



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TÉCNOLÓGICO DE JOINVILLE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS MECÂNICAS

LUIGGI BARBIZAN NICOLINI

**AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE E APLICABILIDADE DE ARGAMASSA  
GEOPOLIMÉRICA À BASE DE METACAU LIM EM REPAROS DE ELEMENTOS  
DE CONCRETO ARMADO**

Joinville  
2021

LUIGGI BARBIZAN NICOLINI

**AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE E APLICABILIDADE DE ARGAMASSA  
GEOPOLIMÉRICA À BASE DE METACAULIM EM REPAROS DE ELEMENTOS  
DE CONCRETO ARMADO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Senff.

Joinville

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

NICOLINI, LUIGGI

AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE E APLICABILIDADE DE ARGAMASSA  
GEOPOLIMÉRICA À BASE DE METACULIM EM REPAROS DE ELEMENTOS  
DE CONCRETO ARMADO / LUIGGI NICOLINI ; orientador, Luciano  
Senff, 2021.

128 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia e Ciências Mecânicas, Joinville, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2. Geopolímero. 3.  
Concreto armado. 4. Durabilidade. 5. Argamassa de reparo  
estrutural. I. Senff, Luciano. II. Universidade Federal de  
Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e  
Ciências Mecânicas. III. Título.

LUIGGI BARBIZAN NICOLINI

**AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE E APLICABILIDADE DE ARGAMASSA  
GEOPOLIMÉRICA À BASE DE METACAULIM EM REPAROS DE ELEMENTOS  
DE CONCRETO ARMADO**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca  
examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Claudimir Antonio Carminatti  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Derce de Oliveira Souza Recouvreux  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Marcelo Tramontin Souza  
Universidade Estadual de Santa Cruz

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão  
que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia e Ciências  
Mecânicas.

---

Prof. Dr. Rafael de Camargo Catapan  
Coordenador(a) do Programa

---

Prof. Dr. Luciano Senff  
Orientador(a)

Joinville, 2021.

Este trabalho é dedicado a toda minha família e meus grandes amigos.

## **AGRADECIMENTOS**

Meus sinceros agradecimentos a todos que viabilizaram a realização deste trabalho em tempos de pandemia de COVID-19, principalmente:

À Universidade Federal de Santa Catarina, assim como, ao programa de pós-graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, por disponibilizar toda a sua estrutura para a realização deste trabalho.

Ao meu orientador Luciano Senff, por todos os ensinamentos e toda a ajuda prestada.

A minha companheira Caroline Honaiser, que sempre está presente na minha vida e me dá forças nas horas em que mais preciso.

Aos meus familiares pelo apoio e incentivo, principalmente aos meus pais Agostinho Nicolini e Elaine Terezinha Barbizan Nicolini que me apoiam em todas as minhas decisões e me ensinaram a lutar pelos meus sonhos.

A todos os meus amigos e colegas, especialmente ao Vilson Schwitzky, ao Luiz Bertolino Serpa Neto e à Eduarda Moraes que me ajudaram muito, principalmente nas atividades de laboratório.

A empresa Ad Fiducia Avaliações e Perícias de Engenharia, em especial ao Eng. Gilberto Luiz e meu colega Eng. Renan Richard da Cunha, por fornecer uma grande infraestrutura de ensaios e pelo apoio, confiança e ensinamentos transmitidos durante os últimos anos.

A todos do Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável (LabICons) e ao Laboratório Multidisciplinar de Física e Química da Universidade Federal de Santa Catarina.

A todos da empresa SolosVille pela parceria.

Aos membros da banca, que aceitaram o meu convite e que, sem dúvidas, enriqueceram muito essa pesquisa.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação. Um grande abraço.

## RESUMO

Geopolímeros são materiais com propriedades cimentícias e características promissoras que possuem diversas aplicações e, normalmente, são mais sustentáveis do que o cimento Portland. Este material pode adquirir elevada resistência mecânica nas primeiras idades e apresentar excelente durabilidade. Embora o estudo da durabilidade de geopolímeros tenha aumentado nos últimos anos, poucos são voltados a avaliar a utilização de argamassas geopoliméricas em reparos de elementos estruturais de concreto armado. O presente estudo investigou as características mecânicas e de durabilidade de uma argamassa geopolimérica à base de metacaulim após a exposição a soluções ácidas, ciclos de gelo-degelo e contaminação com cloretos, comparando o seu comportamento ao de uma argamassa à base de cimento Portland com formulação, resistência mecânica e fluidez similares. Por fim, foi avaliada a aplicabilidade da argamassa geopolimérica estudada em reparos estruturais de elementos de concreto armado a partir dos parâmetros estudados. Os resultados indicaram que os geopolímeros possuem resistência superior aos ataques por ácido sulfúrico e ácido clorídrico quando comparados à matriz de cimento Portland. Os ciclos de gelo-degelo não influenciaram nas propriedades físicas e resistência mecânica das argamassas. Os ensaios de alcalinidade demonstraram um bom desempenho da argamassa geopolimérica frente aos processos de carbonatação, não apresentando diminuições relevantes de pH após 365 dias de ensaios. Os ensaios de potencial de corrosão das argamassas de referência indicaram que ambas promoveram o processo de passivação das armaduras, contudo o desempenho da argamassa geopolimérica frente às contaminações por cloretos foi inferior devido, principalmente, à maior permeabilidade da matriz. O ensaio de compatibilidade eletroquímica entre a argamassa geopolimérica e a argamassa de cimento Portland nas primeiras idades indicou que as argamassas possuem tendências desprezíveis de formação de macrocélulas. Em síntese, conclui-se que a argamassa geopolimérica proposta possui um grande potencial para ser utilizada como material de reparo estrutural em decorrência dos indicadores promissores de durabilidade e de sua boa compatibilidade com substratos de concreto de cimento Portland.

**Palavras-chave:** Geopolímero. Concreto armado. Durabilidade. Argamassa de reparo estrutural.

## ABSTRACT

Geopolymers are materials with cement properties and promising characteristics, have several applications and are usually more sustainable than Portland cement. This material can acquire high mechanical resistance in the early ages and have excellent durability. Although the study of the durability of geopolymers has increased in recent years, few are focused on evaluating the use of geopolymeric mortars in the repair of reinforced concrete structural elements. The present study investigated the mechanical and durability characteristics of a metakaolin-based geopolymeric mortar after exposure to acidic solutions, freeze-thaw cycles and chloride contamination, and compared its behavior to a Portland cement-based mortar with similar formulation, mechanical strength and fluidity. Finally, the applicability of the studied geopolymer mortar in structural repairs of reinforced concrete elements was evaluated based on the studied parameters. The results indicated that the geopolymers have superior resistance to attacks by sulfuric acid and hydrochloric acid when compared to Portland cement matrix. Ice-thaw cycles did not influence the physical properties and mechanical strength of mortar. The alkalinity tests showed a good performance of the geopolymeric mortar against carbonation processes, not showing relevant decreases in pH after 365 days of tests. The corrosion potential tests of the reference mortars indicated that both promoted the reinforcement passivation, however the performance of the geopolymer mortar against chloride contamination was lower, mainly due to the greater permeability of the matrix. The electrochemical compatibility test between the geopolymeric mortar and the Portland cement mortar at early ages indicated that the mortars have negligible tendencies in the formation of macrocells. Therefore, it is concluded that the proposed geopolymer mortar has a great potential to be used as a structural repair material, due to the promising indicators of durability and its good compatibility with Portland cement concrete substrates.

**Keywords:** Geopolymer. Reinforced concrete. Durability. Structural repair mortar.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desempenho das edificações ao longo do tempo.....	16
Figura 2 – Modelo conceitual da reação de geopolimerização.....	25
Figura 3 – Aplicações de geopolímeros em função de sua relação Si/Al .....	26
Figura 4 – Pilha eletroquímica clássica .....	44
Figura 5 – Célula de corrosão do concreto armado .....	45
Figura 6 – Tipos de corrosão das armaduras e fatores que os provocam .....	46
Figura 7 – Esquema demonstrando a corrosão por cloretos (pites).....	49
Figura 8 – Esquema de variação do conteúdo crítico de cloretos em função da qualidade do concreto e da umidade relativa ambiental .....	51
Figura 9 – Tipos de argamassas de reparo e principais propriedades.....	53
Figura 10 – Esquema de caracterização das matérias primas e ensaios .....	57
Figura 11 – Determinação das formulações das argamassas.....	58
Figura 12 – Areia Normal Brasileira: (a) fina, (b) média-fina, (c) média-grossa.....	63
Figura 13 – Argamassadeira utilizada para a produção das amostras.....	65
Figura 14 – Molde dos corpos de prova prismáticos de 40 mm x 40 mm x 40 mm...	66
Figura 15 – Molde dos corpos de prova cilíndricos com Ø50 mm e altura de 100 mm .....	66
Figura 16 – Mesa de consistência.....	67
Figura 17 – Máquina universal de ensaios.....	71
Figura 18 – Procedimento de imersão total dos corpos de prova em solução ácida.	73
Figura 19 – Equipamentos utilizados no ensaio de potencial de corrosão .....	75
Figura 20 – Demonstração do ensaio de potencial de corrosão .....	76
Figura 21 – Procedimento de imersão dos corpos de prova em solução salina.....	79
Figura 22 – Espalhamento da argamassa geopolimérica .....	82
Figura 23 – Espalhamento da argamassa de cimento Portland .....	82
Figura 24 – Corpos de prova geopoliméricos após imersão em ácido sulfúrico.....	84
Figura 25 – Corpos de prova de cimento Portland após imersão em ácido sulfúrico	85
Figura 26 – Resultado da caracterização das propriedades físicas dos corpos de prova imersos em ácido sulfúrico .....	86
Figura 27 – Resistência mecânica à compressão após imersão em ácido sulfúrico.	88
Figura 28 – Relação entre a resistência mecânica à compressão e a porosidade das amostras imersas em ácido sulfúrico .....	88
Figura 29 – Corpos de prova geopoliméricos após imersão em ácido clorídrico .....	91

Figura 30 – Corpos de prova de cimento Portland após imersão em ácido clorídrico .....	92
Figura 31 – Resultado da caracterização das propriedades físicas dos corpos de prova imersos em ácido clorídrico .....	93
Figura 32 – Resistência à compressão após imersão em ácido clorídrico .....	94
Figura 33 – Relação entre a resistência mecânica à compressão e a porosidade das amostras imersas em ácido clorídrico .....	95
Figura 34 – Corpos de prova geopoliméricos após ciclos .....	97
Figura 35 – Corpos de prova de cimento Portland após ciclos .....	98
Figura 36 – Resultado da caracterização das propriedades físicas dos corpos de prova em ciclos de molhagem-secagem e gelo-degelo .....	99
Figura 37 – Perda de resistência à compressão aos 0, 1, 4 e 12 ciclos de molhagem-secagem e gelo-degelo .....	100
Figura 38 – Ensaio de carbonatação das amostras. ....	101
Figura 39 – Corpos de prova típicos para o ensaio de potencial de corrosão .....	104
Figura 40 – Procedimento do ensaio de potencial de corrosão das amostras .....	104
Figura 41 – Resultados do ensaio de potencial de corrosão das argamassas geopoliméricas (GEO).....	106
Figura 42 – Resultados do ensaio de potencial de corrosão das argamassas de cimento Portland (OPC) .....	106
Figura 43 – Condição visual das armaduras dos corpos de prova geopoliméricos após 365 dias de ensaio .....	107
Figura 44 – Condição visual das armaduras dos corpos de prova de cimento Portland após 365 dias de ensaio .....	108
Figura 45 – Corpos de prova para imersão com topo e base impermeabilizadas... ..	111
Figura 46 – Resultados do ensaio de potencial de corrosão das amostras imersas em solução salina.....	112
Figura 47 – Condição visual das armaduras dos corpos de prova 91 dias de imersão em solução salina.....	112
Figura 48 – Corpos de prova compostos mistos por cimento Portland ( <i>inferior</i> ) e geopolímero ( <i>superior</i> ) .....	114
Figura 49 – Resultados do ensaio de potencial de corrosão das amostras mistas ..	115
Figura 50 – Condição visual das armaduras dos corpos de prova mistos após 365 dias de ensaio.....	115

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ensaio e quantidade de corpos de prova .....	59
Tabela 2 – Composição química em frações do Metacaulim .....	60
Tabela 3 – Propriedades físico-químicas do Metacaulim .....	61
Tabela 4 – Características físico-químicas do hidróxido de sódio.....	61
Tabela 5 – Características físico-químicas do silicato de sódio .....	62
Tabela 6 – Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa)...	64
Tabela 7 – Formulação e constituintes das argamassas produzidas .....	64
Tabela 8 – Probabilidade de corrosão do concreto armado de cimento Portland conforme faixas de ddp .....	77
Tabela 9 – Quantidade de cloretos adicionada na etapa de produção das argamassas .....	78
Tabela 10 – Índices de consistência dos traços ideais das argamassas .....	81
Tabela 11 – Resistência à compressão média das amostras prismáticas de referência .....	88
Tabela 12 – Potencial de corrosão médio - Ecorr (mV) dos corpos de prova com cloretos adicionados nas misturas geopoliméricas .....	105
Tabela 13 – Potencial de corrosão médio - Ecorr (mV) dos corpos de prova com cloretos adicionados nas misturas de cimento Portland (OPC).....	105
Tabela 14 – Potencial de corrosão médio - Ecorr (mV) dos corpos de prova imersos em solução salina.....	111
Tabela 15 – Diferença entre potenciais de corrosão médio - Ecorr (mV) dos corpos de prova mistos .....	114
Tabela 16 – Síntese das propriedades estudadas das argamassas propostas .....	121

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ARI – Alta resistência Inicial

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CP – Cimento Portland

ddp – Diferença de potencial

GEO – Geopolímero

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

NBR – Norma Brasileira

OPC – *Ordinary Portland Cement* – Cimento Portland Convencional

pH – Potencial hidrogeniônico

RS – Resistente à sulfatos

UDESC – Universidade do Estado de Santa Catarina

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	17
1.2	OBJETIVOS .....	18
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>18</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>18</b>
1.3	LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	19
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	19
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>20</b>
2.1	GEOPOLÍMEROS .....	20
<b>2.1.1</b>	<b>Matérias-primas para a produção de geopolímeros.....</b>	<b>22</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Ativação alcalina .....</b>	<b>23</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Propriedades dos geopolímeros.....</b>	<b>27</b>
2.1.3.1	<i>Resistência Mecânica a Compressão .....</i>	27
2.1.3.2	<i>Permeabilidade.....</i>	28
2.1.3.3	<i>Alcalinidade .....</i>	29
2.1.3.4	<i>Ataques Ácidos e por Sulfatos.....</i>	30
2.1.3.5	<i>Reações expansivas .....</i>	31
2.1.3.6	<i>Resistência à variações térmicas e ao gelo-degelo.....</i>	32
2.2	CIMENTO PORTLAND .....	32
2.3	ENVELHECIMENTO DO CONCRETO .....	36
<b>2.3.1</b>	<b>Agressividade das águas .....</b>	<b>37</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Permeabilidade.....</b>	<b>39</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Ciclos de gelo-degelo .....</b>	<b>40</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Ataque por sulfatos.....</b>	<b>41</b>
<b>2.3.5</b>	<b>Corrosão de armaduras .....</b>	<b>42</b>
2.3.5.1	<i>Carbonatação.....</i>	47
2.3.5.2	<i>Contaminação por cloretos.....</i>	48
2.3.5.3	<i>Efeito de macropilha (ânodo incipiente) .....</i>	51
2.4	REPARO ESTRUTURAL COM ARGAMASSAS .....	52
2.5	APLICAÇÃO DE GEOPOLÍMEROS EM REPAROS ESTRUTURAIS.....	55
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>57</b>
3.1	MATERIAIS .....	60

3.1.1	<b>Metacaulim</b> .....	60
3.1.2	<b>Hidróxido de Sódio (NaOH)</b> .....	61
3.1.3	<b>Silicato de Sódio (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>)</b> .....	62
3.1.4	<b>Agregado Miúdo</b> .....	62
3.1.5	<b>Cimento Portland Convencional</b> .....	63
3.2	<b>MÉTODOS</b> .....	64
3.2.1	<b>Preparação das amostras</b> .....	64
3.2.2	<b>Caracterização no estado fresco – Índice de consistência</b> .....	67
3.2.3	<b>Caracterização no estado endurecido</b> .....	68
3.2.3.1	<i>Propriedades Físicas</i> .....	68
3.2.3.1.1	Inspeção visual.....	69
3.2.3.1.2	Perda de massa ( $\Delta m$ ).....	69
3.2.3.1.3	Absorção de água por imersão ( <i>A</i> ).....	69
3.2.3.1.4	Porosidade aberta ou índice de vazios ( <i>I<sub>v</sub></i> ).....	70
3.2.3.1.5	Densidade aparente ou massa específica ( $\rho$ ) .....	70
3.2.3.1.6	Absorção de água por capilaridade ( <i>C</i> ).....	70
3.2.3.2	<i>Propriedades Mecânicas - Resistência à Compressão</i> .....	71
3.2.3.3	<i>Imersão em ácido sulfúrico e ácido clorídrico</i> .....	72
3.2.3.4	<i>Ciclos de molhagem-secagem e gelo-degelo</i> .....	73
3.2.3.5	<i>Ensaio de alcalinidade</i> .....	74
3.2.3.6	<i>Potencial de Corrosão</i> .....	75
3.2.3.7	<i>Adição de cloretos nas misturas das argamassas</i> .....	77
3.2.3.8	<i>Imersão em solução salina</i> .....	78
3.2.3.9	<i>Compatibilidade eletroquímica das argamassas geopoliméricas e de cimento Portland</i> .....	79
3.2.3.10	<i>Aplicabilidade em reparos estruturais</i> .....	80
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	81
4.1	Caracterização no estado fresco – Índice de consistência.....	81
4.2	Caracterização no estado endurecido .....	83
4.2.1	<b>Imersão em ácido sulfúrico</b> .....	83
4.2.1.1	<i>Inspeção visual</i> .....	83
4.2.1.2	<i>Perda de massa, absorção de água por imersão, porosidade aberta, densidade aparente e absorção de água por capilaridade</i> .....	85
4.2.1.3	<i>Resistência à compressão</i> .....	87

<b>4.2.2</b>	<b>Imersão em ácido clorídrico .....</b>	<b>90</b>
4.2.2.1	<i>Inspeção visual.....</i>	90
4.2.2.2	<i>Perda de massa, absorção de água por imersão, porosidade aberta, densidade aparente e absorção de água por capilaridade.....</i>	92
4.2.2.3	<i>Resistência à compressão .....</i>	94
<b>4.2.3</b>	<b>Ciclos de molhagem-secagem e gelo-degelo .....</b>	<b>96</b>
4.2.3.1	<i>Inspeção visual.....</i>	96
4.2.3.2	<i>Perda de massa, absorção de água por imersão, porosidade aberta, densidade aparente e absorção de água por capilaridade.....</i>	98
4.2.3.3	<i>Resistência à compressão .....</i>	100
<b>4.2.4</b>	<b>Ensaio de alcalinidade .....</b>	<b>101</b>
<b>4.2.5</b>	<b>Adição de cloretos nas misturas das argamassas.....</b>	<b>103</b>
<b>4.2.6</b>	<b>Imersão em solução salina.....</b>	<b>110</b>
<b>4.2.7</b>	<b>Compatibilidade eletroquímica da argamassa geopolimérica e de cimento Portland .....</b>	<b>113</b>
<b>4.2.8</b>	<b>Aplicabilidade em reparos estruturais .....</b>	<b>116</b>
4.2.8.1	<i>Compatibilidade estrutural.....</i>	116
4.2.8.2	<i>Compatibilidade de deformações:.....</i>	117
4.2.8.3	<i>Compatibilidade à agressividade ambiental:.....</i>	117
4.2.8.4	<i>Compatibilidade eletroquímica:.....</i>	117
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>119</b>
5.1	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....	122
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>123</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Não são raras as edificações e monumentos de concreto armado com mais de 70 anos que se apresentam em uso e ainda atendem aos requisitos mínimos de desempenho e segurança. Contudo, há um aumento relevante na quantidade de construções com pouca idade que apresentam problemas estruturais originados, principalmente, por falhas nas etapas de projeto, execução, operação e manutenção das edificações.

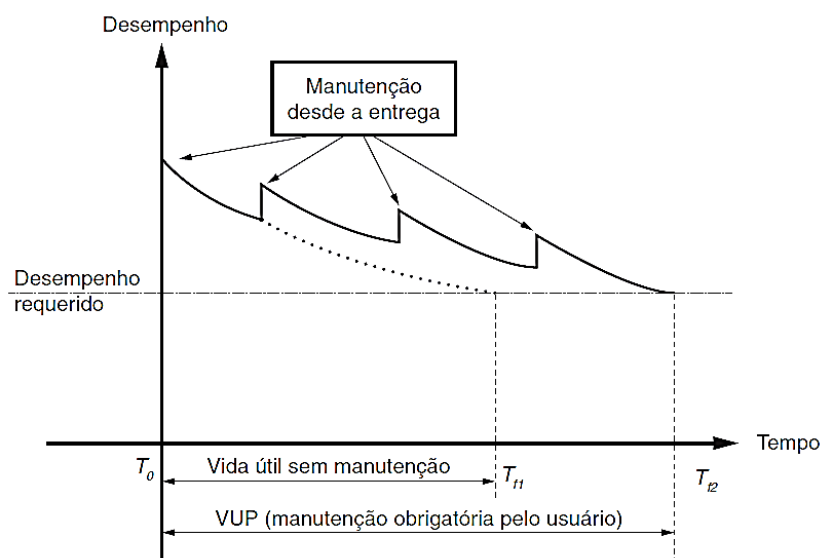
Durante as etapas de projeto e execução, novos materiais são especificados e amplamente utilizados nas construções. Segundo Ferreira (2000), nos últimos anos foram desenvolvidos concretos mais resistentes e com menor consumo de cimento Portland, foram descobertos novos aditivos, e houve mudanças nos processos construtivos, o que vem aumentando o consumo de concreto no mundo.

Paralelamente ao aumento no consumo do concreto, observa-se que as estruturas estão cada vez mais suscetíveis a ataques de agentes agressivos que favorecem a ocorrência de manifestações patológicas nas construções. Andrade (1992) afirma que os materiais utilizados nas construções antigas apresentavam baixas resistências mecânicas, eram submetidos a baixas tensões de serviço e possuíam coeficientes de segurança elevados, resultando em estruturas com grande massa, inércia e grande resistência aos processos de degradação. Atualmente, com o avanço da ciência dos materiais, da teoria das estruturas, do concreto armado e dos processos cada vez mais industrializados de fabricação, os elementos atingem elevadas resistências mecânicas, são submetidas a elevadas tensões de serviço e dão origem a estruturas mais esbeltas e econômicas e, conseqüentemente, menos resistentes aos processos de degradação.

A baixa resistência aos processos de degradação implica em uma diminuição importante na durabilidade das estruturas de concreto armado, aumentando a geração de resíduos, o consumo de novos materiais não renováveis e a necessidade de atividades de manutenção e eventuais reparos. De acordo com a ABNT (2013), as atividades de manutenção na fase de uso das edificações se fazem necessárias para conservar ou recuperar a capacidade funcional da edificação e seus sistemas constituintes, a fim de atender às necessidades e segurança dos seus usuários e prolongar a vida útil das construções. A Figura 1 ilustra a influência das atividades de manutenção no desempenho e vida útil das construções.



Figura 1 – Desempenho das edificações ao longo do tempo



Fonte: ABNT (2013)

Dentre as diversas manifestações patológicas que podem ser identificadas no concreto armado e que diminuem a vida útil das estruturas caso não sejam reparadas, destacam-se as fissuras, desagregações e corrosão de armaduras, as quais diminuem ao passo que cuidados são tomados na fase de projeto, escolha de materiais, execução da obra, manutenção e proteção (BAUER, 2000).

Diversos materiais podem ser empregados em reparos estruturais, desde que apresentem características físicas, químicas e mecânicas compatíveis à estrutura existente, boa durabilidade e garantam o desempenho necessário. Argamassa de reparo estrutural, composta por cimento Portland, aditivos e agregados especiais, é um dos principais materiais utilizados em reparos estruturais de elementos de concreto armado, sendo utilizado para restituir a monoliticidade dos elementos de concreto ou proteger novamente as armaduras de agentes deletérios. Embora o uso de argamassas à base de cimento seja recorrente, novos materiais com características semelhantes e mais sustentáveis vêm sendo estudados, dentre eles, os geopolímeros.

Os geopolímeros são obtidos a partir de materiais com altos teores de sílica e alumina amorfos que endurecem quando ativados por uma solução alcalina, apresentando características similares aos materiais à base de cimento. De acordo com Davidovits (1994), os geopolímeros podem apresentar rápido endurecimento, elevadas resistências mecânicas em pequenas idades, baixa retração, boa resistência

ao gelo e degelo, resistência a sulfatos e agentes corrosivos, além de não gerar reações álcali-agregado.

Conforme Boca Santa (2012), as principais fontes de aluminossilicatos amorfos podem ser provenientes de materiais naturais, materiais que passaram por tratamentos térmicos ou até mesmo de resíduos, destacando-se as escórias de alto forno, cinzas e o metacaulim, este último que é objeto de estudo do presente trabalho.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Os concretos de cimento Portland são suscetíveis à carbonatação, redução do pH que favorece a despassivação das armaduras, à reação álcalis-agregados fortemente expansivas, à ataques por ambientes ácidos, a reações expansivas com sulfatos e apresentam ainda um desempenho muito limitado a altas temperaturas, pois a partir dos 400 °C começam a perder a água de constituição, acabando por se desintegrar (PINTO, 2006).

Sabe-se ainda que para cada tonelada de cimento Portland fabricada são geradas aproximadamente 0,95 toneladas de CO<sub>2</sub> (DAVIDOVITS, 1994), o que torna o processo de obtenção do cimento Portland um dos maiores geradores de CO<sub>2</sub> e, conseqüentemente, um dos maiores poluidores do mundo.

Desta forma, destaca-se a importância da realização de estudos voltados à avaliação da durabilidade de novos materiais mais sustentáveis para a substituição do cimento Portland. A partir da revisão sistemática de literatura, foi possível observar a carência de estudos que avaliam as propriedades de durabilidade de geopolímeros no Brasil. Acredita-se que tal carência ocorre pela dificuldade de realização de ensaios a longo prazo, limitando-se a ensaios acelerados de curto prazo.

Embora os ensaios de durabilidade de longa duração retratem melhor o comportamento dos materiais, os ensaios acelerados podem dar parâmetros do comportamento dos materiais frente aos agentes agressivos e condições climáticas ao longo tempo. Segundo Bertolini (2010), para avaliar o comportamento de um material com ensaios acelerados, submete-se o mesmo a condições e solicitações mais elevadas do que a que estará sujeito durante sua vida útil, convertendo-se posteriormente as informações obtidas para a condição real.

Desta forma, para avaliar as possíveis aplicações de argamassas geopoliméricas é necessário entender os mecanismos de deterioração do material, e

a comparação com argamassas de cimento Portland se torna uma ferramenta muito importante, considerando que as propriedades de durabilidade deste já são bastante estudadas e normatizadas.

O presente trabalho irá investigar experimentalmente e em condições de laboratório as características no estado fresco, mecânicas e de durabilidade de uma argamassa geopolimérica à base de Metacaulim, exposta a soluções ácidas, ciclos de gelo-degelo e contaminações com cloretos, e então, comparar o seu comportamento à uma argamassa à base de cimento Portland com formulação, resistência mecânica e fluidez similares. A partir dos resultados obtidos, será avaliada a aplicabilidade da argamassa geopolimérica estudada para utilização em reparos estruturais de elementos de concreto armado.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar as propriedades de durabilidade de uma argamassa geopolimérica à base de metacaulim e a sua aplicabilidade em reparos de elementos estruturais de concreto armado.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

a) Determinar um traço de argamassa geopolimérica à base de metacaulim e um traço de argamassa de cimento Portland com consistência similar e resistência mecânica à compressão superior a 35 MPa aos 28 dias;

b) Comparar as propriedades físicas e resistência mecânica à compressão das argamassas após a imersão em ácido clorídrico, ácido sulfúrico e à ciclos de molhagem-secagem e gelo-degelo;

c) Comparar o risco de corrosão de argamassas armadas a partir de medições de potencial de corrosão após a adição de cloretos na mistura da argamassa e imersão de corpos de prova em solução salina;

d) Avaliar a compatibilidade eletroquímica a partir de medições de potencial de corrosão entre as argamassas de cimento Portland e geopolimérica; e

e) Avaliar a aplicabilidade da argamassa geopolimérica em reparos estruturais de estruturas de concreto armado com base nos resultados obtidos dos ensaios realizados.

### 1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

O presente estudo irá avaliar a aplicabilidade de argamassa geopolimérica em reparos estruturais de forma preliminar e exclusivamente a partir de parâmetros de durabilidade e de resistência mecânica à compressão. Outros parâmetros como aderência com o concreto de cimento Portland, resistência à flexão, deformabilidade, compatibilidade entre módulos de elasticidade, coeficientes de dilatação térmica, coeficientes de Poisson, retração, dentre outros, não serão avaliados, podendo ser avaliados em estudos futuros.

### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho é composto por cinco capítulos: introdução, revisão bibliográfica, metodologia, resultados e discussões e conclusão. A introdução é o primeiro capítulo, na qual será apresentada a problemática, a justificativa, os objetivos e as limitações da pesquisa. O segundo capítulo trata da fundamentação teórica sobre os geopolímeros e suas propriedades, durabilidade de estruturas de concreto armado e ensaios de durabilidade. No terceiro capítulo é descrita a metodologia abordada, contendo os materiais e métodos laboratoriais de ensaios utilizados. A análise e os resultados são apresentados no quarto capítulo, onde se tem a avaliação dos resultados obtidos nos ensaios. Por último, no quinto capítulo, serão apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada a fundamentação teórica do trabalho, abordando conceitos e informações relevantes do tema e dos materiais envolvidos no processo.

### 2.1 GEOPOLÍMEROS

Os geopolímeros são conhecidos por diversos nomes, entre eles: cerâmicas alcalinas, hidrocerâmicas, cimentos ativados alcalinamente, polímeros inorgânicos entre outros. São materiais com propriedades cimentícias e com grande potencial tecnológico por utilizarem matérias-primas naturais ou resíduos industriais de diversas fontes, desde que sejam ricos em aluminossilicatos amorfos ou semicristalinos e que tenham passado por tratamento térmico, o que os torna mais reativos para posteriormente sofrerem ativação através de uma fonte altamente alcalina (BOCA SANTA, 2012).

Esses materiais, na década de 1970, foram denominados de “geopolímeros” pelo cientista e professor Joseph Davidovits, mas já estavam sendo investigados pelo cientista Victor Glukhovisky e outros. Os geopolímeros têm o potencial de resolver as principais preocupações em torno do armazenamento e descarte de resíduos das indústrias de extração e processamento mineral, utilizando esses resíduos como materiais cimentícios (ALBITAR *et al.*, 2017).

Pinto (2006) afirma que os materiais que contenham aluminossilicatos amorfos (desde resíduos de construção, escórias, cinzas volantes, pozolanas, até materiais puros como a argila, a caulinita ou o metacaulim) podem ser sujeitos a processos de geopolimerização.

Os materiais geopoliméricos são 'polímeros', portanto se transformam, policondensam e adotam formas rapidamente em baixas temperaturas (algumas horas a 30 °C, alguns minutos a 85 °C e alguns segundos com micro-ondas); mas também são materiais minerais rígidos, resistentes às intempéries, suportando altas temperaturas (DAVIDOVITS, 1991, p13, tradução nossa).

Segundo Duxson (2006), o concreto geopolimérico, quando comparado com as propriedades do concreto de cimento Portland tradicional, pode apresentar

características superiores e promissoras, conforme será apresentado e avaliado neste estudo.

O concreto de cimento Portland desenvolve resistência mecânica a partir da formação de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), que são produzidos pelo processo de hidratação do cimento Portland por água. No entanto, o concreto geopolimérico segue uma via de reação diferente e ganha resistência através da formação de um gel de aluminossilicato. O gel é produzido dissolvendo alumina e óxidos de sílica de materiais reativos em um meio altamente alcalino, normalmente fornecido pelas soluções de hidróxido de sódio e silicato de sódio (GUNASEKARA *et al.*, 2019).

De acordo com Pinto (2006), os compostos de Cimento Portland apresentam um conjunto de desvantagens em relação a outros materiais, que não só resultam em limitações à estabilidade das suas propriedades, como também podem implicar em contaminação ambiental, destacando-se:

- Elevado consumo energético na sua fase de fabricação, sendo preciso atingir temperaturas de até 1500 °C nos fornos para a produção do clínquer, provocando um elevado grau de poluição ambiental, com produção de enormes quantidades de CO<sub>2</sub> (1 kg de clínquer ~ 1 kg de CO<sub>2</sub> libertado para a atmosfera);
- Fenômenos de carbonatação, que recombina o CO<sub>2</sub> atmosférico com o hidróxido de cálcio, produzindo carbonato de cálcio e levando a uma diminuição do pH abaixo do limiar de proteção das armaduras no concreto armado;
- Considerável permeabilidade à penetração dos cloretos, com possibilidade de redução da alcalinidade do ambiente que protege as armaduras, no caso do concreto armado;
  - Baixa resistência ao ataque por sulfatos, que provocam reações expansivas;
  - Possibilidade de reações álcali-agregados fortemente expansivas;
  - Grande retração, o que dificulta a utilização em reparos estruturais.

Geopolímeros podem ganhar espaço na concorrência ao cimento Portland visto que podem apresentar propriedades superiores às citadas acima, sendo potencialmente aplicáveis em materiais resistentes ao fogo, artefatos, isolamento térmico, materiais de construção, telhas cerâmicas, itens refratários, argamassas e concretos para reparo e reforço de estruturas, entre outros (DAVIDOVITS, 2008).

### 2.1.1 Matérias-primas para a produção de geopolímeros

Conforme citado anteriormente, diversos materiais podem ser utilizados para a produção de geopolímeros, como resíduos de construção, escórias, cinzas volantes, metacaulim, entre outros, desde que estes possuam aluminossilicatos amorfos em sua composição. Normalmente, estas fontes de aluminossilicatos são as provenientes de tratamentos térmicos prévios, que envolveram a perda de água e alteração da coordenação do íon alumínio com o oxigênio. Como consequência destas alterações, o material perde grande parte da sua estrutura cristalina e adquire um estado amorfo, de elevada entropia, o que lhe confere uma grande reatividade a soluções alcalinas (PINTO, 2006).

A escolha das matérias-primas para a produção de geopolímeros deve levar em conta diversos fatores considerados essenciais para o processo de polimerização, entre eles: teor de sílica amorfa, teor de fase vítrea e distribuição de tamanho de partículas (FERNÁNDEZ-JIMENEZ *et al.*, 2004). Tittarelli (2018) afirma ainda que é necessário que o material apresente um teor de sílica e alumina superior à 80% da composição química e uma baixa quantidade de CaO.

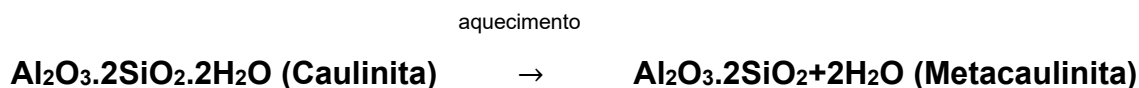
Desta forma, destaca-se o metacaulim, por ser altamente reativo e por possuir em sua composição elementos essenciais para produção de geopolímeros, entre eles um teor de cerca de 52% de SiO<sub>2</sub> e aproximadamente 40% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Os outros 8% são considerados impurezas, compostos normalmente por quartzo e outros argilominerais como o feldspato, mica, gipsita, ferro e materiais orgânicos (NITA, 2006). O metacaulim apresenta também um pequeno tamanho dos grãos, que geralmente é menor do que 5 µm (DUXSON, 2006). Quando comparado a outras fontes de aluminossilicatos, o metacaulim pode possuir maior pureza, tamanho de partícula menor e maior reatividade (AGUIRRE-GUERRERO *et al.*, 2017).

O metacaulim é obtido a partir da desidroxilação do caulim por tratamento térmico, em temperaturas pré-definidas, para transformar-se em metacaulim. O processo de desidroxilação torna o material mais reativo e apropriado para sofrer ativação alcalina (BOCA SANTA, 2012). De acordo com Davidovits (1999) a desidroxilação do caulim ocorre em temperaturas entre 600 °C e 950 °C.

O Brasil destaca-se como um dos maiores produtores mundiais do caulim, este que é um dos minérios mais abundantes da crosta terrestre. O minério é formado por um grupo de silicatos hidratados de alumínio, principalmente caulinita e haloisita,

podendo conter outras impurezas como areia, quartzo, mica, grãos de feldspato e óxidos de ferro e titânio (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2020).

Segundo Pinto (2006), a desidroxilação (perda das hidroxilas OH e liberação de água) ocorre ao aquecer o caulim entre 600 e 900 °C durante um período suficientemente longo, conforme a seguinte reação:



Davidovits (1991) baseou seus estudos principalmente no desenvolvimento de materiais cimentícios por ativação alcalina dos caulins, determinando diversas aplicações em vastos setores industriais, e cujo comportamento em termos de durabilidade assemelha-se ao dos materiais cerâmicos pela sua notável estabilidade.

Unido ao metacaulim, para a produção de argamassas e concretos geopoliméricos é indispensável o uso de agregados miúdos e/ou graúdos como forma de reduzir a retração e aumentar a coesão e a resistência mecânica do produto final (PINTO, 2006).

### 2.1.2 Ativação alcalina

A ativação alcalina é um processo químico que permite transformar estruturas vítreas (amorfos, parcialmente amorfos ou metaestáveis) em um compactado material cimentício (PALOMO *et al.*, 1999). Pode-se também dizer que a reação de ativação alcalina se traduz em um processo de policondensação (síntese polimérica) em que os tetraedros de SiO<sub>4</sub> e AlO<sub>4</sub> se ligam alternadamente entre si, compartilhando todos os oxigênios. Os íons alcalinos (K<sup>+</sup> e Na<sup>+</sup>) presentes na solução ativadora atuam como agentes formadores da estrutura, compensando o excesso de cargas negativas decorrente da alteração da coordenação do alumínio com o oxigênio, sendo os componentes que determinam as propriedades ligantes (PINTO, 2006).

Segundo o mesmo autor, os ativadores utilizados são basicamente de dois tipos: os simples e os compostos. Os primeiros são constituídos por uma base alcalina (hidróxido de sódio ou de potássio no geral), enquanto que os segundos são formados pela associação de uma base alcalina com um silicato de sódio ou de potássio. O tipo, dosagem e concentração do ativador tem de ser avaliado em função da matéria-prima



a ser utilizada, pois a composição química e o grau de finura condicionam a reação de ativação.

Em função das diversas variáveis que fazem parte do processo de alcali-ativação de aluminossilicatos, Davidovits (1982) sugere relações molares de mistura dos reagentes que podem ser adotadas como parâmetros de partida para a obtenção de geopolímeros, que também são chamados de polissialatos do tipo M – PSS (onde M é Na, K, ou ambos), como mostrado a seguir:

$$\begin{aligned}0,20 < \text{M}_2\text{O}/\text{SiO}_2 < 0,48 \\3,50 < \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 4,50 \\10,0 < \text{H}_2\text{O}/\text{M}_2\text{O} < 25,0 \\0,80 < \text{M}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 < 1,60\end{aligned}$$

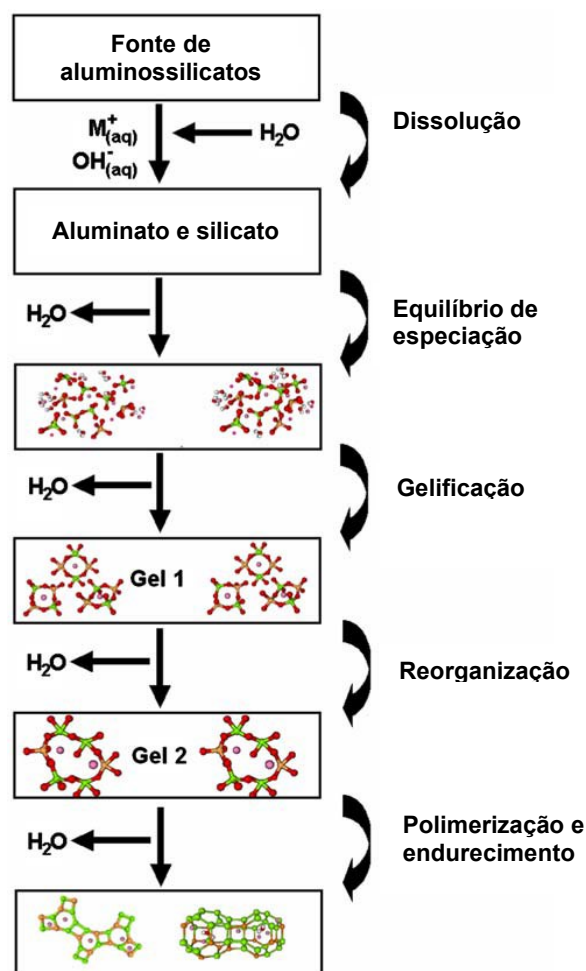
Além dessas relações, Silva (2000) também avaliou a influência da relação molar  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  do óxido de cálcio nas propriedades mecânicas dos polissialatos do tipo Na, K, Ca – PSS, sugerindo a seguinte relação:

$$0,15 < \text{CaO}/\text{SiO}_2 < 0,35$$

A combinação ideal das relações apresentadas dependerá muito da matéria-prima a ser utilizada e do ativador alcalino. Salientando-se que essas relações são parâmetros de partida e seus valores podem e devem ser extrapolados quando for necessário obter melhores resultados (VARGAS, 2006).

A ativação alcalina de fontes de aluminossilicatos reativos gera a denominada reação de geopolimerização, onde o modelo conceitual da reação apresentado por Duxson (2006) indica que o processo ocorre a partir da transformação de uma fonte de aluminossilicato amorfo sólido em um aluminossilicato alcalino sintético. A dissolução da matéria prima ocorre em solução com pH elevado (ativadores alcalinos), criando rapidamente uma solução de aluminossilicato supersaturado. Nestas soluções concentradas posteriormente ocorre a formação de um gel numa reação de condensação. A partir de então o sistema continua a se reorganizar e criar uma rede de conexões, resultando numa rede de aluminossilicatos chamada de geopolímeros. A Figura 2 ilustra o processo descrito.

Figura 2 – Modelo conceitual da reação de geopolimerização



Fonte: Duxson (2006)

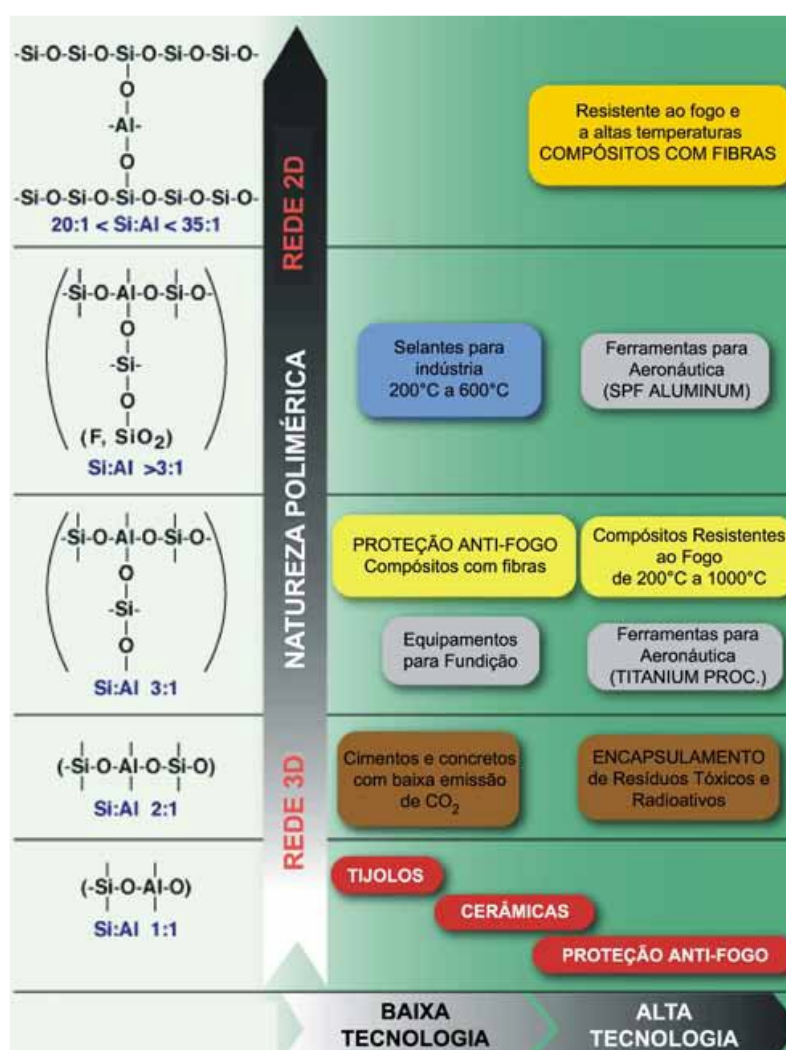
Em adição, Palomo *et al.* (1999) afirmam que ocorrem reações fortemente exotérmicas de dissolução no processo de geopolimerização, principalmente durante os desarranjos das ligações covalentes de Si-O-Si e de Al-O-Al, passando os íons (silício e alumínio) para a solução supersaturada. Os produtos gerados, decorrentes da decomposição da matéria-prima, começam a acumular por um período chamado de “período de indução” em que o calor liberado é mínimo. Finalmente, na etapa de condensação da estrutura ocorre a formação de um material cimentício com uma estrutura mal ordenada, porém, com alta resistência mecânica.

Diversos autores destacam a importância de avaliar a relação sílica/alumina (Si/Al) das matérias primas a serem utilizadas para a produção de geopolímeros. Vargas (2006) constatou em seu trabalho que argamassas à base de cinzas volantes com diferentes relações atômicas de Si/Al apresentaram variações importantes em suas resistências mecânicas. Conforme Pinto (2006), para relações Si/Al mais baixas,

são obtidas estruturas tridimensionais, que favorecem a obtenção de altas resistências mecânicas, sendo o campo dos materiais de construção. À medida que aumenta a razão atômica Si/Al (até 35), obtém-se materiais com maior caráter polimérico, formando cadeias mais longas e mais adequadas a outros tipos de aplicações.

A Figura 3 apresenta um quadro ilustrativo com as possíveis aplicações de materiais geopoliméricos, em função das razões Si/Al e das intervenções tecnológicas necessárias.

Figura 3 – Aplicações de geopolímeros em função de sua relação Si/Al



Fonte: Davidovits (1999)

### 2.1.3 Propriedades dos geopolímeros

Os geopolímeros apresentam diversas propriedades que se destacam em relação ao cimento Portland, tornando-o objeto crescente de estudos nos últimos anos, especialmente pela sua resistência mecânica e durabilidade. As principais propriedades físico-químicas dos cimentos geopoliméricos são descritas no presente capítulo.

#### 2.1.3.1 Resistência Mecânica a Compressão

Comparável ao cimento Portland, o geopolímero é capaz de obter elevadas resistências mecânicas em pequenas idades. Davidovits (1994) explica que os cimentos geopoliméricos ganham a maior parte de sua resistência dentro de 24 horas, podendo atingir resistências de compressão de até 100 MPa em 28 dias de cura.

A avaliação da resistência mecânica à compressão é importante para determinar o grau de polimerização dos geopolímeros, visto que estruturas mais polimerizadas tendem a apresentar maiores resistências. O grau de polimerização e o desempenho mecânico dos materiais geopoliméricos dependem de diversos fatores, principalmente: a relação de dissolução entre Si/Al, a distribuição do tamanho das partículas, a natureza amorfa da matéria-prima sólida, o grau de cristalinidade, o teor de cálcio na matéria-prima, a concentração do ativador, entre outros.

Segundo Vargas (2006), a idade e a temperatura também apresentam influência significativa no comportamento mecânico final das amostras álcali-ativadas, tendo observado em seu trabalho que amostras com idades maiores e curadas a temperaturas de 80° C apresentaram maiores resistências que amostras curadas a temperaturas menores. Embora a cura de geopolímeros em elevadas temperaturas apresentem melhores resistências, a cura em temperatura ambiente também apresenta bons desempenhos e é desejável, pois não requer gasto energético externo e permite ao novo cimento uma comparação equivalente aos cimentos tradicionais.

### 2.1.3.2 Permeabilidade

Sabe-se que diversos fatores influenciam na permeabilidade do concreto à base de cimento Portland e prejudicam significativamente a durabilidade do material, dentre eles: as falhas nos procedimentos de execução (vibração, segregação, etc), utilização de materiais incompatíveis, aumento do fator água cimento e outros.

De acordo com Pinto (2006), a porosidade do concreto representa uma porta aberta para a entrada dos agentes líquidos e gasosos capazes de favorecer e/ou promover alterações químicas no interior do concreto, afetando significativamente a durabilidade e a estabilidade do cimento. Buscando diminuir a permeabilidade, têm-se proposto modificações importantes na composição dos cimentos e dos próprios concretos à base de cimentos Portland, através da adição de materiais pozzolânicos (mais finos e reativos) nas misturas, que exercem simultaneamente ações químicas (combinação) e físicas (ocupação dos vazios), destacando-se as cinzas volantes, sílica ativa, metacaulim e outros. Os materiais pozzolânicos fazem o refinamento dos poros, obstruem a passagem de umidade e agentes agressivos ao interior do concreto, aumentam a resistência à sulfatos e diminuem a penetração de cloretos (AMBEDKAR; DHANALAKSHMI, 2017).

No âmbito do estudo da permeabilidade e conseqüentemente na durabilidade de geopolímeros, diversos autores avaliaram que geopolímeros apresentam desempenhos superiores ao cimento Portland convencional (CUNHA, 2013). Os geopolímeros alcançam a fase de endurecimento rapidamente, são amorfos ou muito pouco cristalinos, o que faz com que os vazios típicos da estrutura zeolítica tenham dimensões muito pequenas. Em condições de cura a temperaturas elevadas, a estrutura do geopolímero pode se fechar ainda mais e se tornar quase impermeável (PINTO, 2006).

Duxson (2006) observou que a microestrutura de um material geopolimérico passou a ser mais homogênea, ter poros menores e ser menos permeável à medida em que a relação Si/Al das matérias primas foi aumentada. A porosidade também é um dos principais parâmetros de influência para a corrosão das armaduras em argamassas e concretos geopoliméricos (TITTARELLI, 2018; MOHAN; MINI, 2018).

Sabendo que cloretos são um dos principais responsáveis pela corrosão das armaduras das estruturas de concreto armado, os estudos realizados por Gunasekara *et al.* (2019) e Aguirre-Guerrero *et al.* (2017) demonstraram que a taxa de difusão de cloreto no concreto geopolimérico é dependente da porosidade da matriz de geopolímero, dependendo também da reatividade da matéria prima. A reatividade depende principalmente da área superficial da matéria prima, do conteúdo de aluminossilicatos amorfos e pelo conteúdo de CaO. A maior área superficial e altos teores de aluminossilicatos amorfos favorecem a formação de gel de aluminossilicato e produzem uma matriz geopolimérica mais forte e menos porosa, reduzindo a taxa de ingresso de cloretos no material e, conseqüentemente, a incidência de corrosão por cloretos nas estruturas. Desta forma, os autores citam que é possível obter concretos geopoliméricos com maiores resistividades elétricas, menor permeabilidade e melhor desempenho à corrosão de armaduras do que concretos de cimento Portland.

Portanto, os ensaios para avaliar a permeabilidade e porosidade são fundamentais para avaliar a durabilidade dos materiais, sendo os principais: ensaios de absorção de água, capilaridade, índice de vazios e massa específica.

### 2.1.3.3 Alcalinidade

Por serem produzidos com ativadores alcalinos (soluções de NaOH ou KOH), os concretos geopoliméricos tendem a apresentar elevado pH. Sabendo-se também que as armaduras no concreto armado são passivadas em ambientes alcalinos, os geopolímeros, assim como o cimento Portland, tendem a apresentar excelente desempenho na passivação das armaduras (TITTARELLI, 2018).

Tanto nos concretos de cimento Portland quanto nos geopolímeros, a queda do pH com o tempo é inevitável, principalmente em função da carbonatação. Nos concretos de cimento Portland ocorre a formação do carbonato de cálcio, já nos geopolímeros ocorre a formação de carbonatos de sódio que, além de reduzir o pH dos concretos e despassivar as armaduras, podem provocar mudanças na porosidade dos materiais (BADAR *et al.*, 2014).

Chen *et al.* (2021) e Badar *et al.* (2014) afirmam que normalmente o desempenho dos geopolímeros à carbonatação é inferior ao do Cimento Portland, pois os processos de carbonatação de matrizes geopoliméricas são diferentes das

matrizes de cimento Portland. Os autores descrevem que o pH da matriz de cimento Portland é controlado pela portlandita ( $\text{CaOH}_2$ ), enquanto que nos geopolímeros com baixo teor de cálcio esta fase não se forma, e, portanto, o pH do sistema é controlado pela solução dos poros.

Os estudos realizados por Badar *et al.* (2014) demonstraram que os concretos geopoliméricos produzidos com matérias primas com maior teor de CaO apresentaram uma redução significativa no pH em relação à concretos geopoliméricos à base de matérias primas com baixo teor de cálcio, levando a crer que geopolímeros com elevados teores de CaO são mais propensos à carbonatação. O excesso de ativador alcalino também pode influenciar na formação de carbonato de sódio nos geopolímeros e reduzir o seu pH.

Mesmo com desempenho inferior, diversos autores indicam que os geopolímeros podem ainda assim apresentar bom comportamento frente aos processos de carbonatação e também promover a passivação das armaduras por alguns anos (POUHET; CYR, 2016; BABAE; KHAN; CASTEL, 2018; PASUPATHY *et al.*, 2018).

A elevada alcalinidade dos geopolímeros também pode aumentar o limite máximo da concentração de cloretos no concreto armado, o que pode estar relacionado à presença de silicatos na solução ativadora que podem se comportar como inibidores de corrosão (TITTARELLI, 2018). De acordo com a ABNT NBR 12655 (ABNT, 2015b), sabe-se que o teor máximo de cloretos admitidos em estruturas de concreto armado à base de cimento Portland é de 0,4% em relação à massa de aglomerante, porém segundo Tittarelli (2018), em geopolímeros o teor máximo de cloretos pode atingir patamares de 0,7% a 0,9% sem que ocorra a corrosão do aço.

#### 2.1.3.4 Ataques Ácidos e por Sulfatos

Ataques ácidos e por sulfatos são muito comuns em estruturas de concreto armado e causam grande preocupação, principalmente em obras de infraestrutura, de tratamento de efluentes e de aplicações agrícolas (KWASNY *et al.*, 2018).

Sabe-se que os ácidos tem a propriedade de afetar concretos com cimento Portland através da reação com o hidróxido de cálcio do material, ocasião em que ocorre a lixiviação de cálcio provocando a degradação progressiva da pasta de

cimento. Esta reação aumenta a permeabilidade do concreto, reduz sua resistência mecânica e, conseqüentemente, diminui sua durabilidade (CUNHA, 2013).

Entretanto, vários investigadores garantem que a resistência ao ataque por ácidos é uma das maiores vantagens dos geopolímeros comparativamente com outros ligantes à base de cimento Portland (ALBITAR *et al.*, 2017; KWASNY *et al.*, 2018; MOHAN; MINI, 2018; WALLAH; RANGAN, 2006). Albitar *et al.* (2017) observou que concretos à base de geopolímeros apresentaram menor degradação e perda de massa em ácidos em relação aos de cimento Portland devido à sua melhor estabilidade química.

Bakharev (2005) afirma que a estabilidade dos materiais geopolímeros em ambientes agressivos depende da ordenação intrínseca presente no gel de aluminossilicato, constatando que geopolímeros mais cristalinos são mais estáveis em ambientes ácidos do que geopolímeros com estrutura mais amorfa, o que pode ser regulado através da variação dos ativadores alcalinos. O mesmo autor complementa que o mecanismo de deterioração dos materiais geopoliméricos em meios ácidos está ligado à despolimerização dos polímeros aluminossilicatos, que podem levar a uma perda significativa de resistência.

Em relação ao ácido sulfúrico, que é muito comum em estações de tratamento de efluentes, Wallah e Rangan (2006) descrevem que embora o ácido sulfúrico cause uma certa degradação na resistência dos geopolímeros, os ensaios realizados por eles indicaram que não existem mecanismos para formação de gipsita ou etringita em concretos geopoliméricos à base de matérias primas com baixo teor de cálcio, diferentemente do que ocorre nos concretos de cimento Portland.

#### 2.1.3.5 Reações expansivas

Tanto a gipsita quanto a etringita, formadas principalmente pelo ataque de sulfatos em concretos à base de matérias primas ricas em cálcio, como é o caso do cimento Portland, podem ser expansivas e resultarem no desenvolvimento de tensões internas que podem danificar o concreto, levando a redução da resistência mecânica do material (ALBITAR *et al.*, 2017). Por isso, destacam-se os caulins, as cinzas vulcânicas e certas cinzas volantes, que geralmente tem um teor muito baixo ou praticamente nulo de cálcio em sua composição, sendo, portanto, menos suscetíveis a reações expansivas provocadas por ataques de sulfatos.



Outro fenômeno expansivo muito comum em concretos de cimento Portland é a reação álcali-agregado, que pode ser explicada como uma reação que ocorre entre os álcalis do cimento e certas formas de sílica presentes em agregados reativos, formando um gel álcali-sílica na superfície dos agregados que, ao absorver água, aumenta consideravelmente de volume. Este aumento de volume pode ser tão importante que provoque o desenvolvimento de tensões internas nos concretos, superiores à capacidade resistente destes, provocando por isso grande fissuração. O concreto fissurado, além de afetado no seu comportamento mecânico, torna-se mais permeável e menos durável (PINTO, 2006). Neste sentido, Davidovits (1994) cita diversos trabalhos que afirmam que ligantes álcali-ativados não geram reações álcali-agregado.

#### *2.1.3.6 Resistência à variações térmicas e ao gelo-degelo*

Estudos mostram que o cimento Portland moderno é fortemente afetado por condições climáticas agressivas e dura poucas décadas, enquanto que argamassas antigas são menos afetadas. Concretos e argamassas antigas demonstram a excepcional durabilidade dos cimentos zeolíticos, análogos aos geopolímeros sintéticos (DAVIDOVITS, 1994).

Os concretos à base de cimento Portland normal apresentam desempenho limitado quando submetidos a um aumento de temperatura, iniciando a sua desintegração para temperaturas acima dos 300 °C, os geopolímeros são termicamente mais estáveis e podem resistir a temperaturas de até 1200 °C (TORGAL; JALALI, 2010). O autor ainda aponta diversos estudos realizados em ligantes alcalinamente ativados para avaliar a resistência mecânica final de corpos de prova submetidos a diversos ciclos de gelo-degelo, indicando que o material apresenta bom desempenho mecânico, contudo, o seu desempenho depende muito da porosidade e da microestrutura do ligante avaliado.

## 2.2 CIMENTO PORTLAND

O Cimento Portland é um aglomerante hidráulico, produzido a partir da moagem e aquecimento do clínquer e adições de sulfatos de cálcio. Segundo Taylor (1997), o clínquer é obtido a partir do aquecimento à 1450 °C do calcário e argila,

tendo composição típica, em termos de óxidos, de 67% de CaO, 22% de SiO<sub>2</sub>, 5% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3% de Fe<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 3% de outros componentes. Segundo o autor, as propriedades do cimento Portland estão diretamente relacionadas às concentrações de suas fases constituintes resultantes do processo de produção do clínquer, destacando-se a Alita, a Belita, a Celita e a Ferrita. Isaia (2007) caracteriza estas fases da seguinte forma:

- **Alita** é um silicato tricálcico (3CaO.SiO<sub>2</sub>), também conhecida por C<sub>3</sub>S pela notação química do cimento. Representa o constituinte mais importante do clínquer, com ocorrência na faixa de 50% a 70%. No contato com a água, esse composto se hidrata, reagindo rapidamente e dando origem aos silicatos de cálcio hidratados de composição variável (C-S-H) e hidróxido de cálcio (C-H), sendo o principal responsável pela resistência da pasta de cimento nas primeiras idades;

- **Belita** é um silicato dicálcico (2CaO.SiO<sub>2</sub>), também conhecida por C<sub>2</sub>S pela notação química do cimento. Esta fase constitui de 15% a 30% do clínquer e é importante para o ganho de resistência do material em idades mais avançadas, visto que reage mais lentamente com a água. Também dão origem aos silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) e hidróxido de cálcio (C-H);

- **Celita ou Aluminato** consiste na fase aluminato tricálcico (3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), também conhecida por C<sub>3</sub>A pela notação química do cimento. É considerada uma fase intersticial e representa de 5 a 10% do clínquer. A reação com a água forma aluminatos tricálcicos hidratados, ou na presença de sulfatos no cimento, formam o trisulfoaluminato de cálcio hidratado, também conhecido como etringita; e

- **Ferrita ou Ferroaluminato** é a fase ferroaluminato tetracálcico (4CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), também conhecida por C<sub>4</sub>AF pela notação química do cimento. Também é considerada uma fase intersticial e representa 5% a 15% do clínquer. A reação com água forma compostos similares à Celita, porém com a presença do ferro.

Desta forma, Silva (2006) explica que hidratação do cimento se dá pela hidratação das respectivas quatro fases principais, sendo que o endurecimento da pasta é realizado pela hidratação dos aluminatos (C<sub>3</sub>A e C<sub>4</sub>AF) e a resistência dos compostos é obtida pela hidratação dos silicatos (C<sub>3</sub>S e C<sub>2</sub>S).

No Brasil são produzidos e comercializados diferentes tipos de Cimentos Portland. A NBR 16697 (ABNT, 2018), classifica os cimentos brasileiros em cinco classes em função das suas adições minerais e propriedades: Cimento Portland comum (CP-I), Cimento Portland composto (CP-II), Cimento Portland de alto forno

(CP-III), Cimento Portland pozolânico (CP-IV) e Cimento Portland de alta resistência inicial (CP-V). Estes cimentos também são classificados pela sua classe de resistência (25, 32, 40 e ARI) e por apresentar propriedades especiais (Sufixo RS – resistente à sulfatos e sufixo BC - baixo calor de hidratação). Os tipos de cimentos Portland são designados conforme o Quadro 1.

Quadro 1 – Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa)

Designação normalizada		Sigla	Classe de resistência	Sufixo	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
Cimento Portland Comum		CP I	25, 32 ou 40	RS ou BC	95 - 100	0 - 5		
		CP I-S			90 - 94	0	0	6 - 10
Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno		CP II-E			51 - 94	6 - 34	0	0 - 15
Cimento Portland composto com material pozolânico		CP II-Z			71 - 94	0	6 - 14	0 - 15
Cimento Portland composto com material carbonático		CP II-F			75 - 89	0	0	11 - 25
Cimento Portland de alto-forno		CP III			25 - 65	35 - 75	0	0 - 10
Cimento Portland pozolânico		CP IV			45 - 85	0	15 - 50	0 - 10
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V			ARI <sup>a</sup>	90 - 100	0	0
Cimento Portland Branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40	75 - 100	-	-	0 - 25	
	Não estrutural		-	-	50 - 74	-	-	26 - 50

<sup>a</sup> O cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CP V-ARI RS) pode conter frações de escórias granuladas de alto-forno ou materiais pozolânicos.

Fonte: ABNT NBR 16697 (2018)

Observa-se a partir do quadro que a maioria dos tipos de cimentos brasileiros apresentam adições minerais em sua composição, justamente para atender à diversas aplicações. De acordo com Isaia (2007), a adição de materiais finamente moídos ao cimento é chamada de adição mineral e podem ser divididas em três categorias: materiais cimentícios (escórias de alto-forno), materiais pozolânicos (cinzas volantes, sílica ativa, outros) e materiais não reativos (fíler calcáreo). As adições minerais são utilizadas por diversas razões, como para a melhoria da trabalhabilidade do concreto

fresco, diminuição do calor de hidratação, diminuição da retração por secagem, melhoria na resistência mecânica, garantia da durabilidade necessária para certas condições de serviço, para a redução de gastos e pela sustentabilidade, visto que a redução no consumo de cimento reduz o consumo energético e a emissão de CO<sub>2</sub> para o meio ambiente.

O uso de adições minerais no Cimento Portland pode ser muito vantajoso para o aumento da durabilidade do material, sendo uma das razões mais relevantes para a sua utilização. Neste quesito, destaca-se a utilização de pozolanas e escória de alto-forno. Analisando os efeitos na durabilidade, as adições minerais podem reduzir a porosidade capilar a partir da reação com o hidróxido de cálcio da hidratação do cimento, gerando silicatos e silicoaluminatos de cálcio hidratado, que precipitam nos poros capilares e reduzem a permeabilidade e a absorção, dificultando a entrada de agentes agressivos no concreto. As adições minerais podem também ajudar na resistência ao ataque de sulfatos, não só pela redução da porosidade, mas também pela redução da quantidade de Hidróxido de Cálcio (C-H) disponível para a reação com sulfatos em direção à formação de etringita que é responsável por reações expansivas. Outra contribuição é no combate da reação álcali-agregado que gera reações expansivas no concreto a partir da redução da porosidade, dos álcalis totais da mistura e da relação Ca/Si, esta que favorece a absorção dos álcalis existentes. Por fim, Isaia (2007) ainda afirma que as adições minerais reduzem a difusão de cloretos e a entrada de oxigênio e de água no concreto, aumentando sua resistividade elétrica e contribuindo na prevenção da corrosão das armaduras.

Segundo Silva (2006), a composição química e mineral, o tamanho do grão e a distribuição granulométrica do cimento são fatores importantes a serem considerados na seleção do mesmo, pois repercutem na resistência inicial e final do concreto. Quanto maior for a finura do cimento, mais rápida será sua reação de hidratação, maior a reatividade, menor exsudação, menor permeabilidade e melhor trabalhabilidade e coesão do concreto (BAUER, 2000).

Desta forma, destaca-se o Cimento Portland de Alta resistência inicial resistente à sulfatos (CP-V ARI RS), que possui grande área superficial, alta reatividade, baixa porosidade e melhores características de durabilidade devido à adição de escória de alto forno, em substituição ao clínquer. A NBR 16697 (ABNT, 2018) classifica o CP-V ARI RS como um cimento que apresenta resistência à

compressão superior à 34 MPa em apenas 7 dias e também apresenta expansão menor do que 0,3% aos 56 dias de ensaio de exposição à solução de sulfato de sódio.

A partir da hidratação do cimento Portland é possível produzir pastas, argamassas e concretos, importantes para diversos tipos de aplicações. As pastas são compostas apenas pelo material aglomerante, água e eventualmente aditivos, já as argamassas são compostas pela pasta e agregados miúdos (areia, resíduos, etc). Por fim, o concreto é formado pela mistura da pasta, agregados miúdos e agregados graúdos (brita, resíduos, etc). O concreto por si só tem pouca resistência às solicitações de tração, porém tem como principal vantagem o excelente comportamento à compressão. Todavia, unindo o concreto à vergalhões de aço, é possível obter um material compósito com boa resistência à tração e compressão, chamado de concreto armado (PUCHER, 1957).

### 2.3 ENVELHECIMENTO DO CONCRETO

Em concreto, são conhecidas obras da antiguidade clássica, como por exemplo o Coliseu de Roma, o Panteão Romano, entre outros diversos monumentos, onde foram utilizados materiais pétreos artificialmente aglomerados (concretos e argamassas) que apresentam um comportamento notável, não só mecânico, como em termos da durabilidade (PINTO 2006). A durabilidade do concreto é uma preocupação fundamental na infraestrutura civil, pois é fortemente dependente das interações do material com o meio ambiente, e determina o desempenho durante a vida útil (BADAR *et al.*, 2014). Segundo Mehta e Monteiro (2008), os projetistas de estruturas de concreto armado apresentam muito interesse pelas características de resistência do material, contudo, é necessário que se tenha consciência da sua durabilidade.

De acordo com o ACI Committee 201 *apud* Mehta e Monteiro (2008), a durabilidade do concreto de cimento Portland é definida como sua capacidade de resistir à ação de intempéries, ataque químico, abrasão, ou qualquer outro processo de deterioração, ou seja, um concreto durável preservará sua forma, qualidade e capacidade de uso originais quando exposto ao ambiente de uso para o qual foi projetado.

Conforme Bertolini (2010), um elemento de construção sofre uma decadência progressiva do seu desempenho em função dos efeitos do ambiente em que se

encontra inserido. Dentre as ações impostas pelo ambiente, destacam-se as ações químicas, transporte nos materiais porosos, variações de umidade, variações de temperatura e ações expansivas.

- **Ações químicas:** interação química que ocorre entre o material e as substâncias presentes no ambiente, como por exemplo a corrosão das armaduras e o ataque por sulfato ao concreto;

- **Transporte nos materiais porosos:** substâncias agressivas, tanto no estado gasoso como líquido, podem penetrar através dos poros do concreto e agredir o material tanto na sua superfície quanto internamente. Dentre os principais mecanismos que permitem o transporte destacam-se a permeabilidade e a absorção capilar;

- **Variações de umidade:** variações de umidade geradas pela exposição ao ambiente podem provocar variações dimensionais do concreto, gerando tensões internas, podendo degradar o material;

- **Variações de temperatura:** assim como a variação de umidade, podem provocar variações dimensionais nos materiais que compõem o concreto, gerando tensões internas que podem danificar o material; e

- **Ações expansivas:** podem ser de natureza física ou química que geram ações expansivas no interior do material, podendo danificar sobretudo os materiais porosos e frágeis.

Neste tocante, Mehta e Monteiro (2008) afirmam que as causas mais usuais de deterioração das estruturas de concreto de cimento Portland, em ordem decrescente de importância, são a corrosão de armaduras, exposição aos ciclos de congelamento e degelo e o ataque por sulfatos, e em cada uma das causas de deterioração a água está presente, e a facilidade com que penetra nos sólidos porosos determina a taxa de deterioração do material e sua durabilidade. Bertolini (2010) também complementa que, normalmente, os danos no concreto iniciam-se na superfície e avançam progressivamente para o interior do material.

### 2.3.1 Agressividade das águas

A água, em suas variadas formas, é o mais abundante fluido na natureza, possuindo partículas pequenas que penetram em cavidades ou poros muito finos.

Como solvente, a água se destaca por dissolver muito mais substâncias do que outros fluidos, sendo também muito conhecida por provocar rupturas e o surgimento de altas tensões internas nos materiais devido a variações volumétricas (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

De acordo com Cánovas (1988), a água, quando não contém substâncias nocivas, é um bom aliado do concreto, especialmente durante sua fase de cura, entretanto, em idades mais avançadas, sendo pura ou com substâncias químicas dissolvidas, torna-se grande inimiga do concreto.

As águas puras degradam o concreto devido ao seu grande poder de dissolução, quando correm constantemente pelo concreto tendem a dissolver lentamente os compostos à base de cálcio. Em um primeiro momento são lixiviados os hidróxidos de cálcio do concreto, mas posteriormente, são também atacados outros constituintes, com possíveis efeitos negativos sobre a resistência mecânica (BERTOLINI, 2010). O produto lixiviado interage com o CO<sub>2</sub> presente no ar e forma uma crosta esbranquiçada de carbonato de cálcio, também chamado de eflorescência (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Cánovas (1988) e Bertolini (2010) descrevem que as águas ácidas e salinas degradam o concreto pelo ataque aos constituintes alcalinos pela dissolução ou por transformação dos componentes em sais solúveis, que posteriormente são eliminados por lixiviação ou pela formação de novos componentes, principalmente em componentes com maior teor de cal.

Mehta e Monteiro (2008) afirmam que as águas ácidas, podem ser consideradas agressivas, pois causam o desequilíbrio químico no concreto e levam a uma redução da alcalinidade da solução dos poros, desestabilizando os produtos de hidratação dos materiais cimentícios. A taxa de ataque químico será dada em função do pH do agente agressivo e da permeabilidade do concreto, contudo, quando o concreto apresenta baixa permeabilidade e o pH do agente agressivo é superior a 6, a taxa de degradação é lenta demais para ser considerada.

As águas salinas, com destaque para as águas do mar, possuem em sua composição sais de cloretos e sulfatos que solubilizam a pasta endurecida dos concretos de cimento Portland (CANOVAS, 1988). Bertolini (2010) informa que a quantidade de sais dissolvidos da água do mar é de 35 g/L em média, podendo mudar, sobretudo em mares fechados.

### 2.3.2 Permeabilidade

A permeabilidade é o mecanismo pelo qual um fluido, um gás, ou um líquido penetram à uma taxa de fluxo através dos poros do material. Bauer (2000) afirma que o concreto é um material obrigatoriamente poroso, com vazios geralmente interligados e permeável à líquidos e gases.

Bertolini (2010) descreve que a durabilidade de uma estrutura, ou seja, a resistência à ação dos agentes agressivos, depende fundamentalmente das propriedades do concreto, sobretudo a capacidade de bloquear sua penetração. Como a água é evaporável, passível de congelamento e também livre para movimentos internos, um concreto não será vulnerável a fenômenos destrutivos relacionados à água se houver pouca ou nenhuma água evaporável internamente após a secagem ou se a exposição subsequente não causar a ressaturação dos poros (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), Bauer (2000) e Bertolini (2010), dentre os diversos fatores que influenciam na porosidade do concreto destacam-se os seguintes:

- **Relação água/cimento:** é um dos principais fatores que influenciam na porosidade de um concreto. Sabe-se que concretos com maior fator água/cimento apresentam maior porosidade devido aos vazios deixados pela água de amassamento que reage ou evapora do material após a cura;

- **Tipo de cimento e adições:** concretos com menor dimensão do agregado e com adições minerais podem diminuir a porosidade do material e diminuir a penetração de agentes agressivos no concreto. O aumento da dimensão dos agregados aumenta consideravelmente a permeabilidade do concreto, devido ao aumento das microfissuras existentes entre o agregado e a pasta de cimento;

- **Cura:** processos de cura inadequados impedem a hidratação eficaz do concreto e provocam um aumento na porosidade;

- **Teor de cimento:** o aumento do teor de cimento permite uma maior adição de água na massa e ganho de trabalhabilidade, contudo, pode favorecer a fissuração;

- **Aditivos:** os aditivos superfluidificantes são importantes para a trabalhabilidade e a diminuição do fator água/cimento do concreto, conseqüentemente, diminuindo a porosidade do material;



- **Resistência à compressão:** concretos com maiores resistências possuem restrições quanto à utilização de água na mistura, diminuindo a porosidade da estrutura; e

- **Adensamento:** concretos devidamente adensados apresentam uma diminuição significativa em sua permeabilidade e maior durabilidade.

Portanto, concretos adequadamente dosados, lançados e curados tendem a possuir uma permeabilidade menor e, conseqüentemente, uma maior durabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

### 2.3.3 Ciclos de gelo-degelo

A resistência de um concreto ao gelo-degelo é avaliada pelo número de ciclos de gelo e degelo que podem ser suportados antes de se atingir um determinado nível de degradação, assumindo, normalmente, como índices de degradação a perda de massa ou a diminuição do módulo de elasticidade dinâmico (BERTOLINI, 2010).

Cánovas (1988) e Bertolini (2010) afirmam que concretos já endurecidos ou em grau avançado de endurecimento terão efeitos muito pequenos devido às baixas temperaturas, especialmente se for compacto e resistente, ou seja, com baixa porosidade. Entretanto, concretos porosos tendem a absorver água e, em caso de congelamento, ela terá um aumento de volume, exercendo consideráveis tensões de tração no interior do concreto. A expansão volumétrica da água congelada pode chegar a 9%, devendo ser absorvida pelos poros não saturados do concreto para que não ocorra a degradação do material. Para tal propriedade, é muito comum a utilização de aditivos incorporadores de ar, que criam poros não interconectados, impedindo a absorção de água e formando câmaras de expansão para o congelamento, embora afetem a resistência mecânica do material. Os danos provocados pela ação do congelamento são fissuras, deslocamentos e a desagregação, afetando a durabilidade e a resistência mecânica do material.

As ações do calor no concreto armado podem ser de duas fontes, as ações naturais produzidas pelo ambiente ao longo de sua vida útil ou a devidas a ação do fogo ou incêndio. As variações de temperatura naturais têm pouca influência sobre o concreto graças a grande inércia térmica que ele possui e faz com que, quando a peça é grande, suas regiões internas não absorvam tal variação. Já a ação de incêndio em

uma estrutura pode provocar a destruição total da mesma, caso as temperaturas cheguem a ultrapassar 450 °C, para isso devem ser utilizados materiais resistentes ao fogo (CÁNOVAS, 1988).

Segundo o mesmo autor, quando um concreto é submetido à ação do fogo, seus componentes sofrem alterações importantes, assim a água livre ou capilar presente no concreto começa a evaporar a partir de 100 °C, retardando desta forma o aquecimento do mesmo. Entre os 200 e 300 °C, a perda da água capilar é completa, sem que se aprecie ainda alteração na estrutura do cimento hidratado e sem que as resistências diminuam de forma considerável. De 300 a 400 °C provoca-se a perda de água do gel do cimento, ocorrendo uma sensível diminuição das resistências e aparecendo as primeiras fissuras no concreto. Aos 400 °C, parte do hidróxido de cálcio da hidratação dos silicatos se transforma em cal viva e até os 600 °C, os agregados e o aço se expandem diferencialmente, gerando tensões internas que começam a desagregar o concreto. Bertolini (2010) diz que as modificações microestruturais do concreto submetido à altas temperaturas não se limitam às características mecânicas do concreto e do aço, podendo se observar um aumento na porosidade e da permeabilidade da pasta de cimento.

#### **2.3.4 Ataque por sulfatos**

Os íons sulfato podem penetrar no concreto quando este está em contato com águas ou solos nos quais estão dissolvidos tais íons. Quando os sulfatos reagem com os componentes da matriz cimento, geram produtos expansivos que podem provocar desagregações, deslocamentos, fissuras, aumento da permeabilidade e a diminuição da resistência mecânica (BERTOLINI, 2010).

A maioria dos solos contém sulfato de cálcio, de magnésio, de sódio e de potássio em suas águas subterrâneas. O sulfato de amônia está presente frequentemente em terras e águas agrícolas. Efluentes de fornos e da indústria podem conter ácido sulfúrico. A decomposição de matéria orgânica em pântanos, lagos rasos, poços de mineração e tubos de esgoto tendem a formar ácido sulfúrico pela ação bacteriana. Chuvas ácidas, além de conterem pH muito baixo, podem ter sulfatos como poluentes. Desta forma, observa-se que não é raro encontrar concentrações de sulfato potencialmente deletérias ao concreto em diversas condições e ambientes (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Destaca-se também a água do mar como um dos

principais agentes agressivos que possuem sulfatos em sua composição. A água do mar possui sulfato de cálcio, de magnésio, de sódio e de potássio, que são altamente agressivos ao concreto, tendo seus efeitos amplificados pela presença de cloretos (CÁNOVAS, 1998).

De acordo com Cánovas (1988), o aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) e as fases presentes no cimento Portland hidratado que contém alumina são mais vulneráveis ao ataque por íons de sulfato e podem trazer piores consequências sob a ação das águas sulfatadas. Isto ocorre pela formação de sulfoaluminato tricálcico (etringita) que é expansivo e pode ter seu volume aumentado em até 2,5 vezes. Mehta e Monteiro (2008) descrevem que a gipsita também pode ser formada dependendo do tipo de cátion associado à solução de sulfato ( $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ), causando a expansão e a geração de tensões internas. O ataque por sulfato de magnésio é considerado como o ataque mais agressivo ao concreto, visto que a conversão de hidróxido de cálcio em gipsita devido aos sulfatos é acompanhada pela formação da brucita (hidróxido de magnésio insolúvel), que pode reduzir a alcalinidade do sistema e afetar a estabilidade do gel C-S-H do concreto.

A dimensão do ataque depende tanto do teor de sulfatos no solo e na água em contato com o concreto, como das características do concreto, sendo mais severa em altas concentrações de sulfatos. Uma baixa permeabilidade do concreto é a melhor defesa contra esse tipo de ataque, neste caso recomenda-se a utilização de cimentos com baixa quantidade de hidróxido de cálcio, um conteúdo de aluminato tricálcico inferior a 5%, adições minerais (adição de escória de alto-forno ou pozolanas), baixa permeabilidade, baixa relação água/cimento e executados com espessuras de cobrimentos conforme indicações normativas (BERTOLIN, 2010; CÁNOVAS, 1988; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

### **2.3.5 Corrosão de armaduras**

A corrosão é definida como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos. A deterioração causada pela interação físico-química entre o material e o seu meio representa alterações prejudiciais indesejáveis, tais como desgaste, variações químicas ou modificações estruturais, tornando-o inadequado para o uso (GENTIL, 2011).

De acordo com Cánovas (1988) e Cascudo (1997), a corrosão dos materiais metálicos pode ser classificada em química e eletroquímica. Na corrosão química, ou também conhecida por corrosão seca, o material reage com os gases do ambiente formando uma película de óxido homogênea sobre as superfícies metálicas. De forma geral, a corrosão química é um processo lento e não provoca deterioração substancial, exceto quando em contato com gases altamente agressivos. Já a corrosão eletroquímica ou aquosa é o tipo de corrosão que traz os maiores problemas aos metais, em especial às obras civis. Trata-se de um ataque de natureza eletroquímica que ocorre em meio aquoso como resultado da formação de uma pilha eletroquímica e um eletrólito, apresentando diferenças de potencial entre as regiões da superfície do metal.

Bauer (2000) descreve que em ambos os tipos de corrosão o metal perde elétrons às substâncias oxidantes do ambiente. Entretanto na corrosão química os elétrons perdidos se combinam no mesmo lugar onde são produzidos, já na corrosão eletroquímica os elétrons se movimentam entre as regiões do material com potenciais elétricos diferentes.

Portanto, ao se introduzir um metal em um eletrólito, ou seja, meio aquoso contendo íons, há uma evolução entre os potenciais eletroquímicos do metal e do meio em que está inserido no sentido da estabilização, buscando o equilíbrio através de reações de redução e oxidação. Contudo, se em um certo eletrólito existirem imersos dois metais com potenciais distintos, e esses forem ligados através de um condutor metálico, ocorrerá a passagem espontânea de elétrons entre os metais a partir do condutor, no sentido do metal mais eletronegativo para o menos eletronegativo, formando assim uma corrente elétrica e conseqüentemente uma pilha eletroquímica (CASCUDO, 1997).

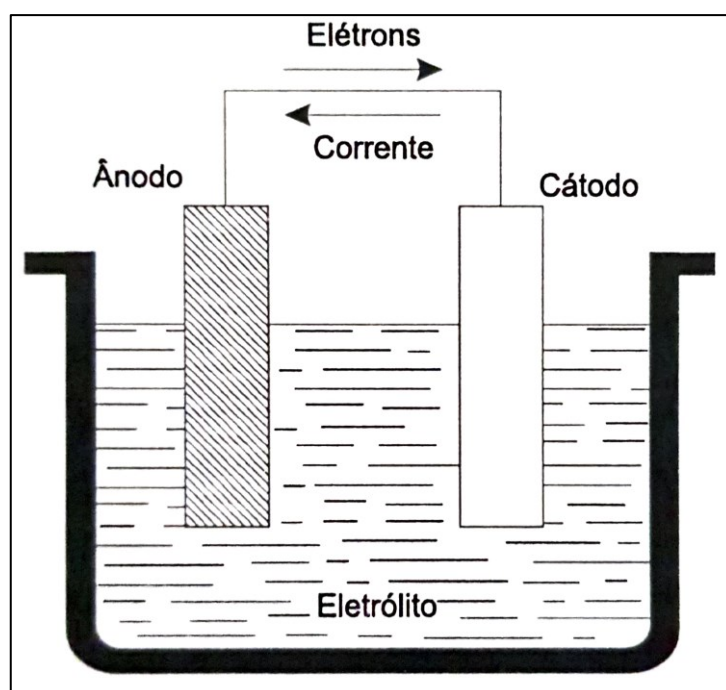
Gentil (2011) explica que para ocorrer a formação de uma pilha eletroquímica, com fluxo de elétrons ou corrente, é necessário a existência de um circuito elétrico completo, que se torna assim, um circuito de corrosão. O circuito completo é constituído pelos seguintes componentes:

- Ânodo:** eletrodo em que há oxidação (corrosão) e onde a corrente, na forma de íons metálicos positivos, entra no eletrólito;
- Eletrólito:** condutor (usualmente um líquido) contendo íons que transportam a corrente para o cátodo;
- Cátodo:** eletrodo em que há redução e onde a corrente sai do eletrólito;

•**Circuito metálico:** ligação entre o ânodo e o cátodo, por onde escoam os elétrons, no sentido ânodo-cátodo.

Desta forma, o ânodo, que é o material mais eletronegativo, cede elétrons para o cátodo, sofrendo assim oxidação ou também chamada de dissolução do metal. Já o cátodo recebe os elétrons provenientes do ânodo, formando uma deposição catódica, que nada mais é que os produtos finais do processo de corrosão, gerando um aumento de volume (CASCUDO, 1997). A Figura 4 demonstra a formação de uma pilha eletroquímica clássica.

Figura 4 – Pilha eletroquímica clássica

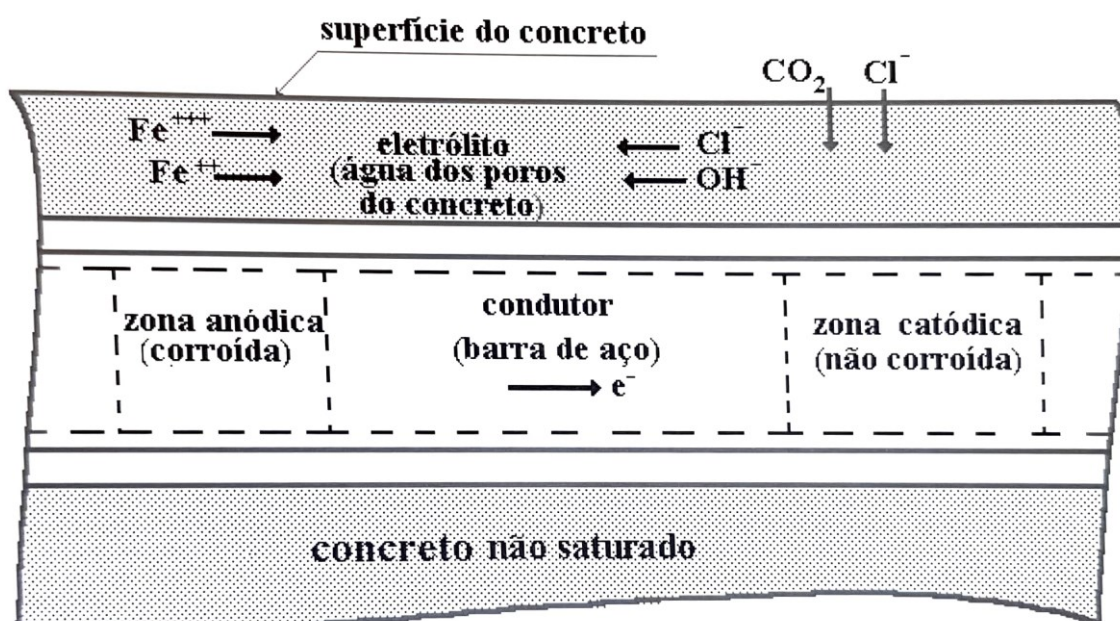


Fonte: Gentil (2003)

No concreto, a corrosão das armaduras é normalmente provocada pelo processo eletroquímico e, segundo Mehta e Monteiro (2008), os potenciais eletroquímicos que formam células de corrosão podem ser gerados de duas formas, a partir de células de composição ou células de concentração. As células de composição ocorrem quando dois metais diferentes são embutidos no concreto ou quando há variações significativas nas características superficiais do aço. Já as células de concentração se formam na vizinhança da armadura devido às diferenças na concentração de íons dissolvidos no meio, como álcalis e cloretos. Como resultado, um dos dois materiais ou algumas partes de um mesmo metal (quando apenas um

tipo de metal está presente) torna-se anódica e a outra catódica. Destaca-se também a importância da presença tanto de ar como de água na superfície do cátodo para a ocorrência da corrosão, visto que a reação anódica não progride sem que haja um fluxo de elétrons do ânodo para o cátodo. Portanto, podemos dizer que o ânodo, o cátodo e a ligação metálica são os metais embutidos no concreto e o eletrólito é o próprio concreto saturado, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Célula de corrosão do concreto armado



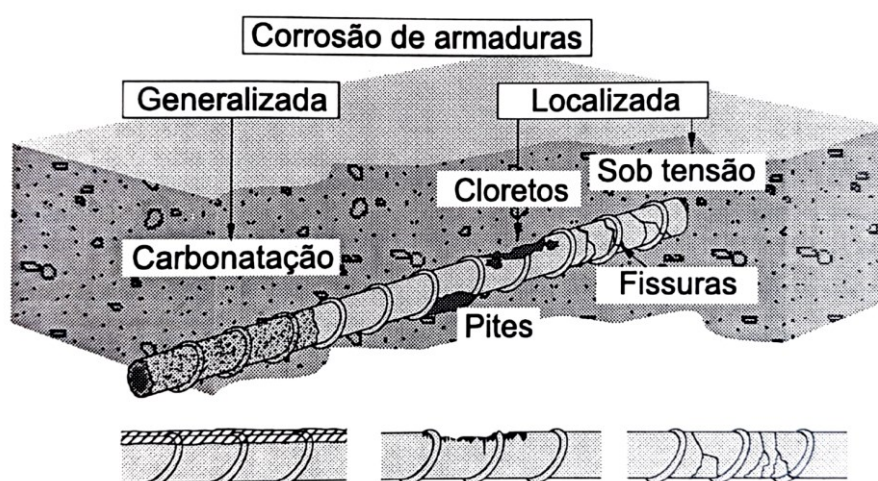
Fonte: Souza e Ripper (1998)

Em estruturas de concreto armado, a corrosão, além de deteriorar propriamente o aço, também pode afetar a estabilidade e durabilidade geral da construção, visto que a transformação do ferro metálico em produto de corrosão (ferrugem) é acompanhada pelo aumento do volume que, dependendo do estado de oxidação, pode ser da ordem de 600% em relação ao metal original, provocando a fissuração, aumentando a permeabilidade e diminuindo a resistência do concreto (GENTIL, 2011; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Segundo a morfologia, a corrosão das armaduras do concreto pode ser classificada como: corrosão generalizada, corrosão puntiforme (pites) e corrosão sob tensão fraturante. A corrosão generalizada, como o próprio nome já diz, ocorre em toda a superfície do metal. A corrosão puntiforme é um tipo de corrosão localizada, no qual há a formação de pontos de desgaste definidos na superfície metálica, os quais

evoluem aprofundando-se, podendo provocar a ruptura pontual da barra, o que a classifica como altamente agressiva. Por fim, a corrosão sob tensão, que também é do tipo localizada e ocorre concomitantemente com uma tensão de tração da armadura, podendo dar origem a propagação de fissuras (CASCUDO, 1997). A Figura 6 apresenta os três tipos de corrosão descritos.

Figura 6 – Tipos de corrosão das armaduras e fatores que os provocam



Fonte: Cascudo (1997)

Conforme explicam Mehta e Monteiro (2008), os produtos de ferro comum e de aço normalmente são cobertos por uma fina película de óxido de ferro, que se torna impermeável e fortemente aderente à superfície do aço em um meio alcalino, o que faz do aço um material passivo no tocante à corrosão, ou seja, o aço não oxidará até que a passividade tenha sido destruída. Na ausência de cloretos na solução, o filme protetor do aço é considerado estável em pH acima de 11,5. Como o cimento Portland hidratado contém uma grande quantidade de álcalis e normalmente o concreto apresenta pH superior a 12, o aço se encontrará passivado. Contudo, em certas condições, o pH do concreto pode ser significativamente reduzido, podendo destruir a passividade do aço e propiciar as condições necessárias para o processo de corrosão.

Helene (2014) informa que a perda da camada passivadora pode iniciar um processo de deterioração progressivo e auto acelerante. Os fenômenos que podem influenciar na perda da camada protetora podem ser: carbonatação, contaminação por cloretos na camada de cobrimento, fissuração, solicitações cíclicas, defeitos de execução, origem dos materiais, molhagem, secagem, fungos, fuligem, diferenças de

temperatura e meios agressivos, que além de desencadearem a despassivação do filme protetor, podem contribuir na aceleração de um processo corrosivo já iniciado.

Dentre tais fenômenos, Cascudo (1997) destaca a presença de íons cloreto no concreto e a diminuição da alcalinidade do concreto pela carbonatação como sendo os principais fatores para a corrosão das armaduras.

### 2.3.5.1 Carbonatação

A carbonatação é a transformação, de forma lenta, dos compostos do cimento hidratado em carbonatos. Ocorre, principalmente, a partir da combinação do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) presente no ar e o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$  ou C-H) do concreto, formando o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). A formação do carbonato de cálcio provoca a redução do pH do concreto para faixas de 8,5 – 9, o que possibilita a despassivação do aço e a sua corrosão. Em caso de maiores quantidades de  $\text{CO}_2$ , como em águas agressivas, é possível ocorrer a formação de bicarbonato de cálcio e conseqüentemente uma maior deterioração do concreto. Embora seu principal causador seja o gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) presente na atmosfera, pode ser causada também pelo dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) e outros gases ácidos (HELENE, 1993; GENTIL, 2011).

Segundo Andrade (1992) a dissolução da camada passivadora gerada pela frente de carbonatação causa uma corrosão de morfologia generalizada, isto é, ataca de forma uniforme toda a superfície do aço no meio despassivado.

Como o processo de carbonatação ocorre a partir da superfície exposta do concreto, a velocidade de penetração de  $\text{CO}_2$ , e conseqüentemente de carbonatação, aumenta com o crescimento da taxa de permeabilidade do concreto, aumento da quantidade de fissuras, menor conteúdo de cimento, ou devido à problemas de compactação (CÁNOVAS, 1988).

Os efeitos da carbonatação ainda podem ser agravados pelas condições de umidade do ambiente. Segundo Bertolini (2010), a máxima carbonatação se dá para uma umidade relativa entre 60% - 80%, sendo que em concretos secos ou saturados a carbonatação se torna irrelevante. A velocidade de avanço da frente carbonatação, a partir da superfície exposta do concreto, ou seja, a penetração da carbonatação pela camada de cobertura, é um processo lento e obedece a uma lei parabólica conforme a Equação 1:



$$e = k \sqrt{t} \quad (1)$$

Sendo:  $e$  = profundidade em mm,  $t$  = tempo em anos e  $k$  – constante em  $\text{mm.ano}^{-1/2}$ . A constante desta lei é função de diversos fatores relacionados à qualidade e resistência do concreto e da referida umidade ambiente (ANDRADE, 1992).

Desta forma, destaca-se a importância da espessura da camada de cobertura das armaduras que cria uma barreira física entre o aço e o ambiente externo e é capaz de retardar a despassivação do aço. A NBR 6118 (ABNT, 2014), determina a espessura mínima das camadas de cobrimentos a partir dos tipos de elementos estruturais e da classe de agressividade ambiental, variando de 20 a 55 mm para cada situação.

Por fim, embora a carbonatação seja prejudicial às armaduras, ela é benéfica para a durabilidade do concreto, pois a formação de carbonato de cálcio, insolúvel, deposita-se nos poros do concreto, vedando-os e, conseqüentemente, diminuindo a permeabilidade do concreto e aumentando a resistência mecânica (GENTIL, 2011).

### 2.3.5.2 Contaminação por cloretos

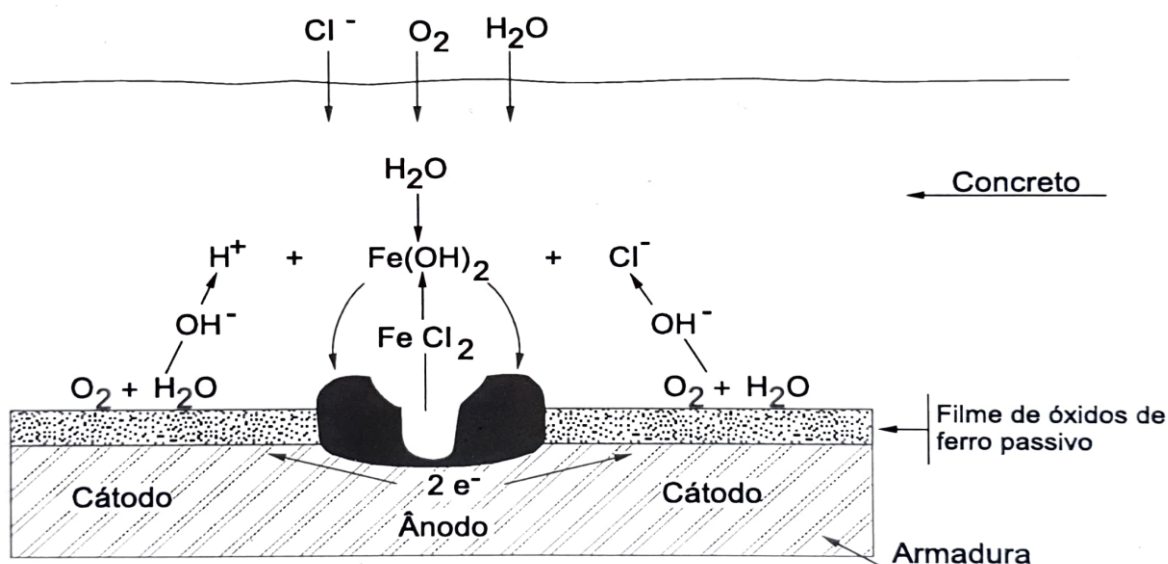
A corrosão de armaduras causada por íons cloreto é a principal causa de deterioração das estruturas de concreto armado nas regiões marítimas, principalmente nas regiões em que há a incidência de nevoa salina e ciclos de molhagem e secagem do concreto (RIBEIRO, 2009).

De acordo com Cascudo (1997), os cloretos que atingem a armadura do concreto podem ter origem externa, adentrando o concreto por difusão através dos poros existentes na peça, ou ainda já existirem no interior do concreto por contaminantes existentes na água de amassamento ou agregados ou ainda devido à aceleradores de pega que tem como base o cloreto de cálcio.

A presença de cloretos na solução de poros do concreto pode induzir a corrosão localizada, também chamada de corrosão por pites, das armaduras do concreto armado. O ataque ocorre quando a concentração de íons cloreto na solução de poros em contato com a superfície do aço atinge uma concentração para romper o filme de passividade do aço, esta quantidade é chamada de quantidade crítica de cloretos (BERTOLINI, 2010).

Na corrosão das armaduras provocada por cloretos livres no concreto, na zona despassivada concentra-se a região anódica, enquanto que nas zonas circundantes, ainda passivas, ocorre o processo catódico. Como formam-se em pequenas dimensões (pites), a modesta dimensão da zona atacada leva a uma relação muito baixa entre a superfície anódica e catódica e, portanto, a um elevado valor de densidade de corrente anódica e uma elevada velocidade de ataque. O ataque embora presente em uma pequena dimensão, pode penetrar muito rapidamente no metal (BERTOLINI, 2010). A Figura 7 ilustra o processo de corrosão por íons cloreto livres no concreto armado.

Figura 7 – Esquema demonstrando a corrosão por cloretos (pites)



Fonte: Cascudo (1997)

A penetração dos cloretos do ambiente no concreto normalmente é caracterizada por um elevado teor na superfície externa e teores decrescentes a maiores profundidades. Cascudo (1997) descreve que os mecanismos de transporte que levam ao movimento e concentração iônica dos cloretos no concreto são a absorção capilar, difusão iônica, permeabilidade e migração iônica. Neste sentido, a interconexão dos poros, que determina a porosidade aberta e a distribuição do tamanho de poros, descreve a possibilidade e a velocidade de transporte de cloretos no concreto.

- **Absorção:** tal fenômeno é motivado por tensões capilares, que ocorrem imediatamente após o contato superficial do líquido com o substrato. A absorção capilar, portanto, é dependente da porosidade aberta, isto é, dos poros

interconectados entre si, permitindo o transporte de substâncias líquidas contaminadas para o interior do concreto. Pelo processo de absorção, a solução com cloretos pode penetrar vários milímetros em poucas horas;

- **Difusão iônica:** na região interna do concreto, onde a umidade é mais elevada, o transporte se dá por difusão em meio aquoso. A difusibilidade iônica ocorre devido à gradientes de concentração iônica, seja entre o meio externo e interno, seja dentro do próprio concreto. Estas diferenças nas concentrações suscitam o movimento dos íons em busca do equilíbrio.

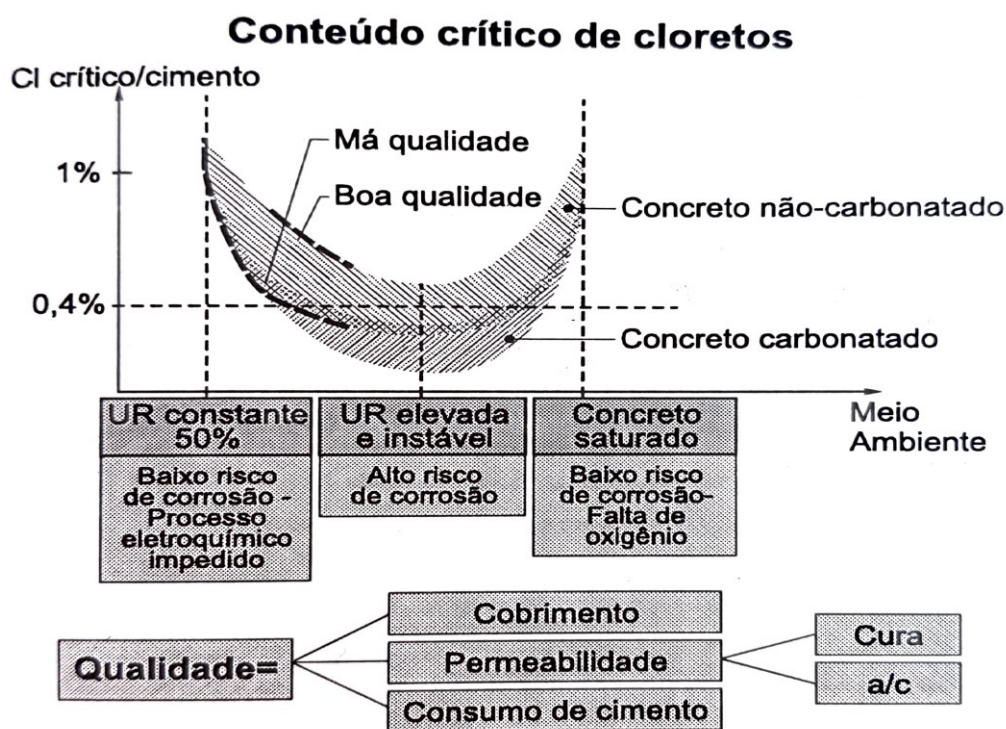
- **Permeabilidade:** como está relacionada à interconexão de poros no interior do volume de concreto, ela é fundamental para que haja o transporte iônico, via penetração de substâncias líquidas; e

- **Migração iônica:** ocorre pela ação de campos elétricos. No concreto a migração pode se dar pelo próprio campo gerado pela corrente elétrica do processo eletroquímico, como também pode ser oriundo de campos elétricos externos, como por exemplo ao empregar a técnica de proteção catódica para o controle da corrosão.

Bertolini (2010) ainda diz que a penetração de cloretos também é influenciada pela sua interação com os produtos de hidratação, já que os cloretos podem ser adsorvidos no gel C-S-H ou podem reagir quimicamente com os compostos de cimento, como por exemplo os aluminatos. Portanto, o aumento de aluminatos, e pozolanas ou escórias, favorece uma interação dos cloretos e diminui a quantidade de íons livres na mistura, diminuindo, conseqüentemente, a penetração.

De acordo com Cánovas (1988), a quantidade crítica de cloretos no concreto depende do tipo de cimento utilizado, da presença de umidade e da quantidade de íons livres na mistura, ou seja, que não se encontram combinados com os componentes do cimento. A quantidade crítica de íons cloro é de 0,6% da massa de cimento da mistura para concreto fresco, e valores menores, de 0,4%, para o concreto endurecido. A Figura 8 expressa o teor crítico de cloreto em função da qualidade do concreto e da umidade ambiental.

Figura 8 – Esquema de variação do conteúdo crítico de cloretos em função da qualidade do concreto e da umidade relativa ambiental



Fonte: Cascudo (1997)

### 2.3.5.3 Efeito de macropilha (ânodo incipiente)

Cascudo (1997) descreve que as macropilhas, ou macrocélulas, são pilhas nas quais as áreas anódicas e catódicas se encontram consideravelmente afastadas umas das outras, enquanto que nas micropilhas ou microcélulas, as distâncias entre os ânodos e cátodos são microscópicas. As corrosões provocadas pela carbonatação e pelo ataque de cloretos ocorrem predominantemente pela formação de micropilhas, contudo, as regiões vizinhas às micropilhas, que não foram atacadas, poderão se tornar cátodos de um novo sistema eletroquímico, podendo provocar a corrosão por macropilhas.

As macropilhas em armaduras de concreto podem ser originadas por um ou pela combinação de vários fatores, como a heterogeneidade do eletrólito (diferença de pH, concentração salina diferenciada, etc.); heterogeneidade do metal (impurezas na matriz metálica, tensões residuais, contornos de grãos, etc.) e contato elétrico entre metais com potenciais eletroquímicos diferentes (RIBEIRO, 2009).

## 2.4 REPARO ESTRUTURAL COM ARGAMASSAS

Fundamentalmente, durante a execução da estrutura, uma das formas de proteger as armaduras e diminuir a probabilidade de corrosão é aumentar a classe de resistência do concreto, o tempo de cura úmida, diminuir a relação água/aglomerante e atender as espessuras de cobrimento mínimo das armaduras estabelecidas por normas (ISAIA, 2007). Contudo em concretos que já se encontram em processo de corrosão ou que necessitam a restituição de sua homogeneidade, é necessário realizar o reparo estrutural. O sistema de reparo é um conjunto de materiais e técnicas aplicados desde a interface com o concreto de substrato até o acabamento de proteção final do elemento reparado.

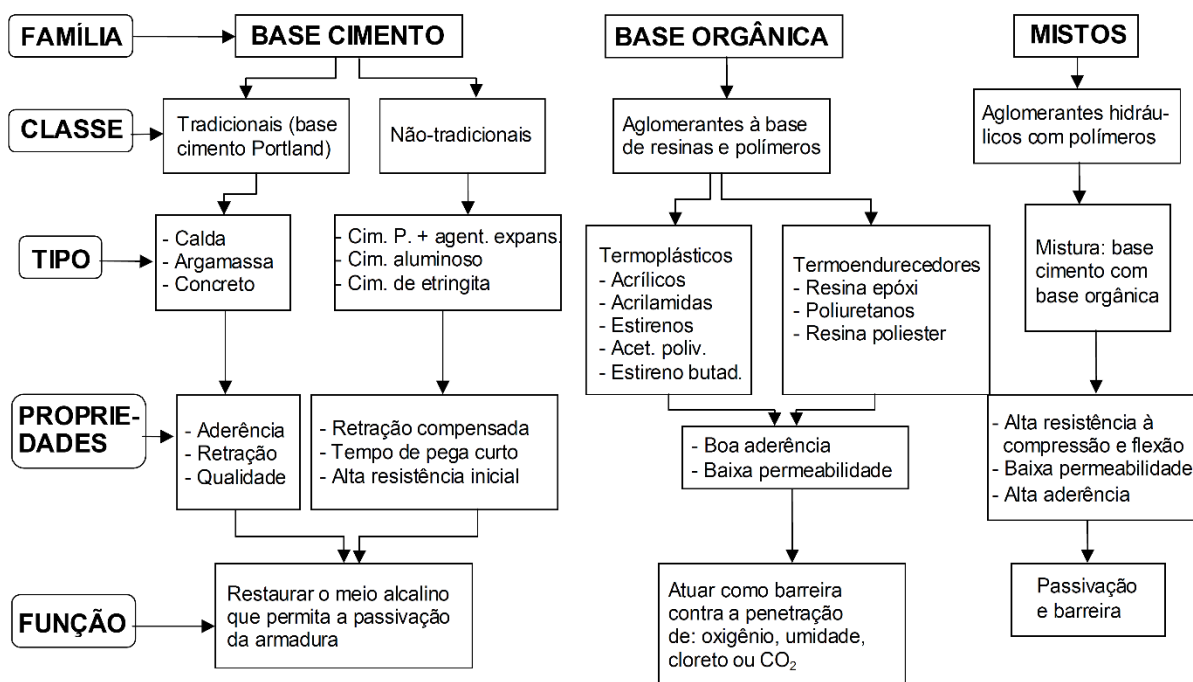
Os reparos localizados consistem em expor a armadura nos trechos corroídos e proceder o tratamento das barras, com posterior reconstituição da seção do concreto (CASCUDO, 1997). A reconstituição da seção de concreto pode ser realizada utilizando-se de concretos ou argamassas. Em reparos superficiais de elementos de concreto armado utiliza-se de argamassas de reparo, principalmente para os casos em que o que está deteriorado é a camada de cobrimento das armaduras (SOUZA; RIPPER, 1998). A argamassa utilizada dependerá da natureza do serviço e, segundo Andrade (1992), as mais utilizadas são à base de cimento, de base polimérica ou de resina e mistas e suas propriedades são apresentadas na Figura 9.

- **Argamassa de base de cimento:** em quase todos os casos, contêm diversos aditivos que melhoram as suas propriedades como retração, exsudação, tempo de pega, consistência e outras. Estes materiais à base de cimento devem restaurar o meio alcalino que permita a repassivação da armadura;

- **Argamassa de base orgânica:** têm composição muito variada e as mais comuns são constituídas de resinas epóxi, resinas poliéster, base poliuretano e base acrílica. Elas atuam como uma barreira contra a penetração de oxigênio, umidade, cloretos ou CO<sub>2</sub>; e

- **Argamassas mistas:** são produzidas a partir de misturas das duas anteriores e atuam como passivantes e como barreira.

Figura 9 – Tipos de argamassas de reparo e principais propriedades



Fonte: Andrade (1992)

Segundo Emmons *et al.* (1994), a compatibilidade entre o reparo e o substrato pode ser definida como o equilíbrio das propriedades físicas, químicas e eletroquímicas e dimensionais entre o reparo e o substrato. Deve permitir que o reparo resista a todas as tensões causadas pelas variações de volume e aos efeitos químicos e eletroquímicos, sem deteriorar-se, num meio específico, num determinado período de tempo. Desse modo, os materiais de reparo devem possuir os seguintes requisitos:

- **Compatibilidade estrutural:** engloba fatores físicos como aderência, resistência à compressão, resistência à flexão, deformação lenta e módulo de elasticidade similares ao substrato;

- **Compatibilidade de deformações:** os reparos devem ter baixa retração por secagem e ter coeficiente de dilatação térmica compatível com o substrato;

- **Compatibilidade à agressividade ambiental:** a baixa porosidade e a estabilidade química são importantes para que o reparo resista a microclimas agressivos; e

- **Compatibilidade eletroquímica:** o reparo deve provocar o mínimo de desequilíbrio de potencial eletroquímico na armadura, em decorrência de diferenças entre os meios proporcionados pelo reparo e o concreto da estrutura.

Cascudo (2009) ainda explica que tais argamassas, dependendo das circunstâncias do reparo, devem apresentar tixotropia adequada para a aplicação, devendo ser mais ou menos fluídas dependendo da forma e das dimensões da área a ser reparada.

Embora o reparo estrutural seja muito efetivo para combater a corrosão instalada no concreto armado, Ribeiro (2009) descreve que o mesmo pode induzir processos corrosivos nos trechos adjacentes das barras de aço no concreto original (substrato), principalmente por três mecanismos: corrosão por microcélulas, por pites e por macrocélula, esta última decorrente de concentração diferencial de elementos alcalinos entre a região do reparo e o concreto original adjacente.

A corrosão por micropilha gerada pela aplicação de material de reparo ocorre quando o substrato do reparo é um concreto carbonatado, no qual a alcalinidade decorrente da atividade catódica já foi perdida pela diminuição significativa da produção de íons hidroxila ( $\text{OH}^-$ ). Ao aplicar-se um material de reparo com excesso destes íons, que são responsáveis pela manutenção do pH elevado, os mesmos são transportados, por difusão, para as áreas vizinhas, com menor concentração de  $\text{OH}^-$ . Em seguida, são gradativamente consumidos pela carbonatação do concreto, causando perda de alcalinidade e a consequente despassivação do aço.

No caso de substrato contaminado por íons cloreto, a elevação do potencial eletroquímico da armadura, após a execução do reparo, pode ultrapassar o seu potencial de pite, criando-se, assim, condições de se estabelecer um processo corrosivo. Desse modo, a corrosão no substrato, em ambos os casos, carbonatado ou contaminado por cloreto, pode tornar-se significativa e ser agravada pela corrosão por macrocélula, induzida pela incompatibilidade eletroquímica entre o reparo e o substrato.

A corrosão por macrocélulas em reparos localizados ocorre devido a incompatibilidade eletroquímica entre o material de reparo e o concreto original, quando este se encontra carbonatado ou contaminado por cloreto. Nos casos usuais, não é viável a remoção completa do concreto carbonatado da estrutura a ser reparada, desta forma, parte da armadura que está imersa no concreto carbonatado (no substrato), adjacente ao reparo, perde a polarização catódica que lhe era proporcionada pela atividade anódica contígua, antes do reparo. Em seu estudo, o autor avalia as tendências de corrosão por macrocélulas da seguinte forma:

- Quando a diferença de potencial entre o trecho da barra no interior do material de reparo e o trecho da barra no substrato de concreto for menor que 50 mV, a tendência à formação de macrocélula de corrosão será desprezível;
- Quando a diferença de potencial entre o trecho da barra no interior do material de reparo e o trecho da barra no substrato de concreto estiver entre 50 mV e 200 mV, a possibilidade de formação de macrocélula de corrosão será moderada; e
- Quando a diferença de potencial entre o trecho da barra no interior do material de reparo e o trecho da barra no substrato de concreto for maior que 200 mV, a possibilidade de formação de macrocélula de corrosão será alta.

Desta forma, observa-se que diversas argamassas podem ser utilizadas para reparos estruturais, o que deve ser determinado a partir das propriedades necessárias para o reparo, seja a repassivação das armaduras, a restituição da homogeneidade do elemento, o preenchimento de cavidades, dentre outras. Em casos particulares, a proteção à longo prazo das argamassas pode ser melhorada com proteções específicas, voltadas para prolongar o tempo de iniciação e o tempo de propagação da corrosão nas áreas reparadas, como é o caso da aplicação de tratamentos superficiais na superfície do concreto, aplicação de revestimento das armaduras e a aplicação de inibidores de corrosão diretamente na mistura das argamassas (BERTOLINI, 2010).

## 2.5 APLICAÇÃO DE GEOPOLÍMEROS EM REPAROS ESTRUTURAIIS

Nos últimos anos é crescente o número de trabalhos que buscam avaliar a durabilidade de materiais geopoliméricos, contudo ainda são poucos os trabalhos que avaliam a aplicabilidade de argamassas geopoliméricas em reparos estruturais em elementos de concreto armado. A avaliação da utilização de materiais geopoliméricos como argamassa de reparo estrutural deve levar em conta diversos fatores como a resistência mecânica, durabilidade e compatibilidade com o substrato e as armaduras.

Alguns estudos apontados por Tennakoon *et al.* (2017) realizados em amostras de concreto armado expostos à ambientes marinhos mostraram que o desempenho de corpos de prova de concreto geopolimérico é comparável aos de concreto de cimento Portland em relação à corrosão das armaduras. Kriven *et al.* (2009) e Rostami *et al.* (2015) descobriram que a aplicação de um revestimento



argamassado à base de geopolímero em corpos de prova de concreto armado reduziu significativamente a taxa de corrosão do aço em testes acelerados de corrosão. Al-Majidi *et al.* (2018) também observaram uma redução relevante no efeito da corrosão das armaduras e um aumento na resistência mecânica de vigas de concreto armado de cimento Portland reparadas com argamassa geopolimérica. Aguirre-Guerrero *et al.* (2017) sugerem que os geopolímeros podem ser usados como revestimentos protetores para concretos expostos a cloretos.

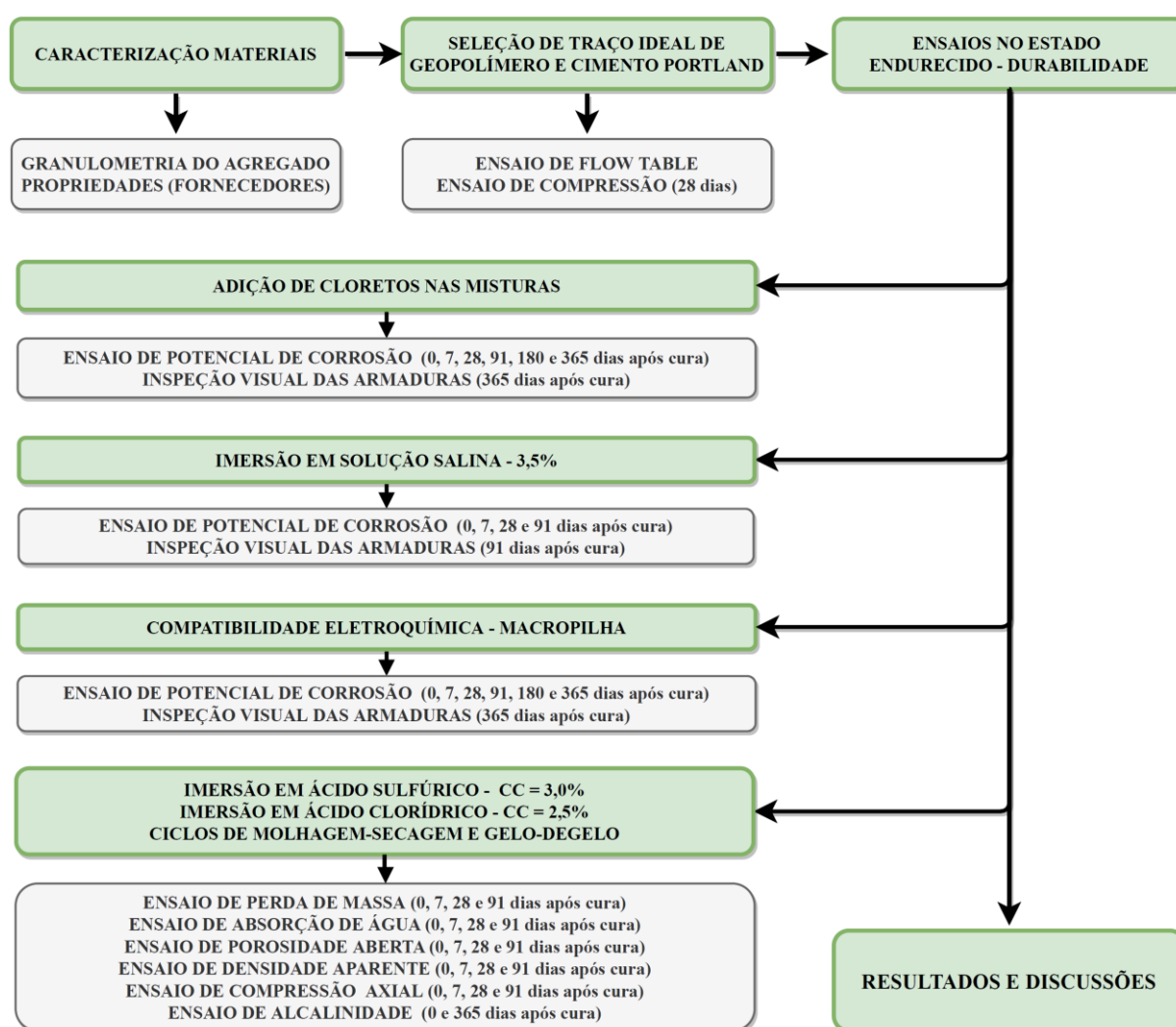
Em relação a compatibilidade e aderência do geopolímero ao substrato, capeamentos com geopolímeros realizados por Aguirre-Guerrero *et al.* (2017) indicaram uma forte adesão no substrato de concreto de cimento Portland. A união de dois materiais com diferentes alcalinidades também pode provocar incompatibilidades eletroquímicas entre o concreto armado e a argamassa de reparo, podendo provocar a corrosão das armaduras pelo efeito de macropilha que ocorre por diferenças de potencial eletroquímico ao longo das armaduras (GU *et al. Apud* AL-MAJIDI *et al.*, 2018). Portanto, para não gerar os referidos efeitos de macropilha nos elementos a serem reparados, é necessário utilizar materiais com alcalinidade compatível.

Bhutta *et al.* (2019) ainda avaliam a incorporação de vários tipos de fibras em argamassas geopoliméricas para reparos estruturais, demonstrando dentre outras, melhora na trabalhabilidade e resistência mecânica das argamassas estudadas.

### 3 METODOLOGIA

O programa experimental foi conduzido com o objetivo de avaliar propriedades de durabilidade de uma argamassa geopolimérica à base de Metacaulim (GEO), compará-las com as propriedades de uma argamassa similar de cimento Portland convencional (OPC – *Ordinary Portland Cement*) e avaliar a aplicabilidade da argamassa geopolimérica proposta em reparos estruturais. O esquema da caracterização dos materiais e ensaio das amostras é apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Esquema de caracterização das matérias primas e ensaios

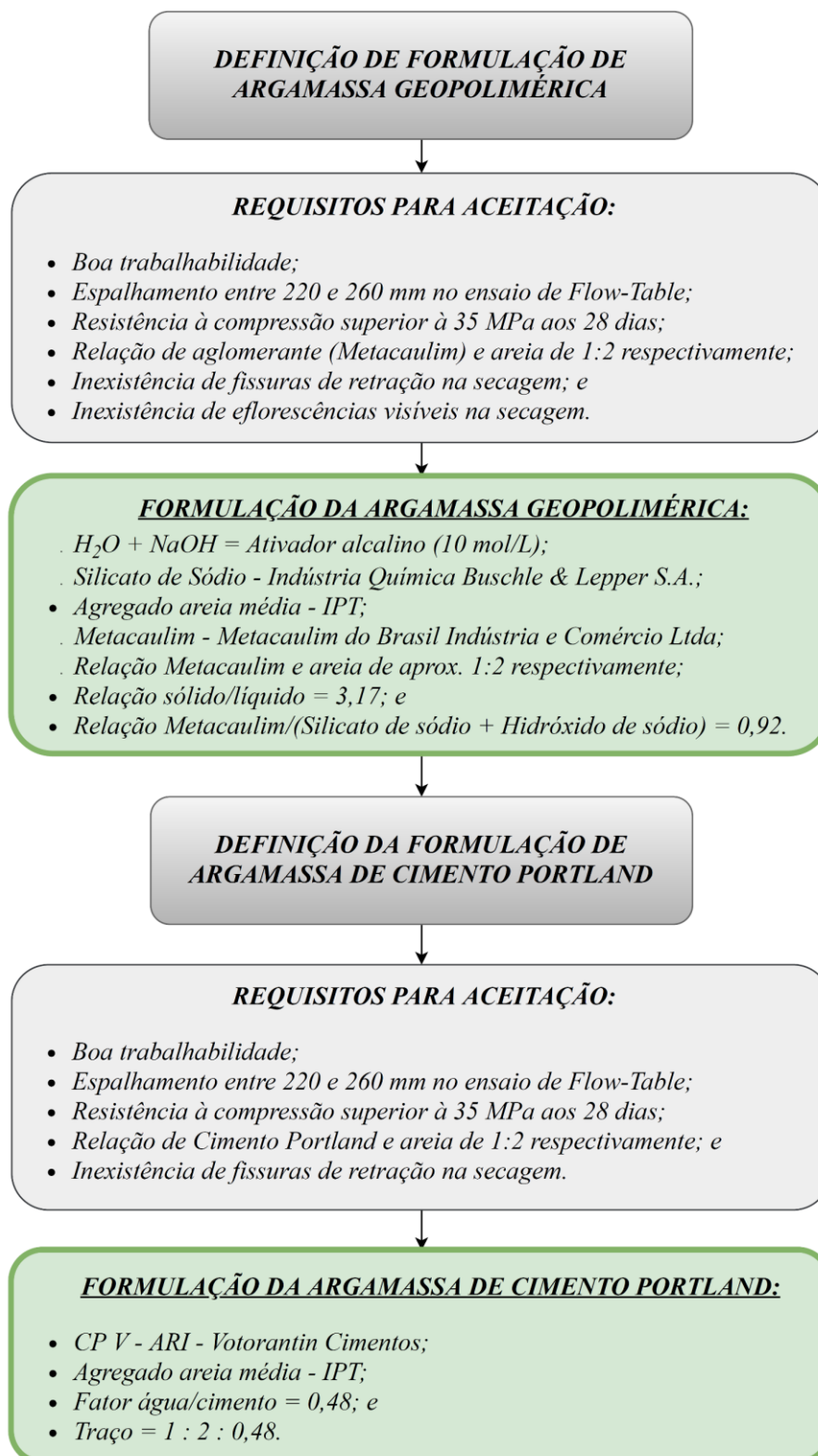


Fonte: Autor (2021)

A definição da formulação das argamassas é apresentada na Figura 11. Inicialmente, buscou-se determinar um traço de argamassa geopolimérica que atendesse aos requisitos apresentados na referida figura e a aplicação pretendida. Após a determinação do traço de argamassa geopolimérica foi determinada uma

formulação compatível de argamassa de cimento Portland que atendesse aos mesmos requisitos da argamassa geopolimérica e se assemelhasse na sua formulação, na trabalhabilidade e resistência mecânica.

Figura 11 – Determinação das formulações das argamassas



Fonte: Autor (2021)

Os corpos de prova foram produzidos e ensaiados no Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável (Labicons) e no Laboratório Multidisciplinar de Física e Química da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em Joinville, na empresa Ad Fiducia Avaliações e Perícias de Engenharia e na empresa Sollos Ville.

No total, foram produzidos 117 corpos de prova para avaliar propriedades mecânicas e de durabilidade no estado endurecido. Deste total, 48 corpos de prova eram cilíndricos com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm, sendo a metade deles de argamassa geopolimérica e a outra metade de argamassa de cimento Portland. Também foram produzidos 3 corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm preenchidos na metade inferior da altura com argamassa de cimento Portland e a metade superior com geopolímero. Os corpos de prova cilíndricos continham uma barra de aço com bitola de 5,0 mm ao centro, com cobrimento de 2,25 cm em cada face. Os outros 66 corpos de prova eram prismáticos com 40 mm x 40 mm x 40 mm, sendo a metade deles de geopolímero e a outra metade de cimento Portland. A Tabela 1 apresenta a quantidade de corpos de prova utilizados para cada ensaio realizado no estado endurecido. Cada amostra contou com três réplicas.

Tabela 1 – Ensaios e quantidade de corpos de prova

<b>Descrição/Ensaio</b>	<b>Dimensão</b>	<b>Nº. de corpos de prova</b>
Referência		3 (GEO) + 3 (OPC)
Adição de cloretos na mistura	Ø50mm x 100mm	12 (GEO) + 12 (OPC)
Imersão em solução salina	(Cilíndrico com aço Ø5,0mm)	9 (GEO) + 9 (OPC)
Compatibilidade eletroquímica		3 (GEO+OPC)
Referência		3 (GEO) + 3 (OPC)
Imersão em Ácido Sulfúrico	40x40x40mm	9 (GEO) + 9 (OPC)
Imersão em Ácido Clorídrico	(Prismáticos)	9 (GEO) + 9 (OPC)
Molhagem-secagem e gelo-degelo		9 (GEO) + 9 (OPC)
Ensaio de alcalinidade		3 (GEO) + 3 (OPC)
<b>TOTAL</b>		<b>117</b>

Fonte: Autor (2021)

As amostras passaram por um período inicial de cura em condições de laboratório por 6 semanas para evitar que os ensaios influenciasses nas reações de cura dos corpos de prova. A caracterização das amostras foi realizada no estado fresco no dia da moldagem e no estado endurecido após 0, 7, 28, 91, 180 e 365 dias do referido período de cura.

No estado fresco, determinou-se o índice de consistência das argamassas a partir do ensaio de *flow-table*.

No estado endurecido foram realizados ensaios de potencial de corrosão nas amostras cilíndricas e inspeção visual das armaduras. Nas amostras prismáticas foi realizada a imersão em ácido sulfúrico, imersão em ácido clorídrico e ciclos de molhagem/secagem e gelo/degelo. Posteriormente as propriedades físicas foram caracterizadas a partir de inspeção visual e dos ensaios de perda de massa, absorção de água por imersão, porosidade aberta, densidade aparente e absorção de água por capilaridade. Avaliou-se também o comportamento da resistência mecânica a partir do ensaio de compressão axial e, por fim, foi realizado o ensaio de alcalinidade nas amostras de referência. Os referidos ensaios serão descritos de forma mais detalhada a seguir.

### 3.1 MATERIAIS

#### 3.1.1 Metacaulim

Para a produção das argamassas, o Metacaulim HP Ultra, fornecido pela Empresa Metacaulim do Brasil Indústria e Comércio Ltda, foi utilizado como fonte de sílica e alumina. A Tabela 2 apresenta a composição química em frações e a Tabela 3 mostra as propriedades físico-químicas do Metacaulim utilizado no trabalho.

Tabela 2 – Composição química em frações do Metacaulim

<b>Óxidos</b>	<b>Valores (%)</b>
SiO <sub>2</sub>	57
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2
TiO <sub>2</sub>	1,5
Outros	5,5

Fonte: Metacaulim do Brasil (2020)

Tabela 3 – Propriedades físico-químicas do Metacaulim

Propriedades Físico-Químicas	Valores Típicos	Valores Limites (NBR 15.894)
SiO <sub>2</sub>	57%	44% a 65%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34%	32% a 46%
CaO + MgO	< 0,1%	< 1,5%
SO <sub>3</sub>	< 0,1%	< 1%
Na <sub>2</sub> O	< 0,1%	< 0,5%
Eq. Alcalino Na <sub>2</sub> O	< 1,5%	< 1,5%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2%	-
TiO <sub>2</sub>	1,5%	-
Área Específica BET	230.000 cm <sup>2</sup> /g	150.000 cm <sup>2</sup> /g
Massa Específica	2,56 kg/dm <sup>3</sup>	-

Fonte: Metacaulim do Brasil (2020)

### 3.1.2 Hidróxido de Sódio (NaOH)

Como ativador alcalino foi utilizado o hidróxido de sódio em escamas, adquirido da empresa Buschle & Lepper S.A., apresentando concentração de 97% de NaOH. As propriedades físico-químicas do hidróxido de sódio são apresentadas na Tabela 4. A solução de hidróxido de sódio foi preparada com água destilada com uma concentração 10 mol/L.

Tabela 4 – Características físico-químicas do hidróxido de sódio

Descrição	Especificação
Massa Molar	40 g/mol
Concentração	> 97%
pH	12,7 (solução 10 mol/L)
Densidade aparente	2,138 g/cm <sup>3</sup>
Solubilidade em água	109 g em 100 g de H <sub>2</sub> O
Ponto de ebulição/intervalo de ebulição	1390 °C (Solução com 90% a 95% de NaOH em peso)
Ponto de fusão	318 °C

Fonte: Buschle & Lepper S.A. (2020)

### 3.1.3 Silicato de Sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )

O silicato de sódio, utilizado juntamente com o hidróxido de sódio como ativador alcalino, apresenta consistência líquida e viscosa com molaridade de 3,44 mol/L, comercialmente fornecido pela empresa Buschle & Lepper S.A.. As propriedades físico-químicas do silicato de sódio são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Características físico-químicas do silicato de sódio

<b>Descrição</b>	<b>Especificação</b>
Densidade a 25 °C ( $\text{g/cm}^3$ )	1,390 - 1,420
Viscosidade (cP)	250 - 500
Óxido de sódio (%)	8,50 - 9,20
Óxido de silício (%)	27,80 - 30,50
Sólidos totais (%)	37,00 - 39,00
Relação ( $\text{SiO}_2$ )/( $\text{Na}_2\text{O}$ )	3,02 - 3,59
Água (%)	61,00 - 63,00

Fonte: Buschle & Lepper S.A. (2020)

### 3.1.4 Agregado Miúdo

Para a produção das argamassas foi utilizada a areia normal brasileira, que é um material de referência e padronizado conforme a NBR 7214 (ABNT, 2015a) e utilizado por laboratórios nacionais para a realização de ensaios físico-mecânicos de cimento Portland. O seu uso é recomendado pela NBR 7215 (ABNT, 2019) na moldagem de corpos-de-prova visando classificar o cimento de acordo com sua resistência mecânica à compressão.

O material foi adquirido do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, sendo fornecido em embalagens de 25 kg. Para a pesquisa foram utilizadas em partes iguais as frações granulométricas média-grossa (33,33%), média-fina (33,33%) e fina (33,34%), permitindo classificar a areia utilizada como média. A Figura 12 apresenta as três areias utilizadas;

Figura 12 – Areia Normal Brasileira: (a) fina, (b) média-fina, (c) média-grossa



Fonte: O autor (2021)

### 3.1.5 Cimento Portland Convencional

Para a produção dos corpos de prova de cimento foi utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial CP-V ARI RS da empresa Votorantim Cimentos. Este cimento foi escolhido por apresentar resistência superior em ambientes agressivos, pequenas quantidades de adições minerais na sua composição, baixa granulometria e desenvolver grande resistência mecânica nas primeiras idades, assemelhando-se aos geopolímeros. De acordo com o fabricante, o cimento utilizado apresenta 4,9% de perda ao fogo (PF), 6,6% de Óxido de magnésio (MgO) e 2,7% de



trióxido de enxofre (SO<sub>3</sub>). A composição do cimento Portland utilizado é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 – Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa)

<b>Designação normalizada</b>	<b>Sigla</b>	<b>Classe de resistência</b>	<b>Clínquer + sulfatos de cálcio</b>	<b>Material carbonático</b>
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V <sup>a</sup>	ARI	90 – 100	0 – 10

<sup>a</sup>O cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CP V-ARI RS) pode conter frações de escórias granuladas de alto-forno ou materiais pozolânicos.

Fonte: ABNT NBR 16697 (2018)

## 3.2 MÉTODOS

### 3.2.1 Preparação das amostras

Os corpos de prova prismáticos com dimensões de 40 mm x 40 mm x 40 mm foram produzidos de acordo com a norma NBR 13279 (ABNT, 2005b). Os corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm foram produzidos de acordo com a norma NBR 7215 (ABNT, 2019).

As formulações das argamassas produzidas são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Formulação e constituintes das argamassas produzidas

<b>Descrição</b>	<b>Aglomerante (g)</b>	<b>Agregado (g)</b>	<b>H<sub>2</sub>O (g)</b>	<b>Solução de NaOH 10 mol/L(g)</b>	<b>Silicato de sódio (g)</b>
Metacaulim (GEO)	100	192,31	0	25	67,31
Cimento Portland (OPC)	100	200	48	0	0

Fonte: Autor (2021)

A produção das argamassas foi realizada a partir da argamassadeira de movimento planetário da marca Solotest de 60 Hz e 380 V, apresentada na Figura 13.

Figura 13 – Argamassadeira utilizada para a produção das amostras



Fonte: O autor (2021)

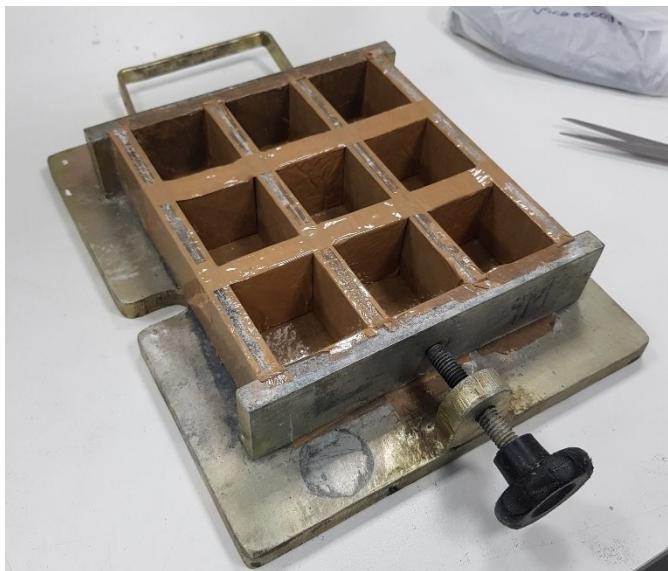
A produção da argamassa de cimento Portland seguiu as recomendações da ABNT (2019). Inicialmente foi adicionada na argamassadeira toda a quantidade de água e cimento Portland, iniciando a mistura em velocidade baixa durante 30 s. Após este tempo, adicionou-se a areia gradualmente durante 30 s com o equipamento em funcionamento. Imediatamente após o término da colocação da areia, misturou-se os materiais em velocidade alta por 30 s. Posteriormente desligou-se o misturador por 90 s e retirou-se os materiais aderidos às paredes nos primeiros 30 s de repouso. Após este intervalo, ligou-se novamente o equipamento em velocidade alta por mais 60 s.

Já a preparação da argamassa geopolimérica seguiu outro procedimento. Inicialmente foram adicionados o hidróxido de sódio e a solução de silicato de sódio na cuba para mistura em velocidade baixa por 5 min para homogeneizar a fração líquida. Posteriormente adicionou-se todo o volume de Metacaulim, misturando-o à solução inicial por 5 min. Após este período, o material aderido às paredes da cuba e nas pás foi raspado e homogeneizado por mais 5 min. Finalmente adicionou-se a areia e misturou-se por mais 3 min.

As barras de aço com diâmetro de 5,0 mm inseridas no centro dos corpos de prova cilíndricos contaram com um lixamento prévio até atingir um padrão de metal quase branco.

Os corpos de prova prismáticos foram moldados a partir do molde apresentado na Figura 14, enquanto que os Corpos de prova cilíndricos foram moldados com o molde apresentado na Figura 15.

Figura 14 – Molde dos corpos de prova prismáticos de 40 mm x 40 mm x 40 mm



Fonte: O autor (2021)

Figura 15 – Molde dos corpos de prova cilíndricos com  $\varnothing 50$  mm e altura de 100 mm



Fonte: O autor (2021)

Os corpos de prova foram retirados dos moldes após 24 horas da produção e curados ao ar e em temperatura ambiente por seis semanas para simular uma condição real de aplicação. A partir deste período iniciaram-se os ensaios descritos nas seções seguintes.

### 3.2.2 Caracterização no estado fresco – Índice de consistência

O ensaio no estado fresco das argamassas foi realizado conforme a NBR 13276 (ABNT, 2016) e a NBR 7215 (ABNT, 2019). A mesa de consistência apresentada na Figura 16 foi utilizada no ensaio. Ela recebe movimentos verticais ascendentes e cai de uma altura de  $12,5 \pm 0,2$  mm, provocando deformações e o espalhamento da argamassa. Para a realização do ensaio, inicialmente centralizou-se a fôrma troncocônica na mesa de consistência e iniciou-se o preenchimento do molde com argamassa em três camadas de mesma altura, aplicando com soquete 15, 10 e 5 golpes uniformes em cada camada respectivamente. Posteriormente, o material em excesso foi removido com uma régua, faceando a amostra no topo do molde. Terminada a etapa de preenchimento, a forma foi imediatamente retirada e foi aplicado 30 golpes na mesa em um intervalo de 30 s. Por fim é calculado o índice de consistência a partir da média aritmética das três medidas do diâmetro da amostra espalhada.

Figura 16 – Mesa de consistência



Fonte: O autor (2021)

O índice de consistência foi um dos fatores determinantes para a definição das formulações das argamassas. A relação sólido/líquido ideal das argamassas foi determinada a partir de sua consistência e pela resistência à compressão aos 28 dias, razão pela qual buscou-se um espalhamento com aberturas entre 220 mm e 260 mm. Para atender referido índice de consistência, na argamassa geopolimérica determinou-se a formulação com uma porção de aglomerante para aproximadamente duas porções de areia (traço 1:2) e uma relação de aglomerante/líquido de 0,92. Na argamassa de cimento Portland buscou-se a mesma proporção de aglomerante e areia (1:2), contudo, o fator água/cimento utilizado foi 0,48.

### **3.2.3 Caracterização no estado endurecido**

Nesta seção, serão descritos os procedimentos dos ensaios realizados nas amostras no estado endurecido, ou seja, a partir de seis semanas de cura ambiente.

#### *3.2.3.1 Propriedades Físicas*

As propriedades físicas das amostras prismáticas foram investigadas a partir de inspeções visuais, pela medição da perda de massa e pelos ensaios de absorção de água por imersão, porosidade aberta e densidade aparente conforme recomendações da NBR 9778 (ABNT, 2005a), e a absorção de água por capilaridade foi avaliada a partir das diretrizes da NBR 9779 (ABNT, 2012).

A caracterização das propriedades físicas das amostras foi importante, para analisar a integridade e desempenho das amostras prismáticas de 40 mm x 40 mm x 40 mm com o passar do tempo frente às condições severas de agressividade a que foram submetidas. As amostras imersas em ácido sulfúrico, ácido clorídrico e a ciclos de molhagem-secagem e gelo-degelo tiveram suas propriedades físicas avaliadas ao término do período inicial de cura e após 7, 28 e 91 dias de exposição.

### 3.2.3.1.1 Inspeção visual

A inspeção visual das amostras foi realizada nas amostras prismáticas em todos os ensaios a partir da avaliação ótica da superfície das amostras expostas ou não a situações agressivas, buscando avaliar a existência ou evolução de fissuras, mudanças de coloração, desagregações, porosidade, lixiviações e outros fenômenos identificáveis visualmente.

### 3.2.3.1.2 Perda de massa ( $\Delta m$ )

Para a estimativa da perda de massa, as amostras foram secas em estufa a temperatura de  $105 \pm 5$  °C por 24 horas e posteriormente resfriadas até atingir a temperatura de  $23 \pm 2$  °C, tendo sua massa seca ( $m_s$ ) determinada após este período a partir de balança com precisão de 0,01 g da marca Marte, modelo AD3300. A relação entre a massa seca obtida ( $m_s$ ) e a massa seca inicial ( $m_{s0}$ ), determinada ao final do período de cura das amostras, descreve a perda de massa do corpo de prova após o período de exposição.

A perda de massa é determinada a partir da Equação 2.

$$\Delta m = \frac{m_s}{m_{s0}} (100) \quad (2)$$

### 3.2.3.1.3 Absorção de água por imersão (A)

Para realização dos ensaios de absorção de água por imersão, porosidade aberta e densidade aparente, as amostras foram secas em estufa a temperatura de  $105 \pm 5$  °C por 24 horas e resfriadas até atingir a temperatura de  $23 \pm 2$  °C, tendo sua massa seca ( $m_s$ ) determinada após este período a partir de balança com precisão de 0,01 g da marca Marte, modelo AD3300. Posteriormente, as amostras foram imersas em água por 24 horas e tiveram suas massas saturadas imersas ( $m_i$ ) determinadas. Por fim, a massa saturada ( $m_{sat}$ ) das amostras foi determinada após o enxugamento das amostras com pano úmido.

A absorção de água por imersão (A), é determinada a partir da Equação 3.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} (100) \quad (3)$$

#### 3.2.3.1.4 Porosidade aberta ou índice de vazios ( $I_v$ )

A porosidade aberta, ou também conhecida por índice de vazios ( $I_v$ ), é determinada a partir da Equação 4.

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} (100) \quad (4)$$

#### 3.2.3.1.5 Densidade aparente ou massa específica ( $\rho$ )

A densidade aparente, também conhecida por massa específica, foi determinada na condição seca ( $\rho_s$ ) conforme a Equação 5 e na condição saturada ( $\rho_{sat}$ ) conforme a Equação 6.

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (5)$$

$$\rho_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (6)$$

#### 3.2.3.1.6 Absorção de água por capilaridade ( $C$ )

Para o ensaio de absorção por capilaridade, inicialmente as amostras foram secas em estufa com temperatura de  $105 \pm 5$  °C por 24 horas e posteriormente resfriadas até atingir a temperatura de  $23 \pm 2$  °C, tendo sua massa seca ( $m_s$ ) determinada após este período, a partir de balança com precisão de 0,01 g da marca Marte, modelo AD3300. Posteriormente as amostras foram imersas parcialmente em água até a altura de 1,0 centímetro por um período de 30 minutos e a massa saturada ( $m_{sat}$ ) das amostras foi determinada após o enxugamento das amostras com pano úmido.

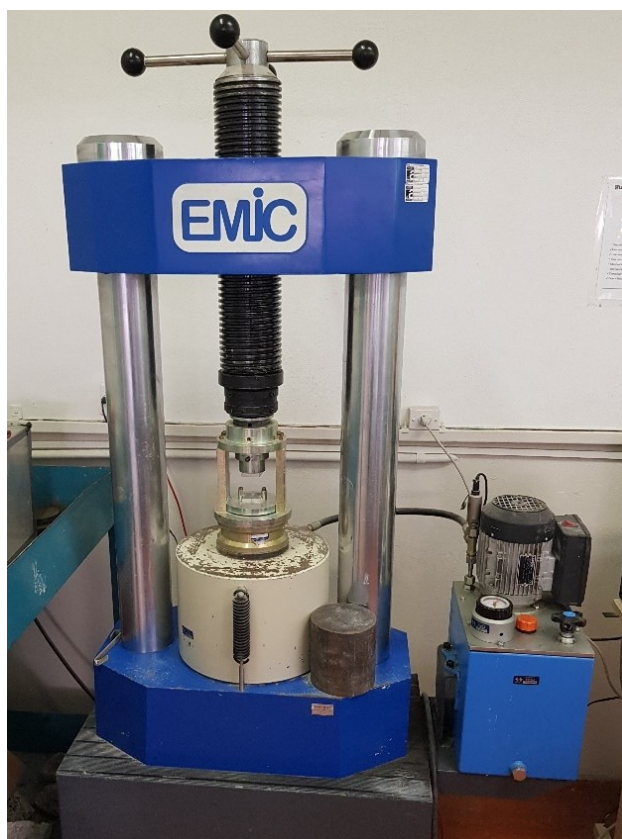
A absorção de água por capilaridade ( $C$ ), é determinada a partir da Equação 7, sendo  $S$  a área da seção transversal da amostra em contato com a água.

$$C = \frac{m_{sat} - m_s}{s} \text{ (g/cm}^2\text{)} \quad (7)$$

### 3.2.3.2 Propriedades Mecânicas - Resistência à Compressão

Os ensaios de resistência à compressão das amostras prismáticas foram realizados atendendo a NBR 13279 (ABNT, 2005b). Os valores da resistência à compressão das amostras ( $f_c$ ), em megapascal (MPa), foram obtidos a partir da relação da carga de ruptura do elemento pela área nominal da seção do corpo de prova. Os ensaios foram realizados através da máquina de ensaios universal – Modelo EMIC de 200 Toneladas, conforme apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Máquina universal de ensaios



Fonte: O autor (2021)



A análise do comportamento mecânico das amostras é importante para avaliar eventuais mudanças de resistência mecânica das amostras após a exposição a situações agressivas. Os ensaios de compressão axial das amostras prismáticas imersas em ácido sulfúrico, ácido clorídrico e submetidas a ciclos de molhagem-secagem e gelo-degelo, foram realizados após cada período de exposição das amostras.

### *3.2.3.3 Imersão em ácido sulfúrico e ácido clorídrico*

Para cada ácido foram produzidos 18 corpos de prova prismáticos de 40 mm x 40 mm x 40 mm, conforme o procedimento descrito na seção 3.2.1. Deste total, 9 corpos de prova eram de argamassa geopolimérica e 9 de argamassa de cimento Portland. Portanto, foram produzidos no total, 36 corpos de prova para a imersão em ácidos.

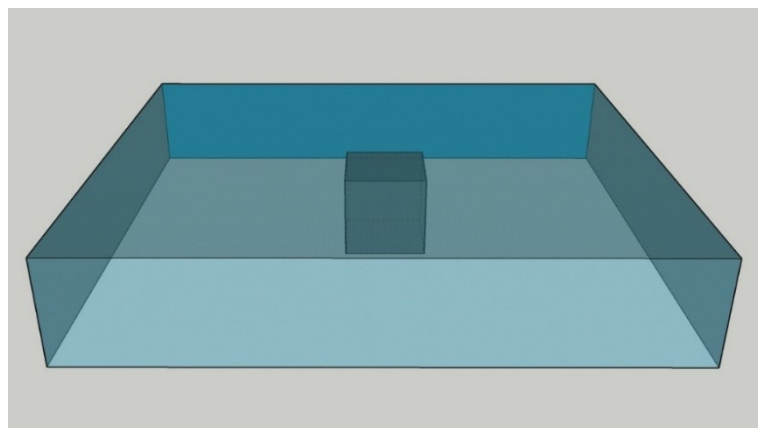
A imersão de corpos de prova, de forma contínua, em ácido sulfúrico, busca simular o comportamento do material frente a este ácido que é normalmente encontrado em estações de tratamento de efluentes e ser conhecido por provocar a corrosão biogênica do concreto. Segundo Bauer (2000), este ácido pode ser produzido em águas residuais a partir de bactérias que oxidam pequenas quantidades de ácido sulfídrico e formam grandes quantidades de ácido sulfúrico. O ácido clorídrico também foi escolhido por ser comumente utilizado em atividades de limpeza nas edificações, estações de tratamento, indústrias e agricultura.

Sabe-se que os ácidos provocam a desintegração da pasta de cimento de concretos e argamassas, deixam os agregados expostos, provocam a diminuição do pH e, conseqüentemente, despассивam as armaduras dos elementos de concreto armado (HELENE; PEREIRA, 2007). Desta forma, a caracterização das propriedades físicas e mecânicas dos corpos de prova após a imersão em ácido permitem avaliar a eventual degradação das argamassas expostas a estes tipos de ácidos.

Após seis semanas de cura ambiente, os corpos de prova foram totalmente imersos em soluções ácidas. A solução de ácido sulfúrico foi produzida a partir da diluição de 31,6 ml de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$  - concentração de 95%) em 1000 ml de água destilada, atingindo uma concentração da solução de aproximadamente 3%. A solução com ácido clorídrico foi produzida a partir da diluição de 68,5 ml de ácido clorídrico (HCl - concentração de 36,5%) em 1000 ml de água destilada, atingindo uma

concentração da solução de aproximadamente 2,5%. As soluções ácidas foram substituídas mensalmente para manter suas concentrações. A Figura 18 ilustra o procedimento de imersão realizado.

Figura 18 – Procedimento de imersão total dos corpos de prova em solução ácida



Fonte: Autor (2021)

As inspeções visuais, a medição da perda de massa e os ensaios de absorção de água por imersão, porosidade aberta, densidade aparente, absorção de água por capilaridade e de resistência à compressão foram realizadas nas amostras ao término do período inicial de cura e após 7, 28 e 91 dias da imersão nas soluções ácidas. Os procedimentos dos ensaios das propriedades físicas se encontram apresentados na seção 3.2.3.1 e o ensaio de compressão axial na seção 3.2.3.2.

#### 3.2.3.4 Ciclos de molhagem-secagem e gelo-degelo

Para este ensaio foram produzidos 18 corpos de prova prismáticos de 40 mm x 40 mm x 40mm, conforme o procedimento descrito na seção 3.2.1. Deste total, 9 corpos de prova eram de argamassa geopolimérica e 9 de argamassa de cimento Portland.

Os ciclos de molhagem-secagem e gelo-degelo buscam simular condições atmosféricas que as estruturas e os materiais de construção civil são frequentemente submetidos durante a sua vida útil, principalmente em regiões com grandes variações higrotérmicas. Estes ciclos podem causar mudanças importantes na estrutura interna do material e repercutir na durabilidade dos mesmos.

Após seis semanas iniciais de cura ambiente, os ciclos foram então conduzidos. Os ciclos tiveram duração temporal de uma semana. Cada ciclo contou

com a imersão das amostras em água por 48 horas, congelamento em um *freezer* por 48 horas, secagem em estufa por 48 horas em temperatura de  $105 \pm 5$  °C e, finalmente, resfriamento em temperatura ambiente por 24 horas.

As inspeções visuais, a medição da perda de massa e os ensaios de absorção de água por imersão, porosidade aberta, densidade aparente, absorção de água por capilaridade e de resistência à compressão foram realizados nas amostras ao término do período inicial de cura e após 7, 28 e 91 dias do referido término da cura, ou seja após 0, 1, 4 e 12 ciclos completos. Os procedimentos dos ensaios das propriedades físicas são apresentados na seção 3.2.3.1 e o ensaio de compressão axial na seção 3.2.3.2.

#### 3.2.3.5 *Ensaio de alcalinidade*

O ensaio de alcalinidade foi realizado nas amostras prismáticas após 0 e 365 dias do período de cura para avaliar a diminuição do pH das amostras com o passar do tempo e o comportamento dos processos de carbonatação nas amostras de cimento Portland pela formação de carbonatos de cálcio e nos geopolímeros pela formação de carbonatos de sódio, os quais são responsáveis por provocar a diminuição da alcalinidade das matrizes, despessar as armaduras e favorecer a instalação de processos corrosivos nas armaduras.

O ensaio foi realizado a partir da aspersion de solução alcoólica de fenolftaleína (CC = 1,0%) na superfície de amostras seccionadas transversalmente. A reação da solução com a superfície da matriz provoca uma mudança de coloração da região aplicada em função do pH existente. A solução de fenolftaleína é um dos indicadores químicos mais utilizados para esta aplicação. Andrade (1992) afirma que a solução de fenolftaleína é incolor em pH inferior a 8,3, para valores superiores à 9,5 torna-se vermelho-carmim e entre 8,3 a 9,5 possui coloração variável de rosa à vermelho carmim, sendo mais claro em alcalinidades menores. Portanto, regiões não reagentes (incolores) não são capazes de proteger as armaduras inseridas no concreto e podem conseqüentemente permitir a instalação de processos corrosivos das armaduras inseridas na matriz.

Recentemente este ensaio vem sendo amplamente realizado em matrizes geopoliméricas conforme é demonstrado por Chen *et al.* (2021), Badar *et al.* (2014) e Babae, Khan e Castel (2018).

### 3.2.3.6 Potencial de Corrosão

O ensaio de potencial de corrosão foi realizado em todas as amostras cilíndricas armadas com uma barra de aço com diâmetro de 5,0 mm. O método segue o procedimento estabelecido pela ASTM C 876 (2015). Para a avaliação do potencial de corrosão das amostras utilizou-se um milivoltímetro de alta impedância de entrada ( $>10\text{ M}\Omega$ ) com resolução em nível de milivolt da marca Meterman – Modelo 34XR, conectado a um eletrodo de referência de cobre/sulfato de cobre e à armadura dos corpos de prova investigados. Os equipamentos utilizados encontram-se na Figura 19.

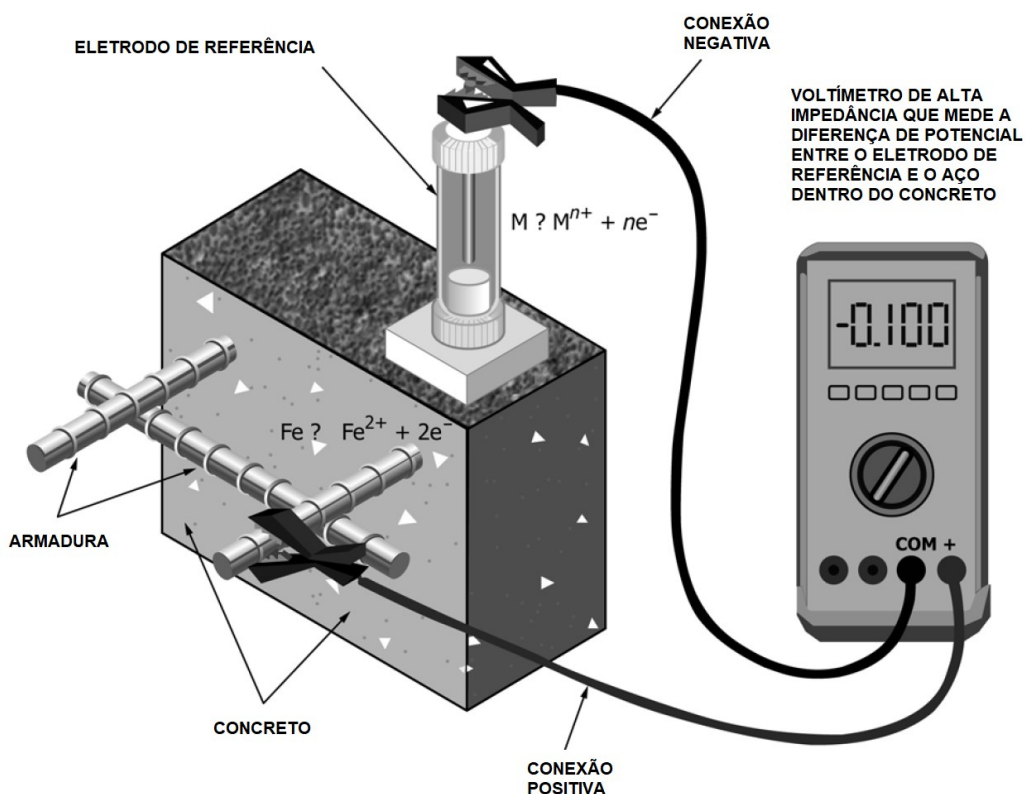
As leituras do milivoltímetro indicam a diferença de potencial (ddp) entre o eletrodo de referência e a armadura dos corpos de prova e se baseiam no princípio da pilha eletroquímica. Portanto, um polo do milivoltímetro foi conectado ao eletrodo de referência de cobre/sulfato de cobre e o outro na armadura do corpo de prova conforme é demonstrado na Figura 20. O eletrodo de referência entra em contato com a superfície do corpo de prova de modo que a armadura a qual se deseja investigar esteja logo abaixo do contato entre o eletrodo e a superfície do concreto.

Figura 19 – Equipamentos utilizados no ensaio de potencial de corrosão



Fonte: O autor (2021)

Figura 20 – Demonstração do ensaio de potencial de corrosão



Fonte: Adaptado de ASTM (2015, p.2)

Para a realização dos ensaios, foram adotados os seguintes procedimentos:

- Os corpos de prova foram umedecidos por 24 horas, sem provocar a saturação, em solução contendo 100 mL de agente tensoativo (detergente) em 20 L de água (concentração de 0,5%);
- Para melhorar a condutividade elétrica entre o eletrodo de referência e a superfície da argamassa foi utilizada uma esponja umedecida;
- Para o cimento Portland, as leituras de potencial obtidas são negativas e associa-se à probabilidade de corrosão de acordo com as faixas previamente estabelecidas pela norma ASTM C 876:2015, apresentadas na Tabela 8;
- Para cada corpo de prova foi adotada a média de 5 leituras realizadas.

Tabela 8 – Probabilidade de corrosão do concreto armado de cimento Portland conforme faixas de ddp

<b>ddp</b>	<b>Probabilidade de corrosão</b>
> -200 mV	90% de não ter corrosão
-200 mV a -350 mV	Incerta
< -350 mV	90% de ter corrosão

Fonte: Adaptado de ASTM (2015, p.7)

### 3.2.3.7 Adição de cloretos nas misturas das argamassas

Para o presente ensaio foram produzidos 30 corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm, armados com uma barra de aço de 5,0 mm de diâmetro no centro com cobrimento uniforme de 2,25 cm tanto das faces quanto da base do corpo de prova, conforme o procedimento descrito na seção 3.2.1. Deste total, 15 corpos de prova eram de argamassa geopolimérica e 15 de argamassa de cimento Portland.

O objetivo do ensaio era avaliar a probabilidade de corrosão a partir do ensaio de potencial de corrosão de amostras contaminadas por íons cloreto desde a etapa de produção. A contaminação foi simulada a partir da adição de cloretos diretamente na mistura das argamassas geopoliméricas e de cimento Portland. A adição de cloreto de sódio (NaCl) foi realizada na etapa de produção das amostras e o teor de cloretos adicionado foi determinado a partir da relação da massa atômica do Cl e a massa de aglomerante da mistura. A NBR 12655 (ABNT, 2015b) descreve que o teor máximo de íons cloreto admissível no concreto armado é de 0,4% da massa de cimento da amostra, podendo diminuir conforme o uso e a exposição dos elementos. Desta forma, determinou-se o plano amostral com a variação do teor de cloretos da amostra em relação a massa de aglomerante, com cinco formulações para a argamassa geopolimérica e cinco formulações para a argamassa de cimento Portland, conforme apresentado na Tabela 9.

O ensaio de potencial de corrosão foi realizado ao término do período inicial de cura e após 7, 28, 91, 180 e 365 dias do referido término da cura. O procedimento do ensaio encontra-se apresentado na seção 3.2.3.6. Após os 365 dias de ensaios, os corpos de prova foram rompidos para avaliar a existência de produtos de corrosão visíveis nas barras.

Tabela 9 – Quantidade de cloretos adicionada na etapa de produção das argamassas

Descrição	Réplicas	Massa de NaCl (g) adicionada em cada 1000g de aglomerante	Teor de cloreto (% em relação a massa de aglomerante)
GEO 1 (REF)	3	0	0,00
GEO 2	3	4,12	0,25
GEO 3	3	8,24	0,50
GEO 4	3	12,36	0,75
GEO 5	3	16,48	1,00
OPC 1 (REF)	3	0	0,00
OPC 2	3	4,12	0,25
OPC 3	3	8,24	0,50
OPC 4	3	12,36	0,75
OPC 5	3	16,48	1,00

Fonte: Autor (2021)

### 3.2.3.8 *Imersão em solução salina*

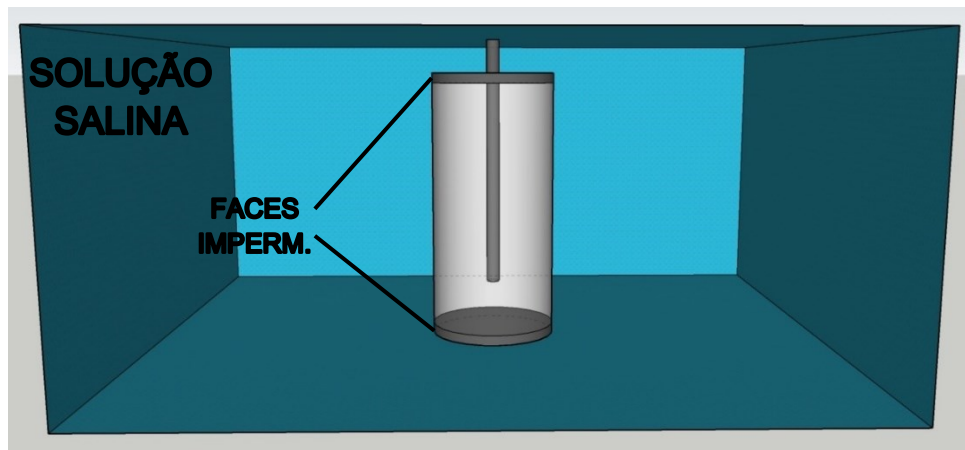
Para este ensaio foram produzidos 18 corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm, armados com uma barra de aço de 5,0 mm de diâmetro no centro com cobrimento uniforme de 2,25 cm tanto das faces quanto da base do corpo de prova, conforme o procedimento descrito na seção 3.2.1. Deste total, 9 corpos de prova eram de argamassa geopolimérica e 9 de argamassa de cimento Portland.

A imersão de corpos de prova de forma contínua em solução salina busca simular a condição de exposição altamente agressiva que estruturas de concreto armado em contato com água do mar ou soluções com cloretos são submetidas, como é o caso de pontes, píeres, portos e etc. A medição do potencial de corrosão das amostras permite avaliar o desempenho das argamassas na proteção das armaduras contra agentes deletérios.

Após seis semanas de cura ambiente, os corpos de prova foram totalmente imersos em solução salina produzida a partir da diluição de 35 g de NaCl em 1000 g de água destilada, atingindo uma concentração de aproximadamente 3,5%, compatível com a salinidade do mar. A solução salina foi substituída mensalmente para manter a sua concentração. As faces inferiores e superiores do corpo de prova foram impermeabilizadas com resina epóxi de modo a evitar que a água da solução

penetrasse no corpo de prova pelo topo e pela base. A Figura 21 ilustra o procedimento de imersão realizado.

Figura 21 – Procedimento de imersão dos corpos de prova em solução salina



Fonte: Autor (2021)

Os ensaios de potencial de corrosão foram realizados nas amostras ao término do período inicial de cura e após 7, 28 e 91 dias da imersão na solução salina. O procedimento do ensaio de potencial de corrosão é apresentado na seção 3.2.3.6. Após os 91 dias de ensaios, os corpos de prova foram rompidos para avaliar a existência de produtos de corrosão visíveis nas barras.

### 3.2.3.9 *Compatibilidade eletroquímica das argamassas geopoliméricas e de cimento Portland*

Para o presente ensaio foram produzidos 3 corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm, armados com uma barra de aço de 5,0 mm de diâmetro ao centro com cobertura uniforme de 2,25 cm tanto das faces quanto da base do corpo de prova, conforme o procedimento descrito na seção 3.2.1. A metade inferior dos corpos de prova foi preenchida com argamassa de cimento Portland e a metade superior com argamassa geopolimérica.

O objetivo do ensaio foi observar o comportamento dos potenciais eletroquímicos ao longo das armaduras dos corpos de prova compostos por materiais com diferentes propriedades físico-químicas (geopolímero e cimento Portland) e avaliar, de forma simplificada e preliminar, a possibilidade de ocorrência de um tipo de deterioração, conhecido na literatura por efeito de macropilha ou ânodo incipiente.



Segundo Ribeiro (2009), o efeito de macropilha ocorre devido a mudanças nas características eletroquímicas do meio que envolve o aço na região de utilização de materiais distintos e pode levar a um desequilíbrio de potencial eletroquímico entre as regiões da barra de aço nesses meios, dando origem à corrosão por macrocélula.

Desta forma, para avaliar a compatibilidade eletroquímica foi realizado o ensaio de potencial de corrosão ao término do período inicial de cura e após 7, 28, 91, 180 e 365 dias do referido término da cura. O procedimento do ensaio é apresentado na seção 3.2.3.6. Após os 365 de ensaios os corpos de prova foram rompidos para avaliar a existência de produtos de corrosão visíveis nas barras.

#### *3.2.3.10 Aplicabilidade em reparos estruturais*

Neste trabalho, a avaliação da aplicabilidade da argamassa geopolimérica estudada em reparos estruturais de elementos de concreto armado foi realizada exclusivamente a partir dos resultados obtidos no presente estudo no período ensaiado e de requisitos de compatibilidade estrutural, compatibilidade de deformações, compatibilidade à agressividade ambiental e compatibilidade eletroquímica entre o material de reparo e o substrato que são propostos por Emmons *et al.* (1994).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo os resultados são apresentados e discutidos. Inicialmente será apresentada a caracterização no estado fresco das argamassas a partir do ensaio de consistência. Na sequência, serão apresentados os resultados da caracterização no estado endurecido, a partir dos ensaios de potencial de corrosão, avaliação das propriedades físicas, resistência à compressão dos corpos de prova em cada condição de exposição e o ensaio de alcalinidade em amostras de referência.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO – ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA

Os resultados do ensaio são apresentados na Tabela 10. Os valores obtidos de espalhamento representam a média de três ensaios do índice de consistência realizados para a formulação final da argamassa geopolimérica à base de Metacaulim (GEO) e da argamassa cimento Portland compatível (OPC).

Tabela 10 – Índices de consistência dos traços ideais das argamassas

<b>Amostra</b>	<b>Índice de consistência (cm)</b>
GEO	22,33 ± 0,29
OPC	25,17 ± 0,29

Fonte: Autor (2021)

Os índices de consistência foram fundamentais para a determinação do traço ideal das argamassas geopoliméricas e de cimento Portland, visto que foram produzidas argamassas com índice de consistência similar, boa trabalhabilidade e resistência à compressão compatível. Os traços determinados podem ser observados na Tabela 7 da seção 3.2.1. A diferença entre os índices das duas argamassas é de aproximadamente 11%.

Merece ainda destacar a capacidade da argamassa geopolimérica apresentar uma consistência gelatinosa (tixotrópica) conforme é observado por Panda *et al.* (2019). A consistência em gel facilita a utilização das argamassas geopoliméricas em aplicações de grande dificuldade técnica, como por exemplo a aplicação em

superfícies verticais, fundos de vigas e lajes, entre outros, podendo reduzir a necessidade de utilização de aditivos e fibras nas misturas.

A Figura 22 apresenta o ensaio de consistência da argamassa geopolimérica e a Figura 23 apresenta o ensaio da argamassa de cimento Portland.

Figura 22 – Espalhamento da argamassa geopolimérica



Fonte: Autor (2021)

Figura 23 – Espalhamento da argamassa de cimento Portland



Fonte: Autor (2021)

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO

Nesta seção são apresentados os resultados dos ensaios realizados nas amostras no estado endurecido para cada condição de exposição descrita na metodologia.

### 4.2.1 Imersão em ácido sulfúrico

Os resultados dos ensaios realizados nos corpos de prova imersos em ácido sulfúrico com concentração de 3% são apresentados nesta seção.

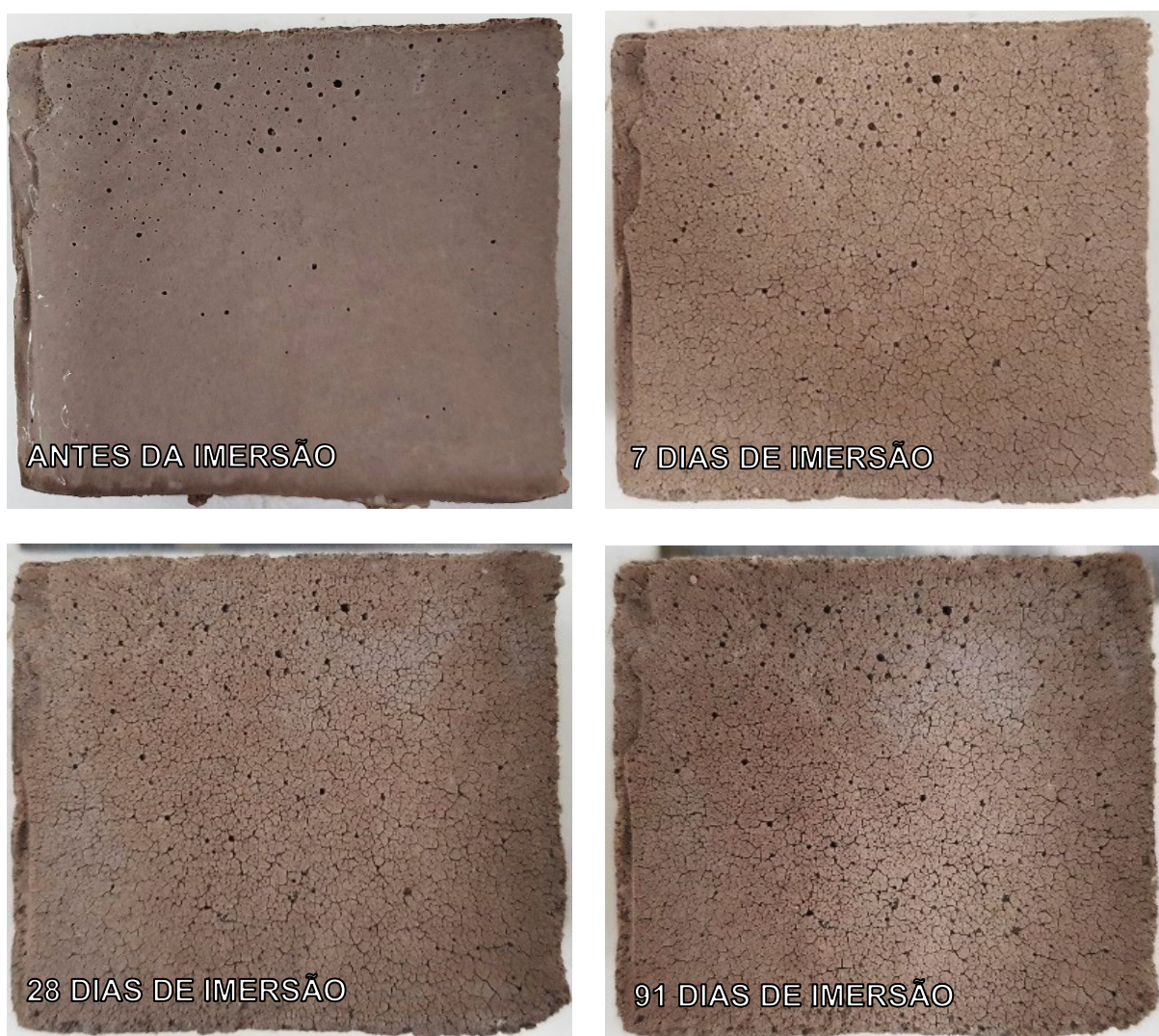
#### 4.2.1.1 Inspeção visual

A inspeção visual dos corpos de prova antes e durante a imersão em ácido sulfúrico demonstrou que as argamassas de cimento Portland apresentaram maiores degradações superficiais que as argamassas geopoliméricas. A Figura 24 ilustra em escala a condição típica dos corpos de prova geopoliméricos e a Figura 25 a condição típica dos corpos de prova de cimento Portland antes e após 7, 28 e 91 dias de imersão.

Após 91 dias de imersão em ácido sulfúrico, a argamassa geopolimérica apresentou a formação de pequenas fissuras mapeadas, similares a fissuras de retração, enquanto que a argamassa de cimento Portland revelou desagregações mais importantes, esfarelamentos e a exposição dos agregados. De acordo com Cunha (2013), os ácidos atacam os constituintes alcalinos das argamassas pela dissolução ou por transformação dos componentes em sais solúveis, e desestabilizam as ligações, podendo explicar as degradações observadas nas amostras. As desagregações em maiores idades nas amostras de cimento Portland são mais severas possivelmente devido à presença de compostos de cálcio na sua composição, destacando o aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) e o hidróxido de cálcio (CH). Conforme Bertolini (2010), Cánovas (1988) e Mehta e Monteiro (2008), a interação dos compostos de cálcio com os sulfatos do meio originam reações expansivas devido a formação de sulfoaluminato de cálcio (etringita) e gipsita, gerando grandes tensões internas e provocando desagregações. Este comportamento não foi constatado na argamassa geopolimérica possivelmente devido a pequena quantidade de compostos de cálcio do aglomerante, conforme é apresentado na Tabela 3, e pela maior

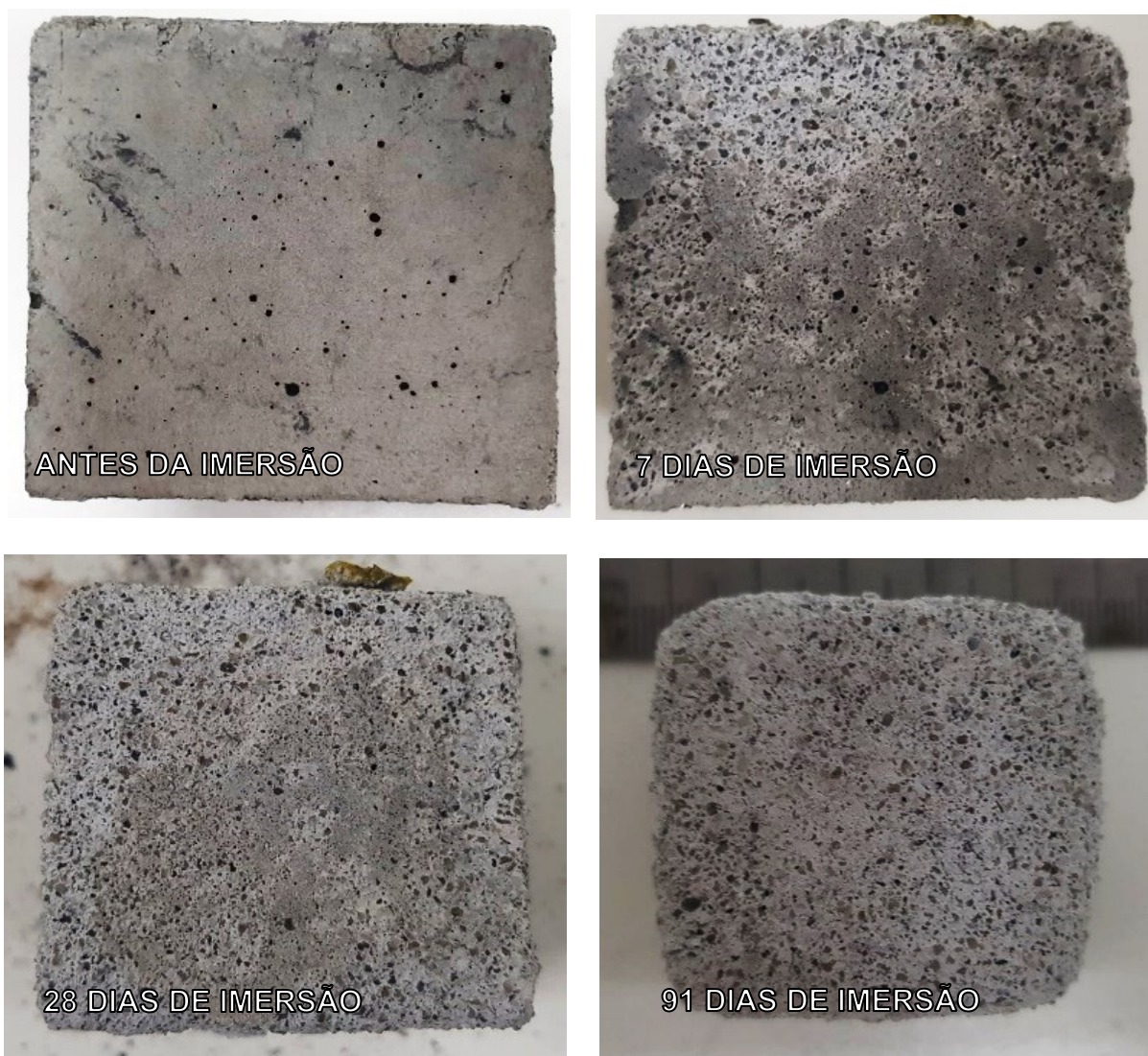
estabilidade química dos geopolímeros. De acordo com Albitar *et al.* (2017) os geopolímeros são quimicamente mais estáveis que o cimento Portland em ambientes ácidos. Wallah e Rangan (2006) indicam que os geopolímeros, geralmente, não apresentam a formação de gipsita e etringita devido à ausência de cálcio na sua matéria prima, contudo, podem apresentar se o material possuir alguma concentração de cálcio na sua composição.

Figura 24 – Corpos de prova geopoliméricos após imersão em ácido sulfúrico



Fonte: Autor (2021)

Figura 25 – Corpos de prova de cimento Portland após imersão em ácido sulfúrico



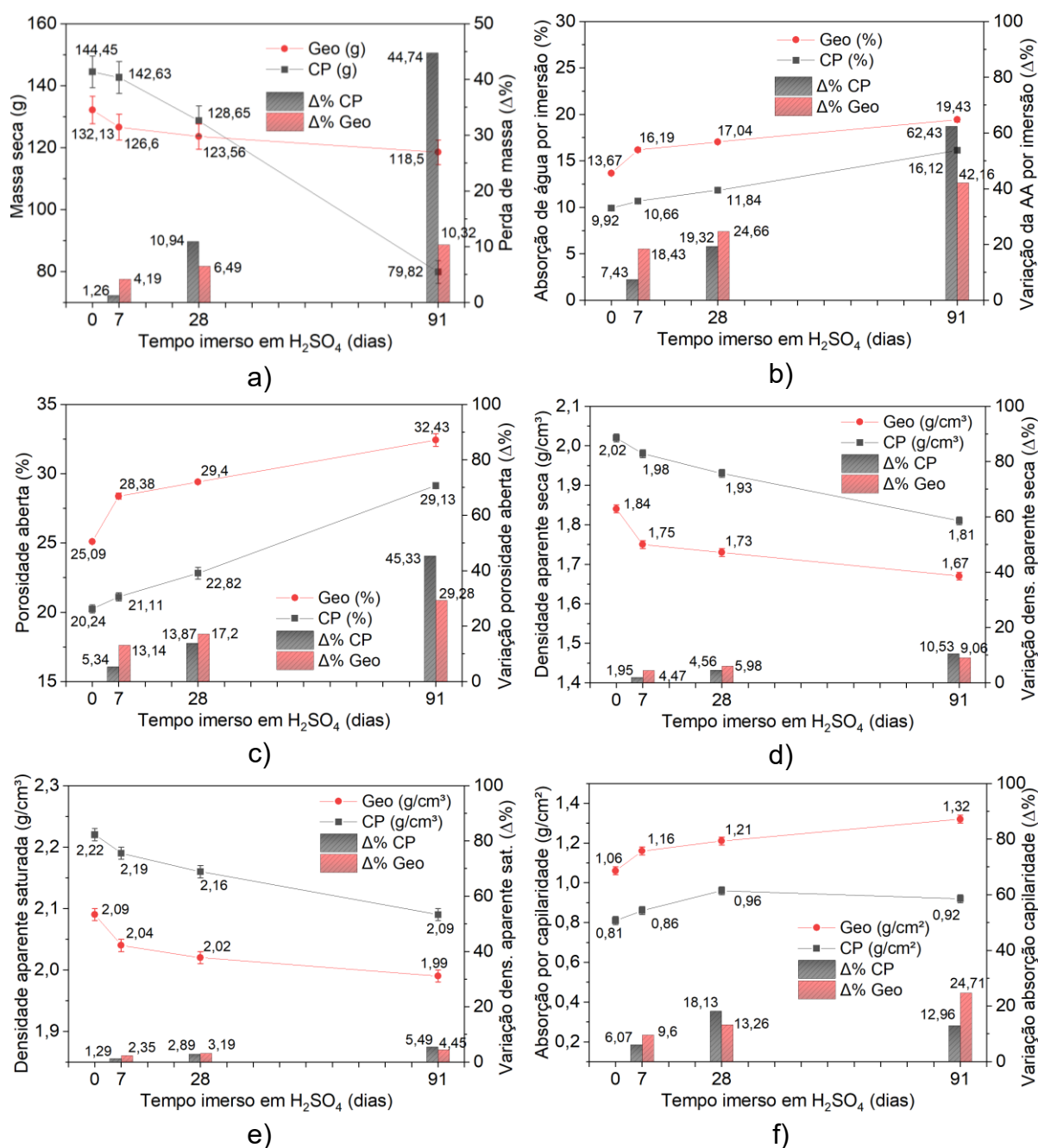
Fonte: Autor (2021)

#### 4.2.1.2 *Perda de massa, absorção de água por imersão, porosidade aberta, densidade aparente e absorção de água por capilaridade*

Os resultados dos ensaios de caracterização das propriedades físicas das amostras imersas em ácido sulfúrico são apresentados na Figura 26. De forma geral, foi observado que a argamassa geopolimérica de referência apresenta maior absorção por imersão, maior porosidade aberta, menor densidade aparente e maior absorção por capilaridade, sugerindo que o traço definido para a argamassa geopolimérica em estudo apresenta uma permeabilidade maior que a da argamassa de cimento Portland. Os resultados obtidos após as imersões revelaram que a argamassa de cimento Portland apresenta maior influência em suas propriedades

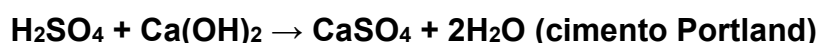
físicas na solução ácido sulfúrico (maior variação de suas propriedades), destacando-se para a grande perda de massa (Figura 26a) em relação a sua massa inicial após os 91 dias de exposição (44,74 %), enquanto que os geopolímeros que tiveram uma perda de massa muito inferior (10,32 %), sendo a diferença entre as perdas de massa constatadas de 34,42%, assim como foi observado por Albitar *et al.* (2017) em seu estudo.

Figura 26 – Resultado da caracterização das propriedades físicas dos corpos de prova imersos em ácido sulfúrico



Fonte: Autor (2021)

As análises dos demais resultados da Figura 26 demonstram que em idades iniciais (até 7 dias) os geopolímeros sofreram maiores efeitos em suas propriedades físicas quando comparados à matriz de cimento Portland. Este comportamento é explicado por Cunha (2013) e Kwasny *et al.* (2018) como sendo decorrente do enfraquecimento das ligações alcalinas das argamassas e pela reação do ácido com o alumínio e sódio da pasta. Nos períodos finais de ensaio (28 e 91 dias), as argamassas de cimento Portland apresentaram maiores variações em suas propriedades, principalmente o aumento da porosidade e da absorção por imersão. Tais influências decorrem da reação do ácido com o cálcio da matriz e pela eventual ocorrência de reações expansivas provocadas pela formação de gipsita e etringita, o que não ocorre com os geopolímeros pelo baixo teor de cálcio conforme citado anteriormente. A reação do ácido sulfúrico com o cimento Portland provoca a formação de sulfato de cálcio e água, e nos geopolímeros ocorre a formação de sulfato de sódio e água, conforme as seguintes reações:



Em relação ao gráfico de absorção por capilaridade (Figura 26f), observa-se que o último valor obtido para a amostra de cimento Portland indica que a saturação do corpo de prova ocorreu antes do período de 30 minutos influenciado pela grande perda de massa e aumento significativo do índice de vazios do corpo de prova.

#### 4.2.1.3 Resistência à compressão

As resistências características à compressão das amostras de referência são apresentadas na Tabela 11. Os resultados da perda de resistência pela imersão em ácido sulfúrico são apresentados na Figura 27 e a relação da resistência mecânica à compressão (RMC) e a porosidade dos materiais é apresentada na Figura 28.

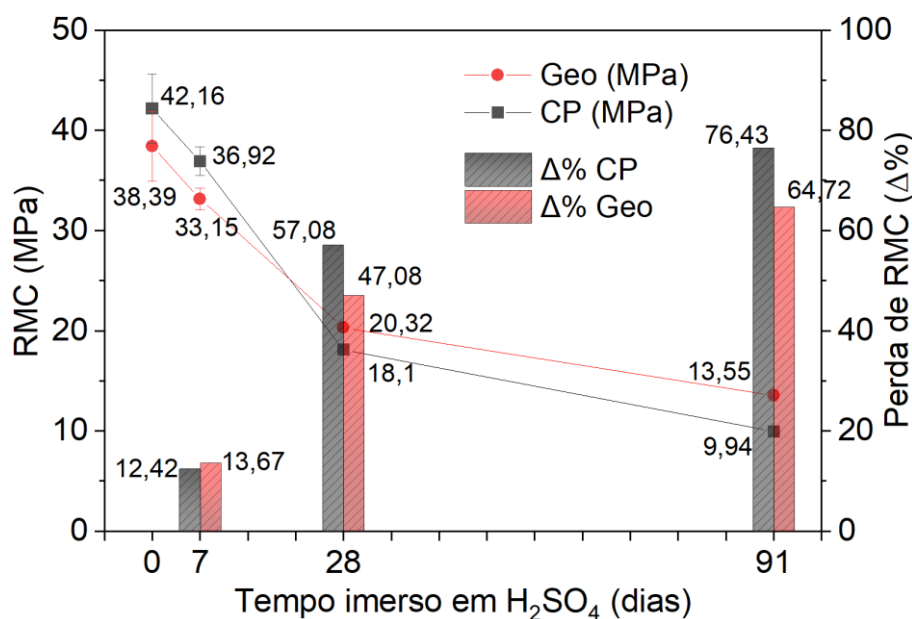


Tabela 11 – Resistência à compressão média das amostras prismáticas de referência

Amostra	Resistência à compressão média (MPa)
Geopolímero	38,39 ± 2,65
Cimento Portland	42,16 ± 3,46

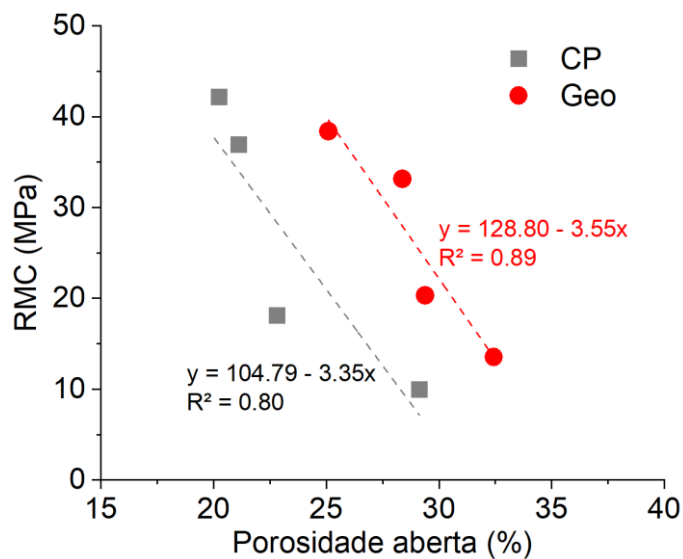
Fonte: Autor (2021)

Figura 27 – Resistência mecânica à compressão após imersão em ácido sulfúrico



Fonte: Autor (2021)

Figura 28 – Relação entre a resistência mecânica à compressão e a porosidade das amostras imersas em ácido sulfúrico



Fonte: Autor (2021)

Observa-se que a argamassa de cimento Portland de referência apresentou uma resistência 9,8% superior que a matriz geopolimérica de referência (42,16 MPa para a matriz cimentícia e 38,39 MPa para a matriz geopolimérica).

Conforme pode ser observado na Figura 27, nas primeiras idades as argamassas geopoliméricas apresentaram comportamento similar ao das argamassas de cimento Portland, com uma perda de resistência na ordem de 13,67%, enquanto que na matriz cimentícia a perda de resistência foi de 12,42%. Aos 28 dias, as degradações na resistência dos corpos de prova de cimento Portland se acentuaram e atingiram patamares de 57,08%, ou seja, perderam mais do que a metade de sua resistência característica e apresentaram cerca de 10% a mais de perda de resistência em comparação à argamassa geopolimérica. Aos 91 dias, as argamassas de cimento atingiram perdas de 76,43% e as argamassas geopoliméricas apresentaram cerca de 64,72% de perda, com uma diferença entre elas de aproximadamente 11,71%.

A partir da Figura 28 é possível constatar que a resistência mecânica das argamassas é influenciada diretamente pelo aumento da porosidade das matrizes provocado pelo ataque ácido. A maior perda de resistência mecânica à compressão da argamassa de cimento Portland pode ser justificada pela maior influência do ácido sulfúrico na porosidade da argamassa de cimento Portland conforme pode ser observado na Figura 26c.

Desta forma, é possível observar uma maior resistência da argamassa geopolimérica, em termos de resistência mecânica à compressão à ataques por ácido sulfúrico. Este comportamento pode decorrer da maior estabilidade química e capacidade das ligações químicas dos geopolímeros resistirem à ácidos do que o cimento Portland, além da baixa ocorrência de reações expansivas pela inexistência ou pouca ocorrência de compostos de cálcio na mistura conforme citado anteriormente e avaliado por Kwasny *et al.* (2018) e Albitar *et al.* (2017) em seus estudos.

O aumento da resistência à sulfatos do cimento Portland estudado (CP-V ARI RS) a partir de adições minerais não foi suficiente para atingir os patamares e desempenhos obtidos na argamassa geopolimérica, o que demonstra que para os cimentos convencionais, sem adições minerais para melhorar a resistência à sulfatos, o desempenho nestes meios pode ser ainda pior, destacando-se novamente o excelente desempenho da argamassa geopolimérica. Segundo Mohan e Mini (2018),

as adições minerais podem provocar a diminuição da permeabilidade dos concretos e também fornecer resistências superiores aos ácidos.

Portanto, mesmo apresentando uma permeabilidade superior e uma densidade menor que a amostra de cimento Portland, a argamassa geopolimérica estudada apresenta uma resistência superior ao ácido sulfúrico, em termos de durabilidade (propriedades físicas) e resistência mecânica, após 91 dias de imersão.

#### **4.2.2 Imersão em ácido clorídrico**

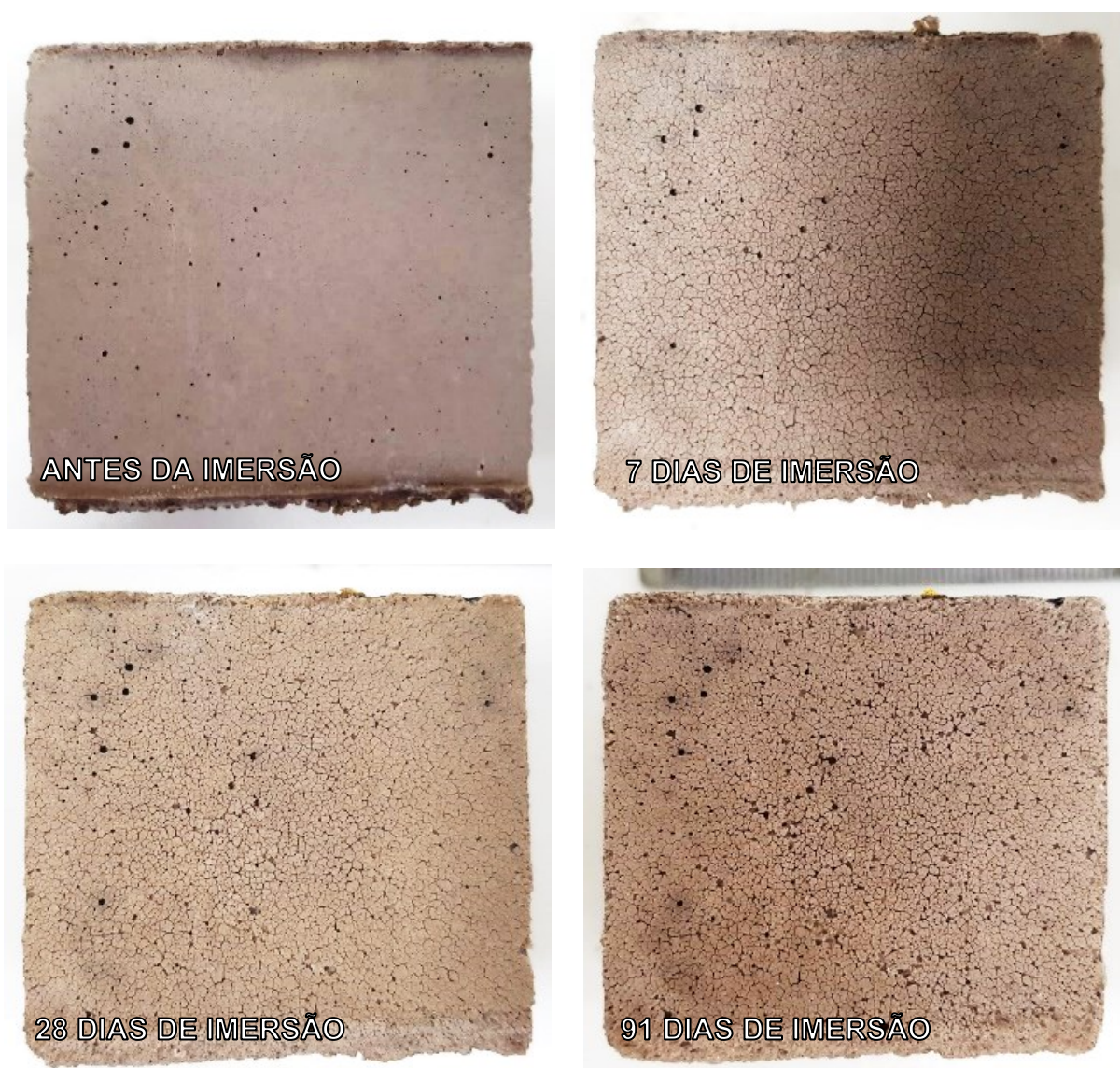
Os resultados dos ensaios realizados nos corpos de prova imersos em ácido clorídrico com concentração de 2,5% são apresentados nesta seção.

##### *4.2.2.1 Inspeção visual*

A inspeção visual dos corpos de prova antes, durante e após a imersão em ácido clorídrico demonstraram novamente que as argamassas de cimento Portland sofreram maiores degradações superficiais comparadas as argamassas de geopolímero. A Figura 29 ilustra a condição típica observada nos corpos de prova geopoliméricos e a Figura 30 demonstra a condição típica dos corpos de prova de cimento Portland antes e após 7, 28 e 91 dias de imersão.

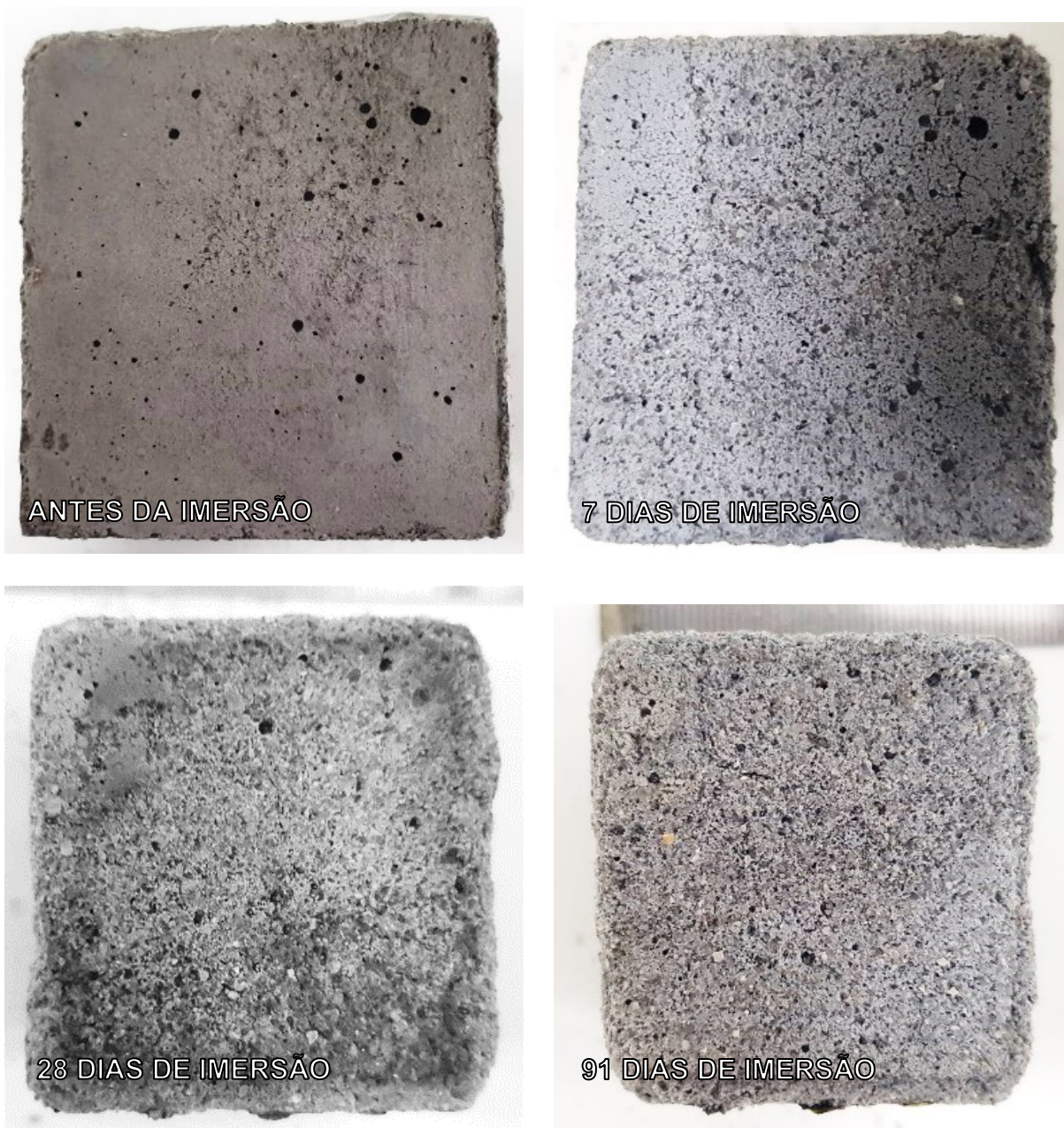
Após 91 dias de imersão a argamassa geopolimérica apresentou a mesma formação de pequenas fissuras mapeadas, assim como na imersão em ácido sulfúrico, porém, na argamassa de cimento Portland puderam ser novamente observadas maiores desagregações, esfarelamentos e a exposição dos agregados. Do mesmo modo, observa-se uma menor resistência do cimento Portland ao ácido clorídrico, que é capaz de instabilizar as ligações alcalinas do cimento a partir de reações de descalcificação da pasta. Segundo Kwasny *et al.* (2018) e Mohan e Mini (2018), a perda de cálcio se dá pelo ataque do ácido clorídrico à portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) e o silicato de cálcio hidratado (CSH) do cimento, formando sais de cálcio (principalmente  $\text{CaCl}_2$ ), que podem ser expansivos e lixiviados pela própria solução aquosa do meio. Nos geopolímeros, novamente não são observadas alterações de mesma magnitude devido à baixa quantidade de compostos de cálcio na sua composição e maior estabilidade química da matriz.

Figura 29 – Corpos de prova geopoliméricos após imersão em ácido clorídrico



Fonte: Autor (2021)

Figura 30 – Corpos de prova de cimento Portland após imersão em ácido clorídrico

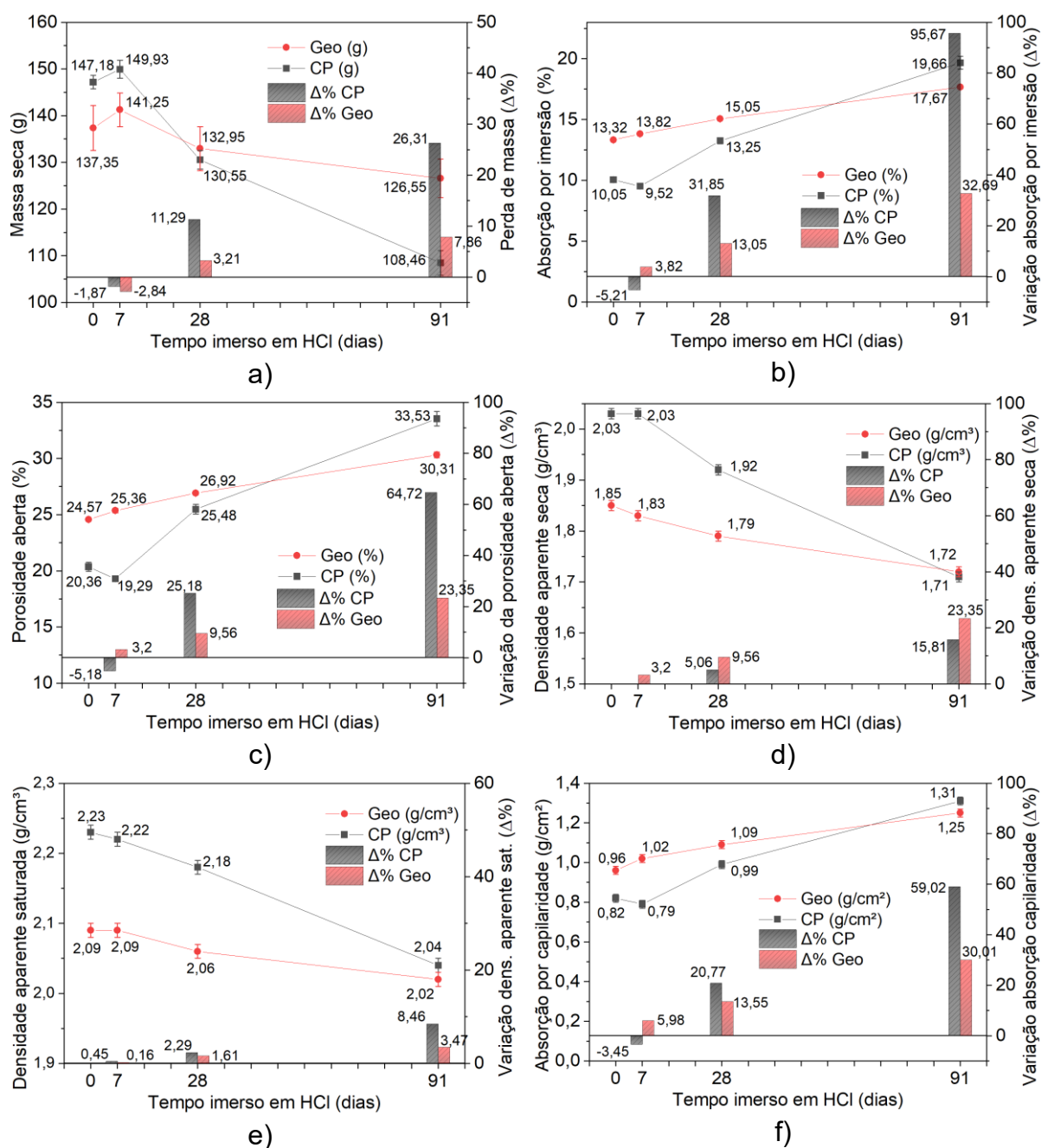


Fonte: Autor (2021)

#### 4.2.2.2 *Perda de massa, absorção de água por imersão, porosidade aberta, densidade aparente e absorção de água por capilaridade*

Os resultados dos ensaios de caracterização das propriedades físicas das amostras imersas em ácido clorídrico são apresentados na Figura 31.

Figura 31 – Resultado da caracterização das propriedades físicas dos corpos de prova imersos em ácido clorídrico

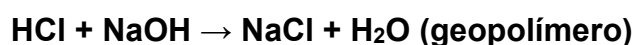
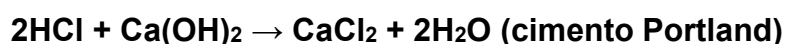


Fonte: Autor (2021)

De forma geral, o comportamento das propriedades físicas das argamassas imersas em ácido clorídrico apresenta tendência similar ao das amostras imersas em ácido sulfúrico, as perdas de massa observadas após 91 dias de imersão são de 26,31% para a matriz de cimento Portland e de apenas 7,86% para a argamassa geopolimérica, resultando numa diferença de 18,45% entre elas.

Assim como com o ácido sulfúrico, foram observadas maiores influências do ácido clorídrico na variação das propriedades físicas das amostras geopoliméricas nas

idades iniciais (até 7 dias) e maiores influências do ácido na matriz de cimento Portland em maiores idades (entre 28 e 91 dias), principalmente o aumento da porosidade e das absorções, o que pode ser explicado inicialmente pelo enfraquecimento das ligações alcalinas e pela posterior reação do ácido com o cálcio e sódio das pastas com a formação de sais de cálcio e de sódio. A reação do ácido clorídrico com o cimento Portland provoca a formação de cloreto de cálcio e água, e nos geopolímeros ocorre a formação de cloreto de sódio e água, conforme as seguintes reações:



#### 4.2.2.3 Resistência à compressão

Os resultados da perda de resistência (%) das argamassas são apresentados na Figura 32 e a relação da resistência mecânica à compressão (RMC) e a porosidade dos materiais é apresentado na Figura 33.

Figura 32 – Resistência à compressão após imersão em ácido clorídrico

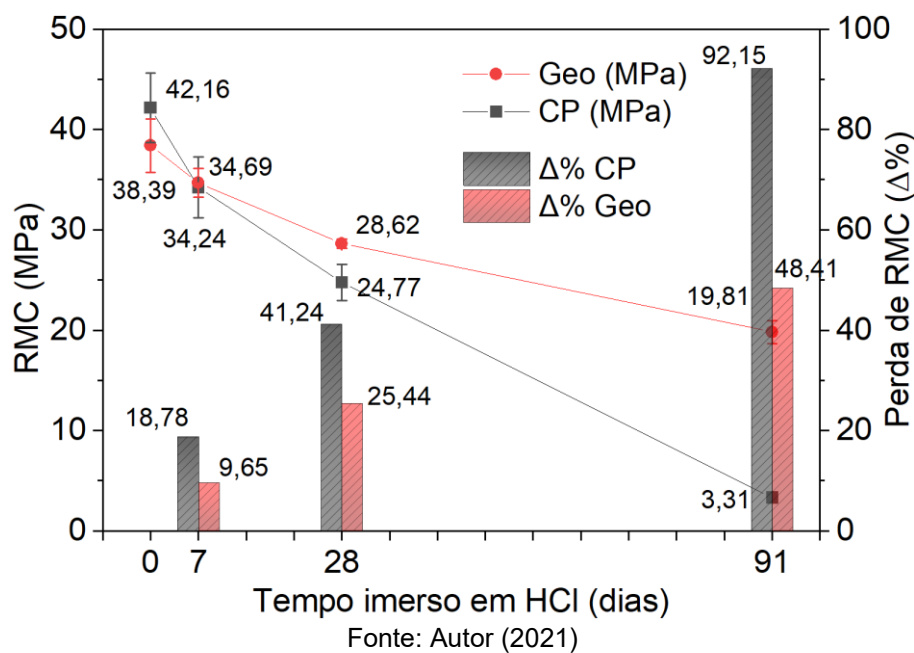
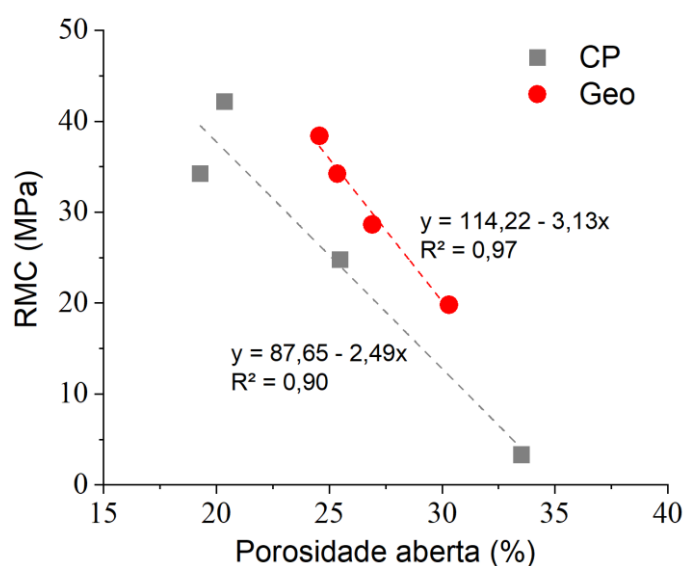


Figura 33 – Relação entre a resistência mecânica à compressão e a porosidade das amostras imersas em ácido clorídrico



Fonte: Autor (2021)

Conforme é possível observar na Figura 32, as matrizes geopoliméricas apresentaram menores degradações na sua resistência mecânica à compressão do que as argamassas de cimento Portland em todos os períodos de exposição, sendo mais resistente a este meio. As perdas de resistência aos 91 dias de ensaio demonstram que a argamassa de cimento Portland perdeu quase toda sua resistência inicial à compressão (92,15%) enquanto que os geopolímeros tiveram apenas cerca de metade de sua resistência diminuída (48,41%), resultando numa diferença de 43,74% entre as argamassas. A partir da Figura 33 é possível constatar que a resistência mecânica das argamassas é influenciada diretamente pelo aumento da porosidade das matrizes provocado pelo ataque ácido. A maior perda de resistência mecânica à compressão da argamassa de cimento Portland pode ser justificada pela maior influência do ácido clorídrico na porosidade da argamassa de cimento Portland conforme pode ser observado na Figura 31c.

Foi também constatado que as argamassas geopoliméricas apresentaram uma menor perda de resistência quando comparadas ao ácido sulfúrico, o que pode estar relacionada à menor formação de reações expansivas, confirmando as conclusões obtidas por outros estudos (KWASNY *et al.*, 2018, WALLAH; RANGAN, 2016).

Embora a solução ácida tenha uma menor concentração de ácido clorídrico (2,5%) do que a solução de ácido sulfúrico (3%), a concentração íons cloro da solução



de ácido clorídrico é superior à concentração de íons sulfato da solução de ácido sulfúrico o que provoca uma maior agressividade do ácido clorídrico na descalcificação da matriz de cimento Portland e justifica a maior perda de resistência à compressão dos corpos de prova. Conforme é explicado por Mohan e Mini (2018), outro fator que pode ter favorecido o cimento Portland no ácido sulfúrico ante a o ácido clorídrico é a presença das adições minerais do cimento CP-V ARI RS (resistente à sulfatos) que forneceram resistência superior às eventuais reações expansivas provocadas por sulfatos.

Portanto, destaca-se novamente que, mesmo possuindo uma permeabilidade superior e uma densidade menor que a amostra de cimento Portland, a argamassa geopolimérica estudada apresenta uma durabilidade superior ao ácido clorídrico, em termos de durabilidade (propriedades físicas) e resistência mecânica à compressão, após 91 dias de imersão.

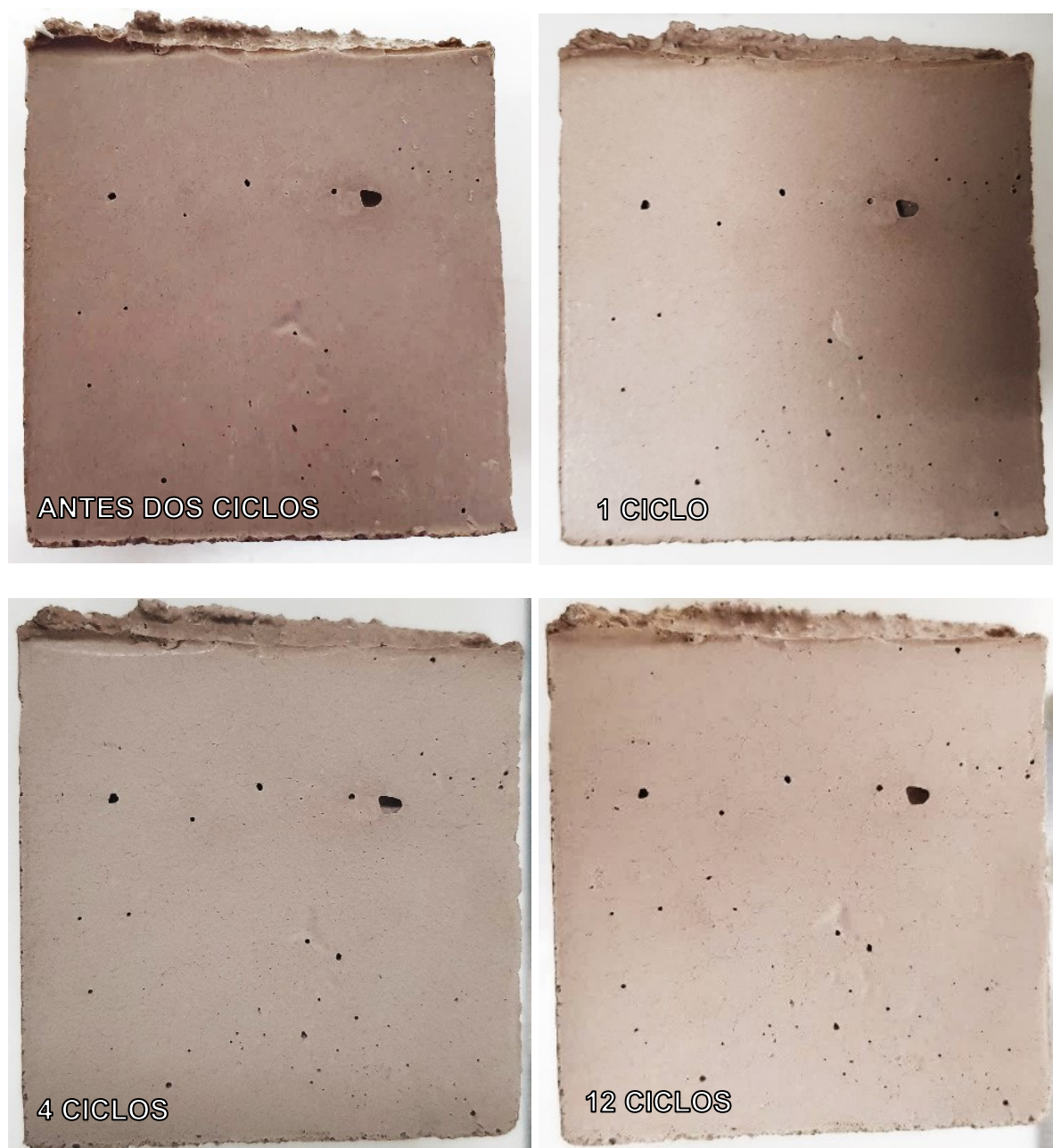
#### **4.2.3 Ciclos de molhagem-secagem e gelo-degelo**

Os resultados dos ensaios realizados nos corpos de prova submetidos à ciclos de molhagem-secagem e gelo-degelo são apresentados nesta seção.

##### *4.2.3.1 Inspeção visual*

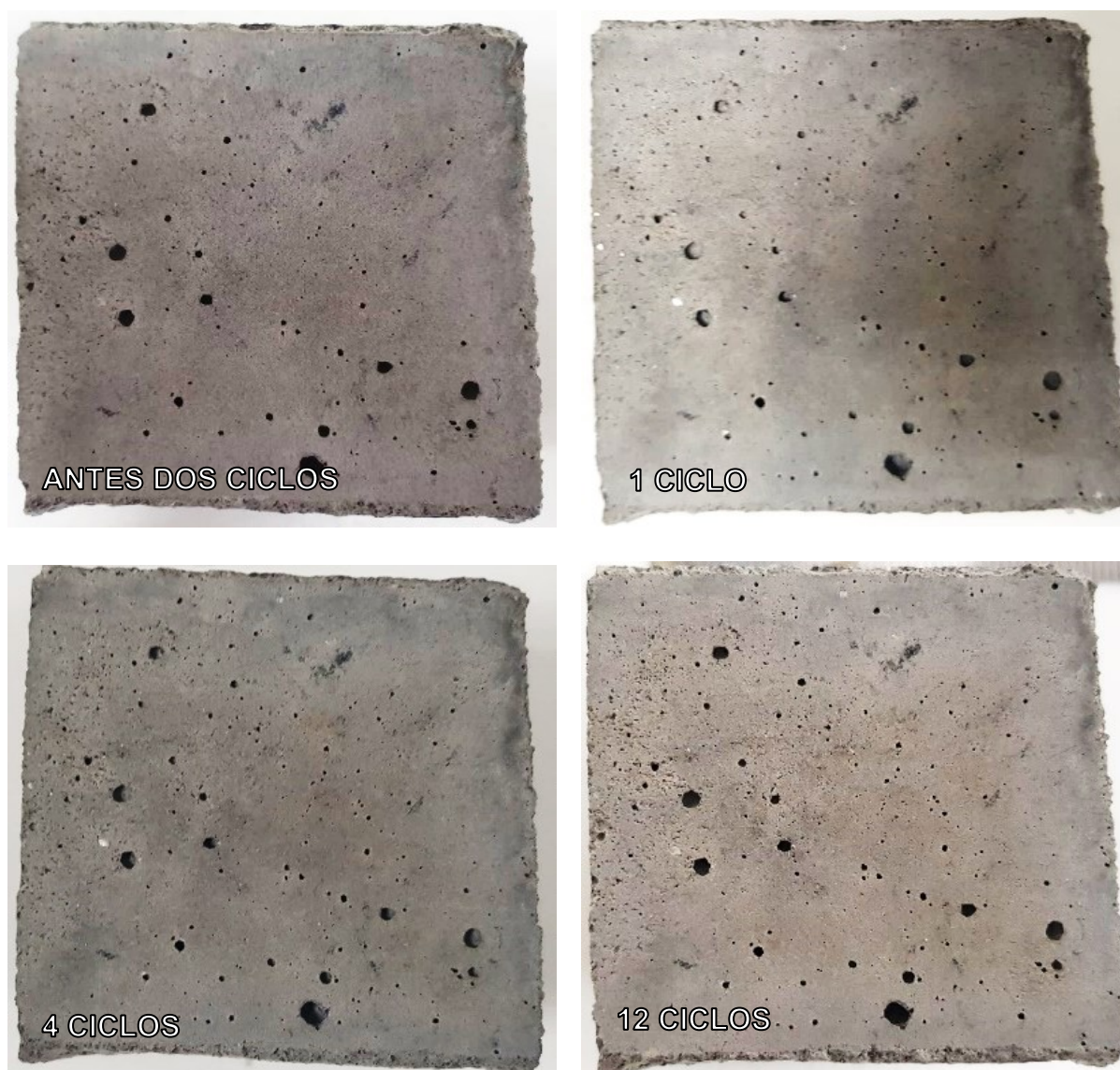
A inspeção visual dos corpos de prova antes e após 12 ciclos de molhagem-secagem e gelo-degelo não permitiram constatar degradações visíveis na superfície dos corpos de prova. A Figura 34 ilustra a condição típica observada dos corpos de prova geopoliméricos e a Figura 35 demonstra a condição típica dos corpos de prova de cimento Portland antes e após 12 ciclos.

Figura 34 – Corpos de prova geopoliméricos após ciclos



Fonte: Autor (2021)

Figura 35 – Corpos de prova de cimento Portland após ciclos



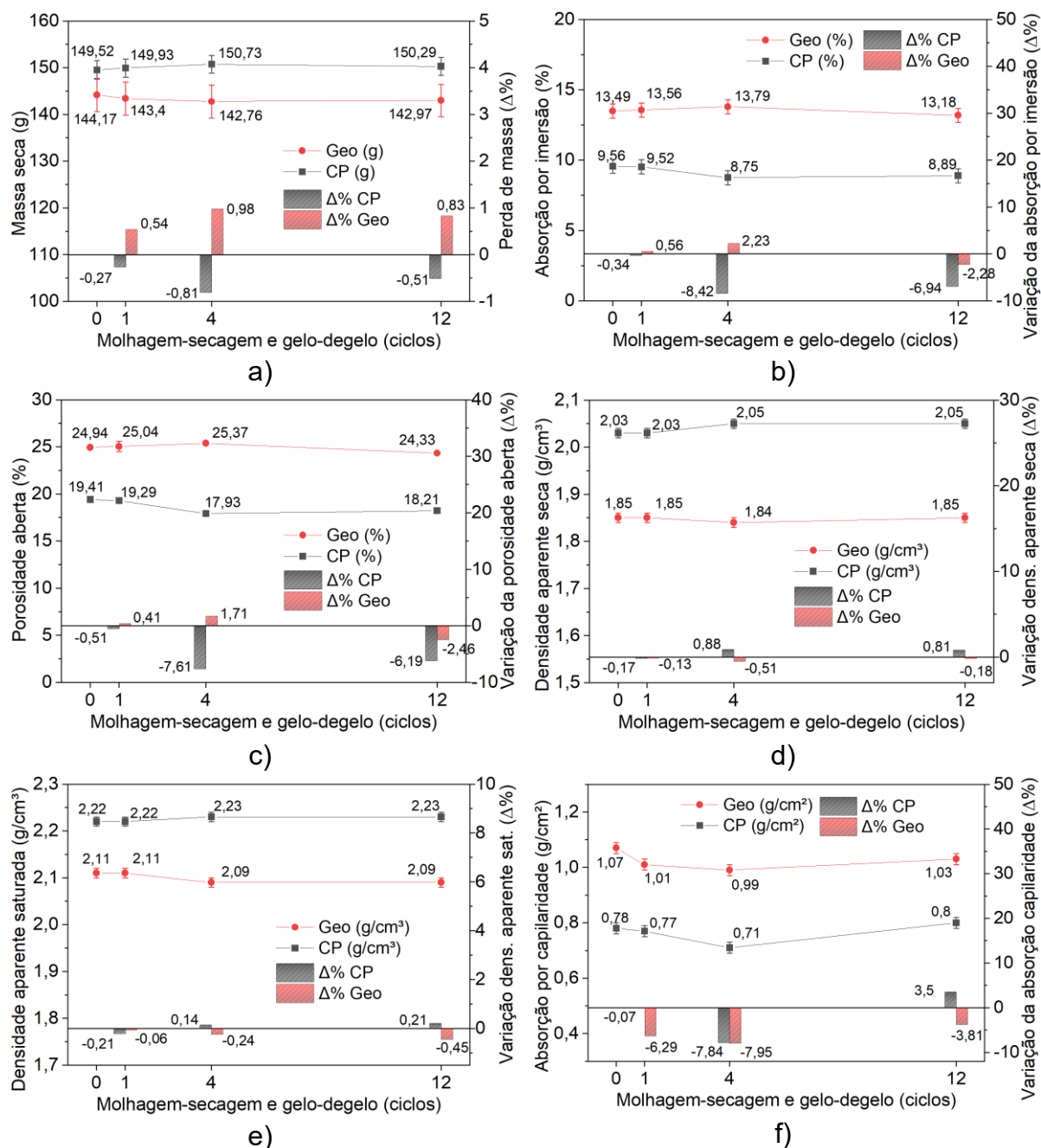
Fonte: Autor (2021)

#### 4.2.3.2 *Perda de massa, absorção de água por imersão, porosidade aberta, densidade aparente e absorção de água por capilaridade*

Os resultados dos ensaios de caracterização das propriedades físicas das amostras submetidas à ciclos de molhagem-secagem e gelo-degelo são apresentados na Figura 36. A partir dos resultados é possível constatar que após 12 ciclos, as características físicas dos corpos de prova não apresentaram alterações relevantes, pelo contrário, observa-se até uma melhora de algumas características físicas da argamassa de cimento Portland, como a diminuição da absorção e diminuição do índice de vazios, provavelmente em decorrência do favorecimento nas condições cura

das amostras. Desta forma, não foi possível avaliar a degradação das argamassas em apenas 12 ciclos. De fato, Aygormez *et al.* (2020), observaram ainda uma boa estabilidade das propriedades físicas dos geopolímeros à base de metacaulim em até 56 ciclos de gelo-degelo e 25 ciclos de molhagem-secagem.

Figura 36 – Resultado da caracterização das propriedades físicas dos corpos de prova em ciclos de molhagem-secagem e gelo-degelo

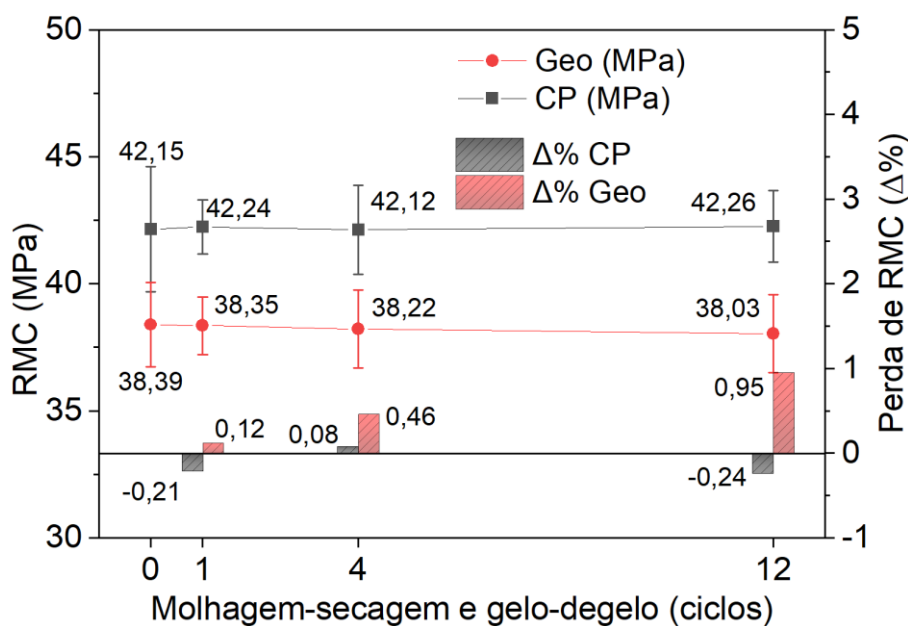


Fonte: Autor (2021)

#### 4.2.3.3 Resistência à compressão

Os resultados da perda de resistência dos corpos de prova são apresentados na Figura 37.

Figura 37 – Perda de resistência à compressão aos 0, 1, 4 e 12 ciclos de molhagem-secagem e gelo-degelo



Fonte: Autor (2021)

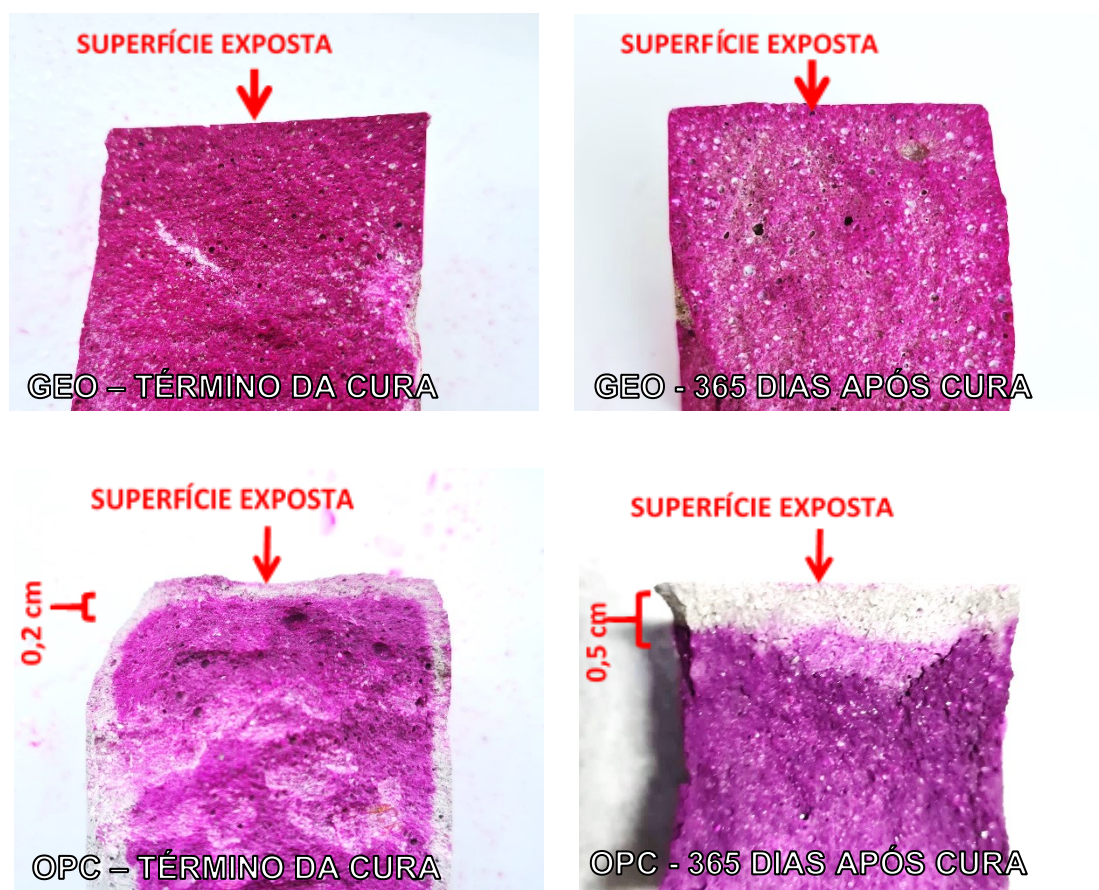
Não foram observadas mudanças relevantes nas resistências mecânicas à compressão dos corpos de prova após 12 ciclos de molhagem-secagem e gelo-degelo (variações inferiores à 1%). As pequenas perdas de resistência dos geopolímeros e os ganhos de resistência observado no cimento Portland são esperadas e podem ter relação com a variabilidade dos resultados obtidos e por influência nas reações de cura dos corpos de prova. Torgal e Jalali (2010) apresentam diversos estudos indicando a boa resistência dos geopolímeros ao gelo-degelo e Aygomez *et al.* (2020) demonstram em seu estudo ganhos de resistência de amostras geopoliméricas em 56 ciclos de gelo-degelo e 25 ciclos de molhagem-secagem.

Embora as amostras não terem sofrido grandes variações em suas propriedades físicas e resistências em 12 ciclos completos (91 dias de ensaio), observa-se que os geopolímeros não apresentaram uma diminuição de desempenho e apresentaram comportamento equivalente à argamassa de cimento Portland estudada, permitindo concluir que em até 12 ciclos de molhagem-secagem e gelo-degelo, os geopolímeros apresentam um bom desempenho à ciclos de molhagem-secagem e gelo-degelo.

#### 4.2.4 Ensaio de alcalinidade

O ensaio de alcalinidade realizado na seção transversal dos corpos de prova a partir da aspersion de fenolftaleína é apresentado na Figura 38.

Figura 38 – Ensaio de carbonatação das amostras.



Fonte: Autor (2021)

Dos resultados obtidos é possível constatar que imediatamente após o período de cura, a camada de carbonatação na argamassa de cimento Portland já contava com cerca de 2,0 mm de profundidade (sem coloração), provocando o rebaixamento do pH nessas regiões para níveis inferiores à 8,3, enquanto que nos geopolímeros não foram constatadas diminuições relevantes de pH em toda a seção do corpo de prova (coloração vermelho carmim). Após 365 dias do período de cura, foi observado aumento da profundidade carbonatada da argamassa de cimento Portland, a qual avançou até uma profundidade de 5,0 mm a partir da superfície, enquanto que nos geopolímeros, novamente toda seção transversal manteve uma elevada alcalinidade. Pasupathy *et al.* (2016) observaram profundidades de carbonatação de 8 – 27,5 mm após 8 anos de carbonatação natural de um concreto geopolimérico, indicando um bom comportamento dos geopolímeros em maiores idades.

Apesar de não ter sido observada a formação de uma camada de carbonatação na superfície dos corpos de prova geopoliméricos assim como no cimento Portland, de acordo com Chen *et al.* (2021) e Badar *et al.* (2014), normalmente o desempenho dos geopolímeros à carbonatação é inferior ao do Cimento Portland pois os processos de carbonatação de matrizes geopoliméricas são diferentes das matrizes de cimento Portland. Os autores descrevem que o pH da matriz de cimento Portland é controlado pelos produtos de hidratação do hidróxido de cálcio, enquanto que nos geopolímeros com baixo teor de cálcio esta fase não se forma, e, portanto, o pH do sistema é controlado pela solução dos poros.

Além da manutenção da elevada alcalinidade pelos produtos de hidratação do hidróxido de cálcio nas matrizes de cimento Portland, de acordo com Gentil (2011), os carbonatos de cálcio formados se depositam nos poros do concreto e criam uma barreira (diminuição da porosidade) que dificulta o avanço da frente de carbonatação. Babaei, Khan e Castel (2018) afirmam que embora os geopolímeros sejam mais propensos a perder sua alcalinidade devido a inexistência de hidróxidos de cálcio na sua composição, o controle da alcalinidade na solução de poros e da porosidade pode permitir a sua utilização para a passivação das armaduras em estruturas de concreto

armado. Os autores ainda concluem que baixas concentrações de álcalis na solução de poros dos geopolímeros com baixo teor de cálcio já são suficientes para promover uma proteção eficiente para as armaduras em condições normais de carbonatação.

Assim sendo, observa-se um bom desempenho da argamassa geopolimérica à base de metacaulim estudada frente aos processos de carbonatação nos 365 dias de ensaios, destacando-se pela manutenção da elevada alcalinidade (coloração vermelho carmim) em toda sua seção transversal dentro deste período.

#### **4.2.5 Adição de cloretos nas misturas das argamassas**

Conforme descrito na metodologia, o ensaio busca avaliar a influência da adição de cloretos diretamente nas misturas diante da corrosão e potencial de corrosão dos corpos de prova armados com vergalhões de aço. A Figura 39 mostra os corpos de prova típicos e a Figura 40 apresenta o procedimento de ensaio de potencial de corrosão das amostras. A Tabela 12, Tabela 13, Figura 41 e a Figura 42 apresentam os resultados obtidos nas leituras de potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) dos corpos de prova, indicando a probabilidade de ocorrência de corrosão das armaduras após 0, 7, 28, 91, 180 e 365 dias do período inicial de cura de 6 semanas.

Buscando avaliar a passivação do aço e a existência efetiva de corrosão das armaduras, ao final dos 365 dias de ensaio foi realizado o rompimento dos corpos de prova e as armaduras foram avaliadas visualmente conforme é possível observar na Figura 43 e na Figura 44.



Figura 39 – Corpos de prova típicos para o ensaio de potencial de corrosão



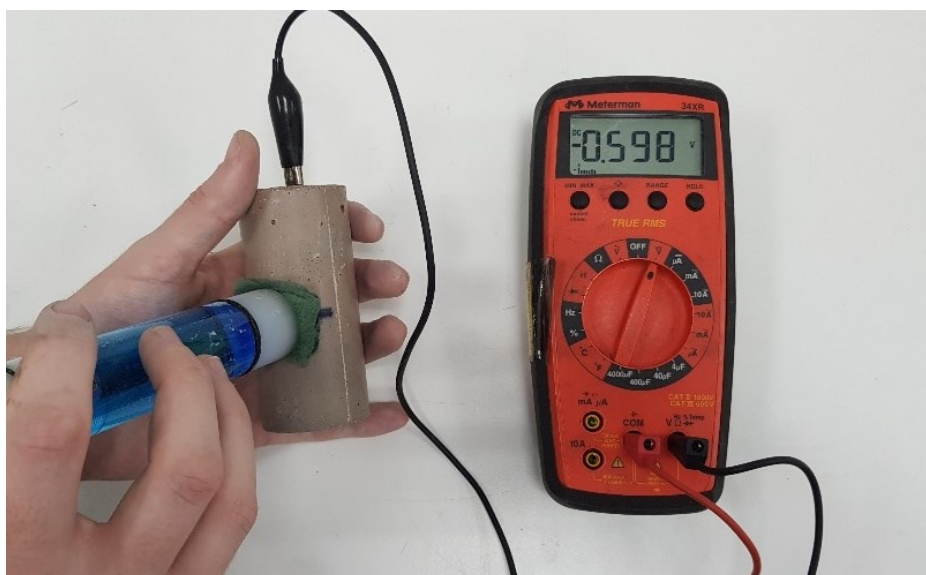
a) Geopolímero (Metacaulim)



b) Cimento Portland (CP V – ARI RS)

Fonte: Autor (2021)

Figura 40 – Procedimento do ensaio de potencial de corrosão das amostras



Fonte: Autor (2021)

Tabela 12 – Potencial de corrosão médio - Ecorr (mV) dos corpos de prova com cloretos adicionados nas misturas geopoliméricas

Amostra	DIAS					
	0	7	28	91	180	365
REF GEO 1 0% NaCl	-233 ± 27	-217 ± 3	-190 ± 9	-167 ± 21	-125 ± 12	-135 ± 8
GEO 2 0,25% NaCl	-590 ± 10	-546 ± 22	-514 ± 14	-477 ± 21	-282 ± 20	-237 ± 16
GEO 3 0,50% NaCl	-604 ± 25	-572 ± 27	-552 ± 10	-513 ± 15	-303 ± 30	-252 ± 28
GEO 4 0,75% NaCl	-605 ± 25	-569 ± 17	-566 ± 10	-563 ± 15	-317 ± 22	-298 ± 39
GEO 5 1,0% NaCl	-614 ± 5	-584 ± 23	-570 ± 8	-550 ± 20	-390 ± 18	-368 ± 38

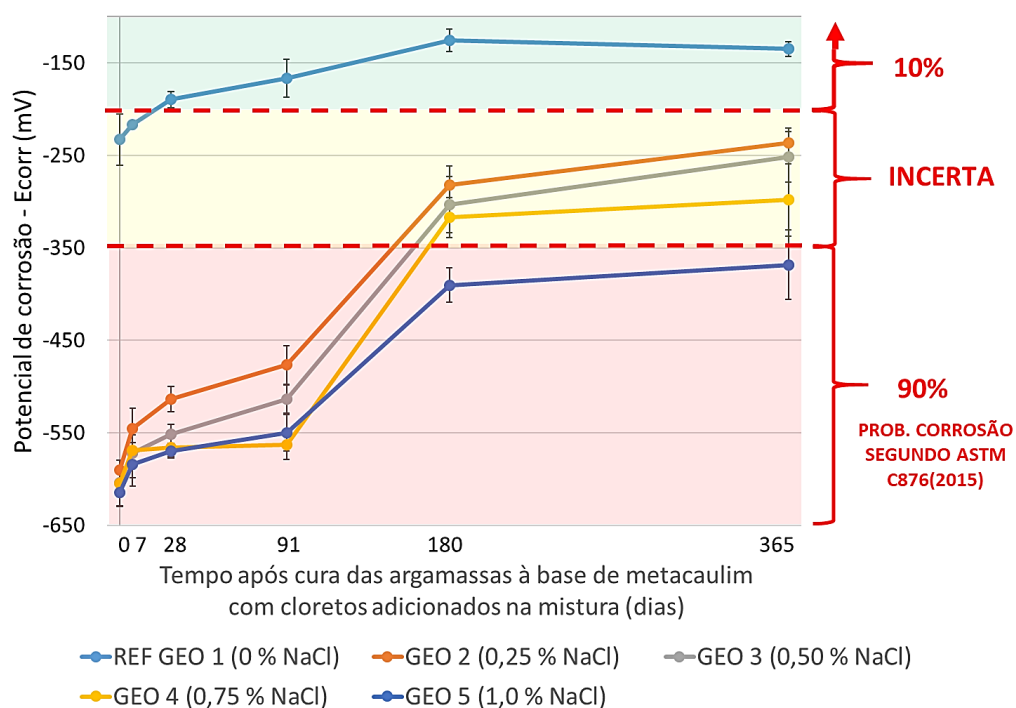
Fonte: Autor (2021)

Tabela 13 – Potencial de corrosão médio - Ecorr (mV) dos corpos de prova com cloretos adicionados nas misturas de cimento Portland (OPC)

Amostra	DIAS					
	0	7	28	91	180	365
REF OPC 1 0% NaCl	-303 ± 14	-330 ± 15	-336 ± 11	-280 ± 10	-208 ± 12	-198 ± 33
OPC 2 0,25% NaCl	-401 ± 22	-384 ± 15	-427 ± 14	-397 ± 25	-312 ± 13	-294 ± 34
OPC 3 0,50% NaCl	-440 ± 26	-460 ± 26	-452 ± 16	-405 ± 22	-352 ± 23	-332 ± 28
OPC 4 0,75% NaCl	-463 ± 8	-489 ± 13	-488 ± 16	-430 ± 20	-360 ± 26	-339 ± 31
OPC 5 1,0% NaCl	-469 ± 14	-487 ± 7	-491 ± 17	-445 ± 23	-367 ± 19	-355 ± 18

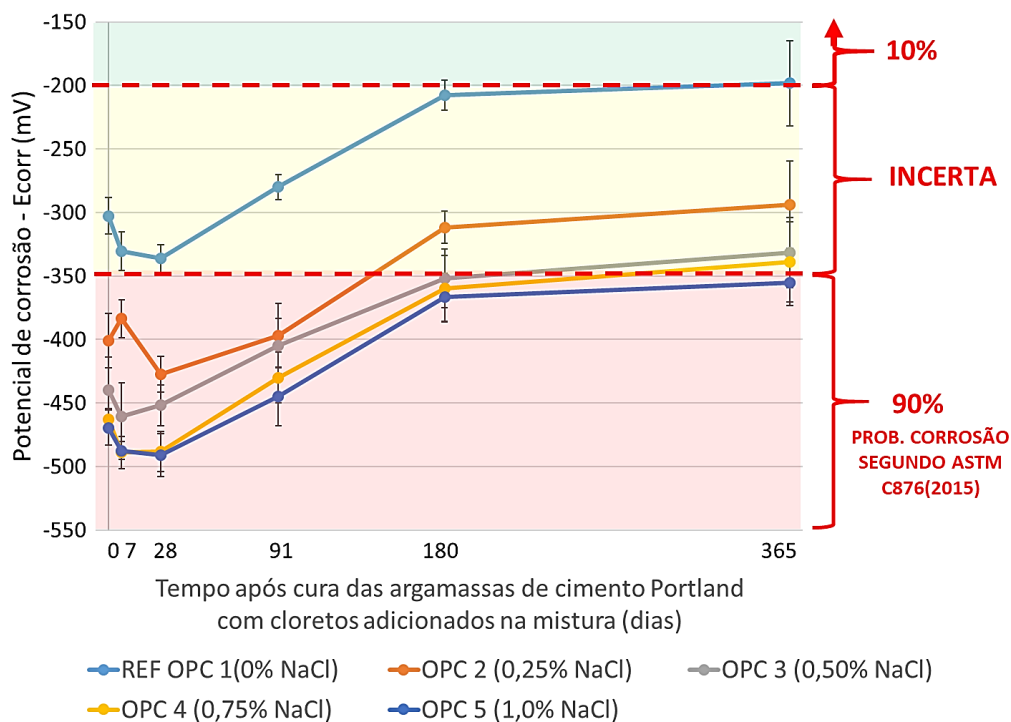
Fonte: Autor (2021)

Figura 41 – Resultados do ensaio de potencial de corrosão das argamassas geopoliméricas (GEO)



Fonte: Autor (2021)

Figura 42 – Resultados do ensaio de potencial de corrosão das argamassas de cimento Portland (OPC)

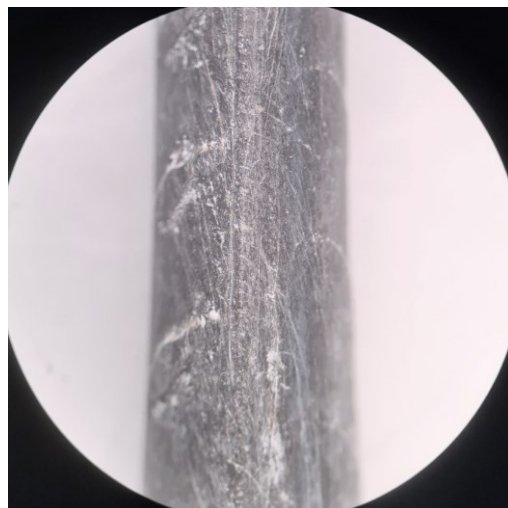


Fonte: Autor (2021)

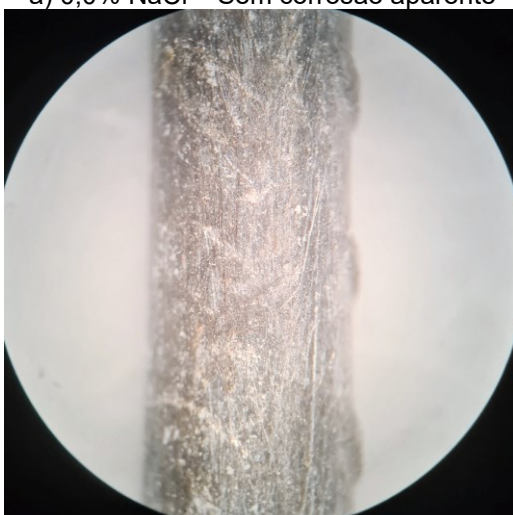
Figura 43 – Condição visual das armaduras dos corpos de prova geopoliméricos após 365 dias de ensaio



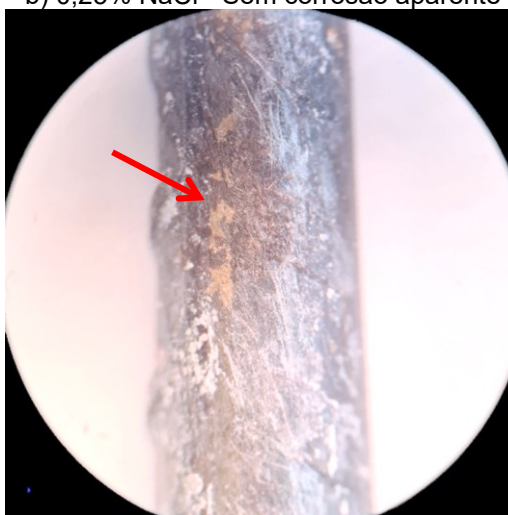
a) 0,0% NaCl – Sem corrosão aparente



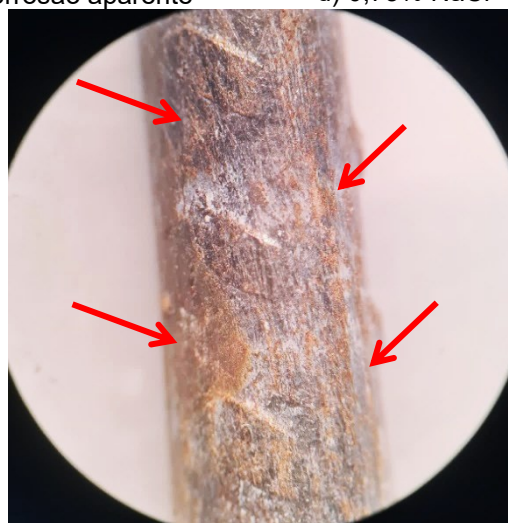
b) 0,25% NaCl - Sem corrosão aparente



c) 0,5% NaCl – Sem corrosão aparente



d) 0,75% NaCl – Início da corrosão (pites)



e) 1,0% NaCl - Com corrosão (pites)

Fonte: Autor (2021)

Figura 44 – Condição visual das armaduras dos corpos de prova de cimento Portland após 365 dias de ensaio



a) 0,0% NaCl – Sem corrosão aparente



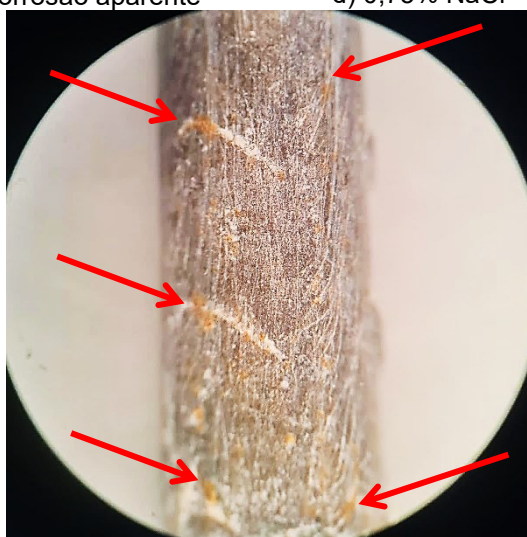
b) 0,25% NaCl – Sem corrosão aparente



c) 0,5% NaCl – Sem corrosão aparente



d) 0,75% NaCl – Sem corrosão aparente



e) 1,0% NaCl – Início da corrosão (pites)

Fonte: Autor (2021)

Dos resultados apresentados é possível observar que as argamassas de referência apresentam valores de potencial eletroquímico superiores à  $-200$  mV (mais eletropositivos) e não formaram produtos de corrosão visíveis (Figura 43a e Figura 44a) após os 365 dias, indicando uma baixa probabilidade de corrosão e que o processo de passivação do aço ocorreu tanto na argamassa geopolimérica quanto na de cimento Portland. A diferença no potencial eletroquímico entre as argamassas de referência de cimento Portland e de geopolímero de até  $-146$  mV (aos 28 dias) pode indicar que as argamassas possuem diferentes quantidades de oxigênio dissolvido nas matrizes. Babae e Castel (2018) indicam que amostras com elevado teor de cálcio provocam o consumo do oxigênio dissolvido pelos sulfetos da argamassa provocando a diminuição do potencial eletroquímico da amostra. O que permite concluir que os limites de potencial de corrosão para concretos de cimento Portland apresentados pela ASTM C876 (2015) podem não se aplicar para a argamassa geopolimérica estudada e necessitar de ajustes devido aos baixos teores de cálcio da matéria prima, o que deverá ser avaliado em estudo específico.

Durante o período de ensaios de 365 dias após o período de cura de 6 semanas, os corpos de prova apresentaram um comportamento similar, com uma maior eletronegatividade (mais eletronegativos) nos primeiros dias de ensaio. Conforme indicado por Medeiros *et al.* (2017), este comportamento pode ter relação com o processo de cura e a formação da camada de óxido de ferro que compõe a camada passivadora do aço nas amostras. Ao final dos 365 dias ocorreu um aumento dos potenciais eletroquímicos (mais eletropositivos) que tenderam à uma estabilização. As amostras geopoliméricas apresentaram aumentos constantes dos seus potenciais, tornando-se mais eletropositivos com o tempo, enquanto que as amostras de cimento Portland, até os 28 dias de ensaio, tiveram seus potenciais diminuídos, o que permite entender que a camada passivadora ainda se encontrava em formação nestas amostras. Araújo (2004) constatou em sua pesquisa que a formação da película passivadora no aço pode ocorrer até 130 dias após a produção do concreto.

Após 365 dias do final da cura inicial, os potenciais eletroquímicos das amostras tenderam a uma estabilização, o que permitiu avaliar os resultados dos potenciais de corrosão de acordo com os parâmetros apresentados pela ASTM C876 (2015). Os potenciais medidos nas amostras geopoliméricas indicaram que 0,25% de cloretos em relação à massa de aglomerante são suficientes para atingir o patamar

de corrosão incerta e 1,0% de cloretos para atingir o patamar de 90% DE probabilidade de corrosão do aço. A Figura 43 indica que o processo de corrosão das armaduras se iniciou com teores de cloretos entre 0,5 - 0,75%, sendo similar ao teor crítico obtido por Babae e Castel (2018) em sua pesquisa.

Os valores de potenciais eletroquímicos das matrizes de cimento Portland indicaram que 0,25% de cloretos em relação à massa de aglomerante é suficiente para enquadrá-lo na faixa de corrosão incerta e com 1,0% o mesmo se enquadra na faixa com 90% de probabilidade de corrosão. Embora os valores de potencial de corrosão indiquem que as argamassas de cimento Portland apresentam maior probabilidade de corrosão com teores menores de cloretos em relação aos geopolímeros, a Figura 44 indica que o processo de corrosão se iniciou nas armaduras com teores de cloretos entre 0,75 - 1,0%.

Diante dos resultados descritos acima é possível observar que ambas as argamassas promoveram a passivação das armaduras, assim como foi constatado por Babae e Castel (2018). Para um mesmo teor de cloretos adicionado nas misturas, os geopolímeros revelaram valores menos eletronegativos no ensaio de potencial de corrosão indicando uma menor probabilidade de corrosão, contudo a inspeção visual das barras demonstrou que o processo de corrosão das armaduras nos geopolímeros se iniciou com um menor teor de cloretos comparado ao cimento Portland, indicando que os limites da ASTM C 876 (2015) podem não se aplicar aos geopolímeros e necessitem de ajustes. Embora o teor crítico de cloretos da argamassa geopolimérica seja inferior ao do cimento Portland, o limite máximo de 0,4% de cloretos (em relação a massa de aglomerante) da ABNT NBR 12655 (ABNT, 2015b) também é aplicável para a argamassa estudada.

#### **4.2.6 Imersão em solução salina**

Os resultados das medições de potencial de corrosão das argamassas imersas em soluções salinas buscam avaliar a influência da permeabilidade de cloretos das amostras no potencial de corrosão das armaduras. A Figura 45 demonstra os corpos de prova típicos do ensaio impermeabilizados nas faces superiores e inferiores.

Figura 45 – Corpos de prova para imersão com topo e base impermeabilizadas



a) Geopolímero (Metacaulim)



b) Cimento Portland (CP V - ARI RS)

Fonte: Autor (2021)

A Tabela 14 e a Figura 46 apresentam os resultados obtidos nos ensaios de potencial de corrosão.

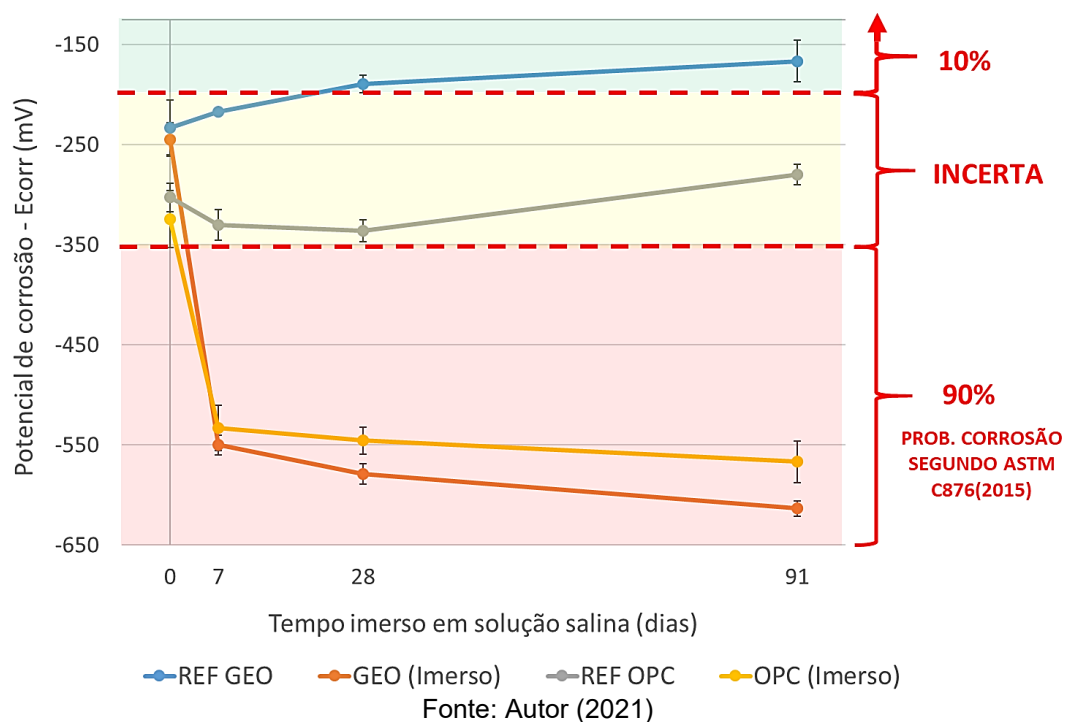
Tabela 14 – Potencial de corrosão médio -  $E_{corr}$  (mV) dos corpos de prova imersos em solução salina

Amostra	DIAS			
	0	7	28	91
REF GEO	-233 ± 27	-217 ± 3	-190 ± 9	-167 ± 21
GEO (Imerso)	-245 ± 17	-550 ± 10	-579 ± 10	-613 ± 8
REF OPC	-303 ± 14	-330 ± 15	-336 ± 11	-280 ± 10
OPC (Imerso)	-325 ± 28	-533 ± 23	-546 ± 14	-567 ± 21

Fonte: Autor (2021)

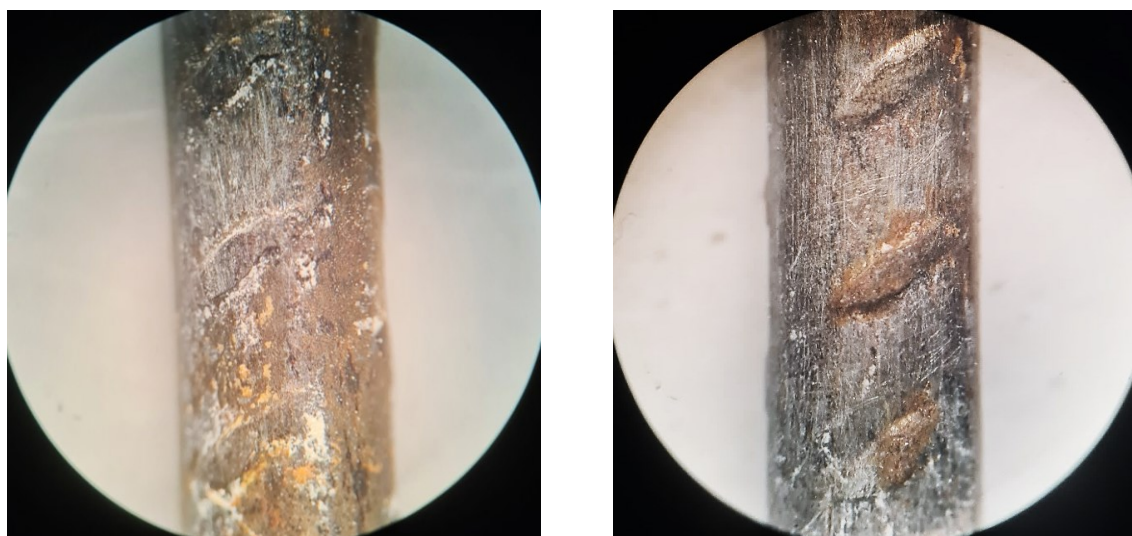


Figura 46 – Resultados do ensaio de potencial de corrosão das amostras imersas em solução salina



Buscando avaliar a existência efetiva de corrosão das armaduras, ao final dos 91 dias de ensaio foi realizado o rompimento dos corpos de prova e as armaduras foram avaliadas visualmente conforme é possível observar na Figura 47.

Figura 47 – Condição visual das armaduras dos corpos de prova 91 dias de imersão em solução salina



a) Geopolímero – Com corrosão mais severa

b) Cimento Portland – Com corrosão menos severa

Fonte: Autor (2021)

Comparando-se as amostras de referência (sem imersão) e as amostras imersas em solução salina, observa-se uma grande diminuição dos potenciais eletroquímicos das amostras imersas, indicando que apenas 7 dias de imersão contínua são suficientes para deixar os corpos de prova com potenciais mais eletronegativos e colocar ambas argamassas no patamar de 90% de probabilidade de corrosão em função da exposição aos cloretos de acordo com a ASTM C876 (2015). Aguirre-Guerrero *et al.* (2017) obtiveram resultados de potenciais de corrosão de mesma magnitude em argamassas de metacaulim em apenas 2 ciclos de umedecimento em solução salina.

Ao final dos 91 dias de imersão é possível observar que os geopolímeros apresentaram valores de potenciais de corrosão mais eletronegativos que a argamassa de cimento Portland (diferença de 46 mV), uma maior variação no potencial em relação à amostra de referência (446 mV) e uma maior magnitude de corrosão visível das armaduras (Figura 47), o que pode ser explicado pela maior permeabilidade do traço proposto da argamassa geopolimérica conforme é apresentado na seção 4.2.1.

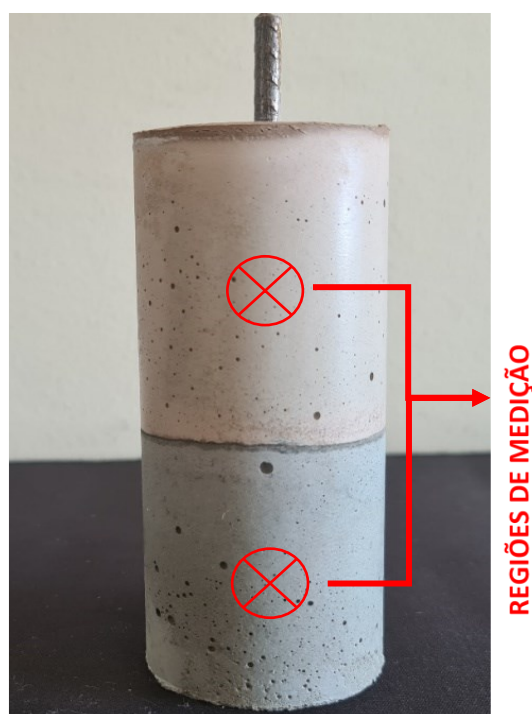
Embora o desempenho dos geopolímeros à corrosão seja inferior aos do cimento Portland, a modificação da formulação da argamassa e utilização de adições, principalmente de compostos de cálcio, podem promover a diminuição da permeabilidade e favorecer os geopolímeros frente ao ataque por cloretos. Badaee e Castel (2018) afirmam que devido ao fato dos geopolímeros não absorverem parte dos cloretos absorvidos assim como o cimento Portland, a diminuição da porosidade é fundamental. Zhang, Yao e Zhu (2010) e Aguirre-Guerrero *et al.* (2017) afirmam que geopolímeros à base de metacaulim possuem grande potencial para utilização em regiões marinhas e na proteção das armaduras devido à baixa porosidade e permeabilidade que podem possuir.

#### **4.2.7 Compatibilidade eletroquímica da argamassa geopolimérica e de cimento Portland**

A compatibilidade eletroquímica entre argamassas mistas de cimento Portland e geopoliméricas foi avaliada a partir do ensaio de potencial de corrosão, o qual permitiu detectar os potenciais elétricos ao longo da armadura inserida dentro de corpos de prova compostos por cimento Portland (metade inferior) e geopolímero

(metade superior), conforme apresentado na Figura 48. As medições foram realizadas na região de cada material e os resultados são apresentados na Tabela 15 e na Figura 49.

Figura 48 – Corpos de prova compostos mistos por cimento Portland (*inferior*) e geopolímero (superior)



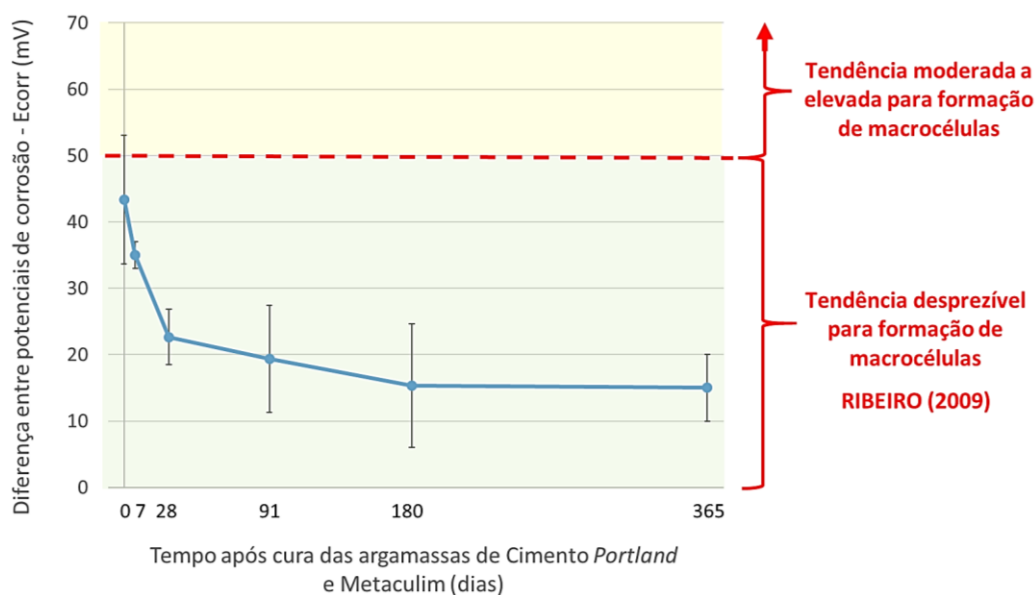
Fonte: Autor (2021)

Tabela 15 – Diferença entre potenciais de corrosão médio - Ecorr (mV) dos corpos de prova mistos

Amostra	DIAS					
	0	7	28	91	180	365
GEO (SUPERIOR)	-230	-233	213	215	173	162
OPC (INFERIOR)	-273	-268	236	234	188	177
<b>Diferença</b>	<b>43 ± 10</b>	<b>35 ± 2</b>	<b>23 ± 4</b>	<b>19 ± 8</b>	<b>15 ± 9</b>	<b>15 ± 5</b>

Fonte: Autor (2021)

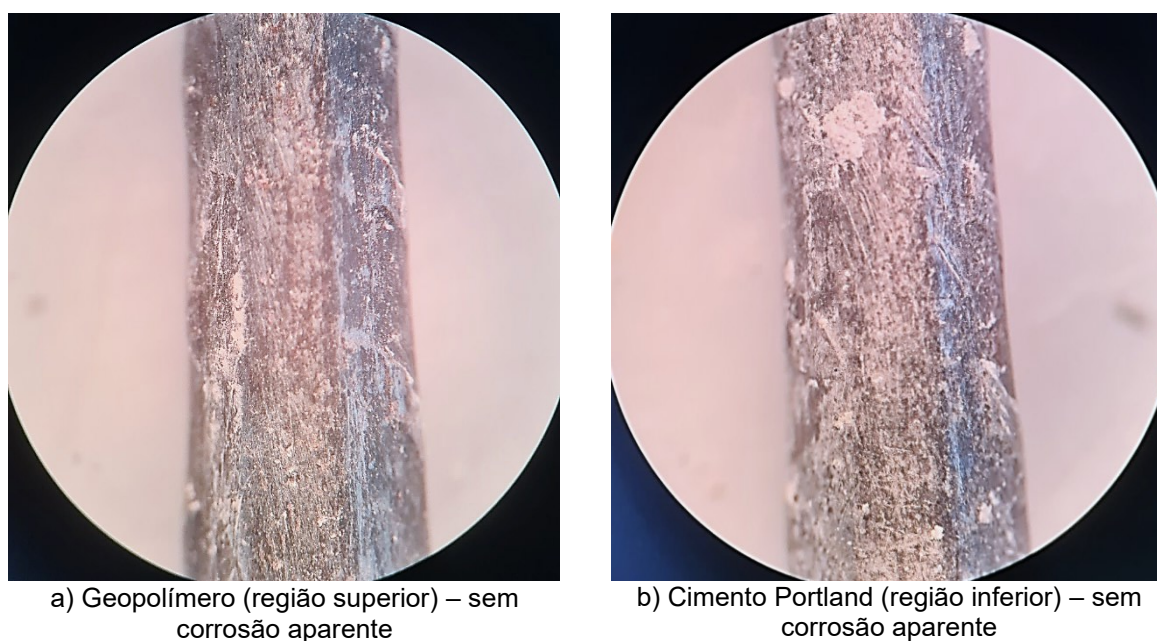
Figura 49 – Resultados do ensaio de potencial de corrosão das amostras mistas



Fonte: Autor (2021)

Buscando avaliar a existência efetiva de corrosão das armaduras, ao final dos 365 dias de ensaio foi realizado o rompimento dos corpos de prova e as armaduras foram avaliadas visualmente conforme é possível observar na Figura 50.

Figura 50 – Condição visual das armaduras dos corpos de prova mistos após 365 dias de ensaio



Fonte: Autor (2021)

Ao término do período de cura dos corpos de prova foram constatadas diferenças de potencial eletroquímico da ordem de 43 mV entre o cimento Portland e

geopolímero. Após 365 dias da cura foram observadas diferenças da ordem de 15 mV. Os referidos valores indicam que os materiais apresentam uma certa compatibilidade eletroquímica para utilização em conjunto. Segundo Ribeiro (2009), diferenças de potencial elétrico de até 50 mV possuem tendências desprezíveis de formação de macrocélulas.

A Figura 50 revela visualmente que não ocorreu a corrosão do aço inserido nos corpos de prova mistos com geopolímero e cimento Portland e que macrocélulas de corrosão possivelmente não foram originadas, indicando, portanto, uma boa compatibilidade eletroquímica entre as argamassas. Destaca-se que tal compatibilidade foi observada de forma preliminar em corpos de prova de pequena idade, ou seja, corpos de prova com elevada alcalinidade inicial e sem os efeitos da carbonatação e da contaminação por cloretos. A compatibilidade efetiva das argamassas geopoliméricas em estruturas de concreto armado com idades elevadas, carbonatadas e com processos corrosivos instalados devem ser objeto de estudos mais detalhados e de maior duração.

#### **4.2.8 Aplicabilidade em reparos estruturais**

A partir dos resultados obtidos, é possível avaliar a compatibilidade da argamassa geopolimérica com substratos de cimento Portland, conforme de Emmons *et al.* (1994), da seguinte forma:

##### *4.2.8.1 Compatibilidade estrutural*

Em termos de compatibilidade estrutural, os resultados apresentados na seção 4.2.1.3 demonstraram que a matriz geopolimérica apresentou elevada resistência à compressão e se assemelhou a argamassa de cimento Portland comparada. Embora não tenha sido avaliada a aderência entre as argamassas, estudos realizados por Aguirre-Guerrero *et al.* (2017) indicaram que geopolímeros apresentam uma boa adesão à substratos de cimento Portland. Outros parâmetros estruturais não puderam ser avaliados como a resistência à flexão, deformação lenta, módulos de elasticidade, etc.

#### *4.2.8.2 Compatibilidade de deformações:*

A compatibilidade de deformações deve ser avaliada, principalmente, a partir da análise da retração por secagem dos materiais, pelos módulos de elasticidade e pelos coeficiente de dilatação térmica do materiais e o substrato, o que não foi avaliado no presente estudo, contudo, destaca-se que os traços propostos das argamassas estudadas buscaram garantir a inexistência de fissuração visível por retração em cura ambiente, fenômeno este que ocorreu em argamassas com traços alternativos produzidas preliminarmente aos traços ideais propostos em função dos altos teores de finos e elevado calor de hidratação das misturas.

#### *4.2.8.3 Compatibilidade à agressividade ambiental:*

Os resultados apresentados nas seções 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3 e 4.2.4, demonstram que a argamassa geopolimérica estudada apresenta propriedades físicas similares à argamassa de cimento Portland estudada e desempenho superior em ambientes ácidos. Frente aos processos de carbonatação que provocam a redução do pH do concreto, os geopolímeros apresentaram bom desempenho, podendo promover a passivação das armaduras.

#### *4.2.8.4 Compatibilidade eletroquímica:*

Os resultados do ensaio de potencial de corrosão e de compatibilidade eletroquímica entre a argamassa geopolimérica e a argamassa de cimento Portland, apresentados nas seções 4.2.5, 4.2.6 e 4.2.7, indicaram que as argamassas promoveram a passivação do aço e apresentam boa compatibilidade eletroquímica nas primeiras idades, com tendências desprezíveis de formação de macrocélulas conforme classificação proposta por Ribeiro (2009). O geopolímero estudado apresentou desempenho inferior às contaminações por cloretos devido à maior permeabilidade da argamassa, o que pode, possivelmente, ser corrigido a partir de modificações na formulação da argamassa buscando reduzir sua permeabilidade.

Desta forma, complementando e corroborando com as informações apresentadas na revisão bibliográfica, pode-se afirmar que, a partir dos parâmetros que foram avaliados, a argamassa geopolimérica estudada apresenta compatibilidade promissora com substratos de concreto de cimento Portland, em termos estruturais, de deformações, à agressividade ambiental e eletroquímicos, possuindo grande potencial de ser utilizada como argamassa de reparo estrutural.

## 5 CONCLUSÃO

O estudo investigou as características mecânicas e de durabilidade de uma argamassa geopolimérica à base de Metacaulim após a exposição a soluções ácidas, ciclos de gelo-degelo e contaminações com cloretos, e comparou o seu comportamento ao de uma argamassa à base de cimento Portland com formulação, resistência mecânica e fluidez similar. Por fim, foi avaliada a aplicabilidade da argamassa geopolimérica estudada em reparos estruturais de elementos de concreto armado a partir dos parâmetros investigados.

Após testes com diferentes formulações, foi determinado um traço ideal de argamassa geopolimérica e um traço de argamassa de cimento Portland compatível. Para a determinação do traço das argamassas em estudo, buscou-se obter argamassas com resistência mecânica à compressão compatíveis e superiores à 35 MPa aos 28 dias, relação de aglomerante/areia de 1/2, inexistência de fissuras visíveis por retração na secagem e eflorescências, além de uma consistência similar avaliada pelo ensaio de *flow table* no estado fresco. A resistência média a compressão das argamassas após um período de cura de seis semanas foi de 38,39 MPa para os geopolímeros e de 42,16 MPa para a matriz de cimento Portland, apresentando uma diferença de 9,8% entre as resistências das amostras de referência. O ensaio de *Flow table* demonstrou um índice de consistência (espalhamento) de 22,33 cm para os geopolímeros e de 25,17 cm para o cimento Portland, indicando uma diferença de aproximadamente 11% entre os índices.

A análise das propriedades físicas e resistência mecânica à compressão no estado endurecido demonstrou um comportamento superior dos geopolímeros frente aos ataques por ácido sulfúrico e ácido clorídrico. Os geopolímeros apresentaram menores variações nas suas propriedades físicas pelos ácidos e revelaram menores perdas de massa do que a matriz de cimento Portland, tendo uma perda de massa 34,42% inferior no ácido sulfúrico e 18,45% inferior no ácido clorídrico, além de apresentar uma perda de resistência 11,71% menor no ácido sulfúrico e 43,74% menor no ácido clorídrico. Os 12 ciclos de molhagem-secagem e gelo-degelo demonstraram que os geopolímeros apresentaram um bom comportamento e ausência significativa de degradações ou variações nas suas propriedades físicas e resistência mecânica a compressão, assim como a argamassa de cimento Portland.



Ensaio de alcalinidade realizados indicaram um bom desempenho da argamassa geopolimérica estudada frente aos processos de carbonatação, não apresentando diminuições relevantes de pH em toda sua seção transversal após 365 dias de ensaios. Na argamassa de cimento Portland a camada de carbonatação atingiu uma profundidade média de 5,0 mm após 365 dias.

Os ensaios de potencial de corrosão das argamassas de referência indicaram que ambas promoveram o processo de passivação do aço dos corpos de prova, pois apresentaram potenciais eletroquímicos superiores (mais eletropositivos) à - 200 mV e não formaram produtos de corrosão visíveis nas armaduras após 365 dias de ensaio.

Relativamente às contaminações por cloretos, avaliadas a partir de ensaios de potencial de corrosão e inspeção visual das armaduras, constatou-se que o comportamento da argamassa geopolimérica estudada é inferior ao da argamassa de cimento Portland. A maior permeabilidade da argamassa geopolimérica estudada favoreceu um desempenho inferior dos geopolímeros frente à imersão em solução salina, apresentando valores mais eletronegativos (- 46 mV após 91 dias de ensaio) que o cimento Portland, uma maior variação nos valores potencial de corrosão em relação às amostras de referência e uma maior magnitude de corrosão visível nas barras. Os corpos de prova com cloretos adicionados diretamente nas misturas indicaram que os geopolímeros apresentam menor probabilidade de corrosão, contudo, foi observado que com 0,5 - 0,75% de cloretos adicionados em relação à massa de aglomerante, a argamassa geopolimérica passa a formar produtos de corrosão visíveis nas armaduras, enquanto que na matriz de cimento Portland este comportamento ocorre com 0,75 - 1,0% de cloretos adicionados. Embora o teor crítico de cloretos da argamassa geopolimérica seja inferior ao do cimento Portland, o mesmo se enquadra nos limites máximos de 0,4% indicado pela ABNT NBR 12655 (ABNT, 2015b). Os limites da ASTM C 876 (2015) para o ensaio de potencial de corrosão podem não se aplicar aos geopolímeros e necessitar de ajustes em decorrência das diferentes disponibilidades de oxigênio das matrizes geopoliméricas e de cimento Portland.

O ensaio de compatibilidade eletroquímica da argamassa de cimento Portland e a argamassa geopolimérica indicou que as argamassas utilizadas em conjunto possuem tendências desprezíveis de formação de macrocélulas, visto que a diferença dos potenciais eletroquímicos observados ao longo das armaduras dos corpos de prova foi inferior à - 50 mV e as barras não apresentaram a formação de produtos de

corrosão visíveis, o que permite admitir que as argamassas estudadas apresentam boa compatibilidade eletroquímica.

A análise teórica da aplicabilidade da argamassa geopolimérica em reparos estruturais, a partir dos requisitos apresentados por Emmons *et al.* (1994), indicou que a argamassa geopolimérica estudada pode apresentar bom desempenho como argamassa de reparo estrutural, possuindo boa compatibilidade com substratos de concreto de cimento Portland, em termos estruturais, de deformações, à agressividade ambiental e eletroquímicos.

A Tabela 16 apresenta uma síntese comparativa das propriedades avaliadas das argamassas propostas por este trabalho.

Tabela 16 – Síntese das propriedades estudadas das argamassas propostas

<b>Propriedade</b>	<b>Geopolímero</b>	<b>Cimento Portland</b>
Índice de consistência (cm)	22,33	25,17
Resistência mecânica à compressão após 6 semanas de cura (MPa)	38,39	42,16
Permeabilidade	Maior	Menor
Porosidade	Maior	Menor
Densidade	Menor	Maior
Resistência ao ácido sulfúrico	Maior	Menor
Resistência ao ácido clorídrico	Maior	Menor
Resistência à 12 ciclos de gelo-degelo e molhagem-secagem		Boa
Carbonatação após 365 dias de ensaios	Menor	Maior
Passivação das armaduras		Satisfatório
Corrosão das armaduras após imersão em solução salina	Mais severa	Menos severa
Teor crítico de cloretos na argamassa	0,5 - 0,75%	0,75 - 1,0%
Tendência de formação de macrocélula de corrosão entre as argamassas estudadas		Desprezível

Fonte: Autor (2021)

Assim sendo, a partir deste trabalho é possível concluir que a argamassa geopolimérica formulada apresenta indicadores promissores de durabilidade e um grande potencial para utilização como argamassa de reparo estrutural de elementos de concreto armado. A argamassa estudada apresenta vantagens e desvantagens em relação à argamassa de cimento Portland comparada e se destacou pela sua boa trabalhabilidade, maior resistência à ataques ácidos e bom desempenho frente aos processos de carbonatação, contudo, apesar de promover a passivação das armaduras, apresentaram desempenho inferior ao cimento Portland na proteção contra a corrosão, principalmente pela sua maior permeabilidade.

## 5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente estudo não pretendeu esgotar as análises necessárias para a validação de uma argamassa de reparo geopolimérica à base de metacaulim, e sim, avaliou preliminarmente uma formulação e a sua viabilidade de utilização a partir de alguns parâmetros que foram possíveis de serem avaliados na campanha de ensaios.

Para corroborar com a presente pesquisa e aprofundar o estudo de argamassas geopoliméricas em reparos estruturais, recomenda-se para trabalhos futuros a realização de ensaios de durabilidade de maior duração e mais aprofundados, variação dos traços das argamassas, utilização de outras matérias primas com diferentes teores de cálcio, avaliação da incorporação de aditivos e adições nas argamassas para a diminuição da permeabilidade da argamassa, além da análise dos parâmetros não avaliados como a aderência com o concreto de cimento Portland, resistência à flexão, deformabilidade, compatibilidade entre módulos de elasticidade, coeficientes de dilatação térmica, coeficientes de Poisson, retração, absorção de cloretos, dentre outros.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118** – Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7214** – Areia normal para ensaio de cimento – Especificação. Rio de Janeiro, 2015a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7215** – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9778** – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9779** – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12655** – Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13276** – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13279** – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15575-1** – Edificações habitacionais – Desempenho – Requisitos Gerais. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16697** – Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- AGUIRRE-GUERRERO, A. M. *et al.* A novel geopolymers application: Coatings to protect reinforced concrete against corrosion. **Applied Clay Science**, [s.l.], v. 135, p.437-446, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2016.10.029>.
- ALBITAR, M. *et al.* Durability evaluation of geopolymers and conventional concretes. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 136, p.374-385, abr. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.056>.
- AL-MAJIDI, M. H. *et al.* A novel corrosion resistant repair technique for existing reinforced concrete (RC) elements using polyvinyl alcohol fibre reinforced geopolymer concrete (PVAFRGC). **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 164, p.603-619, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.213>.

AMBEDKAR, B.; A., J.; DHANALAKSHMI, J.. *Enhancement of mechanical properties and durability of the cement concrete by RHA as cement replacement: Experiments and modeling. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 148, p.167-175, set. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.022>.*

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM). **C 876** – *Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*. West Conshohocken, 2015.

ANDRADE, C.. **Manual para Diagnóstico de Obras Deterioradas por Corrosão de Armadura**. 1992: Pini, 1992. 104 p. Tradução de: Antonio Carmona e Paulo Helene.

ANDRADE, J. J. O.. **Durabilidade das estruturas de concreto armado**: análise das manifestações patológicas nas estruturas no estado de Pernambuco. 1997. 151 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

ARAÚJO, A. **Estudo para o estabelecimento de metodologia de avaliação de vernizes na proteção ao concreto armado contra a penetração de agentes agressivos**. 2004. 195f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), São Paulo, 2004.

AYGÖRMEZ, Y. *et al.*. *Elevated temperature, freezing-thawing and wetting-drying effects on polypropylene fiber reinforced metakaolin based geopolymer composites. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 235, p. 117502, fev. 2020. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117502>.*

BABAE, M; KHAN, M.S.H.; CASTEL, A. *Passivity of embedded reinforcement in carbonated low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 85, p. 32-43, jan. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.10.001>.*

BABAE, M.; CASTEL, A.. *Chloride diffusivity, chloride threshold, and corrosion initiation in reinforced alkali-activated mortars: role of calcium, alkali, and silicate content. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 111, p. 56-71, set. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.06.009>.*

BADAR, M. S. *et al.* *Corrosion of steel bars induced by accelerated carbonation in low and high calcium fly ash geopolymer concretes. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 61, p.79-89, jun. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.015>.*

BAKHAREV, T.. *Resistance of geopolymer materials to acid attack. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 35, n. 4, p.658-670, abr. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.005>.*

BAUER, L. A. F.. **Materiais de Construção**: Novos Materiais para Construção Civil. Rio de Janeiro: Ltc, 2000. 2v.

BERTOLINI, L.. **Materiais de construção: patologia | reabilitação | prevenção**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

BOCA SANTA, R. A. A.. **Desenvolvimento de geopolímeros a partir de cinzas pesadas oriundas da queima do carvão mineral e metacaulim sintetizado a partir de resíduo da indústria de papel**. 2012. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.

BUSCHLE & LEPPER. Produtos Químicos. Disponível em: <<http://www.buschle.com.br/produtos-quimicos>>. Acesso em 03 de janeiro de 2020.

BHUTTA, A. *et al.*. *Performance characteristics of micro fiber-reinforced geopolymer mortars for repair*. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 215, p.605-612, ago. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.210>.

CÁNOVAS, M. F.. **Patologia e Terapia do Concreto Armado**. São Paulo: Pini, 1988. 522 p. Coordenação técnica: Falcão Bauer. Tradução de: M. Celeste Marcondes; Carlos Wagner dos Santos; Beatriz Cannabrava.

CASCUDO, O.. **O controle da corrosão de armaduras em concreto**. São Paulo: UFG Coedição Pini, 1997. 237 p.

CHEN, K. *et al.*. *Geopolymer concrete durability subjected to aggressive environments – A review of influence factors and comparison with ordinary Portland cement*. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 279, p. 122496, abr. 2021. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122496>.

CUNHA, M. J. F. M.. **Durabilidade de Geopolímeros Monofásicos**. 2013. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Braga, 2013.

DAVIDOVITS, J. **Mineral polymers and methods of making them**, US Patent 4, p.349-386, 1982.

DAVIDOVITS, J.. *Geopolymers*. **Journal Of Thermal Analysis**, [s.l.], v. 37, n. 8, p.1633-1656, ago. 1991. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/bf01912193>.

DAVIDOVITS J.. **Properties of geopolymer cements**. *Geopolymer institute. Alkaline Cements and Concretes*, KIEV, Ucrânia, 1994, p,19.

DAVIDOVITS, J.. **Chemistry of Geopolymeric of Systems, Terminology**. *Second International Conference Geopolymère'99, Institut Géopolymère, Saint-Quentin, France and I.N.S.S.E.T.* Université de Picardie, Saint-Quentin, France, 1, 9-40p, 1999.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer Chemistry and Applications**. 4. ed. Saint Quentin: Institut Géopolymère, 2008. 37 p. Capítulo 1.

DUXSON, P. *et al.* *Geopolymer technology: the current state of the art*. **Journal Of Materials Science**, [s.l.], v. 42, n. 9, p.2917-2933, 19 dez. 2006. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>.

EMMONS P.H. *et al.* *Concrete Repair in the Future Turn of the Century—Any Problems?*. **Concrete International**. Volume 16. Issue 3 . Pag. 42-49. 1994.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. *et al.* *Microstructure Development of Alkali-Activated Fly Ash Cement: a Descriptive Model*. **Cement And Concrete Research**, Madrid, p.1204-1209, 30 ago. 2004. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.08.021>.

FERREIRA, R. M.. **Avaliação de ensaios de durabilidade do betão**. 2000. 247 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2000.

GENTIL, V.. **Corrosão**. 4 ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2003.

GENTIL, V.. **Corrosão**. 6 ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2011.

GUNASEKARA, C. *et al.* *Chloride induced corrosion in different fly ash based geopolymer concretes*. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 200, p.502-513, mar. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.168>.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HELENE, P. R. L.; PEREIRA, F.. **Rehabilitacion y mantenimiento de estructuras de concreto**. São Paulo: Editores, 2007.

HELENE, P. R. L.; RIBEIRO, D.V. **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise**. Rio de Janeiro: Elsevier Editora, 2014. 272 p.

ISAIA, G. C.. **Materiais de construção civil: e princípios de ciência e engenharia de materiais**. SÃO Paulo: Ibracon, 2007.

KRIVEN, W. *et al.* *Corrosion Protection Assessment of Concrete Reinforcing Bars with a Geopolymer Coating*. **Developments In Porous, Biological And Geopolymer Ceramics**, [s.l.], p.373-381, 2009. John Wiley & Sons, Inc.. <http://dx.doi.org/10.1002/9780470339749.ch33>.

KWASNY, J. *et al.* *Sulfate and acid resistance of lithomarge-based geopolymer mortars*. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 166, p.537-553, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.129>.

MEDEIROS, M. H. F. *et al.*. *Corrosion potential: influence of moisture, water-cement ratio, chloride content and concrete cover*. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [S.L.], v. 10, n. 4, p. 864-885, ago. 2017. Fap UNIFESP. <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952017000400005>.

MEHTA, P K.; MONTEIRO, P. J. M.. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Ibracon, 2008.

METACAULIM DO BRASIL. Metacaulim HP ultra. Disponível em: <<http://www.metacaulim.com.br/impermeabilizantes-metacaulim-hp-ultra.html>> Acesso em 03 de janeiro de 2020.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIAS. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 03 de janeiro de 2020.

MOHAN, A.; MINI, K.M.. *Strength and durability studies of SCC incorporating silica fume and ultra fine GGBS*. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 171, p.919-928, maio 2018. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.186>.

NITA, C.. **Utilização de Pozolanas em Compósitos de Cimento Reforçados com Fibra de Celulose e PVA**. Dissertação de Mestrado da Escola Politécnica de São Paulo – SP, 128p., 2006.

PALOMO, A. *et al.* **Alkali-Activated Fly Ashes a Cement for the Future**. *Cement and Concret*, Elsevier A science Ltda, 1323-1329p, 1999.

PANDA, B.; UNLUER, C.; TAN, M.. *Extrusion and rheology characterization of geopolymer nanocomposites used in 3D printing*. **Composites Part B: Engineering**, [S.L.], v. 176, p. 107290, nov. 2019. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107290>.

PASUPATHY, K. *et al.* *Carbonation of a blended slag-fly ash geopolymer concrete in field conditions after 8 years*. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 125, p. 661-669, out. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.078>.

PINTO, A.T.. **Introdução ao Estudo dos Geopolímeros**. Editora UTAD, Portugal, 105 p., 2006.

POUHET, R.; CYR, M.. *Carbonation in the pore solution of metakaolin-based geopolymer*. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 88, p. 227-235, out. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.05.008>.

PUCHER, A.. **Concreto Armado**. Porto Alegre: Globo, 1957. 445 p.

RIBEIRO, J. L. S.. **Contribuição para a avaliação da compatibilidade eletroquímica entre argamassas de reparo e concreto carbonatado**. 2009. 122 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

ROSTAMI, H. *et al.* *Reduction of Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete Using Alkali Ash Material*. **The Journal Of Solid Waste Technology And Management**, [s.l.], v. 41, n. 2, p.136-145, 1 maio 2015. *Journal of Solid Waste Technology and Management*. <http://dx.doi.org/10.5276/jswtm.2015.136>.

SILVA, F. J. **Reforço e fratura em compósitos de matriz álcali-ativada**. 2000. 270f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Departamento de Ciências dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro, 2000.



SILVA, F. G. da. **ESTUDO DE CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO FRENTE À AÇÃO DE CLORETOS**. 2006. 236 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SOUZA, V. C. de.; RIPPER, T.. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. São Paulo: Pini, 1998. 255 p.

TAYLOR, H. F. M.. **Cement chemistry**. 2. ed. London: Thomas Telford, 1997.

TENNAKOON, C. *et al.* *Chloride ingress and steel corrosion in geopolymer concrete based on long term tests*. **Materials & Design**, [s.l.], v. 116, p.287-299, fev. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.12.030>.

TITTARELLI, F. *et al.* *Corrosion behaviour of bare and galvanized steel in geopolymer and Ordinary Portland Cement based mortars with the same strength class exposed to chlorides*. **Corrosion Science**, [s.l.], v. 134, p.64-77, abr. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2018.02.014>.

TORGAL, F. P.; JALALI, S.. **Ligantes obtidos por activação alcalina:Parte 1 - Durabilidade**. Guimarães, Portugal: Universidade do Minho, 2010.

TURNER, L.K; COLLINS, F. G.. *Carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub>-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete*. **Construction and Building Materials**. Department of Civil Engineering, Monash University, Wellington Road, Clayton, VIC 3800, Australia, p. 129, 2013. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023>.

VARGAS, A. S. de. **CINZAS VOLANTES ÁLCALI-ATIVADAS PARA A OBTENÇÃO DE AGLOMERANTES ESPECIAIS**. 2006. 225 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

WALLAH, S. E.; RANGAN, B. V.. **Low-Calcium fly ash-based geopolymer concrete: Long-term properties**. Bentley: Curtin University Of Technology., 2006.

ZHANG, Z.; YAO, X.; ZHU, H.. *Potential application of geopolymers as protection coatings for marine concrete II. Microstructure and anticorrosion mechanism*. **Applied Clay Science**, [S.L.], v. 49, n. 1-2, p. 7-12, jun. 2010. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.04.024>.