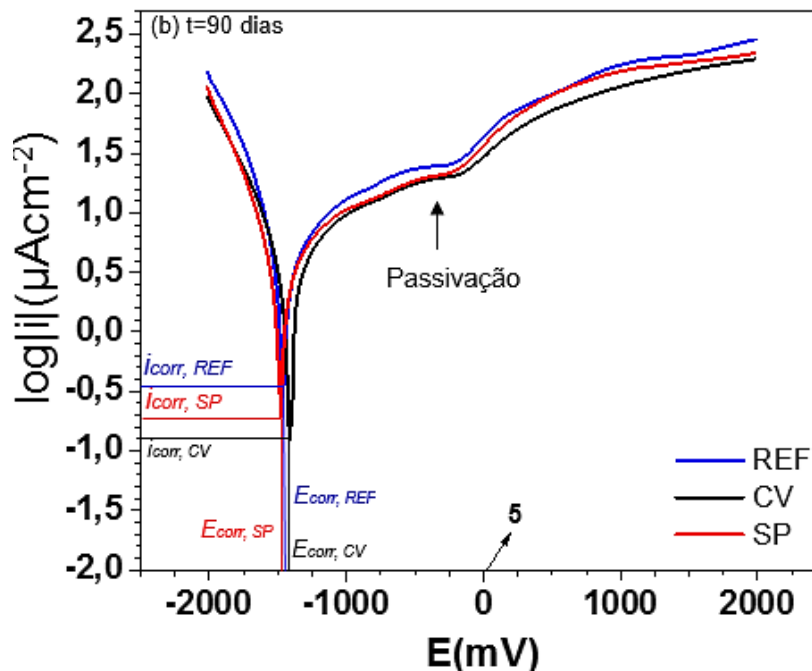
Fonte: Autora (2020)

Na Figura 44 (a-b), são mostradas curvas de polarização para análise da variação do E_{corr} e da i_{corr} comparando-se as três argamassas para os períodos de 0 e 90 dias. Logo a seguir, na Figura 45 (a-c), têm-se as curvas de polarização para cada argamassa, individualmente, no mesmo período supracitado. As linhas verticais e horizontais em azul indicam os valores de E_{corr} , REF e i_{corr} , REF, respectivamente.

Figura 44 – Curvas de polarização, para análise comparativa do E_{corr} das argamassas armadas, com e sem as adições, medidas em solução de 5% de Na_2SO_4 , a 25°C na velocidade de varredura de 10 mV/s em meio aerado para os tempos de (a) 0 e (b) 90 dias.

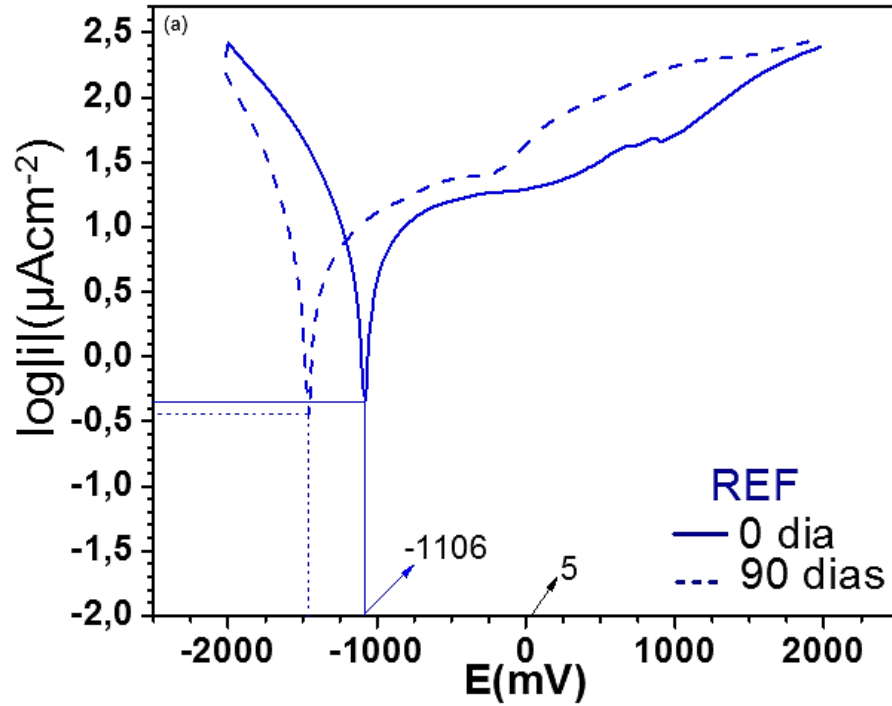


Fonte: Autora (2020)

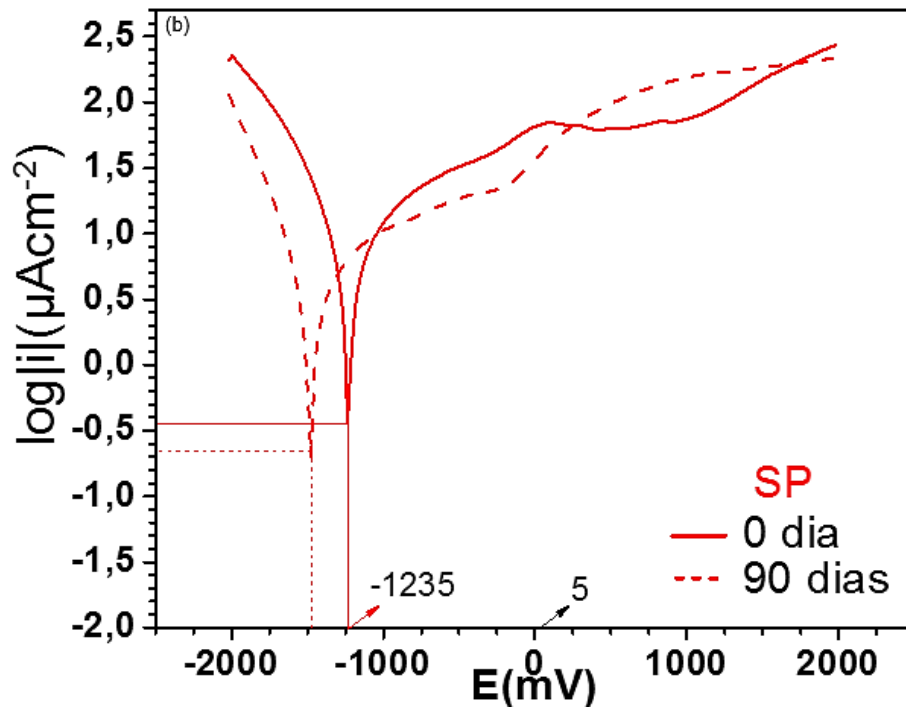


Fonte: Autora (2020)

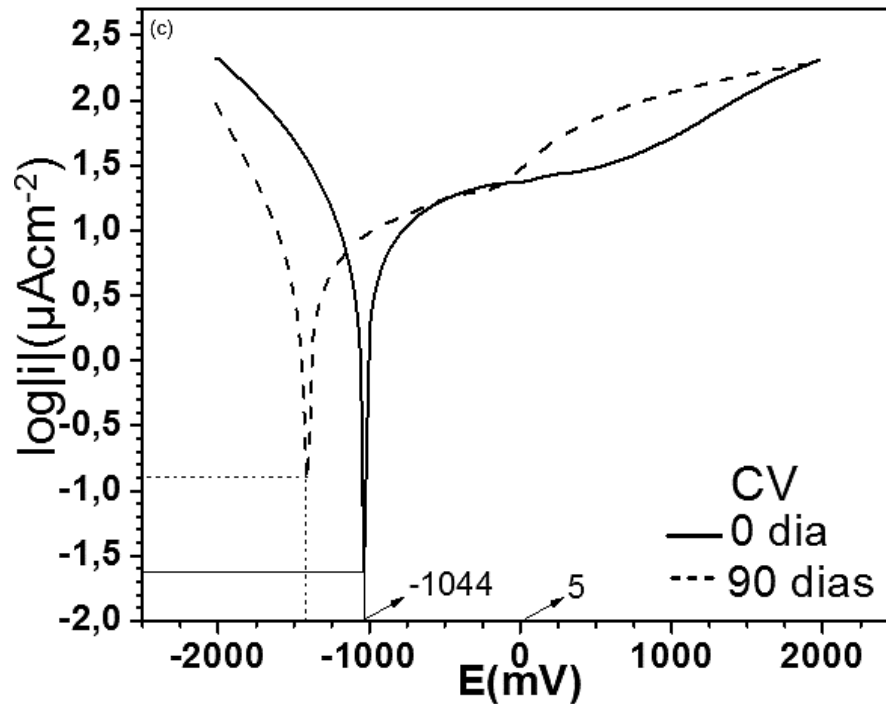
Figura 45 – Curvas de polarização, para análise comparativa do E_{corr} das argamassas armadas, com e sem as adições, medidas em solução de 5% de Na_2SO_4 , a 25°C na velocidade de varredura de 10 mV/s em meio aerado para os tempos de 0 (linha cheia) e 90 (linha tracejada) dias para a argamassas.



Fonte: Autora (2020)



Fonte: Autora (2020)



Fonte: Autora (2020)

De acordo com as curvas, a região catódica tem características de polarização por ativação enquanto que na região anódica observa-se uma tendência à passivação, ou polarização ôhmica, em aproximadamente 5 mV, constatado pela diminuição da densidade de corrente. Contudo, o filme passivo não é estável o suficiente, possivelmente devido à permeabilidade, para promover uma adequada proteção neste potencial e a densidade de corrente volta a crescer quando o potencial atinge cerca de 7 mV retornando para polarização por ativação (GEMELLI, 2001).

Ainda segundo Gemelli (2001), a velocidade de corrosão pode ser limitada ou controlada por três etapas: i) Pela cinética das reações de transferência de cargas anódica ou catódica na interface metal/eletrólito; ii) Pela velocidade de transporte de massa do oxidante ou dos produtos de reação, denominada polarização por concentração e iii) Pela resistência elétrica na interface metal/eletrólito e/ou pela resistividade de filmes passivos, conhecida como queda ôhmica.

As adições mostraram efeitos opostos no E_{corr} quando comparados com a argamassa de referência (Figura 44 a-b). Observa-se que o SP desloca o E_{corr} para valores mais negativos, de -1106 para -1235 mV, enquanto na argamassa com CV o

deslocamento é no sentido positivo, de -1106 para -1044 mV. Os deslocamentos são mais evidentes nas medidas realizadas no tempo inicial do que aos 90 dias. Isso se deve à maior hidratação do material após 90 dias de imersão. Dessa forma, com base nos resultados aqui apresentados pode-se sugerir que o SP ($E_{corr,SP} < E_{corr,REF}$) afeta a reação catódica enquanto a CV ($E_{corr,CV} > E_{corr,REF}$) tem atuação na reação anódica.

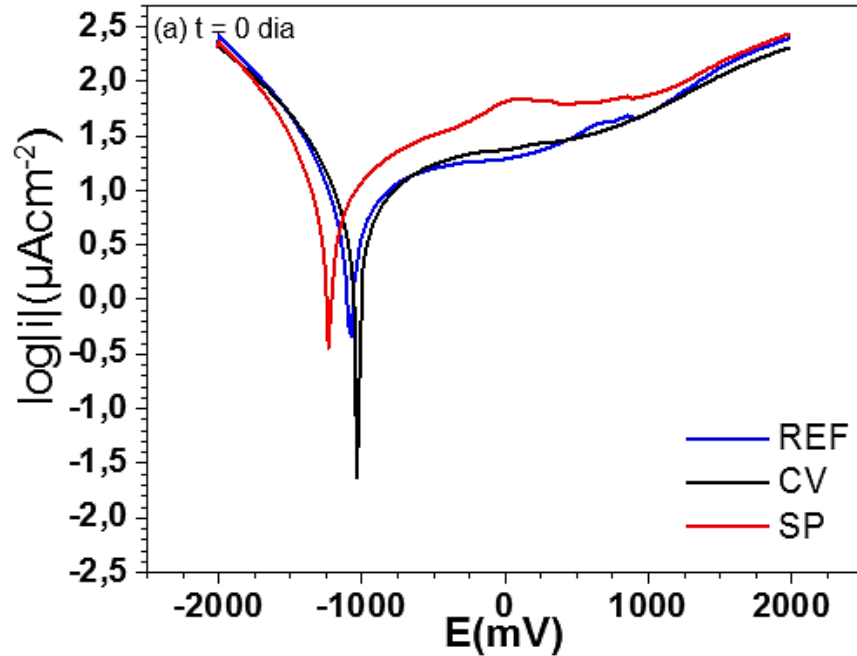
Verifica-se que a variação das densidades de corrente foi pequena comparando-se as três condições, mas percebe-se que na argamassa com adição de SP, as densidades de corrente do lado anódico foram maiores no tempo inicial. A i_{corr} da argamassa contendo CV foi inferior do que as demais argamassas. No tempo inicial observou-se que: $i_{corr,CV} < i_{corr,REF} < i_{corr,SP}$ e após 90 dias: $i_{corr,CV} < i_{corr,SP} < i_{corr,REF}$.

Nesse sentido, pode-se afirmar que a adição de CV contribui para diminuir a velocidade de corrosão da armadura. Isso se deve à diminuição da porosidade da microestrutura da argamassa (DOTTO, 2006; MONTEMOR; SIMÕES; SALTA, 2000; QIAN *et al.*, 2003; SILVA; LIBÓRIO, 2006).

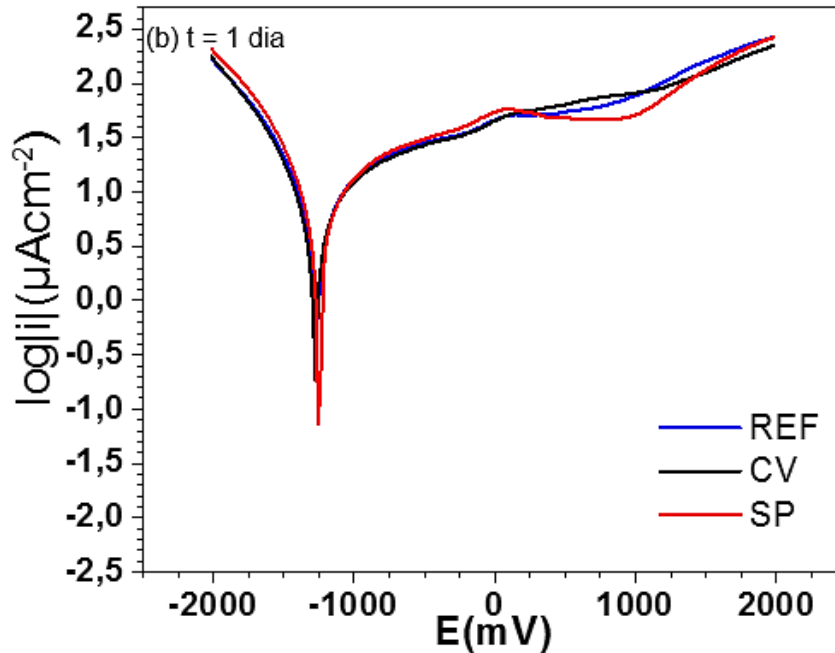
Considerando-se a variação do E_{corr} em função do tempo individualmente para cada argamassa (Figura 45), em 90 dias ocorreu deslocamento do E_{corr} para potenciais mais negativos nas três argamassas. A diminuição do E_{corr} foi da ordem de 41 mV, 379 mV e 261 mV para as argamassas de referência, com adição de CV e com adição de SP, respectivamente. Este decréscimo é esperado porque com o aumento do tempo de imersão há mais penetração dos agentes agressivos na argamassa e também ocorrem modificações microestruturais, principalmente na interface aço-argamassa (MONTEMOR; SIMÕES; SALTA, 2000).

A seguir, na Figura 46 (a-j) são mostradas todas as curvas de polarização medidas nas argamassas estudadas. Agrupou-se no mesmo gráfico as medidas referentes as argamassas contendo 6% de aditivos e a de referência. Para estas curvas, o eixo x está expresso em termos de sobretensão ($E - E_{i=0}$). A partir destas curvas estimou-se os parâmetros detalhadamente descritos na Tabela 25.

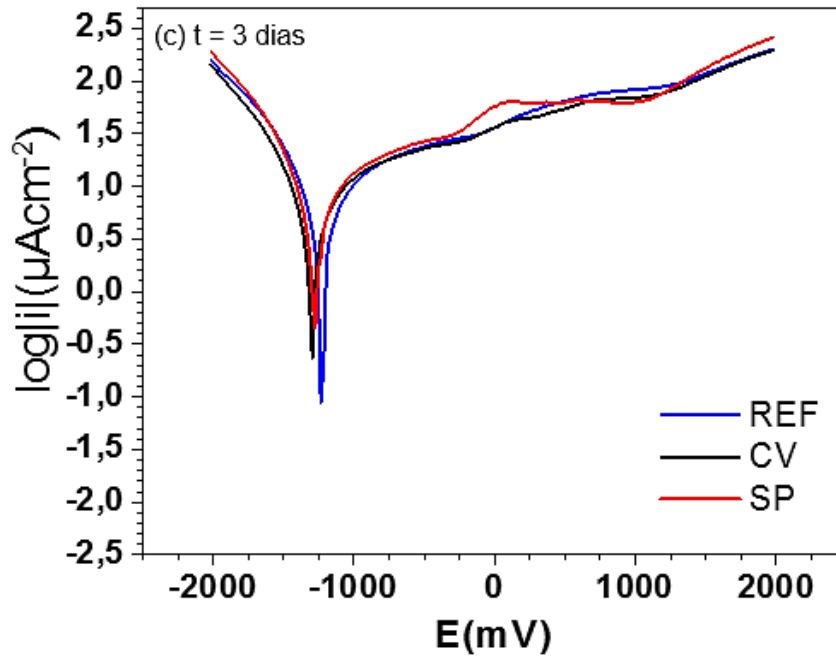
Figura 46 – Curvas de polarização, das argamassas armadas, com e sem as adições, medidas em solução de 5% de Na_2SO_4 , a 25°C na velocidade de varredura de 10 mV/s em meio aerado para os tempos de (a) 0 dia; (b) 1 dia; (c) 3 dias; (d) 5 dias; (e) 10 dias; (f) 20 dias; (g) 30 dias; (h) 45 dias; (i) 60 dias e (j) 90 dias.



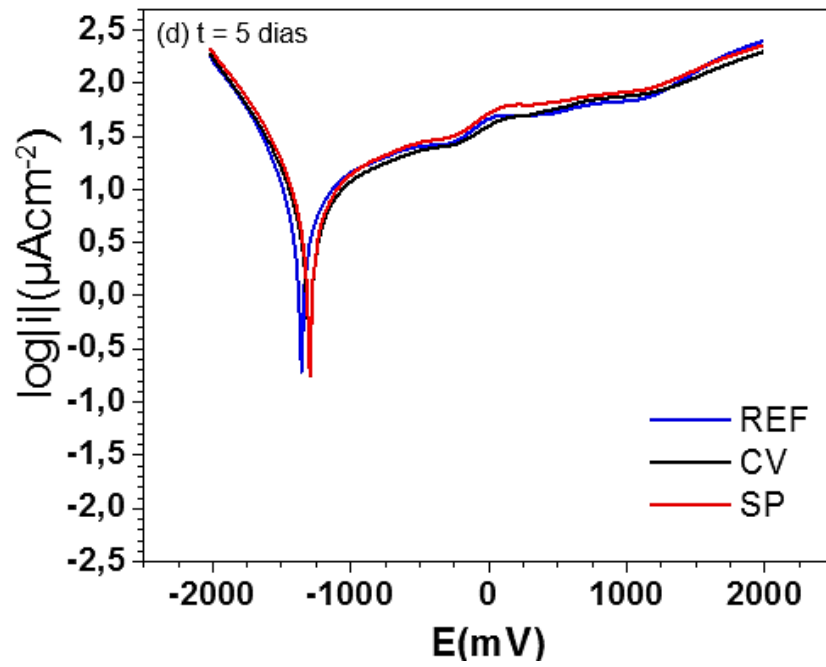
Fonte: Autora (2020)



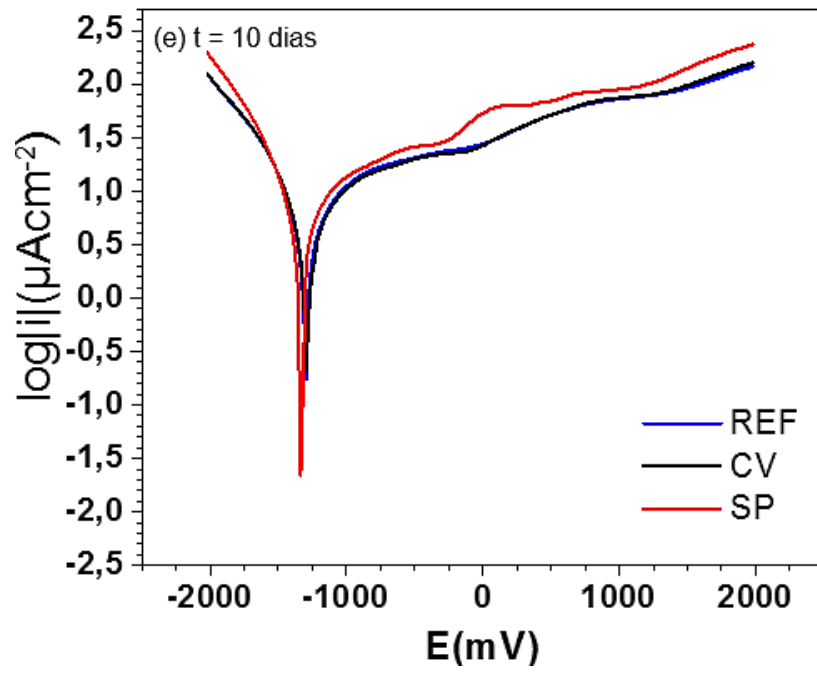
Fonte: Autora (2020)



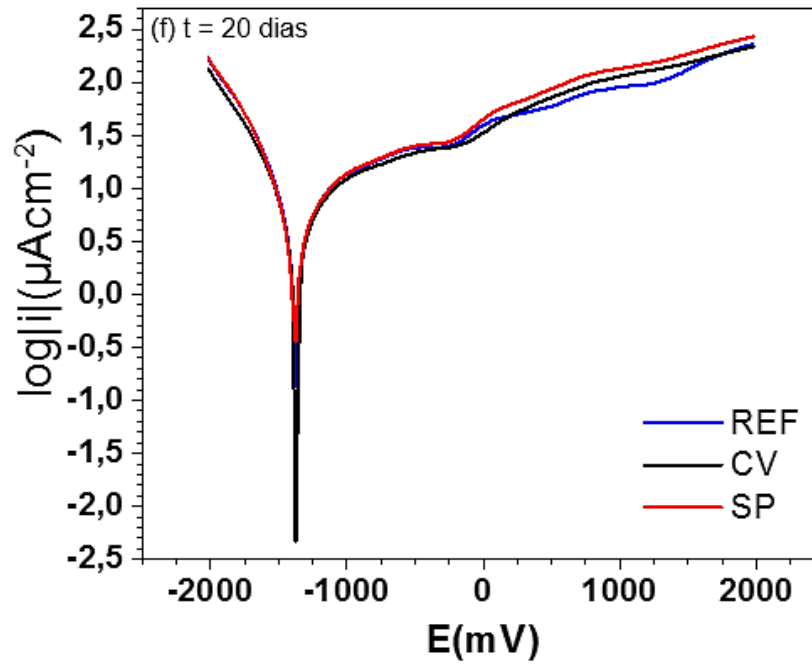
Fonte: Autora (2020)



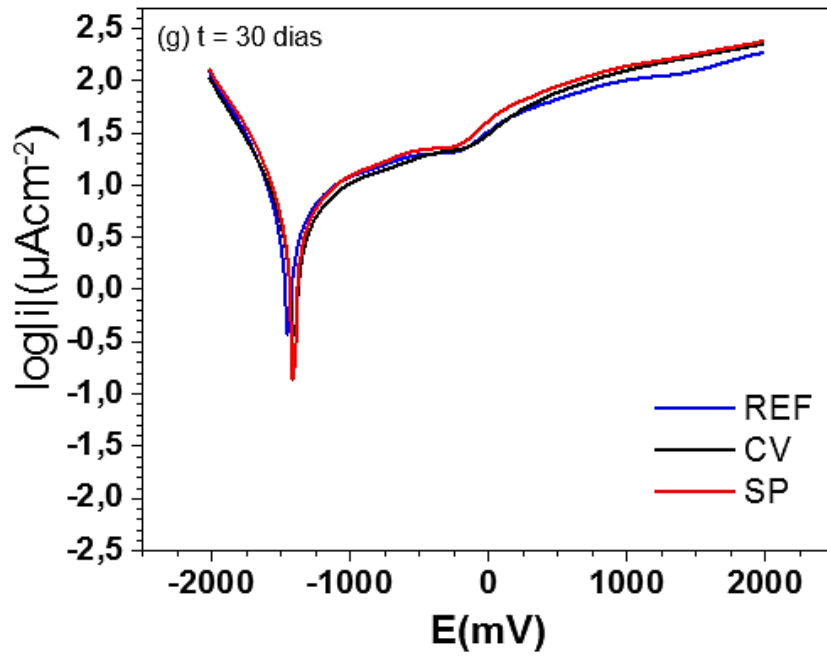
Fonte: Autora (2020)



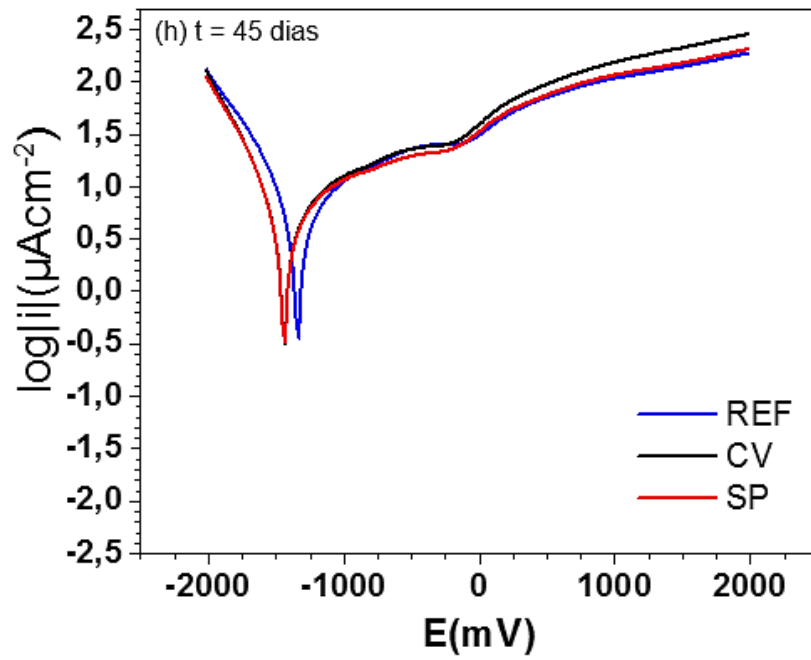
Fonte: Autora (2020)



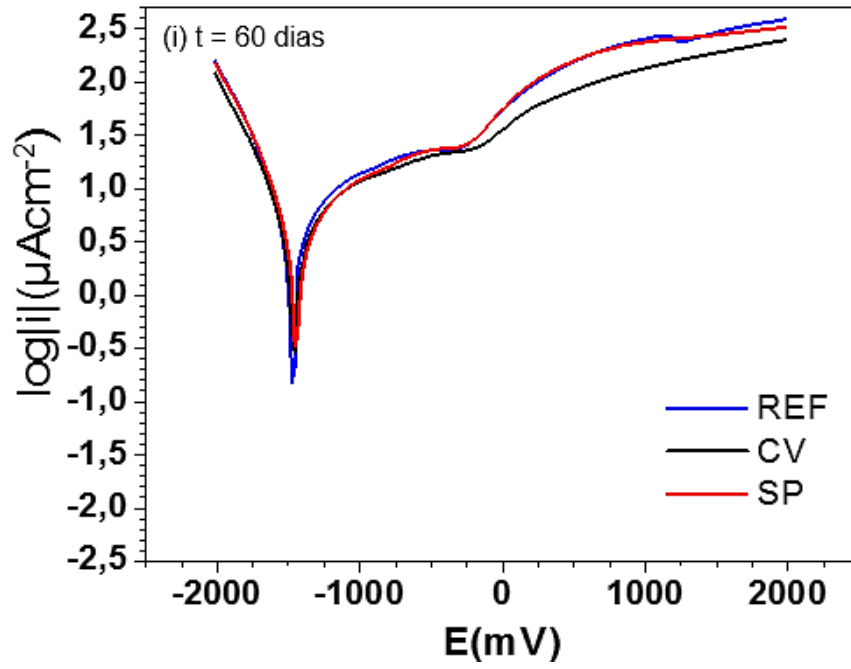
Fonte: Autora (2020)



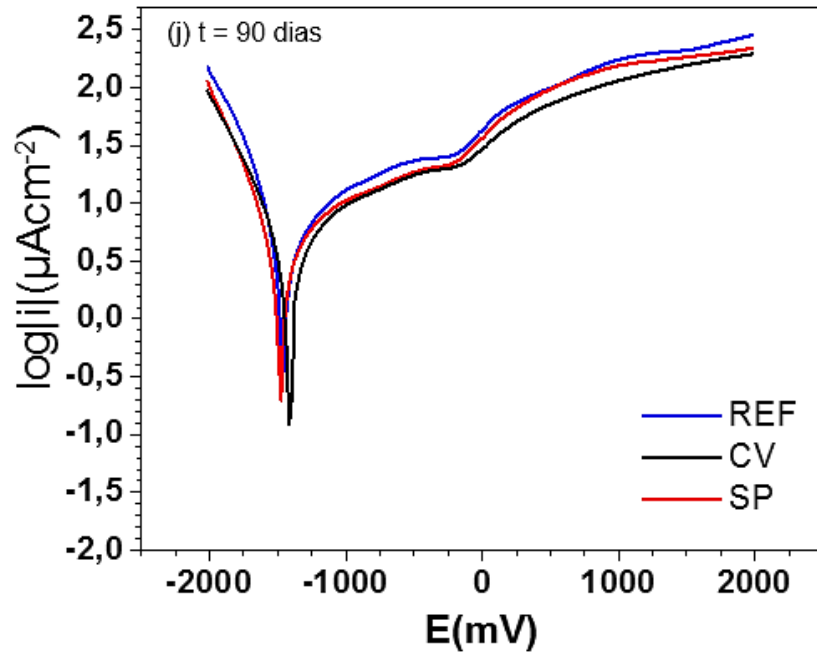
Fonte: Autora (2020)



Fonte: Autora (2020)



Fonte: Autora (2020)



Fonte: Autora (2020)

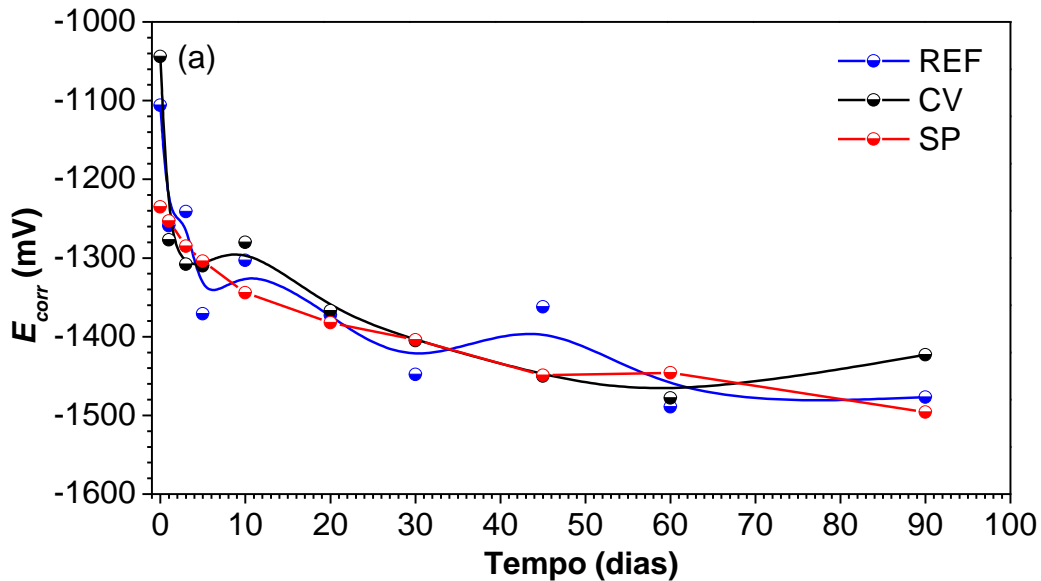
Tabela 22 – Síntese dos resultados obtidos a partir das curvas de polarização mostradas na Figura 46

Resultados eletroquímicos	Tempo de imersão em Na ₂ SO ₄ (dias)					
	0			1		
	REF	CZ	SP	REF	CZ	SP
E_{corr} (mV)	-1106	-1044	-1235	-1259	-1277	-1253
i_{corr} (μAcm^{-2})	0,14	0,14	0,17	0,16	0,15	0,17
b_a (mV)	393,4	350,4	327,3	288,4	314,5	306,1
b_c (mV)	196,7	228,9	216,8	241,7	226,7	225,9
Taxa de corrosão ($\mu\text{m/ano}$)	52	49	62	58	54	61
R_p (kOhm)	25,53	28,09	21,13	22,66	24,55	21,14
EI (%)	-	4,04	-	-	7,54	-
Resultados eletroquímicos	Tempo de imersão em Na ₂ SO ₄ (dias)					
	3			5		
	REF	CZ	SP	REF	CZ	SP
E_{corr} (mV)	-1241	-1308	-1285	-1371	-1310	-1304
i_{corr} (μAcm^{-2})	0,15	0,13	0,17	0,15	0,13	0,16
b_a (mV)	338,4	325,1	336,2	357	329,3	320,9
b_c (mV)	215,8	203,8	217,5	197,8	201,8	206
Taxa de corrosão ($\mu\text{m/ano}$)	53	48	62	55	49	56
R_p (kOhm)	24,77	26,15	21,48	23,32	25,87	22,33
EI (%)	-	9,96	-	-	11,39	-
Resultados eletroquímicos	Tempo de imersão em Na ₂ SO ₄ (dias)					
	10			20		
	REF	CZ	SP	REF	CZ	SP
E_{corr} (mV)	-1303	-1280	-1344	-1373	-1367	-1382
i_{corr} (μAcm^{-2})	0,13	0,11	0,16	0,13	0,12	0,13
b_a (mV)	308,1	252,9	352,9	303,6	295,2	313,9
b_c (mV)	207,8	219,7	204,9	213,2	223,1	204,4
Taxa de corrosão ($\mu\text{m/ano}$)	45	39	57	48	44	46
R_p (kOhm)	27,63	30,03	23,16	26,15	29,19	26,74
EI (%)	-	12,82	-	-	9,13	3,36
Resultados eletroquímicos	Tempo de imersão em Na ₂ SO ₄ (dias)					
	30			45		
	REF	CZ	SP	REF	CZ	SP
E_{corr} (mV)	-1371	-1448	-1405	-1362	-1450	-1449
i_{corr} (μAcm^{-2})	0,12	0,10	0,11	0,13	0,10	0,11
b_a (mV)	357	340,6	327,5	379,3	319,4	329,5
b_c (mV)	197,8	207,5	222,1	195,2	191,3	196,9
Taxa de corrosão ($\mu\text{m/ano}$)	55	46	38	42	36	38
R_p (kOhm)	30,76	36,37	31,18	28,26	31,30	32,05
EI (%)	-	13,19	10,98	-	16,16	15,65
Resultados eletroquímicos	Tempo de imersão em Na ₂ SO ₄ (dias)					
	60			90		
	REF	CZ	SP	REF	CZ	SP
E_{corr} (mV)	-1489	-1478	-1446	-1477	-1423	-1496
i_{corr} (μAcm^{-2})	0,12	0,10	0,12	0,12	0,08	0,12
b_a (mV)	360,4	383,8	319,3	398,1	306,6	387,7
b_c (mV)	184,3	194,8	200,6	172,6	200,5	186,3
Taxa de corrosão ($\mu\text{m/ano}$)	42	39	37	44	30	36
R_p (kOhm)	28,78	33,60	34,51	27,37	40,18	35,71
EI (%)	-	9,24	15,76	-	31,42	19,89

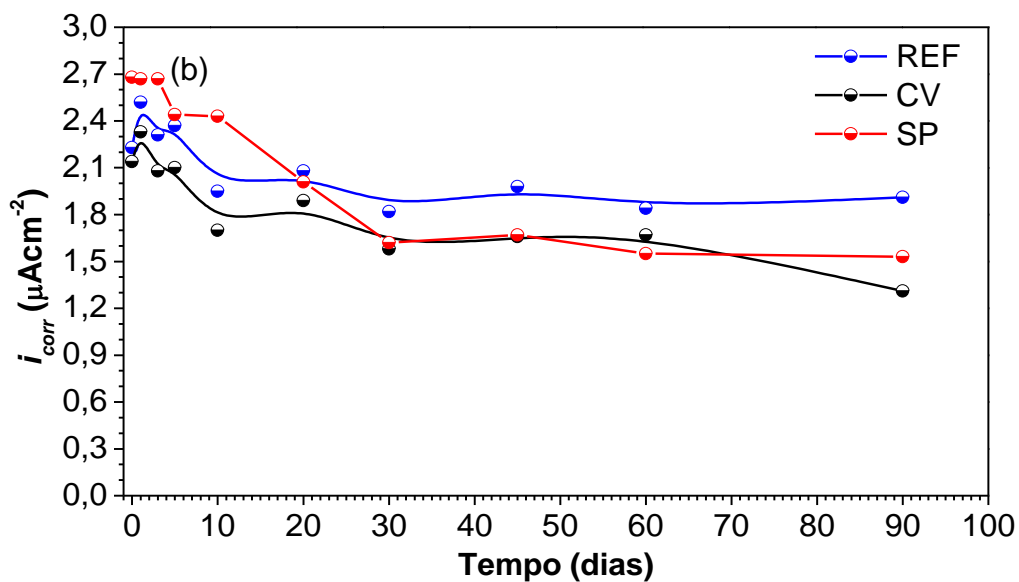
Fonte: Autora (2020)

Para facilitar a análise destes resultados, a seguir, nas Figuras 47 (a-e), são mostrados perfis da variação dos parâmetros E_{corr} , i_{corr} , taxa de corrosão, R_p e EI (%) em função do tempo.

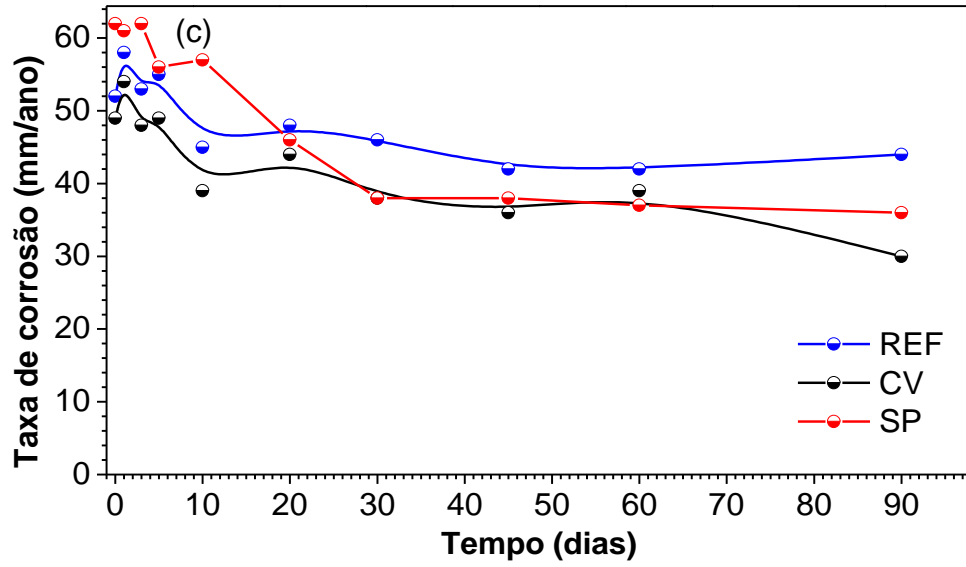
Figura 47 – Evolução do (a) E_{corr} ; (b) i_{corr} ; (c) taxa de corrosão; (d) R_p e (e) EI (%) das argamassas armadas, com e sem as adições, medidas em solução de 5% de Na_2SO_4 , a 25°C em meio aerado para os tempos de 0 a 90 dias.



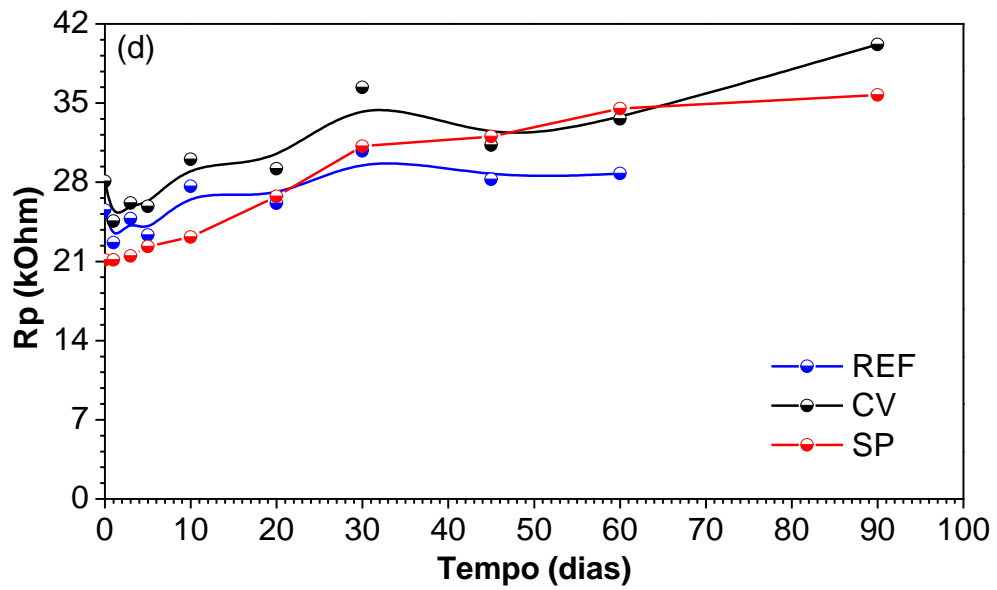
Fonte: Autora (2020)



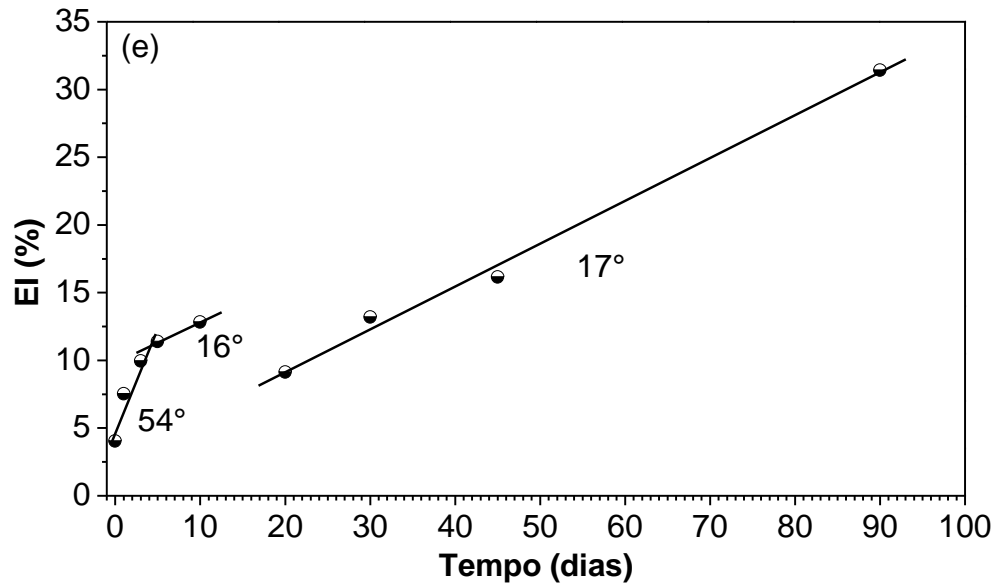
Fonte: Autora (2020)



Fonte: Autora (2020)



Fonte: Autora (2020)

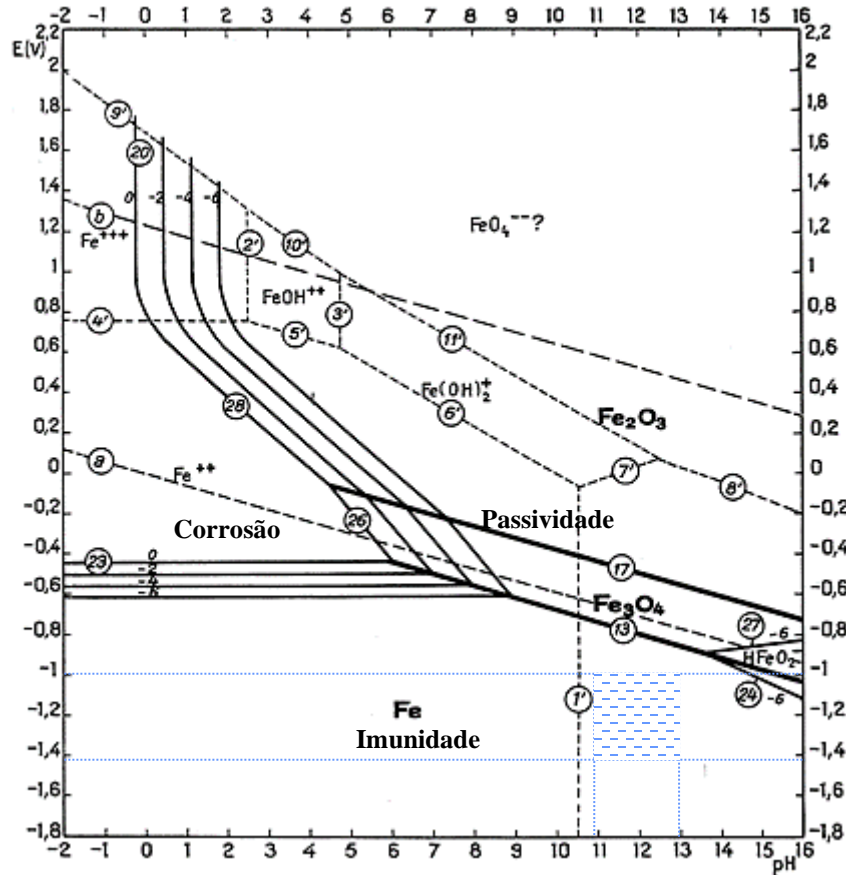


Fonte: Autora (2020)

As variações foram maiores até 20 dias e, a partir de 30 dias, houve tendência à estabilidade. Isso é evidenciado pela mudança da inclinação das curvas.

Relacionando-se o pH da argamassa, que varia de 11 a 13, com os E_{corr} , medidos durante 90 dias, da ordem de -1500 a -1000 mV, no Diagrama de Pourbaix, constatou-se que a armadura está na região de imunidade, indicado pela região hachurada na Figura 48 (GENTIL 2011).

Figura 48 – Diagrama de Pourbaix para o sistema ferro/água a 25°C



Fonte: Adaptado de Gentil (2011)

O estado de “imunidade” demonstrado supõe que a armadura não corrói, a não ser que se alterem as condições termodinâmicas para isso. Contudo, analisando-se os valores da i_{corr} calculados, que relaciona a expectativa de corrosão numa abordagem mais ampla, pressupõe-se uma tendência à corrosão.

Conforme os critérios de Andrade e Alonso (1995), pode-se considerar que a armadura está passivada, nas situações em que $i_{corr} < 0,1 \mu\text{A cm}^{-2}$, valores medidos para argamassa com adição de CV a partir de 30 dias, ou então com baixa corrosão, onde $0,1 < i_{corr} < 0,5 \mu\text{A cm}^{-2}$.

A R_p é menor conforme o avanço da despassivação do metal, ou seja, quanto maior o R_p menor será a corrosão do material metálico neste caso, após 90 dias a $R_{p,cv}$ foi maior e assim nessa condição a taxa de corrosão foi menor. Com o tempo as taxas de corrosão diminuem para todas as condições.

É importante ressaltar que nos tempos de 20 e 60 dias, para a argamassa com adição de CV, houve um aumento da i_{corr} e, conseqüentemente, decaimento da EI (%) possivelmente relacionado à medição eletroquímica ter sido realizada logo após a substituição do eletrólito de Na_2SO_4 . Neste caso, considerando-se que a difusão ocorre predominantemente pelos poros da argamassa e ainda, que a porosidade não é uniforme possivelmente houve um desequilíbrio difusional devido ao gradiente de concentração entre a da solução contida nos poros, principalmente próximo à interface aço argamassa. Este efeito é relacionado por alguns autores (SAMSON; MARSHAND; SNYDER, 2003; BUENFELD *et al.*, 1998) à tortuosidade do material (Figura 49), representando o intrincado percurso que os íons e o eletrólito têm que percorrer nos poros refinados pela adição de CV.

Figura 49 – Desenho esquemático da tortuosidade em meio poroso



Fonte: Autora (2020)

O SP tem atuação na reação catódica, dessa forma poderia ser classificado como inibidor de corrosão catódica, contudo, a EI (%) atribuída à adição de SP foi observada somente após 20 dias, antes disso a eficiência foi “negativa” o que corresponde a um aumento na taxa de corrosão. Tal comportamento não é incomum de se verificar para sistemas contendo inibidores de corrosão, mas isso indica que um estudo minucioso do efeito da concentração de inibidor é fundamental para avaliar o efeito sobre a taxa de corrosão (TREVISOL, 2017).

E ainda, sabe-se que a eficiência dos inibidores catódicos em matrizes cimentícias armadas é razoavelmente baixa quando comparado aos inibidores anódicos, como a CV, por isso, são não muito utilizados (MOREIRA, 2015). Além disso, no caso particular deste trabalho, a adição de SP causou efeitos adversos sobre as propriedades mecânicas do

material, por essas razões não se considerou esse material como inibidor de corrosão para estruturas armadas.

Büchler *apud* Böhni, 2005; Gaidis, 2004 não consideram inibidores de corrosão as substâncias que diminuem a taxa de corrosão atuando no mecanismo de transporte dos agentes agressivos, como, por exemplo, os minerais. Neste trabalho não se adotou esse conceito e sim a proposta pela ISO (International Organization for Standardization) que considera inibidor de corrosão qualquer (grifo nosso) substância química que pode prevenir ou diminuir a taxa, ou velocidade, de corrosão, quando presente em certa concentração em um sistema corrosivo, sem mudar, significativamente, a concentração de qualquer outro agente corrosivo ou alterar as propriedades (BROWN, 1999).

Como foi evidenciado que a adição de 6% de CV diminui a taxa de corrosão em todos os tempos analisados e também contribuiu para as propriedades mecânicas da argamassa, dessa forma, neste trabalho considerou-se somente a adição de 6% de CV para o cálculo da EI (%) e observou-se que a EI (%) é crescente com o tempo. Contudo, analisando-se a variação da inclinação das retas por períodos de tempo, percebe-se que de 0 a 5 dias a taxa de aumento da EI (%) é mais evidenciada com inclinação de 50°, a partir de 10 dias, a taxa tende ao crescimento mais estável, inclinação da reta de 16-17°.

Sabe-se que na prática, para experimentos eletroquímicos medidos em concreto, um maior tempo de medida seria esperado. Contudo, durante a realização deste trabalho ocorreu a pandemia do COVID-19 impossibilitando o acesso aos laboratórios da Universidade e conseqüentemente, realizar as medidas em um tempo maior.

4.12 Determinação da resistência do concreto (R_{bulk}) e da condutividade efetiva (σ_{ef}) a partir da EIE

Nas Figuras 50 e 51 são mostrados os Diagramas de Nyquist e de Bode medidos nas argamassas nos tempos de 0 e 90 dias. Nos Diagramas de Nyquist indicou-se a frequência a qual obteve-se o valor de R_{bulk} (impedância imaginária mínima) e no Diagrama do Bode, $\log |Z|$ versus $\log f$, indicou-se o R_{bulk} . Nas Figuras, inseriu-se uma representação do ângulo de 45° para demonstrar que, apesar de haver uma região linear em baixa frequência, esta não pode ser associada a um elemento difusivo de Warburg. Esta confirmação é evidenciada nos Diagramas de Bode.

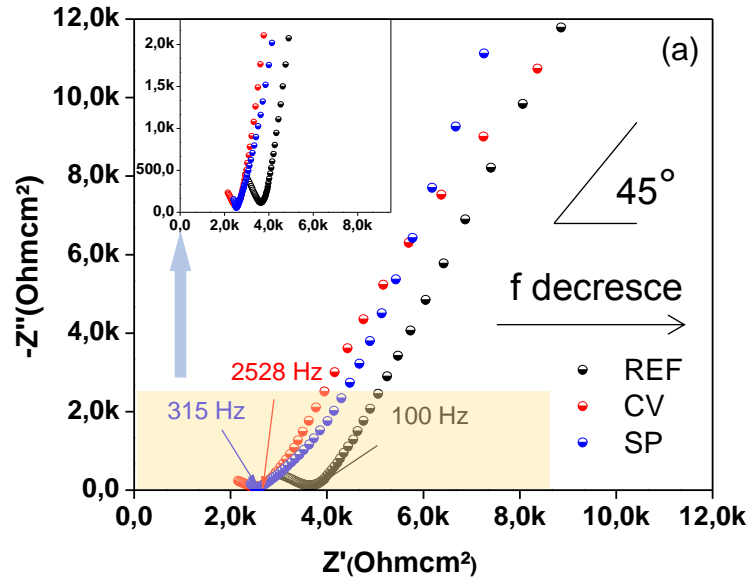
A seguir, na Figura 52 (a-j) são mostrados todos os espectros medidos, neste caso somente os diagramas de Nyquist. Agrupou-se no mesmo gráfico às medidas referentes argamassas contendo as adições de 6% e a de referência.

Para facilitar a análise, plotou-se os eixos dos diagramas no mesmo intervalo, considerando-se o maior intervalo medido.

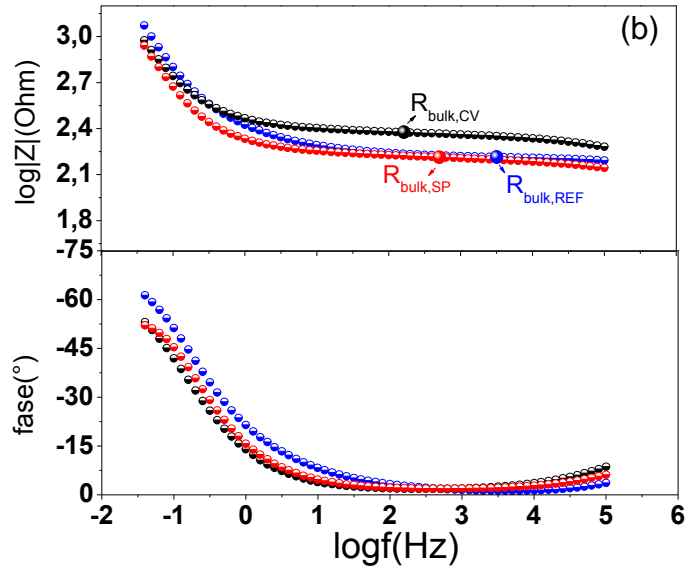
De modo geral, os três tipos de argamassa reagiram de forma similar no ambiente corrosivo. Observa-se que o ponto mínimo de Z'' , ou R_{bulk} , não acontece na mesma frequência (Hz) e que se desloca em Z' , sendo uma função do tipo de aditivo e do tempo de imersão.

Percebe-se também que a partir de 3 dias, há uma propensão à formação de dois semi-círculos, típicos de sistemas aço-argamassa (HU *et al.*, 2019; Gerengi, 2013; Uchoa 2007; Montemor, 2000; Ravikumar e Narayanan Neithalath, 2013). Conforme mencionado na revisão bibliográfica o arco de alta frequência é atribuído às propriedades do material cimentício (*bulk*) enquanto o arco de baixa frequência ao aço (eletrodo). Nos Diagramas de Nyquist, em algumas medidas, principalmente na argamassa com adição de CV, nota-se a presença de um *plateau*, entre os arcos de alta e de baixa frequência, conforme Hu *et al.* (2019), isso ocorre devido a mudanças na resposta elétrica induzidas pelo sistema. Verifica-se que a R_{bulk} diminui com o tempo de imersão para as argamassas de referência (568 Ohm cm²) e contendo adição de SP (31,18 Ohm cm²). Para argamassa contendo CV, R_{bulk} aumentou cerca de 226 Ohm cm², após 90 dias. Não há uma resposta proporcional da variação de R_{bulk} com o tempo considerando-se cada argamassa individualmente. A argamassa contendo CV manteve a R_{bulk} maior em relação às demais argamassas, demonstrando ser a argamassa mais resistente. Isso indica que a CV (material mesoporoso) influenciou, minimizando o transporte dos agentes agressivos.

Figura 50 – Espectros de impedância das argamassas armadas, com e sem as adições, medido no tempo inicial (0 dia) em solução de 5% de Na₂SO₄, a 25°C e meio aerado (a) Diagrama de Nyquist e (b) Diagrama de Bode.

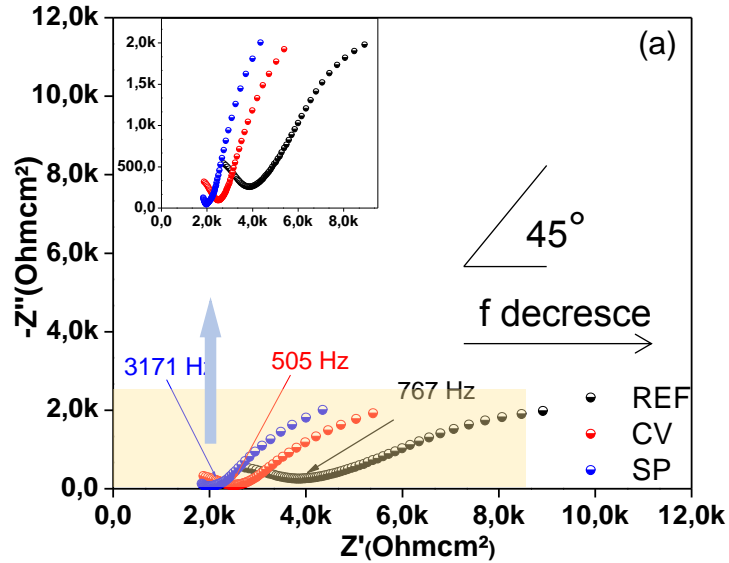


Fonte: Autora (2020)

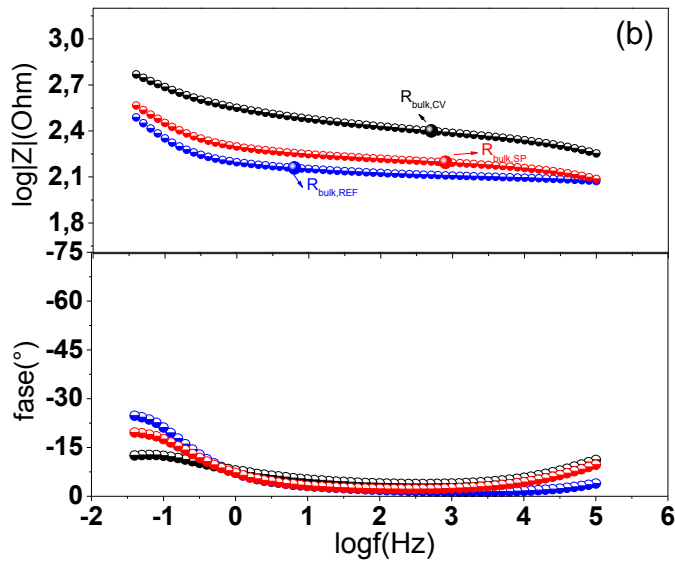


Fonte: Autora (2020)

Figura 51 – Espectros de impedância das argamassas armadas, com e sem as adições, medido após 90 dias em solução de 5% de Na_2SO_4 , a 25°C e meio aerado (a) Diagrama de Nyquist e (b) Diagrama de Bode.

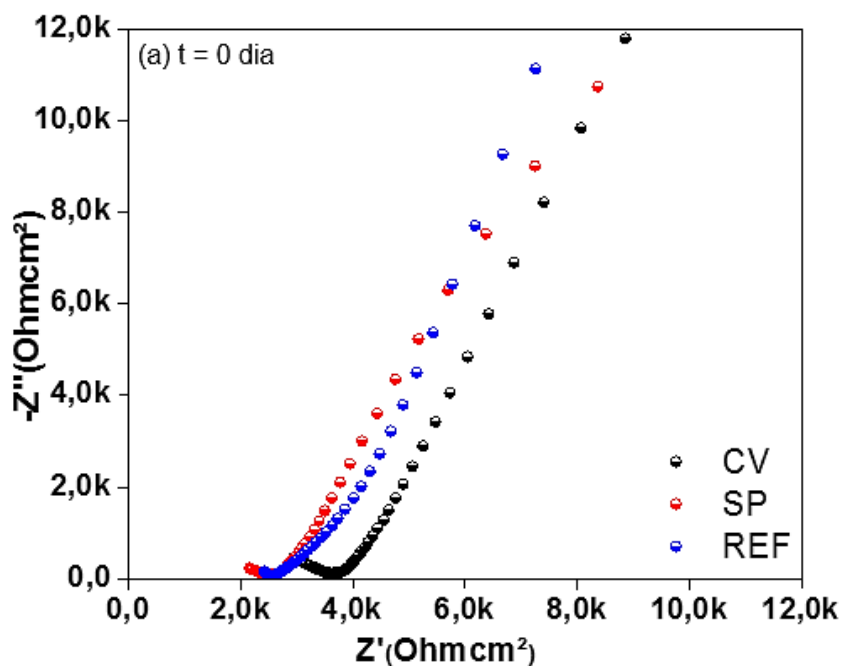


Fonte: Autora (2020)

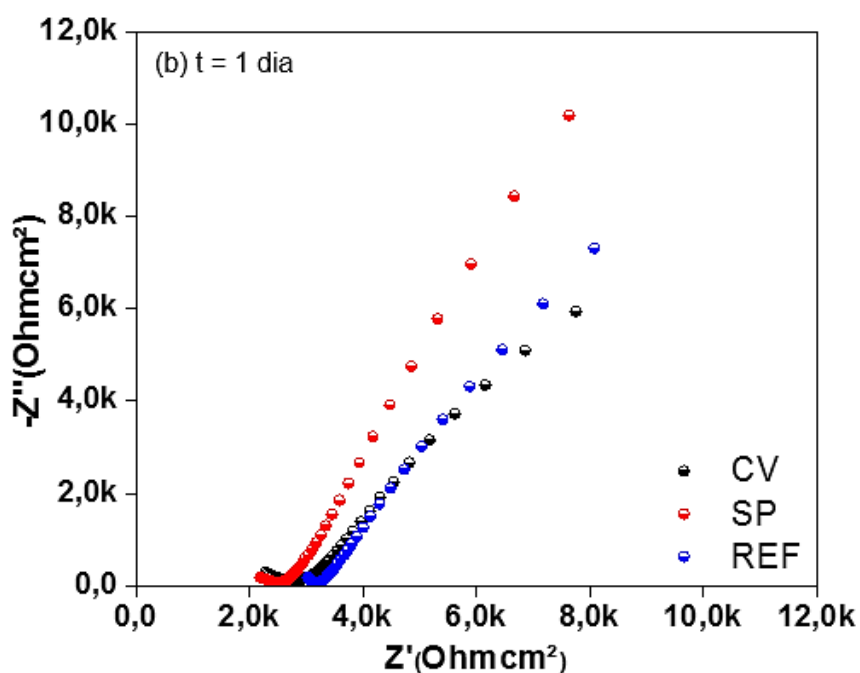


Fonte: Autora (2020)

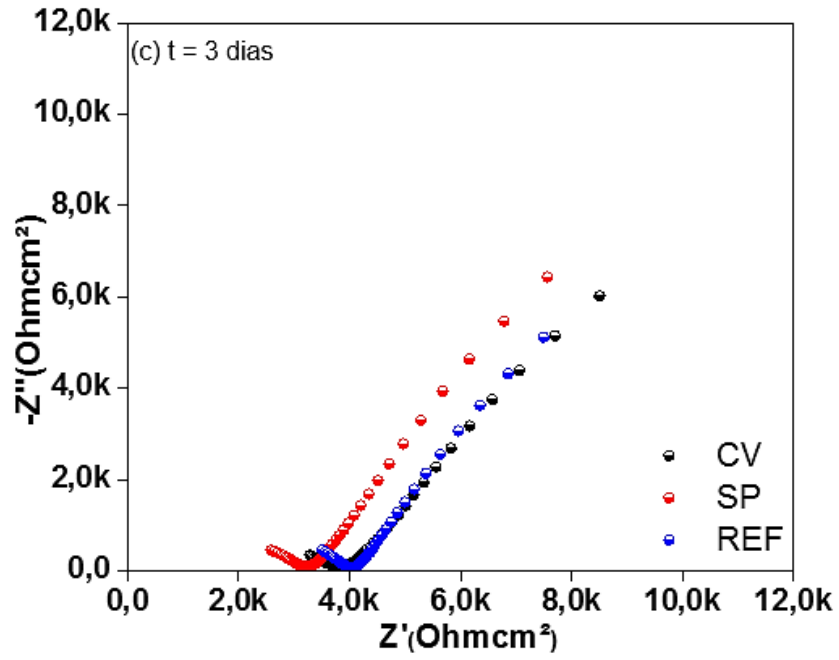
Figura 52 – Espectros de impedância, Diagramas de Nyquist, das argamassas armadas, com e sem as adições medidas em solução de 5% de Na_2SO_4 , a 25°C em meio aerado para os tempos de (a) 0 dia; (b) 1 dia; (c) 3 dias; (d) 5 dias; (e) 10 dias; (f) 20 dias; (g) 30 dias; (h) 45 dias; (i) 60 dias e (j) 90 dias.



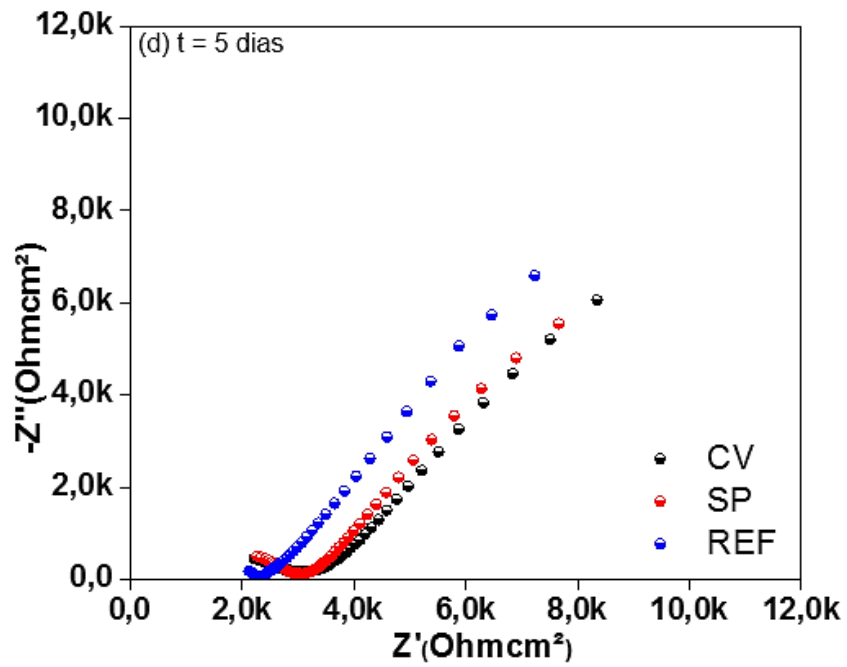
Fonte: Autora (2020)



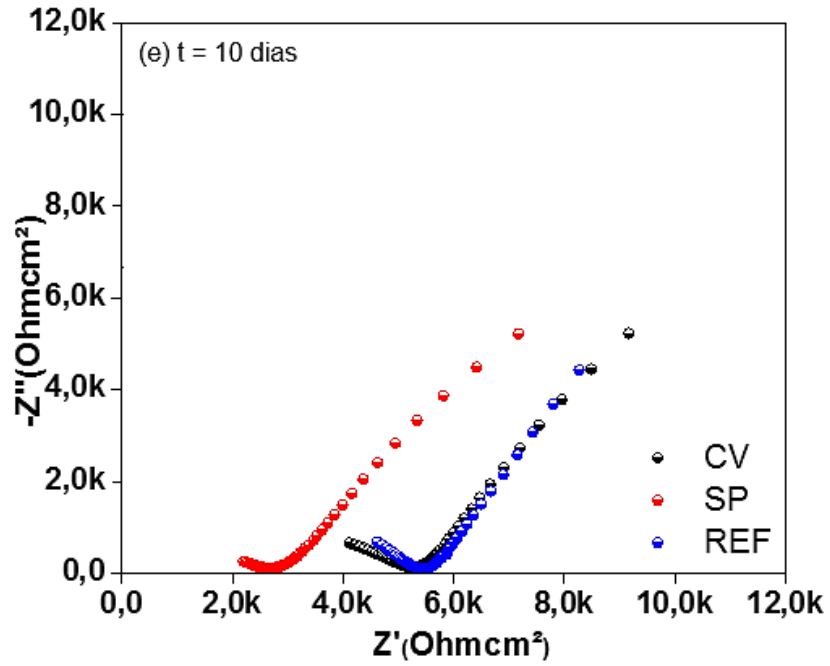
Fonte: Autora (2020)



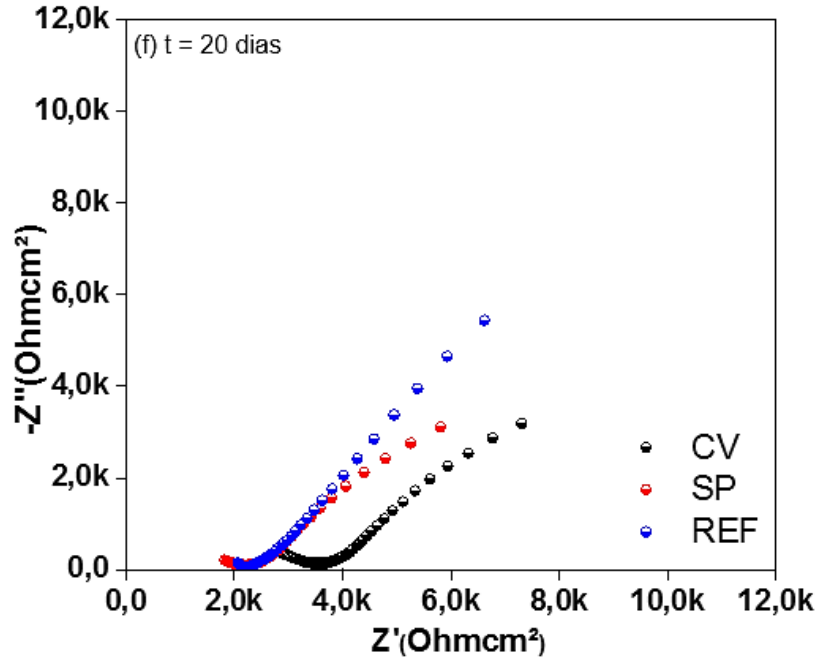
Fonte: Autora (2020)



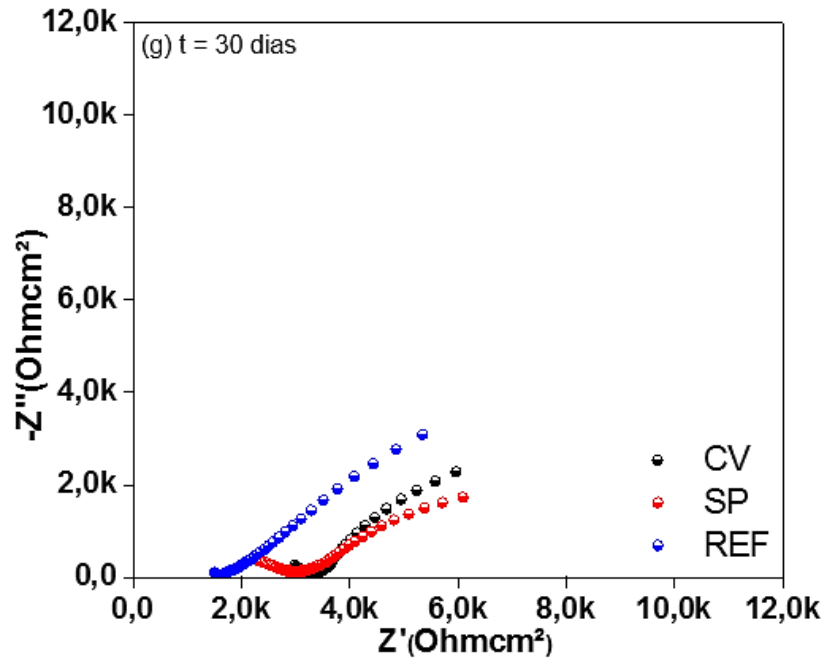
Fonte: Autora (2020)



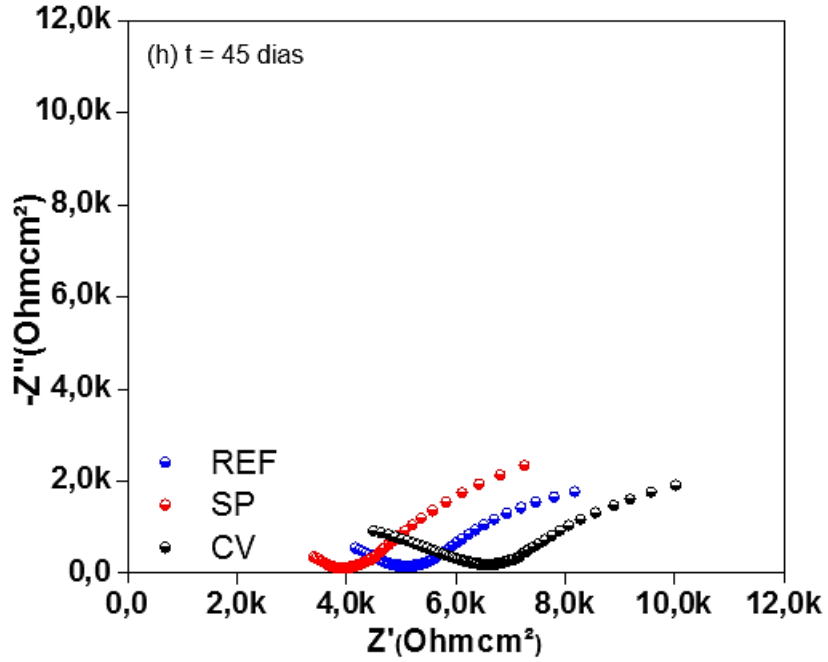
Fonte: Autora (2020)



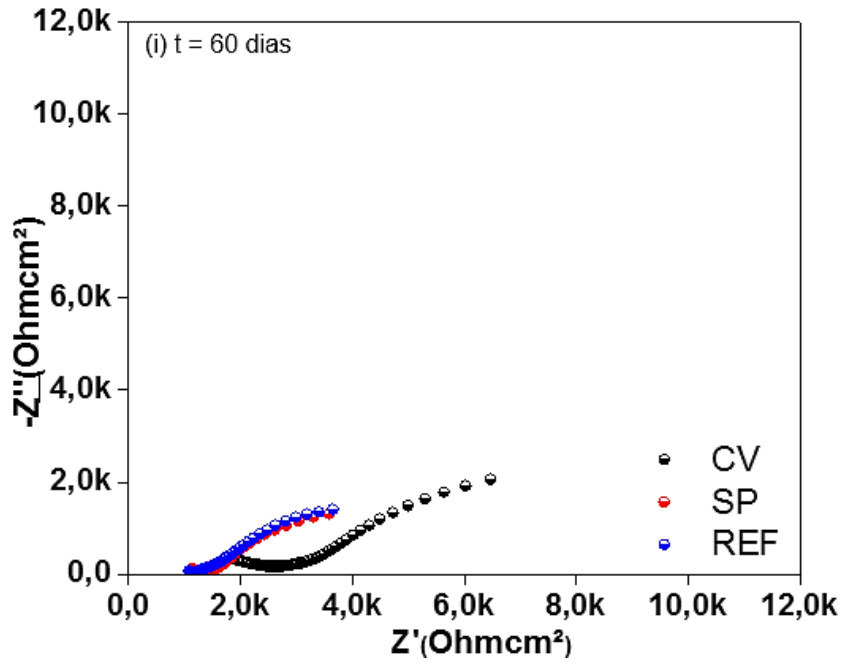
Fonte: Autora (2020)



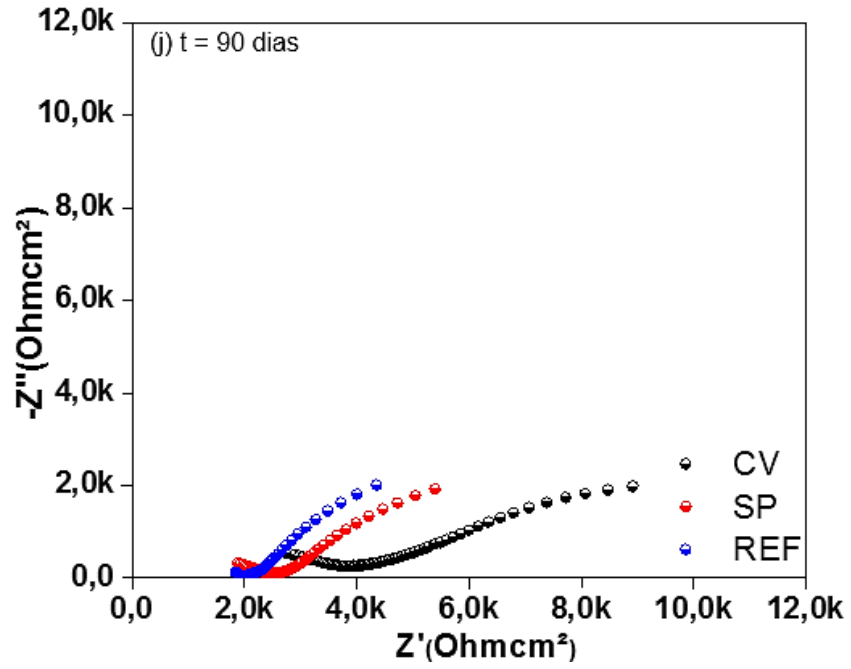
Fonte: Autora (2020)



Fonte: Autora (2020)



Fonte: Autora (2020)

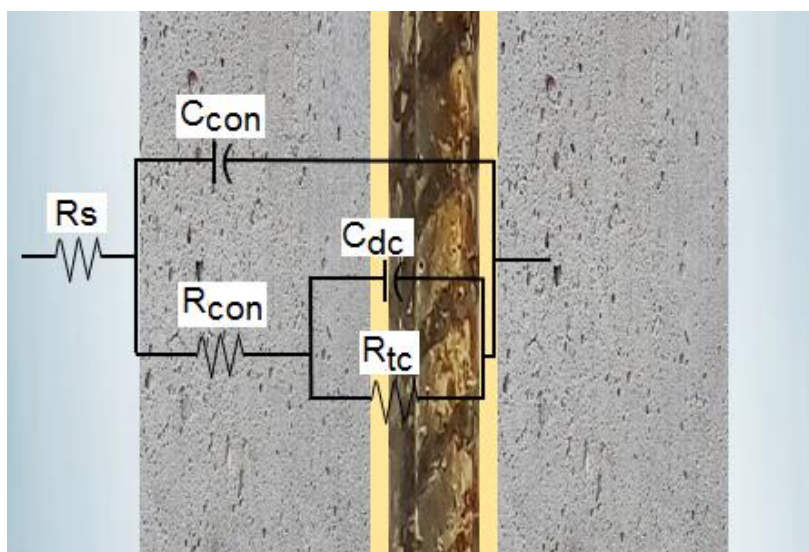


Fonte: Autora (2020)

A Figura 53 mostra o circuito equivalente representativo para o sistema estudado. Este circuito foi proposto por Gerengi *et al.* (2013), e foi validado pela simulação no *software* EchemAnalist da Gamry Instruments.

Os elementos do circuito consistem em três resistências e dois elementos capacitivos sendo R_s a resistência da solução contida nos poros da argamassa, R_{con} ($=R_{bulk}$) a resistência elétrica da argamassa e R_{tc} a resistência a transferência de cargas. C_{dc} e C_{con} representam a capacitância da dupla camada e da argamassa, respectivamente.

Figura 53 – Circuito elétrico equivalente proposto $R_s(C_{con}(R_{con}(C_{dc}R_{tc})))$



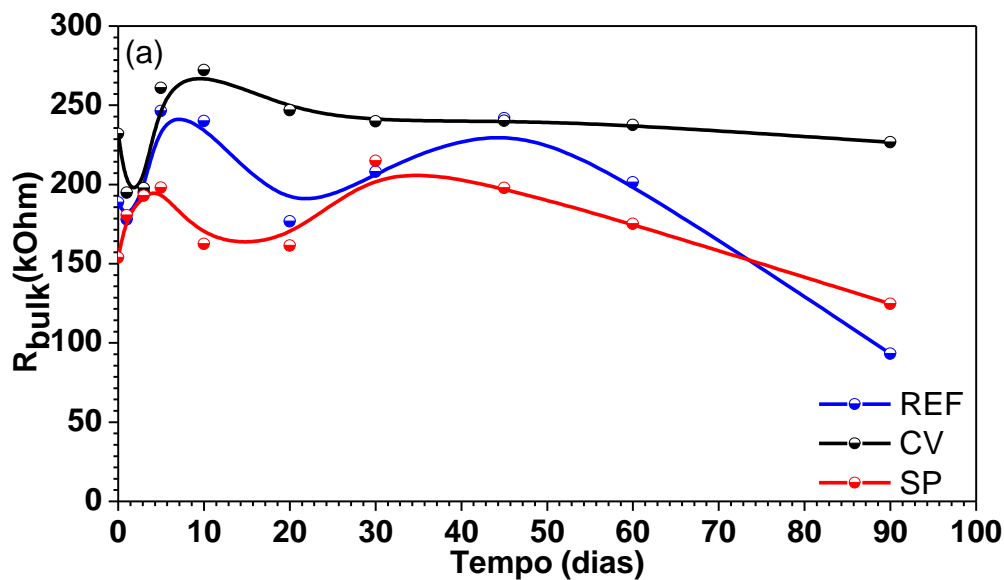
Fonte: Adaptado de Gerengi *et al.* (2013)

A Tabela 23 apresenta os valores das R_{bulk} , em Ohm, obtidos a partir dos diagramas de Nyquist, e das σ_{ef} , em $S\ cm^{-1}$, calculadas a partir da R_{bulk} . Estes resultados foram plotados e são mostrados na Figura 54.

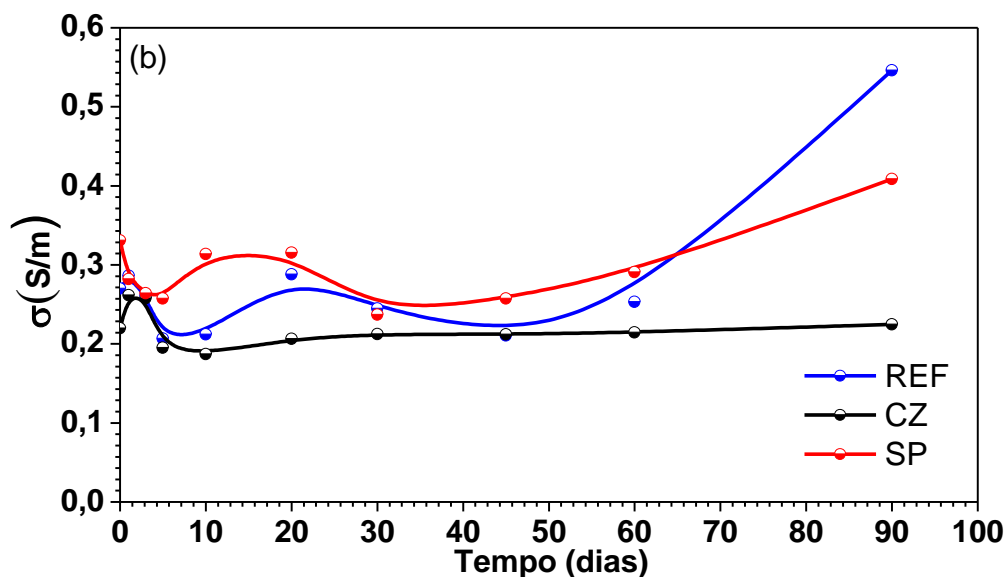
Tabela 23 – Variação da R_{bulk} e σ_{ef}

Tempo		REF	CZ	SP
0	R_{bulk} (Ohm)	188,67	231,88	153,90
	σ_{ef} (S/m)	0,270	0,220	0,331
1	R_{bulk} (Ohm)	177,99	194,77	180,60
	σ_{ef} (S/m)	0,286	0,262	0,282
3	R_{bulk} (Ohm)	194,95	197,70	192,98
	σ_{ef} (S/m)	0,261	0,258	0,264
5	R_{bulk} (Ohm)	246,40	260,88	197,92
	σ_{ef} (S/m)	0,207	0,195	0,257
10	R_{bulk} (Ohm)	240,11	272,29	162,45
	σ_{ef} (S/m)	0,212	0,187	0,314
20	R_{bulk} (Ohm)	176,79	246,88	161,43
	σ_{ef} (S/m)	0,288	0,206	0,316
30	R_{bulk} (Ohm)	207,97	239,927	214,94
	σ_{ef} (S/m)	0,245	0,212	0,237
45	R_{bulk} (Ohm)	240,23	241,71	197,78
	σ_{ef} (S/m)	0,212	0,211	0,258
60	R_{bulk} (Ohm)	201,31	237,62	175,15
	σ_{ef} (S/m)	0,253	0,214	0,291
90	R_{bulk} (Ohm)	93,24	226,73	124,67
	σ_{ef} (S/m)	0,546	0,225	0,409

Fonte: Autora (2020)

Figura 54 – (a) Resistência elétrica da argamassa (R_{bulk}) e (b) Condutividade efetiva (σ_{ef}) versus tempo.

Fonte: Autora (2020)



Fonte: Autora (2020)

De acordo com Østvik *et al.* (2006), Shi (2004) e Papadakis (2000), a R_{bulk} e consequentemente, a condutividade, do material cimentício saturado depende não apenas da estrutura de poros, mas também da composição química da solução dos poros.

Gilleece, Basheer e Long (1995), argumentam que, como a corrosão é um processo eletroquímico, que depende da movimentação iônica nos poros do concreto, a medida da condutividade fornece uma medida da facilidade ou da dificuldade de ocorrência deste processo corrosivo.

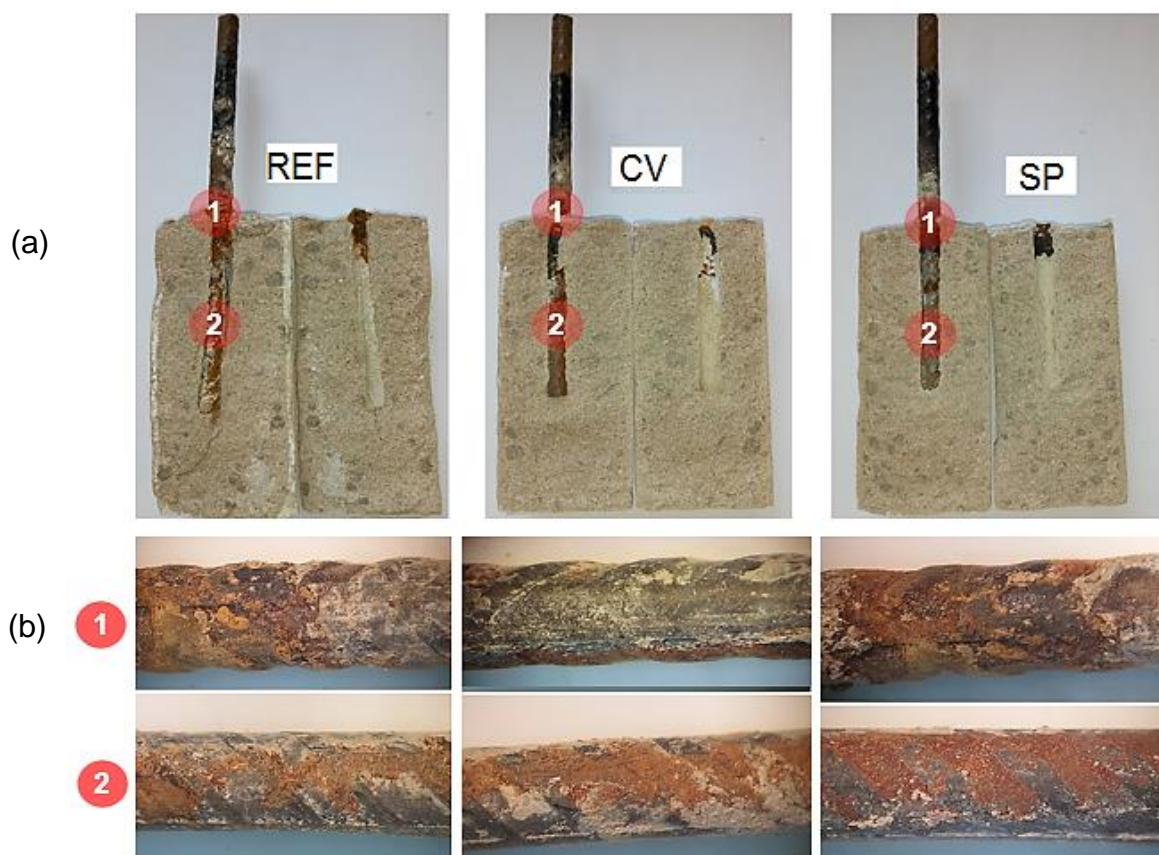
Sendo assim, o decaimento de R_{bulk} (ou aumento de σ_{ef}), mais evidenciado na argamassa de referência e contendo SP, indica que há maior tendência à dissolução anódica da barra nesses meios.

Devido à sua natureza, rica em sulfato de cálcio, o aditivo SP além de estar presente nas estruturas da pasta de cimento hidratado, pode migrar por meio da rede de poros até o interior alcançando a armadura com mais facilidade. A ação deletéria desencadeada pelo aditivo, aumenta a condutividade elétrica, além de acelerar o processo corrosivo e participar das reações formadoras dos produtos finais de corrosão (SANTOS, 2006).

4.13 Análise visual da corrosão e da variação diametral das barras e composição dos produtos de corrosão

Na Figura 55, são mostradas as imagens dos corpos de prova rompidos ainda com as barras embutidas (59a) e somente das barras (55b). Para todas as condições, destacam-se os pontos (1) apresentando corrosão por aeração diferencial na barra na interface exposta/embutida e (2) corrosão na extensão da barra. Pode-se observar a formação de produtos de corrosão marrom-alaranjados na armadura de aço. Além disso, houve perda de espessura na seção transversal resultando na perda de aderência entre o aço e a argamassa.

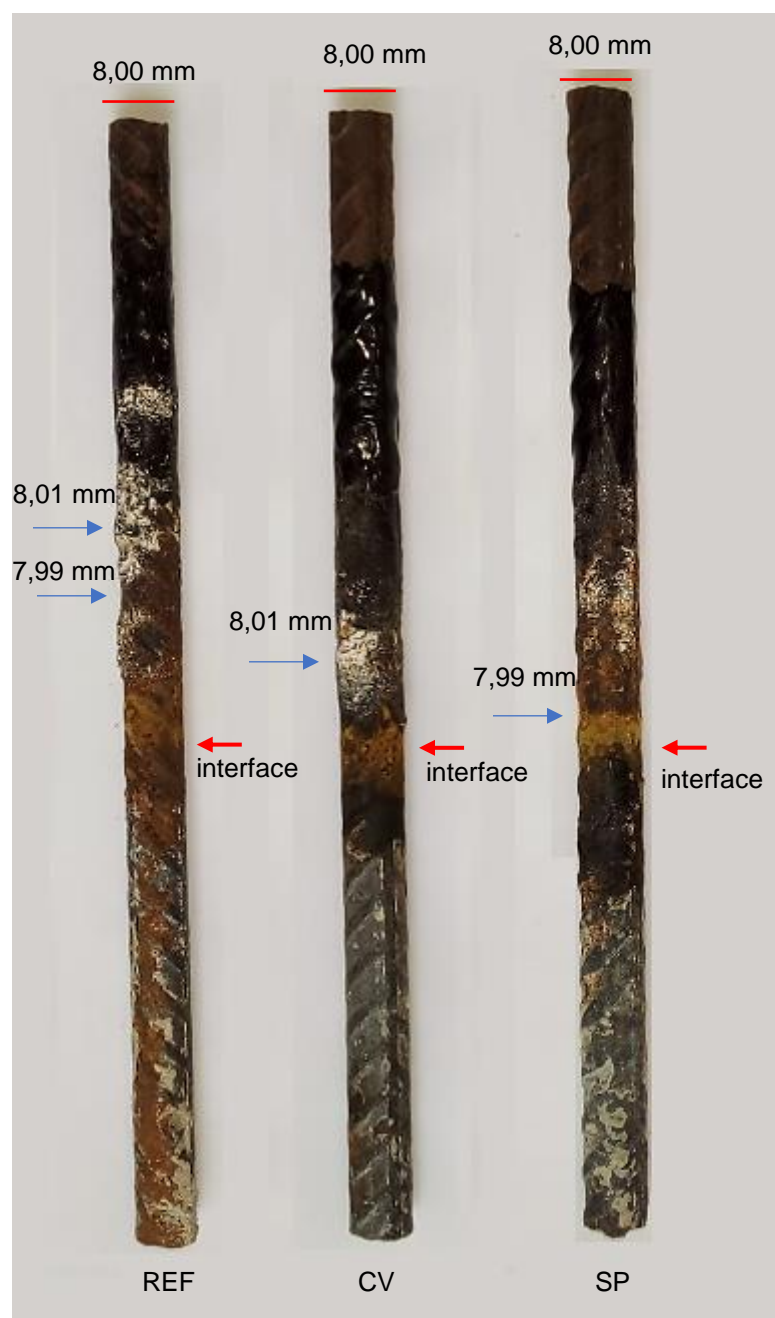
Figura 55 – Imagens de lupa estereoscópica a) das argamassas e b) das barras. Destacam-se os pontos (1) da interface exposta/embutida e (2) corrosão na extensão da barra



Fonte: Autora (2020)

Na Figura 56 são comparadas as variações do diâmetro das barras de aço em seções com perda de espessura e com incrustação sendo (7a) REF; (7b) CV e (7c) SP.

Figura 56 – Variações do diâmetro das barras de aços embutidas nas a) REF; b) CV e c) SP

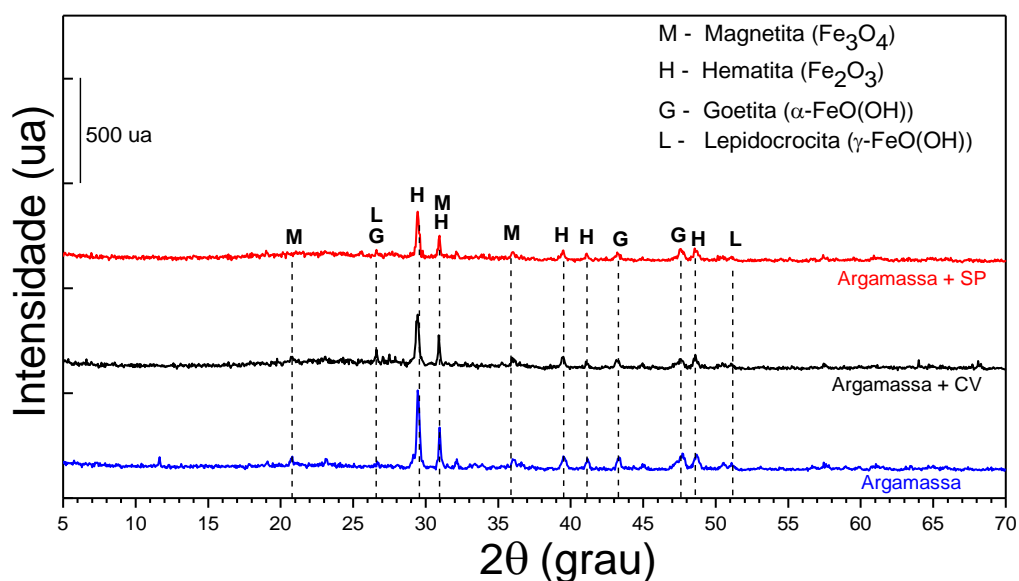


Fonte: Autora (2020)

Observa-se que o processo corrosivo como a incrustação quanto a perda de espessura diametral foi mais significativa na argamassa de referência, possivelmente devido a maior condutividade efetiva deste meio demonstrada anteriormente. Dessa forma, pode-se estabelecer que a natureza da estrutura dos poros, modificada pelos aditivos, influencia na durabilidade das argamassas, isto é, os dois aditivos podem aumentar a vida útil de estruturas de concreto armado sendo que com CV os resultados são mais evidentes.

Nos difratogramas dos produtos de corrosão, foram identificados picos característicos de magnetita, hematita, goetita e lepidocrocita, sendo o mais intenso de hematita em $2\theta = 29,46^\circ$ como mostra a Figura 57. Os resultados foram comparados com padrões da literatura (VIEIRA, *et al.*, 2007; EDWARDS *et al.*, 2001; RAMAN *et al.*, 1998).

Figura 57 – Espectro de DRX dos produtos de corrosão



Fonte: Autora (2020)

4.14 Estimativa da quantificação de emissões de CO₂

Quantificação de emissões de CO₂ do cimento Portland descrito por Stachera (2008)

O método de quantificação de emissões de CO₂ proposto na pesquisa desse autor foi baseado em resultados obtidos das pesquisas científicas de Cybis e Santos, 2000; Cruz *et al.*, 2003; Institut Wallon Vito, 2001; Isaia; Gastaldini, 2004.

A relação para o cálculo entre os pesquisadores em que Stachera (2008) se baseou, é expresso na Tabela 24.

Tabela 24 – Resultados das pesquisas sobre emissões de CO₂ durante a produção de cimento Portland na construção de uma casa de 40m²

Pesquisadores	t _{CO2} de cimento Portland	t _{CO2} (média/casa com 40m ²)	t _{CO2} (média/m ²)
Cybis e Santos (2000)	780	2.664	66,6
Cruz <i>et al.</i> (2003)	2.360		
Inst. Wallon Vito (2001)	2.942		
Isaia e Gastaldini (2004)	4.576		

Fonte: Adaptado de Stachera (2008)

Ao substituir 6% do cimento utilizado por CV, o valor de emissão de CO₂ é reduzido para 2.504,16 t_{CO2}, ou seja, há uma redução de 159, 84 t_{CO2} emitidos e a média de t_{CO2} por m² de área construída é reduzido para 62,60.

Quantificação de emissões de CO₂ do cimento Portland descrito por Costa (2012)

$$\text{Emissões } MT_{,j} = QT_j \times FP_j \times FEP_j$$

O consumo de cimento Portland (QT_j) em toneladas para construção de uma casa popular com até 40 m² é de aproximadamente 2,75 ou 55 sacos de 50 kg.

O fator de perda de cimento (FP) na aplicação durante a obra é de 1,95 (adimensional), obtido a partir de dados sobre as perdas de materiais nos canteiros de obra no Brasil, conforme descrito por Agopyan *et al.* (1998) *apud* Costa (2012).

O fator de emissão do setor cimentício (FEP) em (t_{CO2}/tcimento) é de 0,652 conforme (SESSA, 2013).

De acordo com a Equação supracitada do Método QE-CO₂, a emissão de CO₂ do cimento na construção de uma casa popular com até 40 m² é de aproximadamente 3.496 t CO₂. Quando se substitui 6% do cimento utilizado por CV, este valor é reduzido para 3.286,24 tCO₂, isto é, há uma redução de 209,76 tCO₂ emitidos.

Os resultados demonstram que a substituição do cimento Portland por 6% de CV pode gerar redução dos patamares de emissões de CO₂, evidenciando a possibilidade de utilização da CV na construção civil.

5 CONCLUSÃO

Quanto aos objetivos propostos conclui-se que:

- A CV tem diâmetro médio de 42,19 μm , área superficial específica de 28,4 m^2g^{-1} e tamanho de poro de 38 Å sendo considerado material mesoporoso. O SP tem diâmetro médio de 17,8 μm e área superficial específica 18,20 m^2g^{-1} .
- Por DRX e Espectroscopia Raman, identificou-se na CV picos de quartzo (SiO_2), mulita ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$) e hematita (Fe_2O_3) com um percentual de amorfismo de 65,09% (cristalinidade de 34,91%). O SP apresentando um padrão de difração característico de material cristalino, com cristalinidade percentual de 59,63%. Composto por sulfato de cálcio (CaSO_4), na forma de gipsita.
- Nos pós de argamassa analisados após 200 dias, foram detectados picos de alita (A), belita (B), calcita (C), etringita (E), portlandita (P) e quartzo (Q). Na argamassa contendo SP os picos de etringita foram ligeiramente mais intensos, em consequência da composição deste material rico em sulfato de cálcio (gipsita).
- Nas imagens de MEV, na CV pode-se observar um aglomerado de partículas esféricas com superfície lisa e, em menor quantidade, partículas contendo algumas microporosidades. No SP as partículas são aglomeradas com dimensão variada e distribuições heterogêneas.
- Em relação ao ensaio de resistência a compressão: (29,29 MPa_{CV} , 27,28 MPa_{REF} e 22,32 MPa_{SP}) e absorção de água por capilaridade (0,528 $\text{g}/\text{cm}^2_{\text{CV}}$, 0,631 $\text{g}/\text{cm}^2_{\text{REF}}$ e 0,718 $\text{g}/\text{cm}^2_{\text{SP}}$). A argamassa contendo CV teve melhor desempenho nos ensaios mecânicos. A adição de 6% de CV diminui a velocidade de corrosão da armadura. Até 20 dias houve mais variação de E_{corr} , i_{corr} , taxa de corrosão e R_p e, a partir de 30 dias, houve tendência à estabilidade.
- A partir de 30 a armadura embutida na argamassa com CV está passiva.
- Somente a CV foi considerada como inibidor de corrosão, pois contribuiu também para as propriedades mecânicas.
- A EI (%) devido a CV é crescente com o tempo. Após 90 dias a eficiência foi de 31,42%.

- Observa-se que o processo corrosivo, a incrustação e a perda de espessura foram mais significativas na barra embutida na argamassa de referência.
- Os produtos de corrosão são compostos por óxidos de ferro: magnetita, hematita, goetita e lepdocricita.
- A adição de 6% de CV reduz a emissão de 209,76 tCO₂.
- Tanto a melhoria das propriedades mecânicas quanto a diminuição da corrosão atribuída à adição de 6% de CV está relacionada ao refinamento dos poros da matriz cimentícia.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) C1012/C1012M-12. **Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution**, ASTM International, West Conshohocken, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **A versatilidade do cimento brasileiro**. São Paulo, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7480**: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16072**: Argamassa impermeável: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimentos Portland resistentes a sulfatos: Especificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos: Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos. Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica: Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos. Determinação da absorção de água por capilaridade, índice de vazios e massa específica: Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18**: Agregados — Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 11-2:** Cimento Portland - Análise química - Método optativo para determinação de óxidos principais por complexometria. Parte 2: Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 15:** Cimento Portland - Análise química - Determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 13:** Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23:** Cimento Portland - Análise química - Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 76:** Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 μm (n° 200) - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579:** Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 43:** Cimento portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 65:** Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11582:** Cimento Portland - Determinação da expansibilidade de Le Chatelier - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ABRÃO, P. C. R. A. **O uso de pozolanas como materiais cimentícios suplementares:** disponibilidade, reatividade, demanda de água e indicadores ambientais. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo – USP, 2019. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-26032019-084557/publico/PedroCesarRodriguesAlvesAbraoCorr19.pdf>. Acesso em: 06 set. 2020.

ABREU, E. M. X. *et al.* Análise microestrutural de gessos cerâmicos utilizados na fabricação de estampos para indústria de louças sanitárias. *In:* CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS, 5, Natal, RN, 2002. **Anais** [...]. Natal, RN, 2002. Disponível em: https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbecimat/2002/arqs_pdf/pdf_100/tc101-010.pdf. Acesso em: 15 jul. 2020.

AGUILAR, A.; SAGUÉS, A. A.; POWERS R. G. Corrosion Measurements of Reinforcing Steel in Partially Submerged Concrete Slabs. **Corrosion Rates of Steel in Concrete**. 1. ed. N. Berke, V. Chaker, and D. Whiting (West Conshohocken, PA: ASTM International, 1990), 66-85. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/STP25016S> Acesso em: 05 ago. 2020.

ALMEIDA, B. G.; KANGUSSÚ, G.; HUGO, A. R.; BRAIDA, J. A.; MOREIRA, J. H.; REICHERT, J. M.; BEZERRA, L. O. **Padronização de métodos para análise granulométrica no Brasil**. Embrapa Solos-Comunicado Técnico. INFOTECA-E, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/4681/4934.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 06 ago. 2020.

ALMEIDA, F. C. R. **Avaliação do potencial de corrosão de armadura de concreto com substituição parcial do agregado miúdo pela areia de cinza do bagaço da cana de açúcar**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/4681/4934.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 01 dez. 2020.

ALTHEMAN, D., FERREIRA, G., MONTINI, M., GALLO, J., ROCHA, A. Avaliação de Cinza volante de carvão mineral em matrizes cimentícias. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**. 1320-1337, 2017. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1983-41952017000601320&script=sci_arttext&lng=pt. Acesso em: 15 ago. 2020.

ARANTES, J. P. **Avaliação do efeito da composição mineralógica do estéril e rejeito de minérios sulfetados na geração de DAM aplicando a técnica de difração de raios x associada ao método Rietveld**. Dissertação de mestrado. CEFET – MG, 2014. Disponível em: <https://www.slideshare.net/JudsonArantes/dissertao-de-mestrado-final>. Acesso em: 10 ago. 2020.

ANDRADE, C.; L. SOLER; ALONSO, C.; NÓVOA, X. R.; KEDDAM, M. The importance of geometrical considerations in the measurement of steel corrosion in concrete by means of AC impedance. **Corrosion Science** v. 37 2130-2023, 1995. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0010938X95000952>. Acesso em: 01 out. 2020.

BASTOS, P. S. S. **Fundamentos do concreto armado**: Estruturas de concreto I. Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus de Bauru/SP Faculdade de engenharia Departamento de Engenharia Civil, 2019. Disponível em: <https://www.pbastos.feb.unesp.br/pbastos/concreto1/Fundamentos%20CA.pdf>. Acesso em: 10 out. 2020.

BAUER, E.; POZZAN, E. Avaliação da Corrosão das Armaduras por Efeito de Cloretos em Materiais de Reparo/Reforço à Base Sílica Ativa. *In*: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE O COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS DANIFICADAS. 2, Rio de Janeiro, 2000. **Anais** [...]. Niterói: [s.n], 2000, CD-ROM.

BOHNI, H. **Corrosion in reinforced concrete structures**. Cambridge: Woodhead. Bookman, 2016. Disponível em: <https://pdf-drive.com/pdf/A.20Bohni20-20Corrosion20in20reinforced20concrete20structures2028200529.pdf>. Acesso em: 02 jul. 2020.

BRANDÃO, P. R. G. **Métodos de Instrumentação e Análise**. Notas de aula. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007. Disponível em: <https://ppgem.eng.ufmg.br/defesas/1252M.PDF>. Acesso em: 09 dez. 2020.

BOSTANCI, S. C. **Coal ash use as a cement replacement in concrete production**. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. 800(), 012010-. doi:10.1088/1757-899x/800/1/012010. 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/341492219_Coal_ash_use_as_a_cement_replacement_in_concrete_production. Acesso em: 03 jan. 2020.

BROWN, M. C. **Assessment of commercial corrosion inhibiting admixtures for reinforced concrete**. Dissertação de Mestrado - Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 1999. Disponível em: <https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/36386/MCBrownThesis.pdf?sequence=1>. Acesso em: 16 jul. 2020.

BUENFIELD, N. R. **Chloride transport in concrete subjected to electrical field**. *Journal of Materials in Civil Engineering*. v. 10, n. 4, 1998. Disponível em: <https://trid.trb.org/view/542664>. Acesso em: 10 set. 2020.

BURGIO, L. R. J. H. Library of FT Raman spectra of pigments, minerals, pigment media and varnishes, and supplement to existing library of Raman spectra of pigments with visible excitation. **Spectrochimica Acta Part A**, 57, pp. 1491-1521, 2010. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11446703/>. Acesso em: 20 ago. 2020.

CABRAL, S. C.; AZEVEDO, M. A. Materiais alternativos para adição ao cimento Portland. *Revista Vozes dos Vales*. **Revista Vozes dos Vales: Publicações Acadêmicas** Reg.: 120.2.095 – 2011 – UFVJM ISSN: 2238-6424. 2016. Disponível em: <http://site.ufvjm.edu.br/revistamultidisciplinar/files/2016/09/Stenio23.pdf>. Acesso em: 05 dez. 2020.

CAILLAHUA, M. C. **Avaliação Técnica para Uso do Gesso FGD como Aditivo Retardador do Tempo de Pega em Cimento Portland**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos. Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/1121775_2013_pretextual.pdf. Acesso em: 12 jul. 2020.

CANUL, J. A.; MORENO, E. I.; MENDOZA, J. M. Efecto de la ceniza volante en las propiedades mecánicas de concretos hechos con agregado calizo triturado de alta absorción. **Revista ALCONPAT 6.3** p 235-247, 2016. Disponível em: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-68352016000300235&script=sci_arttext&tlng=es. Acesso em: 10 mar. 2020.

CAROLINO, A. S. **Estimativa do percentual de cristalinidade de polímeros semicristalinos derivados da anilina através dos padrões de difração de Raios-x**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2017. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/bitstream/tede/5624/5/Disserta%c3%a7%c3%a3o%20-%20Adriano%20S.%20Carolino.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2020.

CARVALHO, W. C. **Gerenciamento sustentável das cinzas da combustão de carvão mineral: um estudo de caso de uma termoeletrica em São Luís-MA**. Dissertação de Mestrado. São Luís do Maranhão, 2017. Disponível em: <https://tedebc.ufma.br/jspui/bitstream/tede/1740/2/WelkisonCarvalho.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2020.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto**. 2ª Ed. Goiânia: PINI e UFG, 1997.

CASTRO, T. F. C. **Manutenção em estruturas de concreto armado baseado no conceito de manutenção centrada em confiabilidade**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica - USP, São Paulo, 2016. Disponível em: <http://poliintegra.poli.usp.br/library/pdfs/3da1ec3bd8051e3993d1a450952005e1.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2020.

CECHELLA, I. G.; GASTALDINI, L. G. Concrete sustainability with very high amount of fly ash and slag. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, 2009. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-41952009000300003. Acesso em: 18 fev. 2020.

CEZAR, D. S. **Características de Durabilidade de Concretos com Cinzas Volante e Cinza de Casca de Arroz com e sem Beneficiamento**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Centro de Tecnologia. Santa Maria, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7759/CEZAR%2c%20DAIANA%20DE%20SOUZA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 17 ago. 2020.

CHOTOLI, F. F.; GARCIA, E. M. CABRAL, J. V., QUARCIONI, A. Evaluation of the pozzolanic activity of heavy clay ceramic waste from main ceramic clusters of S. Paulo State. **Revista Cerâmica** vol.61 no.358 São Paulo Apr. 2015. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132015000200251.

Acesso em: 20 jul. 2020.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 436** - Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anteriores a 02 de janeiro de 2007. CONAMA, Brasil. 2011. Disponível em: https://www.normasbrasil.com.br/norma/resolucao-436-2011_114141.html. Acesso em: 15 out. 2020.

CORDEIRO, L. N. C. **Análise da variação do índice de amorfismo da cinza de casca de arroz sobre a atividade pozolânica**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS - Porto Alegre, 2009. Disponível em: https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/17032/000709056.pdf?sequence=1&i_sAllowed=y. Acesso em: 20 jun. 2020.

COSTA, A.B. **Potencial Pozolânico Da Cinza Volante Como Material De Substituição Parcial De Cimento**. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da UNIVATES, 2015. Disponível em: <https://www.univates.br/bdu/handle/10737/911>. Acesso em: 10 out. 2020.

COUTO, J. A. S.; CARMINATTI, R. L.; NUNES, R. R. A.; MOURA, R. C. A. **O concreto como material de construção. Caderno De Graduação - Ciências Exatas E Tecnológicas**. Dissertação de Mestrado. UNIT – SERGIPE. 2013. Disponível em: <https://periodicos.set.edu.br/cadernoexatas/article/view/552/566>. Acesso em: 10 out. 2020.

COSTA, B. L. C. **Quantificação das emissões de CO₂ geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil**. Dissertação de Mestrado. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ – Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe_m/BrunoLuisDeCarvalhoDaCosta.pdf. Acesso em: 04 nov. 2020.

CRUZ, A.B.S., ROSA, L.P., FERREIRA, T.L., MARTINEZ, A.C.P., Centro de energia e tecnologias sustentáveis: O uso eficiente de energia no planejamento do ambiente construído. **Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais** - COPPE/UFRJ, 2003. Disponível em: <http://www.ivig.coppe.ufrj.br/pbr/docs.htm>. Acesso em: 05 jan. 2020.

CYBIS, L. F., SANTOS, C.V.J. Análise do ciclo de vida aplicada à indústria da construção civil - estudo de caso. *In: XXVII Congresso interamericano de Engenharia Sanitária e ambiental*. Porto Alegre, 2005. **Anais** [...] Porto Alegre – RS, 2005. Disponível em: <http://www.ingenieroambiental.com/info/ciclodevida.pdf>. Acesso em: 05 nov. 2020.

DEVORE, J. L. **Probabilidade e estatística para engenharia e ciências**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2006.

DIAS, Y. R. *et al.* Caracterização prévia das cinzas volantes, coproduto da gaseificação do carvão mineral de Candiota-RS. *In: SALÃO INTERNACIONAL DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO*. Bagé, 2016. **Anais** [...] Bagé – RS, 2016. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69131999000600004&script=sci_abstract&lng=pt. Acesso em: 07 out. 2020.

DÍAZ, B. *et al.* Chloride transport through cementitious membranes using pulsed current. **Cement and Concrete Composites**. v. 39, p. 18-22, 2013. Disponível em: <https://hal.sorbonne-universite.fr/hal-00831477/document>. Acesso em: 15 out. 2020.

DONG, Z. H; Shi, W.; Zhang, G. A.; Guo, X. P. The role of inhibitors on the repassivation of pitting corrosion of carbon steel in synthetic carbonated concrete pore solution. **Electrochimica Acta**. 56(17), 5890–5897. doi:10.1016/j.electacta.2011.04.120., 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S001346861100692X>. Acesso em: 22 set. 2020.

DOTTO, J. M. R. **Corrosão do aço induzida por íons cloreto**: Uma análise crítica das técnicas eletroquímicas aplicadas ao sistema aço-concreto com ou sem pozolana. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS – Porto Alegre, 2006. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/7524/000546847.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 23 nov. 2020.

ESTEVES, AMOS, I. C.; HINO, J. R. J. RÉUS, G. C.; MEDEIROS, M. H. F. Influência do consumo de cimento na dosagem do concreto sobre a formação da película passivadora do aço. **Revista Técnico-Científica** 1, nº. 12, 2018. Disponível em: <http://creaprw16.crea-pr.org.br/revista/Sistema/index.php/revista/article/view/418/251>. Acesso em: 12 fev. 2020.

EDWARDS, H. G. M. *et. al.* Raman Spectroscopic Study of 3000-year-old Human Skeletal Remains from a Sambaqui. **Raman Spectroscopy**, v.32, p.17-21, 2001.

FERREIRA, M. M. C. RAMBO, M. K. D. Determination of cellulose crystallinity of banana residues using near infrared spectroscopy and multivariate analysis. **Journal of the Brazilian Chemical Society**. 26:1491–1499, 2015. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-50532015000701491&script=sci_abstract. Acesso em: 19 mar. 2020.

FERRET, L.S. **Zeólitas de cinzas de carvão**: Síntese e uso. Tese de doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS - Porto Alegre, 2004. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/6643/000444348.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 10 nov. 2020.

FRAGA, Y. S. B.; ALBUQUERQUE, C. M. M. Efeitos de adições minerais para mitigação de reações álcali-agregado no concreto: estado da arte. **Engineering Sciences** 5, no. 1 p 1-13, 2017. Disponível em: <https://sustenere.co/index.php/engineeringsciences/article/view/SPC2318-3055.2017.001.0001>. Acesso em: 24 out. 2020.

G Aidis, J. M. Chemistry of corrosion inhibitors. *Cement and Concrete Composites*. **Chemistry of corrosion inhibitors**. 26(3), 181–189. doi:10.1016/s0958-9465(03)00037-4. 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946503000374>. Acesso em: 20 jan. 2020.

GILLEECE, P.R.V.; BASHEER, P. A.M.; LONG, A.E. Non-steady state chloride transport in modified concretes. *In: 1st RILEM WORKSHOP ON CHLORIDE PENETRATION INTO CONCRETE, 1995, ST RÉMY LÈS CHEVREUSE, FRANCE. RILEM, 1995. Anais [...]. Rilem, 1995.* Disponível em: <https://www.rilem.net/publication/publication/7>. Acesso em: 11 ago. 2020.

GEMELLI, E. **Corrosão de Materiais Metálicos e Sua Caracterização**. Rio de Janeiro: Editora LTC - Livros Técnicos e Científicos Editores S.A., 2001.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 6. Ed. LTC: Rio de Janeiro, 2011.

GERENGI, H. *et al.* **Electrochemical investigations on the corrosion behaviour of reinforcing steel in diatomite-and zeolite-containing concrete exposed to sulphuric acid**. *Construction and Building Materials* 49. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061813007630>. Acesso em: 10 ago. 2020.

GOBBO, L. A. **Aplicação da difração de raios-X e método de Rietveld no estudo de cimento Portland**. Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44137/tde-23072009-144653/publico/LAG.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2020.

GONÇALVES, J. P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos**. Dissertação de Mestrado. Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/1676/000305830.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 06 set. 2020.

HELENE, P. R. do L. La Agressividad del Médico y la Durabilidad del Hormigón. *Hormigón, Revista AATH*, n. 10, p. 25-35, 1983. Disponível em: https://www.alconpat.org/imagenes/docs_personajes/Paulo%20Roberto%20do%20Lago%20Helene/Paulo%20Roberto%20do%20Lago%20Helene.pdf. Acesso em: 14 out. 2020.

HOPPE, F. J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-19082008-172648/publico/TESE_DOUTORADO_JUAREZ_HOPPE_FILHO.pdf. Acesso em: 22 nov. 2020.

HOPPE, F. J.; SOUZA, D. J.; MEDEIROS, M. H. F.; PEREIRA, E. PORTELLA, K. F. Concrete attack by sodium sulfate: Mineral additions as a mitigation tool. **Revista Cerâmica** 61, no. 358, 2015. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69132015000200168&script=sci_abstract. Acesso em: 30 jun. 2020.

HU, X.; CAIJUN S.; XIAOJIN, L.; JAKE Z.; GEERT, S. A review on microstructural characterization of cement-based materials by AC impedance spectroscopy. **Cement and Concrete Composites**, 1–14. doi:10.1016/j.cemconcomp.2019.03.018. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946518304529>. Acesso em: 10 out. 2020.

JIANG, L; LIU, R.; Xu, J.; Xiong, C.; Song, Z. Influence of carbonation on chloride-induced reinforcement corrosion in simulated concrete pore solutions. **Construction and Building Materials**. 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095173817303136>. Acesso em: 10 fev.2020.

JUNG, S. H.; SARASWATHY, V.; KARTHICK, S.; KATHIRVEL, P.; KNOW, S. J. Microstructure characteristics of fly ash concrete with rice husk ash and lime stone powder. **International Journal of Concrete Structures and Materials** 12, no. 1. 1-9, 2018. Disponível em: <https://ijcsm.springeropen.com/articles/10.1186/s40069-018-0257-4>. Acesso em: 10 out. 2020.

KARI, O. P., PUTTONEN J.; SKANTZ, E. Reactive transport modelling of long-term carbonation. **Cement and Concrete Composites**. **Materials Characterization**, 52:42–53. .59, pp. 290-300, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946514000808>. Acesso em: 10 fev. 2020.

KEDDAM, M. *et al.* Impedance measurements on cement paste. **Cement and Concrete Research**. V. 27, Issue 8, August 1997, Pages 1191-1201(8), 1191–1201. doi:10.1016/s0008-8846(97)00117-8. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884697001178>. Acesso em: 10 dez. 2020.

KÖLIÖ, A., PAKKALA, T. A., HOHTI, H., LAUKKARINEN, A., LAHDENSIVU, J., MATTILA, J., PENTTI, M. The corrosion rate in reinforced concrete facades exposed to outdoor environment. **Materials and Structures**. 50:1-16, 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-016-0920-7>. Acesso em: 19 out. 2020.

LACERDA, L. V. **Síntese e caracterização de zeólita tipo sodalita obtida a partir de cinzas volantes de carvão mineral utilizado na usina termoeétrica de Candiota-RS.** Dissertação de Mestrado em Engenharia - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/135356/000989043.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 08 nov. 2020

LEDESMA, R. B. **Cinzas volantes e zeólitas sintéticas na composição da pasta de cimento classe G e degradação por CO₂ em condições de armazenamento geológico de carbono.** Dissertação de Mestrado. PUC-RS. 2018. Disponível em: <http://tede2.pucrs.br/tede2/handle/tede/8027>. Acesso em: 14 out. 2020.

LESSARD, J. M.; AITCIN, P. C. The composition and design of high-strength concrete and ultrahigh-strength concrete. **Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete.** pp. 171-192, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081026168000083>. Acesso em: 23 dez. 2020.

LI, J. *et al.* Potential utilization of FGD gypsum and fly ash from a Chinese power plant for manufacturing fire-resistant panels. **Construction and building materials.** v. 95, p. 910-921, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061815302051>. Acesso em: 09 out. 2020.

LIMA, E. M. *et al.* Quantificação de CO₂ emitido decorrente dos materiais empregados na construção de uma residência unifamiliar. *In*: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 75., Maceió, 2018. **Anais [...].** Maceió – AL. 2018. Disponível em: https://www.confea.org.br/sites/default/files/antigos/contecc2018/civil/171_qdceddmencduru.pdf. Acesso em: 15 maio. 2020.

LOPES, T. B. **Comparação da microestrutura do concreto auto adensável com o concreto convencional.** Dissertação de Mestrado. UNICAMP, 2016. Disponível em: http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/320825/1/Lopes_TaisBiazao_M.pdf. Acesso em: 01 out. 2020.

LUQUE, M., OLAYA, J. J. **Estudio comparativo del proceso de corrosión en recubrimientos cerámicos, metálicos y orgánicos mediante técnicas electroquímicas.** Dissertação de Mestrado Universidad Nacional de Colombia 146, 2010. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/11053282.pdf>. Acesso em: 04 set. 2020.

MARCELINO, A. P. B. **Estudos para o desenvolvimento de uma metodologia de definição de teores deletérios de enxofre em concretos e argamassas de barragens.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. p. 107, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/PASA-A79FXG/1/285.pdf>. Acesso em: 01 mar. 2020.

MARQUES, CAVALCANTE, G. *et al.* Utilização de Técnica Eletroquímica na Caracterização do Biodiesel. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA em iniciação científica*, São Paulo, 2009. **Anais [...]**. São Paulo, 2009. Disponível em:

<http://ppgeq.propesp.ufpa.br/ARQUIVOS/dissertacoes/Gabriela%20Cavalcante%20Marques.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2020.

MEDEIROS, G. A. N. **Avaliação de paredes sanduíche em argamassa armada com núcleo de EPS**. Trabalho de Conclusão de Curso. UFPA, 2017. Disponível em: <http://ct.ufpb.br/ccec/contents/documentos/tccs/2017.1/avaliacao-de-paredes-sanduiche-em-argamassa-armada-com-nucleo-de-eps.pdf>. Acesso em 09 ago. 2020.

MARTINS, C. H.; ALTOÉ, S. P. S. Avaliação da utilização da cinza de bagaço de cana-de-açúcar na confecção de blocos de concreto para pavimentação. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**. v. 8, p. 39-54, 2015. Disponível em: <https://periodicos.unicesumar.edu.br/index.php/rama/article/view/3102/2540>. Acesso em: 23 ago. 2020.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MELLO, V.; PACHECO, F.; TUTIKIAN, B. F. Técnicas e Metodologias de Biomineralização na Cicatrização de Fissuras do Concreto. **Revista de Arquitetura IMED**. 2019. Disponível em: <https://seer.imed.edu.br/index.php/argimed/article/view/3679/2506>. Acesso em: 17 out. 2020.

MELO, R. L. **Eletrodeposição, caracterização e estudo de corrosão de camadas de Ni-Mo-P**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará. Centro de Ciências, 2009. Disponível em: http://www.pgquim.ufc.br/wp-content/uploads/2011/11/DISSERTA%C3%87%C3%83O_Regis-Lopes-Melo_2009.pdf. Acesso em: 14 out. 2020.

MELO, S. K. *et al.* **Estudo da formação da etringita tardia em concreto por calor de hidratação do cimento**. Dissertação de Mestrado. 2010. Disponível em: <https://repositorio.bc.ufg.br/tede/bitstream/tede/4464/5/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20-%20Sandra%20Kurotuschi%20de%20Melo%20-%202010%20-%20%281%29.pdf>. Acesso em: 19 ago. 2020.

MENNUCI, M. M. **Avaliação da potencialidade de aditivos como inibidores de corrosão do aço carbono CA-50 usado como armadura de estruturas de concreto**. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Marina%20Martins%20Mennucci_M.pdf. Acesso em: 09 set. 2020.

MIRANDA, E. C. Estudo sobre o histórico da argamassa armada. *In*: CONGRESSO DE INOVAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO INSTITUTO FEDERAL DE SÃO PAULO, 2016. **Anais** [...]. São Paulo, 2016. Disponível em: <http://mto.ifsp.edu.br/images/CPI/Anais/IC/2188.pdf>. Acesso em: 04 out. 2020.

MOREIRA, A. R. **Corrosão e Proteção**. Edição nº 55 de Fevereiro/Março de 2015. ISSN 0100-1485. ABRACO, 2015.

MONTEMOR, M. F.; SIMOES, 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. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946500000032>. Acesso em: 04 out. 2020.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. São Paulo: Bookman, 2016.

NGUYEN, T. T. H., BARY, B., De LARRARD, T. Coupled carbonation-rust formation damage modeling and simulation of steel corrosion in 3D mesoscale reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**. 74:95-107, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884615001143>. Acesso em: 19 jul. 2020.

OLIVEIRA, A. R. B. de. **Estudo eletroquímico da corrosão de aço revestido com a liga Al₉₀S₁₀**. Dissertação de Mestrado em química - Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto, 2012. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/143391599.pdf>. Acesso em: 09 dez. 2020.

OLIVEIRA, H. G. D. **Uma discussão sobre a corrosão do aço induzida por íons cloreto e carbonatação em estruturas de concreto armado** (Bachelor's thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná), 2019. Disponível em: http://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/12221/2/LD_COEMA_2019_2_9.pdf. Acesso em: 07 out. 2020.

PAIVA, H.; VELOSA, A.; CACHIM, P.; FERREIRA, V. M. Effect of pozzolans with different physical and chemical characteristics on concrete properties. **Materiales de Construcción**. Requisitos. Rio de Janeiro, 2014. 6p. v. 66, n. 322, p. 1-12, 2016. Disponível em: <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/view/1987>. Acesso em: 10 set. 2020.

PAPADAKIS, V. G. Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress. **Cement and Concrete Research**. v. 30, n.2, p. 291-299, 2000. Disponível em: <http://users.csa.upatras.gr/~vgpapa/files/VGPpaper17.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2020.

PEREIRA, M. F. **Estudo sobre os tipos de cimento comercializados em Campo Mourão**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012. Disponível em:

http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/1864/1/CM_COMAC_2012_1_06.pdf

. Acesso em: 09 out. 2020.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas a produção de cimento composto e/ou pozolânico**. Dissertação de Mestrado UFRGS, 2016. Disponível em:

<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/7733/000554896.pdf?sequence=1>.

Acesso em: 30 set. 2020.

PRADO, J. M.; RODIGUES, L. M.; da SILVA, S. N. Caracterização do subproduto da FGD (Flue gas Desulfurization) da combustão do carvão. *In: SALÃO INTERNACIONAL DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO*. Bagé, 2016. **Anais** [...]. Bagé, 2016. Disponível em:

<http://www2.bage.ifsul.edu.br/encif2015/pdf/20150930092321000000.pdf>. Acesso em:

17 set. 2020.

QIAN, S. Corrosion performance of reinforcing steel in concrete containing supplementary cementing materials. **Ontario: National Research Council** - 14(5), 371-326, Canada, 2003. Disponível em:

<https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/accepted/?id=73879711-a8c5-4ab6-a22e-80cd98919caa>.

Acesso em: 12 nov. 2020.

RAMAN, R. K. S.; GLEESON, B.; YOUNG, D. J. Laser Raman Spectroscopy: a technique for rapid characterization of oxide scale layers. **Materials Science and Technology**, 14(5), 373-376, 1998. Disponível em:

<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1179/mst.1998.14.5.373>. Acesso em: 19 set.

2020.

RAVIKUMAR, D. NEITHALATH, N. An electrical impedance investigation into the chloride ion transport resistance of alkali silicate powder activated slag concretes. **Cement and Concrete Composites**, 44, 2013. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946513001030>. Acesso em: 11

out. 2020.

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**, 8(4), 2015. Disponível em:

https://www.scielo.br/pdf/riem/v8n4/pt_1983-4195-riem-08-04-00529.pdf. Acesso em: 08

jul. 2020.

RIO GRANDE DO SUL. Fundação de Ciência e Tecnologia. Quantificação das cinzas de carvão fóssil produzidas no Brasil. **Boletim Técnico da CIENTEC**, 36. 2016. Disponível em:

http://www.cientec.rs.gov.br/upload/20160708140547boletim_tecnico_36.pdf.

Acesso em: 05 nov. 2020.

ROCHA, J. W da S. **Investigação das propriedades elétricas de petróleo por espectroscopia de impedância eletroquímica**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo, [s. l.], 2017. Disponível em: http://repositorio.ufes.br/jspui/bitstream/10/8442/1/tese_11060_Disserta%C3%A7%C3%A3o%20-%20John%20Rocha.pdf. Acesso em: 05 jul. 2020.

RODRIGUES, C. **Efeito da adição de cinza de casca de arroz no comportamento de compósitos cimentícios reforçados por polpa de bambu**. Dissertação de Mestrado - PUC-Rio, 2004. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/5002/5002_1.PDF. Acesso em: 15 nov. 2020.

SABEDOT, S.; SUNDSTRON, M. G.; BÖER, S. C., SAMPAIO, C. H.; DIAS, R. G. O.; RAMOS, C. G. Caracterização e aproveitamento de cinzas da combustão de carvão mineral geradas em usinas termelétricas. *In*: 3º CONGRESSO BRASILEIRO DE CARVÃO MINERAL. Gramado. 2011. **Anais** [...]. Gramado, 2011. Disponível em: https://www.ufrgs.br/rede-carvao/Sess%C3%B5es_B4_B5_B6/B6_ARTIGO_01.pdf. Acesso em: 03 nov. 2020.

SÁNCHEZ, I. *et al.* Microstructural modifications in Portland cement concrete due to forced ionic migration tests. Study by impedance spectroscopy. **Cement and concrete research**, v. 38, n. 7, p. 1015-1025, 2008. Disponível em: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-212ea920-c906-3ab2-b5a3-5697cf88f2d3>. Acesso em 11 dez. 2020.

SAMSON, E.; MARCHAND, J.; SNYDER, K. A. Calculation of ionic diffusion coefficients on the basics of migration test results. **Materials and Structures**, v. 36, n. 257, 156-165, 2003. Disponível em: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=860487. Acesso em 11 nov. 2020.

SANTANA, B. V. **Avaliação da absorção por capilaridade de argamassas para revestimento com diferentes aditivos impermeabilizantes**. Dissertação de Mestrado. Centro Universitário de Brasília – UNICEUB, 2017. Disponível em: <https://www.publicacoesacademicas.uniceub.br/pic/article/view/5493>. Acesso em: 14 dez. 2020.

SANTANA, R. A. de A. **Avaliação do uso dos subprodutos da dessulfurização semi-seca dos gases da combustão da termelétrica do Pecém como insumo para a construção civil**. Dissertação de Mestrado. 2018. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/38217>. Acesso em: 10 dez. 2020.

SANTOS, L. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto**, Dissertação de Mestrado. 2016. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/5188/1/dissertacao%20LOURDIMINE%20SANTOS.pdf>. Acesso em: 01 out. 2020.

SARAWATHY, V.; MURALDIDHARAN, S.; THANGAVEL, K.; SRINIVASAN, S. Influence of activated fly ash on corrosion-resistance and strength of concrete. **Cement and Concrete Composites**, v.25, p. 673-680, 2003. Disponível em: http://krc.cecri.res.in/ro_2003/11-2003.pdf. Acesso em: 01 dez. 2020.

SCHWARZ N., DUBOIS M., NEITHALATH N. Electrical conductivity based characterization of plain and coarse glass powder modified cement pastes. **Cement & Concrete Composites** 29, 2007. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12572-011-0023-1>. Acesso em: 01 jan. 2021.

SHI, C. Another look at the rapid chloride permeability test. **Cement & Concrete Composites** 2003. Disponível em: [https://www.semanticscholar.org/paper/ANOTHER-LOOK-AT-THE-RAPID-CHLORIDE-PERMEABILITY-\(-C-Shi/ddd80bfeffac199f2b416bb8d6d56b43236402e7](https://www.semanticscholar.org/paper/ANOTHER-LOOK-AT-THE-RAPID-CHLORIDE-PERMEABILITY-(-C-Shi/ddd80bfeffac199f2b416bb8d6d56b43236402e7). Acesso em: 05 dez. 2020.

SILVA, D. F. F. **Influência da cinza volante na pasta de cimento**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará – Belém, 2009. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/5653>. Acesso em 04 dez. 2020.

SILVA, L. M. **Introdução a análise de sistemas eletroquímicos no domínio da frequência**. Apostila, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri - PPGQ, 2013. Disponível em: <https://silo.tips/download/introducao-a-analise-de-sistemas-eletroquimicos-no-dominio-da-frequencia>. Acesso em 05 dez. 2020.

SILVA, S. N. **Estudo da corrosão no solo de aços para dutos protegidos catodicamente**. Dissertação de mestrado. UFRGS, Porto Alegre, 2007. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/12150/000622745.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 02 dez. 2020.

SILVA, F. G.; LIBÓRIO, J. B. L. A study of steel bar reinforcement corrosion with SF and SRH using Electrochemical Impedance Spectroscopy. **Materials Research**. v. 9, n. 2, 2006. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392006000200018. Acesso em: 02 dez. 2020.

SONG, G. Equivalent circuit model for AC electroscopy of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n.11, 2000. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884600004002#:~:text=An%20equivalent%20circuit%20model%20for,cement%20paste%20layers%20in%20the>. Acesso em: 01 dez. 2020.

STERN, M.; GEARY, M. A. L. Electrochemical Polarization. I. A Theoretical Analysis of the Shape of Polarization Curves. **Journal of the Electrochemical Society**, 104, 56-63, 1957. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.2428496/pdf>. Acesso em: 20 ago. 2020.

SUN, D., Xu, D., Yang, C. *et al.* Inhibition of Staphylococcus Aureus Biofilm by a Copper-Bearing 317L-Cu Stainless Steel and Its Corrosion Resistance. **Materials Science and Engineering**. v. 15. 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092849311630724X>. Acesso em 01 dez. 2020.

ØSTVIK, J-M. *et al.* Electrical resistivity of concrete Part I: frequency dependence at various moisture contents and temperatures. *In: 2nd INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCES IN CONCRETE THROUGH SCIENCE AND ENGINEERING*. Quebec, 2006. **Anais [...]**. Quebec, 2016. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/52082816.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2020.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 1. ed., London: Thomas Telford. Virtual Books, 1992. Disponível em: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/cc.25929>. Acesso em: 01 abr. 2020.

TEIXEIRA, V. G.; COUTINHO, F.; GOMES, A. S. Principais métodos de caracterização da porosidade de resinas à base de divinilbenzeno. **Química nova** 24.6, 2001. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422001000600019&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em: 25 mar. 2020.

TOLMASQUIM, M. T. Energia renovável: hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica. **Revista Escola de Minas**. v. 02, n°. 1 p. 10, 2016. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-172/Energia%20Renov%C3%A1vel%20-%20Online%2016maio2016.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2020.

TOMMASELLI, M. A. G.; KURI, S. E.; MARIANO, N. A. Espectroscopia de impedância para avaliar o efeito do molibdato de sódio incorporado no concreto. **Revista Escola de Minas**, v. 61, n. 3, p. 397-402, 2008. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0370-44672008000300020&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em: 17 fev. 2020.

TORRES, I. F. TIBÉRIO, A. Análise de risco da formação de etringita tardia em blocos de fundação na região metropolitana de Recife-PE-Brasil. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais** 9, no. 3. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2016. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1983-41952016000300357&script=sci_arttext&tlng=pt. Acesso em: 10 jan. 2020.

TREJO, D.; HALMEN, C.; REINSCHMIDT, K. Corrosion Performance Tests for Reinforcing Steel in Concrete: technical report. **Austin: Texas Transportation Institute**, 2009. Disponível em: <https://static.tti.tamu.edu/tti.tamu.edu/documents/0-4825-1.pdf>. Acesso em: 05 jun. 2020.

TREVISOL, C. A.; SILVA, P. R. P.; PAULA, M. M. S.; PELISSER, F. Avaliação de inibidores de corrosão para estruturas de concreto armado. **Revista Matéria (Rio de Janeiro)** **22**, n.º. 4, 2017. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1517-70762017000400427&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em: 22 mar. 2020.

UCHÔA, S. B. B. *et al.* **Inibição de corrosão em concreto armado: eficiência e comportamento do sistema tiouréia/molibdato de sódio**. Dissertação de Mestrado, 2007. Disponível em: http://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFAL_652b52713a42328e12c82c82b8af4fd9. Acesso em: 11 ago. 2020.

UNGERICHT, A. J., PIOVESAN, A. Z. Influência da cura da argamassa em relação às propriedades mecânicas e absorção de água. **Revista Unoesc & Ciência – ACSA**, v. 2, pp.75-86, 2011. Disponível em: <https://portalperiodicos.unoesc.edu.br/acsa/article/view/862>. Acesso em: 05 fev. 2020.

VIEDMA, P. G. de; CASTELLOTE, M.; ANDRADE, C. Comparison between several methods for determining the despassivation threshold value for corrosion onset. **J. Phys. IV France 136 (2006) 79–88 EDP Sciences, Les Ulis**. France 136, 79-88, 2006. Disponível em: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.946.7493&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 19 out. 2020

VIEIRA, C. M. F. *et al.* Incorporação de lama de alto forno em cerâmica vermelha. **Revista Cerâmica**. v. 53, n. 328, p. 381-387, 2007. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69132007000400008&script=sci_arttext&tlng=pt. Acesso em: 03 fev. 2020.

WALKER, R.; PAVÍA, S. Physical properties and reactivity of pozzolans, and their influence on the properties of lime–pozzolan pastes. **Materials and Structures**. v. 44, n. 6, p. 1139- 1150, 2011. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-010-9689-2>. Acesso em: 01 set. 2020

WITZKE, F. B.; SIVALDO, L. C.; RONALDO, A. M. Jr. Abrasão superficial de concretos contendo cinza volante em substituição parcial ao cimento Portland. **Revista técnico-científica** **21**, 2019. Disponível em: <http://doi.editoracubo.com.br/10.4322/2526-7248.056>. Acesso em: 13 jun. 2020.

WOLYNEC, S. **Técnicas eletroquímicas em corrosão**. Monografia. Universidade de São Paulo. Virtual Books, 2003. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=en&lr=&id=qcOI1mv1vbQC&oi=fnd&pg=PA7&dq=WOLYNEC,+S.+T%C3%A9cnicas+eletroqu%C3%ADmicas+em+corros%C3%A3o.+E+du+Universiade+de+S%C3%A3o+Paulo,+2003.&ots=1IT9gsFaA8&sig=QUJZpQPJS-8uKSW9WvP--SGiR9w#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 02 jun. 2020.

ZHANG, X. L. *et al.* Effects of scan rate on the potentiodynamic polarization curve obtained to determine the Tafel slopes and corrosion current density. **Corrosion Science**. v. 51, n. 3, p. 581-587, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010938X08005246>. Acesso em 10 ago. 2020.

ZYRKOWSKI M.; NETO, R. C.; WITKOWSKI, L F. S. Characterization of fly-ash cenospheres from coal-fired power plant unit. **Fuel** v. 174, 2016. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236116000752?casa_token=1htic9S9ab4AAAAA:E_SgBdnI_OXThWZur-yl7bMiz2mYJTXoQeat9ok_ujNiJWleZGwur8dqQdEz-EdFE7lh-heZ66o. Acesso em: 10 jun. 2020.