

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
NÍVEL MESTRADO**

VANESSA STAATS

**AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO
FRENTE AO ATAQUE QUÍMICO COM VISTAS AO AMBIENTE DE ETE**

**São Leopoldo
2020**

VANESSA STAATS

**AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO
FRENTE AO ATAQUE QUÍMICO COM VISTAS AO AMBIENTE DE ETE**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Mauricio Mancio

São Leopoldo

2020

S775a Staats, Vanessa.
Avaliação da durabilidade de concretos de alto desempenho frente ao ataque químico com vistas ao ambiente de ETE / por Vanessa Staats. -- São Leopoldo, 2020.

226 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, São Leopoldo, RS, 2020.
Orientação: Prof. Dr. Mauricio Mancio, Escola Politécnica.

1.Concreto. 2.Concreto – Durabilidade. 3.Concreto de alta resistência. 4.Construção de concreto – Deterioração. 5.Esgotos – Projetos e construção. 6.Corrosão e anticorrosivos. I.Mancio, Mauricio. II.Título.

CDU 666.972
691.32.059:628.3

VANESSA STAATS

**AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO
FRENTE AO ATAQUE QUÍMICO COM VISTAS AO AMBIENTE DE ETE**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS

Aprovado em 22 de dezembro de 2020.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dr. Francieli Tiecher Bonsembiante – UPF

Prof. Dr. Luis Alcides Schiavo Miranda – UNISINOS

Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak – UNISINOS

*Ao meu noivo, Cleofe.
Aos meus pais, Tereza e Valpides.
Ao meu irmão, Junior.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço muito ao meu professor orientador, professor Mauricio, pela orientação, dedicação e serenidade com que pautou a convivência durante toda essa caminhada. O meu respeito e enorme admiração por sua conduta, nos diversos momentos até a conclusão desta grande etapa da minha vida. Obrigada pelo crescimento pessoal, profissional e acadêmico que a convivência contigo me proporcionou.

À professora Marlova, muito obrigada pelas contribuições durante todo meu mestrado, pelas sugestões e, principalmente, pelo apoio e carinho maternal.

Um agradecimento especial ao professor Luiz Miranda, por seu conhecimento transmitido a partir de todas as suas vivências e sua dedicação pelo saneamento.

Ao professor Claudio, por compartilhar sua experiência, sendo um exemplo de busca incansável pelo conhecimento através da ciência.

Aos amigos e colegas do Laboratório de Materiais de Construção, pela ajuda e disposição neste programa experimental, Bianca, Igor, André, Jeremias e Leonardo: vocês foram imprescindíveis no andamento deste trabalho. Obrigada por torcerem pelo sucesso dos ensaios.

Aos meus pais, Tereza e Valpides, pelo apoio incondicional, pelo exemplo de retidão, de honestidade e dedicação ao trabalho. Obrigada por serem o motivo de tudo aquilo que me tornei hoje.

Ao meu irmão Junior, por torcer por mim, sempre animando meus dias e sendo meu orgulho cada vez mais.

Ao meu amor da vida toda, Cleofe, por ser meu maior incentivador e encorajador, sendo meu apoio em todos os momentos, torcendo muito e vibrando por cada conquista.

Aos meus colegas de Unisinos, Fernanda, Laércio, Modesti, Julio, Rore, Katia, Roberto, David, Angélica, Luis, Jessica pela companhia em todas as horas, por dividirem dos mesmos sentimentos, aflições e alegrias. Por serem companheiros na elaboração de trabalhos e por serem mais que colegas, por serem amigos. Meu maior presente deste mestrado foi ter encontrado vocês.

Aos amigos do itt Performance, por disporem de seu escasso tempo para auxílio nos ensaios realizados.

Aos colegas do DMAE por serem tão receptivos e colaborativos com o programa experimental.

Aos meus colegas de trabalho, por fazerem mais leves nosso dia a dia de trabalho. Pelas brincadeiras, risadas, conselhos e ensinamentos.

Quero agradecer aos técnicos da maquetaria, em especial o seu Airton, pela confecção das formas em MDF para serem utilizadas no meu programa experimental.

À Deus, por permitir, que todos os meus sonhos se tornassem realidade. Por ter me renovado todas as vezes que o cansaço e o desânimo tenham chegado e que, através dos Seus ensinamentos, me torna uma pessoa melhor, dia após dia.

“Depois que cansei de procurar,
aprendi a encontrar.
Depois que um vento me opôs resistência,
velejo com todos os ventos”.

Friedrich Nietzsche

RESUMO

Nos sistemas de saneamento, a corrosão do concreto causada por ataques ácidos é um tipo de deterioração muito frequente. Dentro deste contexto, existe uma busca por materiais que minimizem os impactos ambientais e melhorem o desempenho destas estruturas pela ótica da durabilidade, como o uso de concretos de alto desempenho com elevados teores de adições minerais, a aplicação de aditivos cristalizantes, o uso de compósitos cimentícios avançados e, mais recentemente, o desenvolvimento de cimentos especiais.

O presente trabalho aborda a questão do estudo de materiais mais duráveis frente aos ataques químicos, em especial, os decorrentes dentro das Estações de Tratamento de Esgoto, por ser um ambiente altamente agressivo aos materiais cimentícios. O uso de diferentes tecnologias e materiais tem contribuído para o aumento da durabilidade frente aos agentes agressivos que prejudicam as estruturas de concreto, por meio da redução da permeabilidade e do incremento da resistência mecânica.

Existem muitas formas de contribuir com o aumento da durabilidade das estruturas, no entanto, nesse trabalho será dado enfoque para utilização de Concretos de Alto Desempenho (CAD), com o uso de impermeabilizantes por cristalização e sílica ativa, em teor semelhante ao de sílica amorfa presente nos MCS, em comparação aos concretos convencionais, com comparação de dois tipos de cimento.

Foram realizados ensaios a fim de verificar a perda de massa e variação do volume, absorção de água por capilaridade e ainda o ensaio de resistência à tração e compressão. Os resultados mostram a alta eficiência dos traços sem adições, que tiveram melhor desempenho na absorção de água sem comprometer a resistência à compressão, destacando-se os traços produzidos apenas com cimento CPIV e CPII-F, com baixas relações a/c.

Palavras-chave: Ataque químico. Ataque ácido. Durabilidade. Concreto de alto desempenho. Estação de tratamento de esgoto.

ABSTRACT

In Systems Sanitation, corrosion of concrete caused by attacks is a very common type of deterioration. Within this context, there is a search for such materials that minimize environmental impacts and improve the performance of structures from the perspective of durability, such as the use of high-performance concretes with high levels of mineral additions, the application of crystallizing additives, the use of composites advanced cementitious and, more recently, the development of special cements.

The present work addresses the question of the study of more durable materials compared to chemicals, in particular, those arising from Sewage Treatment Plants, as it is a highly aggressive environment for cementitious materials. The use of different technologies and materials has contributed to increase durability in the face of aggressive agents that damage concrete structures, by reducing permeability and increasing mechanical strength.

There are many ways to contribute to the increase in the durability of the structures, however, this work will focus on the use of High Performance Concrete (HPC), with the use of waterproofing by crystallization and active silica, in a similar content to amorphous silica. present in SCM, in comparison to conventional concretes, with comparison of two types of cement.

Tests were carried out in order to verify the loss of mass and volume variation, water absorption by capillarity and also the tensile strength and compression test. The results show the high efficiency of the strokes without additions, which have better performance in absorbing water without compromising the resistance to compression, highlighting the strokes acquired only with CPIV and CPII-F cement, with low water / cement ratio.

Key-words: Chemical attack. Acid attack. Durability. High-Performance Concrete. Sewage Treatment Plants.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Gráfico do custo de reabilitação x construção de estruturas de saneamento nos EUA.....	33
Figura 2 – Manifestações patológicas típicas de Estações de Tratamento de Esgoto	36
Figura 3 – Deterioração do concreto por agentes químicos.....	37
Figura 4 – Processo de deterioração em fossas sépticas.....	37
Figura 5 – Efeito de alguns ácidos envolvidos na deterioração do concreto.....	39
Figura 6 – Efeitos do ataque ácido no concreto	40
Figura 7 – Esquema descritivo dos processos químicos e biológicos envolvidos no processo de produção do H_2SO_4 de maneira biogênica.....	43
Figura 8 – Mudanças físicas e químicas teóricas das propriedades do concreto durante o processo de deterioração	45
Figura 9 – Mecanismo de corrosão por ácidos biogênicos	47
Figura 10 – Evolução típica das concentrações de H_2S (linha cinza).	52
Figura 11 – Características que afetam a porosidade e resistência do concreto aos ácidos.....	54
Figura 12 – Valores mínimos de resistência à compressão em normas internacionais	55
Figura 13 – Materiais com porosidades similares, porém, com alta permeabilidade (esq.) e baixa permeabilidade (dir.), em razão das características das interconexões existentes.....	59
Figura 14 – Efeito da relação água/cimento na porosidade do concreto.....	59
Figura 15 – Distribuição do tamanho de partículas da sílica ativa, em comparação com escória de alto-forno granulada e moída (GGBFS) e cinza volante (fly ash).....	66
Figura 16 – Formação de cristais no interior do concreto. (a) Concreto com cristalizante ainda não ativado; (b) Início da formação de cristais; (c) Cristalização final.	73
Figura 17 – Reações de cristalização de uma rede capilar.....	74
Figura 18 – Crescimento cristalino no concreto	74
Figura 19 – Fechamento de microfissuras com cristalizante (a) antes e (b) após cristalização.....	79

Figura 20 – Amostras de concreto de diferentes relação a/c após 27 dias de imersão.	82
Figura 21 – Predefinição das etapas do programa experimental	85
Figura 22 – Fluxograma do desenvolvimento das etapas de dosagem	91
Figura 23 – Demonstração da moldagem por tipo de material.....	91
Figura 24 – Corpos de prova em sala climatizada após moldagem	99
Figura 25 – Sazonamento da amostra	101
Figura 26 – Esquema dos ciclos de agressão em soluções ácidas	105
Figura 27 – Ensaio acelerados de ataque químico em ambiente de laboratório ...	106
Figura 28 – Vista da ETE Serraria e indicação do reator UASB utilizado	107
Figura 29 – Disposição dos corpos de prova prismáticos na grade	108
Figura 30 – Vista geral do reator UASB (a); janela de inspeção do reator (b); reator UASB aberto após a retirada dos corpos de prova (c).	108
Figura 31 – Gráfico da vazão média diária em L/s da ETE Serraria de outubro de 2019 a março de 2020.....	110
Figura 32 – Preparação da amostra para o ensaio (a) e a realização do ensaio (b)	112
Figura 33 – Adaptação do método de capeamento (a); capeamento em CP (ácido sulfúrico).....	113
Figura 34 – Corpos de prova antes (a) e após a aplicação da carga (b).....	114
Figura 35 – Corpos de prova antes (a) e após a aplicação da carga (b).....	115
Figura 36 – Distribuição granulométrica do CP II F-40.....	117
Figura 37 – Distribuição granulométrica do CP IV.....	117
Figura 38 – Difratoograma da sílica ativa	120
Figura 39 – Distribuição granulométrica da sílica ativa	120
Figura 40 – Resistência média dos traços em cada idade	127
Figura 41 – Resistência média em cada idade por relação a/agl.....	128
Figura 42 – Resistência média em cada idade por relação a/agl.....	129
Figura 43 – Resistência média em cada idade por relação a/agl.....	130
Figura 44 – Resistência média em cada idade por relação a/agl.....	131
Figura 45 – Resistência à compressão após o ataque ácido.	133
Figura 46 – Relação entre as resistências residuais após o ataque ácido do concreto com cimento CPIV.....	134

Figura 47 – Relação entre as resistências residuais após o ataque ácido do concreto com cimento CII-F	135
Figura 48 – Relação entre as resistências residuais após o ataque ácido do concreto com cimento CII-F e adição de Sílica Ativa.....	135
Figura 49 – Relação entre as resistências residuais após o ataque ácido do concreto com cimento CII-F e adição de aditivo Cristalizante	136
Figura 50 – Resultados obtidos de absorção de água (valores médios) antes do ataque por ácido acético	140
Figura 51 – Resultados obtidos de absorção de água (valores médios) após o ataque por ácido acético	141
Figura 52 – Resultados obtidos de absorção de água (valores médios) antes do ataque por ácido sulfúrico	144
Figura 53 – Resultados obtidos de absorção de água (valores médios) após o ataque por ácido sulfúrico	145
Figura 54 – Comparativo entre resistência à compressão e absorção de água para os traços com relação a/agl (0,39)	147
Figura 55 – Comparativo entre resistência à compressão e absorção de água para os traços com relação a/agl (0,32)	148
Figura 56 – Comparativo entre resistência à compressão e absorção de água para os traços com relação a/agl (0,28)	148
Figura 57 – Comparativo entre resistência à compressão e absorção de água para os traços com relação a/agl (0,24)	149
Figura 58 – Comparativo entre resistência à compressão e absorção de água para os traços com relação a/agl (0,39)	151
Figura 59 – Comparativo entre resistência à compressão e absorção de água para os traços com relação a/agl (0,32)	152
Figura 60 – Comparativo entre resistência à compressão e absorção de água para os traços com relação a/agl (0,28)	152
Figura 61 – Comparativo entre resistência à compressão e absorção de água para os traços com relação a/agl (0,24)	153
Figura 62 – Comparativo entre alguns corpos de prova quanto à variação de volume e perda de massa.....	155
Figura 63 – Evolução da perda de massa e variação de volume após ensaio químico no Ácido Sulfúrico – a/agl 0,39.....	157

Figura 64 – Evolução da perda de massa e variação de volume após ensaio químico no Ácido Sulfúrico - a/agl 0,32.....	158
Figura 65 – Evolução da perda de massa e variação de volume após ensaio químico no Ácido Sulfúrico - a/agl 0,28.....	158
Figura 66 – Evolução da perda de massa e variação de volume após ensaio químico no Ácido Sulfúrico - a/agl 0,24.....	159
Figura 67 – Evolução da perda de massa e variação de volume após ensaio químico no Ácido Acético - a/agl 0,39.....	160
Figura 68 – Evolução da perda de massa e variação de volume após ensaio químico no Ácido Acético - a/agl 0,32.....	160
Figura 69 – Evolução da perda de massa e variação de volume após ensaio químico no Ácido Acético - a/agl 0,28.....	161
Figura 70 – Evolução da perda de massa e variação de volume após ensaio químico no Ácido Acético - a/agl 0,24.....	161
Figura 71 – Evolução da perda de massa e variação de volume após ensaio químico no Esgoto - a/agl 0,39.....	162
Figura 72 – Evolução da perda de massa e variação de volume após ensaio químico no Esgoto - a/agl 0,32.....	163
Figura 73 – Evolução da perda de massa e variação de volume após ensaio químico no Esgoto - a/agl 0,28.....	163
Figura 74 – Evolução da perda de massa e variação de volume após ensaio químico no Esgoto - a/agl 0,24.....	164
Figura 75 – Evolução da perda de massa e variação de volume após ensaio químico no Esgoto – Por tipo de aglomerante (CPIV).....	165
Figura 76 – Evolução da perda de massa e variação de volume após ensaio químico no Esgoto – Por tipo de aglomerante (CPIIF).....	165
Figura 77 – Evolução da perda de massa e variação de volume após ensaio químico no Esgoto – Por tipo de aglomerante (CPIIFSA).....	166
Figura 78 – Evolução da perda de massa e variação de volume após ensaio químico no Esgoto – Por tipo de aglomerante (CPIIFCR).....	166
Figura 79 – Resistência à compressão ao longo do tempo na relação a/agl – 0,39223	
Figura 80 – Resistência à compressão ao longo do tempo na relação a/agl – 0,32224	
Figura 81 – Resistência à compressão ao longo do tempo na relação a/agl – 0,28224	
Figura 82 – Resistência à compressão ao longo do tempo na relação a/agl – 0,24225	

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Gráfico de interpolação para dosagens	92
Gráfico 2 – Distribuição granulométrica da areia.....	123
Gráfico 3 – Distribuição granulométrica da brita.....	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Correspondência entre agressividade do ambiente e durabilidade do concreto.....	30
Tabela 2 – Requisitos de projeto e execução para estruturas sujeitas a ambientes quimicamente agressivos de acordo com normas brasileiras e internacionais.	31
Tabela 3 – Vida útil de projeto mínima em normas	34
Tabela 4 – Relação entre concentração de H ₂ S e taxa de corrosão	53
Tabela 5 – Classificação dos poros da pasta de cimento	58
Tabela 6 – Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto.....	60
Tabela 7 – Limites de composição do cimento Portland (em massa)	62
Tabela 8 – Propriedades físicas típicas de amostras de sílica ativa	66
Tabela 9 – Composição química de amostras de sílica ativa para alguns autores ...	67
Tabela 10 - Resumo das variáveis de resposta (Métodos e ensaios planejados).....	87
Tabela 11 - Fatores de Controle com níveis variáveis de estudo.....	88
Tabela 12 – Fatores de controle com nível fixo de estudo	88
Tabela 13 – Consumo máximo de água e relação entre os agregados conforme os traços.....	93
Tabela 14 – Distribuição do volume de materiais (m ³) em 1m ³ de concreto	94
Tabela 15 – Composição dos materiais constituintes para cada mistura, em kg/m ³ . 95	
Tabela 16 – Relação da quantidade de amostras por ensaio e por material	97
Tabela 17 – Identificação dos corpos de prova prismáticos.....	97
Tabela 18 – Identificação dos corpos de prova cilíndricos	98
Tabela 19 – Características das soluções ácidas	104
Tabela 20 – Características do esgoto afluente	109
Tabela 21 – Características físicas dos cimentos	118
Tabela 22 – Características químicas e mecânicas dos cimentos	118
Tabela 23 – Especificações técnicas do aditivo superplastificante	119
Tabela 24 – Composição química qualitativa da sílica ativa	119
Tabela 25 – Ingredientes do aditivo impermeabilizante por cristalização.....	121
Tabela 26 – Informações sobre propriedades físicas e químicas.....	121
Tabela 27 – Caracterização granulométrica do agregado miúdo natural.....	123

Tabela 28 – Granulometria do agregado graúdo.....	124
Tabela 29 – Valores obtidos de resistência à compressão	126
Tabela 30 – Análise de variação percentual de absorção por capilaridade entre o concreto antes e após o ataque por ácido acético	143
Tabela 31 – Análise de variação percentual de absorção por capilaridade entre o concreto antes e após o ataque por ácido sulfúrico	146

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CR	Aditivo Cristalizante
ACI	American Concrete Institute
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	American Society for Testing and Materials
BOE	Bactérias Oxidantes de Enxofre
BRS	Bactérias Redutoras de Sulfato
CCMI	Corrosão Microbiologicamente Induzida
CEBDS	Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável
CUAD	Concreto de Ultra Alto Desempenho
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
EN	European Standard
ETE	Estações de Tratamento de Esgotos
ittP	Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil itt Performance
LMC	Laboratório de Materiais de Construção
NBR	Norma Brasileira Regulamentada
pH	Potencial de Hidrogênio
PLANSAB	Plano Nacional de Saneamento Básico
RILEM	International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures
SA	Sílica Ativa
SES	Sistemas de Esgotamento Sanitários
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blank et. (Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente)
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos

LISTA DE SÍMBOLOS

CH_3COOH	Ácido Acético ou ácido etanóico
H_2SO_4	Ácido sulfúrico
SiO_2	Sílica
CO_2	Dióxido de carbono
SO_4^{2-}	Sulfato
S^{2-}	Sulfeto
Ca	Cálcio
OH	Hidróxido de Cálcio
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Hidróxido de cálcio
H_2S	sulfeto de hidrogênio
$\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$	Thiosulfato
CaSO_4	Sulfato de cálcio
$\text{S}_4\text{O}_6^{2-}$	Tetrationato
S	Enxofre
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
$\text{C}_6\text{A} \cdot 3\text{H}_{32}$	Etringita ($6\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SO}_4 \cdot 32 \text{H}_2\text{O}$)
CaO	óxido de cálcio (Cal viva)
Al_2O	Alumina
C_3A	Aluminato tricálcico ($3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)
CaCO_3	Carbonato de cálcio
C_2S	Silicato dicálcico ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)
$\text{C}_4\text{A}\text{H}_{12}$	Monossulfoaluminato de cálcio
C_4AH_{13}	Cálcio hidratado aluminato

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 OBJETIVOS	25
1.1.1 Objetivo geral	25
1.1.2 Objetivos específicos	25
1.2 JUSTIFICATIVA	25
1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA	27
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
2.1 DURABILIDADE DO CONCRETO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO FRENTE AO ATAQUE QUÍMICO	29
2.2 REAÇÕES DO ATAQUE QUÍMICO NO CONCRETO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO	35
2.2.1 Fatores de degradação do concreto relacionados ao esgoto	38
2.2.1.1 Ataque por ácidos	38
2.2.1.2 Processos químicos e biológicos nas estruturas de saneamento	41
2.2.1.2.1 <i>Formação do ácido acético</i>	41
2.2.1.2.2 <i>Formação do ácido sulfúrico</i>	42
2.2.2 Deterioração do concreto por reações químicas	43
2.2.2.1 Reação causada por ácido acético	44
2.2.2.2 Reação causada por ácido sulfúrico	45
2.2.3 Fatores que influenciam o processo de deterioração por ácidos	48
2.2.3.1 Fatores externos	48
2.2.3.1.1 <i>Temperatura</i>	48
2.2.3.1.2 <i>pH</i>	49
2.2.3.1.3 <i>Umidade relativa</i>	50
2.2.3.1.4 <i>Matéria orgânica biodegradável</i>	51
2.2.3.1.5 <i>Concentração de ácido sulfídrico (H₂S)</i>	51
2.2.3.2 Fatores intrínsecos do concreto	53
2.2.3.2.1 <i>Resistência mecânica do concreto</i>	54
2.2.3.2.2 <i>Porosidade e permeabilidade</i>	57
2.2.3.2.3 <i>Relação água/aglomerante</i>	59
2.3 FATORES QUE INTERFEREM NO PROCESSO DE DETERIORAÇÃO POR ÁCIDOS.....	60

2.3.1	Uso de CAD	60
2.3.2	Composição química e normatização do cimento Portland	61
2.3.2.1	Mudança na composição química dos cimentos	62
2.3.3	Adições pozolânicas	64
2.3.3.1	Sílica ativa	65
2.3.3.1.1	<i>Composição e propriedades físicas</i>	65
2.3.3.1.2	<i>Propriedades químicas</i>	67
2.3.3.2	Efeito da SA nas propriedades do concreto	67
2.3.3.2.1	<i>Durabilidade</i>	70
2.3.3.2.2	<i>Dosagem</i>	72
2.3.4	Aditivos cristalizantes	72
2.3.4.1	Mecanismos de ação	75
2.3.4.2	Permeabilidade	77
2.3.4.3	Influência das condições ambientais	78
2.3.4.4	Adições minerais x cristalização	79
2.4	ENSAIOS DE DURABILIDADE FRENTE AO ATAQUE ÁCIDO	80
2.4.1	Princípios dos métodos de ensaio acelerado	80
2.4.2	Princípios dos métodos de ensaio <i>in loco</i>	83
3	METODOLOGIA	85
3.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL	85
3.1.1	Definição das etapas do programa de ensaios	85
3.1.2	Variáveis estudadas	86
3.1.2.1	Variáveis dependentes ou de resposta	87
3.1.2.2	Variáveis independentes ou de controle	88
3.1.3	Limitações do experimento	89
3.1.4	Etapa I: Estudo de dosagem e definição dos traços conforme as relações água/aglomerante	90
3.1.4.1	Dosagem experimental	90
3.1.4.2	Procedimento de mistura	95
3.1.5	Etapa II: Preparação, cura, sazonalização e caracterização das amostras para os ensaios químicos e mecânicos	96
3.1.5.1	Amostras	96
3.1.5.1.1	<i>Produção dos corpos de prova para ensaios mecânicos</i>	98
3.1.5.1.2	<i>Produção dos corpos de prova para ensaios de durabilidade</i>	99

3.1.5.1.3 Cura.....	100
3.1.5.1.4 Sazonamento	100
3.1.5.1.5 Caracterização das amostras.....	101
3.1.6 Etapa III: Caracterização física e mecânica dos traços e investigação sobre a degradação dos concretos por ataque ácido.....	102
3.1.6.1 Caracterização do concreto endurecido – propriedades físicas e mecânicas	102
3.1.6.1.1 Resistência à compressão axial	102
3.1.6.2 Preparo e amostragens dos agentes agressivos	103
3.1.6.2.1 Coleta de amostras de esgoto in natura.....	103
3.1.6.2.2 Preparo das soluções em laboratório.....	103
3.1.6.2.3 Determinação do pH.....	104
3.1.6.3 Agressão química.....	104
3.1.6.3.1 Ensaio acelerados de ataque ácido em laboratório.....	105
3.1.6.3.2 Ensaio de deterioração em ambiente de uma ETE	106
3.1.6.4 Perda de massa e variação de volume	110
3.1.6.5 Análise visual	111
3.1.6.6 Absorção de água por capilaridade.....	111
3.1.6.7 Capeamento.....	112
3.1.6.8 Características mecânicas	113
3.1.6.8.1 Resistência à tração na flexão	113
3.1.6.8.2 Resistência à tração à compressão axial	114
3.2 MATERIAIS	115
3.2.1 Cimento	116
3.2.2 Aditivo	119
3.2.3 Sílica ativa.....	119
3.2.4 Impermeabilizante por cristalização.....	121
3.2.5 Agregado miúdo.....	122
3.2.6 Agregado graúdo	123
3.2.7 Água	125
4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	126
4.1 AVALIAÇÃO DOS ÍNDICES DE RESISTÊNCIA MECÂNICA	126
4.1.1 Resistência mecânica à compressão	126
4.1.2 Análise da Resistência à compressão x relação a/agl.....	128

4.1.3 Resistência mecânica por cada agente de deterioração x tipo de aglomerante	133
4.1.3.1 Relação entre a resistência residual à tração e à compressão por tipo de aglomerante	134
4.2 AVALIAÇÃO DOS ÍNDICES FÍSICOS	139
4.2.1 Absorção de água por capilaridade	139
4.2.1.1 Análise da absorção de água por capilaridade antes e após deterioração por ácido acético	139
4.2.1.2 Análise da absorção de água por capilaridade antes e após deterioração por ácido sulfúrico	143
4.2.1.3 Análise da resistência à compressão pela absorção de água por capilaridade após deterioração por ácido acético.....	147
4.2.1.4 Análise da resistência à compressão pela absorção de água por capilaridade após deterioração por ácido sulfúrico.....	151
4.2.2 Variação de massa e volume	154
4.2.2.1 Análise da variação de massa e volume por tipo de aglomerante	157
4.2.2.1.1 <i>Variação de massa e volume por tipo de aglomerante x ácido sulfúrico..</i>	<i>157</i>
4.2.2.1.2 <i>Variação de massa e volume por tipo de aglomerante x ácido acético....</i>	<i>160</i>
4.2.2.1.3 <i>Variação de massa e volume por tipo de aglomerante x esgoto.....</i>	<i>162</i>
5 CONCLUSÃO	168
5.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	170
REFERÊNCIAS	172
APÊNDICE A – QUADRO RESUMO HISTÓRICO DE ESTUDOS	190
APÊNDICE B – ESTUDO PILOTO	194
APÊNDICE C – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	209
APÊNDICE D – VALORES DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO (AMOSTRA SEM ATAQUE QUÍMICO)	213
APÊNDICE E – VALORES DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (AMOSTRA SEM ATAQUE QUÍMICO)	215
APÊNDICE F – VALORES DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO (AMOSTRA APÓS ATAQUE QUÍMICO)	217
APÊNDICE G – VALORES DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (AMOSTRA APÓS ATAQUE QUÍMICO)	219

APÊNDICE H – GRÁFICOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO (AMOSTRA SEM ATAQUE QUÍMICO).....	221
APÊNDICE I – ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO ÁGUA/AGLOMERANTE NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	223

1 INTRODUÇÃO

O saneamento é o setor de infraestrutura com o maior déficit e desafios de expansão. Comparado a outros países, o Brasil está muito distante do acesso universal, tanto no quesito água tratada quanto na coleta e tratamento de esgoto, ocupando a 112^a posição num ranking de saneamento entre 200 países, segundo estudo realizado pelo Instituto Trata Brasil juntamente com o CEBDS (2014). A pontuação do Brasil no Índice de Desenvolvimento do Saneamento é inferior, não só às médias da América do Norte e da Europa, mas também às de alguns países do Norte da África e Oriente Médio. Segundo o Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB) de 2013, para melhorar estes dados, foi previsto o investimento de cerca de R\$ 25 bilhões por ano até 2033 para abastecer 99% da população com água potável e levar rede de esgoto para 92% dos brasileiros.

Há um grande esforço conjunto das entidades públicas e privadas para que as estruturas de obras de saneamento alcancem um nível de desempenho que seja adequado e compatível com os aspectos técnicos de durabilidade.

Nem sempre a implantação destas estruturas, tão imprescindíveis à saúde da população, é realizada de forma tecnicamente durável e economicamente viável. Para tanto, é indispensável uma mudança radical nos padrões de projeto, execução e manutenção das obras de saneamento. De acordo com Hoppe (2014), apesar de todo o esforço empregado em pesquisas neste assunto, muitas vezes o somatório desse conhecimento acumulado ao longo dos anos não acarretou um incremento na qualidade e durabilidade das obras correntes, tendo em vista os inúmeros casos de estruturas recentes cuja deterioração ocorreu num período de tempo muito menor que o planejado.

Dentre as diversas causas possíveis para esta situação pode-se citar a transmissão deficiente dos conhecimentos para o setor produtivo da construção; a dificuldade de desenvolver métodos confiáveis de avaliação da durabilidade; as discrepâncias existentes entre o comportamento dos fenômenos de deterioração em laboratório e na estrutura real; o surgimento de novos materiais, a variação nas condições ambientais já estudadas, entre outros.

Estudos de Zivica (2001) confirmam a fundamental importância do conhecimento sobre os mecanismos que propiciam o desencadeamento de

manifestações patológicas que podem impactar negativamente na obra, como é o caso da degradação do concreto devido ao ataque químico.

Os níveis de ataque variam de acordo com cada ambiente das estações de tratamento de esgoto (ETE) e de acordo com os produtos utilizados no tratamento que podem atingir o concreto. Também se deve considerar o efeito erosivo da água com partículas sólidas e principalmente a ação de bactérias, que em sistemas de tratamento de esgoto fechados costumam ocasionar grandes problemas de corrosão na parte superior de grandes tubulações ou nos tetos das estruturas pela formação do ácido sulfúrico biogênico (PINTO; TAKAGI, 2007).

Segundo Herisson (2012), outros três fatores culturais contribuem para a ocorrência de deterioração em estruturas de saneamento: (1) Sistemas de esgoto muitas vezes são superdimensionados por levarem em conta um crescimento futuro, e pelo aumento de pessoas que vivem nas áreas periféricas e subúrbios, o que faz os sistemas se estenderem por distâncias cada vez maiores, propiciando grande acúmulo de sedimentos, principalmente em locais planos; (2) Redução do consumo de água, que leva a limitar as taxas de fluxo do efluente e favorecer um maior tempo de detenção hidráulica; (3) Aumento das temperaturas (maior uso de máquinas de lavar roupa e louça, banhos quentes), aumentando as taxas de reações bioquímicas. Sand et al. (1994) estimam um aumento de 10°C nas últimas décadas; (4) O aumento do uso de detergentes causando a acidificação do meio.

Além do surgimento de novos materiais, houve também a mudança de produtos já existentes, como no caso dos cimentos, cuja composição tem mudado ao longo dos anos e tiveram sua normatização alterada recentemente.

Dentro deste contexto, o desenvolvimento e otimização de estruturas de concreto armado com melhor desempenho a ataques químicos, se faz necessário para viabilizar a expansão adequada do tratamento de esgoto, tanto em esfera municipal, como em âmbito nacional. Diversas alternativas têm se mostrado promissoras para atender este requisito, tais como a utilização de concretos de alto desempenho com elevados teores de adições minerais e a aplicação de aditivos cristalizantes que aumentam a impermeabilização das estruturas.

Portanto, este trabalho procura colaborar neste sentido, avaliando determinadas propriedades de concretos de alta resistência que influenciam na durabilidade destes materiais frente ao ataque químico em Estações de Tratamento de Esgoto.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o comportamento de concretos de alto desempenho frente ao ataque químico por ácidos, através de ensaio acelerado de degradação em laboratório e da exposição ao ambiente de uma ETE, para concretos dosados com distintas relações a/agl e confeccionados com diferentes tipos de aglomerantes.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Investigar a perda de resistência mecânica dos materiais quando submetidos ao ataque químico dos ácidos acético, sulfúrico e compará-los a materiais submetidos ao esgoto;
- b) Analisar a perda de massa e variações dimensionais das amostras quando submetidas à penetração dos ácidos ensaiados;
- c) Comparar o efeito da relação a/agl e do uso de adições pozolânicas na absorção capilar de água do concreto endurecido;
- d) Determinar se os aditivos cristalizantes influenciam na resistência mecânica do concreto após o ataque ácido;
- e) Identificar qual material estudado apresentou melhor desempenho relacionado à durabilidade frente ao ataque ácido.

1.2 JUSTIFICATIVA

O concreto é um material versátil e, portanto, usado em muitas aplicações de construção. Este material é exposto sob as mais diversas condições ambientais e pode entrar em contato com substâncias que levam a uma degradação química do material, como os causados pelo ataque de ácidos.

Apesar da evolução tecnológica do concreto ao longo do tempo, não são incomuns os problemas atrelados à resistência e durabilidade do material, impondo elevados custos para sua correção. Em muitos locais, os aportes financeiros gastos

com a recuperação das estruturas de concreto são maiores do que os recursos financeiros utilizados na construção de novas edificações.

Obras de grande porte, tais como as Estações de Tratamento de Esgoto, impactam de forma significativa no meio ambiente e na população. Von Sperling (2016) menciona que os gastos com implantação das ETE no Brasil correspondem de R\$100,00 a R\$ 590,00 por habitante, sendo os Reatores UASB, os de menor custo e as Lagoas facultativas e anaeróbio-facultativas seguidas de lagoas de maturação, com o maior custo de implantação. Devido a sua relevância socioambiental e ao alto investimento inicial é imprescindível que seja assegurada a durabilidade e o bom desempenho das novas estruturas.

VIEIRA (1994) relata que o desenvolvimento de reatores UASB foi iniciado no Brasil em 1980. E, apesar de já ser conhecido há bastante tempo sobre a elevada agressividade existente em ambientes de ETE, pesquisas envolvendo a identificação de detalhes do processo de degradação e os compostos formados são primordiais para dar suporte, a fim de intervir na velocidade deste tipo de degradação, seja no caso de novas estruturas a serem projetadas ou manutenção de obras existentes.

Devido à sua curta história (BOND E TEMPLETON, 2011; Associação Alemã de Biogás, 2015), ao processamento anaeróbico complexo e à grande variedade de modos de ação possíveis, atualmente existe pouca experiência com relação ao efeito do processo nas estruturas de concreto utilizadas (KÖNIG, 2013, KÖNIG et al., 2010, NEUMANN et al., 2012, KÖNIG & DEHN, 2015). Conhecimento de estruturas semelhantes usadas na agricultura (DE BELIE et al., 1997, DE BELIE et al., 2000a, DE BELIE et al., 2000b), estações de tratamento de esgoto (DE BELIE et al., 2004, FERNANDES et al., 2012, FJERDINGSTAD, 1969) e usinas de esgoto levam à suposição de altos níveis de exposição a materiais ácidos.

Esse processo de degradação ocorre naturalmente de maneira muito lenta, levando-se anos até que sinais de corrosão sejam observados. Portanto, muitos estudos aplicam métodos que fornecem resultados mais rápidos. Essas abordagens incluem testes acelerados que podem ser realizados através do uso de soluções de ácido sulfúrico (DE BELIE, 2002; AYDIN, 2007), testes de simulação microbiológica através da ação do ácido sulfúrico biogênico (YOUSEFI, 2014; VINCKE, 1999; SAND, 1994) ou através da análise e comparação dos resultados obtidos pelos dois métodos (MONTENY, 2001; BELIE, 2004; MUYNCK, 2009).

Para Tutikian et al. (2011), o concreto convencional pode não ter comportamento satisfatório nestas aplicações, o que motiva o estudo de composições especiais, como os concretos de alta resistência e os de alto e ultra alto desempenho. Uma das finalidades do estudo de novos materiais e tecnologias é identificar misturas que apresentem qualidade em relação à durabilidade.

Huang et al. (2018) destacaram as seguintes lacunas do conhecimento: realização de pesquisas em escala reduzida e desconhecimento entre a capacidade de cicatrização e o prolongamento da vida útil. Os materiais cimentícios que possuem em sua dosagem adição de nanomateriais têm potencial para incrementar a vida útil das estruturas, pelo efeito de refinamento dos poros da matriz (efeito fíler) e por seu potencial em reagir com os compostos hidratados do cimento, formando produtos quimicamente estáveis, que complementam o preenchimento da matriz cimentícia (SANCHEZ; SOBOLEV, 2010; SAID et al., 2012; BEHFARNIA; SALEMI, 2013; LI et al., 2014; NORHASRI; HAMIDAH; FADZIL, 2017; REN; LAI; GAO, 2018).

De acordo com Hooton & Bickley (2014), dentre todas essas estratégias, deve-se considerar que a maneira mais segura de atender os critérios de sustentabilidade é projetar para durabilidade a longo prazo. Esta capacidade pode ser alcançada com o desenvolvimento de materiais com propriedades autocicatrizantes, propriedades mecânicas e de durabilidade, que provoquem mudanças conceituais da forma de administrar o dano e adiar os períodos de reparos ou recuperações.

Neste estudo, pretende-se focar na aplicação de diferentes tipos de concretos de alto desempenho, visando avaliar a sua capacidade de resistir às manifestações patológicas em estruturas de concreto em estações de tratamento, possivelmente, desenvolvendo uma alternativa ao concreto convencional que cumpra suas funções básicas e, além disso, seja ambientalmente sustentável e viável economicamente.

Além disso, poderá servir como suporte para o desdobramento de inúmeros trabalhos na área de recuperação de estruturas degradadas em ETE e estudos de práticas de prevenção dos mecanismos de degradação em casos de obras novas.

1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

Esta dissertação está estruturada em cinco partes principais, detalhadas a seguir:

No primeiro capítulo, situam-se a introdução, objetivo geral e objetivos específicos e apresentam-se os tópicos que direcionam essa pesquisa.

No segundo capítulo foi realizada uma revisão da literatura existente, dando suporte para todo o trabalho e os temas oriundos da pesquisa bibliográfica referente ao que será estudado no trabalho, com foco na durabilidade e fatores que a influenciam frente aos agentes químicos, características e propriedades de materiais estudados como alternativa para o uso em ETE.

O programa experimental deste estudo é apresentado no capítulo 3, compreendendo seu planejamento, metodologia, materiais empregados e ensaios realizados. Os ensaios são definidos no programa experimental com a finalidade de avaliar os concretos estudados diante dos mecanismos que possam comprometer a durabilidade das estruturas.

No capítulo 4 estão expostos os resultados dos experimentos, juntamente com a interpretação dos mesmos com o auxílio de análises estatísticas.

Esta etapa é a parte essencial do trabalho, visto analisar comparativamente qual o material tem melhor desempenho para o aumento da durabilidade do concreto.

Por fim, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões obtidas na pesquisa, às considerações finais e as sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No presente capítulo são tratados os aspectos relacionados à revisão da literatura referente à caracterização do meio, às manifestações patológicas típicas de ETE e quais as metodologias adequadas para levantamentos e avaliação do estado de conservação de estruturas de concreto.

Através da busca por bibliografias com registros de experiências anteriores sobre o processo de deterioração no ambiente de estudo e dos métodos de mensuração e mitigação dessa agressividade, a partir do melhoramento dos concretos com e sem o uso de impermeabilizante por cristalização e de sílica ativa como adição na mistura, com o intuito de diminuir a porosidade capilar do concreto e aumentar sua resistência mecânica, é o principal foco desta pesquisa.

O ataque ácido vem sendo cada vez mais estudado, devido à propagação de danos de estruturas de concreto em todo o mundo. Este presente trabalho aborda a ocorrência do ataque químico que causa degradação no concreto relacionado a um ambiente específico, mas os conceitos poderão incidir sobre outros ambientes.

Além disso, discute sobre as características do Concreto de Alto Desempenho (CAD) com cimento Portland, de acordo com as normas vigentes e seu comportamento, comparado ao concreto convencional, frente aos ataques químicos a que são expostos.

2.1 DURABILIDADE DO CONCRETO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO FRENTE AO ATAQUE QUÍMICO

Um concreto durável é aquele que mantém a sua forma, com qualidade e capacidade de uso original quando exposto ao meio para o qual foi projetado. No entanto, nenhum material é considerado eternamente durável; o concreto, mesmo possuindo características e propriedades que suportam situações adversas de uso e aplicações, muda ao longo do tempo suas propriedades internas pelas variações que ocorrem na sua microestrutura (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Medeiros et al. (2011) comentam que, para garantir uma durabilidade adequada às estruturas de concreto armado, é necessário adotar medidas preventivas, que são pensadas durante a etapa de concepção do projeto e na dosagem do concreto. Estas medidas podem proporcionar economia, facilidade e

segurança quando comparadas a medidas de recuperação e proteção após o período de construção. Dessa forma, o investimento na durabilidade não se torna atraente somente no âmbito ambiental, mas também é interessante economicamente.

A durabilidade da estrutura de uma ETE está diretamente relacionada às medidas preventivas adotadas, principalmente, em fase de projeto e aos cuidados tomados durante a execução das estruturas. Assim, prescrições normativas quanto à relação água/cimento (a/c) e resistência do concreto estão relacionadas à classe de agressividade a que o material estará exposto são bastante relevantes.

Como ponto de partida, conforme previsto na NBR 6118, pode-se enquadrar as obras de saneamento, em contato com esgoto, na classe de agressividade IV, conforme a tabela 6.1 “Classes de agressividade ambiental”.

Neste estudo, vale lembrar que o American Concrete Institute (ACI) possui uma especificação própria para execução das obras de saneamento denominada “ACI 350 – Code Requirements for Environmental Engineering Concrete Structures”. Em relação a edifícios usuais, as estruturas de obras de saneamento estão sujeitas a condições mais severas de exposição e critérios mais restritivos para a situação de serviço. A presença de agentes químicos agressivos em contato direto com o concreto e os ciclos de molhagem e secagem são exemplos das condições mais severas de exposição. Como critério de serviço, a necessidade de estanqueidade é uma premissa básica destas construções.

A relação entre a agressividade do meio ambiente e a durabilidade do concreto também é considerada por Helene (2004) e elencada na Tabela 1.

Tabela 1 – Correspondência entre agressividade do ambiente e durabilidade do concreto

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Concreto recomendável
I	Fraca	Efêmero, normal, resistente ou durável
II	Moderada	Normal, resistente ou durável
III	Forte	Resistente ou durável
IV	Muito Forte	Durável

Fonte: Helene (2004).

Diversas normas internacionais que tratam do tema classificam a agressividade do meio e determinam parâmetros de especificação de concretos, como é o caso da norma americana ACI 318 (ACI, 2014), norma europeia EN 206-1 (EN, 2013) e a norma britânica BS 8500-1:2006 (BSI, 2006). O Brasil também trata do assunto nas normas NBR 6118 (ABNT, 2014) e NBR 12655 (ABNT, 2015).

Na Tabela 2 são apresentadas as algumas prescrições normativas de durabilidade internacionais de forma simplificada, bem como, as normas brasileiras. Denota-se que nas normativas internacionais, a conceituação de classes de agressividade e as prescrições de durabilidade são retratadas de acordo com as características físicas e químicas a que a estrutura está exposta, somadas às ações mecânicas que as desgastam.

Tabela 2 – Requisitos de projeto e execução para estruturas sujeitas a ambientes quimicamente agressivos de acordo com normas brasileiras e internacionais.

Origem	Norma	Classificação	Agressividade Ambiental	Relação a/c máxima	Resistência Mínima do Concreto Armado (MPa)	Cobrimento (mm)
Brasil	ABNT 6118 ABNT 12655	IV	Muito forte	0,45	C40	45 - lajes / 50 - vigas e pilares
Europa	BS EN 206-1	XA 1	Ambiente com substância química levemente agressiva, de acordo com parâmetros de SO_4^{-2} , pH, CO_2 , NH_4^+ e Mg_2^+	0,55	C30/37	50/75 BS EN 8500-1
		XA 2	Ambiente com substância química moderadamente agressiva, de acordo com parâmetros de SO_4^{-2} , pH, CO_2 , NH_4^+ e Mg_2^+	0,50	C30/37	
		XA 3	Ambiente com substância química altamente agressiva, de acordo com parâmetros de SO_4^{-2} , pH, CO_2 , NH_4^+ e Mg_2^+	0,45	C35/45	
EUA	ACI 318	S0	Baixo sulfato: $SO_4^{-2} < 0,10$ (% em massa)	-	C17	50/65
		S1	Moderado: $0,10 < SO_4^{-2} < 0,20$ (% em massa)	0,50	C28	
		S2	Severo: $0,20 < SO_4^{-2} < 2,00$ (% em massa)	0,45	C31	
		S3	Muito severo: $SO_4^{-2} > 2,00$ (% em massa)	0,45	C31	

Austrália	AS 3600	B1	Estruturas sujeitas a ciclos de molhagem e secagem, em zona não estrutural e clima tropical, ou ainda, em zonas industriais de qualquer zona climática e estruturas próximas à costa marinha (1 a 50 km de distância)	-	C32	50
		B2	Estruturas, permanentemente, submersas, afastadas até 1 km da costa marinha	-	C40	45
		C	Estruturas em zonas de respingos ou névoa salina	-	C50	50/65
Índia	IS 456		Extrema – Estruturas expostas a zonas de marés ou químicos agressivos	0,40	C25	75

Fonte: Adaptado pela autora de EN (2013), ACI (2014), AS (2018), IS (2000), ABNT (2014) e ABNT (2015).

A durabilidade do concreto é determinada pela sua capacidade de resistir à ação de intempéries, ao ataque químico, à abrasão, ou qualquer outro processo de deterioração (ACI 201.2R, 2008).

Beushausen (2016) destaca que essa preocupação tardia com a durabilidade acarretou em impactos financeiros consideráveis para reparo, recuperação e substituição de estruturas de concreto armado.

De modo crescente, os custos de reparos e substituições em estruturas devido a falhas nos materiais têm se tornado parte substancial do orçamento das construções. O crescimento no custo de reposição de estruturas e o destaque dado ao custo do ciclo de vida ao invés do custo inicial estão forçando os engenheiros a darem mais importância aos aspectos de durabilidade (MEHTA & MONTEIRO, 1994; ANDRADE, 1999; AÏTCIN, 2000).

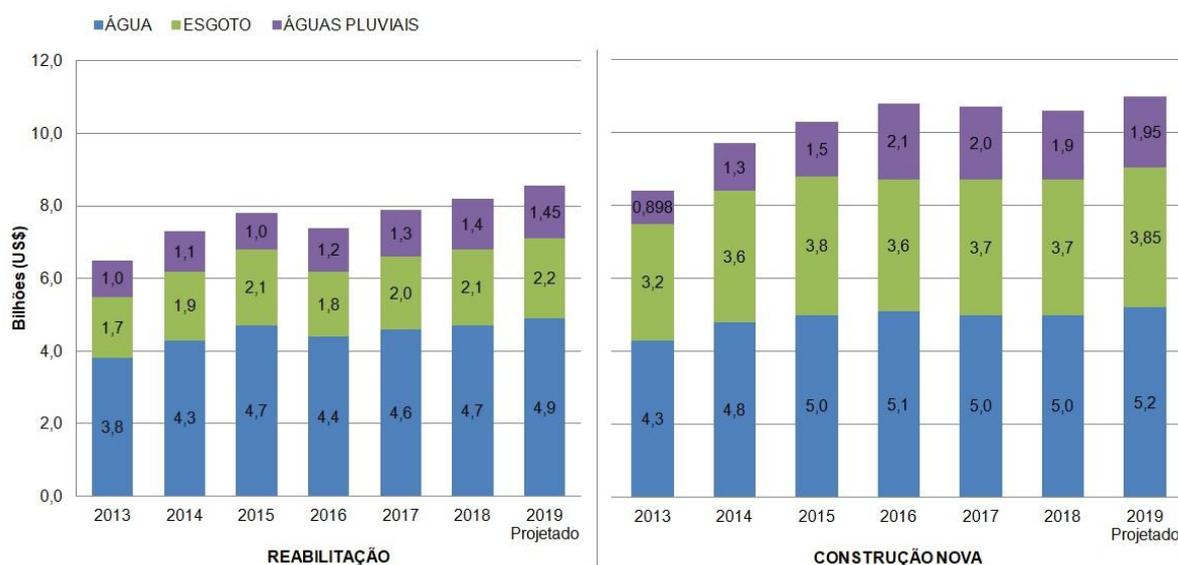
Em muitas localidades, o problema da deterioração de concretos no esgoto não é reconhecido, até que ocorram danos mais graves e extensos, como o colapso das estruturas ou falha de equipamentos, embora o custo para reparo ou substituição das estruturas exceda, em muito, os custos do seu controle preventivo (US-EPA, 1991).

Estatisticamente, pequenos investimentos em projeto e execução são uma alternativa eficiente de obter maior durabilidade e de forma mais controlada; visto que, não é apenas uma questão técnica e econômica, mas também uma questão ambiental e sustentável (GJØRV, 2015).

Duprat, Sellier e Nguyen (2006) estimam que 10% das estruturas corroam depois de 35 anos de exposição ao tempo, esta proporção chega a 25% quando as estruturas alcançam 50 anos de existência. Esta estimativa é suficientemente forte para o aprofundamento das causas que promovem esta patologia, dentre elas a carbonatação.

A Agência de Proteção Ambiental dos EUA (US-EPA, 2019) disponibiliza o custo do investimento com a reabilitação e novas construções de estruturas de água e esgoto cloacal e pluvial nos Estados Unidos, no período entre 2013 e 2019. Tratando apenas de estruturas de esgoto cloacal, observa-se na Figura 1 que, neste período, o somatório de investimentos com a reabilitação das estruturas existentes foi de US\$13,8 bilhões, representando 54,2% do valor investido em novas construções, que foi de US\$25,5 bilhões.

Figura 1 – Gráfico do custo de reabilitação x construção de estruturas de saneamento nos EUA



Fonte: US-EPA (2019).

Segundo a Revista Underground Construction (2019), a reabilitação de esgotos continua a superar as novas construções em sua curva de crescimento, já que é projetada com um crescimento de 4,1% em 2019, enquanto que novas instalações de infraestrutura de esgoto aumentaram 3,7%.

A idade média do sistema de esgoto nos Estados Unidos, de acordo com a Autoridade de Recursos Hídricos de Massachusetts, por exemplo, é de 70 anos

com, aproximadamente, 39% dos esgotos com mais de 100 anos de idade (MWRA, 2018).

As estruturas devem satisfazer os requisitos de resistência, manutenção e estabilidade durante a vida útil, sem a perda das condições de uso ou necessidade de manutenção excessiva não prevista em projeto. O período no qual não se faz necessária a realização de maiores reparos é denominado pela EN 1990:2002 – *Eurocode - Basis of Structural Design* como vida útil de projeto.

Normalmente, a vida útil de uma estrutura é expressa em anos, sendo estabelecida pela maioria das normas e códigos internacionais do concreto uma vida útil de projeto (VUP) mínima de 50 anos para a maioria das estruturas e de 100 anos para obras de infraestrutura, pontes, viadutos, barragens, entre outras. Neste sentido, a Tabela 3 mostra recomendações de vida útil de alguns documentos de referência internacional.

Tabela 3 – Vida útil de projeto mínima em normas

Tipo de estrutura	Vida útil de projeto mínima em cada norma			
	BS 7543 (2015)	ISO 2394 (2015)	Fib 34 (2006) e EN 206-1 (2007)	Fib 53 (2010)
Temporárias	≥ 10 anos	1 a 5 anos	≥ 10 anos	-
Estruturas offshore	-	-	-	≥ 35 anos
Edifícios industriais e reformas	≥ 30 anos	-	-	-
Edifícios e outras estruturas comuns	-	≥ 50 anos	≥ 50 anos	≥ 50 anos
Edifícios novos e reformas de edifícios públicos	≥ 60 anos	-	-	-
Edifícios monumentais, pontes e obras de infraestrutura	≥ 120 anos	≥ 100 anos	≥ 100 anos	≥ 100 anos
Edifícios monumentais	-	-	-	≥ 200 anos

Fonte: Helene (2004).

Considerando que não há diretrizes específicas apenas para o concreto, mas sim para estruturas formadas por aço e concreto, subentende-se que a obediência

às indicações das normas brasileiras, vinculada à correta execução dos elementos estruturais, garante a vida útil de projeto mínima de 50 anos das estruturas (HELENE, 1997).

A NBR 6118 e a NBR 12655 fixam requisitos específicos para o concreto em função do local de aplicação, a fim de que o mesmo resista aos agentes agressivos e a vida útil seja maximizada.

A NBR 6118 (ABNT, 2014), em termos de durabilidade, tem as principais especificações técnicas dos concretos, incluindo nestes requisitos a máxima relação água/cimento e os valores mínimos de cobrimento nominal das armaduras, todavia sem que sejam estabelecidos, explicitamente, os períodos de vida útil das estruturas por este documento especificadas (PACHECO, 2016).

Em estruturas de saneamento, o ataque ácido é um dos principais processos de deterioração e pode causar a deterioração severa no concreto, do aço e demais materiais utilizados em sua construção, além de danos aos equipamentos elétricos e mecânicos que compõe os sistemas. Isto faz com que estruturas projetadas para durarem de 50 a 100 anos apresentem vida útil reduzida a apenas 10 ou 20 anos (US-EPA, 1991).

2.2 REAÇÕES DO ATAQUE QUÍMICO NO CONCRETO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Segundo Pinto e Takagi (2007), o concreto armado é, atualmente, o material de construção mais utilizado em obras de saneamento. Porém, apesar da grande evolução de sua tecnologia, os sistemas de tratamento de água e esgoto são cada vez mais agressivos e podem colocar em risco a operação e durabilidade das estruturas de saneamento.

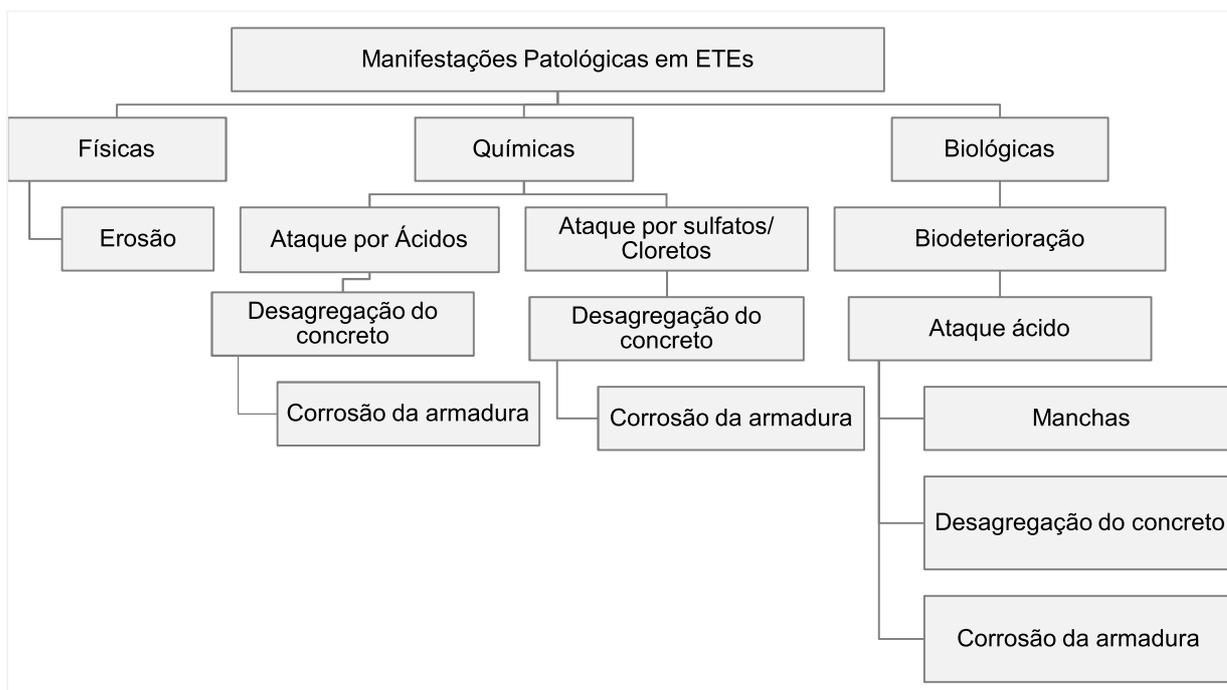
Brandão (1998) afirma que uma forma bastante comum de ataque em ETE é o ataque biológico. O principal fator de degradação provém do ataque do ácido sulfúrico resultante das reações que estas bactérias desencadeiam e é altamente nocivo à integridade da pasta de cimento. Além disso, o aumento da umidade superficial do concreto e a presença de fissuras propiciam condições favoráveis para que outras formas mais severas de deterioração se instalem.

Para Takagi e Pinto (2007), os níveis de ataque variam de acordo com cada ambiente das estações de tratamento de esgoto. Alguns produtos químicos usados

rotineiramente no tratamento podem atacar o concreto. Também se deve considerar o efeito erosivo das partículas sólidas no esgoto e, principalmente, a ação de bactérias em sistemas de tratamento de esgoto fechados, que costuma ocasionar grandes problemas de corrosão na parte superior de grandes tubulações ou nos tetos das estruturas pela formação do ácido sulfúrico biogênico.

Dias (2018) atenta para a divisão proposta na Figura 2, que deve ser ponderada visto que as origens físicas, químicas e biológicas estão fortemente interligadas, como, por exemplo, o ataque por ácido sulfúrico biogênico, que é uma degradação química com provável origem biológica, em se tratando de ambientes de ETE.

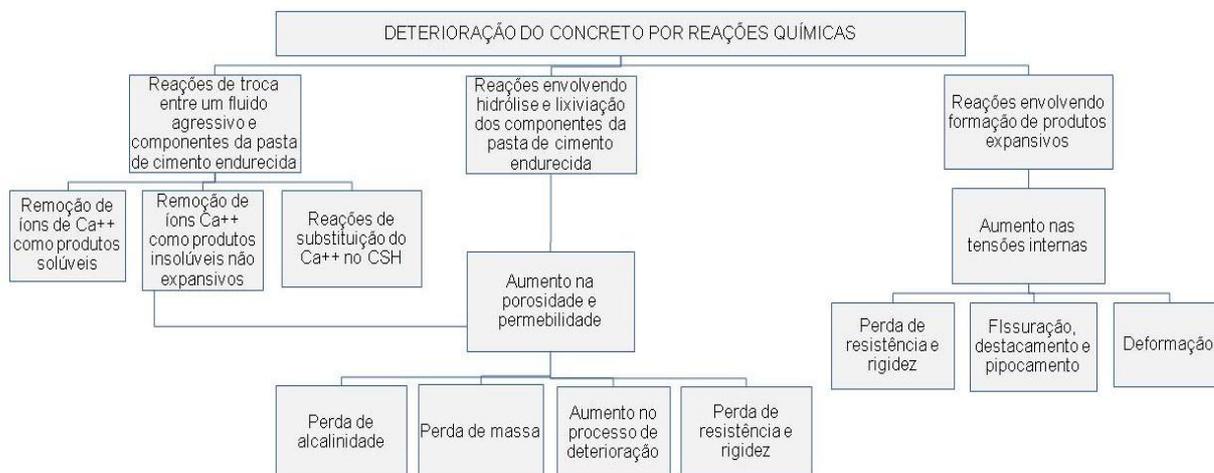
Figura 2 – Manifestações patológicas típicas de Estações de Tratamento de Esgoto



Fonte: Adaptado de Dias (2018).

Esta pesquisa está direcionada a atmosferas de Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários domésticos, portanto, serão explanados os temas relacionados a estes ambientes. As manifestações patológicas podem ter diversas origens, que geram diferentes sintomas e mecanismos de deterioração elencados na Figura 3.

Figura 3 – Deterioração do concreto por agentes químicos



Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014).

Góis (2016) verificou a deterioração em um ambiente de ETE que possui tratamento anaeróbio, com dois reatores UASB (em inglês, *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), identificado forte odor de H_2S e deterioração. As manifestações patológicas encontradas foram: perda de cobrimento, corrosão da armadura, presença de substância esbranquiçada, fissuração, bolor e manchamento (Figura 4). Foi possível identificar um estágio avançado de deterioração neste reator, onde existia, principalmente, grande quantidade de agregado aparente e substâncias esbranquiçadas, principais manifestações patológicas visíveis típicas de CCMI (Corrosão do Concreto Microbiologicamente Induzida)

Figura 4 – Processo de deterioração em fossas sépticas.



Fonte: Góis (2016).

O “Quadro 1 - Resumo histórico dos estudos mais relevantes sobre ataque químico no concreto” no APÊNDICE A exibe, de forma compilada e na ordem cronológica, os principais trabalhos dos autores que mais produzem pesquisas na área de deterioração do concreto por ataque químico, em especial o ataque de ácidos, dentre teses, dissertações e artigos científicos, realizados ao longo dos anos até os dias atuais.

2.2.1 Fatores de degradação do concreto relacionados ao esgoto

Conforme observado, os mecanismos de deterioração estão relacionados entre si e um pode desencadear outro. Relacionar as características físicas, químicas e biológicas com os potenciais ataques químicos ao concreto pode elucidar pontos até então ignorados na análise da durabilidade dos materiais cimentícios.

Na literatura está bem difundida a importância de conhecer a agressividade do meio ambiente, sendo este o fator essencial para se prever a durabilidade das estruturas e, por isso, deve ser considerado desde a fase de projeto. O concreto sofre influência de efeitos externos que variam conforme o ambiente no qual está inserido e conforme o uso ao qual está submetido. Estes efeitos podem ser de origem física, química e biológica (MEHTA, MONTEIRO, 2014; SOUZA, RIPPER, 1998).

Para (Ferreira, 2000) agentes agressivos na forma líquida podem penetrar nos poros do concreto de três formas: (1) por meio da difusão, que se trata do resultado da diferença existente dos graus de concentrações iônicas entre os fluidos externos e internos; (2) por pressão hidrostática, que é o resultado da diferença relativa a variação na pressão dos fluidos; (3) por existência de forças capilares, resultantes da ocorrência de mecanismos capilares.

2.2.1.1 Ataque por ácidos

De acordo com Hondjuila & Miokono (2013), o concreto por sofrer um ataque direto por ácido, sendo este ácido proveniente de alguma fonte mineral. Por outro lado, outras fontes de ácidos deletérios ao concreto podem, também, estar envolvidas indiretamente na deterioração do mesmo, como, por exemplo, a atividade bacteriana produzindo os chamados ácidos biogênicos. O efluente que flui para o

sistema de esgoto contém componentes orgânicos e inorgânicos, o que garante as condições adequadas para o crescimento e a atividade de vários microrganismos (SUN, 2015).

No caso do ataque indireto, os microrganismos irão produzir substâncias que reagirão com o material, causando a dissolução dos componentes ou formação de produtos expansivos. Os processos de biodeterioração provocam a perda de propriedades físicas e mecânicas e/ou alterações da composição dos materiais (HERISSON, 2012).

As velocidades de ataque de alguns produtos químicos sobre o concreto são apresentadas na Figura 5.

Figura 5 – Efeito de alguns ácidos envolvidos na deterioração do concreto

Velocidade de ataque à temperatura ambiente	Ácidos inorgânicos	Ácidos orgânicos
Rápida	Clorídrico Fluorídrico Nítrico Sulfúrico	Acético Fórmico Lático
Moderada	Fosfórico	Tânico
Lenta	Carbônico	-
Desprezível	-	Oxálico Tartárico

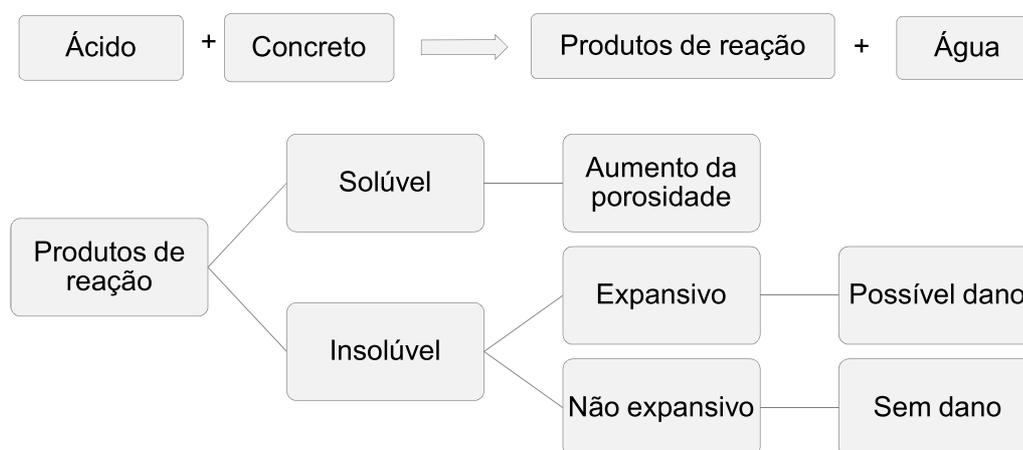
Fonte: Neville (2013).

Os ataques ácidos podem ser divididos em: (1) ácidos minerais que dissociam fortemente os componentes do concreto e (2) ácidos orgânicos que atuam com uma dissociação mais branda. O ataque ácido também pode levar a um efeito de preenchimento dos poros por produtos expansivos (YUAN et al. 2015).

Na literatura existem divergências sobre os dois mecanismos de ataque ácido, pois muitos autores mostraram que uma resistência ao ataque por ácido mineral não significa necessariamente uma resistência ao ataque por ácido biogênico (DE BELIE et al., 2004; VINCKE et al., 2002; MONTENY et al., 2000). Para verificar estas diferenças, devem ser aplicados materiais de estudo *in loco* e em ensaios acelerados em laboratório.

De acordo com o tipo de ácido, a situação será mais ou menos agressiva. Ao ingressar no interior da massa do concreto, alguns ácidos podem formar sais insolúveis e expansivos, causando fissuração e posterior deterioração do concreto. Se, ao contrário, os produtos resultantes forem solúveis, há o incremento da porosidade e se acelera o processo de perda de massa e deterioração (HUSNI, 2003). A Figura 6 mostra o efeito do ataque ácido ao concreto.

Figura 6– Efeitos do ataque ácido no concreto



Fonte: Adaptado de Husni (2003).

Cassal (2000), analisando a deterioração do concreto por ataque ácido, menciona que os fatores que mais influenciam na velocidade de deterioração são a porosidade capilar do concreto, a quantidade de material agressivo e a solubilidade dos produtos resultantes da reação. Segundo o autor, em muitos tipos de ataque, a permeabilidade se modifica durante o ataque: a remoção dos compostos solúveis que vão se formando aumenta a permeabilidade e, em consequência, a velocidade do ataque. A quantidade de material agressivo está relacionada à agressividade ao concreto, que aumenta quando o ácido é renovado constantemente, mantendo sua concentração elevada.

De forma geral, o concreto não é resistente a ácidos, pois ocorre a reação destes com o hidróxido de cálcio do cimento Portland hidratado, formando compostos de cálcio solúveis em água que são lixiviados (GU et al., 1998; NICA et al., 2000; PCA, 2002; GIANNANTONIO et al., 2008; LEEMAN et al., 2010).

2.2.1.2 Processos químicos e biológicos nas estruturas de saneamento

A finalidade das estações de tratamento de esgotos visa mitigar a proliferação de inúmeras doenças parasitárias e infecciosas, além de remover substâncias que exercem ação deletéria nos corpos de água: a matéria orgânica pode causar a diminuição da concentração de oxigênio dissolvido provocando a morte de peixes e outros organismos aquáticos, escurecimento da água e exalação de odores desagradáveis.

No Brasil, um dos processos de tratamento biológico de efluentes sanitários mais utilizados é o reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo do tipo UASB, devido às suas características operacionais compatíveis com o clima predominante e os custos relativamente baixos de manutenção (NEVES et al. 2019).

2.2.1.2.1 Formação do ácido acético

O ácido acético (CH_3COOH) é um ácido orgânico produzido a partir da digestão aeróbica e anaeróbica que reduz a durabilidade do concreto (CHATVEERA e LERTWATTANARUK, 2014). Esse ácido é encontrado no dia a dia principalmente na sua forma impura, chamada vinagre. É conhecido por ser um ácido fraco, porém corrosivo.

Dos ácidos voláteis encontrados mais comumente em reatores anaeróbios, o ácido acético é o mais abundante, sendo formado a partir de praticamente todos os compostos orgânicos. Para substratos complexos, o ácido acético é precursor de cerca de 72% do metano formado. Em um processo operado corretamente, sua concentração expressa como ácido fica em torno de 200mg/L. Os ácidos acético e propiônico são responsáveis por 85% da produção total de metano e os 15% restantes se originam dos outros ácidos (CHERNICHARO, 1997). Já os estudos realizados por Pontes et al. (2002), para um reator UASB em escala piloto, operando com carga orgânica volumétrica afluyente de 1,6 a 2,3 $\text{kgDQO.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$, indicaram que um dos principais ácidos formados na degradação anaeróbia de esgotos sanitários foi o ácido acético.

2.2.1.2.2 Formação do ácido sulfúrico

Conforme a Agência de Proteção Ambiental Americana, o Sulfeto de Hidrogênio (H_2S) é um gás incolor, inflamável com odor característico de “ovo podre” (USEPA, 2003).

O esgoto doméstico contém compostos de enxofre que, sob a ação de bactérias redutoras de sulfato (BRS), em meio anaeróbico, produz H_2S e anidrido carbônico (CO_2). O ácido sulfídrico, ao desprender-se do efluente na forma de sulfeto de hidrogênio (H_2S), reage parcialmente com o oxigênio do ar atmosférico, formando água (H_2O) e compostos de enxofre ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$; $\text{S}_4\text{O}_6^{2-}$; SO_4^{2-}). A outra parcela do sulfeto de hidrogênio (H_2S), através do ataque ácido, se dissolve na água contida na estrutura porosa do concreto, reduzindo gradativamente o pH da matriz hidratada de forma evolutiva partindo da superfície e avançando gradativamente em profundidade (MONTENY et.al., 2000; DE MUYNCK et al., 2009; ISLANDER et.al., 1991; PINTO e TAKAGI, 2007).

De acordo com o estudo de O’Connell et al. (2010), as bactérias anaeróbicas redutoras de sulfato consomem o sulfato (SO_4^{2-}) presente no esgoto para obter oxigênio necessário para consumir matéria orgânica, liberando então íons sulfeto (S_2^{2-}). Essas bactérias estão presentes na camada de lodo formado no fundo, abaixo do nível do esgoto, também conhecido como biofilme (VINCKE, 1999; SAND, 1994).

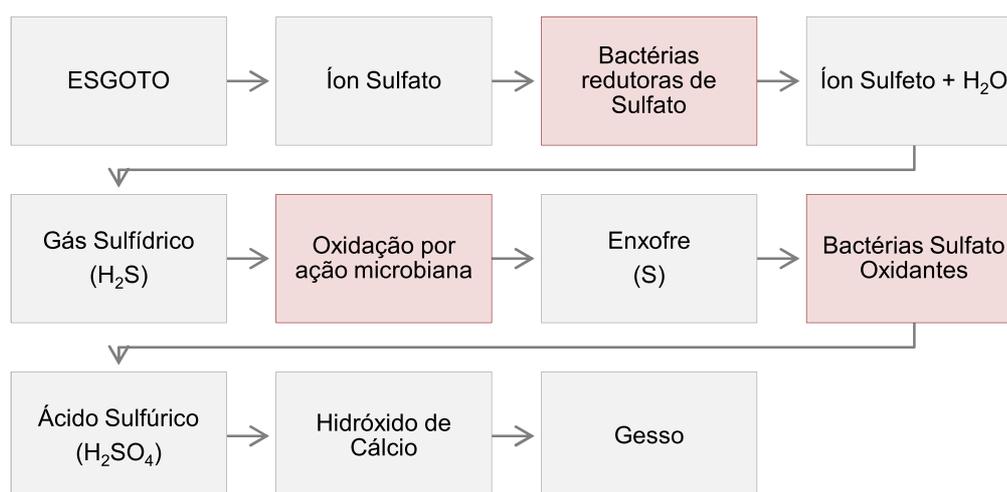
As bactérias oxidantes de enxofre (BOE) são bactérias quimioautotróficas (utilizam a energia das reações de oxidação de compostos inorgânicos para seu metabolismo), gram-negativas e de respiração aeróbia (precisam de oxigênio) (WAKSMAN e JOFFE, 1922). Elas obtêm a energia que necessitam para crescer oxidando compostos de enxofre como sulfeto de hidrogênio (H_2S), enxofre elementar (S), thiosulfato ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$), tetrionato ($\text{S}_4\text{O}_6^{2-}$) e ácido sulfúrico (H_2SO_4). A oxidação destes compostos é acompanhada por uma diminuição no pH (PARKER & PRISK, 1953; SHIRAKAWA, 1994).

A formação de ácido sulfídrico ou sulfeto de hidrogênio (H_2S) nas estruturas de esgoto é um grande problema, especialmente em locais onde o clima é mais quente, devido a certas características negativas que possui, como mau cheiro, alta toxicidade e suas fortes propriedades corrosivas em diversos tipos de materiais metálicos ou cerâmicos (VINCKE, 2002).

Segundo Herisson (2010), o H_2S pode impactar o concreto de duas formas: de forma direta, reagindo com o material e provocando uma diminuição do seu pH ou de forma indireta, atuando como nutriente para as BOE, as quais irão produzir o H_2SO_4 a partir deste gás.

De modo geral, esse processo pode ser descrito por três passos: primeiramente, ocorre a neutralização da superfície de concreto, proporcionando um ambiente adequado para o crescimento de bactérias anaeróbicas que produzem sulfeto de hidrogênio (H_2S), também conhecido como gás sulfídrico. A seguir ocorre a produção de H_2SO_4 . Esses processos estão descritos no diagrama representado na Figura 7.

Figura 7 – Esquema descritivo dos processos químicos e biológicos envolvidos no processo de produção do H_2SO_4 de maneira biogênica



Fonte: Adaptado de Tavares (2017).

2.2.2 Deterioração do concreto por reações químicas

A deterioração do concreto por ácidos, orgânicos ou inorgânicos, resulta, principalmente, de reações entre esses elementos e os compostos de cálcio do cimento endurecido – silicato, aluminato e hidróxido de cálcio – os quais são convertidos a sais de cálcio (BRANDÃO, 1998).

Na maioria dos casos, o resultado das reações químicas é a formação de compostos de cálcio solúveis em água, os quais podem ser facilmente lixiviados, resultando em perda da capacidade de ligação entre os constituintes do concreto.

2.2.2.1 Reação causada por ácido acético

O ataque do ácido acético abrange a decomposição de produtos hidratados e não hidratados da pasta de cimento (PAVLÍK, 1994). O mecanismo de degradação envolve a descalcificação do gel C-S-H e a formação do sal solúvel acetato de cálcio.

Segundo Beddoe e Dorner (2005), em geral, o grau de agressividade do ataque depende da capacidade do ácido em dissociar e solubilizar o cálcio (Ca^{++}) dentro da microestrutura do concreto. Portanto, embora o ácido acético dissocie os elementos mais lentamente do que os ácidos minerais, seu ataque forte é atribuído à elevada solubilidade do acetato de cálcio formado. Dessa forma, os ácidos atuam destruindo a matriz resistente do concreto, produzindo transformações na pasta de cimento endurecida. O resultado destas ações é a perda de massa e a redução da seção resistente do concreto. Esta perda acontece em camadas sucessivas, a partir da superfície exposta, sendo a velocidade da degradação proporcional à concentração do ácido em contato com o concreto (ANDRADE et al., 2003).

O ataque do ácido acético se assemelha ao processo corrosivo também provocado pelo ácido nítrico. As diferenças entre os dois processos são causadas por ionização parcial do ácido acético, com efeito de preenchimento com solução na camada corroída e, conseqüentemente, em mudanças no pH (PAVLÍK, 1994).

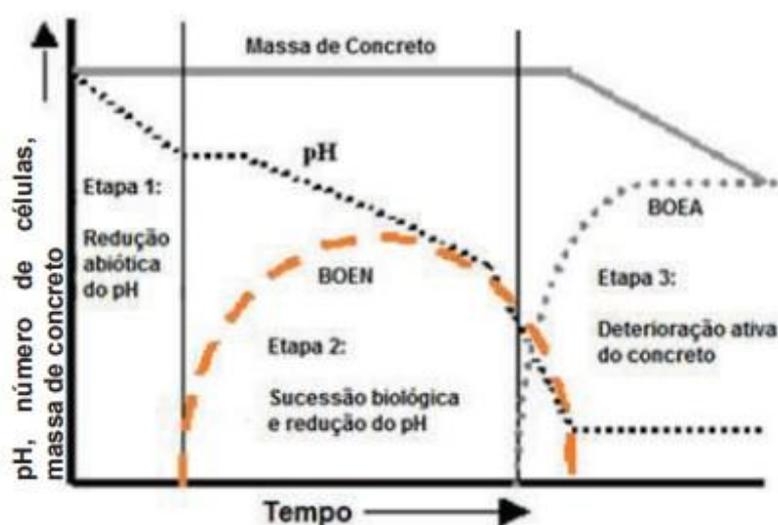
De acordo com Bertron et al. (2005), o ácido acético é bastante agressivo, de acordo com o valor de pKa (constante de dissociação do ácido acético, $\text{pKa} = 4,75$). Para atingir a um mesmo valor de pH é necessária uma maior concentração de ácidos fracos do que seria necessária de ácidos fortes. Portanto, os ácidos fracos precisam estar presentes em maior concentração para gerar uma degradação semelhante à degradação gerada por ácidos fortes.

O mecanismo de reação com fases hidratadas no concreto de cimento Portland pode ser resumido da seguinte forma: hidróxido de cálcio (CH), que é a fase mais vulnerável ao ataque de ácido no concreto, reage com o ácido acético e produz sais de cálcio solúveis (acetato de cálcio). Quando esses sais são lixiviados do concreto, a porosidade aumenta, o nível de pH nos poros cai e os hidratos do cimento tornam-se gradualmente instáveis. O resultado final é uma desintegração total do material (BERTRON, 2005; BELIE, 2018).

2.2.2.2 Reação causada por ácido sulfúrico

Em estruturas para esgoto, BOE transformam os compostos de enxofre em sulfeto de hidrogênio (H_2S), especialmente a temperaturas mais altas, acima de $25^\circ C$, onde a umidade relativa e a turbulência do efluente são altas e também na presença de oxigênio (VAUGHN, 2007). O sulfeto de hidrogênio aquoso é produzido na zona anaeróbica a partir da reação de redução dos íons sulfato devido às bactérias redutoras de sulfato (BRS) (ANAÏS et al., 2018).

Figura 8 – Mudanças físicas e químicas teóricas das propriedades do concreto durante o processo de deterioração



Fonte: Adaptado de Roberts et al. (2002).

Na Fase 1 ocorre a acidificação inicial do concreto. Mehta e Monteiro (2008) citam que o concreto é naturalmente alcalino, com um pH variando na faixa de 11 a 13. Nesta fase inicial ocorre pouca atividade biológica, pois as BOE não são capazes de se desenvolver neste pH elevado. Porém, nas estruturas para esgoto estão presentes substâncias como CO_2 e H_2S , ambas com propriedades ácidas (ROBERTS et al., 2002). Estas substâncias podem se dissolver na camada de água da superfície do concreto e reagir com os seus componentes, penetrando, em seguida, nos poros do material. Tais reações entre CO_2 e H_2S com o concreto atuam na redução química do pH do concreto para aproximadamente 8 (SUN, 2015).

Na Etapa 2 ocorre a colonização da superfície do concreto, chamada de biofilme, pois existem quantidades suficientes de nutrientes, umidade e oxigênio no meio, portanto as bactérias do gênero *Thiobacillus* do tipo neutrófilas (BOEN),

começam a se fixar na superfície e a se reproduzir. Isto acelera a redução do pH da superfície, uma vez que ocorre a produção de vários compostos de enxofre e, a medida que o pH cai, o concreto passa a ser colonizado por outros microrganismos, alterando a comunidade microbiótica do meio e novos organismos crescem. Este processo de deterioração do concreto ainda é muito leve (ROBERTS et al., 2002).

A Etapa 3 é caracterizada pela corrosão severa e a perda de massa do concreto. Como resultado da colonização por BOEN, o pH do concreto sofre uma diminuição constante. Quando o pH está em torno de 4 ou 5 as bactérias do tipo acidófilas (BOEA), da espécie *T. Thiooxidans*, começam a colonizar a superfície e se tornam o microrganismo dominante na superfície do concreto, oxidando os compostos de enxofre e produzindo grandes quantidades de ácido sulfúrico (H_2SO_4), podendo reduzir o pH do concreto a menos de 2, momento em que ocorre efetivamente a deterioração severa do material (ROBERTS et al., 2002, SUN, 2015).

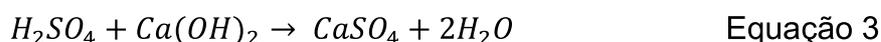
Os ácidos reagem com o elemento de caráter básico da pasta de cimento ($Ca(OH)_2$), produzindo água e sais de cálcio, conforme Equação 1:



Em estruturas de saneamento encontra-se com bastante frequência o gás sulfídrico ou sulfeto de hidrogênio (H_2S), resultante do metabolismo de sulfatos presentes no esgoto por bactérias anaeróbias. Trata-se de um gás fraco, que por si só é pouco nocivo ao concreto. Entretanto, quando se desprende do esgoto, é oxidado por bactérias aeróbias, presentes na superfície livre das estruturas, transformando-se em ácido sulfúrico (H_2SO_4) (BAUER, 2000), conforme Equação 2:

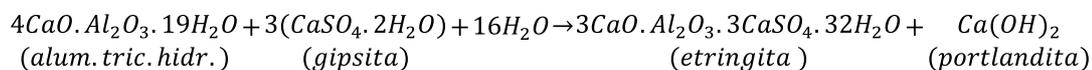


De acordo com Ferreira (2000), normalmente o ácido atacante deposita o produto da reação (sal) na superfície do concreto. O ácido sulfúrico produzido (H_2SO_4) é particularmente agressivo ao concreto, pois, na reação com o $Ca(OH)_2$ da pasta de cimento, produz o sulfato de cálcio na forma de gesso ou gipsita ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), conforme a Equação 3:



O sulfato de cálcio, por sua vez, irá reagir produzindo etringita secundária, o que é acompanhado por um aumento de volume. Alguns autores afirmam que a gipsita pode causar um aumento de volume de 120% a 220% (MONTENY et al.,

2000). À medida que aumenta o ingresso de ácido no concreto, mais gipsita vai sendo formada, conforme a Equação 4, podendo gerar expansão, fissuração e desagregação do concreto.

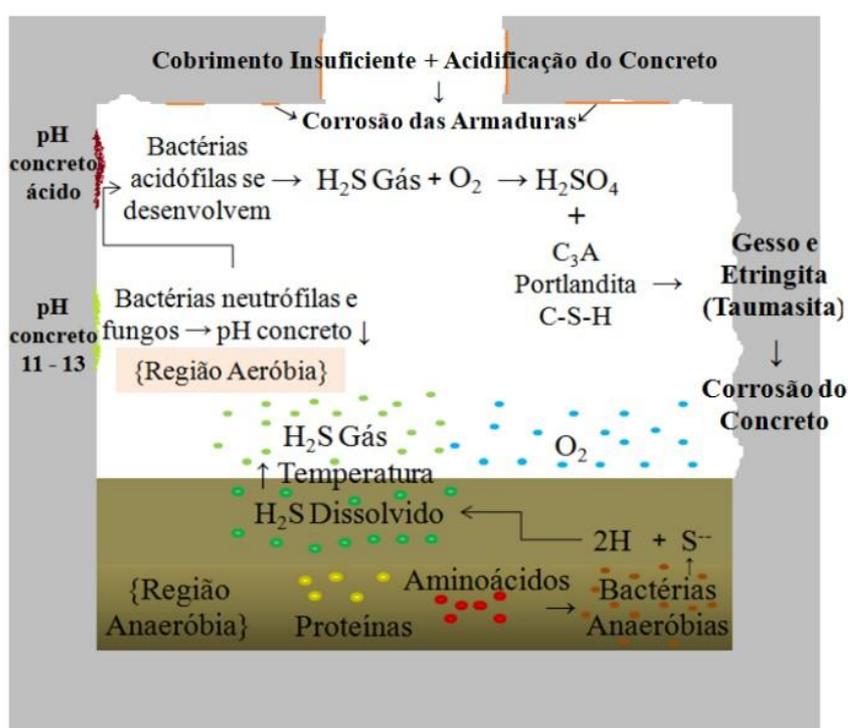


Equação 4

Quando o pH diminui, a etringita não consegue manter uma estabilidade e acaba por se transformar em gipsita, que, por sua vez, é lixiviada para fora do meio (MORI et al., 1992).

A Figura 9 ilustra o mecanismo de degradação ocasionado por ácidos biogênicos:

Figura 9 – Mecanismo de corrosão por ácidos biogênicos



Fonte: Adaptado de Dias (2016).

2.2.3 Fatores que influenciam o processo de deterioração por ácidos

Os principais fatores que influenciam as taxas de corrosão do concreto incluem: (1) a concentração de H_2S na fase gasosa, que é influenciada pelas concentrações de sulfeto no esgoto, pH, turbulência e temperatura (WIENER et al., 2006, YONGSIRI et al., 2004); (2) a transferência de H_2S da fase gasosa para o concreto da estrutura para esgoto, determinada pela concentração de H_2S gasoso, temperatura, umidade relativa (AESOY et al., 2002, JOSEPH et al., 2012) e propriedades da superfície do concreto – especialmente, relação a/c e pH (ISLANDER et al., 1991, SATOH et al., 2009, Sydney et al., 1996); e (3) a taxa de formação de produtos de corrosão que depende da taxa de produção de ácido sulfúrico e das propriedades do concreto – composição química, alcalinidade e porosidade (BERNDT, 2011, NIELSEN et al., 2008, ZIVICA e BAJZA, 2001).

2.2.3.1 Fatores externos

Com relação aos aspectos de durabilidade do concreto, é importante compreender, de forma mais aprofundada, quais são os constituintes presentes no esgoto, capazes de agredir o concreto para proposição de medidas de proteção que garantam vida útil considerável ao concreto das ETE.

2.2.3.1.1 Temperatura

O aumento da temperatura pode provocar maior liberação de sulfeto para a atmosfera e, portanto, a agressividade do meio, conseqüentemente, será maior. ETE localizadas em regiões mais quentes podem estar sujeitas a um nível de degradação maior do que ETE de regiões mais frias, devido à influência da temperatura na produção e liberação de sulfetos para o ambiente, embora a temperatura não seja o único fator a influenciar na acidificação da atmosfera. Em seu estudo, Park et al. (2014) relacionaram o aumento da temperatura com o aumento da produção de H_2S , explicado pelo fato da temperatura aumentar o consumo de oxigênio do esgoto, mudando o ambiente anaeróbio e aumentando a taxa de sulfatos dissolvidos, os quais serão transformados em H_2S pelas BRS. Conseqüentemente, sob temperatura elevada, as reações de ataque por sulfatos são geralmente aceleradas.

Bond et al. (2014) desenvolveram um estudo no qual avaliaram a influência da taxa de concentração de gás sulfídrico, da umidade do ar e da temperatura do ar na desagregação do concreto e concluiu que a temperatura variou, porém não foi possível detectar os efeitos claros da temperatura na desagregação do concreto. Entretanto, o trabalho de Yongsiri et al. (2004) mostrou que existe efeito da temperatura na transferência ar-água de gás sulfídrico, além de aumentar a atividade microbiana que produz esse gás.

Mangat e El-Khatib (1992) encontraram crescimento nos cristais de etringita até a temperatura de 40°C. O aumento no tamanho dos cristais de etringita e o aumento na adsorção do SO_4^{2-} contribuem para o preenchimento mais rápido dos poros da matriz cimentícia, reduzindo o tempo de indução da interação.

De acordo com Von Sperling (2016), a temperatura tem influência direta nas taxas de reações físicas, químicas e biológicas, além de influenciar ainda na solubilidade dos gases. Desta forma, a temperatura é fator que influencia na taxa de degradação do concreto de forma indireta (MORI et al., 1992).

2.2.3.1.2 pH

O pH elevado da solução aquosa dos poros do concreto (12,5~13,0) restringe a atividade microbiana, a qual requer pH próximo a 9,0 para que haja a colonização de bactérias oxidantes, responsáveis pela oxidação dos compostos de enxofre (ISLANDER et al., 1991). Portanto, estudos de Mori et al. (1992) e Estokov et al. (2012) admitem que o ataque ácido é um dos principais motivadores iniciais da degradação do concreto por ácido sulfúrico biogênico, já que reduzem o pH da solução aquosa dos poros para que ocorra a colonização de bactérias oxidantes.

Valores baixos de pH poderão ocorrer quando da decomposição de composto facilmente degradáveis como açúcares e amido, produzindo ácidos orgânicos pois implicará em afluente à ETE já com altas concentrações de ácidos (FORESTI, 1999).

O pH é alterado significativamente pela ação das bactérias que acidificam o meio, podendo ocasionar a deterioração do concreto. Por exemplo, a acidez torna o gás sulfídrico mais volátil e, conseqüentemente, viabiliza a formação de ácido sulfúrico (MARQUEZ-PEÑARANDA; SANCHEZ, 2016).

O'Connell et al. (2010) sugerem que a superfície de concreto apresenta inicialmente uma alta alcalinidade, com pH apresentando valores entre 11 e 13, como resultado da hidratação do cimento. Esse elevado pH impede o crescimento das bactérias sulfato-oxidantes. Desse modo, para o crescimento dessas bactérias, é necessária a redução do pH da superfície do concreto. Essa redução do pH permite que bactérias aeróbicas se desenvolvam e passem a produzir H_2SO_4 , o qual irá atacar o concreto.

Pesquisas mais recentes de Joseph (2012) e Yan (2015) associam a queda do pH ao processo de dissolução por meio da ação do H_2S .

A partir do trabalho de Koenig e Dehn (2016) constatou-se que, embora esses ácidos orgânicos sejam referidos como "fracos", eles têm um potencial de dano muito maior com valores de pH idênticos aos ácidos supostamente "mais fortes" (como ácidos minerais). Eles testaram concretos em um fermentador em escala piloto para uma análise dos mecanismos de dano específicos do processo e do material. O maior dano ocorreu devido à dissociação relativamente incompleta e ao efeito tampão, dissociação subsequente em reações com substâncias básicas.

2.2.3.1.3 Umidade relativa

Em uma tubulação de esgoto constituída de concreto, para o estudo do ataque ácido, pode-se diferenciar o ambiente submerso e o ambiente acima do nível d'água, onde o concreto fica em contato com os gases provenientes da fase líquida.

Sawyer, McCarty e Parkin (2003) detalham este processo, desta vez, em condições aeróbicas que ocorrem geralmente na parte acima do nível do esgoto dentro das tubulações, devido à presença de oxigênio. É natural que estes organismos infectem as paredes e principalmente a parte superior das tubulações. Devido às condições aeróbicas que normalmente prevalecem nas tubulações acima do nível das águas residuárias, estas bactérias realizam a oxidação acima detalhada e formam ácido sulfúrico, o qual, sendo um ácido forte, ataca o concreto.

Nos sistemas de esgoto, a umidade relativa é determinada pela diferença de temperatura entre o esgoto e atmosfera da estrutura. Assim como a temperatura, a umidade também varia muito nos sistemas de esgoto de cada país. Segundo Wells et al. (2012) enquanto em Los Angeles (EUA) a umidade varia de 96% a 100%, em Sydney (Austrália) varia de 90% a 94%.

Pinto e Takagi (2007) enfatizam que a agressividade nas tubulações de esgoto é muito maior sobre o nível d'água devido à presença de oxigênio, causando corrosão mais intensa na parte superior das tubulações ou nos tetos das estruturas de armazenamento de esgotos.

Estudos em laboratório e em sistemas de esgotos reais descobriram que uma umidade relativa elevada (95% a 100%) leva à redução do pH de superfícies mais externas do concreto durante a acidificação inicial, em comparação com uma umidade inferior (85% a 95%) (JOSEPH et al., 2010; WELLS et al., 2012). Para concretos mais corroídos, a alta umidade também pode levar ao aumento da perda de massa do mesmo (JIANG et al., 2014; WELLS et al., 2012).

2.2.3.1.4 *Matéria orgânica biodegradável*

Outro fator necessário ao processo é a presença de nutrientes, sendo esse parâmetro analisado por Mori et al. (1992). Dentre os ensaios biológicos realizados, uma das amostras foi inserida em solução de água destilada, ou seja, sem os nutrientes necessários, mas com a introdução das bactérias e concentração de H_2S . Observou-se, que nessa amostra, não ocorreu a produção de H_2SO_4 , demonstrando assim que, sem os nutrientes presentes no fluxo de esgoto, a bactéria não consegue se multiplicar, não havendo, portanto, o processo de corrosão microbiológica.

A matéria orgânica é necessária como substrato para o crescimento do biofilme. Park et al. (2014) mostraram, em seu trabalho, que quanto maior a taxa de matéria orgânica maior a redução de sulfatos a sulfeto de hidrogênio (H_2S). As bactérias do esgoto são autotróficas, necessitando como nutrientes, enxofre, gás carbônico, oxigênio, sais minerais e água, para produzir, assim, o ácido sulfúrico.

2.2.3.1.5 *Concentração de ácido sulfídrico (H_2S)*

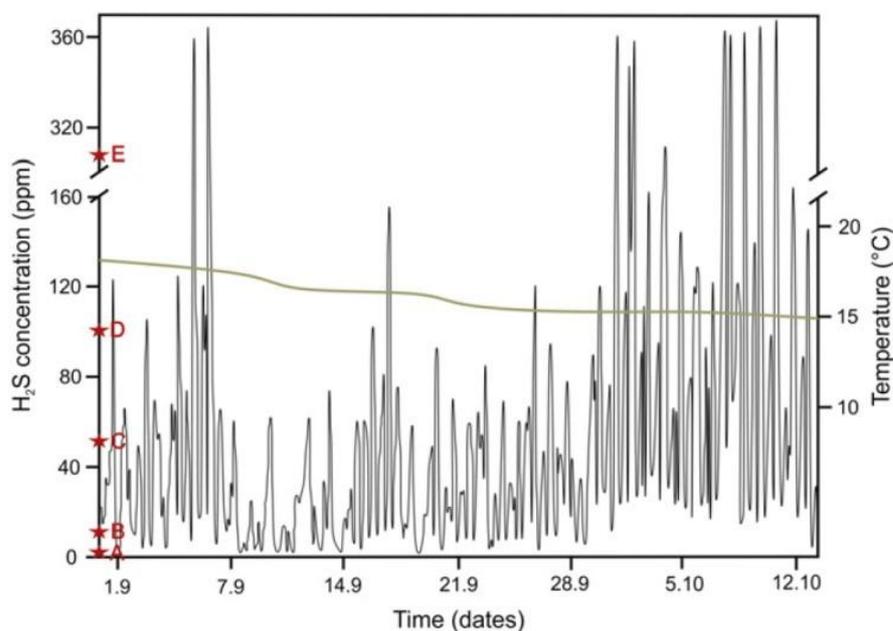
O H_2S tem um papel fundamental na Corrosão do Concreto Microbiologicamente Induzida (CCMI). Mori et al. (1992) analisaram os níveis de H_2S em relação à taxa de corrosão em seus experimentos. No ensaio *in loco*, em uma tubulação de esgoto perto da ETE de Ohmuta, Japão, a concentração de H_2S variava entre 25 e 300 ppm, sendo medida, na superfície logo acima do nível de

esgoto da tubulação de concreto, uma taxa de corrosão entre 4,3 e 4,7 mm/ano. Isto significa uma corrosão nesta estrutura de, em média, 88 mm em 20 anos.

Alguns estudos de laboratório foram realizados em condições estritamente controladas, a fim de simular de forma precisa o ambiente de esgoto, com níveis reais de H_2S (SUN, 2015). Outras pesquisas foram realizadas em conjunto com estudos *in loco* para identificar a relação entre o nível H_2S e taxa de corrosão (JOSEPH et al., 2010; WELLS et al., 2012).

Do trabalho de Gu (1998), tem-se a evolução típica das concentrações de H_2S (Figura 10) em um poço anaeróbio de esgoto. A temperatura interna do poço é exibida em verde. Estrelas vermelhas (A-E) marcam importantes limiares de H_2S para seres humanos, de odor (A), irritação nos olhos e dor de cabeça (B), graves danos aos olhos e sistema respiratório (C), dificuldade respiratória para o ser humano (D) e possível morte (E).

Figura 10 – Evolução típica das concentrações de H_2S (linha cinza).



Fonte: Gu (1998).

Pinto e Takagi (2007) enfatizam que a agressividade em concretos para esgoto é muito maior sobre o nível d'água devido à presença de oxigênio, causando corrosão mais intensa na parte superior das tubulações ou nos tetos das estruturas de armazenamento de esgotos.

Segundo Aisse et al. (2010), a decomposição anaeróbia de matéria orgânica por algumas bactérias origina H_2S , que fica dissolvido no esgoto. Isto ocorre devido à presença de radicais de enxofre nas moléculas dos compostos orgânicos, como proteínas e aminoácidos. Pinto e Takagi (2007) complementam ainda a ação redutora de bactérias anaeróbicas *Desulfovíbrio desulfuricans* sobre compostos orgânicos ou inorgânicos de enxofre presentes nos esgotos, na formação do H_2S .

Tabela 4 – Relação entre concentração de H_2S e taxa de corrosão

Nível de H_2S (ppm)	Temperatura (°C)	Taxa de corrosão (mm.ano ⁻¹)	Local	Pesquisa
5 – 400	10 – 30	4,3 – 4,7	Parede in loco	Mori et al. (1992)
5 – 400	10 – 30	1,4	Coroa in loco	
25 – 300	12 – 30	7,6	CP argamassa in loco	
400	13 - 28	3,8 – 6,1	Laboratório	
100	20	2,1 – 3,8	Laboratório	Ismail et al. (1993)
250	28	0,3 – 0,8	Laboratório	Vincke et al. (2002)
2 – 4	25	10	Laboratório	Aesoy et al. (2002)
15 – 25	25	14	Laboratório	
10 – 50	-	3,6 - 6	In loco	Satoh et al. (2009)
79	26	12	In loco	Wells (2014)
5 - 50	17 - 30	0,7 – 1,2	Laboratório	Jiang et al. (2014a)

Fonte: Sun (2015).

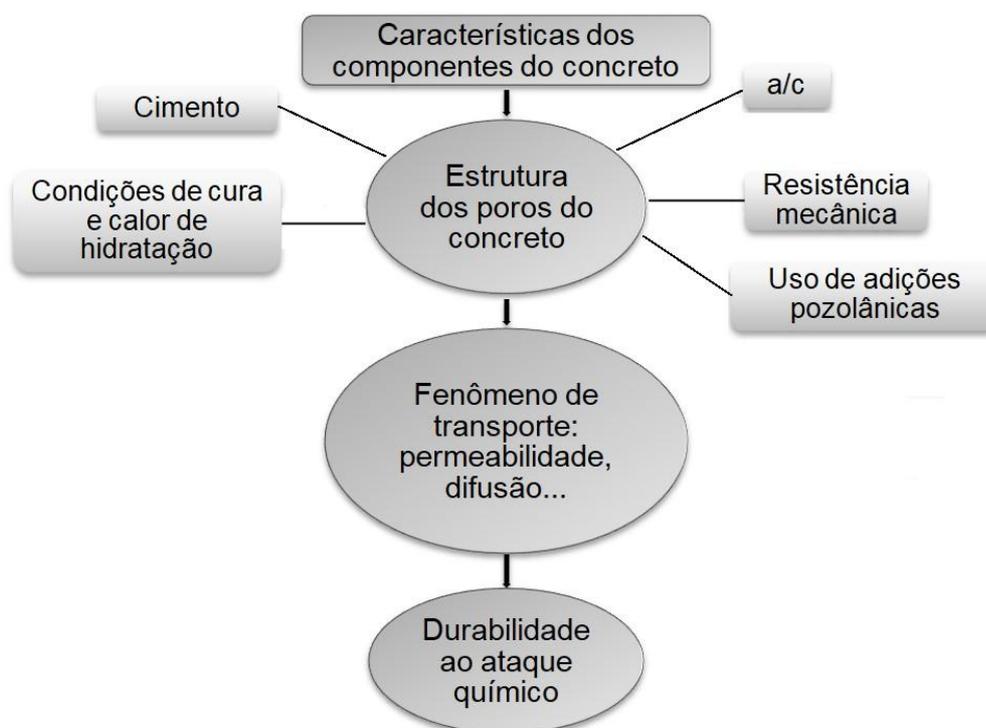
2.2.3.2 Fatores intrínsecos do concreto

A deterioração do ataque ácido no concreto, seja por ácido puro ou por ácido biogênico, se deve ao grau de interação do ácido com os materiais que compõem o material. Tais interações são de natureza complexa e requerem conhecimentos de química do cimento, de microbiologia e de boas práticas de engenharia civil, uma vez que estes conhecimentos podem auxiliar na seleção dos materiais e no projeto de estruturas adequadas para seu devido fim, aumentando assim a sua

durabilidade. Portanto, os fatores que aceleram ou inibem a taxa de ataque precisam ser bem claros, tanto na concepção do projeto e escolha dos materiais, quanto na construção das estruturas de saneamento. Não apenas a escolha de materiais resistentes influencia no processo, mas também o projeto das estruturas e sua correta execução (MOTSIELOA, 2012).

A Figura 11 mostra os fatores que interferem na estrutura dos poros e como estes parâmetros influenciam na durabilidade do concreto frente ao ataque ácido.

Figura 11 – Características que afetam a porosidade e resistência do concreto aos ácidos



Fonte: Adaptado de Motsieloa (2012).

2.2.3.2.1 Resistência mecânica do concreto

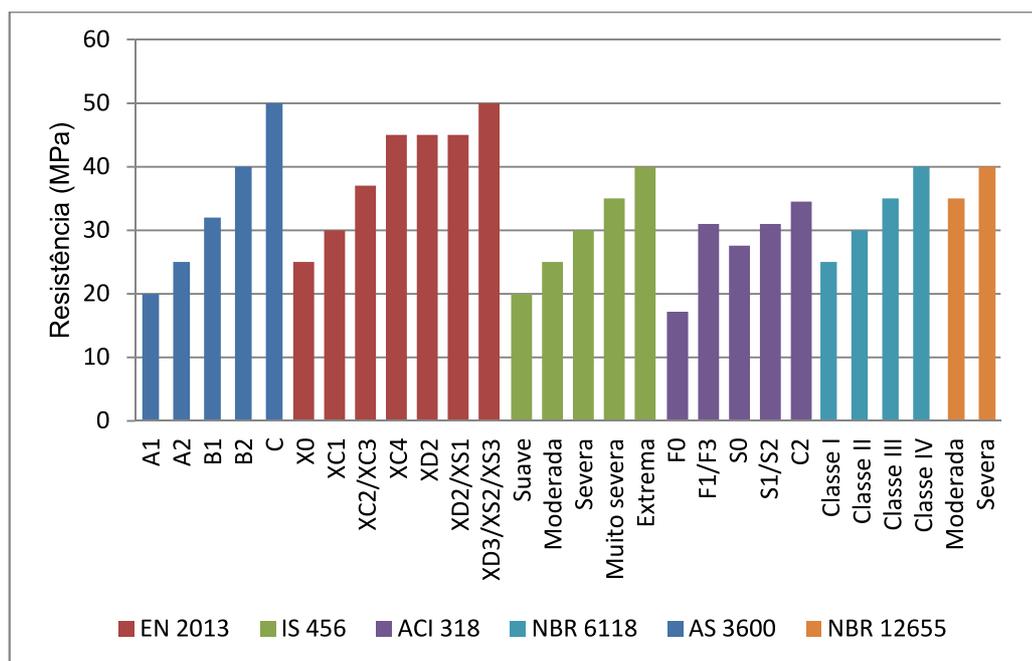
A resistência à compressão do concreto possui um valor significativo, logo essa resistência é de vital importância no dimensionamento de estruturas e na qualidade do concreto. Segundo Vieira (2007), é importante a realização do ensaio de compressão axial do concreto para que se obtenha um valor característico único

para um determinado lote de corpos de provas, sendo esse valor comparado ao valor requerido em projeto.

Misturas cimentícias com alta resistência são caracterizadas pela baixa relação água/cimento, provocando o aumento da quantidade de aglomerante e a presença marcante de grãos de cimento anidros que originam a formação de C-S-H e CH procedentes da hidratação tardia (HUANG; YE; DAMIDOT, 2013).

A importância da resistência mecânica nos concretos sempre foi levada em consideração, visto que elas fazem parte das normas que visam a qualidade e durabilidade das estruturas. Na Figura 12 são apresentadas as exigências de algumas das normas mais difundidas sobre classes de agressividade para concretos.

Figura 12 – Valores mínimos de resistência à compressão em normas internacionais



Fonte: Adaptado pela autora de EN (2013), ACI (2014), AS (2018), IS 456 (2000), ABNT (2014) e ABNT (2015).

Brandão (1998) concluiu que, no concreto, a parte mais sensível ao ataque químico é a pasta de cimento, cuja porosidade vai influir fundamentalmente na sua intensidade. Numa pasta densa, o ataque é essencialmente limitado à superfície, prosseguindo lentamente com o tempo para o interior. Uma pasta porosa, ao contrário, favorece a penetração das soluções agressivas, que, agindo no interior do concreto, tornam o ataque mais intenso.

Barbosa (2006) comenta que a determinação da evolução da deterioração mais utilizada nas pesquisas sobre ataque por sulfatos é o da medida da variação dimensional, e frequentemente a variação na resistência mecânica.

A mensuração da resistência mecânica através do ensaio de compressão axial atua como caracterização dos concretos, dada a sua participação efetiva no cálculo estrutural e verificação usual no controle tecnológico do concreto, somadas à facilidade de obtenção de seu valor. O ensaio de resistência mecânica caracteriza o suporte de cargas das amostras alusivas a um específico traço de concreto. A norma utilizada para este ensaio é a NBR 5739 (ANBT, 2018).

Mehta e Monteiro (2014) destacam que, através desse ensaio de realização simples podem-se deduzir outras características do concreto, como módulo de elasticidade, resistência às intempéries, entre outros, o que difunde e incentiva sua realização.

Pouco se sabe sobre o comportamento à flexão do concreto lixiviado. Além disso, o comportamento mecânico a longo prazo de amostras de concreto com diferentes relações água/cimento após a lixiviação por períodos específicos raramente foi quantificado na literatura publicada (CHOI et al., 2017).

Irassar (1990) propôs um critério para avaliação da resistência ao ataque químico, denominado de “tempo de fissuração”, que se baseia em ensaios de resistência à tração na flexão em corpos de prova. É possível observar que a resistência aumenta com o tempo de ataque, atingindo um ponto máximo, a partir do qual a resistência começa a decrescer. Este comportamento tende a uma parábola, onde o ponto máximo é o “tempo de fissuração”, que representa o ponto a partir do qual os efeitos do ataque passam a danificar os corpos de prova.

Este espaço de tempo é dividido em dois períodos: no primeiro, a taxa de expansão é bastante baixa e linear, sendo chamado de período de indução, quando os produtos expansivos formados pelo ataque preenchem os vazios da pasta de cimento hidratada, não conferindo tensões internas ao material. O aumento súbito da expansão verificado no segundo estágio de ataque ocorre devido ao aumento nas quantidades de gipsita e etringita formados, cujo volume não cabe mais nos poros existentes na estrutura da argamassa. O aumento progressivo da camada atacada provoca um aumento da força expansiva e uma redução da seção resistente (núcleo não atacado), aumentando a expansão (SANTHANAN; COHEN; OLEK, 2003).

2.2.3.2.2 Porosidade e permeabilidade

Neville e Brooks (2013) relacionam o termo permeabilidade com a facilidade com que os líquidos e gases podem permear através do concreto. Mehta e Monteiro (2014) estabelecem a água de amassamento como fator crucial da permeabilidade da pasta de concreto, pois ela determina o espaço total e também o espaço não preenchido depois de toda água ter sido consumida pelas reações de hidratação ou pela evaporação. Com o desenvolvimento da hidratação, a porosidade e a permeabilidade diminuem. Não há, porém, uma proporcionalidade entre tais fatos. Além disso, quanto maior for a relação agregado/ligante, maior será a permeabilidade. Tal fato ocorre pelas microfissuras presentes na zona de transição na interface entre o agregado e a pasta de cimento, que mais tarde estabelecem interconexões que facilitam a permeabilidade do material (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

Para Brandão (1998), a durabilidade do concreto é essencialmente condicionada pela permeabilidade e pela capacidade de absorção do concreto, ambas diretamente influenciadas pela porosidade. A permeabilidade é a propriedade do concreto de permitir a passagem de água através do material e depende da estrutura dos poros como um todo, isto é, do tamanho, da distribuição e da continuidade dos poros. Todos os fatores que afetam a porosidade do concreto interferem também na sua permeabilidade e capacidade de absorção e, portanto, na sua resistência ao ataque químico.

A interconexão da porosidade e a distribuição de tamanho dos poros são parâmetros microestruturais que desempenham um papel importante nos processos de difusão produzidos como resultado do ataque de lixiviação em soluções agressivas (GOÑI et al., 2013).

Ye (2005), no seu estudo sobre percolação de água por capilaridade, concluiu que a distribuição dos tamanhos dos poros e o diâmetro médio dos poros são os fatores cruciais que determinam a permeabilidade à água.

De forma genérica, os poros da pasta de cimento podem ser classificados, com base em seus tamanhos, em macroporos, mesoporos ou microporos, sendo os dois primeiros particularmente importantes na questão da durabilidade do concreto (SOUZA; RIPPER, 1998).

A Tabela 5 apresenta a classificação dos poros, citada no trabalho da Union of Pure and Applied (IUPAC, 2014).

Tabela 5 – Classificação dos poros da pasta de cimento

Denominação	Tipo	Diâmetro
Microporos	Poros de gel	< 2 nm
Mesoporos	Poros capilares	2 nm a 50 nm
Macroporos	Poros capilares	> 50 nm

Fonte: Adaptado de Union of Pure and Applied (IUPAC, 2014).

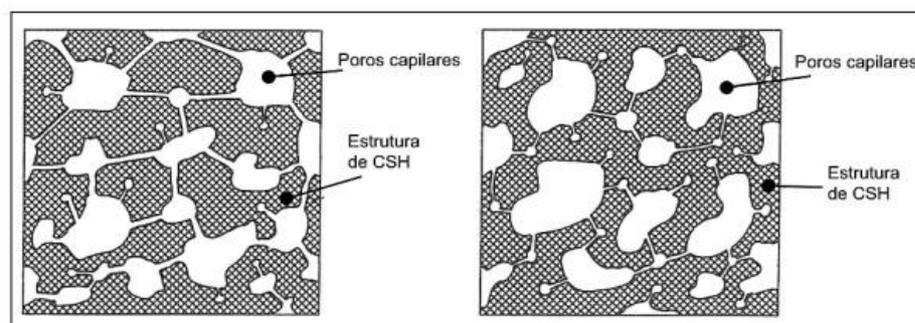
De acordo com RILEM TC 230-DUC (HANS BEUSHAUSEN et al., 2015), a penetração de substâncias agressivas nas fissuras e na estrutura porosa do material é o principal parâmetro para prever a durabilidade da estrutura.

A permeabilidade do concreto pode ser controlada com a diminuição do volume de vazios capilares da pasta, através de baixa relação água/cimento, consumo adequado de cimento, emprego de adições minerais, cura e adensamento adequados (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

A porosidade capilar, que cai de forma análoga à relação água/cimento (a/c), leva a uma obstrução nos processos de transporte e reduz a área superficial específica que é relevante para a cinética da reação (KÖENIG & DEHN, 2015). A permeabilidade do concreto é a propriedade que governa a taxa de fluxo de um fluido através de um sólido poroso (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

A conectividade dos poros capilares influencia diretamente o movimento dos íons na pasta de cimento; portanto, o grau de conectividade dos poros capilares é uma característica microestrutural importante (PATEL et al., 2019). A permeabilidade depende não exclusivamente do tamanho dos poros, mas sim das interconexões que existem e o tamanhos destas, conforme se ilustra na Figura 13 (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Figura 13 – Materiais com porosidades similares, porém, com alta permeabilidade (esq.) e baixa permeabilidade (dir.), em razão das características das interconexões existentes.

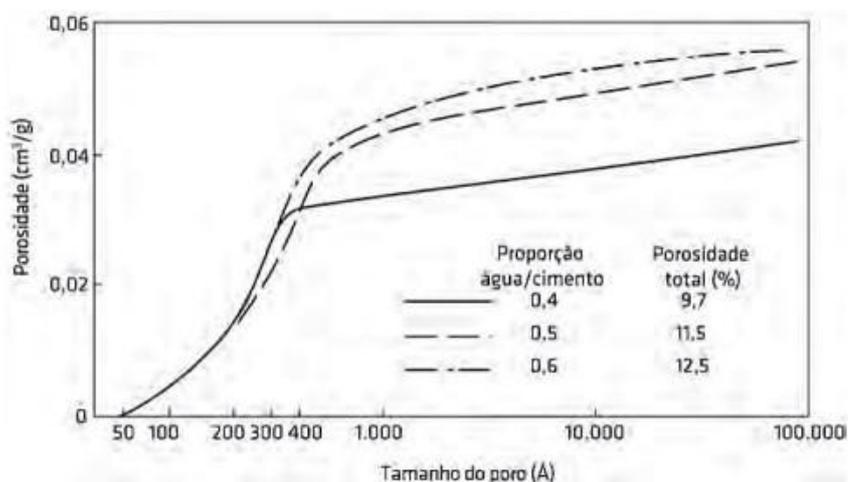


Fonte: Adaptado de Neville e Brooks (2013).

2.2.3.2.3 Relação água/aglomerante

Neville (2016) pontua que em qualquer estágio de hidratação, a relação água/aglomerante (a/agl) determina a porosidade da pasta de cimento endurecida. Portanto, o volume de vazios do concreto é diretamente relacionado com a relação a/c e o grau de adensamento do concreto, como mostrado na Figura 14.

Figura 14 – Efeito da relação água/cimento na porosidade do concreto



Fonte: GJORV (2015).

Com vistas à durabilidade do concreto, devem ser tomadas providências para garantir baixo índice de permeabilidade. Juntamente com uma execução cuidadosa do concreto, a adoção de baixa relação água-cimento e de um teor mínimo de

cimento na dosagem são as medidas mais eficazes para este fim, pois garantem alta densidade para o concreto (BRANDÃO, 1998).

Na NBR 6118 (ABNT, 2014) são definidos valores de relação água/cimento limites a serem utilizadas para cada classe de concreto, de acordo com a classe de agressividade do meio. Estes parâmetros estão exibidos abaixo, na Tabela 6.

Tabela 6 – Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto

Concreto	Classe de Agressividade			
	I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	≤0,65	≤0,60	≤0,55	≤0,45
Classe de concreto	≥C20	≥C25	≥C35	≥C40

Fonte: adaptado NBR 6118 (ABNT, 2014).

2.3 FATORES QUE INTERFEREM NO PROCESSO DE DETERIORAÇÃO POR ÁCIDOS

A perda de desempenho do concreto está ligada a processos de deterioração de natureza complexa, podendo ser atribuída a fatores intrínsecos ou extrínsecos ao material. Considerando que os fatores intrínsecos ao material podem ter grande influência na minimização das manifestações patológicas, o domínio sobre a microestrutura e as propriedades individuais dos componentes do concreto é fundamental para que se compreendam suas propriedades como resistência, durabilidade, módulo de deformação, porosidade, dentre outras (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

2.3.1 Uso de CAD

Para se executar estruturas mais duráveis em ambientes agressivos, é necessário produzir-se CAD dosado para fim específico, sob medida, em que são pesquisadas em laboratório as relações únicas entre as propriedades necessárias para a estrutura e sua eficácia em obras (ISAIA, 2005).

Muitos confundem o Concreto de Alto Desempenho (CAD) com o Concreto de Alta Resistência (CAR), mas nem sempre um CAD é um CAR (TUTIKIAN, ISAIA,

HELENE, 2011). Por exemplo, um concreto com resistência a compressão de 80MPa com excessivo consumo de cimento e elevada retração, ou com baixo slump (de difícil trabalhabilidade prática para obras, podendo acarretar em problemas como “bicheiras”), apesar de ser um CAR, não pode ser classificado como CAD (TUTIKIAN, ISAIA, HELENE, 2011).

Normalmente, entretanto, a diferença básica entre o concreto comum e o concreto de alto desempenho está na relação água/cimento. Quanto menor a relação a/c maior a resistência e durabilidade da estrutura (IBRACON, 2011).

Concretos com alta resistência são caracterizados pela baixa relação água/cimento, o que, geralmente, leva a menor porosidade e permeabilidade.

Além disso, o uso de baixas relações a/c ocasiona o aumento da quantidade de aglomerante e a presença de grãos de cimento anidros que origina a formação de C-S-H e CH procedente da hidratação tardia (HUANG; YE; DAMIDOT, 2013).

Pensando no uso de impermeabilizantes por cicatrização, Granger et al. (2007) demonstraram que o emprego de misturas com relações água/aglomerantes muito baixas resultaram em maiores quantidades de grãos anidros e maior capacidade de cicatrização, devido à disponibilidade deste material ao longo do tempo, quando havia penetração de umidade e, então, geração de C-S-H.

Propriedades relacionadas com a durabilidade e resistência mecânica do CAD com adições minerais são provenientes não só das reações de hidratação, mas também, pelas reações pozolânicas e pelos efeitos físicos de superfície, havendo então uma parceria entre si, potencializando o resultado do parâmetro que está sendo medido, o comparando em relação a um concreto sem adições minerais. Os efeitos provenientes das reações pozolânicas aumentam dependendo do teor da adição mineral (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Mehta e Aïtcin (1990) recomendam que se deva evitar o uso exclusivo do cimento Portland, pois uma incorporação de adições minerais resulta em vários benefícios ao CAD como, por exemplo, a maior trabalhabilidade do concreto fresco, melhor resistência à fissuração térmica e maior durabilidade.

2.3.2 Composição química e normatização do cimento Portland

A NBR 6118 (ABNT, 2014) não especifica os materiais para serem aplicados a estruturas sujeitas a ataque por ácido biogênico, em particular. As especificações

apenas remetem a algumas propriedades dos materiais utilizando o quesito de classificação por agressividade ambiental, delimitando a resistência à compressão mínima, relação água/cimento máxima e o cobrimento mínimo das armaduras.

2.3.2.1 Mudança na composição química dos cimentos

A maior modificação das especificações do cimento, na nova norma NBR 16697, diz respeito ao aumento do teor de adição de fíler calcário nos vários tipos de cimento. Essa alteração visa a um alinhamento com padrões normativos internacionais, que incentivam a adoção de alternativas ou tecnologias mais avançadas para diminuir emissões específicas de CO₂ por tonelada de cimento (ABCP, 2019).

Ao total são definidos 10 tipos distintos, separados em categorias, em função das misturas, adições, comportamento estrutural e desempenho. Alguns requisitos permaneceram os mesmos: físicos, reológicos e mecânicos, representados pelos valores de resistência à compressão nas diferentes idades de controle, tempos de pega, finura e expansibilidade. A Tabela 7 apresenta a composição percentual dos elementos constituintes de cada tipo, juntamente à equivalência à ASTM C150.

Tabela 7 – Limites de composição do cimento Portland (em massa)

Designação Normalizada	Sigla ABNT	Sigla ASTM	Clínquer + sulfatos de Cálcio	Escória de Alto Forno	Material Pozolânico	Material Carbonáceo
Cimento Portland Comum	CP I	CEM IIA	95 – 100	0 – 5		
	CP I-S	CEM II	90 – 94	0	0	6 – 10
Composto com Escória de Alto Forno	CP II E	CEM IS	51 – 94	6 – 34	0	0 – 15
Composto com material Pozolânico	CP II Z	CEM IP	71 – 94	0	6 – 14	0 – 15
Composto com material Carbonáceo	CP I IF	-	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	CEM IP	45 – 85	0	15 – 60	0 – 10
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial		CP V	CEM III	90–100	0	0	0 – 10
Cimento Portland Branco	Estrutural	CPB	-	75 – 100	-	-	0 – 25
	Não estrutural		-	50 – 74	-	0	26 – 50

Fonte: ABNT NBR 16.697 (2018) e ASTM C150 (2019).

A quantidade de clínquer em cada um dos cimentos é muito significativa: enquanto, segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018), o cimento CP II-F possui entre 75 e 89% da massa total do material em clínquer e sulfatos de cálcio, o cimento CP IV pode conter entre 45 e 85%.

Belie et al. (2018) afirmam que o teor de clínquer presente no cimento é um fator de relevância, pois determina o suprimento de íons Ca^{2+} e, conseqüentemente, a capacidade de formação de CaCO_3 .

Segundo Beddoe (2005), apesar do teor de ligante nas misturas aumentar a capacidade de neutralização e contribuir para sua resistência, teores muito altos podem resultar em camadas porosas e facilitar a difusão de ácidos, devido ao elevado teor de CaO (cerca de 60 – 65%), produzindo cal livre em sua hidratação, o que pode reagir com os ácidos, sendo lixiviados.

O cimento Portland que tem um elevado teor de CaO (cerca de 60 - 65%) produz cal livre em sua hidratação, a qual reage facilmente com ácido sulfúrico (SCRIVENER, 1999).

De diferentes artigos publicados por Bertron et al. (2004, 2005), aparentemente, os cimentos contendo uma grande quantidade de SiO_2 , uma baixa quantidade de CaO e grandes quantidades de Fe_2O_3 e Al_2O_3 são mais resistentes ao ataque ácido.

Segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018), para ser considerado cimento CP II-F, o cimento deve possuir adição de fíler calcário em teor entre 11 e 25%. Contudo, outras classes, tais como CP-IV, podem apresentar quantidades de até 10 % desta adição. Limites estes em que se observa adição segura deste material, sem comprometimento significativo nas características mecânicas e na durabilidade destes materiais.

De acordo com De Belie et al (1997), três fatores parecem desempenhar um papel importante na resistência aos ácidos do concreto: (i) a permeabilidade, determinando a extensão em que os ácidos podem penetrar no concreto, (ii) a alcalinidade e (iii) a composição química da pasta de cimento.

Estudos anteriores demonstraram a influência positiva de adições minerais, como sílica ativa (SA), devido ao menor conteúdo de CH, redução da relação Ca-Si em hidratos de silicato de cálcio (C-S-H) e a estrutura de poros refinada que eles produzem no concreto (BERTRON et al. 2004, 2005).

Segundo Aïtcin (2014), os concretos produzidos com cimentos modernos, de maior finura e com maior teor de C_3S e C_3A , obtêm grau de hidratação aos 28 dias maior do que era obtido com cimentos antigos. Por outro lado, o acréscimo de hidratação posterior é menor, o que pode implicar em uma porosidade capilar final maior do que aquelas obtidas antigamente tornando o concreto menos durável. O aumento do teor de C_3S e C_3A também significa um maior desenvolvimento do calor de hidratação e maior produção de hidróxido de cálcio e etringita, onde isto pode resultar em baixa durabilidade dos concretos com alto consumo de cimento. Os códigos em geral procuram garantir a obtenção de um concreto durável através de uma tripla recomendação, com a especificação de valores mínimos aceitáveis de f_{ck} e consumo de cimento, e valores máximos permitidos de relação água/cimento.

A NBR 16697 (2018) diz que materiais carbonáticos (fíler) se tratam de “materiais finamente divididos, constituídos em sua maior parte de carbonato de cálcio”. O CP II-F contém fíler calcário, não sendo em geral uma boa opção para meios agressivos (GALHARDO, 2014).

De acordo com Regattieri, Silva e Helene (1996), quando comparado aos outros tipos de cimento, o CP IV apresenta melhor desempenho na redução de absorção capilar do concreto.

Neste trabalho, a variação nos tipos de cimento utilizados pode representar um fator fundamental na análise da influência do fíler calcário presente no cimento e compará-la a outro tipo de adição, no caso, pozolânica.

2.3.3 Adições pozolânicas

Pozolanas são comumente utilizadas como materiais suplementares sistemas cimentícios, a fim de melhorar algumas propriedades do concreto, como sua

resistência mecânica e densidade. Devido à sua composição e estrutura, a sílica afigura-se como um material potencialmente pozolânico.

2.3.3.1 Sílica ativa

A sílica ativa (SA) é um subproduto da produção de silício elementar ou ligas contendo silício em fornos elétricos a arco. A uma temperatura de, aproximadamente, 2.000°C, a redução do quartzo de alta pureza em silício produz vapor de dióxido de silício, que se oxida e condensa em baixas temperaturas para produzir sílica ativa. As partículas de sílica ativa têm formato esférico e são muito finas, com um tamanho médio de 0,1–0,3 µm (De Belie et al., 2017; Jiao et al., 2017; Thomas, 2013).

Malhotra (1993), Mehta & Monteiro (1994) e Aïtcin (2000) classificam a sílica ativa como material altamente pozolânico, devido ao fato de ser constituída basicamente de sílica amorfa.

A sílica ativa compreende principalmente sílica amorfa. Para Black (2016), o conteúdo preciso de sílica depende da origem da sílica ativa, mas sempre excede 85%. Existem pequenas quantidades de sílica cristalina, frequentemente como cristobalita. Outros vestígios de contaminantes incluem, em teores aproximadamente decrescentes, carbono (resultante da adição de coque e aparas de madeira durante o processo de produção), alumínio, ferro, cálcio, magnésio, potássio e sódio.

2.3.3.1.1 Composição e propriedades físicas

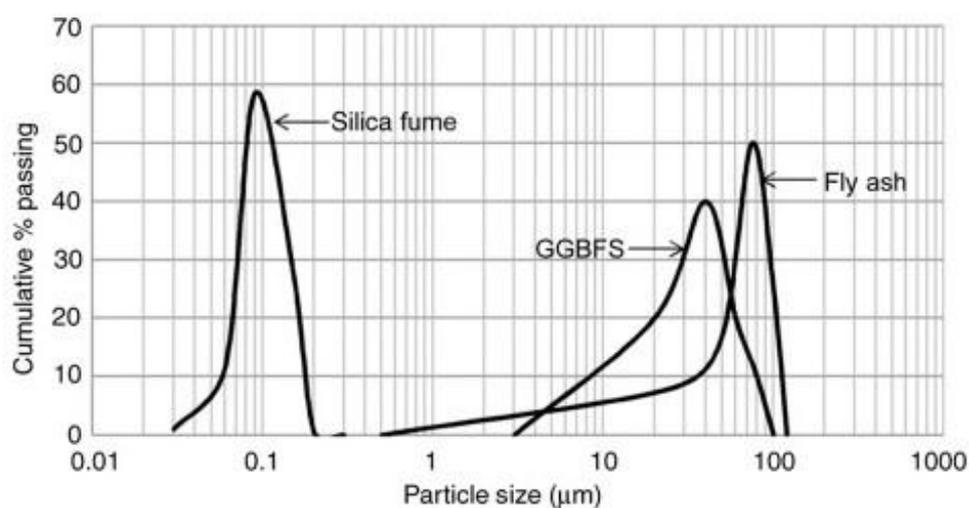
A sílica ativa compreende minúsculas microesferas, com diâmetro médio das partículas de sílica amorfa de cerca de 0,1µm. As partículas de sílica ativa são geralmente de cor cinza, mais escuras ou mais claras, de acordo com seu teor de carbono e ferro (Aïtcin, 2016).

A área superficial das partículas de sílica ativa pode variar entre 13.000 e 30.000 m²/kg, medida por equipamento de absorção de nitrogênio (VALIPOUR et al. 2014). Esta superfície é, cerca de, 13 a 20 vezes maiores que a superfície específica de outros materiais pozolânicos, aumentando a demanda por água em pasta com baixa relação água/cimento, tornando necessário o uso de aditivo plastificante ou

superplastificante. Por ser um material muito fino, apresenta massa unitária muito baixa: 200 a 300 kg/m³ (Babu e Prakash, 1995; Neville, 1997; Aïtcin, 2000).

A massa específica da sílica ativa é 2,20-2,30 (KHAN e SIDDIQUE, 2011; TAFRAOUI et al. 2016; THOMAS, 2012). A Figura 15 mostra uma distribuição típica de tamanho de partícula para sílica ativa (INCE et al., 2015), onde a natureza muito mais fina do material é claramente evidente.

Figura 15 – Distribuição do tamanho de partículas da sílica ativa, em comparação com escória de alto-forno granulada e moída (GGBFS) e cinza volante (fly ash).



Fonte: Ince et al., (2015).

A Tabela 8 mostra as propriedades físicas típicas de SA investigadas por vários pesquisadores.

Tabela 8 – Propriedades físicas típicas de amostras de sílica ativa

Propriedade	Guneyisi et al. (2012)	Mardani-Aghabaglou et al. (2014)	Haruehansapong et al. (2014)	Lilkov et al. (2014)
Tamanho de partícula (µm)	0,1	0,1	0,1	0,1
Massa Específica	2,20	2,10	-	-
Área de superfície específica (cm ² / g)	21.080	18.000	20.000	18.600

Fonte: Siddique (2016).

2.3.3.1.2 Propriedades químicas

A Sílica Ativa é composta, principalmente, de sílica pura na forma não cristalina. SA tem um teor muito alto de dióxido de silício amorfo e consiste em partículas esféricas muito finas. Também são encontradas pequenas quantidades de óxidos de ferro, magnésio e alcalinos. A Tabela 9 mostra as propriedades químicas da SA, conforme relatado por vários pesquisadores.

Tabela 9 – Composição química de amostras de sílica ativa para alguns autores

Composição (%)	Guneyisi et al (2012)	Mardani-Aghabaglou et al (2014)	Haruehansapong et al (2014)	Lilkov et al (2014)
SiO ₂	90,36	87,29	88,3	89,50
Al ₂ O ₃	0,71	0,47	1,17	1,13
Fe ₂ O ₃	1,31	0,63	4,76	2,31
CaO	0,45	0,81	0,48	0,98
MgO	-	4,47	2,14	1,55
K ₂ O	1,52	1,28	-	0,60
Na ₂ O	0,45	1,25	-	0,42
SO ₃	0,41	0,22	1,05	0,40
LOI	3,11	2,70	2,1	2,40

Fonte: Adaptado de Siddique (2016).

2.3.3.2 Efeito da SA nas propriedades do concreto

Conforme Kulakowski (2002), a utilização da sílica ativa no concreto modifica suas propriedades tanto no estado fresco (trabalhabilidade, coesão, estabilidade, segregação, exsudação, entre outras) como no estado endurecido (resistência à compressão, resistência à tração, fluência, permeabilidade, durabilidade, entre outras). O seu efeito microfíler e pozolânico resulta em mudanças consideráveis na microestrutura e nas propriedades macroscópicas do concreto.

O uso de materiais cimentícios reforçados com sílica pode encontrar aplicações em uma variedade de sistemas que vão desde cimento de poço de petróleo (CHOO LAEI *et al.*, 2012) a pavimentação (ZHANG e LI, 2011) e aplicações de compactação de alto desempenho (NAZARI, BAGHERI e RIAHI, 2011).

Ao contrário dos outros substitutos do cimento, o uso de sílica ativa leva a uma hidratação mais rápida e, normalmente, a resistências mais altas (LAMBERT e ATKINS, 2010).

As propriedades do concreto fresco são significativamente alteradas, quando comparadas às dos concretos convencionais, pela introdução de adições minerais na mistura (LOPES, 1999).

Jalal et al. (2015) investigaram os efeitos da substituição parcial de cimento por nano sílica, sílica ativa e cinzas volantes em diferentes propriedades do concreto autoadensável de alto desempenho. Eles mostraram que as propriedades mecânicas do concreto foram melhoradas em misturas contendo as adições, especialmente composição de nanossílica e sílica ativa.

Ergun (2011) explica que a sílica (SiO_2) pode reagir com o CH e produzir hidratos de silicato de cálcio (C-S-H), responsáveis pelo desenvolvimento da resistência.

Kadri e Durval (2009) verificaram a influência da adição de sílica ativa na hidratação do cimento e demonstraram que a substituição do clínquer por sílica ativa promove uma aceleração na taxa de hidratação nas primeiras idades. A explicação para este acontecimento foi que o grão fino da sílica ativa criou novos pontos de nucleação, fazendo com que os hidratos se desenvolvessem. Os autores ainda argumentaram que, devido à substituição do cimento por sílica ativa, houve uma diminuição do calor total liberado pela mistura e ocorreu um aumento na resistência, devido à reação pozolânica.

Oertel et al. (2014) analisaram a influência do tipo de sílica na hidratação em concretos de ultra-alto desempenho e concluíram que a sílica ativa acelerou a hidratação da alita (C_3S), aumentando a superfície para que ocorresse a nucleação das fases do C-S-H e fazendo com que o processo de hidratação do cimento se desenvolvesse de forma mais rápida nas primeiras idades. Eles observaram que o menor consumo de cimento no concreto faz com que a mistura atinja menores picos de temperatura. As adições minerais também podem ser benéficas aos ataques químicos devido à melhor fixação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$, produto mais vulnerável na pasta de cimento.

O efeito da adição da sílica ativa também foi verificado por Dal Molin et al. (1997). A maior perda de massa para o ensaio de resistência ao ataque químico

com ácido láctico foi para a maior relação a/c e para o traço sem adição de sílica ativa.

Jain e Pawade (2015) concluíram que a resistência à compressão do concreto com sílica ativa foi significativamente melhorada em até 56 dias, melhorando o desempenho do concreto em resistir aos danos relacionados à corrosão, com 15% de substituição de cimento Portland por sílica ativa.

Os mesmos autores, Jain e Pawade (2015), verificaram que a adição de sílica aumentou a proteção do aço embutido no concreto contra a corrosão, devido ao refinamento dos poros, proporcionando boa durabilidade quanto a ataques químicos.

Para Vieira et al. (2008), tanto a diminuição da relação água/aglomerante quanto a adição de sílica ativa melhoram consideravelmente a resistência do concreto ante a ação de agentes agressivos. Quando a sílica ativa é adicionada ao concreto, ela aumenta sua resistência à compressão, resistência à tração e resistência à abrasão. Essas melhorias decorrem do empacotamento fechado obtido no sistema de pasta de cimento que reduz a porosidade geral e melhora a zona de transição interfacial. Além disso, o material está envolvido na reação pozolânica (LIN *et al.*, 2013) com os cristais de hidróxido de cálcio produzindo material cimentante adicional (C-S-H) e eliminando áreas de concentração de tensões e com tendência à iniciação de falha (cristais de $\text{Ca}(\text{OH})_2$). A redução da porosidade produz ao mesmo tempo um material mais durável e resistente a processos de degradação química como difusão de íons cloreto, reação de sílica alcalina e lixiviação de cálcio, que preserva o material da degradação mecânica e protege as armaduras de aço da corrosão (ZHANG e LI, 2011).

Em um estudo prático desenvolvido por Cappellesso et al. (2016) para avaliar o desempenho de aditivos cristalizantes e adição de sílica ativa, o concreto com adição de sílica ativa apresentou o melhor desempenho quando comparado ao de referência (sem adições ou aditivos), com um aumento de 28% na resistência à compressão e 16% de redução na absorção capilar de água por imersão total.

Em estudo realizado por Silva e Libório (2004), a introdução de sílica de ferro silício apresentou queda de 48% na absorção por capilaridade em relação ao traço controle, enquanto a sílica da casca de arroz diminuiu em 12% a absorção capilar. Ainda segundo os autores, quanto menor o diâmetro dos poros capilares, maior a pressão e, assim, maior a profundidade de penetração da água no concreto.

Portanto, quanto maior o diâmetro dos poros capilares, menor a profundidade do concreto atingida pela água absorvida.

Segundo Romano et al. (2006), a sílica ativa tem sido empregada com o objetivo de aumentar a compacidade e/ou a resistência mecânica de produtos cimentícios devido à sua atividade pozolânica e à sua atuação como fíler, promovida por sua granulometria muito fina.

2.3.3.2.1 Durabilidade

Sabendo-se o grau de agressividade do ambiente onde a estrutura se encontra, Battagin (2010) cita algumas maneiras de prevenir possíveis manifestações patológicas: uso de concretos menos permeáveis, com baixa relação a/c, uso de cimentos de alto-forno, pozolânicos ou resistentes aos sulfatos, que apresentam um comportamento mais favorável com relação à durabilidade.

Kulakowski (2002) comenta que durabilidade dos materiais a base de cimento, como é o caso do concreto, é significativamente influenciada pelas adições de sílica ativa, devido à alteração provocada na microestrutura da matriz cimentante proveniente da reação pozolânica e do efeito microfíler, além de outros. Isto se reflete na diminuição do transporte de massa no interior do concreto, principalmente de água e soluções aquosas, contribuindo para o aumento da durabilidade destes materiais.

De acordo com Neville (2016), as propriedades melhoradas pelo uso da adição de sílica ativa não se devem apenas ao efeito pozolânico (químico) que a sílica ativa apresenta, mas também ao efeito fíler (físico) pelas partículas finas, ambos contribuem para a formação de um concreto com melhor microestrutura. O efeito físico-químico também é relatado por Mehta e Monteiro (2014), no qual os autores descrevem como influências físicas a diminuição da exsudação, a redução do tamanho e volume de vazios, melhora na coesão devido às partículas finas, aumento no fator de empacotamento e, conseqüente aumento de resistência.

Para Siddique (2011), a presença de sílica ativa no concreto reduz a influência da zona interfacial fraca, fortalecendo a ligação agregado-pasta de cimento, resultando em uma microestrutura menos porosa e mais homogênea na região interfacial.

Pesquisas realizadas com concretos com a mesma relação a/c e mesma resistência, porém com adições minerais, concluíram que a absorção capilar de água em um concreto com 8% de sílica ativa é cerca de metade do que em um concreto sem adição (LOPES et al., 2007).

Wu et al. (2016) alcançaram 118 MPa em 28 dias usando 25% de sílica ativa, uma razão a/agl de 0,18 e uma razão a/c de 0,21. Eles estudaram diferentes teores de sílica ativa na mistura, demonstrando seu importante efeito na resistência à compressão.

Adições de pozolanas ativas são comumente usadas no concreto para melhorar algumas de suas propriedades, como resistência à compressão, densidade e durabilidade. A reação pozolânica, que ocorre entre a sílica amorfa (SiO_2) e o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) na presença de água, forma um tipo de hidrato de silicato de cálcio (C-S-H) com baixa relação Ca / Si (TAYLOR, 1993; CHEN et al, 2004). Essa reação e a formação de C-S-H aumentam ainda mais a resistência à compressão do concreto. Além disso, o CSH adicional e os grãos de pozolana não hidratados, sílica amorfa não reagida, podem aumentar a densidade preenchendo espaços vazios na pasta de cimento e na zona de transição entre pasta e agregados de concreto, desde que o tamanho das partículas seja pequeno o suficiente (MEHTA e MONTEIRO, 2013). Essa densificação do material cimentício também pode diminuir a entrada de água e agentes agressivos e aumentar a durabilidade do concreto (QING et al, 2007; HEIKAL et al, 2013).

A capacidade da sílica ativa de reagir com o hidróxido de cálcio da pasta de cimento e de formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional provoca uma alteração na estrutura de poros e na quantidade de microfissuras da matriz e da zona de transição, elevando a resistência final do concreto (KULAKOWSKI, 2002).

Quanto à ação física, a sua adição pode ocasionar um aumento da massa específica da mistura, pelo efeito de preenchimento dos vazios (efeito microfíler) e, também, pela densificação da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado devido à interferência na movimentação das partículas de água livre em relação aos sólidos da mistura (ACI, 1987; CALDARORE & GRUBER, 1995; LEA, 1971).

Jain e Pawade (2015) concluíram que durabilidade da argamassa com sílica ativa foi testada em ambientes químicos de compostos de sulfato, nitrato de amônio,

cloreto de cálcio e vários tipos de ácidos e teve resultados muito melhores que o material de referência, sem sílica.

Caso o concreto tenha sido proporcionado para ter uma baixa porosidade total, o incremento de porosidade da zona de transição pode ser insuficiente para considerá-la como um caminho permeável a ponto de afetar a durabilidade do concreto. Conforme Aïtcin (2000) essa zona pode até desaparecer em um concreto de alto desempenho. Segundo Silva (2000), com a adição de sílica ativa ocorre, praticamente, ausência de exsudação interna na zona de interface, o que leva a uma diminuição de concentração de tensões no sistema matriz x agregado e produz maior quantidade de C-S-H.

2.3.3.2.2 *Dosagem*

Em levantamento realizado por Fornasier (1995) foi observada uma grande variabilidade nas conclusões dos pesquisadores sobre a porcentagem ideal da sílica ativa a adotar, pois esta quantidade depende da compatibilidade e proporção dos materiais utilizados, do desempenho desejado e das condições do ambiente de exposição do concreto. Os valores encontrados nesta pesquisa para os teores usuais de sílica ativa foram de 5 a 30%, sendo o teor de adição em torno de 10% o mais utilizado pelos pesquisadores.

Patil et al. (2017) citam que ainda não é definitivo entre a maioria dos autores o valor a ser utilizado de sílica ativa nos produtos de cimento, estando entre 8% e 20%.

Aïtcin (2000) diz que, teoricamente, para fixar todo o potencial de cal liberado pela hidratação de C_3S e do C_2S , a dosagem da sílica ativa estaria entre 25 e 30%.

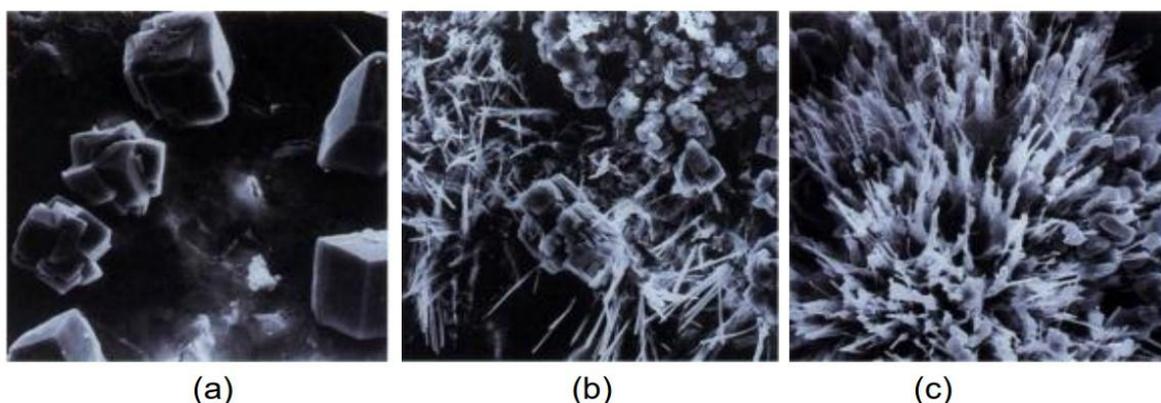
2.3.4 Aditivos cristalizantes

Os aditivos minerais utilizados para autocicatrização são categorizados em aditivos expansivos e aditivos cristalizantes (SISOMPHON; COPUROGLU; KOENDERS, 2012).

Takagi, Almeida Júnior e Oliveira (2007) definem a autocicatrização por cristalização como um processo físico-químico onde os ingredientes ativos do cristalizante desencadeiam reações catalíticas, compatíveis com as reações de

hidratação do cimento, em que ocorre a formação de cristais não solúveis na estrutura do concreto (Figura 16), de modo a garantir que não haja a penetração de água por capilaridade, suportando pressões hidrostáticas tanto positivas como negativas de até 0,7 MPa.

Figura 16 – Formação de cristais no interior do concreto. (a) Concreto com cristalizante ainda não ativado; (b) Início da formação de cristais; (c) Cristalização final.



Fonte: Takagi, Almeida Júnior e Oliveira (2007).

O tratamento com o uso de aditivos cristalizantes comparado a outros sistemas de impermeabilização apresenta vantagens, o mesmo é adicionado na própria dosagem do concreto, e forma uma camada cristalina no interior dos poros, que dificulta a passagem de água, permite apenas a passagem do vapor d'água evitando a pressão dentro do concreto como exemplifica Ourives, Bilesky e Yokoyama (2008).

O impermeabilizante por cristalização é considerado por Bertolini (2010) um sistema de proteção que colmata os poros. O autor afirma que devido às substâncias à base de silicatos presentes no produto, ao penetrarem no concreto reagem com os subprodutos do mesmo, em especial com o hidróxido de cálcio e formam os cristais que provocam o tamponamento dos poros.

Ourives, Bilesky e Yokoyama (2008) colocam em destaque que nos sistemas de cristalização, se novas fissuras aparecem durante a vida útil da estrutura, os cristais se formarão nessas fissuras também impedindo novos caminhos de passagem para a água (Figura 17). Essa formação cristalina impede a penetração de água, porém, permite a passagem de vapor d'água evitando a pressão de vapor dentro do concreto. Se novas fissuras aparecerem durante a vida útil da estrutura,

os cristais se formarão nessas fissuras, também evitando novos caminhos de passagem para a água. Quando não há água dentro da fissura, os cristais permanecem dormentes, mas, assim que ela aparece novamente os cristais voltam a crescer protegendo o concreto permanentemente (OURIVES et al, 2009).

Figura 17 – Reações de cristalização de uma rede capilar



Fonte: Adaptado de PENETRON®

Ourives et al (2009) afirmam que, uma vez dentro do concreto, os compostos químicos reagem com a água, com os hidróxidos de cálcio e de alumínio, crescendo cristais nos poros capilares. (Figura 18).

Figura 18 – Crescimento cristalino no concreto



Fonte: Adaptado de PENETRON®

Com base na recente revisão do estado da arte sobre concreto autocicatrizável proposto por De Belie et al. (2018), o processo de autocicatrização promovido pelo aditivo cristalizante (CR) é considerado autógeno estimulado, pois

considera-se que a cicatrização autógena é estimulada pela hidratação no início do processo ou pela cristalização.

Oliveira (2019) concluiu, em seu trabalho, que, em geral, os teores de 0% e 1% de CR demonstraram recuperações parciais acima de 60%, enquanto o teor de 0,5% de CR não exibiu recuperação mecânica. Para o maior nível de dano, nota-se que a dosagem com 1% de CR demonstrou o melhor desempenho, a recuperação mecânica foi total com o aumento de 10% da capacidade de carga.

Granger et al. (2007) relacionaram a recuperação mecânica com o preenchimento do novo C-S-H formado devido à hidratação tardia dos grãos de cimento anidro provocado pela presença de água na região da fissura. Além do C-S-H foi identificado, principalmente, CH por Huang; Ye; Damidot (2013), como os principais produtos de cicatrização formados pelo mecanismo de hidratação tardia.

2.3.4.1 Mecanismos de ação

Alguns estudos sugerem que a reação dos aditivos químicos a base de silicatos provenientes do CR ocorra com o CH em presença de umidade e forme uma estrutura cristalina insolúvel responsável pelo preenchimento dos poros e fissuras (CAPPELLESSO et al., 2016; DE NARDI et al., 2017; SISOMPHON; COPUROGLU; KOENDERS, 2012, 2013; YODMALAI et al., 2011).

O catalisador cristalino em solução com sílica reativa ($MgSiF_6$) forma um material cimentício sintético classificado como uma impermeabilização cristalizante hidrofílica. Os componentes reativos reagem com o $Ca(OH)_2$ para formar produtos cristalinos que desconectam poros e preenchem fissuras no concreto. Os produtos cristalinos só podem ocorrer quando estiver presente umidade suficiente (SISOMPHON, COPUROGLU, KOENDERS, 2012).

Os produtos químicos hidrofílicos como o CR utilizam a água para catalisar e reagir com as partículas de cimento e produzir a estrutura cristalina. Fisicamente obstruem o sistema de poros e precipitam hidratos nas fissuras e na zona de transição de maneira suficiente para resistir a penetração de água sob pressão (BIPARVA; YUERS, 2010; JIANG; LI; YUAN, 2015).

Alguns pesquisadores estimularam a cicatrização autógena de fissuras através dos mecanismos de expansão e cristalização pelo emprego de aditivos minerais. Este tipo de estímulo baseia-se nas próprias características intrínsecas da

matriz cimentícia como a alta alcalinidade e o ambiente úmido (AHN; KISHI, 2010; JIANG; LI; YUAN, 2015; KISHI et al., 2007; NAGATAKI; GOMI, 1998; SISOMPHON; COPUROGLU, 2011; SISOMPHON; COPUROGLU; KOENDERS, 2012, 2013).

Huang et al. (2016) e Li et al. (2018) afirmaram que o processo de recristalização do CH lixiviado do interior da pasta é um dos mecanismos de maior relevância para a cicatrização autógena. A presença do CR na pasta aumenta a dissolução de íons Ca^{2+} , estimulando assim esse processo de recristalização.

O efeito de autocicatrização depende não só do tipo de cimento utilizado, o teor de adição e a adição de catalisador cristalino, mas também das condições de exposição à água e ao ar (SISOMPHON, COPUROGLU e KOENDERS, 2012). Segundo Edvardsen (1999), o tipo de cimento exerce uma menor influência na cicatrização autógena. Porém, o teor de clínquer presente no cimento é um fator de maior relevância, pois determina o suprimento de íons Ca^{2+} para as reações (DE BELIE et al., 2018).

Segundo o Comitê do ACI 212.3R (2016), estes aditivos podem afetar algumas propriedades no estado fresco, tais como: redução na demanda de água, aumento do teor de ar incorporado e aumento do tempo de pega. O prolongamento do tempo de retardo também foi identificado por (MAILVAGANAM, 1995a; MUNN; KAO; CHANG, 2003).

Zizkova et al. (2018) avaliaram as propriedades mecânicas de argamassas com 0,5% e 1,5% CR após a exposição em alguns ambientes agressivos como cloretos, sulfatos e CO_2 . O aumento do teor de CR reduziu a porosidade das argamassas e, em geral, melhorou moderadamente a resistência à compressão de argamassas aos 118 dias, porém não exerceu um comportamento previsível na resistência à flexão.

De acordo com o ACI (2010), as misturas hidrofílicas cristalinas contêm componentes ativos que reagem com as partículas do cimento e com a água, gerando silicato de cálcio hidratado e/ou precipitado cristalino, que bloqueiam os poros e capilares existentes na estrutura interna do concreto.

Em geral, Munn; Chang; Kao (2005) e Munn; Kao; Chang (2003) verificaram que a inclusão de 0,8% e 1,2% CR não melhorou pronunciadamente a resistência à compressão até 28 dias de concretos convencionais produzidos com cimento comum. Por outro lado, de acordo com Munn; Kao; Chang (2005), quando 1,2% CR

foi empregado com cimento pozolânico, constatou-se o aumento da resistência à compressão aos 3, 28 e 91 dias.

De acordo com resultados de um trabalho apresentado por Pazderka e Hájková (2016), até os 28 dias de idade, não foram observados acréscimos ou decréscimos significantes na resistência à compressão de dois tipos de concretos dosados com aditivos cristalizantes distintos. Para ambos, a variação entre os resultados foi da ordem de 1% a menos em relação ao traço de referência (sem aditivo). Os autores propuseram a hipótese de que o desenvolvimento de resistência do concreto com o aditivo é tardio, sugerindo a realização de estudos posteriores para confirmação.

Neville (2002) esclareceu que a hidratação tardia é o principal mecanismo para concretos jovens, devido à retomada da hidratação dos grãos anidros a partir do contato com a água após o processo de fissuração, resultando no preenchimento da fissura pelos C-S-H e CH. Em idades avançadas, o principal mecanismo é o de formação de CaCO_3 , que requer a presença de CO_2 dissolvido em água na fissura. A primeira hipótese impõe a somente a presença de água, enquanto a segunda exige também a presença de CO_2 dissolvido (GRANGER et al., 2007).

Em relação à resistência mecânica, Ferrara; Krelani; Moretti (2016) demonstraram que a presença de 0,5% e 1% CR melhorou a capacidade de carga, de rigidez e de deformação na flexão em concretos convencionais e em HPFRCC (High Performance Fibre Reinforced Cementitious Composite).

2.3.4.2 Permeabilidade

Misturas cimentícias com alta resistência são caracterizadas pela baixa relação água/cimento, provocando o aumento da quantidade de aglomerante e a presença marcante de grãos de cimento anidros que origina a formação de C-S-H e CH procedente da hidratação tardia (HUANG; YE; DAMIDOT, 2013; GRANGER et al. (2007)).

Para fins de avaliação do desempenho dos aditivos frente à permeabilidade do concreto, Mačanovskis et al. (2016) concluíram que os aditivos cristalizantes reduziram em até 75% a profundidade de penetração de água em ensaios laboratoriais.

Roig-Flores et al. (2015a, 2015b) concluíram que concretos com 4% CR sob condição de cura imersa alcançaram a maior capacidade de selamento. Por outro lado, Roig-Flores et al. (2016) verificaram que a presença de 4% CR não exerceu influência pronunciada nos índices de selamento em relação às misturas de referência.

Contudo, a inclusão do CR provocou um desempenho ligeiramente superior nos concretos de alta resistência quando comparados aos convencionais.

Sisomphon; Copuroglu; Koenders (2012) observaram que presença de CR reduziu consideravelmente a permeabilidade em relação à referência, porém o aumento de 1,5% para 4% CR não implicou necessariamente no aumento do selamento.

Entretanto, o emprego do CR em conjunto com o aditivo expansivo apresentou a maior capacidade de selamento de fissuras.

Jaroenratanapirom; Sahamitmongkol (2010, 2011) verificaram o fechamento completo em fissuras mais finas (menor que 50 μm), sendo que as argamassas com 1% CA demonstraram performance superior à referência. Por outro lado, em fissuras mais largas (100-300 μm) as amostras com CR demonstraram menor eficácia de fechamento de fissura, em relação à referência, sendo que o aumento da idade de pré-fissuração piorou o desempenho da cicatrização.

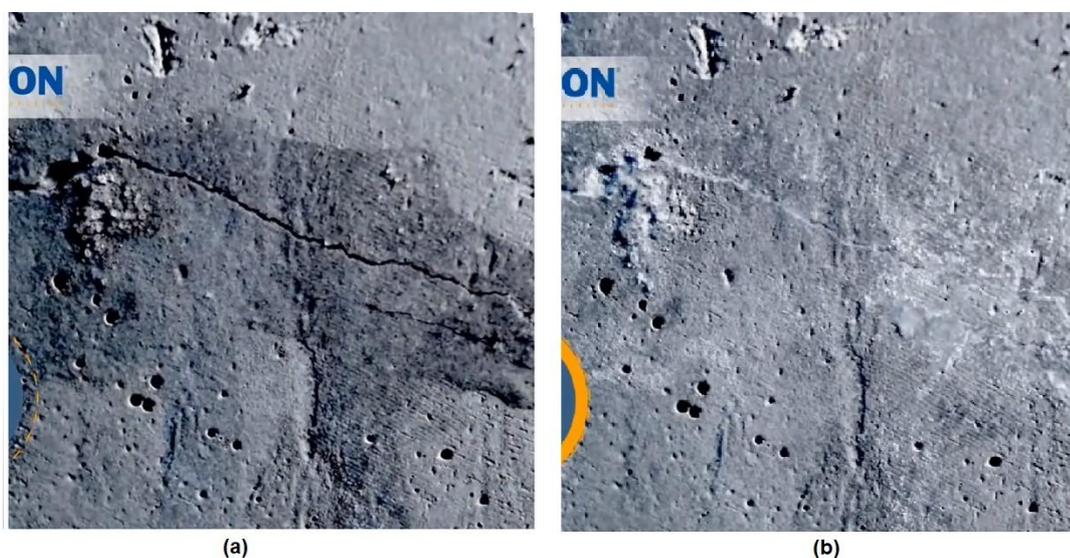
2.3.4.3 Influência das condições ambientais

Ferrara; Krelani; Carsana (2014) constataram que a presença de 1% CR acelerou o processo de cicatrização, bem como recuperou a rigidez e a capacidade de carga na flexão em amostras cicatrizadas de concretos convencionais sob condições de imersão em água.

Cuenca; Tejedor; Ferrara (2018) constataram, em seu trabalho, que as condições ambientais têm relevante influência na capacidade de cicatrização. As amostras expostas ao ar exibiram menor selamento de fissura, enquanto que as imersas em água demonstraram melhor desempenho, inclusive com ciclos de fissuração/cicatrização.

Borg et al. (2018) demonstraram que argamassas com 1% CR apresentaram desempenhos satisfatórios em ambientes expostos a cloretos. Em geral, as condições de imersão contínua e os ciclos de molhagem/secagem exibiram desempenhos superiores à condição de exposição ao ar, indicando a capacidade de selamento de fissuras de até 300 μm .

Figura 19 – Fechamento de microfissuras com cristalizante (a) antes e (b) após cristalização.



Fonte: Adaptado de PENETRON®

2.3.4.4 Adições minerais x cristalização

Em um estudo prático desenvolvido por Cappellesso et al. (2016) para avaliar o desempenho de aditivos cristalizantes e adição de sílica ativa no concreto, os autores verificaram que o aditivo cristalizante utilizado proporcionou um aumento de 16% na resistência à compressão do concreto, e concluíram que o resultado pode estar em função da redução dos poros capilares que é provocada pela formação de cristais no interior do material.

Segundo Jain e Pawade (2015) é preferível usar superplastificante ao introduzir sílica ativa no concreto, a fim de manter a proporção de água em níveis aceitáveis e obter trabalhabilidade razoável e sustentável.

Algumas adições minerais como escórias de alto forno e cinza volante reagem de forma mais lenta que o cimento, resultando na presença de mais material aglomerante anidro remanescente e disponível para o mecanismo de hidratação tardia. Contudo, as adições minerais consomem CH, conseqüentemente, podem reduzir o potencial de cicatrização através da formação do CaCO_3 (PALIN; WIKTOR; JONKERS, 2015; QIAN et al., 2009; TERMKHAJORNKIT et al., 2009; VAN TITTELBOOM et al., 2012).

Para este estudo, limitou-se a verificação do aditivo cristalizante e da adição mineral de sílica ativa separadamente.

2.4 ENSAIOS DE DURABILIDADE FRENTE AO ATAQUE ÁCIDO

A investigação sobre a deterioração do concreto por ácidos pode ser dividida em dois métodos de estudo: simulação em laboratório e ensaios *in situ* (*in loco*). Cada método possui vantagens, desvantagens e limitações que serão analisados nos tópicos a seguir.

2.4.1 Princípios dos métodos de ensaio acelerado

O ataque por agentes agressivos aos materiais de base cimentícia que ocorre na natureza é normalmente muito lento, sendo assim é interessante acelerar este processo através dos ensaios de laboratório (BARBOSA, 2006).

Investigações de laboratório bem projetadas de corrosão de esgoto podem imitar as condições do esgoto (Jiang et al., 2014a, Joseph et al., 2010).

Torres (2017) explica que uma forma simples de estudo da corrosão química é a observação *in loco* de estruturas de concreto em contato, diretamente, com o esgoto ou a análise de amostras retiradas de estruturas nesta condição. No entanto, essa degradação ocorre de maneira muito lenta, naturalmente.

No processo de acidificação biogênica, as condições do ambiente de exposição são extremamente difíceis de serem controladas com precisão, devido à incerteza envolvida no comportamento e na taxa de crescimento das bactérias. Como método alternativo para simular a acidificação, estudos têm sido realizados expondo as amostras a soluções de ácido sulfúrico (MUYNCK, et al., 2009; O'CONNEL et al., 2010).

Vários pesquisadores, em um esforço para comparar a resistência de diferentes tipos de concreto ao ataque ácido biogênico, desenvolveram métodos de ensaio acelerados que podem simular o ataque de ácido sulfúrico biogênico ao concreto (HORMANN et al., 1997; MORI et al., 1992; VINCKE et al., 1999).

O comportamento de materiais cimentícios à base de diferentes tipos de cimento em contato com o ácido sulfúrico foi simulado com um modelo preditivo baseado no modelo de Yuan et al. (2015) para prever a profundidade de deterioração do cimento submetido ao ataque com ácido sulfúrico e determinar qual deles apresentaria melhor resistência a este tipo de corrosão. Neste estudo, não foi possível a produção de ácido biológico em laboratório. Os autores afirmaram que,

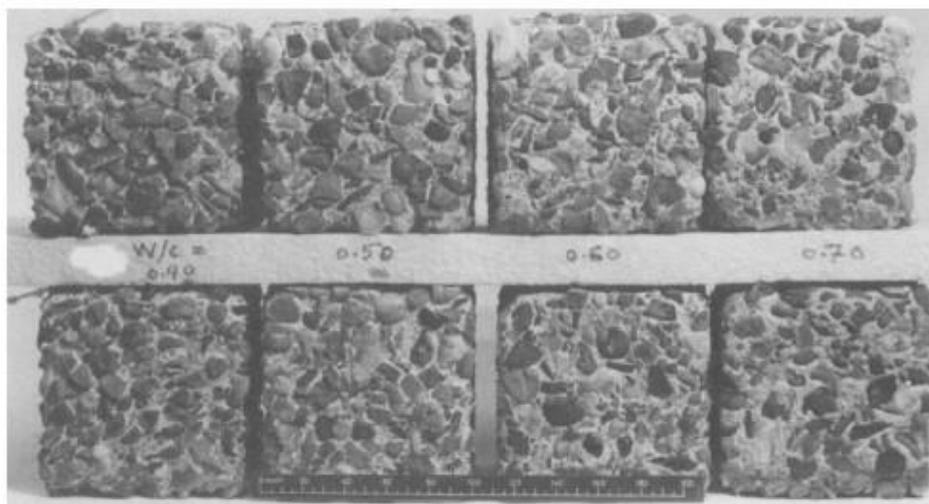
pesar disso, os resultados do modelo obtidos podem ser comparados àqueles de testes experimentais *in situ* e de laboratório para os quais a atividade do microrganismo pode ser dependente de parâmetros ambientais e materiais.

Gorninski e Kazmierczak (2008) utilizaram o método proposto por Camps, Laplanche e Al Rim (1990) para uma avaliação da resistência química de concretos poliméricos, submetendo amostras a soluções alcalinas e salinas como uma forma acelerada de recriar processos corrosivos de ambientes industriais em laboratório.

Nos ensaios químicos realizados por Monteny et al. (2000), o processo de degradação é simulado e acelerado por meio da imersão em soluções à base de H_2SO_4 , considerando-se assim que o ataque é dado somente por uma reação química. Os autores comentam que, de modo a acelerar a degradação, podem ser usadas concentrações mais elevadas da solução agressiva, temperatura mais elevada e superfícies de contato maiores. Monteny et al. (2000) afirmam que a concentração de H_2SO_4 na solução variou entre 1% e 5%. No entanto, a capacidade de neutralização do cimento leva à diminuição do efeito das soluções. Desse modo, um dos principais problemas enfrentados foi a frequência de renovação da solução, se tornando necessária a medição do pH da solução periodicamente para determinar a necessidade de se substituir a solução.

Um exemplo de estudo em que foi utilizado esse tipo de ensaio foi o realizado por Fattuhi et al. (1988), em que foram utilizadas diferentes misturas de pasta de cimento e concreto com diferentes fatores a/c e tempos de cura. Analisou-se a perda de massa das amostras inseridas por até 50 dias em solução de 2% de H_2SO_4 . Neste estudo, a solução era mantida com o pH aproximadamente igual à 1,78. No intervalo de ensaio, as amostras foram escovadas e pesadas. Nessa amostra foi observada a formação de uma camada espessa e amarelada de gesso através de difração de raios-x (DRX) na superfície, o que reduziu consideravelmente a penetração do ácido. A Figura 20 ilustra as amostras cúbicas de concreto após 27 dias de imersão.

Figura 20 – Amostras de concreto de diferentes relação a/c após 27 dias de imersão.



Fonte: Fattuhi e Hughes (1988).

Esse comportamento é o oposto do observado no estudo de Hughes e Guest (1978) no qual a concentração de ácido era bastante reduzida, sendo igual a apenas 0,0016% 0,02% por massa de H_2SO_4 . Nesse trabalho, quanto menor o volume de cimento nas amostras, maiores foram a perda de massa e perda de resistência observada.

Pavlík e Uncík (1997) ressaltaram, em seu estudo, que a alternância de molhagem e secagem do concreto é ainda mais prejudicial do que uma exposição contínua ao ataque químico.

Outro estudo semelhante foi desenvolvido por Raju e Dayaratnam (1984), tendo como objetivo a elaboração de equações para estimar a profundidade de penetração de H_2SO_4 , como também os fatores de redução da resistência e massa. Foram realizados ensaios de imersão em soluções de H_2SO_4 com concentrações iguais a 0,1%, 1% e 5%. Este estudo apresentou resultados diferentes dos resultados encontrados nos estudos anteriores, onde se percebeu que as amostras imersas na solução de concentração 0,1% apresentaram um aumento da resistência e da massa em comparação com os resultados da amostra de referência sem imersão. Enquanto isso perdas de resistência e de massa consideráveis foram observadas para as exposições de 1% e 5% de ácido.

2.4.2 Princípios dos métodos de ensaio *in loco*

Alguns autores, como Sand, Dumas e Marcdargen (1994) acreditam que os ensaios exclusivamente químicos desconsideram a corrosão que ocorre de maneira variável ao longo da estrutura. Além disso, não se leva em consideração a capacidade de produção de H_2SO_4 , que é diretamente ligada à ação das bactérias, como também o potencial de neutralização do concreto (EHRICH et al. 1999).

Em sua pesquisa, Dias (2018) concluiu que a simulação das condições ambientais em laboratório pode ser complicada, ponderando que as interações dos agentes deletérios são mais complexas quando estão presentes no meio natural do que isolando algum deles em laboratório.

Em métodos acelerados a degradação ocorre mais rapidamente, de forma que a reprodução dos seus efeitos e a avaliação dos processos é realizada mais facilmente. Porém, a taxa de degradação acelerada observada pode ser diferente de uma taxa de degradação natural. Uma vez que a biodegradação do cimento e do concreto depende de diferentes parâmetros, como a quantidade de compostos de enxofre, umidade, turbulência e vazão de esgoto, espaço e temperatura, conforme relatado por Yousefi et al. (2014). Dessa forma, é muito difícil reproduzir exatamente as condições naturais no laboratório devido à complexidade do ataque por biológico por bactérias (SCRIVENER et al., 2013).

Com a variação da vazão, as unidades de tratamento apresentam, assim como no ensaio acelerado, variação nos níveis de esgoto dentro de seus tanques proporcionando ciclos de molhagem e secagem, o que, conseqüentemente, oportuniza uma deterioração mais rápida das regiões expostas a essa variação. Muitos estudos de laboratório foram realizados com foco nos mecanismos de deterioração relacionados ao MICC em diferentes tipos de concreto (GUTIÉRREZ-PADILLA ET AL., 2010; NIELSEN ET AL., 2008; BELIE et al. (2004); HERRISSON et al., 2013; EŠTOKOV et al., 2012), mas até agora estudos de campo sobre MICC são raros. Embora os resultados dos experimentos de laboratório tenham sido amplamente usados para tirar conclusões sobre os processos MICC em ambientes naturais, é quase impossível reproduzir as condições ambientais de campo do MICC no laboratório (VOLLERTSEN et al., 2008).

Assim, pesquisas de campo são fundamentais para aprofundar o conhecimento na área, proporcionando o entendimento dos mecanismos de deterioração e, conseqüentemente, a possibilidade de métodos de prevenção às patologias mais eficientes.

3 METODOLOGIA

Para atingir os objetivos propostos neste trabalho, realizou-se o programa experimental, cujo Capítulo 3 estabelece as etapas de desenvolvimento, as variáveis de análise, fatores de controle, materiais e métodos de obtenção dos resultados. O detalhamento do programa experimental é descrito na sequência.

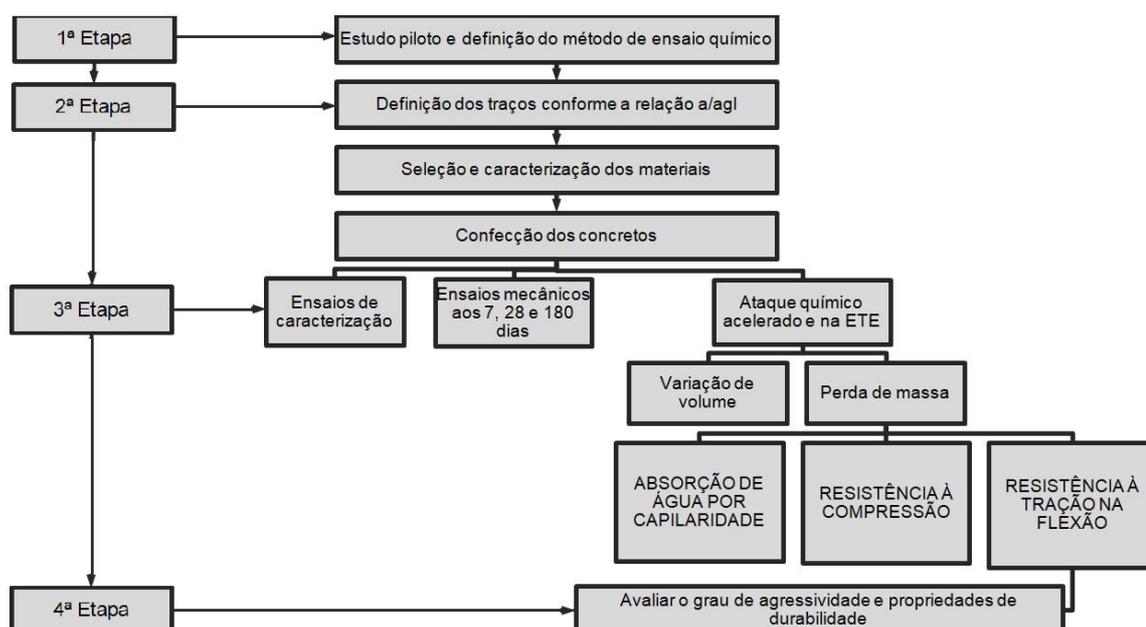
3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A metodologia experimental realizada nesta pesquisa tem como objetivo apresentar os equipamentos utilizados em campo e a realização dos procedimentos, com o intuito de contribuir para o conhecimento da deterioração do concreto causada pelo ácido acético, ácido sulfúrico e o esgoto, em uma ETE, avaliando o grau de agressividade e as propriedades de durabilidade.

3.1.1 Definição das etapas do programa de ensaios

Como predefinição das etapas do programa experimental, criou-se o organograma apresentado na Figura 21 com as fases de estudo para que se alcancem os objetivos deste trabalho.

Figura 21 – Predefinição das etapas do programa experimental



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Na 1ª Etapa foi realizado um trabalho apresentado como Estudo Piloto (STAUDT, L.; STAATS, V.; FRÖHLICH, J, 2019), desenvolvido pelos mestrandos Luis Staudt (com foco no estudo em materiais geopoliméricos), Vanessa Staats (focando no desenvolvimento e aplicação de uma metodologia de ataques químicos), e Jéssica Fröhlich (focando no estudo de materiais LC³), com a supervisão dos professores Mauricio Mancio e Marlova Piva Kulakowski.

No APÊNDICE B está apresentado o Estudo Piloto em forma de artigo, onde poderá ser visualizado, de forma concisa todo o trabalho experimental realizado, suas conclusões e observações.

Na 2ª Etapa ocorreu o desenvolvimento dos traços de concreto, com base no método de dosagem Mehta-Aïtcin (1990) para concretos de alto desempenho visando a durabilidade dos materiais e atendendo as exigências das normas ABNT NBR 6118:2014 e ABNT NBR 12655:2015. Ainda nesta etapa foram caracterizados todos os materiais utilizados no programa experimental. Após a definição dos traços, foi executada toda a preparação, mistura e a cura das amostras a serem ensaiadas.

Já na 3ª Etapa ocorreu a caracterização física e mecânica dos concretos, no estado fresco e no estado endurecido. Realizou-se o sazonalamento das amostras como método de preparo para os ensaios acelerados, dando início aos ciclos de ataque químico nos 16 diferentes traços desenvolvidos. A investigação sobre a degradação do concreto por ácidos está dividida em dois métodos de estudo: simulação em laboratório com testes químicos acelerados; e ensaios *in situ* (*in loco*). Durante o período de imersão e secagem foram realizadas inspeções visuais, registrada a perda de massa das amostras e alterações nas suas dimensões. Cada método possui vantagens, desvantagens e limitações que serão analisadas e comentadas nos resultados obtidos.

Na Etapa IV avaliou-se a relação entre as características físicas e mecânicas de cada um dos concretos com as propriedades e conceitos de durabilidade.

3.1.2 Variáveis estudadas

Neste trabalho foram estudadas variáveis dependentes e variáveis independentes, conforme segue.

3.1.2.1 Variáveis dependentes ou de resposta

A avaliação do desempenho dos materiais estudados frente ao ataque por soluções ácidas é dividida em dois grupos: ensaios em uma ETE e em laboratório.

Os ensaios principais são aqueles que fornecem características do material em relação ao seu desempenho quanto ao ataque químico, após ciclos de imersão e secagem e são detalhados a seguir.

O segundo grupo de ensaios engloba a resistência à compressão, realizados para fins de controle de produção dos corpos de prova. O resumo das variáveis de resposta está mostrado na Tabela 10.

Tabela 10 - Resumo das variáveis de resposta (Métodos e ensaios planejados)

Variáveis de resposta (métodos de ensaios planejados)					
Variáveis	Ensaio	Metodologia	Estado	Idade (dias)	Formato
Dosagem dos traços	Método de dosagem	MEHTA-AÏTCIN	-	-	-
	Verificação do abatimento do tronco de cone	NM 67:1998	Fresco	-	-
Caracterização dos concretos	Densidade e índice de vazios	ASTM C1688	Fresco	-	-
	Resistência à compressão	NBR 5739:2018	Endurecido	7, 28 e 180	cilíndrico
Caracterização dos ácidos e esgoto	Análises físicas, químicas e biológicas	NBR 9897/1987; ZIVIKA, 2001; GÓIS, 2016	-	-	-
Ensaio químico	Ensaio de ataque em solução ácida por imersão e secagem	GORNINSKI, DAL MOLIN e KAZMIERCZAK, 2007	Endurecido	35 a 105	prismático
Propriedades relacionadas à durabilidade	Variação de volume	NBR 13583 (2014)	Endurecido	49,63,77,91 e 105	prismático
	Perda de massa	GORNINSKI, DAL MOLIN e KAZMIERCZAK, 2007	Endurecido	49,63,77,91 e 105	prismático
	Absorção de água por capilaridade	RILEM TC 116PCD	Endurecido	112	prismático
	Resistência à compressão	NBR 16738:2019 adaptada	Endurecido	180	prismático
	Resistência à tração na flexão	NBR 16738:2019 adaptada	Endurecido	180	prismático

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

3.1.2.2 Variáveis independentes ou de controle

A partir das variáveis de respostas que se pretende mensurar, foram determinados os parâmetros decisivos no processo, ou seja, as variáveis controláveis ou independentes e os seus níveis fixos, cuja hipótese é de que apresentem influência sobre as variáveis de resposta. Desta forma, as variáveis ou fatores controláveis, e os níveis estudados nesta pesquisa, são apresentados, conforme segue na tabela Tabela 11 e na Tabela 12:

Tabela 11 - Fatores de Controle com níveis variáveis de estudo

Fatores de controle com níveis variáveis	
Relação a/agl	0,39
	0,32
	0,28
	0,24
Aglomerante	CP IV
	CP II F 40 (Ref)
	CP II F 40 (Sílica Ativa)
	CP II F 40 (Cristalizante)

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Tabela 12 – Fatores de controle com nível fixo de estudo

Fatores de Controle com nível fixo	
Teor de Adição de Sílica Ativa	20% do volume de aglomerante (com substituição em massa)
Idade de cura	28 dias
Tempo dos ciclos de agressão	5 ciclos de 14 dias
Soluções ácidas	Ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄)
	Ácido acético (CH ₃ COOH)
	Esgoto <i>in natura</i>
Cristalizante	1,0 % do volume de aglomerante
Concentração das soluções	1,0%
	*vide tabela composição química do esgoto

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

3.1.3 Limitações do experimento

Expõem-se como limitações do experimento os traços que delinearão esta pesquisa experimental.

O programa experimental seguiu metodologia semelhante à utilizada em estudos de concretos com adições de sílica ativa, de Kulakowski et al. (1997), concretos com adição de cinza de casca de arroz de Cassal (2000), e no trabalho de Gorninski e Kazmierczak (2008) que avaliaram o desempenho destes materiais frente ao ataque ácido. As formas propostas para medir a corrosão do concreto são através da variação de volume e de massa. Essas medições e pesagem antes e após a retirada dos produtos de corrosão permitem avaliar qual amostra é mais propícia à degradação, já que um material que sofre maior expansão e depois grande perda de massa é mais propício à corrosão do que um que sofreu pequena expansão e perda de material.

Devido à falta de métodos padronizados, diferentes métodos de ensaio e parâmetros foram utilizados e adaptados para avaliar a resistência de concretos a deterioração causada por ataque ácido.

Os estudos de Monteny et al. (2000) e Scrivener et al (2012) apresentam uma revisão dos desenvolvimentos e diferenças encontradas entre diferentes tipos de testes para simular o comportamento de estruturas de concreto e materiais cimentícios em contato com ácido sulfúrico de origem biogênica. A observação *in loco* é uma forma prática de estudo da corrosão do concreto utilizando amostras depositadas diretamente no esgoto. No entanto, essa degradação ocorre de maneira muito lenta naturalmente. Portanto, diversos estudos aplicam técnicas de ensaios acelerados através da aplicação direta de soluções ácidas.

Quanto ao tipo de cimento – considerando que neste trabalho foram realizados ensaios acelerados de deterioração dos concretos, e que as adições pozolânicas podem influenciar o comportamento durável dos concretos – decidiu-se trabalhar com o cimento do tipo CP IV-32 e o CP II F-40, que apresentam características bastante distintas entre si.

Partiu-se da premissa do emprego racionalizado de recursos e cronograma de execução. Esse trabalho limitou-se a estudar o desempenho de 16 traços de concreto frente a diferentes composições químicas, conforme indicado na Tabela 11.

A adoção dos níveis de relação água/aglomerante buscou atender uma variação de resistência à compressão que contemplasse valores, até então, usuais da NBR 6118, até resistências mais elevadas, utilizadas em CAD, verificando-se o comportamento destes concretos frente ao ataque ácido.

O nível de adição de sílica ativa teve como premissa os dados de literatura apontados na revisão bibliográfica, cujos teores ótimos encontram-se em torno de 10 a 20%, adotando-se neste trabalho o teor de 20%.

O produto impermeabilizante por cristalização testado é de um único fornecedor.

Para os níveis de tempo de exposição tomaram-se, como critério, idades múltiplas de sete, facilitando a programação dos ensaios.

No estudo foi proposta a realização de ensaios de compressão direta e tração indireta após 70 dias de imersão em soluções de concentração 1,0% de H_2SO_4 (ácido sulfúrico), solução de concentração 1,0% de CH_3COOH (ácido acético) e diretamente em esgoto da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da Serraria - DMAE.

A seleção desses ácidos baseou-se na dominância de ambientes à base de ácidos orgânicos e inorgânicos presentes em estações de tratamento de esgoto que, corriqueiramente, oferecem um impacto prejudicial significativo no concreto.

3.1.4 Etapa I: Estudo de dosagem e definição dos traços conforme as relações água/aglomerante

Para determinar, de forma metódica, quais são as informações consideradas pelo método e a adoção dos traços definitivos a serem utilizados no Programa Experimental foi realizado, previamente, um estudo de dosagem dos concretos de alta resistência.

3.1.4.1 Dosagem experimental

A seguir, serão abordados os procedimentos para compor os concretos, processo de mistura e ensaios no estado fresco e endurecido dessas composições.

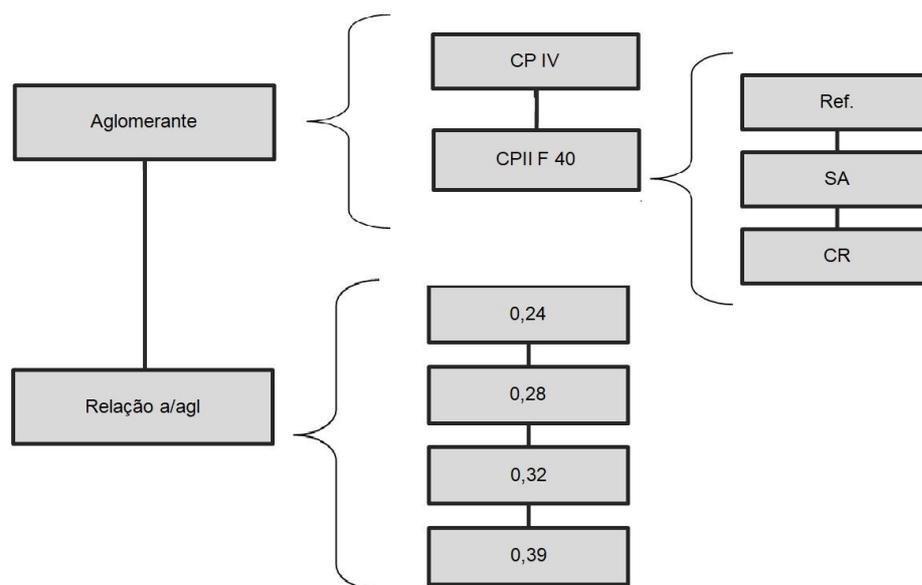
Figura 22 – Fluxograma do desenvolvimento das etapas de dosagem



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

A etapa experimental realizou-se no Laboratório de Materiais de Construção – LMC, na Unisinos e se delimitou a utilização de dois tipos de cimento, agregado graúdo britado nº 0, areia média como agregado miúdo, aditivo cristalizante, aditivo superplastificante e sílica ativa, como adição.

Figura 23 – Demonstração da moldagem por tipo de material

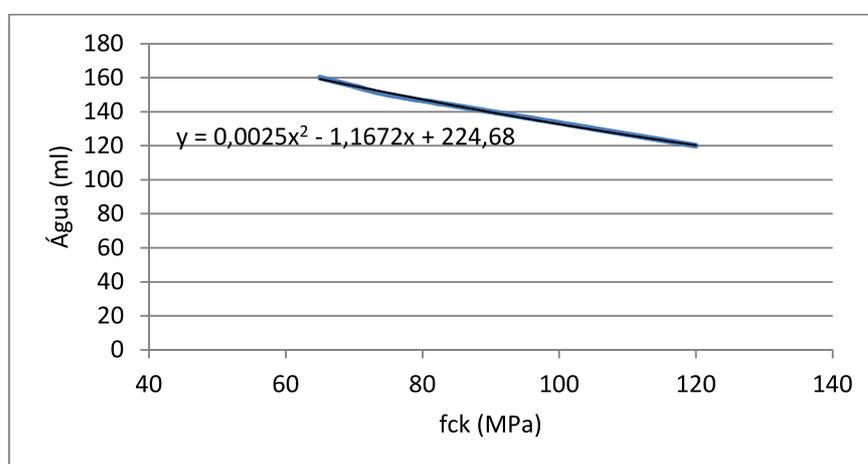


Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Foram dosados concretos de alta resistência através do método de dosagem Mehta-Aïtcin (1990b), por ser considerado um método específico para concretos de alto desempenho, largamente utilizado em nível mundial e de fácil aplicação. Como o método é calculado a partir da escolha do nível de resistência, foram realizados ensaios de caracterização dos materiais componentes, de consistência e de resistência mecânica à compressão da mistura.

Visando fixar quatro níveis distintos de relação a/agl (ver Tabela 1 Tabela 11), inicialmente foram definidos quatro níveis de resistência (entre cerca de 40 MPa e 85 MPa) para a realização da dosagem dos concretos a partir do método Mehta-Aïtcin. Conforme ilustra a Tabela 13, o consumo máximo de água e a proporção entre agregados miúdos e graúdos são dados pelo método em função no nível de resistência desejado. Como o método parte de uma resistência de 65 MPa, com base no procedimento adotado por (CREMONINI et al., 2005), foi realizada uma extrapolação (NEPOMUCENO, 2016) para encontrar os valores respectivos para as resistências de 40 MPa e 55 MPa. A equação referente à extrapolação é demonstrada no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Gráfico de interpolação para dosagens



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Assim, a partir deste estudo puderam ser calculados os valores para cada traço proposto. A Tabela 13 mostra os valores obtidos pela interpolação e são apresentadas por números (1-4), enquanto que as letras representam os valores tabelados do método (A-E). Do mesmo modo, obtiveram-se as proporções recomendadas entre agregado miúdo (a) e agregado graúdo (p).

Tabela 13 – Consumo máximo de água e relação entre os agregados conforme os traços.

Nível de resistência	f_{ck}	Água _{máx} (L/m ³)	a	p
1	40	182	2,05	2,95
2	55	168	2,03	2,97
A	65	160	2,00	3,00
3	70	155	1,975	3,025
B	75	150	1,95	3,05
4	85	143,3	1,917	3,083
C	90	140	1,90	3,10
D	105	130	1,85	3,15
E	120	120	1,80	3,20

Fonte: Método Mehta-Aïtcin (1990b) adaptado pela autora.

Cabe observar que os valores de “a” e “p” no método Mehta-Aïtcin representam apenas a proporção entre agregados miúdos e graúdos, e não se referem ao traço unitário do concreto.

Como mostra a tabela, os teores de agregado graúdo e miúdo são definidos de acordo com o nível de resistência, sendo que deve iniciar no nível A com a proporção entre agregado miúdo e graúdo de 2:3 (isto é, 40% de agregado miúdo e 60% de agregado graúdo). Essa proporção é determinada pelo método, sendo alterada conforme a resistência requerida muda, devendo diminuir a quantidade de agregado miúdo enquanto aumenta a quantidade de agregado graúdo.

Este método considera que a proporção ideal entre pasta de cimento e agregados é **0,35** e **0,65**, respectivamente para cada metro cúbico (m³) de concreto.

Para os cálculos, se considerou as massas específicas dos materiais aglomerantes e dos agregados na condição seca. Todos os agregados foram secos em estufa e guardados em tambores plásticos com tampa.

Ainda, conforme recomendado pelo método, foi considerado que a mistura apresenta 2,0% de ar aprisionado do volume total do concreto.

O método de dosagem propõe que a substituição de aglomerantes por adições minerais seja sempre sobre o volume ocupado pelo material cimentante, que é mantido constante. A fim de padronizar o programa experimental, decidiu-se

que para os traços com sílica ativa seria adotado, portanto, o teor de 20% sobre o volume de aglomerante, e a quantidade de cristalizante sendo definida como a proposta pelo fabricante (1%) do volume de aglomerante.

A dosagem preliminar de superplastificante partiu do que recomenda o método, é de 1% de sólidos sobre a massa de cimento. Sobre os concretos experimentais definidos, a quantidade foi ajustada devido ao grande número de estimativas feito pelo método, ajustando para o abatimento esperado. A incorporação do aditivo se deu em substituição à água de amassamento da mistura, em massa, subtraindo-se a massa de sólidos do aditivo.

O fracionamento dos volumes dos materiais é apresentado na Tabela 14, para cada 1 m³ de concreto.

Tabela 14 – Distribuição do volume de materiais (m³) em 1m³ de concreto

Traço	Cimento Portland (m ³)	Sílica ativa (m ³)	CR (Cristalizante) (m ³)	Areia (m ³)	Brita (m ³)	Água (m ³)	Aditivo (m ³)
CPIV-039	0,148	-	-	0,267	0,397	0,182	0,0023
CPIV-032	0,162	-	-	0,264	0,386	0,168	0,0045
CPIV-028	0,175	-	-	0,257	0,393	0,155	0,0065
CPIV-024	0,187	-	-	0,249	0,401	0,143	0,0076
CPIIF-039	0,148	-	-	0,267	0,397	0,182	0,0023
CPIIF-032	0,162	-	-	0,264	0,386	0,168	0,0045
CPIIF-028	0,175	-	-	0,257	0,393	0,155	0,0065
CPIIF-024	0,187	-	-	0,249	0,401	0,143	0,0076
CPIIFSA-039	0,122	0,030	-	0,267	0,384	0,178	0,0042
CPIIFSA-032	0,135	0,034	-	0,264	0,386	0,161	0,0061
CPIIFSA-028	0,142	0,036	-	0,257	0,393	0,152	0,0069
CPIIFSA-024	0,152	0,038	-	0,249	0,401	0,140	0,0109
CPIIFCR-039	0,147	-	0,00147	0,267	0,384	0,183	0,0030
CPIIFCR-032	0,162	-	0,00162	0,264	0,386	0,168	0,0043
CPIIFCR-028	0,174	-	0,00174	0,257	0,393	0,156	0,0048
CPIIFCR-024	0,187	-	0,00187	0,249	0,401	0,143	0,0080

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

A quantidade em massa de cada material é determinada através da relação entre o volume ocupado em 1 m³ e massa específica de cada um.

Assim, com base na massa específica dos materiais empregados, calculou-se o consumo dos materiais constituintes para cada uma das 16 composições de

concreto de alto desempenho estudadas, em kg/m³, conforme apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 – Composição dos materiais constituintes para cada mistura, em kg/m³.

Traço	a/agl	Material cimentante			Areia	Brita	Água	Aditivo
		Cimento	Sílica ativa	CR				
(kg/m ³)								
1	0,39	467,68			706,23	1035,45	180,63	2,45
2	0,32	511,92			699,34	1042,47	165,30	4,84
3	0,28	553,00			680,39	1061,78	151,10	7,01
4	0,24	589,87			660,29	1082,25	138,77	8,20
5	0,39	467,68			706,23	1035,45	180,63	2,45
6	0,32	511,92			699,34	1042,47	165,30	4,84
7	0,28	553,00			680,39	1061,78	151,10	7,01
8	0,24	589,87			660,29	1082,25	138,77	8,20
9	0,39	384,26	66,88		706,23	1039,44	175,46	4,56
10	0,32	427,23	74,36		699,34	1046,49	157,34	6,57
11	0,28	449,98	78,32		680,39	1065,86	147,85	7,45
12	0,24	480,32	83,60		660,29	1082,25	133,45	11,77
13	0,39	464,52		4,6452	706,23	1039,44	181,19	3,25
14	0,32	511,92		5,1192	699,34	1046,49	165,44	4,59
15	0,28	549,84		5,4984	680,39	1065,86	153,10	5,21
16	0,24	589,87		5,8987	660,29	1086,42	138,52	8,64

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

3.1.4.2 Procedimento de mistura

Para cada concreto, os materiais foram pesados com um dia de antecedência e deixados em sala climatizada ($65 \pm 5\%$ e $23 \pm 2^\circ\text{C}$ de umidade relativa do ar e temperatura do ambiente). Esse processo permitia que a temperatura dos materiais se equilibrasse com a temperatura da sala.

Para a produção dos concretos foram utilizados os equipamentos disponíveis no Laboratório de Materiais – Unisinos. Foi utilizada uma betoneira de eixo vertical, fabricada pela empresa *ELE International Limited*, modelo 34-3530, tendo capacidade para 56 litros.

A preparação dos concretos obedeceu a uma sequência de colocação dos materiais. Primeiramente, a betoneira (cuba, pás, etc.) foi imprimada com uma mistura de argamassa, sendo adicionado todo agregado gráudo e parte da água de amassamento ($\pm 1/3$ de água), com o acionamento da betoneira por 15s. Em

seguida foi adicionado o cimento e outra parte da água de amassamento ($\pm 1/3$ de água) e a betoneira acionada por mais 45 segundos. Por último foram adicionados o agregado miúdo e o restante da água, sendo a betoneira acionada por mais 2 minutos. Os aditivos foram adicionados na água de amassamento; a sílica ativa e o cristalizante, quando utilizados, foram adicionados logo após o cimento.

Ao término desse procedimento, foram realizados, concomitantemente, os ensaios no estado fresco das misturas estudadas.

3.1.5 Etapa II: Preparação, cura, sazonalização e caracterização das amostras para os ensaios químicos e mecânicos

A moldagem dos CP foi planejada de acordo com o número disponível de formas prismáticas metálicas, sendo então necessária a realização em 2 (duas) etapas. Na 1ª etapa foram moldados os materiais correspondentes aos traços nº 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07 e 08; e na 2ª etapa foram moldados os materiais correspondentes aos nº 09, 10, 11, 12, 13, 14, 15 e 16. O tempo de uma etapa para outra foi de 02 dias, período suficiente para desmoldagem dos corpos-de-prova.

3.1.5.1 Amostras

Para cada traço foram moldados nove corpos de prova prismáticos, medindo 4 x 4 x 16 cm, para os ensaios de agressão química, totalizando 144 corpos de prova prismáticos, distribuídos conforme a Tabela 16.

Para os ensaios exclusivamente mecânicos, foram moldados nove corpos de prova de cada traço, sendo três para a idade de 7 dias, três para a idade de 28 dias e três para a idade de 180 dias.

Tabela 16 – Relação da quantidade de amostras por ensaio e por material

Material		Ácido Acético	Ácido Sulfúrico	Esgoto	Ensaio Comp. 7 dias	Ensaio Comp. 28 dias	Ensaio Comp. 180 dias
		Prismático	Prismático	Prismático	Cilíndr.	Cilíndr.	Cilíndr.
CP IV	0,39	3	3	3	3	3	3
	0,32	3	3	3	3	3	3
	0,28	3	3	3	3	3	3
	0,24	3	3	3	3	3	3
CP II F 40 (Ref)	0,39	3	3	3	3	3	3
	0,32	3	3	3	3	3	3
	0,28	3	3	3	3	3	3
	0,24	3	3	3	3	3	3
CP II F 40 (SA)	0,39	3	3	3	3	3	3
	0,32	3	3	3	3	3	3
	0,28	3	3	3	3	3	3
	0,24	3	3	3	3	3	3
CP II F 40 (CR)	0,39	3	3	3	3	3	3
	0,32	3	3	3	3	3	3
	0,28	3	3	3	3	3	3
	0,24	3	3	3	3	3	3
Total por ensaio		48	48	48	48	48	48
TOTAL		288					

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Cada corpo de prova prismático foi identificado pelo tipo de material e tipo de agressão química, e numerados de 1 a 3, conforme Tabela 17.

Tabela 17 – Identificação dos corpos de prova prismáticos

Ácidos / Identificação dos corpos de prova prismáticos			
Traço	Ácido Acético	Ácido Sulfúrico	Esgoto
1	1 - A1	1 - S1	1 - E1
	1 - A2	1 - S2	1 - E2
	1 - A3	1 - S3	1 - E3
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
16	16 - A1	16 - S1	16 - E1
	16 - A2	16 - S2	16 - E2
	16 - A3	16 - S3	16 - E3

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Já para o ensaio de resistência à compressão simples foram moldados três corpos de prova cilíndricos de cada traço para cada idade, medindo 10 x 20 cm, totalizando 144 corpos de prova cilíndricos, como mostra a Tabela 18:

Tabela 18 – Identificação dos corpos de prova cilíndricos

Identificação dos corpos de prova cilíndricos			
Traço	7 dias	28 dias	180 dias
1	1 - 7	1 - 28	1 - 180
	1 - 7	1 - 28	1 - 180
	1 - 7	1 - 28	1 - 180
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
16	16 - 7	16 - 28	16 - 180
	16 - 7	16 - 28	16 - 180
	16 - 7	16 - 28	16 - 180

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

3.1.5.1.1 Produção dos corpos de prova para ensaios mecânicos

Para a análise das características mecânicas dos concretos foram produzidos corpos de prova cilíndricos. Estas amostras foram confeccionadas de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015), nas dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Os moldes cilíndricos foram tratados com desmoldante oleoso, pois apresentou maior eficiência ao desmoldar os corpos de prova.

Os corpos de prova foram executados em duas camadas iguais, cada uma sendo adensada mecanicamente, em mesa vibratória, por 10 segundos cada camada, de acordo com a norma brasileira ABNT NBR 5738:2015. As amostras foram regularizadas nas formas com ajuda de colher de pedreiro. Após, foram envolvidas com saco plástico para evitar perda excessiva de água para o ambiente durante as 24 horas seguintes, quando ficaram em sala climatizada, com $65 \pm 5\%$ e $23 \pm 2^\circ\text{C}$ de umidade relativa do ar e temperatura do ambiente, respectivamente. Conforme descrito a seguir, os corpos de prova foram desmoldados após 24h e encaminhados à cura úmida até a idade dos ensaios.

3.1.5.1.2 Produção dos corpos de prova para ensaios de durabilidade

Para os ensaios relacionados à durabilidade química dos concretos dosados, foi proposta a moldagem de corpos de prova prismáticos, que foi baseada em uma adaptação da norma ABNT NBR 16738:2019 – *Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova prismáticos*.

Usualmente, esta norma aplica-se a argamassas. No entanto, a adaptação do método de ensaio visou otimizar a quantidade de material a ser utilizado, tendo em vista o elevado número de amostras, propiciando a utilização de corpos de prova menores.

Foram utilizados moldes prismáticos (4 x 4 x 16 cm), confeccionados em formas de aço. Os moldes foram tratados com desmoldante à base d'água, formando uma película para impedir a aderência entre as partes e facilitar o desmolde. Foi escolhido este tipo de desmoldante para evitar a interferência de algum tipo de impermeabilização dos corpos de prova durante o ensaio em solução ácida.

Figura 24 – Corpos de prova em sala climatizada após moldagem



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

A moldagem foi executada em duas camadas em cada compartimento do molde. Cada molde tem capacidade para a preparação de 3 (três) corpos de prova, simultaneamente.

O adensamento dos CP prismáticos foi realizado com mesa vibratória por 10 (dez) segundos para cada camada e, ao término do preenchimento, a seção superior dos moldes foi nivelada e protegida com placas de vidro sobre uma camada de filme plástico para evitar perda excessiva de água.

3.1.5.1.3 Cura

Os corpos-de-prova cilíndricos foram desmoldados após 24 horas e mantidos submersos em água saturada de cal, de acordo com as recomendações da norma NBR 9479 (ABNT, 1994), pelo período proposto até a realização dos ensaios de resistência (7, 28 e 180 dias).

Os concretos permaneceram em cura submersa até a data de realização dos ensaios de resistência à compressão. As amostras eram retiradas do tanque uma semana antes em relação aos ensaios de compressão.

A desforma dos corpos de prova prismáticos foi realizada 48 horas depois da moldagem e os corpos de prova foram armazenados submersos em água saturada com cal até a idade de 28 dias para os demais ensaios, de acordo com as recomendações da norma NBR 9479 (ABNT, 1994).

No trabalho principal que trata este estudo, adotou-se o período de cura convencional (28 dias) devido às inúmeras indicações científicas para tal.

Além disso, um fator determinante foi que, durante o Estudo Piloto realizado, verificou-se que a deterioração aos materiais estudados poderia ter sido mitigada com um processo de cura mais longo, já que, na ocasião, as amostras à base de cimento foram curadas a 30°C por apenas 7 dias.

3.1.5.1.4 Sazonamento

Segundo TC 116-PCD – RILEM (1999), neste item são descritos os procedimentos prévios para ensaios de permeabilidade do concreto como critério da sua durabilidade.

Após o período de cura, as amostras foram secas superficialmente, pesadas e então foram dispostas sobre papéis absorventes, na bancada da sala climatizada, ao ar, por um período de sete dias, com temperatura controlada (23°C ± 2°C), de acordo com o método RILEM (1999) adaptado.

Esse procedimento foi adaptado para o programa experimental, antes dos ensaios de agressão química, com o intuito de equilibrar a umidade do material a ser ensaiado, de forma a evitar que os corpos de prova estivessem saturados pelo processo de cura submersa e, desta maneira, eles estivessem mais suscetíveis ao ambiente agressivo.

O procedimento é indicado para quaisquer ensaios que requeiram e podem ser aplicados a amostras de diferentes tamanhos e formas, concretos com composições especiais.

A Figura 25 ilustra a disposição das amostras durante a secagem em sala climatizada.

Figura 25 – Sazonamento da amostra



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

3.1.5.1.5 Caracterização das amostras

Os traços de concreto foram caracterizados em relação a suas propriedades físicas e mecânicas, no estado fresco e no estado endurecido.

a) Caracterização do concreto fresco

Após a mistura dos elementos na betoneira, foi realizado o ensaio de abatimento de tronco de cone (slump test), a fim de mensurar o índice de consistência do concreto, de acordo com a NBR NM 67 – Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (ABNT, 1998), classificando os valores obtidos em concordância com os parâmetros estabelecidos pela NBR 7212: Execução de concreto dosado em central- Procedimento (ABNT, 2012).

Para medir a massa específica do concreto, foi utilizado o método preconizado pela NBR 9833 (ABNT, 2008).

A densidade do concreto foi medida enchendo-se uma forma para corpo de prova, conforme NBR 12644 (ABNT, 2014).

3.1.6 Etapa III: Caracterização física e mecânica dos traços e investigação sobre a degradação dos concretos por ataque ácido

O entendimento das propriedades mecânicas se faz necessário para obtenção de um material mais homogêneo e qualificado, com base nas propriedades físicas e mecânicas de cada traço desenvolvido visando a minimização dos efeitos da degradação dos concretos por ataque ácido.

3.1.6.1 Caracterização do concreto endurecido – propriedades físicas e mecânicas

Entre todas as características apresentadas pelo concreto, a resistência mecânica é fundamental. Mesmo que o concreto seja um material durável e apresente as características estéticas esperadas, não haverá fundamento em utilizá-lo como material de construção se o mesmo não for capaz de suportar cargas a ele submetidas. Para tanto, foram realizados ensaios de resistência mecânica, conforme descrito abaixo.

3.1.6.1.1 Resistência à compressão axial

Após a cura, os corpos de prova cilíndricos foram secos em estufa até a constância de massa e medidas em relação à altura, diâmetro e massa inicial.

Os corpos de prova foram retificados para melhor distribuição do carregamento de ensaio.

O ensaio de resistência à compressão foi realizado segundo a NBR 5739 (ABNT, 2018), nas idades de 7, 28 e 180 dias, com ensaio de 3 (três) corpos de prova por idade, em amostras sem exposição a ácidos. Os resultados de cada teste foram obtidos a partir da média de três espécimes. Para isso, contou-se com o auxílio de uma prensa universal hidráulica da marca EMIC-INSTRON com capacidade para 2000 kN e pratos superiores oscilantes, localizada no Itt Performance - Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil, na Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

3.1.6.2 Preparo e amostragens dos agentes agressivos

A caracterização dos esgotos foi obtida de maneira documental, visto que a concessionária que opera a estação estudada realiza rotineiramente análises do esgoto afluente e efluente.

Já os ácidos utilizados em laboratório foram testados durante os ensaios, utilizando equipamentos no próprio laboratório.

3.1.6.2.1 *Coleta de amostras de esgoto in natura*

A amostra do afluente a ser tratado foi encaminhada para análise pela equipe técnica do local da própria empresa de saneamento.

3.1.6.2.2 *Preparo das soluções em laboratório*

Todas as preparações foram realizadas no Laboratório de Química da Unisinos, utilizando a capela com exaustor ligado, para exaurir vapores e gases gerados, formando uma barreira física entre as reações químicas e o ambiente de laboratório.

Inicialmente, a quantidade de água deionizada de cada solução foi pesada e colocada em um recipiente (balde) plástico. Em seguida, foram medidos os volumes de ácidos (Acético e Sulfúrico) – PA, para uma concentração de solução de 1,0% de ácido, cada uma.

As misturas e homogeneização de cada solução foram feitas com haste de vidro até a uniformização da solução.

Após descanso de, aproximadamente, 3 horas das soluções preparadas, e medido o pH estabilizado, cada solução foi colocada em seu respectivo recipiente, fechado para evitar a dispersão de vapor no ambiente.

O volume das soluções utilizadas correspondeu a 4 (quatro) vezes o volume total dos corpos-de-prova em cada recipiente, conforme proposto por Gorninski, Dal Molin e Kazmierczak (2007).

3.1.6.2.3 Determinação do pH

Para a determinação do pH foi utilizado pHmetro do Laboratório de Química da Unisinos. As amostras homogeneizadas ficaram armazenadas em sala climatizada até estabilização da temperatura, para realizar a medida e leitura do pH, de acordo com a Tabela 19.

Tabela 19 – Características das soluções ácidas

Substância	pH
Ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄)	0,65 ~0,68
Ácido acético (CH ₃ COOH)	4,23 ~4,30

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

3.1.6.3 Agressão química

Os corpos de prova prismáticos foram submetidos aos ensaios de agressão química após o período de cura de 28 dias, mais 7 dias de secagem, tanto *in loco*, na ETE, quanto em laboratório. Concluídos os ensaios de agressão química, os corpos de prova prismáticos foram submetidos a ensaios de perda de massa e volume, absorção por capilaridade e de resistência à compressão e à tração na flexão.

3.1.6.3.1 Ensaios acelerados de ataque ácido em laboratório

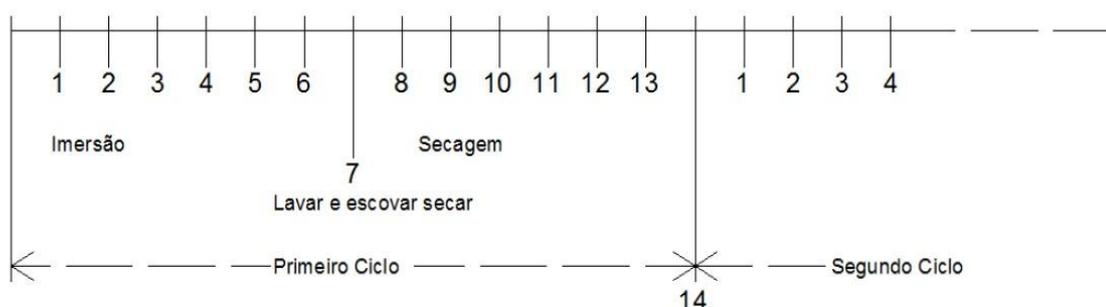
Para a realização dos ensaios químicos, uma vez que o ensaio com ácido sulfúrico ou acético não é normatizado, foram utilizados dados especificados por autores para ataque de sulfatos e outros ataques ácidos adaptados.

O método de ensaio para ataque químico segue o procedimento apresentado por Camps, Laplanche, e Al Rim (1990), adotado, também, por Gorninski, Dal Molin e Kazmierczak (2007). Esta metodologia foi testada e adequada no Estudo Piloto, realizado em etapa anterior para esta pesquisa.

Após a cura e sazonalamento dos concretos foram realizados cinco ciclos de agressão, utilizando-se soluções de ácido sulfúrico (H_2SO_4) e ácido acético (CH_3COOH) em uma concentração de 1,0%, diluídos em água deionizada.

A concentração utilizada para as soluções foi escolhida por ter sido utilizada com frequência em estudos semelhantes Kulakowski et al. (1997); Cassal (2000); Gorninski, (2002); Gorninski, Dal Molin e Kazmierczak (2007), entre outros autores já citados neste trabalho. A Figura 26 demonstra esquematicamente, como ocorreram os ciclos de imersão e secagem.

Figura 26 – Esquema dos ciclos de agressão em soluções ácidas



Fonte: CAMPS et al. (1990).

Cada ciclo de agressão consiste em períodos de 7 (sete) dias de imersão e 7 (sete) dias de secagem em ambiente de laboratório, com temperatura controlada ($23^{\circ}C \pm 2^{\circ}C$).

Foram utilizados, para cada tipo de concreto, três corpos de prova prismáticos de 4x4x16 cm. Previamente ao início dos ciclos, foi determinada a massa de cada corpo de prova.

Após cada período de imersão os corpos de prova passaram por lavagem em água corrente e escova de aço, com o objetivo de simular a ação mecânica de desgaste e retirar os produtos de corrosão da superfície da amostra, seguindo o método sugerido por Vincke (1999). Ao se retirar esses produtos, uma superfície até então sã é exposta, acelerando-se assim o processo de corrosão.

Depois de lavados, os espécimes foram mantidos durante 7 dias em ambiente de laboratório.

Adotou-se a utilização de um estrado plástico, o que possibilitou esse distanciamento dos concretos.

A cada novo ciclo, a solução ácida era renovada, medindo o pH antes de imergir os corpos de prova na solução e após retirá-los.

Teve-se o cuidado de deixar os corpos de prova sempre na mesma posição, durante todos os ciclos do ensaio químico, e em todas as demais situações, com o intuito de uniformizar a amostra e tornar possível a explicação dos resultados, nesse sentido.

Figura 27 – Ensaio acelerado de ataque químico em ambiente de laboratório



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

3.1.6.3.2 Ensaio de deterioração em ambiente de uma ETE

O ensaio de deterioração dos concretos produzidos, chamado neste trabalho de “Ensaio *in loco*” foi realizado nas instalações da ETE Serraria, localizada na zona sul do município de Porto Alegre – Rio Grande do Sul.

A Estação adota um sistema que combina etapas distintas de processo. O afluente entra para o tratamento preliminar, composto por peneiramento mecânico e

caixa de areia aerada. Posteriormente, o esgoto é conduzido aos oito reatores anaeróbicos do tipo UASB. A seguir, o esgoto passa por um sistema de pós-tratamento por lodos ativados, com fases de nitrificação e desnitrificação, em oito conjuntos de equipamentos chamados Unitank®. Os tanques de lodos ativados possuem um sistema de precipitação simultânea de fósforo e, por fim, as centrífugas realizam a desidratação mecânica dos lodos gerados.

A Figura 28 mostra uma visão geral da planta instalada, com a indicação do reator UASB utilizado para a realização do ensaio.

Figura 28 – Vista da ETE Serraria e indicação do reator UASB utilizado



Fonte: Divulgação/PMPA

Para o ensaio, os corpos de prova prismáticos de concreto foram fixados com abraçadeiras plásticas em um estrado, também de plástico (Figura 29).

Figura 29 – Disposição dos corpos de prova prismáticos na grade



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

O estrado foi preso a cordas e lançado no esgoto, ficando totalmente submerso. Não foi possível, pela arquitetura do local, deixar os materiais sem o contato direto com o esgoto. O estrado com os concretos foi amarrado no guarda-corpo existente nas passarelas que contornam os reatores.

Figura 30 – Vista geral do reator UASB (a); janela de inspeção do reator (b); reator UASB aberto após a retirada dos corpos de prova (c).



(a)

(b)

(c)

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

O ensaio de deterioração in loco durou de fevereiro a julho de 2020, iniciando com a submersão dos materiais no esgoto, onde permaneceram encobertos pelo esgoto constantemente.

a) Dados de esgoto afluyente

A ETE Serraria foi dimensionada para realizar o tratamento em nível terciário dos efluentes sanitários coletados, incluindo a remoção dos nutrientes nitrogênio e fósforo. Os reatores UASB fazem parte da fase secundária do tratamento. A estrutura trata esgotos com características domésticas, sendo caracterizado com intensidade mais próxima de "fraco", a partir da classificação proposta por Von Sperling (2005). Os parâmetros do afluyente durante a realização da pesquisa (01/10/2019 a 31/03/2020) estão apresentados na Tabela 20.

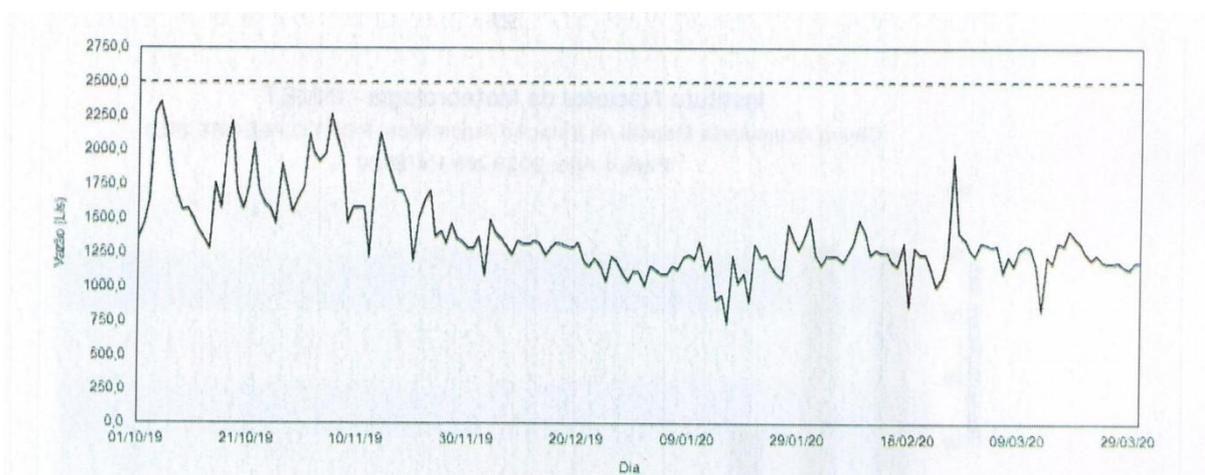
Tabela 20 – Características do esgoto afluyente

Parâmetro	Valor		
	Média	Mín	Máx
Vazão média (L/s)	1.383		
Temperatura (°C)	25,4	15,0	29,9
DQO (mg/L)	356	180	639
DBO ₅ (mg/L)	227	12,37	306
Sólidos suspensos totais SST (mg/L)	181	96	328
Nitrogênio total (mg/L)	26,47	12,37	34,32
Fósforo Total (mg/L)	4,197	2,461	5,655
pH	7,3	6,3	7,5
Coliformes (NMP/100mL)	5,2 E+06	1,5E+06	9,9 E+06

Fonte: DMAE Relatório Operacional ETE Serraria

Atualmente, a ETE recebe uma vazão afluyente média de 1.383 L/s. No período de 01/10/2019 a 31/03/2020 a ETE Serraria recebeu e tratou 21.861.570 m³ de esgoto. A carga orgânica média removida (ou seja, que deixou de ser lançada no Lago Guaíba, que é o corpo hídrico receptor) foi de 3.857 toneladas de DBO com remoção média de carga de 86%. A Figura 31 contém o gráfico da vazão média diária da ETE Serraria no período de outubro de 2019 a março de 2020.

Figura 31 – Gráfico da vazão média diária em L/s da ETE Serraria de outubro de 2019 a março de 2020



Fonte: DMAE Relatório Operacional ETE Serraria

3.1.6.4 Perda de massa e variação de volume

Os ensaios de variação dimensional tiveram como base a metodologia proposta pela NBR 13583 (ABNT, 2014), apesar de a norma não preconizar o uso de solução de ácido sulfúrico e/ou acético. Como a solução ácida é muito agressiva e não há norma para este ensaio, o tempo para primeira medição foi adaptado para 14 dias, de acordo com o ensaio de secagem e molhagem.

Ao final de cada ciclo de ataque químico, no 14º (décimo quarto) dia, as amostras foram submetidas a medidas transversais e longitudinais. Cada amostra era medida em três pontos diferentes e a variação considerada foi a média dessas três medidas. Além disso, ao final de cada ciclo cada amostra foi pesada.

Girardi, Vaona e Di Maggio (2010) realizaram um ensaio no qual verificaram a perda de massa e expansão de corpos de prova de concreto, submetidos ao ataque cíclico de sulfato de sódio e ácido sulfúrico, com variações no tipo de cimento e nas adições. Com os resultados, verificou-se que nas amostras que apresentaram menor expansão, a taxa de perda de massa foi maior; logo, ambos os fatores devem ser considerados no projeto e no estudo de estruturas.

3.1.6.5 Análise visual

Conforme descrito na NBR 13583 (ABNT, 2014), deve analisado o aspecto visual das barras, em cada idade de medição, registrando qualquer anomalia apresentadas, tais como: fissuração das barras, o tamanho e intensidade das fissuras, desagregação parcial, total ou empenamento das barras, evaporação da água de imersão, com emprego de paquímetro ou outro instrumento de medida. Então, dessa forma, é possível analisar manifestações patológicas resultantes do ataque do ácido sulfúrico e do ácido acético, e também analisar a diferença de comportamento de cada tipo de cimento quando exposto a estes elementos.

3.1.6.6 Absorção de água por capilaridade

Como forma de observar a porosidade do corpo de prova propôs-se a realização do ensaio de absorção por capilaridade segundo o procedimento RILEM TC 116 PCD (1999), em três amostras, com adaptação dos tempos de leitura e tamanho da amostra.

Estes ensaios foram realizados sob condições controladas, com $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e $65 \pm 5\%$, de temperatura e umidade relativa do ar, respectivamente, nas idades de 28 e 112 dias.

As amostras foram previamente secas em estufa até a constância de massa e medidas em relação à altura, comprimento e massa inicial. Para os ensaios de capilaridade, optou-se pela utilização de três amostras prismáticas, utilizando a base das mesmas (4 x 16 cm) em contato com a água e, periodicamente foi registrado o aumento de massa pela absorção capilar, através da pesagem das amostras em balança com precisão de 0,1g.

Verificou-se a massa das amostras submetidas ao nível de água corrente nos períodos de 1min, 2min, 3min, 4min, 5min, 10min, 15min, 30min, 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h, 24h, 48h, 72h e 96h.

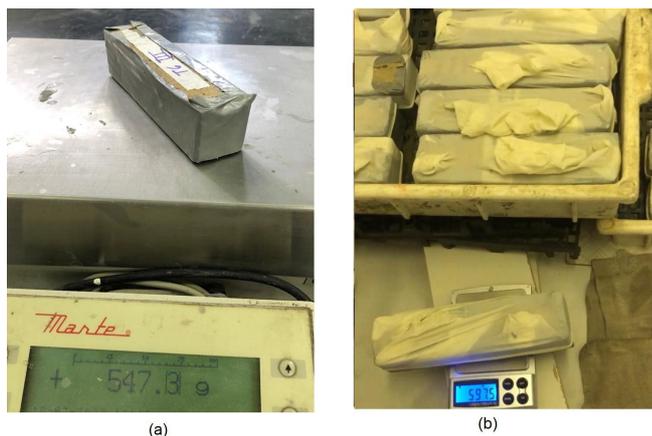
Antes de cada pesagem, a amostra foi seca, de modo superficial, com um pano úmido, mantendo sempre a face inferior umedecida.

A Figura 32 apresenta as amostras utilizadas para o ensaio de capilaridade, envoltas por fita de alta adesão nas laterais e com luvas de látex cobrindo o topo e,

garantindo que as amostras não sofressem influência da absorção de água do ambiente.

A vedação, (cobertura plástica) permitiu um fluxo unidirecional ocasionado pela rede de poros, ocorrendo saída de ar presente nos poros até o ponto flexível que a cobertura plástica proporciona à medida que a água foi absorvida.

Figura 32 – Preparação da amostra para o ensaio (a) e a realização do ensaio (b)



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Os resultados obtidos a partir deste ensaio apresentam o perfil de absorção de água ao longo do tempo.

3.1.6.7 Capeamento

Os corpos de prova prismáticos foram capeados com enxofre fundido para regularização da superfície, com espessura máxima de 3,0mm, aderindo-se ao corpo de prova, deixando um acabamento liso e plano depois de endurecido.

Foi realizado capeamento apenas nos corpos de prova que foram testados com o ácido sulfúrico, pois, ao final do ensaio de agressão química, estes apresentavam elevada irregularidade superficial.

Os concretos exibiam aspecto de fragilidade superficial, então, buscando manter a integridade dos mesmos, foi realizada uma modificação da norma, utilizando o molde de corpos de prova cilíndricos. No molde prismático apresentava alta aderência do corpo de prova ao molde, dificultando sua retirada. A utilização de molde para capeamento de CP cilíndrico em CP prismático é apresentada na Figura 33.

Figura 33 – Adaptação do método de capeamento (a); capeamento em CP (ácido sulfúrico).



(a)

(b)

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

3.1.6.8 Características mecânicas

Para a caracterização mecânica dos concretos pesquisados foram realizados ensaios de resistência à tração à compressão axial e ensaio de resistência à tração na flexão.

3.1.6.8.1 Resistência à tração na flexão

Depois do último ciclo de agressão química, todos os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à tração na flexão, em uma prensa hidráulica. Utilizou-se, para esta análise, prensa hidráulica Controls, modelo C80/ES, Classe I, com capacidade de 2000 kN. Foi aplicada uma carga de (50 ± 10) N/s até a ruptura do corpo de prova.

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado na idade de 180 dias, com apoio em três pontos, segundo especificado no anexo A (Figura A.4) da norma NBR 16738 (ABNT, 2019).

Para cada tipo de concreto foram realizados três ensaios, ponderando, para efeito de análise, seu valor médio amostrado.

Os CP foram posicionados de lado (de acordo com a moldagem) no dispositivo conforme a Figura 34, de modo que a face rasada não ficasse em contato com os dispositivos de apoio nem com o dispositivo de carga.

Figura 34 – Corpos de prova antes (a) e após a aplicação da carga (b)



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

A partir dos dados gerados nos ensaios, usou-se Equação 5 a para obter a resistência à tração na flexão.

$$R_f = 1,5 \times \frac{F_f \times L}{40^3}$$

Onde:

R_f = resistência à tração na flexão (MPa);

F_f = carga aplicada verticalmente no centro do prisma (N);

L = distância entre os pontos de apoio (mm).

3.1.6.8.2 Resistência à tração à compressão axial

Para o ensaio de resistência à compressão foram utilizados os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 16738:2019 adaptada para concretos.

O ensaio de determinação da resistência à compressão do concreto foi executado com cada metade do corpo de prova prismático rompido no ensaio anterior (resistência à tração na flexão), colocada entre duas placas de aço de 4 x 4 x 1 cm., totalizando seis amostras, com idade de 180 dias.

Utilizou-se, para esta análise, prensa hidráulica Controls, modelo C80/ES, Classe I, com capacidade de 2000 kN. A velocidade de carregamento aplicada foi de 500 + 50 N/s até a ruptura do corpo de prova.

Admitiu-se o valor obtido como a resistência à compressão de um corpo de prova cúbico de lado 4 cm, dadas as dimensões das placas de aço utilizadas.

Foram realizados seis ensaios para cada concreto confeccionado, ponderando, para efeito de análise, seu valor médio amostrado. Os CP foram posicionados no dispositivo conforme a Figura 35:

Figura 35 – Corpos de prova antes (a) e após a aplicação da carga (b).



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

A partir dos dados gerados nos ensaios, usou-se Equação 6 a para obter a resistência à compressão.

$$R_c = \frac{F_c}{A}$$

Onde:

R_c = resistência à compressão (MPa);

F_c = carga aplicada no prisma (N);

A = área da seção comprimida (1600 mm² para este ensaio);

3.2 MATERIAIS

As características das matérias primas são fundamentais para a obtenção de concretos com propriedades específicas. Nesta etapa, as principais características

físicas e químicas das matérias primas utilizadas para a obtenção de concretos (cimento Portland, sílica ativa, cristalizante, agregado miúdo e agregado graúdo) foram avaliadas.

Os ensaios de caracterização química foram realizados no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (Lcvmat) da Unisinos.

3.2.1 Cimento

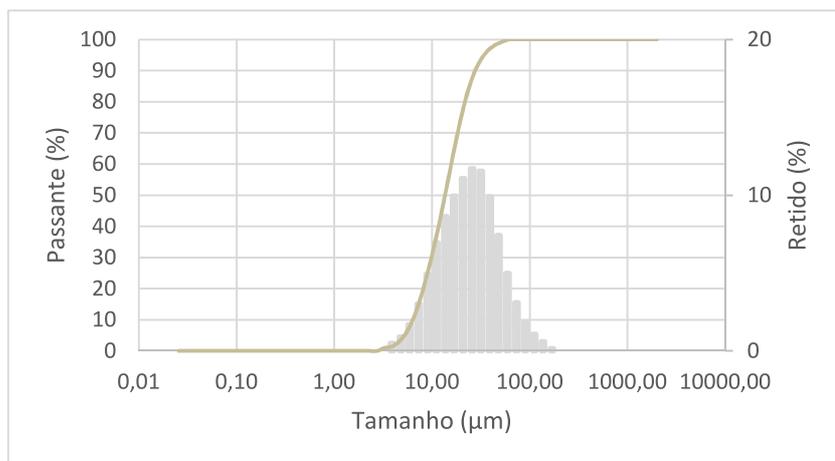
Foram escolhidos dois tipos de cimento para esta pesquisa: cimento Portland com adições pozolânicas, CP IV – 32 e o CP II F 40.

O CP IV-32 possui a maior quantidade de material pozolânico dentre os cimentos selecionados (de 15 a 50%). De acordo com Regattieri, Silva e Helene (1996), quando comparado a outros tipos de cimento, o CP IV apresenta melhor desempenho na redução de absorção capilar do concreto. Tendo em vista esse estudo, a decisão por esse tipo de cimento é justificada pela intenção de criar o melhor cenário no que diz respeito a fatores colaborativos à impermeabilização de forma a apresentar resultados que descrevam a máxima capacidade que esses produtos têm de promover estanqueidade.

O CP II F-40 é um cimento com material carbonático e sem adições pozolânicas, que proporciona rápida hidratação, permitindo um elevado grau de hidratação dos corpos de prova até a data da exposição destes, ao ensaio acelerado. Além disso, escolha desse cimento se justifica por sua grande disponibilidade na região sul e frequente utilização em estruturas do porte avaliado.

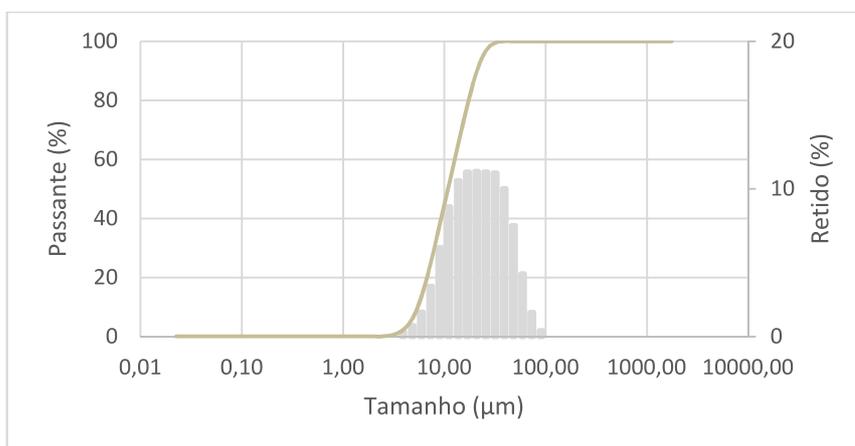
A Figura 36 e a Figura 37 apresentam a distribuição granulométrica dos cimentos.

Figura 36 – Distribuição granulométrica do CP II F-40



Fonte: LCVmat (2019).

Figura 37 – Distribuição granulométrica do CP IV



Fonte: LCVmat (2019).

As análises físico-químicas do cimento foram obtidas através da empresa fornecedora do cimento, conforme dados expressos na Tabela 21.

Tabela 21 – Características físicas dos cimentos

Parâmetros	Resultados	
	CP IIF	CPIV
Massa específica (g/cm ³)	3,16	2,83
Blaine (cm ² /g)*	4498,0	4248,0
#200 (%)*	0,04	0,52
#325 (%)*	0,15	2,76
D ₁₀ (µm)**	6,33	7,25
D ₅₀ (µm)**	13,55	14,40
D ₉₀ (µm)**	27,60	26,50

*Valores fornecidos pela empresa de cimento. ** Valores fornecidos pelo LCVmat

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Na Tabela 22 é apresentada a caracterização química e mecânica do cimento de acordo com os dados fornecidos pela empresa de cimento.

Tabela 22 – Características químicas e mecânicas dos cimentos

Parâmetros	Resultados	
	CP IIF	CPIV
Al ₂ O ₃ (%)	4,24	9,79
SiO ₂ (%)	18,80	29,58
Fe ₂ O ₃ (%)	2,81	4,27
CaO(%)	61,56	44,52
MgO(%)	2,22	2,16
SO ₃ (%)	2,98	2,11
Perda ao fogo (%)	5,88	4,68
CaO Livre (%)	0,90	0,79
Resíduo Insolúvel (%)	0,94	25,23
Equivalente alcalino (%)	0,68	1,20
Expansão à quente (mm)	0,20	0,50
Início de pega (h:min)	03:55	04:19
Fim de pega (h:min)	04:38	05:15
Água Cons. Normal (%)	29,60	30,40
fc 1 dia (MPa)	22,00	12,90
fc 3 dias (MPa)	37,80	23,60
fc 7 dias (MPa)	43,20	29,60
fc 28 dias (MPa)	51,50	44,80

Fonte: Dados fornecidos pela empresa de cimentos (2019)

Posteriormente, o material foi pesado conforme cada traço e acondicionado em sacos plásticos identificados.

3.2.2 Aditivo

Para a realização desta pesquisa foi utilizado aditivo superplastificante à base de policarboxilato, da linha Tec-Flow 8000. As especificações técnicas constam na Tabela 23.

Tabela 23 – Especificações técnicas do aditivo superplastificante

Descrição	Unidades	Limites		Texto
		Mínimo	Máximo	
Aparência	-	-	-	Líquido Laranja
Peso Específico à 25°C	g/cm ³	1,08	1,120	-
pH à 25°C	-	4,50	6,50	-
Teor de Sólidos	%	44,35	49,01	-
Cloretos	%	-	0,050	-

Fonte: Dados fornecidos pela empresa produtora de aditivo (2019)

Utilizou-se esse aditivo para que houvesse mistura plástica e redução do conteúdo de água, evitando sua utilização em excesso.

3.2.3 Sílica ativa

A composição química qualitativa da sílica ativa está representada na Tabela 24.

Tabela 24 – Composição química qualitativa da sílica ativa

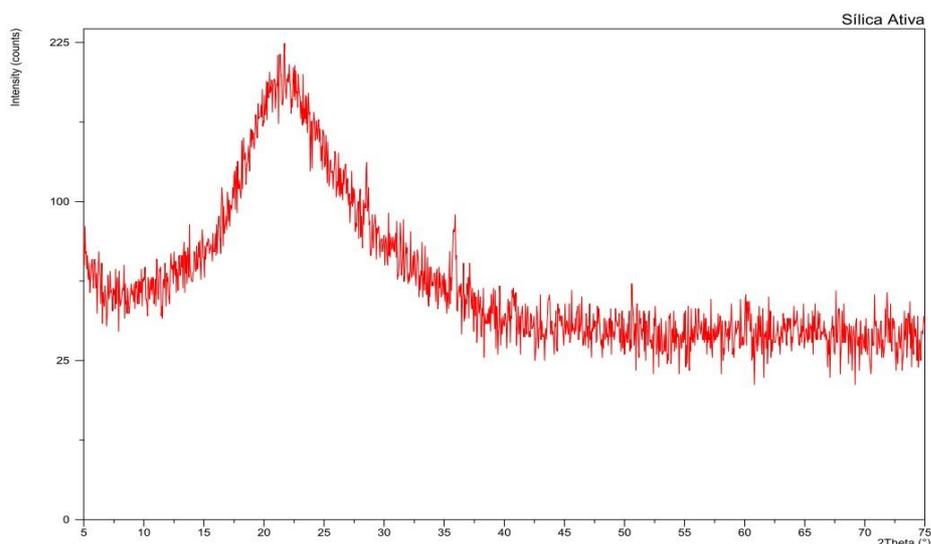
Material	Elementos majoritários (>50%)	Menor quantidade (5%<x<50%)	Elementos traços (<5%)
Sílica ativa	Si	-	K, Ca, Al, Fe, S, Mn, Zn, Rb, Sr

Fonte: LCVmat Unisinos (2019).

A sílica foi analisada no Laboratório de Difractometria de Raios X (IGEO) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), com o auxílio de um difratômetro de Raios X da marca Siemens (BRUKER AXS), modelo D-5000. Foi analisado o intervalo angular de 5° a 27° 2θ. A amostra foi analisada a 0,05°/1s com fendas de divergência e antiespalhamento de 1° e fenda de recepção de 0,2mm.

A caracterização mineralógica da sílica ativa está apresentada no difratograma da Figura 38. A partir do difratograma configura-se um material com características amorfas.

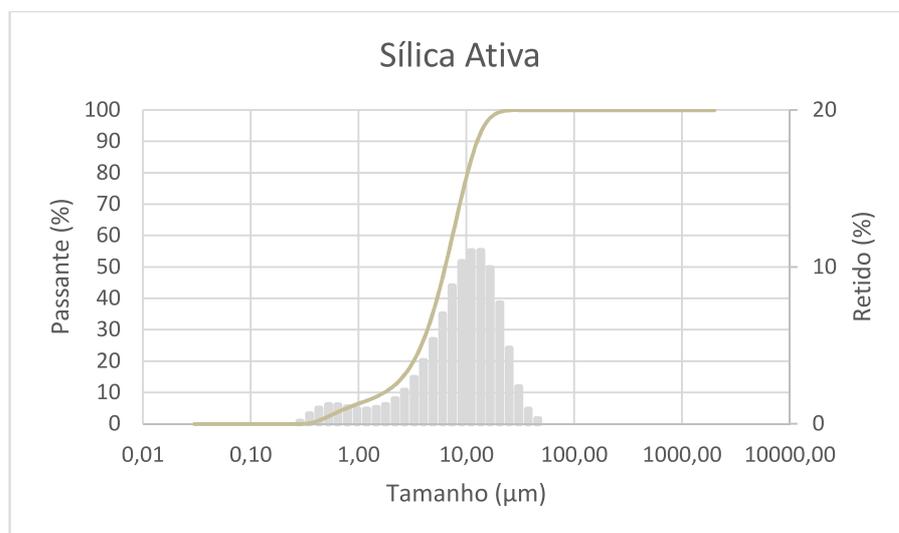
Figura 38 – Difratograma da sílica ativa



Fonte: LCVmat Unisinos (2019).

As dimensões das partículas foram determinadas através do ensaio de granulometria por difração a laser, no LCVMat, com o equipamento Microtac S3500. A Figura 39 apresenta as faixas granulométricas da sílica utilizada.

Figura 39 – Distribuição granulométrica da sílica ativa



Via úmida, tratada com Hex. Na, transparente, IR 1.46 fluxo 10%, ultra ext. 100w 20min Ultr int. 40W 60s

Fonte: LCVmat Unisinos (2019).

Posteriormente, o material foi pesado conforme cada traço e acondicionado em sacos plásticos identificados.

3.2.4 Impermeabilizante por cristalização

O impermeabilizante por cristalização utilizado como adição neste trabalho foi fornecido em embalagens de 18 kg e é composto por cimento Portland, compostos químicos ativos e rastreador químico, conforme descrição do fabricante. Os compostos químicos reagem na presença de umidade do concreto fresco e com os produtos da hidratação do cimento, os quais resultam em uma estrutura cristalina insolúvel nos poros e capilares do concreto. Os ingredientes do aditivo impermeabilizante por cristalização estão apresentados na Tabela 25 e as propriedades físico-químicas estão apresentadas na Tabela 26, conforme ficha técnica do produto.

Tabela 25 – Ingredientes do aditivo impermeabilizante por cristalização

Nome Químico	%
Cimento Portland	65 a 80
CTS-15-1*	10 a 30
CTS-15-2*	5 a 10
Hidróxido de cálcio e magnésio ($\text{CaMg}(\text{OH})_4$)	1,5 a 6
Óxido de hidróxido de magnésio e cálcio ($\text{Ca}(\text{Mg}(\text{OH})_2\text{O})$)	1,5 a 6
Hidróxido de cálcio	1 a 2

*segredo industrial – A porcentagem exata (concentração) da composição foi retida como segredo industrial.

Fonte: Ficha Técnica de Produto - FT 004 fornecida pelo fabricante (2019).

Tabela 26 – Informações sobre propriedades físicas e químicas

Aspecto (estado físico, forma e cor)	Sólido em pó, cinza
Odor e limite de odor	Característico de cimento
pH	10 - 13 (10% em solução)
Ponto de fusão	> 1000°C
Dosagem em relação à massa de cimento	0,8%

Fonte: FISPQ fornecida pelo fabricante (2019).

A proporção sobre a massa do cimento utilizada da adição do impermeabilizante neste trabalho é de 0,8%. A escolha pelo menor valor recomendado tem a finalidade de analisar o produto na situação mais crítica. O uso deste material tem como objetivo selar permanentemente o concreto contra a penetração de água e quaisquer outros líquidos, além de contribuir com a proteção contra agentes agressivos da atmosfera devido a sua baixa permeabilidade. Esse produto é usado em estruturas como reservatórios, estações de tratamento de água e efluentes, túneis, fundações, entre outras obras que necessitem de concretos impermeáveis.

Além disso, também consta na ficha técnica do produto, a sua capacidade em selar fissuras de infiltração de água, com aberturas de até 0,5 mm, de modo a promover a autocicatrização da estrutura. Da mesma forma que ocorre o preenchimento dos poros capilares na presença de umidade, as reações capazes de selar a fissura também dependem da entrada de água pela abertura.

3.2.5 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado é de origem natural quartzosa, proveniente no estado do Rio Grande do Sul. As caracterizações de massa específica e determinação de curva granulométrica foram realizadas de acordo com a NBR NM 52 (ABNT, 2009) e NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Foi determinada a massa específica da areia no Laboratório de Materiais de Construção (LMC) da Unisinos, sendo encontrada a média de massa específica de 2,61 g/cm³ e desvio padrão de 0,002.

A areia utilizada foi lavada e realizada a secagem em estufa com temperatura de 100 °C, num período de 48 horas. Posteriormente, o material foi pesado já conforme cada traço e acondicionado sacos plásticos identificados.

A composição granulométrica da areia pode ser analisada na

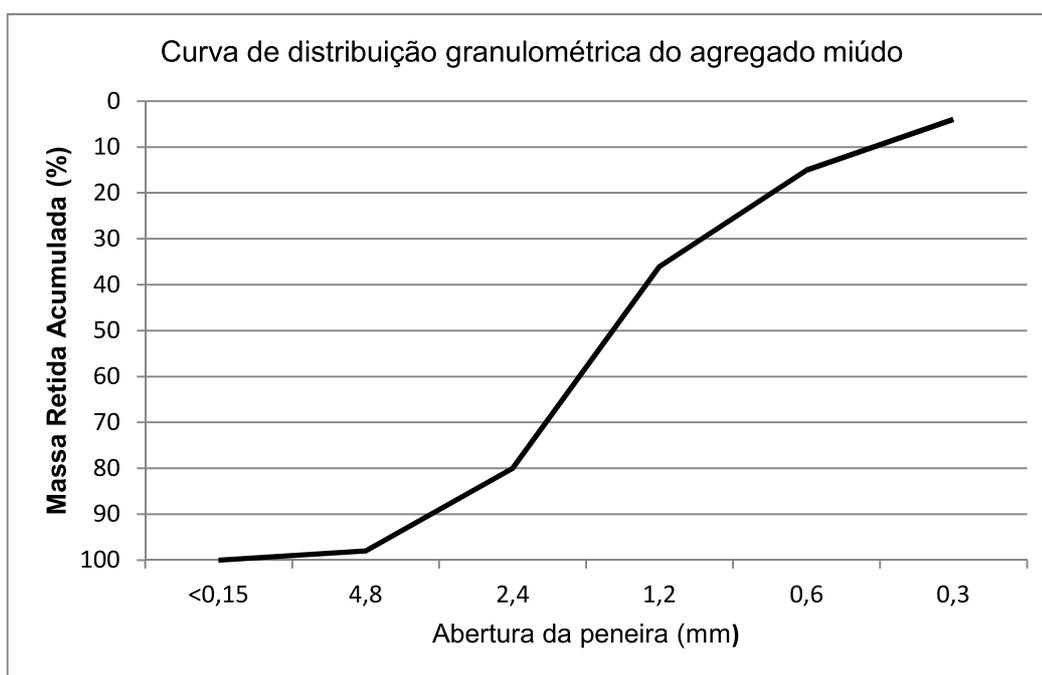
Tabela 27, assim como no Gráfico 2. De acordo com os resultados obtidos, o agregado miúdo pertence à zona utilizável, conforme a ABNT NM 248/2003.

Tabela 27 – Caracterização granulométrica do agregado miúdo natural

Abertura da peneira (mm)	Massa retida (%)	Massa acumulada (%)
4,8	1	1
2,4	3	4
1,2	11	15
0,6	21	36
0,3	44	80
0,15	18	98
<0,15	2	100
Dimensão máxima característica		2,4
Módulo de finura		2,3

Fonte: Elaborado pela autora (2019)

Gráfico 2 – Distribuição granulométrica da areia



Fonte: Elaborado pela autora (2019)

3.2.6 Agregado graúdo

O agregado graúdo natural adotado para a pesquisa é de origem basáltica, proveniente de extração na região de Bento Gonçalves. A granulometria do agregado graúdo natural foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção

(LMC) – UNISINOS, utilizando uma peneira elétrica de marca Telastem, durante 10 minutos. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 28 e no Gráfico 3.

Este agregado foi lavado, para remoção de finos aderidos aos grãos e seco em estufa por 48 horas, a 100°C e guardado em tonéis para posterior utilização. De acordo com os resultados obtidos, o agregado graúdo utilizado encontra-se na faixa granulométrica #12,5 e #4,8mm.

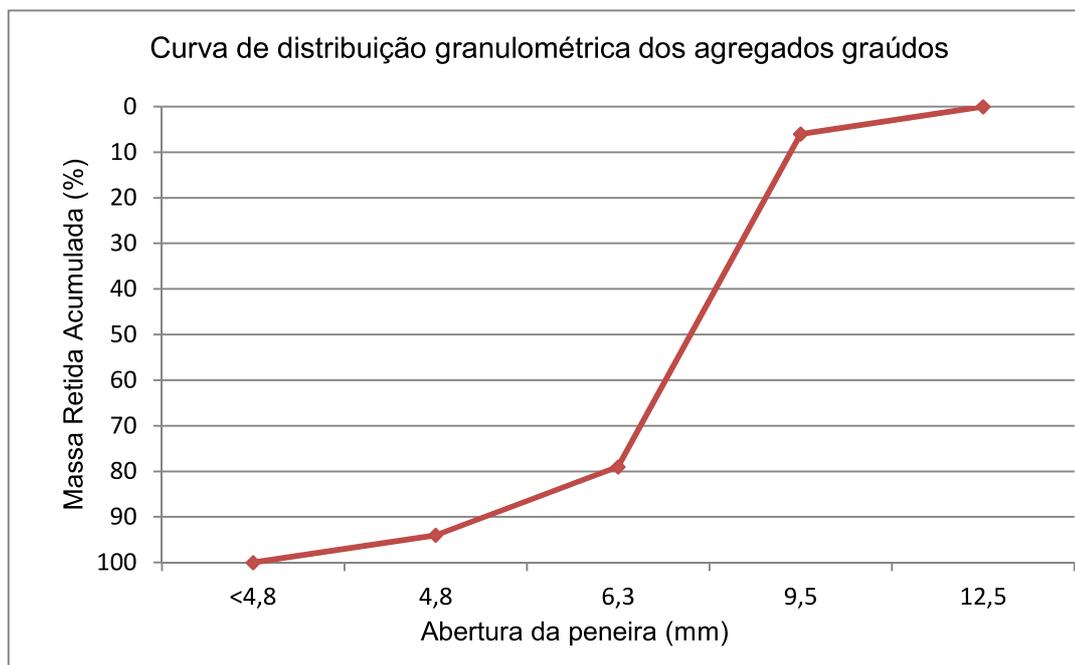
Tabela 28 – Granulometria do agregado graúdo

Abertura da peneira (mm)	Massa retida (%)	Massa acumulada (%)
12,5	0	0
9,5	6	6
6,3	73	79
4,8	21	94
<4,8	0	100
Dimensão Máxima característica (mm)		12,5
Massa específica aparente (g/cm ³)		2,71
Massa específica do agregado saturado com superfície seca (g/cm ³)		2,55

Fonte: Elaborado pela autora (2019)

A massa unitária do agregado graúdo foi determinada pela NM 45 – Método “A”, (ABNT, 2006), a massa específica e a absorção de água foram determinadas de acordo com as normas NM 53 (ABNT, 2009), resultando nos valores de 3,76% de absorção de água, de 2,71 g/cm³ para massa específica e 1,45 g/cm³ para massa unitária.

Gráfico 3 – Distribuição granulométrica da brita



Fonte: Elaborado pela autora (2019)

A escolha desta granulometria se deu devido à adaptação da moldagem de concretos em formas prismáticas no tamanho proposto pela norma NBR 16738 (ABNT, 2019), de 4 x 4 x 16 cm e pelo fato de se obter maior grau de intertravamento em agregados com dimensões menores, favorecendo o aumento da resistência à compressão (CHANDRAPP; BILIGIRI, 2016a).

3.2.7 Água

A água utilizada é proveniente da rede de abastecimento pública de água, da cidade de São Leopoldo.

4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos no programa experimental, a validação através dos conceitos apresentados na revisão teórica e as análises comparativas entre os distintos traços de concreto propostos.

4.1 AVALIAÇÃO DOS ÍNDICES DE RESISTÊNCIA MECÂNICA

A análise dos resultados de resistência mecânica obtidos para corpos de prova de concreto são explorados nos itens a seguir, inclusive comparando-os a outros fatores de durabilidade.

4.1.1 Resistência mecânica à compressão

O ensaio de resistência mecânica à compressão foi realizado nas idades de 7, 28 e 180 dias.

Os valores obtidos nos traços são apresentados na Tabela 29, destacando-se a resistência à compressão média e potencial, ou seja, o maior valor entre as amostras. Os resultados referentes a cada amostra podem ser verificados no **Apêndice D**.

Tabela 29 – Valores obtidos de resistência à compressão

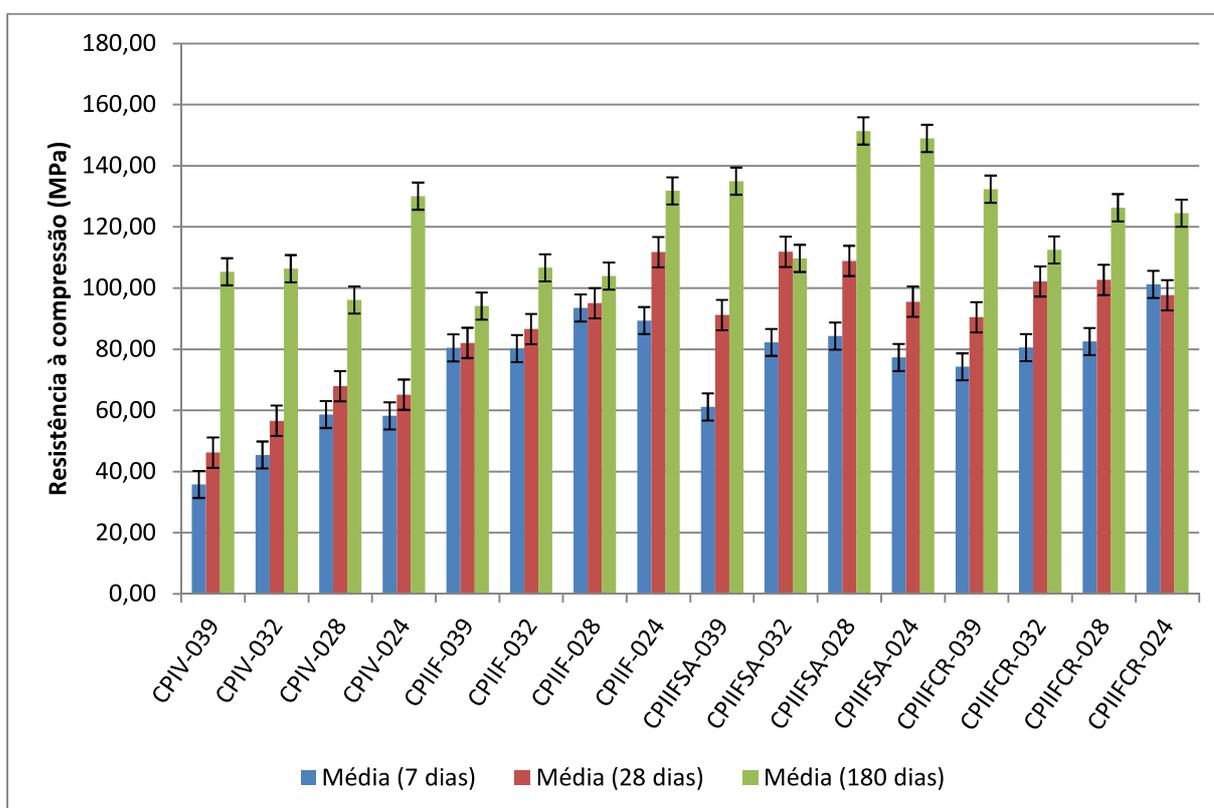
Traço	Resist. Média 7 dias (MPa)	Resist. Potencial (MPa)	Desv. Padrão	Resist. Média 28 dias (MPa)	Resist. Potencial (MPa)	Desv. Padrão	Resist. Média 180 dias (MPa)	Resist. Potencial (MPa)	Desv. Padrão
CPIV-039	35,79	36,03	0,13	46,23	46,79	0,27	105,34	109,06	1,94
CPIV-032	45,45	47,84	1,41	56,62	57,41	0,44	106,37	121,34	4,86
CPIV-028	58,65	60,73	0,65	67,95	70,79	1,00	96,12	102,72	2,23
CPIV-024	58,23	60,43	0,71	65,15	72,72	2,63	130,08	140,05	3,14
CPIIF-039	80,45	81,67	0,70	82,08	87,47	2,32	94,15	98,92	2,28
CPIIF-032	80,24	86,76	2,35	86,64	91,90	1,62	106,67	110,81	2,23
CPIIF-028	93,50	98,68	1,94	95,05	105,50	4,09	103,96	114,90	4,85
CPIIF-024	89,40	100,10	4,67	111,78	115,39	1,67	131,81	134,01	0,77
CPIIFSA-039	61,14	63,16	0,99	91,20	93,08	0,89	134,98	136,72	0,85
CPIIFSA-032	82,25	85,51	1,63	111,89	115,33	1,41	109,72	112,85	1,63
CPIIFSA-028	84,32	92,49	2,46	108,90	114,53	2,11	151,38	156,63	2,51
CPIIFSA-024	77,32	87,53	3,52	95,56	108,35	7,51	148,95	168,22	6,03
CPIIFCR-039	74,27	79,34	1,77	90,47	98,11	4,34	132,37	139,16	2,58

CPIIFCR-032	80,56	87,37	2,35	102,20	104,49	1,06	112,49	115,68	1,39
CPIIFCR-028	82,53	91,35	3,95	102,71	103,35	0,34	126,31	132,87	2,27
CPIIFCR-024	101,22	103,38	1,15	97,71	108,85	4,10	124,50	126,83	1,32

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

A Figura 40 apresenta, de maneira holística, os valores obtidos de resistência à compressão média nos traços desenvolvido, estimados com seus respectivos desvios padrões.

Figura 40 – Resistência média dos traços em cada idade



Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Verificou-se que os traços se encontraram de acordo com o preconizado pela ABNT NBR 6118:2014, tendo sua resistência evoluindo entre os traços, analisando-se a idade de 180 dias.

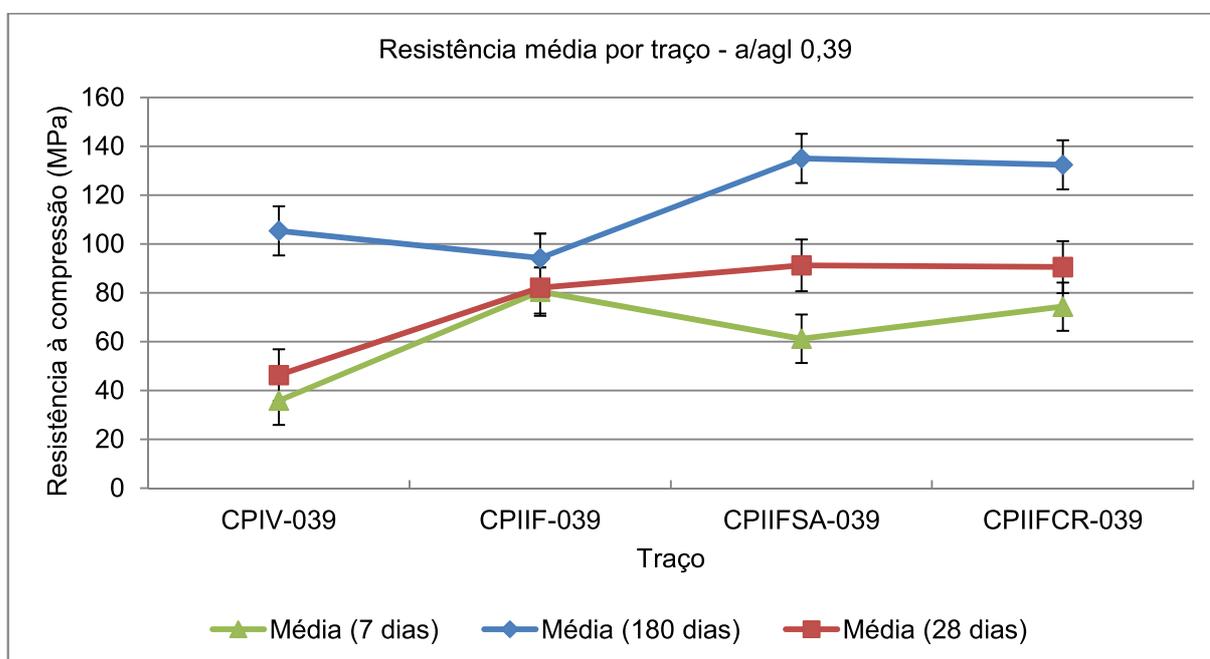
Assim como Oertel et al. (2014) constataram, nesta pesquisa os materiais com adição mineral de sílica ativa (SA) obtiveram uma resistência à compressão maior do que a de um concreto de referência (sem adição mineral) para uma mesma relação água/aglomerante. Com a substituição de clínquer por sílica ativa, ocorre o efeito fíler, propiciando a criação de novos pontos de nucleação e pela reação pozolânica.

Segundo Berodier e Scrivener (2014), o aumento da resistência é atribuído, em parte, à diminuição da distância interpartículas.

4.1.2 Análise da Resistência à compressão x relação a/agl

Comparando-se os materiais de mesma relação água/aglomerante, como mostra a Figura 41, pode-se observar que os traços de referência obtiveram uma resistência média maior que os demais, nas primeiras idades, sendo que esse fato corrobora para o entendimento dos acontecimentos da microestrutura.

Figura 41 – Resistência média em cada idade por relação a/agl



Fonte: Elaborado pela autora (2020)

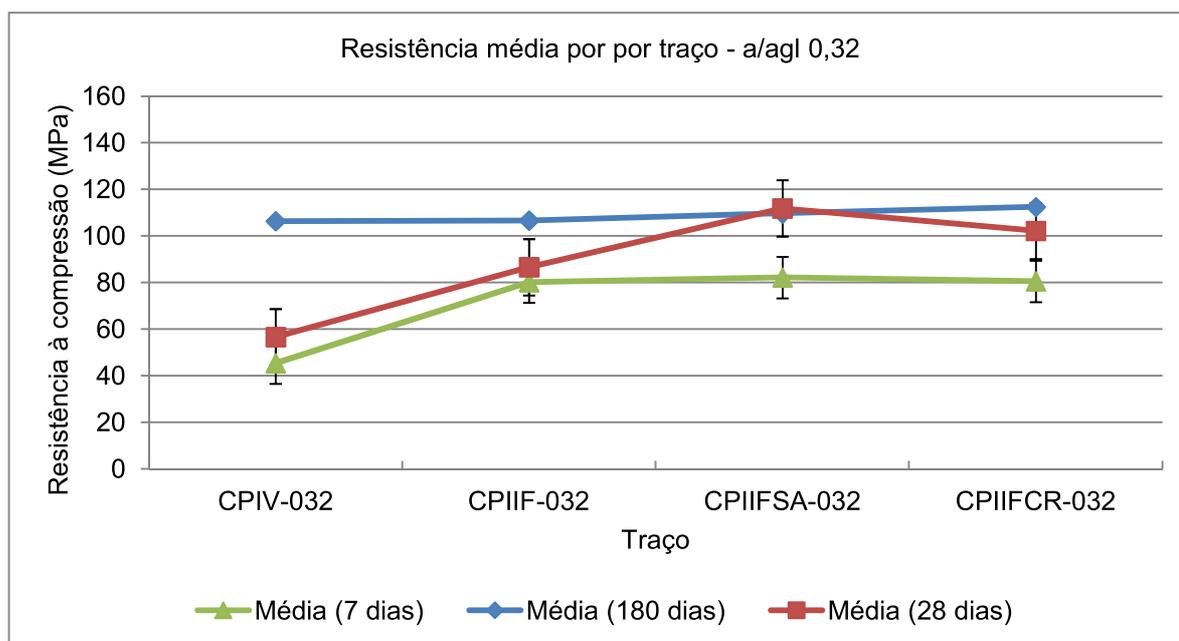
Nota-se que o emprego tanto do aditivo cristalizante, quanto da sílica ativa, contribuíram para o aumento de resistência nas maiores idades, comparando-se aos traços de referência. O traço CPIIFCR-0,39 atingiu 130,08 MPa aos 180 dias, enquanto que o traço de referência CPIIF-0,39 chegou a 106,37 MPa.

O início precoce do pico de depleção do sulfato antes do pico principal de liberação de calor demonstrado pelas pastas com CR pode ser explicado pela interação cimento-aditivo. À medida que o CR provoca o aumento da área de superfície disponível para hidratação, a demanda por sulfato de cálcio tende a aumentar. De acordo com Hanehara e Yamada (2008); Sandberg e Roberts (2005), os aditivos exercem impacto físico-químico especialmente na hidratação dos

aluminatos, visto que o C_3A afeta a quantidade e a superfície específica dos hidratos produzidos nas idades iniciais.

Observa-se ainda pela Figura 42 que, ao final do experimento, aos 180 dias, todos os traços alcançaram valores de resistência muito próximas uns aos outros.

Figura 42 – Resistência média em cada idade por relação a/agl



Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Os concretos elaborados com o cimento CPII-F demonstraram um desempenho de resistência favorável nos primeiros 7 dias de idade. Autores Helene e Terzian (1992) confirmaram que a finura baliza a velocidade de hidratação do cimento e que o aumento ocorre no mesmo sentido da resistência à compressão nas primeiras idades, mas em contrapartida, ocorre liberação maior de calor de hidratação.

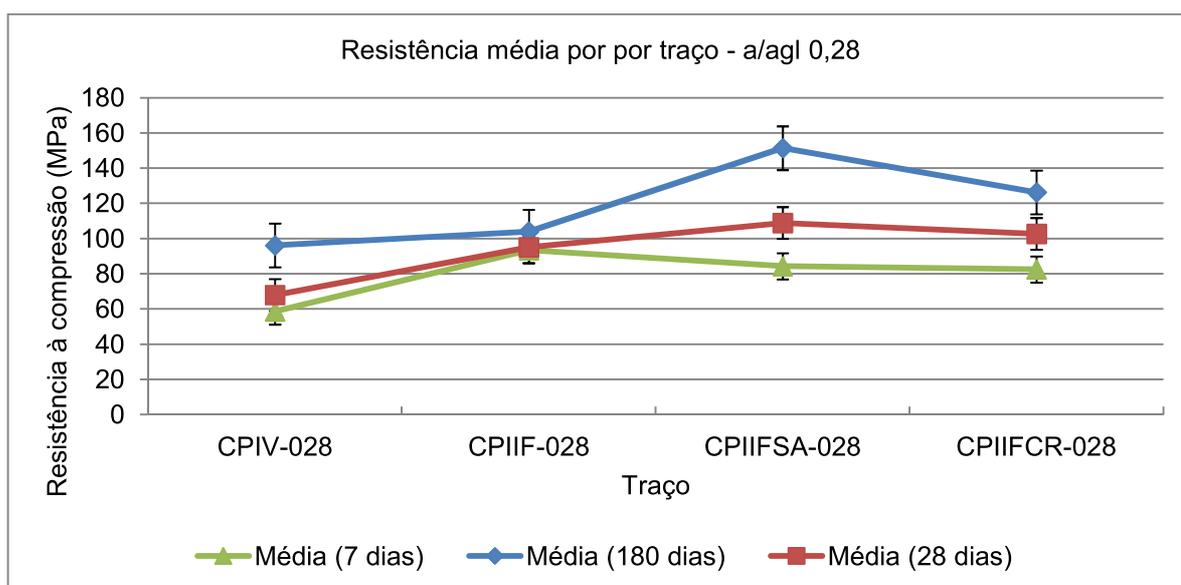
O crescimento da resistência do concreto com CPIV, aos 28 dias de idade, foi lento em relação aos demais, demonstrando uma característica conhecida desse tipo de cimento e assim retardando o ganho a resistência à compressão dos corpos de prova. O resultado final dessas ações simultâneas se traduz em aumento da compacidade, da resistência mecânica, da durabilidade e, portanto, do desempenho.

Outro ponto de vista adotado por alguns autores é em relação à finura do material, devido à sua composição granulométrica informa como se comporta a distribuição, ou seja, ela intervém expressivamente na resistência à compressão (BATTAGIN, 2011).

Girardi (2014) afirma que, considerando a mesma composição química, fica claro que quanto maior a superfície específica do cimento Portland, maior a resistência à compressão nas primeiras idades, ou seja, o grau de dissolução dos grãos é maior nas primeiras idades devido à área superficial exposta à água ser superior. Contudo, no decorrer do tempo, haverá a estabilização e as resistências irão se equivaler quando ocorrer à dissolução quase que total dos grãos maiores.

Analisando os dados com a SA os traços com substituição de cimento Portland por SA e também os traços com aditivo cristalizante possuem uma resistência média muito superior à do que a referência e, também, do traço apenas com cimento CP IV, para idade de 180 dias. Nas primeiras idades, de 1 a 7 dias, os maiores resultados de resistência à compressão foram obtidos pelo traço de referência, à base de cimento CII F (Figura 43).

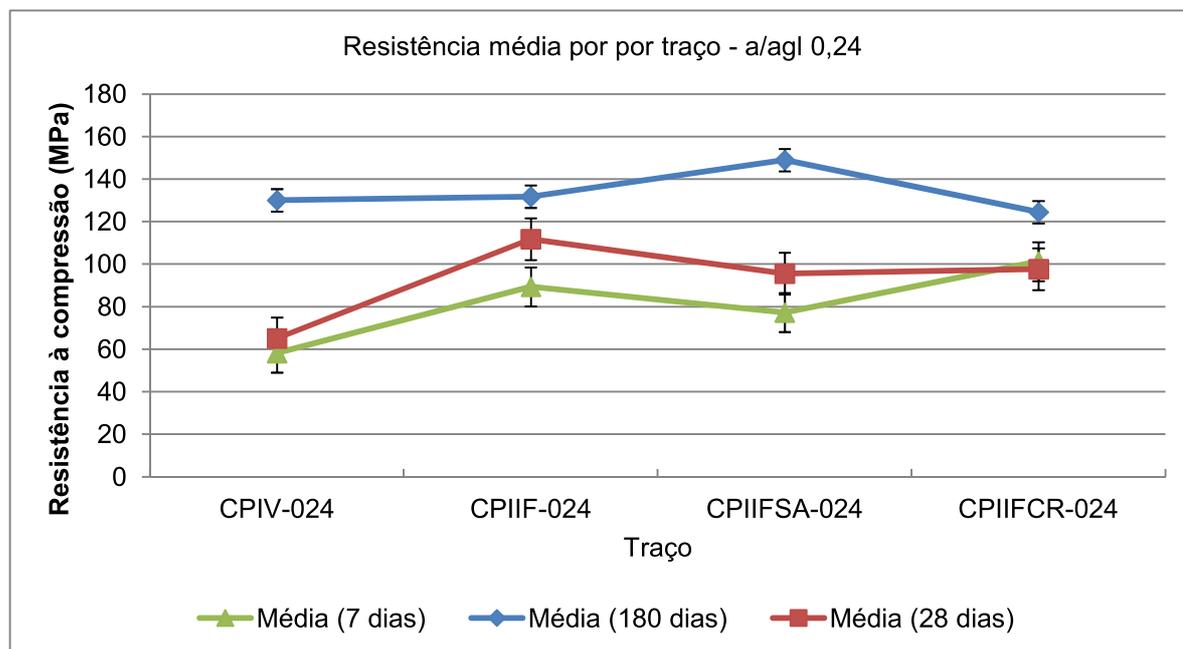
Figura 43 – Resistência média em cada idade por relação a/agl



Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Aos 7 dias, o CPIIFCR-028 e o CPIIFSA-028 apresentaram resistências mais próximas, de 95,56 MPa e 108,90 MPa, respectivamente. Já aos 180 dias, o CPIIFCR-028 obteve 148,95 MPa, enquanto que o traço CPIIFSA-028 apresentou uma resistência 151,38 MPa. Ainda assim, em comparação ao traço de referência CPIIF028, o CPIIFCR-028 apresentou uma diferença de 35% a mais de resistência aos 180 dias.

Figura 44 – Resistência média em cada idade por relação a/agl



Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Aos 28 dias, o CPIIF-024 atingiu 102,20 MPa, possuindo, dentre os traços de mesma relação a/agl, a maior resistência nesta idade. No entanto, a longo prazo, o traço com SA apresentou uma elevação considerável de sua resistência, atingindo 126,31 MPa, contra 112,49 MPa do traço referência. O traço com SA teve desempenho melhor, neste quesito, do que o próprio traço com CPIV.

Fica destacado, em todos os gráficos acima, que o teor de substituição de 20% de SA nas idades iniciais não apresenta valores proeminentes em relação aos demais. No entanto, nas maiores idades, a resistência destes traços supera os traços sem adições. Esta situação também foi avaliada por Paula (2006), onde se conclui que a reatividade entre a sílica ativa e os hidróxidos do cimento ocorre em reação secundária, e, portanto, não aparece nas idades iniciais, proporcionando um aumento nas propriedades mecânicas, ou seja, um aumento de resistência.

Damone e Illston (2010) comentam que as partículas de MCS têm dimensões muito pequenas e sua utilização no concreto tem como efeito geral um aumento na resistência a longo prazo em comparação com a mistura de cimento Portland equivalente, sem adições. Além disso, também proporciona melhor empacotamento da matriz no estado fresco, levando a uma menor porosidade no concreto endurecido, em especial na zona de transição pasta x agregado.

As relações água/aglomerante são muito próximas umas das outras e também muito pequenas. Diamond (1983), explica em seu estudo que a reação pozolânica, decorrente do uso da sílica ativa, é capaz de remover os álcalis da solução do poro, sendo que esse efeito se mostrou mais proeminente para pastas com maior relação a/lig. Segundo o autor, isso pode indicar que o produto resultante da reação pozolânica, ou seja, o C-S-H pozolânico requer considerável quantidade de água livre para se formar. De fato, a água é um elemento importante, necessário para que as reações pozolânicas e a química do cimento, em geral, se desenvolvam. Ela participa não só como meio, possibilitando a ocorrência das reações de dissolução – precipitação, mas também é reagente dos produtos formados, C-S-H e C-S-H pozolânico.

Os traços produzidos apenas com CP IV também apresentam um aumento de resistência ao logo do tempo, com valores muito semelhantes ao concreto de referência aos 180 dias.

Para traços de mesma relação água/aglomerante, ficou evidente que as resistências à compressão dos concretos com substituição de sílica ativa (20%) apresentam uma resistência à compressão inicial mais baixa do que o concreto sem adição (CPIIF) em sete dias. Isto também foi percebido no trabalho de (SANJUÁN, et al., 2015), que concluiu que uma finura mais alta permite uma resistência à compressão mais alta e em 28 dias.

Destaca-se, ainda, que as discrepâncias não prejudicam a análise comparativa entre os traços, dado que em termos de comportamento global, verificou-se a progressão da resistência à compressão em todos os traços analisados.

Os traços produzidos apenas com CP IV tiveram um ganho de resistência satisfatório, principalmente para baixas relações a/agl e, de acordo com o comentado na revisão bibliográfica, em idades mais avançadas, alcançou resistência média maior que o traço produzido apenas com CPIIF, nas relações a/agl de 0,24 e 0,39. Esse comportamento se deve principalmente ao avanço da reação pozolânica, além de um possível efeito de empacotamento da mistura, em razão do efeito fíler, que preenche as partículas entre os grãos de cimento, aumentando a compacidade da mistura, como também visto por Souza (2011).

Conforme apresentado pela Figura 41, não houve um comportamento padrão verificado entre os distintos traços.

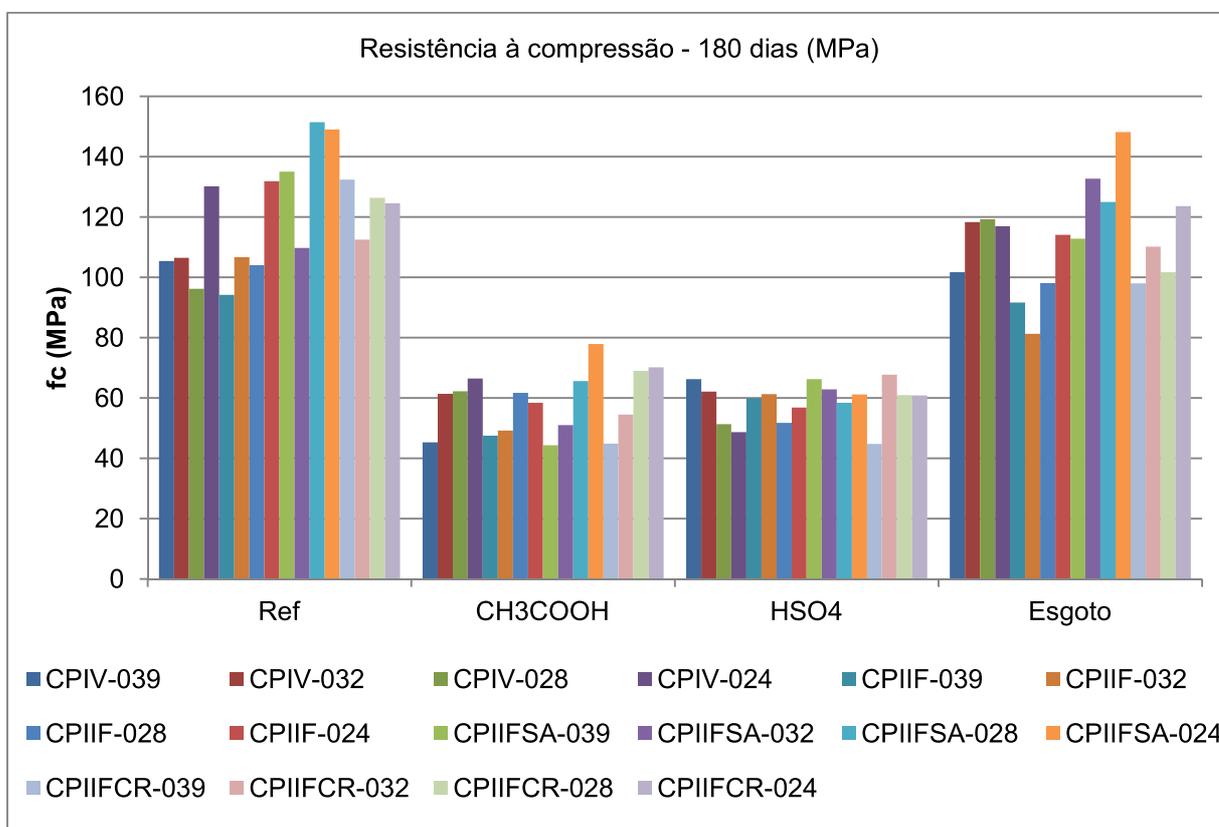
O traço CPIIFCR-024 apresentou oscilação do valor de resistência à compressão, com queda nos valores aos 28 e aos 180 dias. Os pontos discrepantes deste traço podem ser resultado de alguma falha na realização do ensaio, regularização da amostra (superfície linear), ou ainda, ocorrências de vazios no interior dos corpos de prova.

Os traços CPIV-024, CPIIF-024 e CPIIFSA-024 apresentaram-se com a resistência à compressão sempre em ascendência ao longo do tempo, sendo que o traço com sílica ativa obteve um destaque neste crescimento, mostrando o maior valor de resistência em todas as idades de análise. A constatação de resistências superiores às de projeto pode ser atribuída a três fatores principais: a maior resistência dos cimentos modernos, o uso de material pozolânico e a hidratação de longo prazo.

4.1.3 Resistência mecânica por cada agente de deterioração x tipo de aglomerante

A Figura 45 apresenta graficamente uma visão geral de todos os valores médios obtidos de resistência à compressão aos 180 dias, após o ataque ácido.

Figura 45 – Resistência à compressão após o ataque ácido.



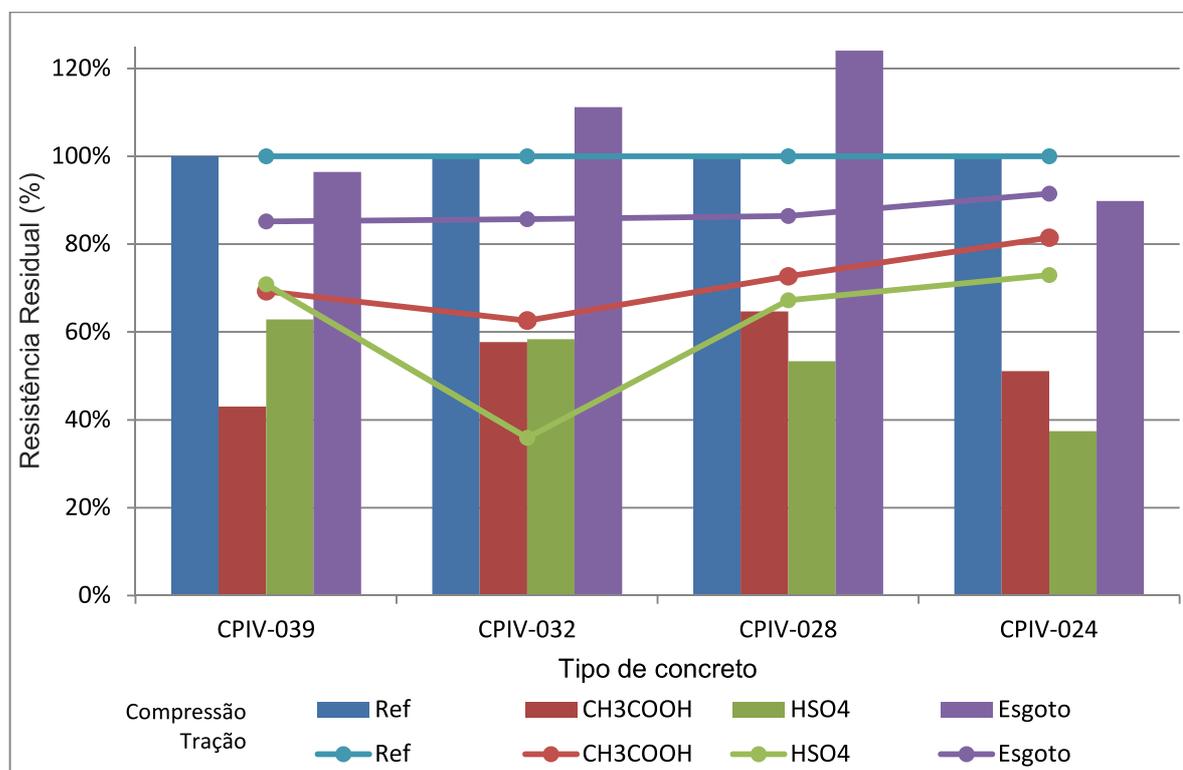
Analisando as resistências dos materiais após o ataque ácido, fica clara a deterioração causada pelos ácidos sulfúrico e acético. A resistência máxima desses traços após o ataque ácido não passou de 80 MPa, enquanto que, os traços submetidos ao esgoto mostraram uma perda de resistência muito pequena

4.1.3.1 Relação entre a resistência residual à tração e à compressão por tipo de aglomerante

Da Figura 46 à Figura 49 apresenta-se a relação entre a resistência à compressão e a resistência à tração dos concretos após o final do último ciclo. Para todas as amostras houve redução da resistência ao longo do tempo, devido ao ataque químico.

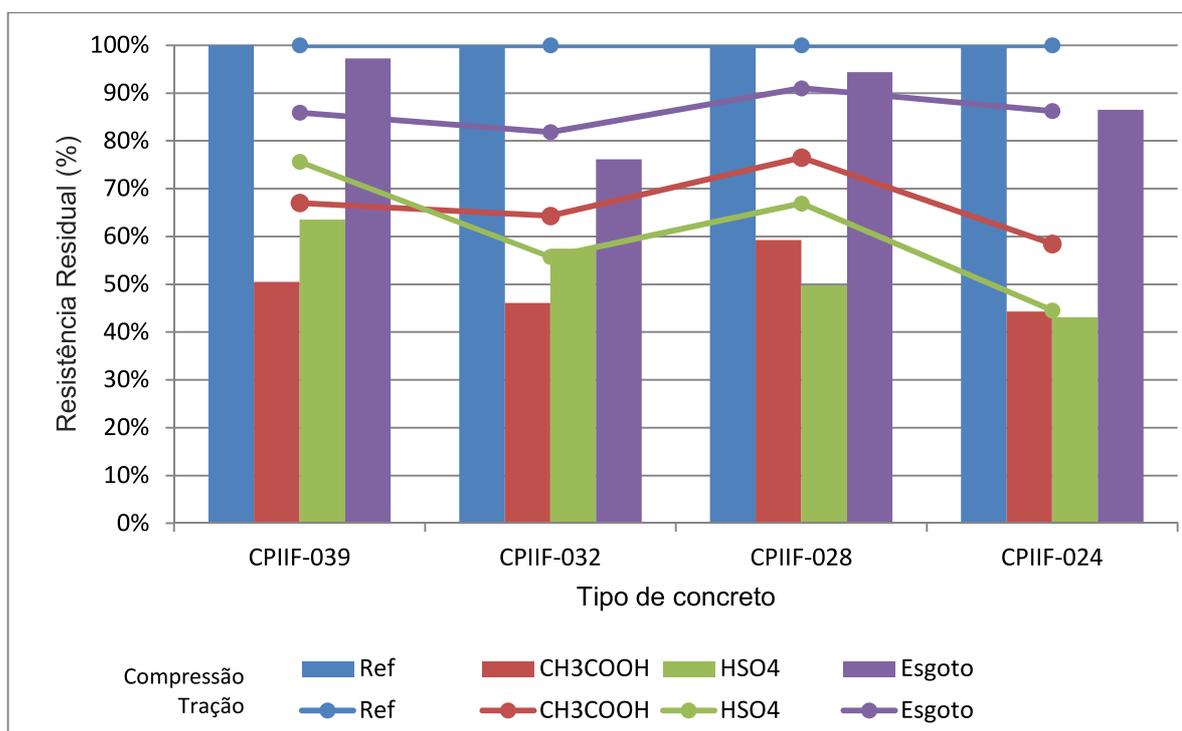
Considera-se a resistência integral como sendo a referência para o gráfico, sendo o gráfico de linhas a diminuição da resistência à tração; e o gráfico de barras, a resistência residual à compressão.

Figura 46 – Relação entre as resistências residuais após o ataque ácido do concreto com cimento CPIV



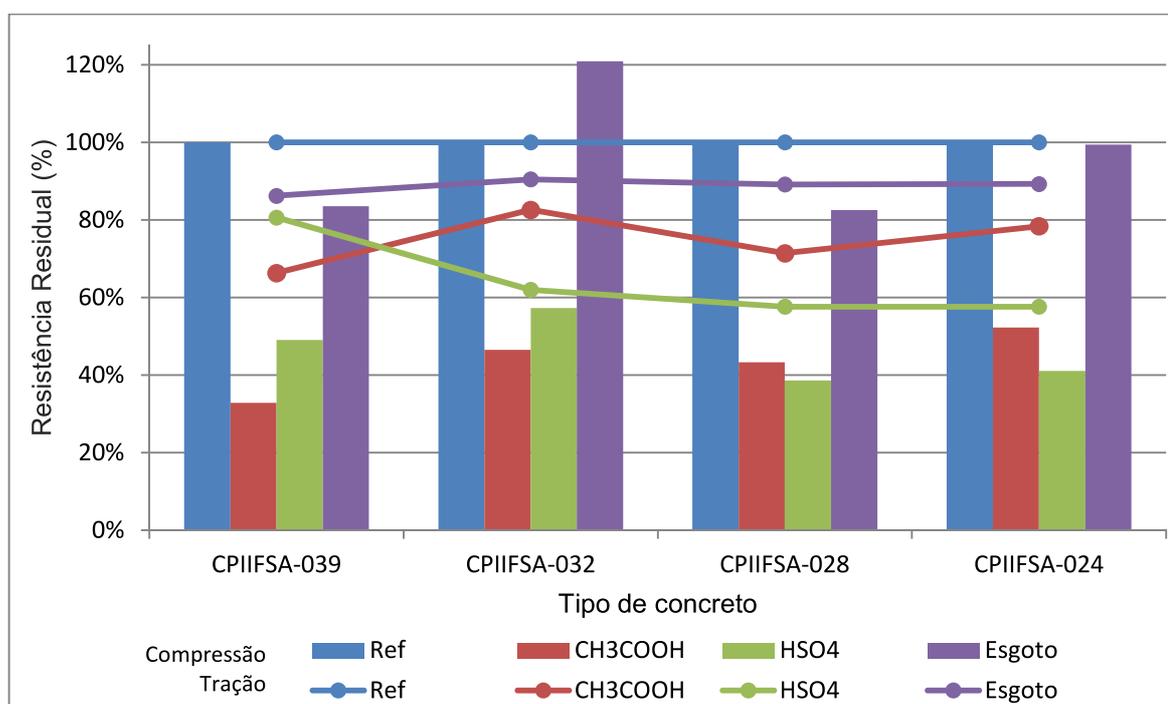
Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Figura 47 – Relação entre as resistências residuais após o ataque ácido do concreto com cimento CII-F



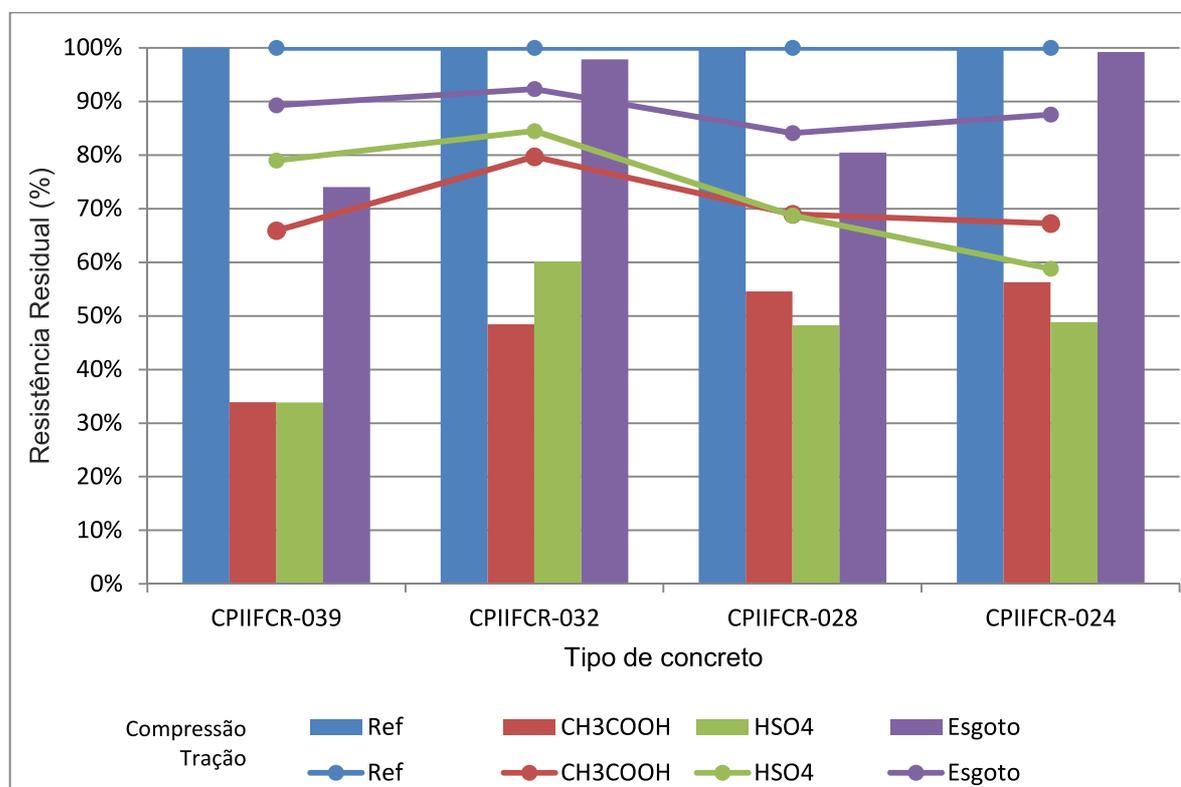
Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Figura 48 – Relação entre as resistências residuais após o ataque ácido do concreto com cimento CII-F e adição de Sílica Ativa



Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Figura 49 – Relação entre as resistências residuais após o ataque ácido do concreto com cimento CPII-F e adição de aditivo Cristalizante



Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Em relação ao ácido sulfúrico, os traços CPIIF-039 e CPIV-028 foram os que menos perderam resistência à compressão, diminuindo 36% e 37%, respectivamente. Já os que mais sofreram queda de resistência foram os traços CPIIFCR-039, o CPIIFCR-032, CPIV-039, seguido do CPIV-032, perdendo 66%, 63%, 61% e 59% da resistência à compressão.

Após o contato com ácido sulfúrico, os traços CPIIFSA-028, CPIIF-024 e CPIIF-032 sofreram uma queda na resistência à tração de 64%, 55% e 44%, respectivamente.

O concreto produzido apenas com CPIIF e relação a/agl de 0,28 apresentou a menor perda de resistência entre todas as misturas analisadas. Pode-se concluir que este traço manteve sua resistência à compressão após ciclos de ácido acético.

O traço CPIIFCR-039 perdeu 67% da sua resistência à compressão após ataque de ácido acético.

Este comportamento é repetido para todos os ácidos: acético e sulfúrico, e no esgoto, o que apresentou, inclusive, ganho de resistência nas amostras; e concorda com os resultados encontrados na variação de volume e massa.

Ao contrário do esperado inicialmente, os concretos com cimento CP II F e adição de sílica (CPIIFSA) em geral apresentaram maior redução na resistência à compressão. O concreto CPIIFSA-039, por exemplo, foi o que apresentou a maior perda de resistência, perdendo 67% da resistência à compressão após o ataque de ácido acético. Uma possível explicação para esse fenômeno é o menor percentual de vazios destes concretos com menos espaços e, portanto, para acomodar produtos expansivos provenientes das reações deletérias. Por outro lado, cabe observar que o concreto CPIIFSA com menor relação a/agl (CPIIFSA024) perdeu apenas 22% da sua resistência à tração e 48% da resistência à compressão após o ataque. Neste caso, é possível que a menor permeabilidade do material tenha reduzido o ingresso dos agentes agressivos, compensando assim o fato de ter menor espaço interno para a acomodação de reações expansivas.

Os concretos produzidos apenas com cimento Portland CPIIF e CR foram as que mais sofreram com a ação dos ácidos, pois levaram aos maiores valores de redução percentual de resistência, sendo que o traço CPIIFCR-039 teve resistência reduzida em 66%, tanto pelo ácido acético quanto pelo ácido sulfúrico.

Da mesma forma, o traço CPIIFCR-028 foi drasticamente afetado pelo ácido sulfúrico levando a uma redução de 51%, seguido por ácido acético, com 45% de diminuição da resistência à compressão.

Mehta e Monteiro (1994) comentaram que o ácido acético poderia estar sendo negligenciado por outros autores, quando comparado a ácidos minerais como o ácido sulfúrico, corroborando com os resultados desse experimento, pois mostram que, ao considerar um somatório de todas as perdas causadas por cada tipo de agente agressivo, observa-se que a ação deletéria é causada em maior grau pelo ao ácido acético. Este fato notado no experimento é muito relevante, pois mostra a potencial agressividade do ácido acético em relação à resistência mecânica.

Quanto à resistência à tração, entretanto, o ácido sulfúrico causou maiores danos, causando uma redução de 64% da resistência do traço CPIIFSA-028 e 55% de perda de resistência no traço CPIIF-024.

Nas amostras submersas em esgoto, houve um aumento de 24% da resistência à compressão no traço CPIV-028. É possível que isso se deva às reações pozolânicas ao longo de todo o período em que a amostra ficou submersa. O mesmo ocorreu com o traço CPIIFSA-032 que aumentou a resistência à

compressão em 21% e CPIIFSA-032, que aumentou 11% da resistência mecânica, quando submetido ao esgoto.

Conforme relatado por De Belie et al. (2002), esse processo de degradação ocorre naturalmente de maneira muito lenta, levando-se anos até que sinais de corrosão sejam observados. E, em contrapartida, o corpo de prova submerso no esgoto (que varia, diariamente, de acordo com a carga orgânica, temperatura, pH, etc.) pode encontrar um ambiente propício para ocorrer uma hidratação do concreto estendendo o período de cura.

Um fator determinante para a ocorrência desta pequena degradação observada no ensaio in loco é que, quanto mais concentrado o esgoto que adentra a estação, maior é a quantidade de potenciais agentes agressivos ao concreto e, conseqüentemente, maior será a probabilidade de degradação do concreto da estação. Conforme já explanado, a DQO, parâmetro responsável por avaliar a oxidação da matéria orgânica quimicamente, relaciona-se à produção de sulfetos, pois ocasiona uma maior liberação de gás sulfídrico para o ambiente (CHERNICHARO, 2007).

Com a variação da vazão, as unidades de tratamento apresentam, assim como no ensaio acelerado, variação nos níveis de esgoto dentro de seus tanques proporcionando ciclos de molhagem e secagem, o que, conseqüentemente, oportuniza uma deterioração mais rápida das regiões expostas a essa variação. Os locais com variação do nível do efluente em contato com o concreto são regiões com grandes danos em detrimento das regiões que permanecem o tempo todo inundadas, pois a lâmina do fluido dificulta o ingresso dos gases aos poros do concreto, o que acaba inibindo seu potencial agressivo, ou com relação a regiões expostas totalmente à fase gasosa, embora estas também apresentem grandes deteriorações. Kim e Lee (2009) constataram em seus estudos que a resistência à compressão do concreto exposto a ciclos de molhagem e secagem reduziu 50% em comparação com uma amostra localizada em região totalmente emersa (abaixo do nível do esgoto) e exposta às condições atmosféricas. Amostras parcialmente submersas estudadas por Bond et al. (2014) apresentaram níveis de desagregação do concreto bem mais elevados do que as amostras expostas somente à ação da fase gasosa, com perdas de 3 a 15 mm após 45 meses de exposição, enquanto as amostras expostas somente à ação de gases perderam entre 1 e 8 mm. Mori et al. (1992) também relatam que a região próxima à variação do nível do esgoto foi

mais severamente desagregada e que a crista também sofreu desagregação intensa. Os autores expõem ainda que grandes taxas de desagregação ao redor do nível do esgoto são devidas à disponibilidade de nutrientes para as bactérias acidófilas provenientes do esgoto e, após a deterioração, os produtos desta transformação são carregados, acelerando ainda mais o processo de degradação.

A porosidade total - incluindo o espaço capilar - de uma matriz de cimento diminui com o aumento do tempo de cura, uma consequência esperada devido ao preenchimento do espaço entre as partículas com os novos produtos da hidratação. Em materiais à base de cimento, incorporados com sílica ativa, o aumento do tempo de cura fornece uma maior probabilidade de formação de uma porosidade descontínua, com uma maior proporção de capilares menores em sua estrutura. Além disso, o diâmetro médio dos poros muda em função do tempo de cura, o que pode estar relacionado com a restrição da mobilidade da água de pastas com diferentes composições (DUREKOVIC, 1995).

4.2 AVALIAÇÃO DOS ÍNDICES FÍSICOS

Os processos físicos que podem afetar a durabilidade do concreto são investigados a partir da absorção de água por capilaridade e a análise da variação de massa e volume.

4.2.1 Absorção de água por capilaridade

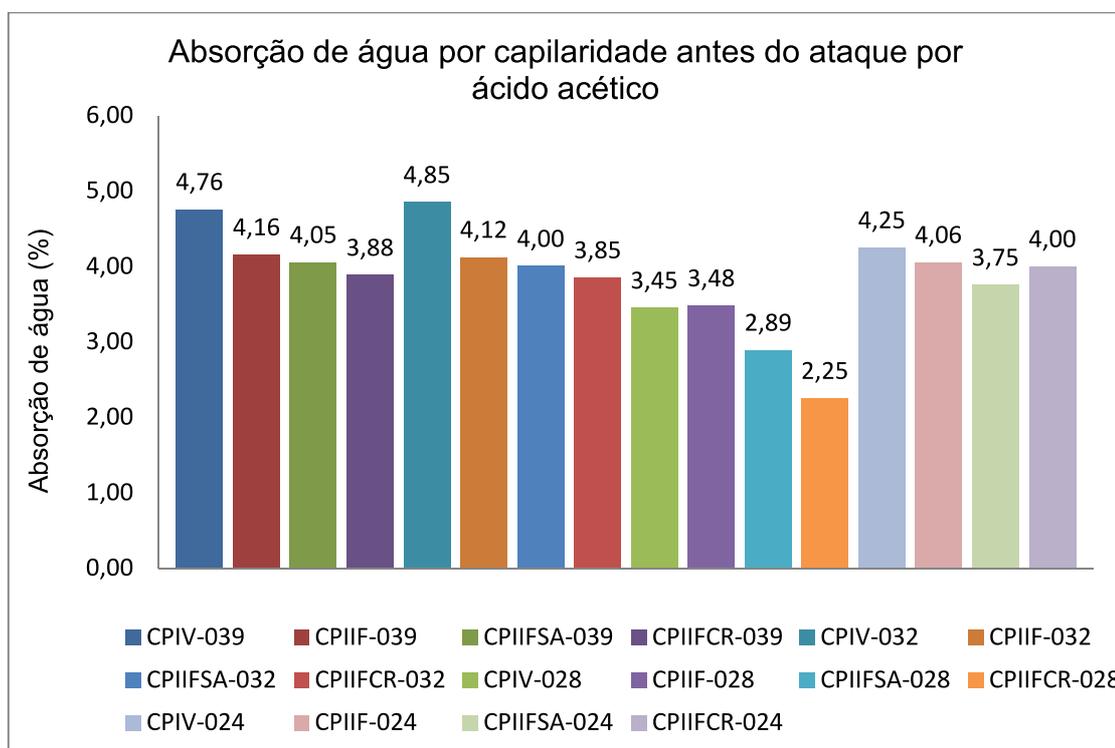
A verificação da absorção de água por capilaridade é explorada

Os resultados deste ensaio, que simula a forma de ascensão capilar da água no concreto endurecido são avaliados considerando as peculiaridades do ácido acético e do ácido sulfúrico.

4.2.1.1 Análise da absorção de água por capilaridade antes e após deterioração por ácido acético

Os valores médios são obtidos a partir das três amostras para os índices físicos de absorção de água. A Figura 50 é alusiva aos resultados de absorção de água para os distintos traços de concreto antes do ataque por ácido acético.

Figura 50 – Resultados obtidos de absorção de água (valores médios) antes do ataque por ácido acético



Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Observando os traços de produzidos apenas com CPIV (CPIV-039 a CPIV-024), percebeu-se uma linearidade, absorvendo menos água os traços com menor relação a/c. Pode-se observar que tanto os traços com cimento CPIV, quanto os traços com cimento CP II-F demonstraram desempenho muito similar, sendo que os corpos de prova produzidos com CP II-F absorveram, ligeiramente, menos água por capilaridade.

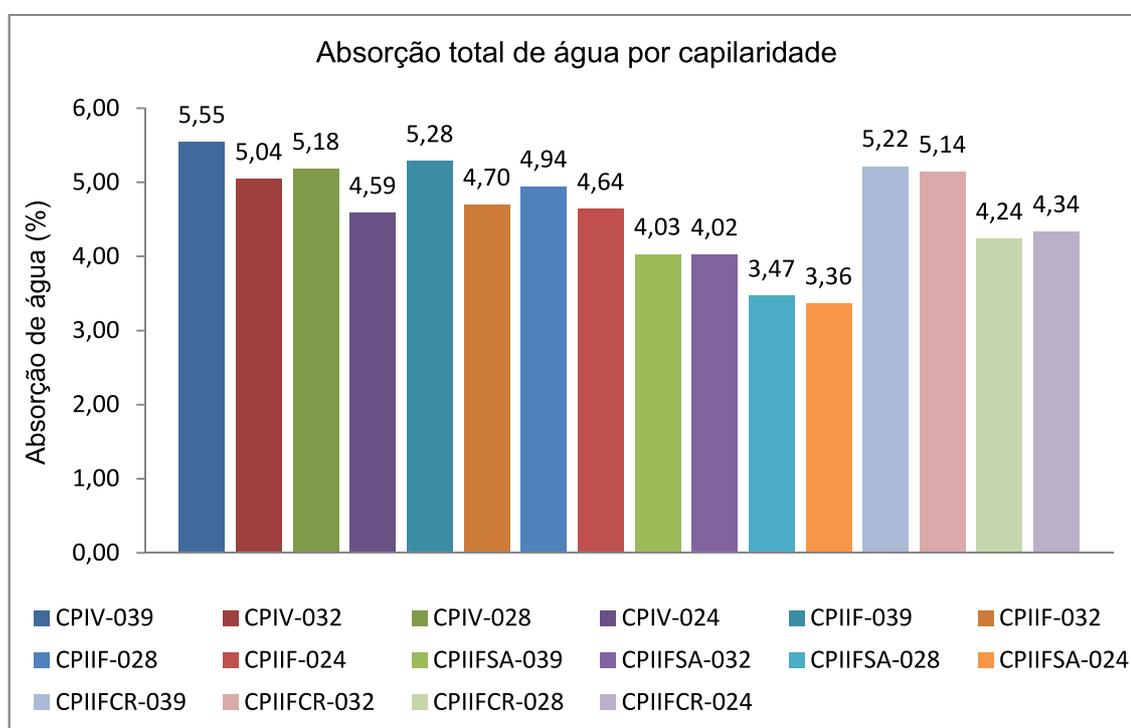
Os traços com Sílica Ativa tiveram uma diminuição da absorção de água antes do ataque químico. Comparando cada traço com e sem SA, houve uma redução na absorção de 2,4% entre o CPIIF-0,39 e o CPIIFSA-0,39; 2,8% entre o CPIIF-0,32 e o CPIIFSA-0,32; 16,9% entre o CPIIF-0,28 e o CPIIFSA-0,28 e 7,4% entre o CPIIF-0,24 e o CPIIFSA-0,24.

O aditivo cristalizante contribui com a diminuição da absorção de água antes do ataque químico. Comparando cada traço com e sem aditivo cristalizante, houve uma redução na absorção de 6,5% entre o CPIIF-0,39 e o CPIIFCR-0,39; 6,6% entre o CPIIF-0,32 e o CPIIFCR-0,32; 35,3% entre o CPIIF-0,28 e o CPIIFCR-0,28 e 1,4% entre o CPIIF-0,24 e o CPIIFCR-0,24.

Este comportamento corrobora com o comprovado por Jalal et al. (2012), em análise microestrutural realizada em MEV em concretos de alta performance fabricados com sílica ativa mostraram que a distribuição uniforme das nanopartículas no concreto melhorou consideravelmente a estrutura dos poros do material.

A Figura 51 é referente aos resultados de absorção de água para os distintos traços de concreto após o ataque por ácido acético, aos 112 dias de idade.

Figura 51 – Resultados obtidos de absorção de água (valores médios) após o ataque por ácido acético



Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Conforme se verifica, no ensaio realizado, os traços com adição de material pozolânico (CPIIFSA-039 a CPIIFSA-024) apresentaram uma relação direta decrescente entre os valores de relação água/agl e absorção de água: quanto menor a relação água/aglomerante, menor a absorção média total.

Os traços que menos absorveram água por capilaridade foram os produzidos com adição de sílica ativa (SA).

Já na verificação realizada para os traços de CPIV-039 a CPIV-024, percebeu-se que a linearidade não se manteve. Pode-se observar que tanto os traços com cimento CPIV, quanto os traços com cimento CP II-F demonstraram

desempenho muito similar, sendo que os corpos de prova produzidos com CP II-F absorveram, ligeiramente, menos água por capilaridade. Nota-se, apenas que o traço com maior relação a/agl é o que possui maior absorção média.

Em estudos anteriores, Ghafari, et al. (2012; 2014) comprovaram que a adição de partículas de sílica leva à redução dos poros capilares e ao refinamento da estrutura dos poros do UHPC. Também foi comprovado que a inclusão de SA melhora a durabilidade do concreto (BEIJI et al., 2013; JALAL et al., 2012). He et al. (2008) concluíram que a adição de SA melhora significativamente a resistência à penetração de sais, bem como a permeabilidade iônica geral. Também é relatado que a adição de SA, especialmente em níveis de reposição mais elevados, aumenta o cloreto e a resistividade elétrica do concreto (MADANI et al., 2014; ZHANG et al., 2011; SAID et al., 2012).

Ao fazer uma analogia entre os traços de mesma relação água/aglomerante (CPIV-039, CPIIF-039, CPIIFSA-039 e CPIIFCR-039), comparando o traço CPIV-039 em relação aos traços demais, esta redução foi de 4,86%, 27,4% e 5,94%, respectivamente. Destaca-se que os valores se mantiveram muito próximos, com desvio padrão de 0,13.

Os traços contendo CR também podem ser considerados com desenvolvimento linear, e quanto menor a relação água/aglomerante, menor foi a absorção por capilaridade. Entretanto, o desvio padrão entre o traço CPIIFCR-039 e o traço CPIV-039 é de 0,06, o que demonstra que o desempenho geral dos traços contendo CR não foi significativo na minimização da absorção de água com relação ao traço de referência.

Apesar dos traços contendo sílica ativa terem apresentado a menor quantidade de absorção de água, a diferença percentual pode ser observada na Tabela 30, que demonstra que os traços com melhor desempenho geral, pelo menor incremento de absorção de água após o ataque químico, se deu nos traços produzidos apenas com cimento CPIV (CPIV-039 a CPIV-024).

Pode-se verificar que a capilaridade foi pouco aumentada nos traços sem adições, que tiveram um bom desempenho global nesta comparação. Em contrapartida, os traços com adições apresentaram expressivo aumento na capilaridade após o ataque ácido.

A Tabela 30 apresenta a diferença percentual comparando a absorção de água por capilaridade ocorrida antes e após o ataque químico (AQ) por ácido acético.

Tabela 30 – Análise de variação percentual de absorção por capilaridade entre o concreto antes e após o ataque por ácido acético

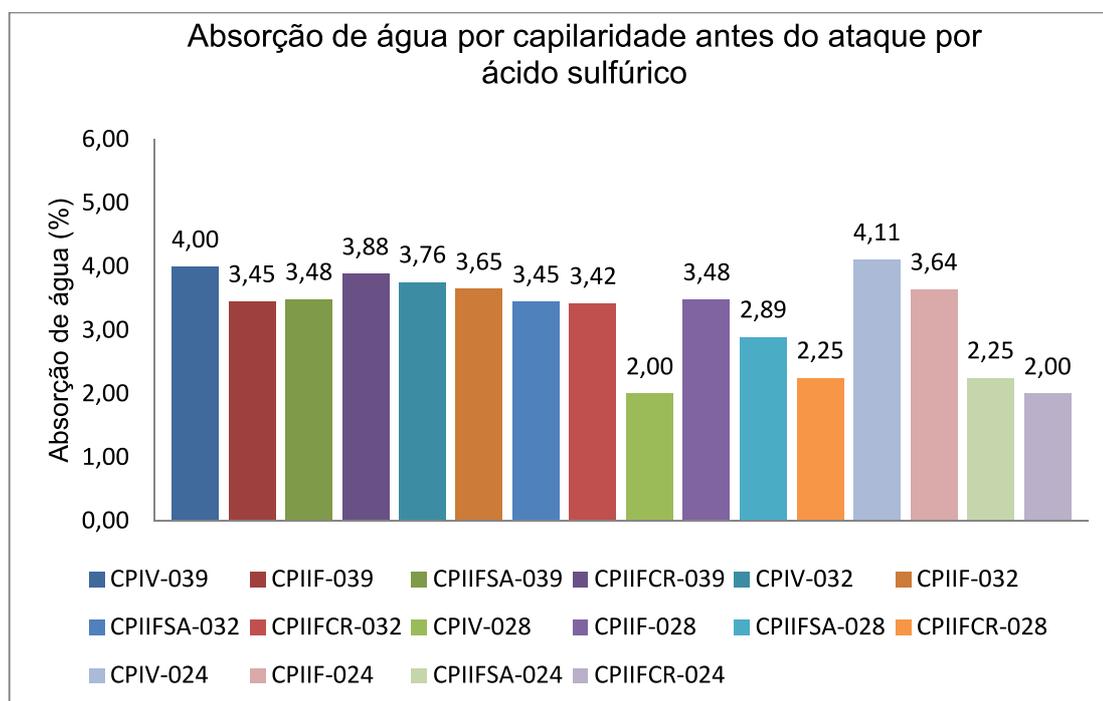
Traço	Absorção antes AQ (%)	Absorção após AQ (%)	Diferença (%)
CPIV-039	4,76	5,55	16,60%
CPIIF-039	4,16	5,04	21,41%
CPIIFSA-039	4,05	5,18	27,81%
CPIIFCR-039	3,88	4,59	18,12%
CPIV-032	4,85	5,28	8,94%
CPIIF-032	4,12	4,70	14,10%
CPIIFSA-032	4,00	4,94	23,48%
CPIIFCR-032	3,85	4,64	20,49%
CPIV-028	3,45	4,03	16,84%
CPIIF-028	3,48	4,02	15,63%
CPIIFSA-028	2,89	3,47	19,93%
CPIIFCR-028	2,25	3,36	49,51%
CPIV-024	4,25	5,22	22,80%
CPIIF-024	4,06	5,14	26,87%
CPIIFSA-024	3,75	4,24	12,88%
CPIIFCR-024	4,00	4,34	8,47%

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

4.2.1.2 Análise da absorção de água por capilaridade antes e após deterioração por ácido sulfúrico

Os valores médios são obtidos a partir das três amostras para os índices físicos de absorção de água. A Figura 52 é alusiva aos resultados de absorção de água para os distintos traços de concreto antes do ataque por ácido sulfúrico.

Figura 52 – Resultados obtidos de absorção de água (valores médios) antes do ataque por ácido sulfúrico



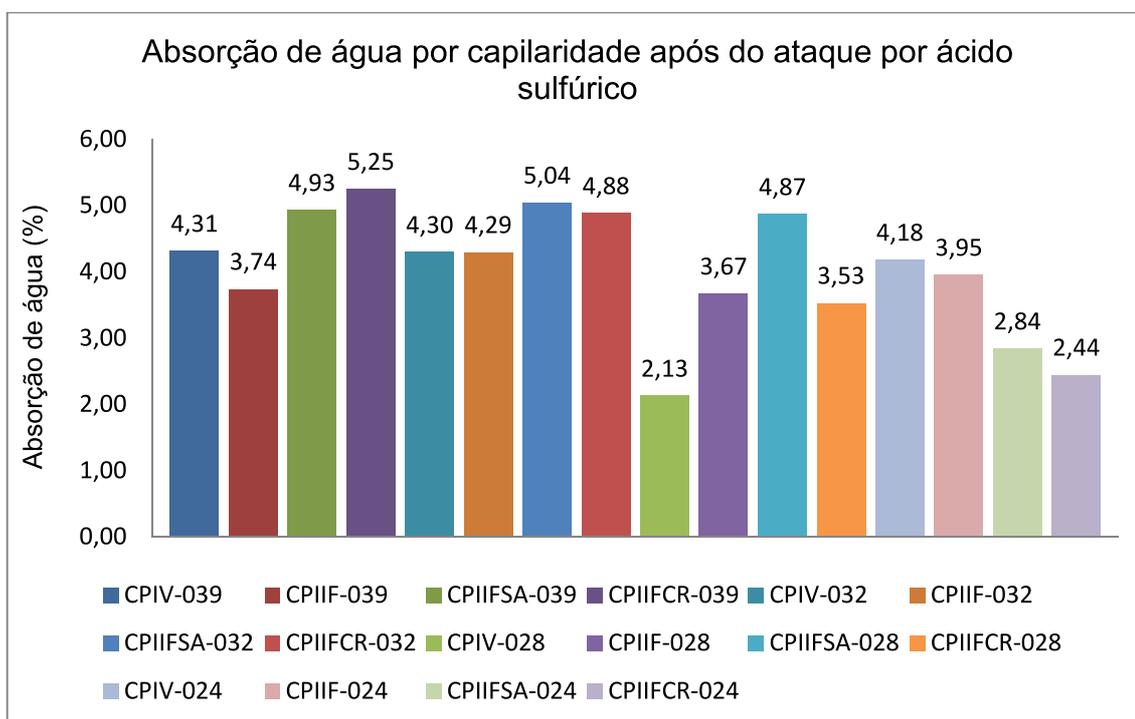
Fonte: Elaborado pela autora (2020)

O aditivo cristalizante contribui com a diminuição da absorção de água antes do ataque químico. Comparando cada traço com e sem aditivo cristalizante, houve uma redução na absorção de 2,9% entre o CPIIF-0,39 e o CPIIFCR-0,39; 14,5% entre o CPIIF-0,32 e o CPIIFCR-0,32; 51,3% entre o CPIIF-0,24 e o CPIIFCR-0,24 e os traços CPIIF-0,28 e o CPIIFCR-0,28 tiveram um aumento de 12,5% na absorção antes do ataque químico.

Os traços com Sílica Ativa tiveram uma diminuição da absorção de água antes do ataque químico. Comparando cada traço com e sem SA, houve uma redução na absorção de 12,9% entre o CPIIF-0,39 e o CPIIFSA-0,39; 13,9% entre o CPIIF-0,32 e o CPIIFSA-0,32; 45,3% entre o CPIIF-0,24 e o CPIIFSA-0,24 e os traços CPIIF-0,28 e o CPIIFSA-0,28 tiveram um aumento de 44,6% na absorção antes do ataque químico.

A Figura 53 é referente aos resultados de absorção de água para os distintos traços de concreto após o ataque por ácido sulfúrico, aos 112 dias de idade.

Figura 53 – Resultados obtidos de absorção de água (valores médios) após o ataque por ácido sulfúrico



Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Do mesmo modo, os traços contendo sílica ativa apresentaram a menor quantidade de absorção de água antes do ataque químico, no entanto, a diferença percentual observada na Tabela 31 demonstra que os traços com melhor desempenho geral, pelo menor incremento de absorção de água após o ataque químico, se deu nos traços produzidos apenas com cimento CPIV (CPIV-039 a CPIV-024), seguido pelos traços produzidos apenas com cimento CII-F (CPIIF-039 a CPIIF-024).

A Tabela 31 apresenta a diferença percentual entre a absorção de água por capilaridade ocorrida antes e após o ataque químico (AQ) por ácido sulfúrico.

Tabela 31 – Análise de variação percentual de absorção por capilaridade entre o concreto antes e após o ataque por ácido sulfúrico

Traço	Absorção antes AQ (%)	Absorção após AQ (%)	Diferença (%)
CPIV-039	4,00	4,31	7,82%
CPIIF-039	3,45	3,74	8,39%
CPIIFSA-039	3,48	4,93	41,50%
CPIIFCR-039	3,88	5,25	35,17%
CPIV-032	3,76	4,30	14,42%
CPIIF-032	3,65	4,29	17,74%
CPIIFSA-032	3,45	5,04	46,34%
CPIIFCR-032	3,42	4,88	42,80%
CPIV-028	2,00	2,13	6,47%
CPIIF-028	3,48	3,67	5,41%
CPIIFSA-028	2,89	4,87	68,48%
CPIIFCR-028	2,25	3,53	56,75%
CPIV-024	4,11	4,18	1,64%
CPIIF-024	3,64	3,95	8,55%
CPIIFSA-024	2,25	2,84	26,21%
CPIIFCR-024	2,00	2,44	22,14%

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Após o ataque químico, os traços com Sílica Ativa tiveram um acréscimo da absorção de água comparado com antes do ataque químico. Comparando cada traço com e sem SA, houve um aumento na absorção de 21,8% entre o CPIIF-0,39 e o CPIIFSA-0,39; 13,2% entre o CPIIF-0,32 e o CPIIFSA-0,32; 65,6% entre o CPIIF-0,28 e o CPIIFSA-0,28. Já entre os traços CPIIF-0,24 e o CPIIFSA-0,24, houve uma diminuição de 41,5% no traço contendo sílica ativa.

Comparando cada traço com e sem aditivo cristalizante (CR) após o ataque ácido, houve um acréscimo na absorção de 14,3% entre o CPIIF-0,39 e o CPIIFCR-0,39; 16,9% entre o CPIIF-0,32 e o CPIIFCR-0,32; 128,7% entre o CPIIF-0,28 e o CPIIFCR-0,28. Já entre os traços CPIIF-0,24 e o CPIIFCR-0,24, houve uma diminuição de 32,0% no traço contendo aditivo cristalizante.

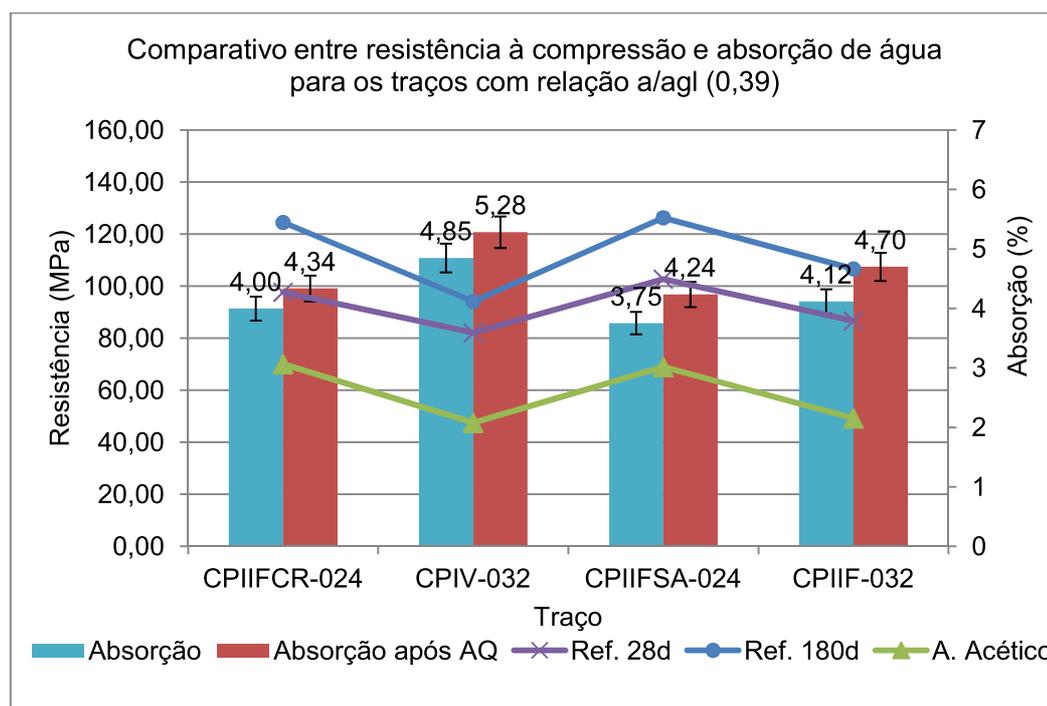
Além disso, é possível visualizar que a inserção de adições minerais resultou em uma maior porosidade após o ataque químico e que se associa aos vazios de ar incorporados no processo de fabricação dos concretos, mediante ao mesmo tempo e energia de mistura para todos os traços. Isso pode ser explicado pela maior demanda de aditivo superplastificante, necessário para a dispersão adequada das

partículas finíssimas das adições minerais. Com isso, houve, em alguns casos, um aumento da incorporação de ar nos materiais, resultando, então, nesse aumento de absorção.

4.2.1.3 Análise da resistência à compressão pela absorção de água por capilaridade após deterioração por ácido acético

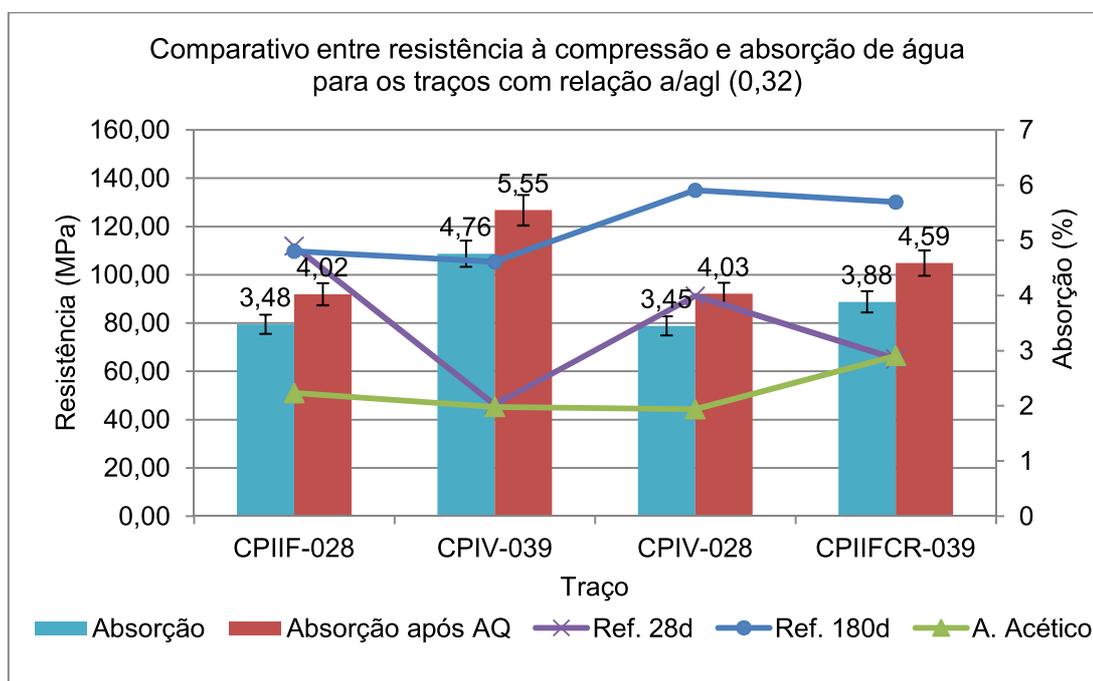
Propõem-se, através da Figura 54, Figura 55, Figura 56 e Figura 57 a correspondência entre as verificações de relação água/aglomerante e absorção de água por capilaridade realizadas nas idades de 28 dias, 70 dias (após ataque ácido) e 180 dias.

Figura 54 – Comparativo entre resistência à compressão e absorção de água para os traços com relação a/agl (0,39)



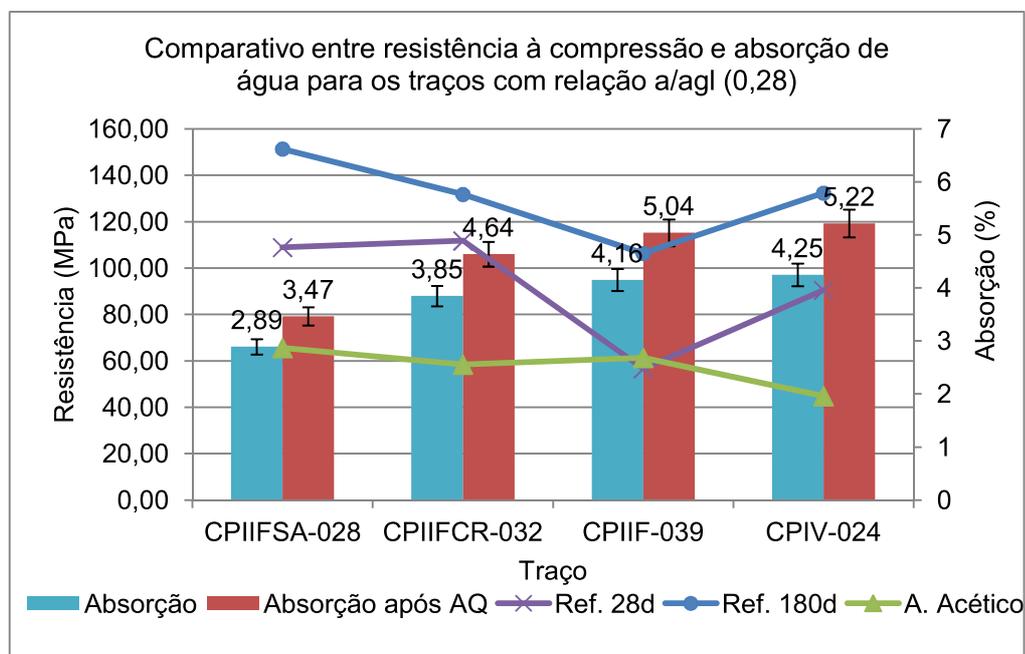
Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Figura 55 – Comparativo entre resistência à compressão e absorção de água para os traços com relação a/agl (0,32)



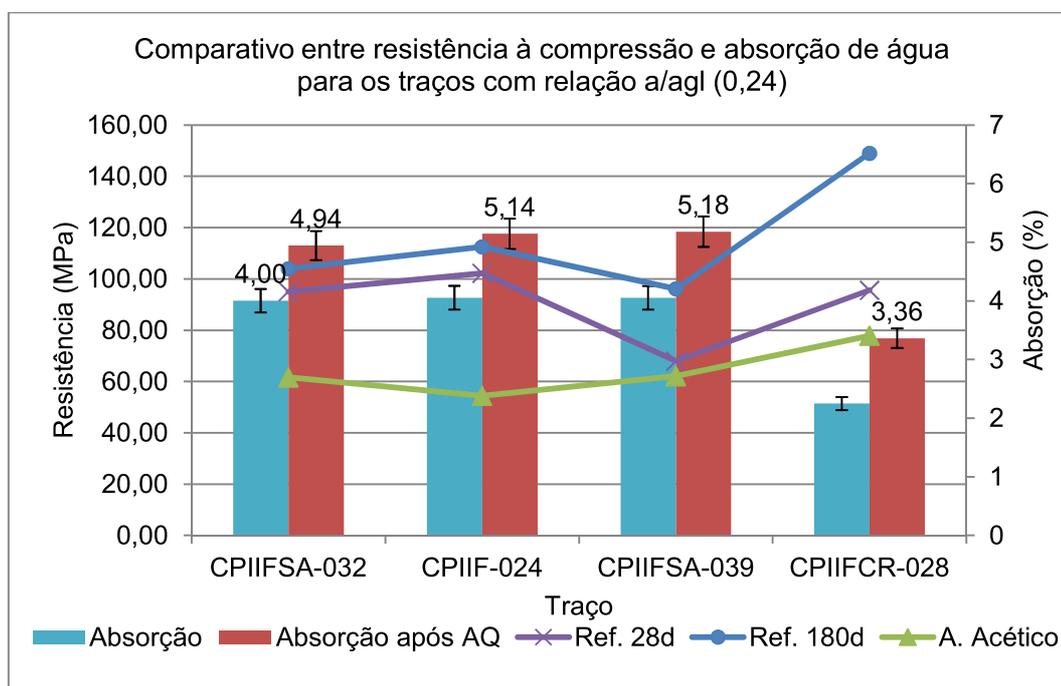
Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Figura 56 – Comparativo entre resistência à compressão e absorção de água para os traços com relação a/agl (0,28)



Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Figura 57 – Comparativo entre resistência à compressão e absorção de água para os traços com relação a/agl (0,24)



Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Ao verificar os valores obtidos de resistência à compressão e de absorção de água por capilaridade, a tendência de todos os traços é que quanto maior a resistência, menor é o percentual total de absorção.

Os traços da relação a/agl de 0,39 apresentaram um valor percentual de absorção de água maior do que os concretos com relação a/agl menor.

Os traços contendo CR também podem ser considerados com desenvolvimento linear e, quanto maior a resistência, menor a absorção de água por capilaridade.

Analisando-se os traços aos CPIIFSA-039 a CPIIFSA-024, percebe-se uma linearidade decrescente de absorção entre eles.

Essas reações produziram uma maior quantidade de C-S-H (LI et al., 2017; GHAFARI et al., 2014) que, juntamente com o efeito filer, aumentaram a compacidade do concreto, transformando a microestrutura observada. A modificação da microestrutura refletiu-se no resultado de resistência à compressão, no qual CPIIFSA-024 obteve o maior incremento absoluto. Aos 28 dias, este traço também apresentou o menor valor de absorção de água entre todos os traços na mesma idade.

Já para a idade de 180 dias, os traços com aditivo cristalizante CR obtiveram as maiores resistências à compressão. Ainda, após o ataque químico, os traços com CR foram os que apresentaram melhor desempenho em relação à resistência à compressão.

Em todos os traços que sofreram deterioração pelo ácido acético, observou-se que devido a este ser produzido com adições minerais, a absorção permaneceu coerente com a resistência mecânica obtida.

O traço CPIIFSA-028 e o traço CPIIFSA-024 tiveram as maiores resistências apresentadas e as menores taxas de absorção.

Li et al. (2017) estudaram o efeito das adições de sílica ativa condensada, na resistência à compressão e microestrutura de argamassas. Para isso, foram analisadas misturas binárias e ternárias de nanossílica e sílica ativa, com diferentes relações a/lig (0,25, 0,30, 0,35 e 0,40). Os teores de sílica ativa foram mantidos fixos em 10%, todos utilizados em substituição ao material cimentante. Argamassas sem adições também foram moldadas para comparação dos resultados. Em geral, as argamassas que continham adições minerais obtiveram maiores resultados de resistência à compressão. Nesse ensaio, os autores consideraram que o maior incremento efetivo aconteceu para os maiores teores nas maiores relações a/agl . Foram verificados incrementos aos 7, 28 e 90 dias de 19%, 19% e 20% para 0,25 e de 61%, 48% e 37% para 0,40, em comparação às referências de mesma relação a/lig . A sílica ativa, por ter uma menor área de superfície, seria responsável pela atividade pozolânica mais tardia, levando ao ganho de resistência até os 28 dias. Os autores atribuem os resultados também ao perfeito empacotamento das misturas promovido pela utilização de adições com granulometria gradual e contínua das partículas densificando e compactando a microestrutura.

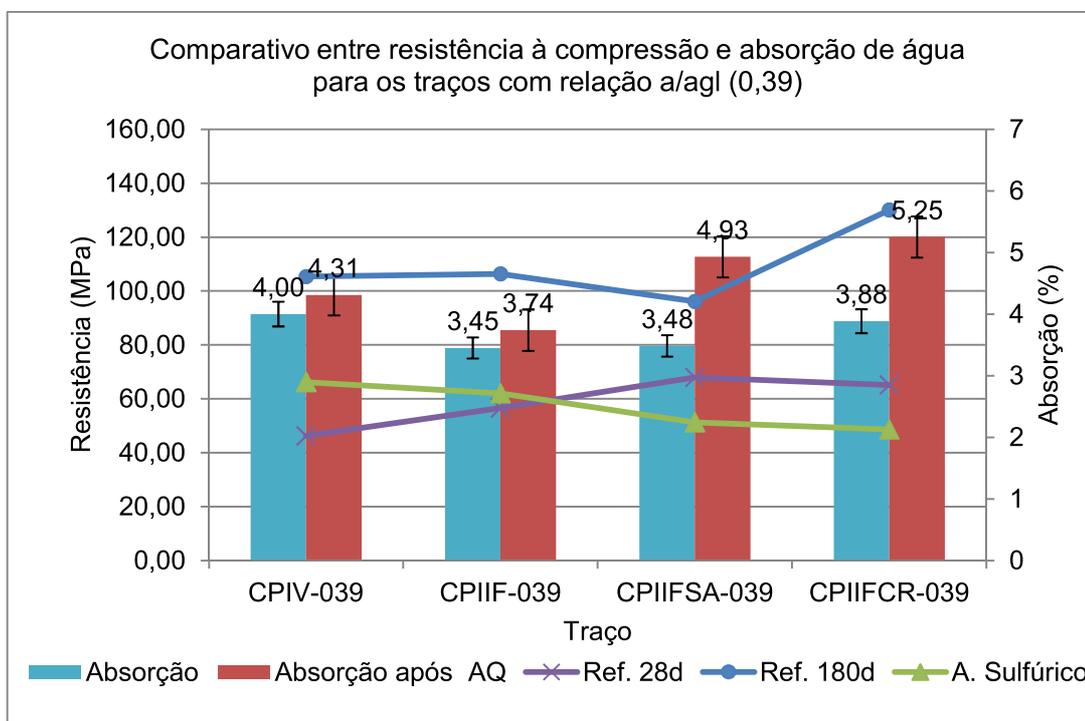
Zhang e Zong (2014) avaliaram comparativamente estas duas características do concreto no estado endurecido, verificando que houve uma relação entre a resistência à compressão e a absorção por capilaridade dos concretos, com relação obtida de 0,70. Bozkurt e Yaziciouglu (2010) avaliaram a evolução ao longo do tempo da resistência à compressão e da absorção de água por capilaridade, verificando que, com o passar do tempo, em idades mais avançadas, as composições de concreto estudadas apresentaram concomitantemente a redução da absorção capilar e a melhora do comportamento mecânico dos traços, concordando com os dados obtidos neste estudo.

Outro ponto a ser observado é o fato de, mesmo após ocorrer o ataque ácido, os traços com CR, para uma mesma relação água/aglomerante, obtiveram os maiores valores de resistência à compressão. No entanto, tiveram uma redução irrisória na absorção de água por capilaridade.

4.2.1.4 Análise da resistência à compressão pela absorção de água por capilaridade após deterioração por ácido sulfúrico

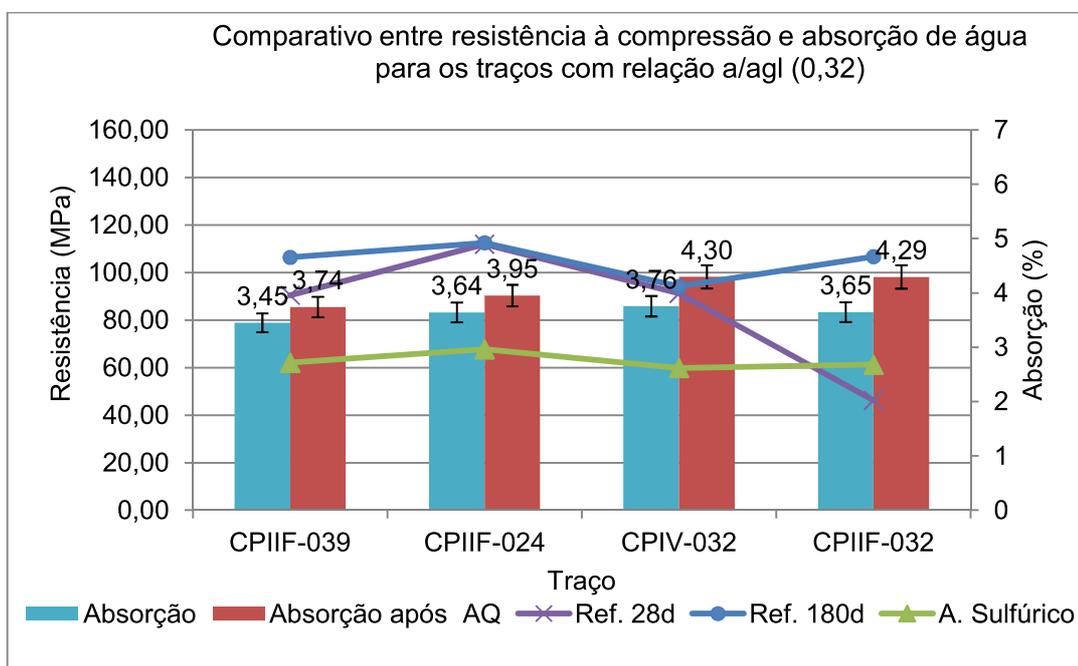
Nas Figuras 58 à 61 são graficadas as correspondências entre a relação água/aglomerante e ensaio de absorção de água por capilaridade, realizado nas idades de 28 dias, 70 dias (após ataque ácido) e 180 dias. Os valores de Absorção de água referem-se aos corpos de prova antes do ataque químico e os de Absorção após Ataque Químico (AQ), ao ensaio realizado após o ataque químico nos concretos.

Figura 58 – Comparativo entre resistência à compressão e absorção de água para os traços com relação a/agl (0,39)



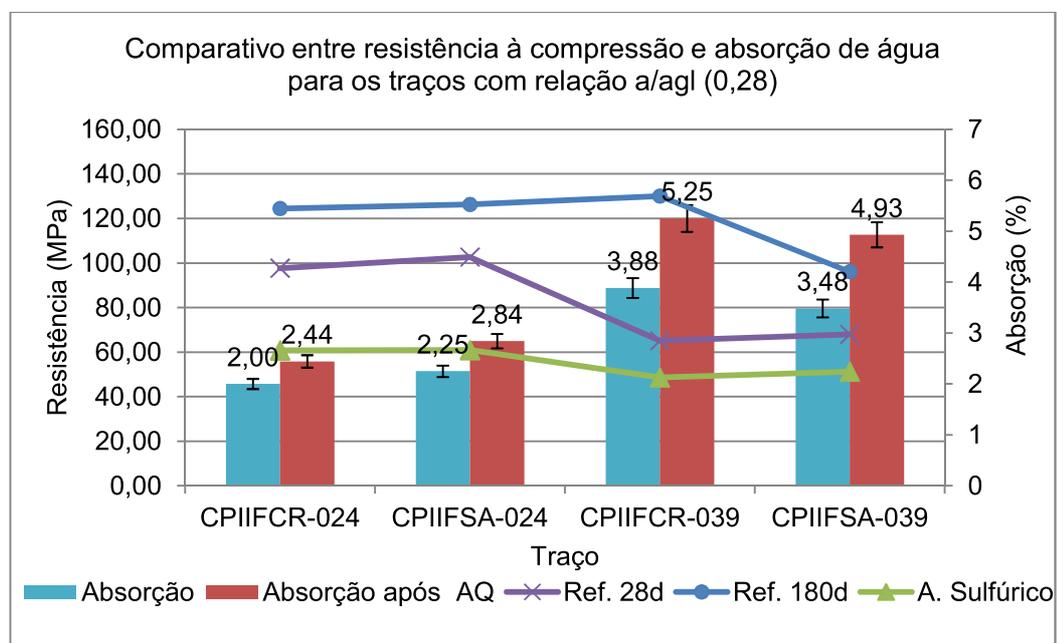
Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Figura 59 – Comparativo entre resistência à compressão e absorção de água para os traços com relação a/agl (0,32)



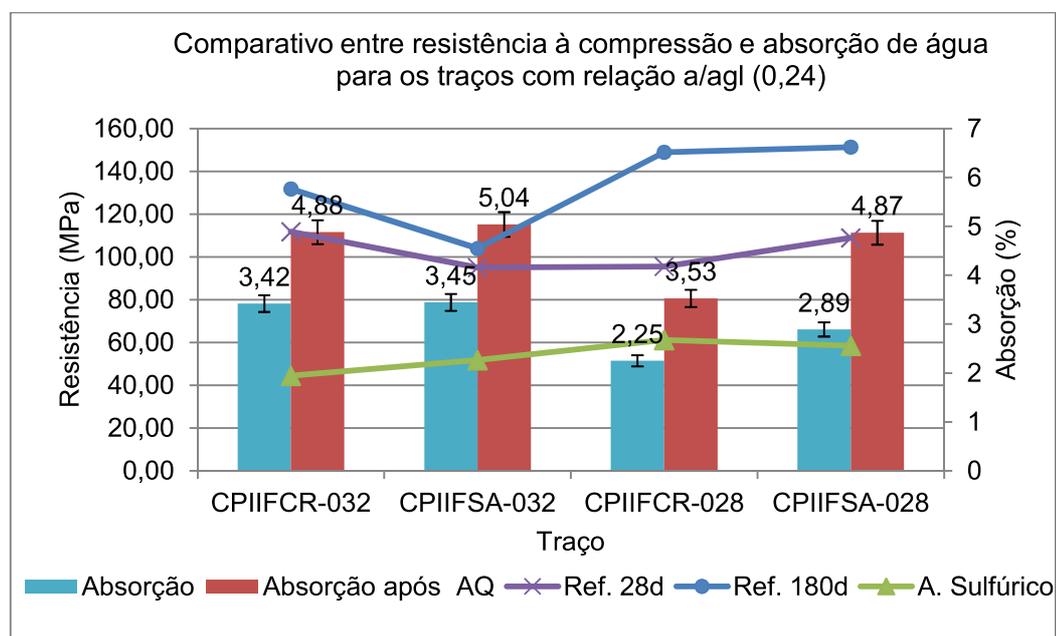
Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Figura 60 – Comparativo entre resistência à compressão e absorção de água para os traços com relação a/agl (0,28)



Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Figura 61 – Comparativo entre resistência à compressão e absorção de água para os traços com relação a/agl (0,24)



Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Avaliando-se a absorção perante a resistência dos materiais após o ataque de ácido sulfúrico em solução de 1%, encontrou-se uma relação inversamente proporcional dado que a absorção de água é possibilitada pela existência de vazios em um elemento de concreto, os quais podem reduzir a resistência à compressão. Todavia, esta relação deixou de ser percebida nos traços CPIIFSA-024 e CPIIFCR-028. Nestas composições, verificou-se concomitantemente a evolução da resistência à compressão ao longo do tempo e a aumento da absorção total de água. As amostras do traço 1 apresentaram redução na absorção de água, porém, reduziram também sua resistência à compressão. Já as amostras do traço 4 apresentaram evolução na resistência à compressão, porém, com pequeno decréscimo na absorção total de água.

Segundo Cabrera et al (1989), citado por Silva Filho (1994), a resistência mecânica não prediz adequadamente o seu desempenho quanto à durabilidade, pois a mesma está relacionada muito mais com a porosidade e a permeabilidade do que com a resistência. Entretanto, o que foi observado é que os materiais com as maiores relações a/agl foram as que mais apresentaram perda de resistência após o ataque químico.

Os traços produzidos apenas com cimento CPIV poderiam ter valores de resistência mecânica muito superiores aos demais traços com CPII-F, no entanto, os ensaios de agressão química iniciaram com apenas 28 dias, sendo que este cimento possui potencial para obter resistências bastante altas em idades mais elevadas, já que o C_2S contribui para a resistência em períodos mais elevados (OLIVEIRA, 2000).

Considerando a capacidade das pozolanas, como a sílica ativa, de melhorar o comportamento do concreto e a microestrutura dos materiais cimentícios em níveis micro e nano, sua aplicação pode limitar os efeitos destrutivos do ataque ácido por meio da redução do nível de hidróxido de cálcio e da permeabilidade do concreto (TAYEH et al., 2013; GHAFARI et al., 2014).

Monteiro (2002) considera que a relação a/c influencia a forma, o tamanho e a distribuição dos poros, os quais agem como barreiras ou meios de comunicação entre os agentes deletérios e o interior das estruturas.

4.2.2 Variação de massa e volume

Os ensaios de alteração de massa são comuns em experimentos que utilizam ataque ácido, mas os mesmos dependem do tipo de cimento e do tamanho da amostra, que pode ser influenciada pelas reações de expansão que ocorrem quando a estrutura começa a ser degradada. As ações combinadas de dissolução e expansão causa gradualmente a falha na camada superficial do corpo de prova, o que provoca a redução da massa significativa (CHANG et al., 2005).

Na Figura 62, a superfície deteriorada apresentou-se de forma uniforme em todas as unidades, entretanto, percebe-se que o fato de os agregados graúdos estarem bastante expostos nas amostras submetidas ao ácido sulfúrico, implica num aspecto favorável a uma degradação mais rápida do concreto.

As amostras submersas em solução por ácido sulfúrico apresentaram uma pasta em sua superfície, em cada troca de solução, ao final de cada ciclo. Isto se deve ao fato de o ácido sulfúrico reagir com o cimento, formando esta pasta que desestabiliza as ligações com os materiais inertes do concreto, e se espalha por toda a superfície do corpo de prova.

Figura 62 – Comparativo entre alguns corpos de prova quanto à variação de volume e perda de massa



(a) Corpos de prova após 5 ciclos de ataque de ácido sulfúrico



(b) Corpos de prova após 5 ciclos de ataque de ácido acético



(c) Corpos de prova submetidos a 5 ciclos de ataque de ácido sulfúrico



(d) Corpos de prova submetidos a 5 ciclos de ataque de ácido acético



(e) Seção dos corpos de prova submetidos a 5 ciclos de ataque de ácido sulfúrico



(f) Seção dos corpos de prova submetidos a 5 ciclos de ataque de ácido acético

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Quanto ao ensaio de perda de massa, foi verificado que os corpos de prova imersos em solução de ácido sulfúrico tiveram uma perda de massa de 15% em relação ao início do ensaio, enquanto os corpos de prova imersos em solução de ácido acético tiveram uma perda entre 5% e 10%. Nos corpos de prova imersos em solução de ácido sulfúrico é possível observar a alteração na porosidade e coloração dos corpos de prova com apenas 7 dias em imersão. As faces dos corpos de prova que estavam anteriormente lisas, após o ataque por ácido sulfúrico se apresentam ásperas. Os corpos de prova imersos em solução de ácido acético não apresentaram degradação tão avançada quanto os corpos de prova imersos no ácido sulfúrico.

Os corpos de prova com cristalizante foram os que mostraram valores mais elevados de perda de massa, se comparados aos demais.

Em uma análise visual durante os ensaios foi possível constatar grande lixiviação de produtos de hidratação do concreto nas amostras sujeitas ao ataque de ácido sulfúrico.

As amostras do ácido acético, embora não apresentassem, visualmente, uma deterioração tão perceptível, os ensaios de variação dimensional provaram que houve expansão das amostras após os ciclos de ataque ácido. O mesmo ocorreu nas amostras colocadas no esgoto, que apresentaram expansão nas medidas dos corpos de prova.

Nenhuma variação dimensional significativa foi observada nas amostras que foram submersas tanto no esgoto, quanto no ácido acético, embora a deposição de um pó na superfície da amostra tenha sido observada em um exame visual, indicando uma provável reação entre o ácido acético e os produtos de hidratação do cimento.

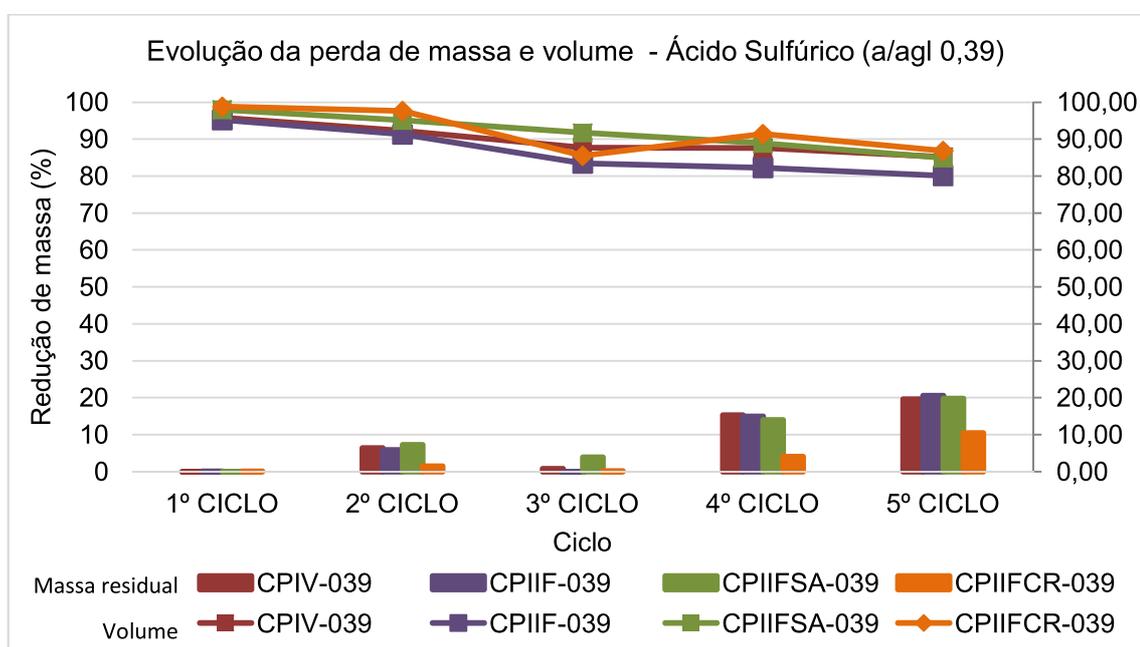
A baixa variação dimensional pode ter ocorrido devido à deposição dos produtos da reação nos poros presentes na amostra de argamassa, inibindo a expansão da amostra. Este fator é relatado por vários autores como sendo fundamental para a análise dos efeitos do ataque químico, pois o número e tamanho dos poros influenciam totalmente o grau de penetração dos ácidos.

4.2.2.1 Análise da variação de massa e volume por tipo de aglomerante

A variação de massa e volume dos concretos depende fatores intrínsecos a cada material, sendo importante a análise comparando os resultados de acordo com o tipo de aglomerante utilizado.

4.2.2.1.1 Variação de massa e volume por tipo de aglomerante x ácido sulfúrico

Figura 63 – Evolução da perda de massa e variação de volume após ensaio químico no Ácido Sulfúrico – a/agl 0,39



Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Figura 64 – Evolução da perda de massa e variação de volume após ensaio químico no Ácido Sulfúrico - a/agl 0,32

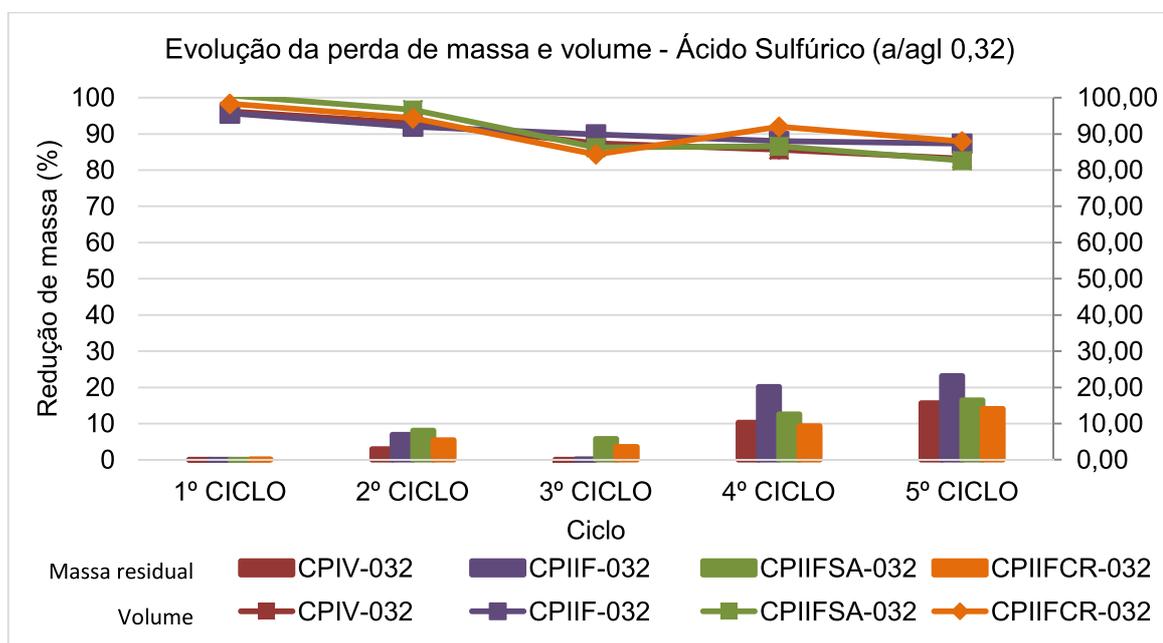


Figura 65 – Evolução da perda de massa e variação de volume após ensaio químico no Ácido Sulfúrico - a/agl 0,28

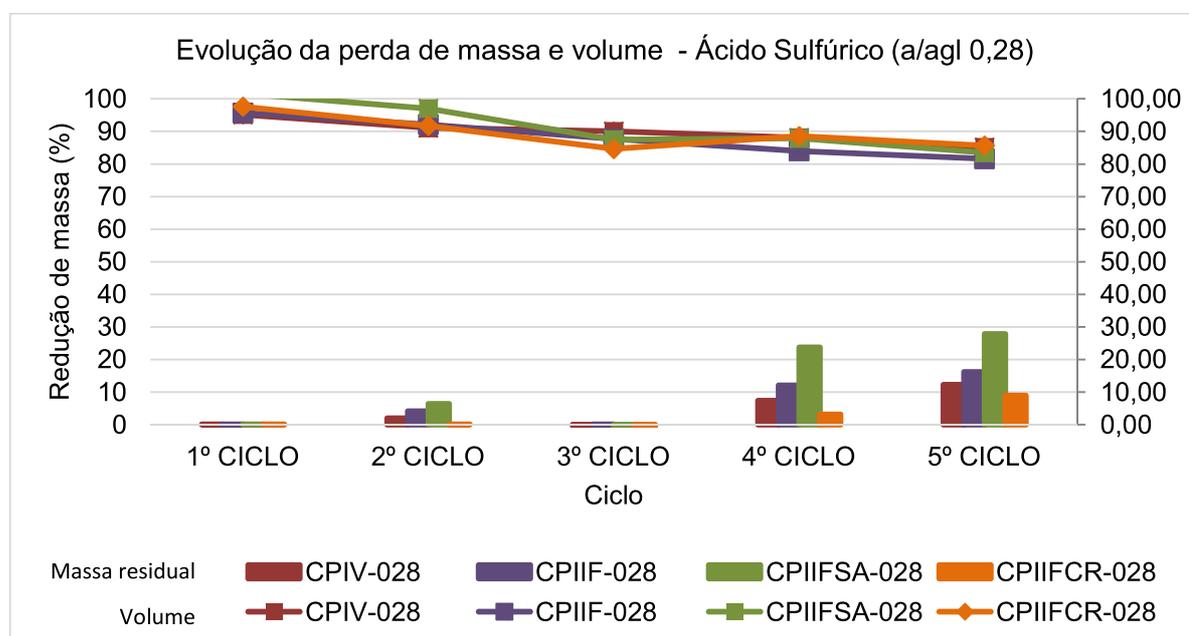
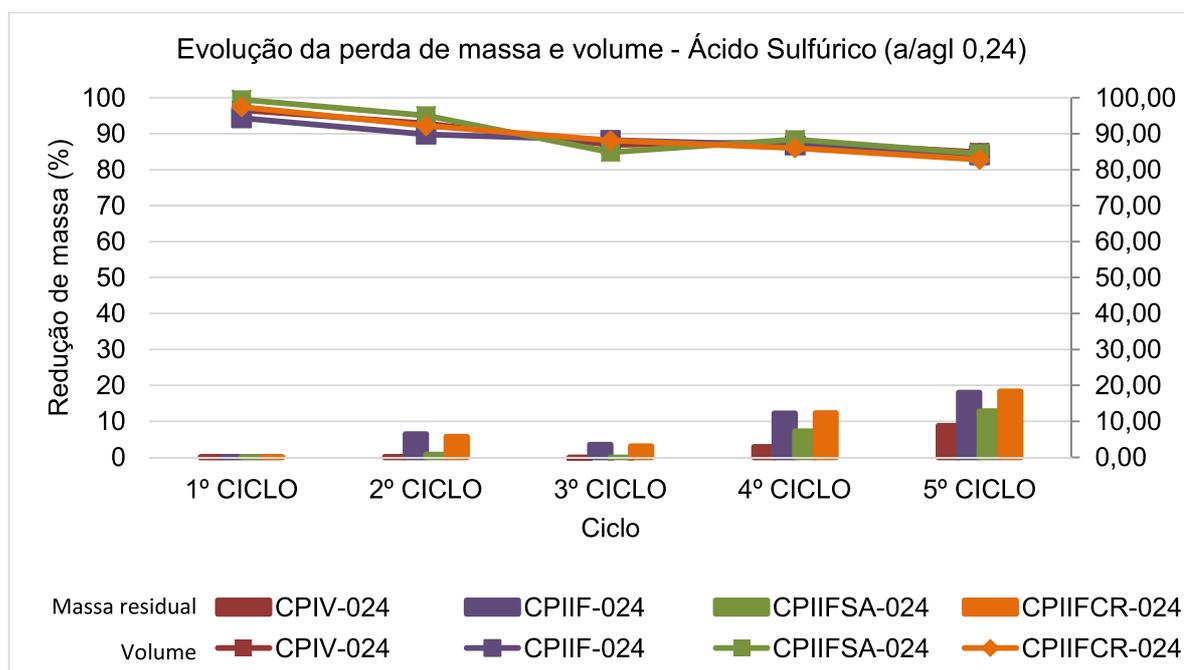


Figura 66 – Evolução da perda de massa e variação de volume após ensaio químico no Ácido Sulfúrico - a/agl 0,24



Fonte: Elaborado pela autora (2020)

As variações de massa dos diferentes corpos de prova de concreto em relação aos corpos de prova de referência em relação ao tempo de imersão são apresentadas na Figura 63, onde se observa que todos os corpos de prova experimentam perda de peso durante todo o período dos ciclos de molhagem e secagem, indicando a suscetibilidade dos corpos de prova à lixiviação quando expostos ao ácido sulfúrico, ácido acético e esgoto. Além disso, a intensidade da perda de massa dos corpos de prova durante os primeiros dias de imersão é maior do que nos demais dias; fato que é mais evidente no concreto com adições.

Mehta e Monteiro (1994) afirmam que os ácidos minerais, como o ácido sulfúrico, são conhecidos por causarem extrema agressão ao concreto devido à formação de sais de cálcio solúveis, que, então, são lixiviados para fora da estrutura da pasta.

Não obstante, o ácido acético é citado pelos autores como muito agressivos, indo de encontro à teoria de que os ácidos orgânicos de grande massa molecular não são tão agressivos quanto os ácidos minerais.

4.2.2.1.2 Variação de massa e volume por tipo de aglomerante x ácido acético

Figura 67 – Evolução da perda de massa e variação de volume após ensaio químico no Ácido Acético - a/agl 0,39

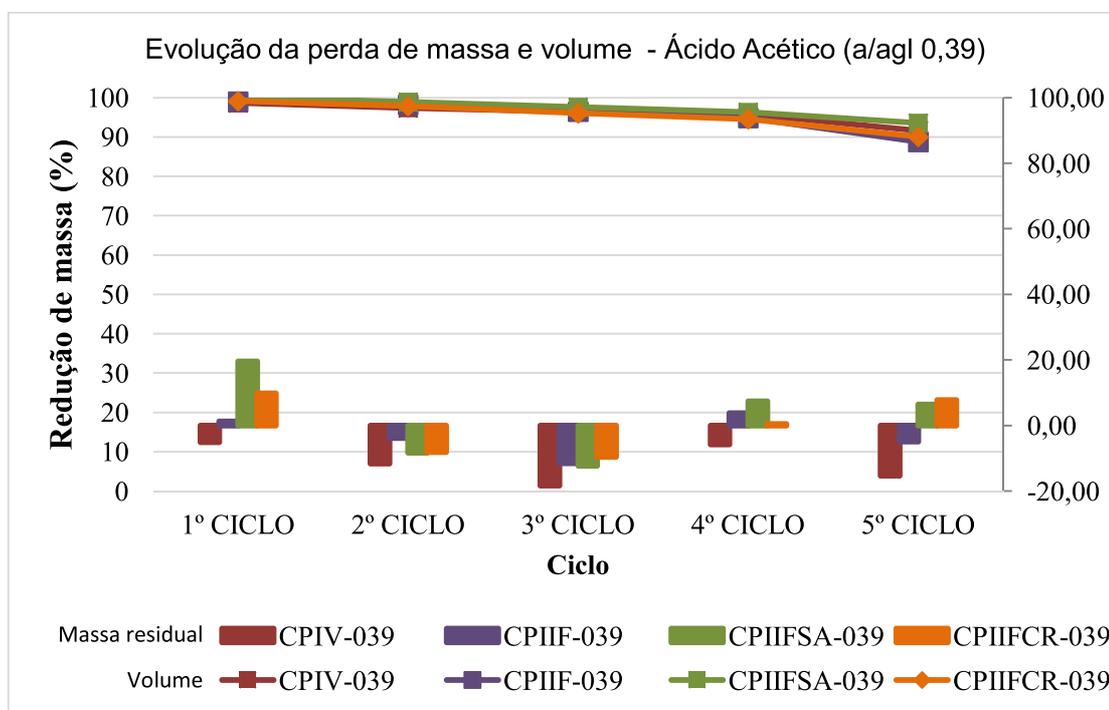


Figura 68 – Evolução da perda de massa e variação de volume após ensaio químico no Ácido Acético - a/agl 0,32

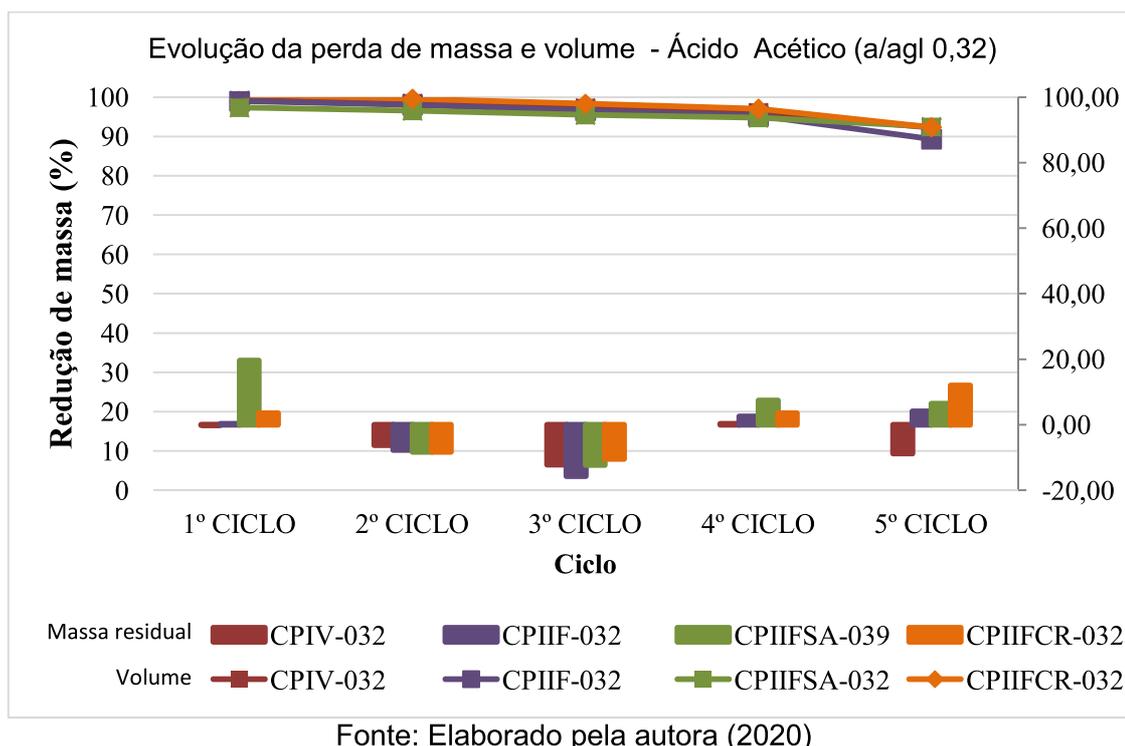


Figura 69 – Evolução da perda de massa e variação de volume após ensaio químico no Ácido Acético - a/agl 0,28

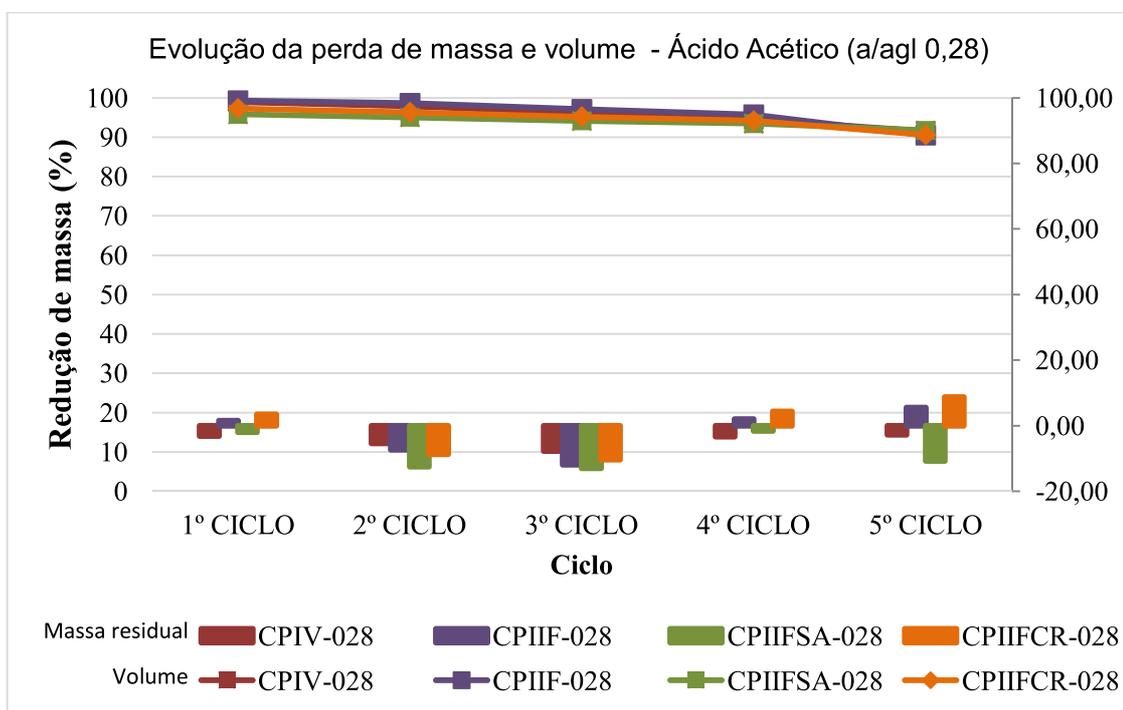
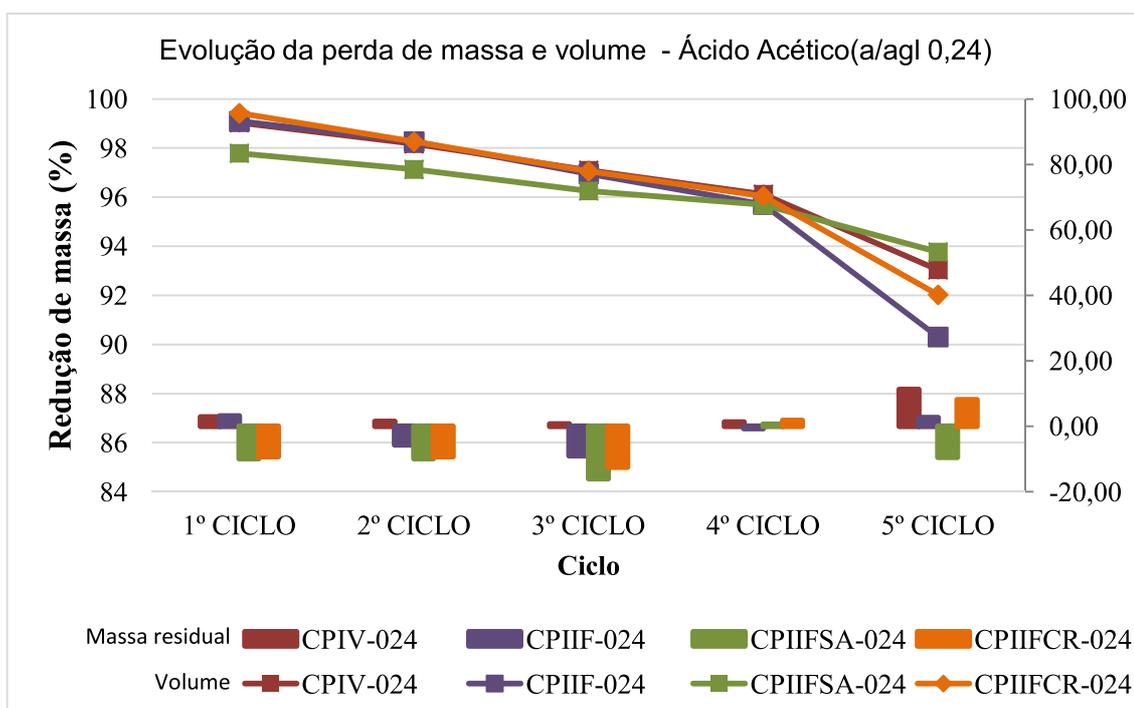


Figura 70 – Evolução da perda de massa e variação de volume após ensaio químico no Ácido Acético - a/agl 0,24



Verificou-se, ainda, que não houve perda de massa significativa no ensaio para os corpos de prova imersos em esgoto. Apesar disso, outro fenômeno que pode ocorrer é o ganho de massa, pela formação de compostos expansivos ou preenchimento dos poros da argamassa o com solução. Na Figura 70 observa-se o aumento da massa dos corpos de prova, no entanto, não é possível concluir se esse aumento de massa ocorreu devido ao preenchimento dos poros pela solução ou pela formação de produtos expansivos. As reduções de massa observadas podem ser devido à dissolução dos produtos nas soluções na qual estavam expostas dentro do reator UASB. Os diferentes tipos de cimento utilizados resultaram em valores diferentes de variação de massa.

4.2.2.1.3 Variação de massa e volume por tipo de aglomerante x esgoto

Figura 71 – Evolução da perda de massa e variação de volume após ensaio químico no Esgoto - a/agl 0,39

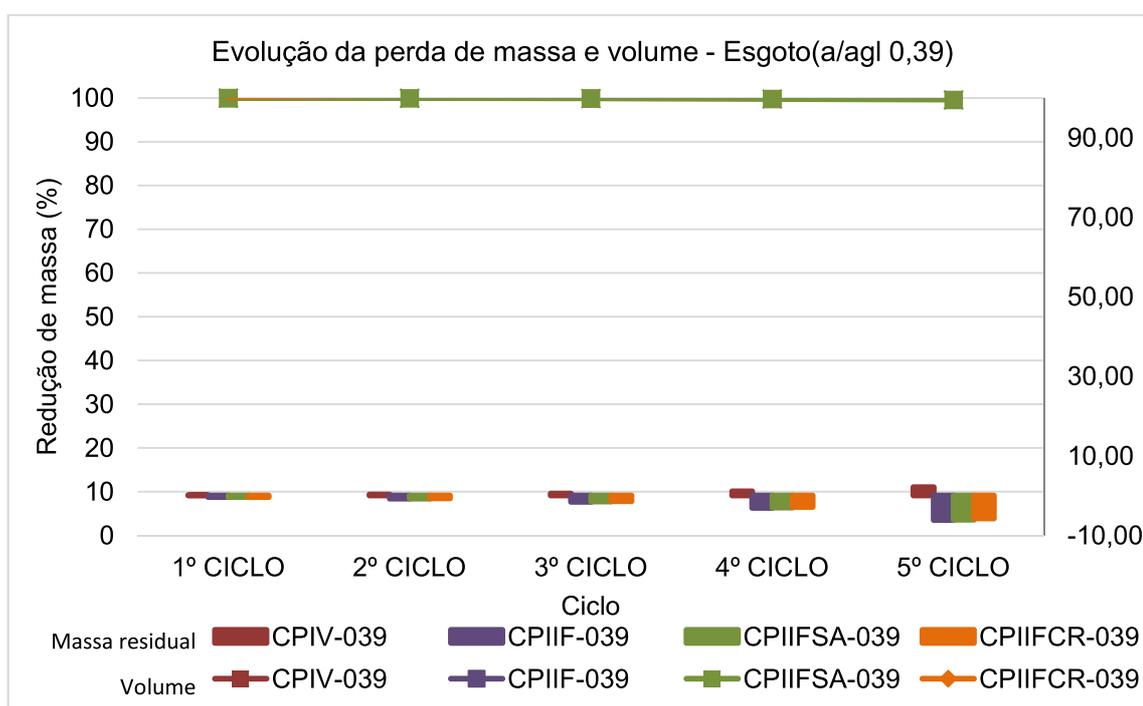


Figura 72 – Evolução da perda de massa e variação de volume após ensaio químico no Esgoto - a/agl 0,32

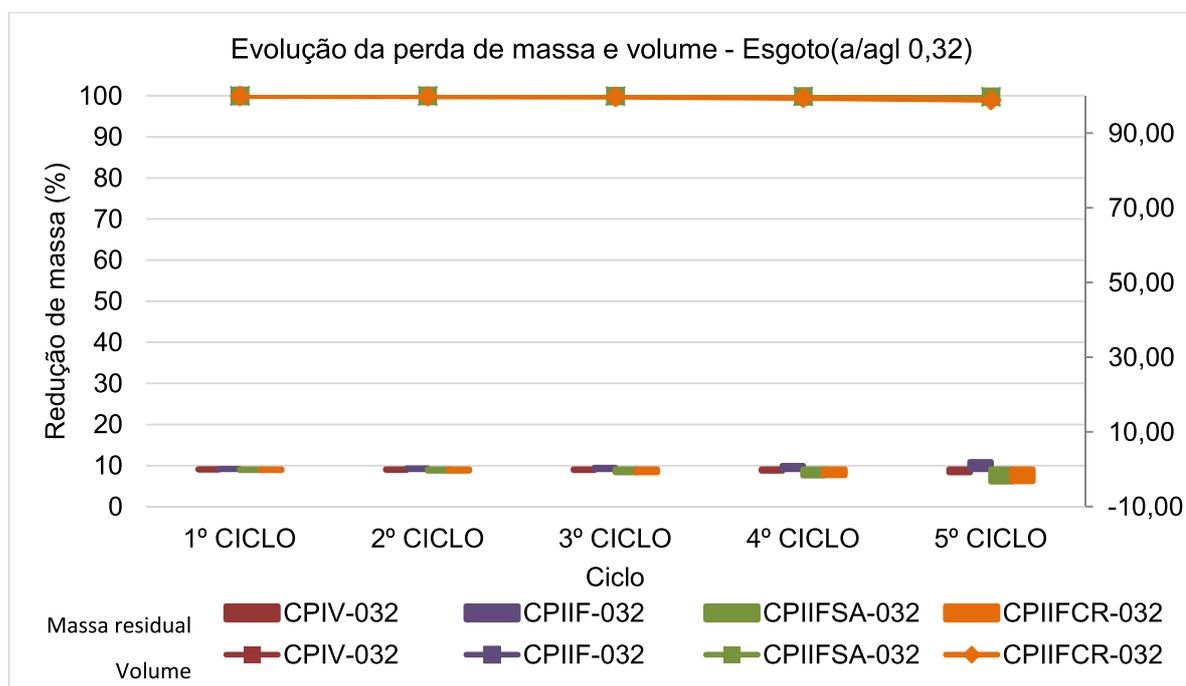


Figura 73 – Evolução da perda de massa e variação de volume após ensaio químico no Esgoto - a/agl 0,28

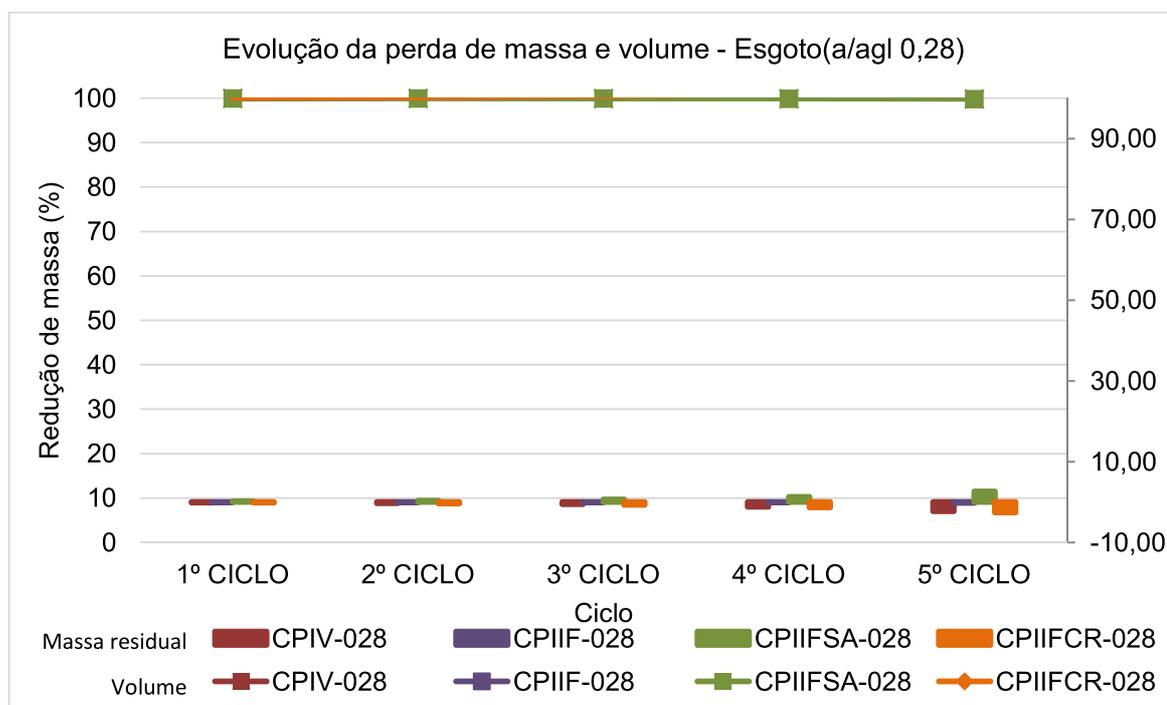
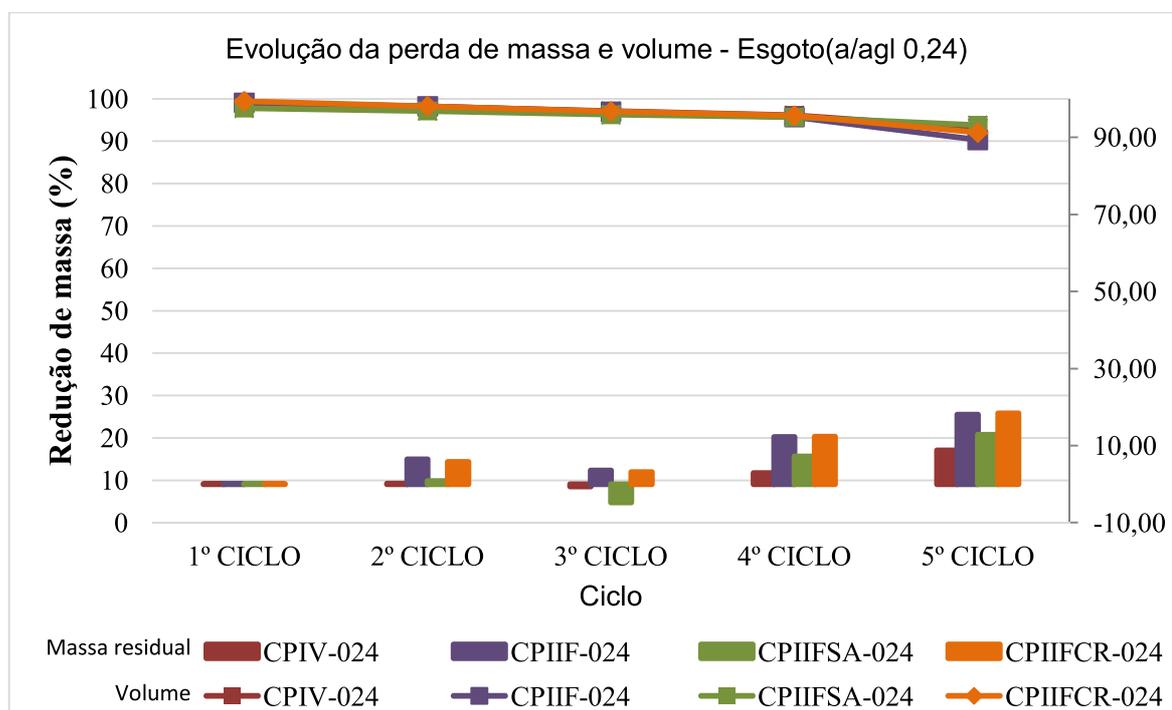


Figura 74 – Evolução da perda de massa e variação de volume após ensaio químico no Esgoto - a/agl 0,24



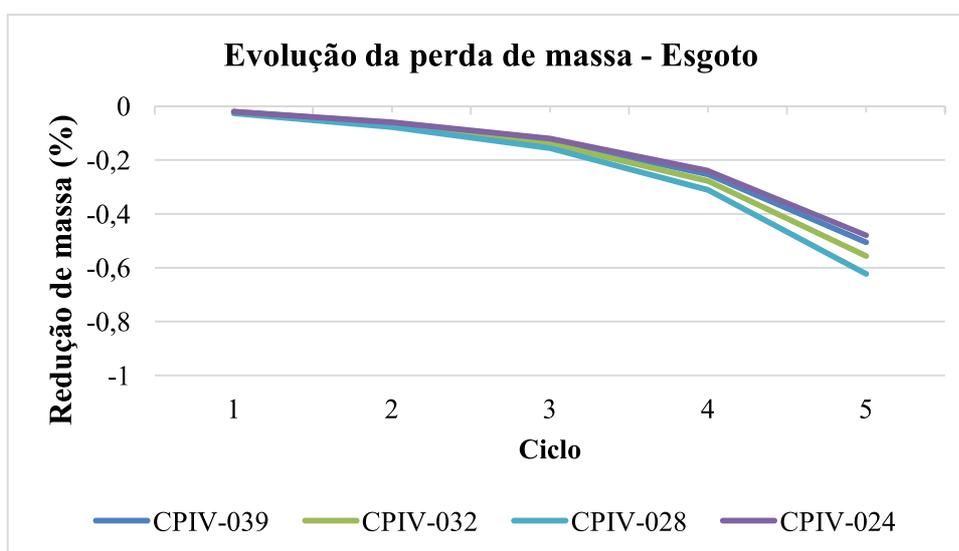
Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Isto vem a somar com o estudo de Olmstead e Hamlin (2012) descobriram que o ácido sulfúrico reage com o hidróxido de cálcio existente no concreto para formar gesso. Embora a formação de gesso resulte em expansão volumétrica de cerca de duas vezes mais, alguns pesquisadores sugeriram que essa reação desempenha um papel secundário no processo de erosão. A reação entre o gesso e o aluminato tricálcico produz etringita volumosa (cerca de 7 vezes), resultando na deterioração da situação de erosão. O crescimento volumétrico desses compostos produz pressão interna e expansão no concreto, levando à formação de fissuras. À medida que a erosão do concreto avança, a superfície fissurada adquire uma aparência macia e esbranquiçada, assim o concreto corroído perde sua resistência mecânica e durabilidade, devido a novas fissuras e lascamentos, o que acaba levando à sua destruição total (YAZICI et al., 2007; FALLAH et al., 2017; BANTHIA et al., 2014; AFROUGHSABET et al., 2016).

Segundo Sun (2015), a perda de massa de concreto representa diretamente a sua degradação real devido à corrosão. Ela pode ser relacionada com a taxa de corrosão, sendo, portanto, uma medida útil e utilizada para inspecionar as condições de corrosão e avaliar a vida útil remanescente das estruturas de esgoto.

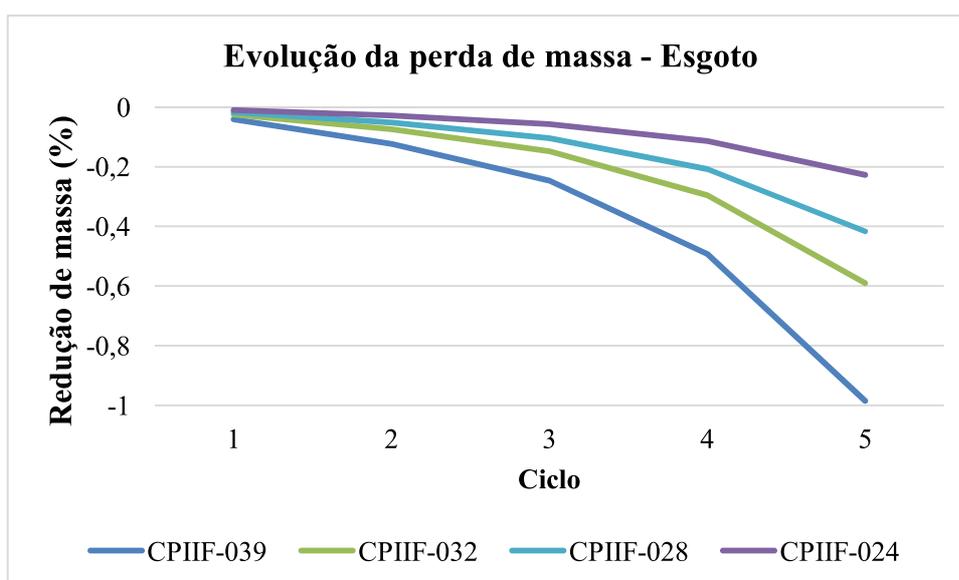
Harbulakova et al. (2013), mostrou que os resultados da perda de massa nos ensaios em laboratórios de amostras com substituição de cimento por MCS se mostraram mais eficazes do que o concreto de referência.

Figura 75 – Evolução da perda de massa e variação de volume após ensaio químico no Esgoto – Por tipo de aglomerante (CPIV)



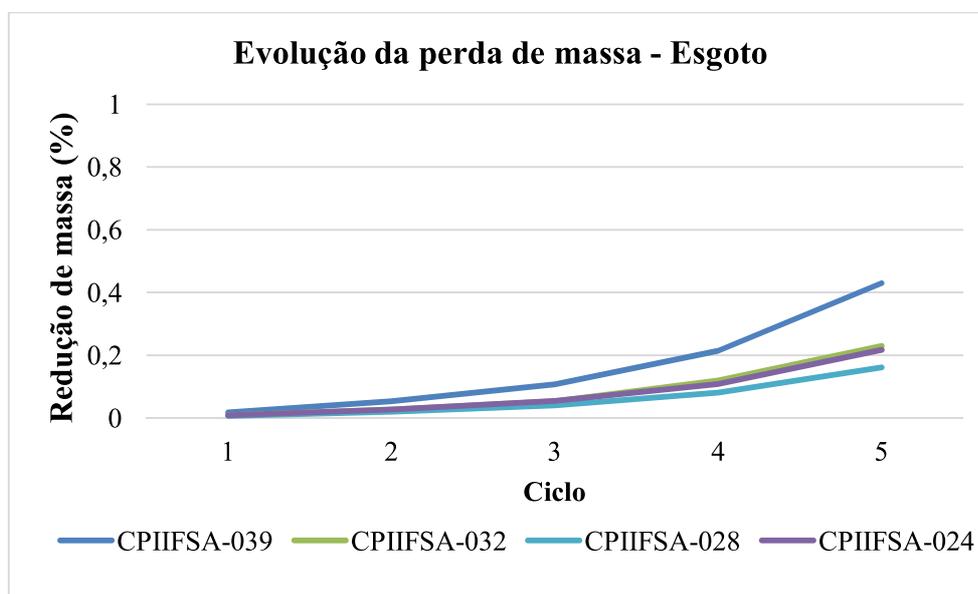
Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Figura 76 – Evolução da perda de massa e variação de volume após ensaio químico no Esgoto – Por tipo de aglomerante (CPIIF)



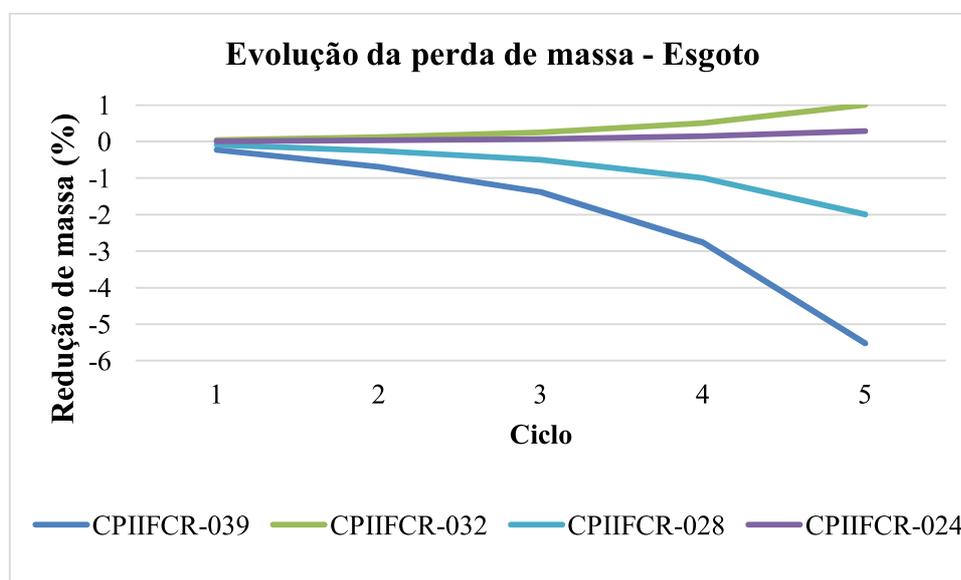
Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Figura 77 – Evolução da perda de massa e variação de volume após ensaio químico no Esgoto – Por tipo de aglomerante (CPIIFSA)



Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Figura 78 – Evolução da perda de massa e variação de volume após ensaio químico no Esgoto – Por tipo de aglomerante (CPIIFCR)



Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Avaliando as Figura 75, Figura 76, Figura 77 e Figura 78, observa-se que os traços com aditivo cristalizante apresentaram uma perda de massa muito superior aos demais traços analisados.

Ainda, o traço com maior relação a/agl foi o que demonstrou a maior perda de massa entre todos os traços submetidos ao esgoto.

Enquanto isso, os corpos de prova do grupo com adição de SA que tiveram aumento de massa linear com o ganho de massa de água e, portanto, uma variação positiva.

Alguns autores ponderam que, de forma geral, o concreto não é resistente a ácidos, pois ocorre a reação destes com o hidróxido de cálcio do cimento Portland hidratado, formando compostos de cálcio solúveis em água que são lixiviados (GU et al., 1998; NICA et al., 2000; PCA, 2002; GIANNANTONIO et al., 2008; LEEMAN et al., 2010). Isso vai ao encontro da explicação de Ourives (2009), que esclarece que quando não há água dentro da fissura, os cristais permanecem dormentes, mas, assim que ela aparece novamente os cristais voltam a crescer. Como houve uma constante entrada de água nos corpos de prova, pode ter ocasionado uma lixiviação dos cristais de CH que se formavam dentro das microfissuras do concreto.

5 CONCLUSÃO

Este item apresenta as conclusões obtidas na análise sobre a influência das características do esgoto e ácidos nele presentes, na degradação do concreto e também sobre os aspectos relevantes da avaliação das estruturas de concreto em ETE. Apresentam-se, também, sugestões para pesquisas futuras na sequência.

- a) A perda de resistência nos corpos de prova ensaiados mostrou-se significativa para a análise de durabilidade, possibilitando relacionar a perda de resistência à permeabilidade, através do ensaio de absorção de água, que demonstrou que, quanto maior a resistência mecânica, menor é a taxa de absorção de água;

Ressalta-se que o ataque de cada solução ácida atua de forma diferenciada nos traços. Os traços produzidos apenas com cimento CPIV apresentaram resultados competitivos ao compará-los aos demais materiais, considerando sua exposição ao ataque ácido aos 28 dias, o que pode ter limitado o potencial de utilização destes materiais, uma vez que oferecem melhor desempenho em idades mais avançadas.

Relacionou-se, também, a perda de resistência causada pelo ataque químico à perda de massa nos corpos de prova, estando intimamente ligada à variação de volume e perda de massa. O tipo de tratamento de esgoto também pode influenciar na intensidade das manifestações patológicas no concreto estudado *in loco*, porém, é necessário considerar que o ensaio realizado na ETE não foi acelerado e que, quanto maior o tempo de exposição do concreto ao esgoto, maior é a expansão verificada. Isto indica que, provavelmente, um estudo mais longo pode propiciar a perda de resistência do concreto e aumento da capilaridade em maior grau.

- b) O CPIIF-024 teve a menor variação dimensional frente ao ataque de ácido acético. Já o traço CPIV-024 foi o que apresentou menor variação de volume após o ataque de ácido sulfúrico. O CPIIFSA-024 foi o traço que teve a menor variação de massa após ataque de ácido acético. Já o traço CPIIFCR-032 foi o que apresentou menor perda de massa após ataque de ácido sulfúrico;

Verificou-se, ainda, que nos corpos de prova em que não houve perda de massa significativa, houve a ocorrência do fenômeno de ganho de massa, pela formação de compostos expansivos ou preenchimento dos poros da argamassa com solução.

Ainda, a pouca variação de massa e volume se deve ao fato de nem a temperatura e nem o pH apresentarem grandes variações durante o período de ensaios, mantendo-se nos patamares, respectivamente, de 26 °C e pH de 7,1. Entretanto, há uma ligeira queda entre o esgoto bruto (afluente) e o esgoto tratado (efluente) para a temperatura e o pH. Assim, depreende-se que a influência significativa da temperatura e pH na produção de gases nocivos existe para variações com maior amplitude.

- c) Na mesma linha das referências bibliográficas, os resultados dos ensaios de absorção indicam o refinamento do sistema de poros no desempenho desses concretos com adição da sílica ativa antes do ataque químico. Este estudo inicia uma premissa de pesquisa, na qual é necessário ponderar que a baixa relação água/aglomerante utilizada pode ter limitado o potencial de utilização das adições sílica ativa, uma vez que concretos com baixa relação a/agl já possuem uma microestrutura muito densa, compactada e otimizada, vislumbrando um menor potencial de melhoria;

Além disso, é possível visualizar que a inserção de adições minerais resultou em uma maior porosidade após o ataque químico e que se associa aos vazios de ar incorporados no processo de fabricação dos concretos, mediante ao mesmo tempo e energia de mistura para todos os traços. Isso pode ser explicado pela maior demanda de aditivo superplastificante, necessário para a dispersão adequada das partículas finíssimas das adições minerais. Com isso, houve, em alguns casos, um aumento da incorporação de ar nos materiais, resultando, então, nesse aumento de absorção.

- d) O aditivo cristalizante teve um efeito positivo no quesito resistência mecânica apenas nos traços com alta relação a/agl, em que evitou a perda de resistência após o ataque químico. Nos demais traços, o concreto referência teve desempenho superior aos concretos com aditivo cristalizante. Isto se explica pela capacidade de tamponamento de poros que o cristalizante proporciona, pois, parte dessas reações de fechamento dos poros ocorre paralelamente à hidratação. O cristalizante também possui a capacidade de promover reações de hidratação posteriores, toda vez que o cristalizante entrar em contato novamente com a água ou estiver submetido a um aumento significativo da umidade. Isso implica dizer que o cristalizante potencializa o fenômeno da autocicatrização, já que promove reações de hidratação

secundárias toda vez que houver formação de fissuras sucedida pela entrada de água, mesmo em idades mais avançadas. Como os concretos com maior relação a/agl apresentaram maior porosidade, facilitam a entrada da água necessária à ativação do cristalizante;

- e) Em relação à permeabilidade do concreto, os traços sem adições tiveram melhor desempenho na absorção de água sem comprometer a resistência à compressão.

Os traços que tiveram menor incremento de absorção de água comparando-se antes e após o ataque por ácido sulfúrico foram os traços CPIV-024 e CPIIF-028. Já em relação ao ácido acético, os traços com menor capilaridade foram o CPIIFCR-024 e o CPIV-032.

A comparação da relação a/agl com a resistência mostrou que a resistência é muito importante na verificação, mas não isoladamente. Pois, ao comparar com a absorção de água, ficou nítido que as misturas com adição de sílica ativa se mostraram as mais eficientes sem o ataque ácido. Entretanto, os traços que demonstraram a menor queda de resistência após o ataque ao ácido acético e ao ácido sulfúrico, respectivamente, foram os traços sem adições: o CPIV-028 e o CPIV-039. Com o passar do tempo, em idades mais avançadas, as composições de concreto estudadas apresentaram, concomitantemente, a redução da absorção capilar e a melhora do comportamento mecânico, concordando com os dados obtidos neste estudo.

5.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A observação do comportamento dos materiais em laboratório e em campo, a partir das análises dos resultados, gerou possibilidades para complementar este estudo com o objetivo de aprofundar o conhecimento sobre o desenvolvimento de novos materiais para mitigar a deterioração em ambientes de alta agressividade.

Sugere-se, então, para trabalhos futuros:

- a) verificar a eficiência de outros materiais, como outros tipos de cristalizantes e impermeabilizantes que promovam aumento da durabilidade dos concretos;
- b) realizar análises para verificar se o cristalizante está consumindo CH;

- c) pode ser uma melhoria do trabalho a aplicação de outro método de dosagem;
- d) sugere-se testar uma mistura dos ácidos acético e sulfúrico.
- e) outra sugestão é o estudo de concretos com consumo de cimento menor do que o estudado nesta pesquisa para obter o limite inferior onde o concreto ainda possa ser considerado de alto desempenho.

Ao avaliar estes pontos sugeridos, o avanço de CAD no Brasil será evidente e só vem a acrescentar benefícios a toda a área técnica e produtiva, proporcionando soluções e materiais mais duráveis às estruturas e às gerações futuras.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655: Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.
- _____. NBR 15575-1: Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.
- _____. NBR 16738: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2019.
- _____. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: 2013.
- _____. NBR 16697: Cimento Portland — Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.
- _____. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- _____. NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.
- ACI Committee 201. Quid to durable concrete, American Concrete Institute, Report of ACI Committee, ACI 201.2R-77, DETER, Detroit, p. 37, 1982.
- AESROY, A. OSTERHUS, S.W. BENTZEN, G. Controlled treatment with nitrate in sewers to prevent concrete corrosion. *Water Sci. Technol. Water Supply*. Volume 2 Issue 4, p. 137-144, 2002.
- AFROUGH SABET, V. et al. High-performance fiber-reinforced concrete: a review. *Journal of Materials Science*. Volume 51, p. 1-35, 2016.
- AGUERO, R. R. et al. Experimental study of concrete mixtures to produce UHPC using sustainable Brazilian materials. *Rev. IBRACON Estrut. Mater.*, São Paulo. Volume 12, Issue. 4, p. 766-789, 2019.
- AHN, T.-H.; KISHI, T. Crack Self-healing Behavior of Cementitious Composites Incorporating Various Mineral Admixtures. *Journal of Advanced Concrete Technology*, Volume 8, Issue 2, p. 171–186, 2010.
- AÍTCIN, P. C. *Concreto de Alto Desempenho*. São Paulo: Pini, 2000. 667 p
- AÍTCIN, P.-C. *Materiais cimentícios complementares e cimentos misturados em Ciência e Tecnologia de Aditivos para Concreto*, 2016.
- ANDRADE, C. Chloride penetration modeling. *Design of Durability of Concrete*. 1995, Berlin. Anais. Berlin, 1999.
- ANDRADE, J. J. O., TISBIEREK, F. T., RATHER, L. P. R., NOBRE, T. R. S. Avaliação das características do concreto quando submetido à degradação de origem química. In: *Anais do 45º Congresso Brasileiro do Concreto – Ibracon*, Vitória-ES, p. 1-12, 2003.

- AUSTRALIAN STANDARD. AS 3600: Concrete structures. Sydney, 2001. 175 p.
- AYDIN, S. YAZICI, H. YIGITER, H. BARADAN, B. Sulfuric acid resistance of high-volume fly ash concrete. *Building and Environment*. Volume 42, p. 717-721, 2007.
- BATTAGIN, A.F. O cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (Ed). *Concreto: ciência e tecnologia*. 1ª ed. São Paulo: IBRACON, Volume 1, p185-232, 2011.
- BATTAGIN, A. F. Cuidados ao construir em áreas litorâneas. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland ABCP. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteudo/imprensa/cuidados-ao-construir-em-areaslitoraneas>>. Acesso em: 06 abril 2019.
- BAUER, L. A. F. *Materiais de Construção 1*, Rio de Janeiro: LTC, 5ª Edição, 2000.
- BEDDOE, R. E., DORNER, H. W. Modelling acid attack on concrete: Part I. The essential mechanisms. *Cement and Concrete Research*. Volume 35, Issue 12, p. 2333-2339, 2005.
- BEHFARNIA, K.; SALEMI, N. The effects of nano-silica and nano-alumina on frost resistance of normal concrete. *Construction and Building Materials*, v. 48, p. 580-584, 2013.
- BERODIER, E.; SCRIVENER, K. Understanding the Filer Effect on the Nucleation and Growth of C-S-H. *Journal American Ceramic Society*, Volume 97, n. May, p. 3764–3773, 2014.
- BERTOLINI, L. *Materiais de construção: Patologia, Reabilitação e Prevenção*. HELENE, P. *Oficina de Textos*, 2010.
- BERTRON, A. DUCHESNE, J. ESCADEILLAS, Cement pastes alteration by liquid manure organic acids: chemical and mineralogical characterization. *Cement and Concrete Research*. Volume 34, Issue 10, p.1823-1835, 2004.
- BERTRON, A. DUCHESNE, J. ESCADEILLAS, G. Attack of cement pastes exposed to organic acids in manure. *Cement and Concrete Composites*. Volume 27, Issues 9–10, p. 898-909, 2005.
- BERTRON, A.; DUCHESNE, J. and ESCADEILLAS, G. Accelerated tests of hardened cement pastes alteration by organic acids: analysis of the pH effect. *Cement and Concrete Research*. Volume 35, Issue 1, p. 155-166, 2005.
- BEUSHAUSEN, Hans. Introduction. In: BEUSHAUSEN, Hans; LUCO, Luis Fernandez. *Performance -Based Specifications and Control of Concrete Durability*. Netherlands: Springer Netherlands, p. 1-7, 2016.
- BLACK, L. *Low clinker cement as a sustainable construction material in Sustainability of Construction Materials (Second Edition)*, 2016
- BOND, T.; TEMPLETON, M. R. History and future of domestic biogas plants in the developing world. *Energy for Sustainable Development*. Volume 15, Issue 4, p. 347-354, 2011.

- BORG, R. P. et al. Crack sealing capacity in chloride-rich environments of mortars containing different cement substitutes and crystalline admixtures. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, Volume 7, Issue 3, p. 141–159, 2018.
- BORGNETH, F. S. Reator artesanal para biodigestão dos resíduos alimentares. Um estudo de caso. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade de Brasília, 2017.
- BRANDÃO, A. M. S. Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado: aspectos relativos ao projeto. Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1998.
- CALDARONE, M. A. GRUBER, K. A. *Proc. Concrete under Severe Conditions*, Sapporo, Japão, 1995.
- CAMPS, J. P.; LAPLANCHE, A.; AL RIM, K. Corrosion of concrete by sequestering agents of detergents. In: *PROTECTION OF CONCRETE*, 1990. Proceedings... Dundee: University of Dundee. Volume 1, p. 63-73, 1990.
- CAPPELLESSO, V. G. et al. Use of crystalline waterproofing to reduce capillary porosity in concrete. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*. Volume 1, Issue 1, p. 9, 2016.
- CASSAL, S.B. A Influência da Adição de Cinza de Casca de Arroz na Resistência de Concretos a Ácidos. 2000. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- CHATVEERA, B., LERTWATTANARUK, P. Evaluation of nitric and acetic acid resistance of cement mortars containing high-volume black rice husk ash. *Journal of Environmental Management*. Volume 133, p. 365-373, 2014.
- CHEN, J.J. THOMAS, J.J. TAYLOR, H.F.W. JENNINGS, H.M. Solubility and structure of calcium silicate hydrate. *Cement and Concrete Research*. Volume 34, Issue 9, p.1499-1519, 2004.
- CHERNICHARO, C. A., 1997. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias. Reatores Aneróbios. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA. Universidade Federal de Minas Gerais. Volume 5, 1997.
- CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias: Reatores Anaeróbios. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2016.
- CHEUNG, J. JEKNAVORIAN, A. ROBERTS, L. SILVA, D. Impact of admixtures on the hydration kinetics of Portland cement. *Cement and Concrete Research*. Volume 41, Issue 12, p. 1289-1309, 2011.
- CHOI, Y. S.; CHOI, S. Y., KIM, I. S.; YANG, E. I. Experimental study on the structural behaviour of calcium-leaching damaged concrete members. *Magazine of Concrete Research*. Volume 70, Issue 21, p.1102-1117, 2018.
- CHOO LAEI, M.; RASHIDI, A. M.; ARDJMAND, M.; YADEGARI, A. The effect of nanosilica on the physical properties of oil well cement. *Materials Science and Engineering: A*. Volume 538, p. 288–294, 2012.

CREMONINI, R., DAL MOLIN, D. C. C., CECCATTO, D. MANCIO, M. & GOULART, J. (2005). Desenvolvimento de um método de dosagem de concretos de alta resistência com baixo consumo de cimento. In CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO–REIBRAC/IBRACON, 2005.

CUENCA, E.; TEJEDOR, A.; FERRARA, L. A methodology to assess crack-sealing effectiveness of crystalline admixtures under repeated cracking-healing cycles. *Construction and Building Materials*. Volume 179, p. 619-632, 2018.

DAMONE, P.; ILLSTON, J. *Construction materials: their nature and behavior*, Spon Press, 4^a ed., 592 p. 2010.

DAVIS, J. L.; NICA, D.; SHIELDS, K.; ROBERTS, D. J. Analysis of concrete from corroded sewer pipe. *International Biodeterioration & Biodegradation*, Volume 42, Issue 1, p. 75-84, 1998.

DE BELIE, N. DE COSTER, V. VAN NIEUWENBURG, D. Use of fly ash or silica fume to increase the resistance of concrete to feed acids. *Concrete Research*. Volume 49, p. 337-344, 1997.

DE BELIE, N. et al. A Review of Self-Healing Concrete for Damage Management of Structures. *Advanced Materials Interfaces*, Volume 5, p. 1–28, 2018.

DE BELIE, N. MONTENY, J. BEELDENS, A. VINCKE, E. GEMERT, D. V. e VERSTRAETE, W. Experimental research and prediction of the effect of chemical and biogenic sulfuric acid on different types of commercially produced concrete sewer pipes. *Cement and Concrete Research*. Volume 34, p. 2223-2236, 2004.

DE BELIE, N. MONTENY, J. BEELDENS, A. VINCKE, E. VAN GEMERT, D. VERSTRAETE, W. Experimental research and prediction of the effect of chemical and biogenic sulfuric acid on different types of commercially produced concrete sewer pipes. *Cement and Concrete Research*. Volume 34, Issue 12, p. 2223-2236, 2004.

DE NARDI, C. et al. Effectiveness of crystalline admixtures and lime/cement coated granules in engineered self-healing capacity of lime mortars. *Materials and Structures*, Volume 50, Issue 4, 191 p., 2017.

DIAS, N. G. Avaliação da Deterioração das Estruturas De Concreto de Estações de Tratamento de Esgoto [manuscrito] / Nayara Gracyelle Dias. - 2018. XXIII, 203 p, 2018.

DUPRAT, F.; SELIER, A.; NGUYEN, X. S. Incidence de l'incertitude sur l'état hydrique du béton dans la carbonatation: approche probabiliste. In: TRANSFERT 2006 – Propriétés de Transferts des Géomatériaux. Anais... Lille, 2006.

DUREKOVIC, A. Cement pastes of low water to solid ratio: An investigation of the porosity characteristics under the influence of a superplasticizer and silica fume. *Cement and Concrete Research*. Volume 25, Issue 2, p. 365-375, 1995.

DUVAL, R. KADRI, E. H. Influence of Silica Fume on the Workability and the Compressive Strength of High-Performance Concretes. *Cement and Concrete Research*, Volume 28, Issue 4, p.533-547, 1998.

E, P. A. Vida Útil das Estruturas de Concreto. In: Congresso Ibero Americano de Patologia das Construções, 4, Congresso de Controle da Qualidade, 6, 1997, Porto Alegre. Porto Alegre: CON PAT-97, 1997. Volume 1, p. 1-30, 1997.

EDVARDSSEN, C. Water Permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete. *ACI Materials Journal*, Volume 96-M56, p. 448–454, 1999.

EHRICH, S. HELARD, L. LETOURNEUX, R. WILLOCQ J. E BOCK, E “Biogenic and chemical sulfuric acid corrosion of mortars. *Journal of Materials in Civil Engineering*, p. 340-344, 1999.

ERGUN, A. Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, Volume 25, Issue 2, p. 806-812, 2011.

ESTOKOV, A.; HARBULAKOVA, V. O.; LUPTAKOVA, A.; STEVULOVA, N. Study of the Deterioration of Concrete Influenced by Biogenic Sulphate Attack, *Procedia Engineering*. *Procedia Engineering*, Volume 42, p. 1731 – 1738, 2012.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1990:2002/A1:2005: Eurocode – Basis of structural design, 2005.

FALLAH, S. NEMATZADEH, M.; Erosion resistance of high-strength concrete containing forta-ferro fibers against sulfuric acid attack with an optimum design. *Construction and Building Materials*. Volume 154, p.675-686, 2017.

FATTUHI, N. I.; HUGHES, B. P. The performance of cement paste and concrete subjected to sulphuric acid attack. *Cement and Concrete Research*, Volume 18, Issue 4, p. 545-553, 1988.

FERRARA, L. et al. Self healing of cement based materials engineered through crystalline admixtures: Experimental results from a multinational university network. *American Concrete Institute, ACI Special Publication*, Volume 2015–Janua, n. SP 305, p. 13.1-13.10, 2015.

FERRARA, L.; KRELANI, V.; MORETTI, F. On the use of crystalline admixtures in cement based construction materials: from porosity reducers to promoters of self-healing. *Smart Materials and Structures*, Volume 25, p. 1–17, 2016.

FERREIRA, R. M. Avaliação dos ensaios de durabilidade do betão. 2000. 246 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Escola de Engenharia. Universidade do Minho, Braga, 2000.

FORNASIER, R. S. Porosidade e permeabilidade do concreto de alto desempenho com sílica ativa. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 129 p. 1995.

GALHARDO, Pedro Gutierrez. Estudo da produção de cimento com ênfase no classe g. 2014. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

GHAFFARI, E. COSTA, H. JÚLIO, E. PORTUGAL, A. DURÃES, L. The effect of nanosilica addition on flowability, strength and transport properties of ultra high performance concrete. *Materials & Design*, Volume 59, p. 1-9, 2014.

GHAFFARI, E., COSTA, H., JÚLIO, E., PORTUGAL, A., DURÃES, L. Enhanced durability of ultra high performance concrete by incorporating supplementary cementitious materials, in: *The Second International Conference Microdurability*, Delft, Netherland, 2012.

GIANNANTONIO, D. J.; KURTH, J. C.; KURTIS, K. E.; SOBECKY, P. A. Effects of concrete properties and nutrients on fungal colonization and fouling. *International Biodeterioration & Biodegradation*, Volume 63, Issue 3, p. 252–259, 2009.

GIRARDI, F. VAONA, W. DI MAGGIO, R. Resistance of different types of concretes to cyclic sulfuric acid and sodium sulfate attack. *Cement and Concrete Composites*, Volume 32, Issue 8, p.595–602, 2010.

GJØRV, O. E. Projeto de durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade. In: FIGUEIREDO, E. P.; HELENE, P. Ed. *Oficina de Textos*. São Paulo, 2015.

GÓIS, T. d. S., *Estudo da Corrosão do Concreto Microbiologicamente Induzida (CCMI) em Estruturas de Saneamento*, Espirito Santo, 2016.

GOÑI, S.; FRÍAS, M.; VILLA, R. V.; VEGAS, I. Decalcification of activated paper sludge – fly ash - Portland cement blended pastes in pure water. *Cement & Concrete Composites*, Volume 40, p. 1–6, 2013.

GORNINSKI, J.; KAZMIERCZAK, C. Avaliação da Resistência Química de Concretos Poliméricos em Ambientes Agressivos. *Ambiente Construído*, Volume 8, n. 1, p. 63-71, 2008.

GORNINSKI, J.P., DAL MOLIN, D.C., KAZMIERCZAK, C.S., Strength degradation of polymer concrete in acidic environments, *Cement and Concrete Composites*, Volume 29, Issue 8, p. 637-645, 2007.

GRANDCLERC, A. DANGLA, P. GUEGUEN-MINERBE, M. CHAUSSADENT, T. Modelling of the sulfuric acid attack on different types of cementitious materials. *Cement and Concrete Research*. Volume 105, Pages 126-133, 2018.

GRANGER, S. LOUKILI, A. PIJAUDIER-CABOT, G. CHANVILLARD, G. Experimental characterization of the self-healing of cracks in an ultra high performance cementitious material: Mechanical tests and acoustic emission analysis. *Cement and Concrete Research*, Volume 37, Issue 4, p. 519–527, 2007.

GRAYBEAL, B. Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete. FHWA-HRT-06-103. p. 1-176, 2006.

GRAYBEAL, B. Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community, FHWA-HRT-13-060, p. 1–163, 2013.

GU, J.; FORD, T. E.; BERKE, N. S.; MITCHELL, R. Biodeterioration of concrete by the fungus *Fusarium*. *International Biodeterioration & Biodegradation*, Volume 41, p. 101-109, 1998.

GU, J.; FORD, T. E.; BERKE, N. S.; MITCHELL, R. Biodeterioration of concrete by the fungus *Fusarium*, *International Biodeterioration & Biodegradation*, Volume 41, Issue 2, p. 101-109, 1998.

GUTIÉRREZ-PADILLA, M.G.D. BIELEFELDT, A. OVTCHINNIKOV, S. HERNANDEZ, M. SILVERSTEIN, J. Biogenic sulfuric acid attack on different types of commercially produced concrete sewer pipes. *Cement and Concrete Research*. Volume 40, p. 293–301, 2010.

HANS BEUSHAUSEN et al. RILEM TC 230-DUC: Performance-Based Specifications and Control of Concrete Durability. South Africa: RILEM TC 230- PSC, 2015.

HEIKAL, M. ABD EL ALEEM, S. MORSI, W.M. Characteristics of blended cements containing nano-silica, *HBRC J. Volume 9*, p. 243–255, 2013.

HELENE, P. A Nova ABNT NBR 6118 e a Vida Útil das Estruturas de Concreto. In: *Seminário de Patologia das Construções*, Porto Alegre: Novos Materiais e Tecnologias Emergentes, LEME, UFRGS, 2004. Volume 1. p. 1-30, 2004.

HERISSON, J. Biodeterioration des matériaux cimentaires dans les ouvrages d'assainissement: étude comparative du ciment d'aluminate de calcium et du ciment Portland. Université Paris-Est, Tese, 280 p, 2012.

HERISSON, J. HULLEBUSCH, E.D. VAN MOLETTA-DENAT, M. TAQUET, P. CHAUSSADENT, T. Toward an accelerated biodeterioration test to understand the behavior of Portland and calcium aluminate cementitious materials in sewer networks, *Int. Biodeterior. Biodegrad.* Volume 84, p. 236–243, 2013.

HONDJUILA MIOKONO, E. D. Biodétérioration de Mortiers avec une succession de bactéries sulfo-oxidantes neutrophiles et acidophiles. Teses, Université de Lille, 2013.
HOOTON, R. D., BICKLEY, J.A. Design for durability: The key to improving concrete sustainability. *Construction and Building Materials*. Volume 67, Issue 9, p. 422-430, 2014.

HOPPE FILHO, J. et al. Degradação do concreto de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) por ácido sulfúrico biogênico. *Rev. ALCONPAT*, Mérida, Volume 4, n. 2, p. 87-99, 2014.

HORMANN, K. HOFMANN, F. SCHMIDT, M. Stability of concrete against biogenic sulfuric acid corrosion, a new method for determination. *Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement*, Gothenburg, 1997.

HUANG, H. et al. Self-healing in cementitious materials: Materials, methods and service conditions. *Materials & Design*, Volume 92, p. 499–511, 2016.

HUANG, H.; YE, G.; DAMIDOT, D. Characterization and quantification of self-healing behaviors of microcracks due to further hydration in cement paste. *Cement and Concrete Research*, Volume 52, p. 71–81, 2013.

HUANG, H.; YE, G.; DAMIDOT, D. Characterization and quantification of self-healing behaviors of microcracks due to further hydration in cement paste. *Cement and Concrete Research*, Volume 52, p. 71–81, 2013.

HUGHES, B. P. GUEST, J. E. Limestone and siliceous aggregate concretes subjected to sulphuric acid attack. *Magazine of Concrete Research*, Volume. 30, Issue 102, p. 11-18, 1978.

HUSNI, R. Acciones sobre las estructuras de hormigón. In: *Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón: reparación, refuerzo y protección*, 2003, Madrid, Spain. São Paulo: Rehabilitar, 2003.

INDIAN STANDART. IS 456. Plain and Reinforced Concrete - Code of Practice. New Delhi, p. 112, 2000.

INSTITUTO TRATA BRASIL – ITB. Portal Eletrônico Portal Eletrônico Portal Eletrônico. Disponível em. Acessado em Set. 2010.

IRASSAR, E. F. Sulfate resistance of blended cement: Prediction and relation with flexural strength. *Cement and Concrete Research*, Volume 20, p.209-218, 1990.

ISAIA, G. C. (Ed.): *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: IBRACON, Volume 1, Issue 1, p. 600, 2005.

ISAIA, G. Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas a corrosão da armadura. 1995. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 1995.

ISAIA, G.C. *Concreto De Alto E Ultra-Alto Desempenho - Capítulo 36 - Concreto: Ciência e Tecnologia* Geraldo Cechella (Editor) © 2011 IBRACON.

ISLANDER, R.L.; DEVINNY, J. S.; ASCE; MANSFELD, F.; POSTYN, A.; SHIH, H. Microbial ecology of crown corrosion in sewers. *Journal of Environmental Engineering.*, Volume 11, Issue 6, p. 751 – 770, 1991.

JAIN, A CAPPELLESSO, V. G. et al. Use of crystalline waterproofing to reduce capillary porosity in concrete. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, Volume 1, Issue 1, p. 9, 2016.

JAIN, ANURAG & PAWADE, PRASHANT. *Characteristics of Silica Fume Concrete*, 2015.

JALAL, M. MANSOURI, E. SHARIFIPOUR, M. POULADKHAN, A. Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO₂ micro and nanoparticles. *Materials & Design*, Volume 34, p. 389-400, 2012.

JALAL, M. POULADKHAN, A. HARANDI O.F., JAFARI, D. Comparative study on effects of Class F fly ash, nano silica and silica fume on properties of high performance self compacting concrete Constr. Build. Mater. Volume 94, p. 90-104, 2015.

JAROENRATANAPIROM, D. SAHAMITMONGKOL, R. Self-crack closing ability of mortar with different additives. Journal of Metals, Materials and Minerals, Volume 21, p. 9–17, 2011.

JIANG, G.; KELLER, J.; BOND, P.L. Determining the long-term effects of H₂S concentration, relative humidity and air temperature on concrete sewer corrosion. Water Research, Volume 65, p. 157-169, 2014.

JIANG, Z.; LI, W.; YUAN, Z. Influence of mineral additives and environmental conditions on the self-healing capabilities of cementitious materials. Cement and Concrete Composites, Volume 57, p. 116–127, 2015.

JOSEPH, A.P. KELLER, J. BOND, P.L. Examination of concrete corrosion using a laboratory experimental set up simulating sewer conditions. 6th International Conference on Sewer Processes and Networks. Surfers Paradise, Gold Coast, Australia, 2010.

JOSEPH, P., KELLER, J., BUSTAMANTE, H. BOND, P. L. "Surface neutralization and H₂S oxidation at early stages of sewer corrosion: Influence of temperature, relative humidity and H₂S concentration," Water Research, Volume 46, p. 4235-4245, 2012.

KADRI, E. H. DURVAL, R. Hydration heat kinetics of concrete with silica fume. Construction and Building Materials, Volume 23, p. 3388-3392, 2009.

KAZMIERCZAK, C. S. Avaliação da resistência química de concretos poliméricos em ambientes agressivos. Ambiente Construído. Volume 8, n. 1, p. 105-113. 2008.

KISHI, T. et al. Self-Healing Behaviour by Cementitious Recrystallization of Cracked Concrete. First International Conference on Self-Healing Materials, n. April, p. 1–10, 2007.

KOENIG, ANDREAS & DEHN, FRANK. Biogenic acid attack on concretes in biogas plants. Biosystems Engineering. Volume 147, p. 226-237, 2015.

KRYTON International Inc. Tecnologia de impermeabilização cristalina. FCI – Fábrica de Concreto Internacional, Alemanha, Edição n. 6, p. 38-39, 2008.

KULAKOWSKI, M. P. Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa. 2002. 199 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Minas e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

KULAKOWSKI, M.P.; VIEIRA, F.P.; DAL MOLIN, D.C.C. Relatório Convênio Camargo Correa Industrial. Porto Alegre: NORIE/CPGEC/UFRGS, 1997.

LAMBERT, P. ATKINS, C. Corrosão e degradação de materiais de engenharia em Shreir's Corrosion, 2010.

LEA, F. M. The chemistry of cement and concrete, 3ª Ed., Chem. Publ., Londres, UK. 1971.

LEEMANN, A.; LOTHENBACH, B.; SIEGRIST, H.; HOFFMANN, C. Influence of water hardness on concrete surface deterioration caused by nitrifying biofilms in wastewater treatment plants. *International Biodeterioration & Biodegradation*, p. 489-498, 2010.

LIBORIO, J. B. L. SET 5891 - Tecnologia dos concretos estruturais. Notas de aula (Disciplina de pós-graduação). São Carlos: Departamento de engenharia de estruturas, EESC. Universidade de São Paulo, 2007.

LIN, K. L. Characteristics of waste catalyst reused as latent hydraulic materials. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. Volume 32, p. 94-98, 2013.

LOPES, A. N. M. Avaliação comparativa de concretos com e sem sílica ativa para resistências entre 50 e 65 MPa. 1999, 170p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Brasília.

LORS, C.; MIOKONO, E.D.H.; DAMIDOT, D. Interactions between *Halothiobacillus neapolitanus* and mortars: Comparison of the biodeterioration between Portland cement and calcium aluminate cement. *International Biodeterioration & Biodegradation*. Volume 121, p. 19-25, 2017.

M.L. Berndt Evaluation of coatings, mortars and mix design for protection of concrete against sulphur oxidising bacteria. *Constr. Build. Mater.* Volume 25, Issue 10, p. 3893-3902, 2011.

MACANOVSKIS, Artūrs et al. Mechanical Properties and Self-Healing Effect of Concrete Containing Capillary Hydro Insulation Admixture. *Construction Science*, Riga, Letônia, 2016.

MAILVAGANAM, N. P. Admixtures for Repair and Restoration of Concrete. In: RAMACHANDRAM, V. S. (Ed.). *Concrete Admixtures Handbook: Properties, Science, and Technologies*. Second ed. Ottawa: Elsevier. p. 843–865, 1995.

MALHOTRA, V. M. Fly ash, slag, sílica fume, and rice-hush ash in concrete: a review. *Concrete International*, Volume 15, Issue 4, p. 23-28, 1993.

MANGAT, P. S.; EL-KHATIB, J. M. Influence of initial curing on sulphate resistance of blended cement concrete. *Cement and concrete Research*, Volume 22, p.1089-1100, 1992.

MARQUEZ-PEÑARANDA J. F. SANCHEZ, M. Effects of biodeterioration on the mechanical properties of concrete. *Materials and Structures*, Volume 49, p. 4085 - 4099, 2016.

MEDEIROS, J. R. A.; LIMA, M. BALESTRA, C. Identificação das Principais Manifestações Patológicas em Estruturas de Concreto Armado Pertencentes ao DCTA. In: Congresso Internacional sobre Patologia e Reparação de Estruturas. João Pessoa. Anais. João Pessoa: IFPB. p. 1 – 9, 2013.

MEHTA, P. K. & AITCIN, P. C. (1990). Microstructural basis of selection of materials and mix proportions for high-strength concrete, in: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON UTILIZATION OF HIGH STRENGTH CONCRETE, 2. Detroit. American Concrete Institute, p. 265-286. (SP-121) apud SHAH, S. A. AHMAD, S. H. High performance concretes and applications. London, Edward Arnold. p.13, 1994.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais. Tradução de Paulo Helene et al. 1ª ed. São Paulo, PINI, 1994. 580p. ISBN 85-7266-040-2.

MEHTA, P. Kumar.; MONTEIRO, Paulo. J. M. Concreto. Microestrutura, propriedades e materiais. 2 ed. São Paulo: IBRACON, p. 751, 2014.

MONTENY, J. BELIE, N. D., VINCKE, E., VERSTRAETE, W. e TAERWE, L, Chemical and microbiological tests to simulate sulfuric acid corrosion of polymer-modified concrete. Cement and Concrete Research, Volume 31, p. 1359-1365, 2001.

MONTENY, J. VINCKE, E. BEELDENS, A. DE BELIE, N.; TAERWE, L, GEMERT, D. V. VERSTRAETE, W. Chemical and microbiological tests to simulate sulfuric acid corrosion of polymer-modified concrete. Cement and Concrete Research, Volume 31, Issue 9, 1359–1365, 2000.

MORI, T.; NONAKA, T.; TAZAKI, K.; KOGA, M.; HIKOSABA, Y.; NODA, S. Interactions of nutrients, moisture, and pH on microbial corrosion of concrete sewer pipes. Water Research, Volume 26, p. 29–37, 1992.

MOTSIELOA. N. Acid Resistance of Sewer Pipe Concrete. Dissertação: Universidade da Cidade do Cabo, 2012.

MUNN, R.; KAO, G.; CHANG, Z. Durability Performance of Australian Commercial Concrete Modified with Permeability Reducing Admixture. 22th Biennial Conference - CONCRETE 05, 2005.

MUNN, R.; KAO, G.; CHANG, Z. Performance and compatability of permeability reducing and other chemical admixtures in Australian concretes. ACI-CANMET_Berlin, Volume 217, 003.

MUYNCK, W. D., BELIE, N. D. e VERSTRAETE, W. “Effectiveness of admixtures, surface treatments and antimicrobial compounds against biogenic sulfuric acid corrosion of concrete. Cement and Concrete Composites, Volume 31, p. 163-170, 2009.

NAGATAKI, S.; GOMI, H. Expansive admixtures (mainly ettringite). Cement and Concrete Composites, Volume 20, p. 163–170, 1998.

NAZARI, A.; BAGHERI, A.; RIAHI, S. Properties of geopolymer with seeded fly ash and rice husk bark ash. *Materials Science and Engineering A*, Volume 528, Issue 24, p. 7395– 7401, 2011.

NEPOMUCENO, E. G. Métodos numéricos: interpolação, extrapolação, aproximação e ajuste de funções. Minas Gerais: UFSJ; CEFET-MG, 2016.

NEVES, A. P. N. DAS, FERREIRA, D. DA S., CASTRO, D. A., & CAVALLINI, G. S. Avaliação da eficiência de remoção de matéria orgânica em efluente sanitário em função da idade do lodo de reator UASB: um estudo de caso. *Journal of Biotechnology and Biodiversity*, Volume 7, Issue 4, p. 449-456, 2019

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. 5ª ed. Rio Grande do Sul: Bookman Editora Ltda, p. 887, 2016.

NEVILLE, A.M., BROOKS, J.J. Tecnologia do Concreto. 2 ed. Porto Alegre: Bookman. p. 448, 2013.

NICA, D.; DAVIS, J. L.; KIRBY, L.; ZUO , G.; ROBERTS, D.J. Isolation and characterization of microorganisms involved in the biodeterioration of concrete in sewers. *International Biodeterioration & Biodegradation*, Volume 46, p. 61 – 68, 2000.

NIELSEN, A.H. VOLLERTSEN, J. JENSEN, H.S. WIUM-ANDERSEN, T. HVITVED-JACOBSEN, T. Influence of pipe material and surfaces on sulfide related odor and corrosion in sewers, *Water Research*. Volume 42, p. 4206–4214, 2008.

NIELSEN, H. VOLLERTSEN, J. JENSEN, H.S. WIUM-ANDERSEN, T. HVITVED-JACOBSEN, T. Influence of pipe material and surfaces on sulfide related odor and corrosion in sewers. *Water Research*, Volume 42, Issue 15, p. 4206-4214, 2008.

NORHASRI, M. S. M.; HAMIDAH, M. S.; FADZIL, A. M. Applications of using nano material in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, Volume 133, p. 91- 97, 2017.

NURAG & PAWADE, PRASHANT. (2015). Characteristics of Silica Fume Concrete.

O'CONNELL, M., MCNALLY, C., & RICHARDSON, M. G. Biochemical attack on concrete in wastewater applications: A state of the art review. *Cement and Concrete Composites*, Volume 32, p. 479–485, 2010.

OERTEL, T. HELBIG, U. HUTTER, F. KLETTI, H. SEXTL, G. Influence of amorphous silica on the hydration in ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, Volume 58, p. 121-130, 2014.

OLIVEIRA, A. de S. Estudo do Potencial de Aditivo Cristalizante como Estimulador de Autocicatrização de Fissuras de Matrizes Cimentícias/ UFRJ/COPPE, 294 p. 2019.

OURIVES, C. N.; BILESKY, P. C.; YOKOYAMA, C. M. Avaliação do Desempenho dos Sistemas de Impermeabilização por Cristalização Capilar do Concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 50, 2008, Salvador. Anais...Salvador, Ed. IBRACON, 2008.

OURIVES, Cláudio Neves; BILESKY, Pedro Carlos; YOKOYAMA, Celina Miki; PIRES, Heloisa Bolorino. Avaliação do desempenho dos sistemas de impermeabilização por cristalização capilar do concreto. *Concreto & Construções*. São Paulo. Ano XXXVII. Edição n. 55, pg. 24-32 Jul. ago. set. 2009.

PACHECO, F. Investigação da relação entre os parâmetros de projeto das estruturas de concreto armado visando à durabilidade 193 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2016.

PALIN, D.; WIKTOR, V.; JONKERS, H. M. Autogenous healing of marine exposed concrete: Characterization and quantification through visual crack closure. *Cement and Concrete Research*, Volume 73, p. 17–24, 2015.

PARK, K. et al. Mitigation strategies of hydrogen sulphide emission in sewer networks - A review. *International Biodeterioration & Biodegradation*, Volume 95, p. 251 – 261, 2014.

PARKER, C1. D. & PRISK, J. The oxidation of inorganic compounds of sulphur by various sulphur bacteria. *Journal of General Microbiology*. Volume 8, p. 344-364. 1953.

PATEL, R. A.; PERKO, J.; JACQUES, D.; SCHUTTER, G.; YE, G.; BREUGEL, V. B. A three-dimensional lattice Boltzmann method based reactive transport model to simulate changes in cement paste microstructure due to calcium leaching, *Construction and Building Materials*, Volume 166, p. 158-170, 2018.

PATIL, HITESH & DWIVEDI, KAMAL & CHATTERJEE, ANIRUDDHA. Optimize properties of Concrete With Silica Fume. 2017.

PAVLIK, V. Corrosion of hardened cement paste by acetic and nitric acids – Part I: Calculation of corrosion depth. *Cement and Concrete Research*, Volume 24, Issue 3, p.551-562, 1994.

PAVLIK, VLADIMIR & UNČÍK, S. The rate of corrosion of hardened cement pastes and mortars with additive of silica fume in acids. *Cement and Concrete Research - Cement and Concrete Research*. Volume 27, Issue 11, p. 1731-1745, 1997.

PAZDERKA, J.; HÁJKOVÁ, E. Crystalline Admixtures and Their Effect on Selected Properties of Concrete. *Acta Polytechnica*, Volume 56, Issue 4, p. 291, 2016.

PCA. Portland Cement Association. *Concrete Information: Types and Causes of Concrete Deterioration*. PCA R&D Serial No. 2617, 2002.

PCA. Portland Cement Association. *Concrete Information: Types and Causes of Concrete Deterioration*. PCA R&D Serial No. 2617, 2002.

PINTO, J., TAKAGI, E.M. Sistemas de impermeabilização e proteção para obras de saneamento, *Concreto & Construções*, Ano XXXIV, No. 47, p. 73-79, 2007.

PONTES, P.P., CHERNICHARO, C.AL., PORTO, M.T.R. Perfil de decaimento da concentração de ácidos graxos voláteis em um reator UASB utilizado para o tratamento de Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG. Esgoto sanitário e operando sob diferentes tempos de detenção hidráulica. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL, 18, 2002, Cancun, México. Proceedings... Cancun: AIDIS, 2002.

QIAN, S. et al. Self-healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating local waste materials. *Cement and Concrete Composites*, Volume 31, Issue 9, p. 613–621, 2009

QING, Y. ZENAN, Z. DEYU, K. RONGSHEN, C. Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume. *Construction and Building Materials*. Volume 21, Issue 3, p.539–545, 2007.

RAJU P. S. N. e DAYARATNAM, P. “Durability of Concrete Exposed to Dilute Sulphuric Acid,” *Building and Environment*, Volume 19, Issue 2, p. 75-79, 1984.

REGATTIERI, C.E. X.; SILVA, M. G.; HELENE, P. Influência do tipo de cimento na resistência, na absorção capilar e na difusão de cloretos dos concretos plásticos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 4, 1996, São Paulo. Anais... São Paulo: ABCP, 1999.

REN, J.; LAI, Y.; GAO, J. Exploring the influence of SiO₂ and TiO₂ nanoparticles on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, Volume 175, p. 277-285, 2018.

RILEM TC 116 PCD. Permeability of concrete as a criterion of its durability. *Concrete durability – an approach towards performance testing*. *Materials and Structures*, Volume 32, Issue 4, p. 174-179, 1999.

ROBERTS, D J.; NICA, D.; ZUO, G.; DAVIS, J. L. quantifying microbially induced deterioration of concrete: initial studies. *Inter. Biode. & Biodegra*. Volume 49, Issue 4, 227–34, 2002.

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

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

SAID, A.; ZEIDAN, M.; BASSOUNI, M.; TIAN, Y. Properties of concrete incorporating nano-silica. *Construction and Building Materials*, Volume 36, p.838-844, 2012.

SANCHEZ, F.; SOBOLEV, K. Nanotechnology in concrete—a review. *Construction and building materials*, Volume 24, Issue 11, p. 2060-2071, 2010.

SAND, W. DUMAS, T. e MARCDARGENT, S., “Accelerated Biogenic Sulfuric-Acid Corrosion Test for Evaluating the Performance of Calcium-Aluminate Based Concrete in Sewage Applications,” *Microbiologically Influenced Corrosion Testing*, ASTM STP 1232, p. 234-249, 1994.

SATOH, H. ODAGIRI, M. ITO, T. OKABE, S. Microbial community structures and in situ sulfate-reducing and sulfur-oxidizing activities in biofilms developed on mortar specimens in a corroded sewer system. *Water Research*, Volume 43, Issue 18, p. 4729-4739, 2009.

SCRIVENER, K. e N. BELIE, D. "Bacteriogenic Sulfuric Acid Attack of Cementitious Materials in Sewage Systems," em *Performance of Cement-Based Materials in Aggressive Aqueous Environments*, Springer, p. 305-318, 2013.

SCRIVENER, K. L.; CABIRON, J.L.; LETOURNEUX, R. High performance concretes from calcium aluminate cements. *Cement and Concrete Research*, Volume 29, p. 1215-1223, 1999.

SHIRAKAWA, M. A., *Estudo da deterioração do concreto por Thiobacillus*, São Paulo, 1994.

SIDDIQUE, R.; KHAN, M. I. *Supplementary cement materials*. New York: Springer, 2011.

SIDDIQUE, R. Utilization of silica fume in concrete: review of hardened properties. *CrossRefView Record in ScopusGoogle ScholarSiddique*. p. 923-932, 2011.

SISOMPHON, K.; COPUROGLU, O.; KOENDERS, E. A. B. Self crack healing of strain hardening cementitious composite incorporating expansive agent and crystalline additive. *Concrete - Proceedings of Concrete Solutions, 4th International Conference on Concrete Repair*, p. 307–312, 2020.

SISOMPHON, K.; COPUROGLU, O.; KOENDERS, E. Effect of exposure conditions on self healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating various cementitious materials. *Construction and Building Materials*, Volume 42, p. 217– 224, 2013.

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

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

STANASZEK-TOMAL, Elzbieta. FIERTAK, Maria. Biological Corrosion in the Sewage System and the Sewage Treatment Plant, *Procedia Engineering*, Volume 161, p. 116-120, 2016.

STAUDT, L.; STAATS, V; FRÖHLICH, J. Evaluation of the performance of special cements under chemical attack. In: *9th International Conference On Concrete Under Severe Conditions Environment and Loading*, 2019, Porto Alegre. *Proceedings 9th International Conference on Concrete under Severe Conditions - Environment and Loading*, 2019.

SUN, X.; JIANG, G.; BOND, P. L; KELLER, J. Impact of fluctuations in gaseous H₂S concentrations on sulfide uptake by sewer concrete: The effect of high H₂S loads. *Water Research*, Volume 81, p. 84 – 91, 2015.

- SUN, X.; JINAG, G.; BOND, P.L.; WELLS, T.; KELLER, J. A rapid, nondestructive methodology to monitor activity of sulfide induced corrosion of concrete based on H₂S uptake rate. *Water Research*, Volume 59, p. 229 – 238, 2014.
- SYDNEY, R. ESFANDI, E. SURAPANENI, S. Control concrete sewer corrosion via the crown spray process. *Water environment research*. Volume 68, Issue 3, p. 338-347, 1996.
- TAFRAOUI, A., ESCADEILLAS, G., VIDAL, T. Durability of the Ultra High Performances Concrete containing metakaolin, *Construction and Building Materials*, Volume 112, p. 980-987, 2016.
- TAKAGI, E. M.; ALMDEIRA, W. J.; OLIVEIRA, F. S. Tratamento químico cristalizante para impermeabilização e proteção de estruturas de concreto armado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Volume 46, 2007, Florianópolis. Anais Florianópolis, Ed. IBRACON, 2007.
- TAYEH, B.A.B. ABU JOHARI, B.H. MEGAT, A. YEN L. Utilization of Ultra-high Performance Fibre Concrete (UHPFC) for Rehabilitation – A Review. *Procedia Engineering*. Volume 54. 525–538. 2013.
- TAYLOR, H.F.W. *Cement Chemistry*, second ed., Academic Press, London, 1993.
- TERMKHAJORNKIT, P. et al. Self-healing ability of fly ash-cement systems. *Cement and Concrete Composites*, Volume 31, Issue 3, p. 195–203, 2009.
- THOMAS, M. D. A. et al. The effect of supplementary cementitious materials on chloride binding in hardened cement paste. *Cement and Concrete Research*, Volume 42, p. 1-7, 2012.
- TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENA, P. Concreto de alto e ultra-alto desempenho. In: ISAIA G.C. *Concreto: ciência e tecnologia - 2 vol. 1. ed.* São Paulo: Ibracon - Instituto Brasileiro de Concreto, 2011. Cap. 36.
- VALIPOUR, A.; AZIZI, S. H.; RAMAN, V. K.; JAMSHIDI, S.; HAMNABARD, N. The comparative evaluation of the performance of two phytoremediation systems for domestic wastewater treatment. *Journal of Environmental Science and Engineering*, Volume 56, Issue 3, p. 319-326, 2014.
- VAN TITTELBOOM, K. et al. Influence of mix composition on the extent of autogenous crack healing by continued hydration or calcium carbonate formation. *Construction and Building Materials*, Volume 37, p. 349–359, 2012.
- VAUGHN, O. D, *Undertanding biogenic sulfuric corrosion. Coating & Lining*, 2007.
- VIEIRA, José Orlando Filho. *Avaliação da Resistência à Compressão do Concreto através de Testemunhos Extraídos: Contribuição à Estimativa do Coeficiente de Correção devido aos Efeitos do Broqueamento.* São Paulo, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Construção Civil, 2007. Universidade de São Paulo, 2007.

- VIEIRA, S.M. M. Experiência e perspectivas do tratamento anaeróbio de esgotos sanitários no Brasil. In: Tratamiento Anaeróbio. III Taller y Seminario Latinoamericano "Tratamiento Anaeróbio de Águas Residuales". Universidad de La Republica, Uruguay, 1994.
- VINCKE, E. VERSTICHEL, S. MONTENY, J. VERSTRAETE, W. A new test procedure for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete Biodegradation, Volume 10, p. 421–428, 1999.
- VINCKE, E.; VAN WANSEELE, E., MONTENY, J.; BEELDENS, A.; DE BELIE, N., TAERWE, L. Influence of polymer addition on biogenic sulfuric acid attack of concrete. International Biodeterioration & Biodegradation, Volume 49, Issue 4, p. 283–92, 2002.
- VOLLERTSEN, J. NIELSEN, A.H. JENSEN, H.S. WIUM-ANDERSEN, T. HVITVED-JACOBSEN, Corrosion of concrete sewers - The kinetics of hydrogen sulfide oxidation. The Science of the total environment. 394. p. 162-170, 2008.
- VON SPERLING, M. Urban wastewater treatment in Brazil / Marcos von Sperling. P. cm. Inter-American Development Bank – IDB Technical Note; 970). 2016.
- WAKSMAN, S.A. JOFFE, J. S. Microorganisms Concerned in the Oxidation of Sulfur in the Soil: II. Thiobacillus Thiooxidans, a New Sulfur-oxidizing Organism Isolated from the Soil. J Bacteriol. Volume 7, Issue 2, p. 239-56, 1922.
- WANG, D. et al. Influence of freeze–thaw on the polishing resistance of coarse aggregates on road surface, Construction and Building Materials, Volume 64, p. 192-200, 2014.
- WIENER, M.S., SALAS, B.V. QUINTERO-NÚÑEZ, ZLATEV, M. R. Effect of H₂S on corrosion in polluted waters: a review. Corrosion Engineering, Science and Technology, Volume 41: Issue 3, p.221-227, 2006.
- WU, ZEMEI & SHI, CAIJUN & KHAYAT, KAMAL. Effect of silica fume content on microstructure development and bond to steel fiber in ultra-high strength cement-based materials (UHSC). Cement and Concrete Composites. Volume 71. 2016.
- XIE, Y. et al., Study on corrosion mechanism of alkali-activated concrete with biogenic sulfuric acid, Construction and Building Materials, Volume 188, p 9-16, 2018.
- YAZICI, H. YIĞİTER, H. KARABULUT, A. S. BARADAN, B.Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete, Fuel, Volume 87, Issue 12, p. 2401-2407, 2008.
- YE, Guang. Percolation of capillary pores in hardening cement pastes, Cement and Concrete Research, Volume 35, Issue 1, p.167-176, 2005.
- YONGSIRI, C. VOLLERTSEN, J. RASMUSSEN, M. HVITVED-JACOBSEN, T.. Air - Water Transfer of Hydrogen Sulfide: An Approach for Application in Sewer Networks. Water environment research: a research publication of the Water Environment Federation. 76. p. 81-88, 2004.

YOUSEFI, A. ALLAHVERDI, A. HEJAZI, P., Accelerated biodegradation of cured cement paste by Thiobacillus species under simulation condition, International Biodeterioration & Biodegradation, Volume 86, Part C, p. 317-326, 2014.

YUAN, H., DANGLA, P., CHATELLIER, P., CHAUSSADENT, T. Degradation modeling of concrete submitted to biogenic acid attack. Cement and Concrete Research, Volume 70, p. 29-38, 2015.

ZHANG, M. LI, H. Pore structure and chloride permeability of concrete containing nano-particles for pavement, Construction and Building Materials, Volume 25, Issue 2, p. 608-616, 2011.

ZHANG, Y. R. et al. Effects of the charge characteristics of polycarboxylate superplasticizers on the adsorption and the retardation in cement pastes. Cement and Concrete Research, Volume 67, p. 184-196, 2015.

ZIVICA, V.; BAJZA, A. Acidic attack of cement - based materials - a review Part 2. Factors of rate of acidic attack and protective measures, Construction and Building Materials, Volume 16, Issue 4, p. 215-222, 2002.

ZIVICA, V.; BAJZA, A. Acidic attack of cement based materials — a review.: Part 1. Principle of acidic attack, Construction and Building Materials, Volume 15, Issue 8, p. 331-340, 2001.

ZIZKOVA, N. et al. Mortars with crystalline additive in aggressive environments. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 385, p. 6, 2018.

APÊNDICE A – QUADRO RESUMO HISTÓRICO DE ESTUDOS

Quadro 1 - Resumo histórico dos estudos mais relevantes sobre ataque químico no concreto

Ano	Autor (es)	Título do trabalho
1970	VAUGHN O'DEA	Undertanding biogenic sulfuric corrosion
1972	BICZÓK, I.	Concrete corrosion, concrete protection
1974	POMEROY	Process design manual for sulfide control in sanitary sewerage systems
1978	THORNTON, H. T.	Acid attack of concrete caused by sulfur bacteria action
1983	MILDE, K. et al.	Thiobacilli of the corroded concrete walls of the hamburg sewer system
1988	ATTIOGBE, E. K.; RIZKALA, S. H.	Response of concrete to sulfuric acid attack
1991	ZIVICA, V.	Corrosion and pore structure of cement composites exposed to the action of aggressive media, in Slovak
1992	MORI, T. et al.	Interactions of nutrients, moisture, and ph on microbial corrosion of concrete sewer pipes
1993	KAWAI, K. et al	Concrete deterioration caused by aerobic bacteria
1994	SAND, W, et al.	Accelerated biogenic sulfuric-acid corrosion test for evaluating the performance of calcium-aluminate based concrete in sewage applications
1994	SHIRAKAWA, M. A	Estudo da biodeterioração do concreto por thiobacillus
1998	DAVIS, J. L., et al.	Analysis of concrete from corroded sewer pipe
1999	EHRICH, S. et al.	Biogenic and chemical sulfuric acid corrosion of mortars
1999	KAEMPFER, W.; BERNDT, M.	Estimation of service life of concrete pipes in sewer networks
2001	MONTENEY, J. et al.	Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete
2001	VINCKE, E. et al.	Analysis of the microbial communities on corroded concrete sewer pipes – a case study
2001	ZIVICA, V.; BAJZA, A.	Acidic attack of cement based materials a review. part 1. principle of acidic attack
2002	VINCKE, E. et al	Influence of polymer addition on biogenic sulfuric acid attack of concrete
2002	YAMANAKA, T. et al.	Corrosion by bacteria of concrete in sewerage systems and inhibitory effects of formates on their growth

2002	ZIVICA, V.; BAJZA, A.	Acidic attack of cement-based materials—a review part 2. factors of rate of acidic attack and protective measures
2004	DE BELIE, N., et al.	Experimental research and prediction of the effect of chemical and biogenic sulfuric acid on different types of commercially produced concrete sewer pipes
2005	BEDDOE, R. E.; DORNER, H. W.	Modelling acid attack on concrete: part i. the essential mechanisms
2005	JANA D.; LEWIN R. A	Acid attack in a concrete sewer pipe – a petrographic and chemical investigation
2007	MONFRONT, L.	Réseaux d'assainissement : gestion patrimoniale et. tuyau en béton
2008	GLASSER, F. P. et al.	Durability of concrete — degradation phenomena involving detrimental chemical reactions
2008	NIELSEN, A. H. et al.	Influence of pipe material and surfaces on sulfide related odor and corrosion in sewers
2008	VOLLERTSEN, J. et al.	Corrosion of concrete sewers—the kinetics of hydrogen sulfide oxidation
2009	ZHANG, L. et al.	Chemical and biological technologies for hydrogen sulfide emission control in sewer systems: a review
2009	MUINCK, W, D., et al.	Effectiveness of admixtures, surface treatments and antimicrobial compounds against biogenic sulfuric acid corrosion of concrete.
2009	ROZIÈRE, E. et al.	Durability of concrete exposed to leaching and external sulphate attacks
2010	GIRARDI, F. et al.	Resistance of different types of concretes to cyclic sulfuric acid and sodium sulfate attack
2010	JOORABCHIAN, S. M.	Durability of concrete exposed to sulfuric acid attack
2010	LEEMANN, A. et al.	Biologically induced concrete deterioration in a wastewater treatment plant Assessed by combining microstructural analysis with thermodynamic modeling
2010	O'CONNELL, M., et al.	biochemical attack on concrete in wastewater applications: a state of the art review
2011	ALEXANDER, M. G.; FOURIE, C.	Performance of sewer pipe concrete mixtures with portland and calcium aluminate cements subject to mineral and biogenic acid attack
2011	MEDEIROS, M. H. F., et al.	Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto
2011	PINHEIRO, S. M. M.; SILVA, M. R	Ações de agentes biológicos no concreto
2012	NASSER, C.; MERIAM, M.	Effect of the addition of microsilica on the durability of mortars exposed to the sodium sulfate attack

2013	EL-AZIZ, M. A.; SUFE, W. H.	Effect of sewage wastes on the physico-mechanical properties of cement and reinforced steel
2013	HILL, J. et al.	An experimental study of combined acid and sulfate attack of concrete
2013	YUAN, H. et al	degradation modelling of concrete submitted to sulfuric acid attack
2014	WELLS, T.; MELCHERS, R. E.	An observation-based model for corrosion of concrete sewers under aggressive conditions
2015	JIANG, G. et al	Identification of controlling factors for the initiation of corrosion of fresh concrete sewers
2015	ROMANOVA, A., et al	Concrete sewer pipe corrosion induced by sulphuric acid environment
2015	TANG, S. W., et al	recent durability studies on concrete structure
2015	MEDEIROS-JUNIOR, R.A., et al.	Avanço do ataque do ácido acético ao concreto - influência da idade de exposição
2016	STANASZEK-TOMAL, E.; FIERTAK, M.	Biological corrosion in the sewage system and the sewage treatment plant
2016	PAN, X. et.al.	Review: A review on surface treatment for concrete – Part 2: Performance
2017	HUBER, B. et al.	Evaluation of concrete corrosion after short- and long-term exposure to chemically and microbially generated sulfuric acid
2017	MEHTA, A.; SIDDIQUE, R.	Sulfuric acid resistance of fly ash based geopolymer concrete
2017	KOENIG, A. et al.	Resistance of alkali-activated binders to organic acid attack: Assessment of evaluation criteria and damage mechanisms
2017	NOEIAGHAEI, T. et al.	Review: Biogenic deterioration of concrete and its mitigation technologies
2017	SONG, M. et al.	Research on Performance and Microstructure of Sewage Pipe Mortar Strengthened with Different Anti-Corrosion Technologies.
2018	AKEXANDER, M. G. et al.	A practical methodology to assess corrosion in concrete sewer pipes.
2018	AIKEN, T. A. et al.	Effect of slag content and activator dosage on the resistance of fly ash geopolymer binders to sulfuric acid attack
2018	KHAN, H. et al.	Deterioration of alkali-activated mortars exposed to natural aggressive sewer environment
2018	XIE, Y. et.al.	Study on corrosion mechanism of alkali-activated concrete with biogenic sulfuric acid
2018	ZEGARDLO. B. et.al.	Analysis of the Effects of Aggressive Environments Simulating Municipal Sewage on Recycled Concretes Based on Selected Ceramic Waste.

2018	GU, L.; BENNETT, T. VISITING, P.	Sulphuric acid exposure of conventional concrete and alkali-activated concrete: Assessment of test methodologies.
2018	MARCOS-MESON, V. at.al.	Durability of Steel Fibre Reinforced Concrete (SFRC) exposed to acid attack – A literature review.
2019	ROGHANIAN, N; BANTHIA, N.	Development of a sustainable coating and repair material to prevent bio-corrosion in concrete sewer and waste-water pipes

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

APÊNDICE B – ESTUDO PILOTO

1 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE CIMENTOS ESPECIAIS SOB ATAQUE QUÍMICO

O trabalho apresentado como Estudo Piloto foi desenvolvido pelos alunos de Mestrado Acadêmico da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), Luis Staudt, com foco no estudo em materiais geopoliméricos, Vanessa Staats, focando no desenvolvimento e aplicação de uma metodologia, Jéssica Fröhlich, focando no estudo de materiais LC³, com a supervisão do Prof. Dr. Mauricio Mancio e da Prof.^a Dr.^a Marlova Piva Kulakowski.

Os estudos foram realizados no Laboratório de Química e no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UNISINOS. Todos os parâmetros foram definidos com base nos trabalhos já realizados na literatura.

1.1 INTRODUÇÃO

Existe uma busca por materiais que minimizem os impactos ambientais e melhorem o desempenho destas estruturas pela ótica da durabilidade.

O objetivo deste trabalho é centrar-se na aplicação de diferentes tipos de cimentos especiais, LC³ (calcário e argila calcinada) e ligantes à base de cimento alcalino submetidos ao condicionamento ácido sulfúrico (H₂SO₄), ácido nítrico (HNO₃) e ácido clorídrico (HCl) a uma concentração de 1% durante cinco ciclos de quatorze dias cada. No final de cada ciclo, tamanho e peso foram medidos. Amostras de controle foram produzidas para comparar os resultados com a amostra submetida a ataque químico. A resistência mecânica foi avaliada aos 7 e 77 dias. Há indicação de que os álcalis apresentam maior estabilidade volumétrica após o ataque químico. No caso das argamassas LC³-RCV e LC³-MK, as adições minerais permitiram maior resistência mecânica para formar um material mais denso e estável. A obtenção desses parâmetros de desempenho pode contribuir para o desenvolvimento de alternativas ao concreto convencional, que cumpre suas funções básicas e, além disso, é ambientalmente sustentável e economicamente viável.

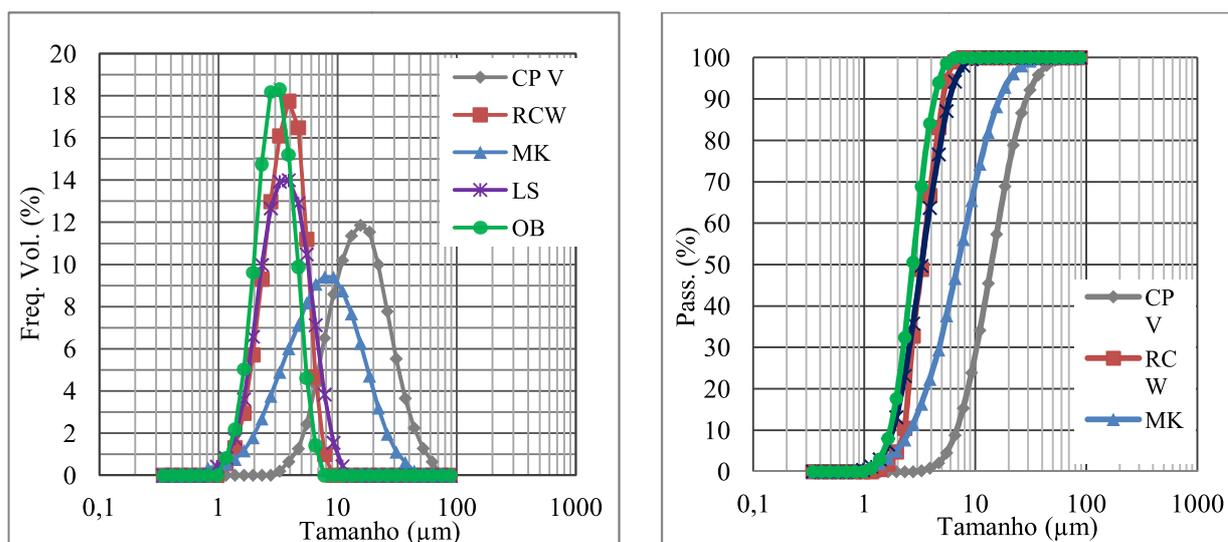
1.2 MATERIAIS

O cimento utilizado para produzir a argamassa de referência neste artigo foi produzido pela Votorantim, código CP IV, classificado como cimento Portland misturado, tipo IV, devido à adição de cinza volante, que pode conter. O cimento LC³ foi produzido com cimento Portland (PC), argila calcinada e calcário - a substituição foi realizada na razão de peso 2:1. Esta pesquisa estudou dois tipos de argilas calcinadas, resíduo de cerâmica vermelha (LC³ - RCV) e metacaulim (LC³ - MK), de acordo com a Tabela 1.

Cimento Portland contendo apenas quantidades vestigiais de calcário foi usado para produzir LC³, código CP-V ARI, de acordo com as normas brasileiras. Filer calcário (FC) foi obtido em Vila Nova do Sul, Brasil. O metacaulim de alta pureza foi retirado da Metacaulim do Brasil. Resíduos de cerâmica de uma fábrica de tijolos (Feliz, Brasil) foram moídos para obtenção de pó fino. Detalhes da sua composição química e física são apresentados na Tabela 1 e na Tabela 2.

A argamassa alcalina ativada foi produzida por cinza vulcânica, com obsidiana específica de Caxias do Sul - RS. O ativador alcalino utilizado foi constituído de hidróxido de sódio P.A. e o silicato de sódio residual previamente produzido a partir da cinza da casca de arroz, através da lixiviação da sílica por ação do NaOH.

Figura 1 - Distribuição granulométrica das matérias-primas medidas por granulometria a laser



Fonte: dos autores.

Tabela 1 - Composição química e características físicas dos principais componentes

Ensaio	CP V	RCV	MK	FC	OB
CaO	54,21	0,86	0,09	43,84	4,1
SiO ₂	15,84	60,09	43,44	12,59	63,4
Al ₂ O ₃	2,79	20,99	32,45	3,57	12,9
Fe ₂ O ₃	2,65	13,19	2,75	1,69	8,2
Na ₂ O	0,4	0,14	0,1	0,49	3,1
TiO ₂	0,18	1,7	0,99	0,24	1,2
K ₂ O	1,03	0,94	2,27	0,6	2,5
MgO	2,9	0,88	0,85	1,08	1,3
P ₂ O ₅	0,1	0,05	0,2	0,12	0,5
FRX					
SO ₃	2,29	-	-	-	-
Cr ₂ O ₃	0,01	-	-	-	-
MnO	0,08	0,2	0,01	0,06	1,3
SrO	0,28	-	-	0,12	< 0,1
ZnO	0,01	-	-	-	< 0,1
BaO	-	-	-	-	< 0,1
ZrO ₂	-	-	-	-	< 0,1
Rb ₂ O	-	-	-	-	< 0,1
LOI	4,17	1,26	2,32	34,95	2,49
Total	86,93	100,3	85,47	99,35	99,79
Área superficial (cm²/g)	16098	231474	220473	33491	189487
Peso específico (g/cm³)	2,9986	2,678	2,519	2,647	2,4614
Análise granulométrica					
D10	6,78	1,92	2,589	1,809	1,709
D50	13,98	3,31	6,95	3,28	2,736
D90	28,82	5,08	16,51	5,85	4,26
DMedio	15,46	3,38	7,99	3,51	2,84

Fonte: dos autores.

1.3. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As argamassas foram produzidas de acordo com cinco proporções de mistura detalhadas na Tabela 2, sendo dois de cimento dois de cimento ativado por álcali e a referência com CP. As argamassas à base de cimento foram produzidas na proporção água/aglomerante de 0,48 segundo a NBR 7215 (ABNT, 1996). A trabalhabilidade foi ajustada para todas as argamassas com superplastificante (até % em peso).

A metodologia adotada na produção de argamassas ativadas com álcali é diferente, o ativador alcalino é homogeneizado 24 horas antes de ser composto de hidróxido de sódio e silicato de sódio. O primeiro passo é a mistura por 15 min da solução alcalina com a obsidiana, depois seguir a areia do rio e homogeneizada por

mais 15 min. As argamassas foram moldadas em prismas de seção 40x40mm e 160 mm de comprimento de acordo com as normas brasileiras ABNT NBR 13279: 2006. As amostras à base de cimento foram curadas a 30°C por 7 dias e as baseadas em álcali-ativado foram curadas a 60°C e 80°C por 24 horas. Foram produzidos no total de 15 amostras para cada tipo de cimento.

Tabela 2 - Proporção da mistura de argamassas

Material	OB (g)	CP (g)	RCV (g)	MK (g)	FC (g)	NaOH (g)	Na ₂ SiO ₃ (g)	Areia (g)	Água (g)	Misturas
AA - 60	624	-	-	-	-	67,73	200,84	1872	142,43	-
AA - 80	624	-	-	-	-	139,07	171,82	1872	179,72	-
LC ³ - RCV	-	363,4	187,2	-	73,38	-	-	1872	300	1,01%
LC3 - MK	-	363,4	-	187,2	73,38	-	-	1872	300	1,43%
REF - CP	-	624	-	-	-	-	-	1872	300	0,42%

Fonte: dos autores.

1.3.1 Teste de resistência a ácidos de amostras de argamassa

O método usado para simular o ataque ácido é baseado em Gorninski, Kazmierczak (2008), porém com algumas mudanças. Após a cura, três amostras foram submetidas em cinco ciclos de ataque, utilizando soluções de ácido clorídrico (HCl), ácido sulfúrico (H₂SO₄) e ácido nítrico (HNO₃), diluídas 1% cada e considerando um volume de solução igual a quatro vezes o volume total os morteiros.

Cada ciclo consiste em 7 dias de imersão em ácido e 7 dias de ambiente de laboratório, totalizando um período de 14 dias. Antes de iniciar cada ciclo, as amostras foram limpas com uma escova de aço para remover a camada com produtos de corrosão na superfície e, em seguida eram pesadas.

A cada novo ciclo, a solução ácida era renovada, medindo o pH antes de colocar a amostra na solução e após retirá-la. A seleção desses ácidos baseou-se na dominância de ambientes à base de cloreto e sulfato presentes em indústrias e estações de tratamento de água e efluentes, que anteriormente demonstravam ter um impacto prejudicial significativo no concreto.

Figura 2 - Ensaio acelerado de ataque químico e amostras em ambiente de laboratório



Fonte: dos autores.

1.3.2 Caracterização de amostras

Medidas de resistência à compressão e à flexão foram realizadas em três amostras aos 7 e 77 dias, iniciais e após o ataque químico, em amostras sem exposição a ácidos. Medidas de força também foram realizadas nas amostras expostas ao ataque após o ciclo final, correspondendo a 77 dias, segundo a ABNT NBR 13279: 2005. Os resultados de cada teste foram obtidos a partir da média de três espécimes.

As perdas de massa e variação volumétrica das amostras foram medidas ao final de cada ciclo de ataque químico, foram submetidas a medidas transversais e longitudinais utilizando um paquímetro.

1.4. RESULTADOS

Como resultado, a análise de amostras submetidas ao ataque de ácidos clorídrico, nítrico e sulfúrico, variações de volume, variação de massa e resistência à flexão e compressão foram obtidas. Como a resistência mecânica foi verificada nas amostras aos 7 dias e aos 77 dias, o que corresponde ao final do 5º ciclo de agressão.

1.4.1 Observação visual

A aparência visual das amostras após serem expostas aos ácidos pode ser observada na Figura 3. O comportamento de deterioração das amostras ocorreu de forma diferente entre as argamassas de cimento Portland e ativadas por álcali, tendo o consumo uniforme de sua superfície e nos demais casos, sendo deteriorado apenas na face inferior, respectivamente, como pode ser visto nas Figura 3 (a) e Figura 3 (b).

As argamassas ativadas com álcali apresentaram uma superfície quase branca, estando relacionadas aos produtos precipitados da reação entre o gel e os respectivos ácidos, conforme relatado Yankwa Djobo et al. (2016).

Nestas amostras o amolecimento da matriz cimentícia ocorreu na fase inferior das amostras, o que causou severa degradação ao remover os produtos degradados ao final de cada ciclo, registrou comportamento similar de amolecimento com as cinzas vulcânicas.

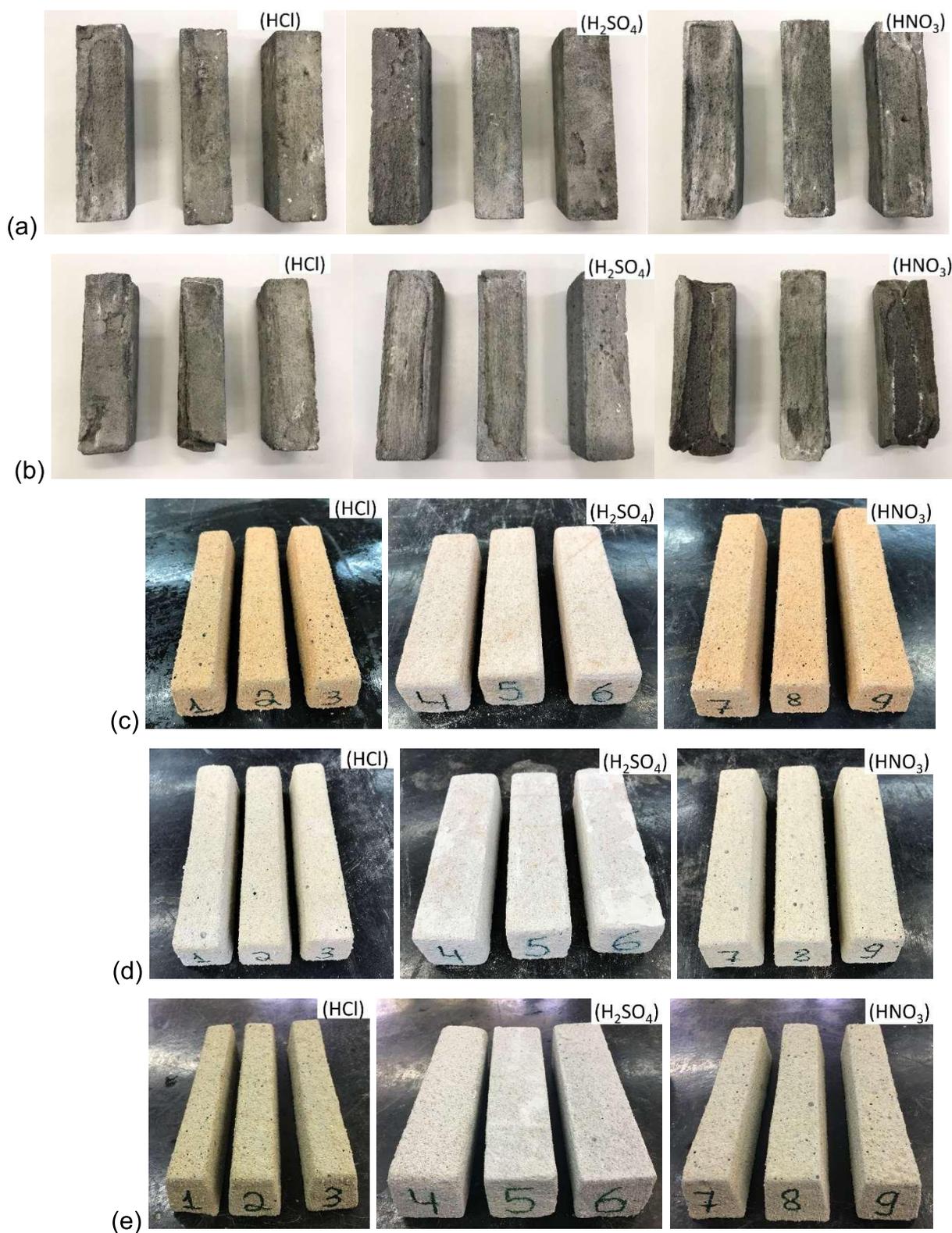
As amostras de LC³-RCV e LC³-MK, respectivamente, são mostradas nas Figura 3 (c) e Figura 3 (d). Argamassas à base de cimento Portland submetidas a ácido sulfúrico sofreram baixa variação de massa e tamanho. Assim, nos primeiros ciclos praticamente não houve variação dimensional para as três misturas de cimento, mas após o terceiro ciclo é possível perceber um aumento na redução de volume, embora seja muito pequeno.

Alguns autores afirmam que as argamassas de cimento Portland submetidas ao ataque com ácido sulfúrico resultam na formação de produtos expansivos, uma vez que o íon sulfato reage com o hidróxido de cálcio para formar gesso ou reage com os aluminatos anídricos para formar etringita.

Nenhuma variação dimensional significativa foi observada nas amostras estudadas, embora a deposição de um pó na superfície da amostra tenha sido observada em um exame visual, indicando uma provável reação entre o ácido sulfúrico e os produtos de hidratação do cimento.

A baixa variação dimensional pode ter ocorrido devido à deposição dos produtos da reação nos poros presentes na amostra de argamassa, inibindo a expansão da amostra. Este fator é relatado por vários autores como sendo fundamental para a análise dos efeitos do ataque químico, pois o número e tamanho dos poros influenciam totalmente o grau de penetração dos ácidos.

Figura 3 - Aparência visual de (a) AA-60; (b) AA-80; (c) LC³-RCV; (d) LC³-MK; (e) Argamassa CP após imersão em solução de HCl a 1%, solução de H₂SO₄ a 1% e solução de HNO₃ a 1%



Fonte: os autores.

1.4.2 Variação de massa e volume

A Figura 4 (a), Figura 4 (b) e Figura 4 (c) apresentam os gráficos de variação de massa e variação volumétrica das amostras submetidas à agressão dos ácidos clorídrico, sulfúrico e nítrico, respectivamente. Os gráficos mostram que todas as amostras resultam em redução de massa. No entanto, é possível observar que as amostras são separadas em dois grupos de comportamento, as argamassas à base de cimento Portland, que obtiveram uma alta redução de massa, e o grupo de argamassas produzidas com cimentos ativados por álcalis, que resultou em redução de massa uma proporção menor.

Argamassas à base de cimento Portland sofreram maior agressividade quando submetidas ao ácido clorídrico. O cimento de referência levou à maior perda de massa de 69,20% de sua massa inicial. Seguido por argamassa LC³-RCV com redução de 54,03% e LC³-MK de 51,15%.

O ácido nítrico é o segundo ácido mais agressivo em argamassas à base de cimento Portland. Observou-se redução de 40,88%, 39,43% e 34,23% de massa para as argamassas CP-IV, LC³-RCV e LC³-MK, respectivamente.

As amostras submetidas ao ataque de ácido sulfúrico foram as que obtiveram menor redução de massa, o que não era esperado, uma vez que os íons sulfato levam à degradação do concreto. Nesta situação, as argamassas CP-IV, LC³-RCV e LC³-MK obtiveram redução de massa de 5%, 5,91% e 4,78%, respectivamente.

A menor degradação das amostras produzidas com MCSs em relação ao cimento Portland de referência pode ser justificada pelos benefícios que o efeito pozolânico traz para a matriz cimentícia. O uso de minerais pozolânicos reduz a porosidade total de argamassas e concreto e a quantidade total de Ca(OH)₂, devido à reação de materiais pozolânicos com portlandita e formação de maior quantidade de C-S-H. Os produtos da reação pozolânica garantem uma matriz de cimento com menor porosidade e mais densa devido à capacidade de preencher os poros, dificultando a penetração e modificando o transporte de agentes agressivos (CYR, 2013).

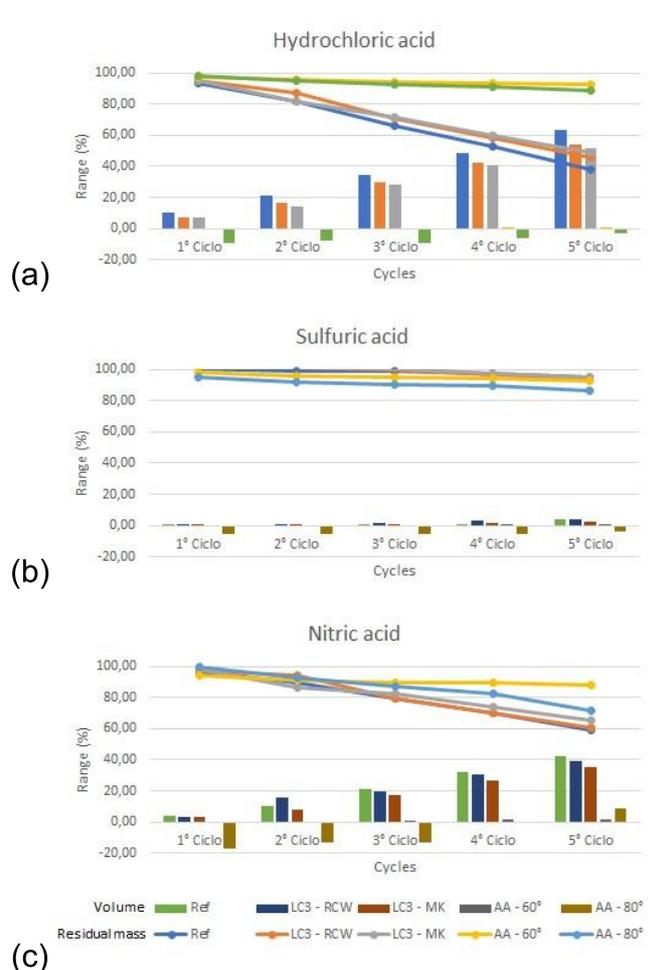
Cyr (2013); Nehdi e M. Hayek (2005); Massazza (2004) e Nehdi, Suleiman, e Soliman (2014) explicam que a durabilidade do concreto contra o ataque físico de sulfato depende significativamente da estrutura de poros do concreto e é menos dependente da composição química e da natureza do aglutinante. Além disso, a

substituição parcial de CP por MCSs reduz a quantidade de C3A presente na mistura, devido ao efeito de diluição de C3A, daí a quantidade de etringita e gesso que podem se formar atacando sulfatos, por exemplo, (NEHDI e HAYEK, 2005).

Em relação ao grupo de argamassas produzidas a partir de cimentos ativados por álcali, é possível notar que a perda de massa é muito menor no final do último ciclo, quando comparada às argamassas à base de cimento Portland. No entanto, o ácido pelo qual esses cimentos foram mais atacados foi o ácido nítrico, levando a uma redução de massa correspondente a 7,29% e 11,20% da massa inicial para as argamassas AA-60°C e AA-80°C, respectivamente. O álcali ativado tinha praticamente o mesmo nível de ataque para os ácidos clorídrico e sulfúrico.

O trabalho sobre durabilidade de concretos alcalinos à base de gesso com uma combinação de hidróxido de sódio e silicato de sódio estudado por Olivia e Nikraz (2012) descobriu que quando o concreto foi submetido a ciclos repetidos de umidificação em água salgada e secagem a alta temperatura, eles mostraram perda de massa e degradação superficial, mas aumentaram a resistência à compressão quando comparados com os valores obtidos para concreto de cimento Portland.

A Figura 4 mostra a variação dimensional das amostras de cimento estudadas. Em geral, observou-se maior variação volumétrica para argamassas produzidas com cimento Portland em relação às argamassas produzidas com cimentos ativados por álcali, para todos os ácidos estudados. Observa-se o grupo de argamassas produzidas com cimento Portland, variação dimensional segue a mesma tendência do comportamento de variação de massa, onde há maior redução de volume para as amostras submetidas ao ácido clorídrico, seguido pelo ácido nítrico e finalmente pelo ácido sulfúrico. Em relação ao tipo de cimento utilizado, de acordo com os resultados da variação de massa, o cimento de referência foi a argamassa mais danificada quando submetida ao ataque, seguida pela LC³-RCV e LC³-MK.

Figura 4 - Variação de massa e volumétrica (a) HCl; (b) H₂SO₄; (c) HNO₃

Fonte: os autores.

Os cloretos podem reagir com os produtos de hidratação do cimento Portland comum, como as fases AFm, para dar novos hidratos, como os cloretoaluminatos de cálcio (sal de Friedel).

De acordo com Paul et al. (2015), o sal de Friedel sempre se forma na presença de grande quantidade de cloreto na solução de troca neutra, quando o monossulfoaluminato (Ms) está presente na pasta. Os autores afirmam ainda que o sal de Friedel também pode ser formado em pastas de cimentos onde se formam as fases de hemicarbonato (Hc) e monocarbonato (Mc). O qual é aplicado no caso dos cimentos LC³ devido à presença de calcário e metacaulim que leva à formação de Hc e Mc, ao invés de Ms (ANTONI et al. 2012).

O uso de MCS como metacaulim aumenta a capacidade de ligação a cloreto, neste caso, há uma maior formação de sal de Friedel, devido à alumina extra fornecida pelo metacaulim. Nas pastas produzidas com misturas cimento-

metacaulim-calcário observa-se a formação do sal de Friedel acompanhado do consumo de monocarbonato e ettringita (SHI et al., 2017).

Segundo Ogawa et al. (2012), os cimentos com MCS com alto teor de alumina combinados com calcário podem melhorar a resistência a sulfatos, pois há formação de mono e hemicarboaluminato em vez de monossulfoaluminato que tende a formar ettringita expansiva quando reage com a fonte de sulfatos externos, embora possa acontecer que o monocarboaluminato se transforma lentamente em ettringita com o fornecimento de íons sulfato externos.

Argamassas à base de cimento Portland submetidas a ácido sulfúrico sofreram baixa variação de massa e tamanho. Assim, nos primeiros ciclos praticamente não houve variação dimensional para as três misturas de cimento, mas após o terceiro ciclo é possível perceber um aumento na redução de volume, embora seja muito pequeno.

Alguns autores afirmam que as argamassas de cimento Portland submetidas ao ataque com ácido sulfúrico resultam na formação de produtos expansivos, uma vez que o íon sulfato reage com o hidróxido de cálcio para formar o gesso ou reage com os aluminatos anidros para formar a ettringita. Nenhuma variação dimensional significativa foi observada nas amostras estudadas, embora a deposição de um pó na superfície da amostra tenha sido observada em um exame visual, indicando uma provável reação entre o ácido sulfúrico e os produtos de hidratação do cimento. A baixa variação dimensional pode ter ocorrido devido à deposição dos produtos da reação nos poros presentes na amostra de argamassa, inibindo a expansão da amostra.

O ataque químico com sulfato pode gerar amplas reações químicas entre íons sulfato e produtos de hidratação do cimento, como a reação entre íons sulfato e hidróxido de cálcio (CH) para formar gesso (CSH₂), além de formar ettringita (C₄AS₃H₃₂) a partir da reação entre cálcio hidratado aluminato (C₄AH₁₃), monossulfato (C₄ASH₁₂₋₁₈) ou aluminato tri-cálcico (C₃A) com o gesso formado durante a primeira reação. A formação de ettringita produz um aumento de volume, podendo causar expansão e fissuras. Com a presença de íons sulfato e carbonato, pode formar o taumasita (C₃SSCH₁₅) com a decomposição das fases do hidrato de silicato de cálcio (CSH), se acordo com Najjar et al. (2017).

A menor perda de massa observada em AA-60°C e AA-80°C pode ser atribuída à ligação bem estruturada de aluminossilicatos a partir de geopolímeros produzidos a partir de cinzas vulcânicas.

As amostras de AA-60°C têm uma maior resistência a ácidos em comparação com a amostra AA-80°C e isto pode ser devido à estrutura do poro.

É bem conhecido que o desempenho do geopolímero na solução ácida está intimamente relacionado com os diâmetros médios dos poros (NEHDI e HAYEK, 2005). O tamanho dos poros também está relacionado à profundidade em que o ácido pode penetrar na amostra. Assim, mesmo que ambas as amostras tenham praticamente a mesma porosidade total, o AA-60°C teria poros muito pequenos ou menos poros conectados do que o outro, reduzindo a difusão desses ácidos. Além disso, a melhor resistência ácida dos geopolímeros também pode estar relacionada à presença de gel rico em Na que neutraliza o ácido sulfúrico (reação ácido-base) e mitigar seus efeitos destrutivos sobre a estrutura dos géis geopoliméricos.

Algumas amostras dos cimentos ativados por álcali exibiram expansão, o que pode ser justificado pelo processo de perda de parte de suas moléculas de água para o meio ambiente e, em seguida, quando reidratadas, quando saturadas, como descrito por Bondar et al. (2015).

1.4.3 Redução na resistência mecânica

A Figura 5 apresenta a resistência à compressão após o final do último ciclo. Para todas as amostras houve redução da resistência ao longo do tempo, devido ao ataque químico. Novamente, há uma distinção entre dois grupos, os cimentos base de cimento Portland e os cimentos ativados por álcali.

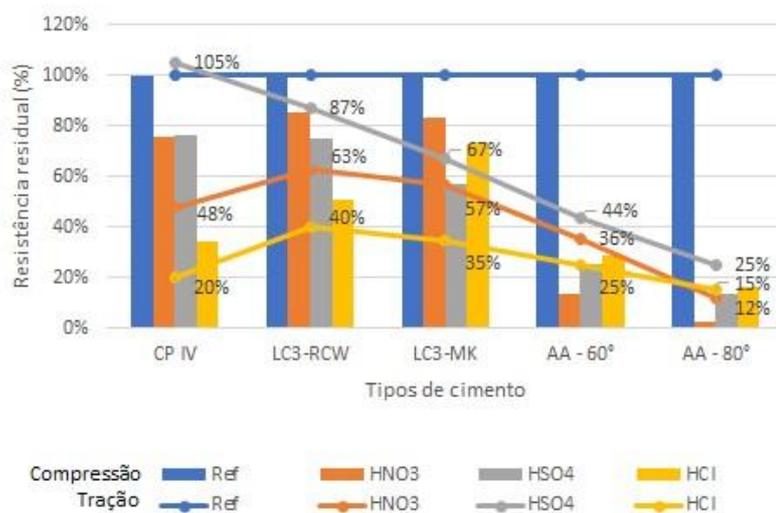
Argamassas à base de cimento Portland foram as amostras que obtiveram maior redução na resistência à compressão. Observou-se que houve melhor desempenho mecânico entre esse grupo, para o LC³-MK, LC³-RCV e CP IV. Este comportamento é repetido para todos os ácidos: clorídrico, sulfúrico e nítrico, e concorda com os resultados encontrados na variação de volume e massa. Entretanto, com relação à perda de resistência em porcentagem, observamos uma ordem inversa, ou seja, entre o grupo de argamassas base de cimento Portland a LC³-MK foi a mistura que obteve a maior porcentagem de redução da resistência à compressão 73%, seguida da LC³- VRC com 51% e o menor CP IV com 34%.

A argamassa produzida com LC³-MK apresentou a menor perda de resistência entre todas as misturas analisadas. Para essa argamassa, é possível concluir que o ácido sulfúrico é o mais agressivo, levando a uma redução de 43% na resistência à compressão. O ataque de ácido clorídrico gerou uma redução de 27% na resistência seguida por ácido nítrico, o que levou a uma redução de 17%. Para a argamassa produzida com LC³-RCV, observou-se redução da resistência à compressão em amostras submersas em redução de ácido clorídrico a 49%, seguido de ácido sulfúrico e ácido nítrico, 25% e 15%. Da mesma forma, o ácido clorídrico foi o mais afetado na resistência à argamassa CP IV, reduzindo sua resistência em 66%, com os ácidos sulfúrico e nítrico levando a uma redução de 24%.

As argamassas produzidas com álcali-ativado foram as que mais sofreram com a ação dos ácidos, pois levaram aos maiores valores de redução percentual de resistência. A argamassa produzida com AA-80°C foi reduzida em 97% de sua resistência, apresentada, seguida do ácido sulfúrico e nítrico com redução de 87% e 84%, respectivamente. Da mesma forma, o traço de AA-60°C foi drasticamente afetado pelo ácido nítrico, levando a uma redução de 87%, seguido por ácido sulfúrico e ácido clorídrico, com 75% e 71%, respectivamente.

Os resultados da variação de resistência encontrada para os álcali-ativados concordam com os resultados encontrados na variação de massa e volume, onde houve maior ataque pelo ácido nítrico. No entanto, para argamassas produzidas com base de cimento Portland, houve divergência entre os resultados dos dois testes. Como a maior variação de volume e massa foi encontrada para as amostras submetidas ao ataque de ácido clorídrico, no entanto, a variação da resistência foi maior para as amostras submetidas ao ácido sulfúrico. A resistência mecânica média do corpo de prova referência é de 17,33 MPa.

Figura 5 - Resistência mecânica (MPa)



Fonte: os autores.

1.5. CONCLUSÕES

O presente trabalho objetivou explorar a durabilidade de argamassas expostas a ambientes favoráveis ao ataque químico sobre cimento álcali-ativado e LC³ produzido com cimento Portland (PC), argila calcinada e calcário. Em ambos os casos, os efeitos causados pela exposição ácida foram investigados. As seguintes conclusões podem ser tiradas do estudo experimental:

- Entre os álcalis ativados, embora os tratados curados a 60°C tenham obtido menor resistência à compressão e flexão em relação à cura a 80°C, apresentaram maior estabilidade volumétrica quando submetidos aos ciclos de ataque químico entre todas as amostras analisadas.

- Houve expansão no álcali ativado, o que pode estar relacionado não apenas ao ataque químico. Este comportamento esperado pode ser atribuído ao tricálcio de aluminato (C3A), levando a uma maior formação de etringita. O ganho inicial de massa pode ser atribuído à reação dos produtos de hidratação entre os óxidos e os íons sulfato penetram na amostra. Produtos que causam expansão podem preencher os poros da pasta causando esse efeito.

- Nas amostras de LC³-RCV e LC³-MK, as adições minerais podem ter proporcionado maior resistência mecânica devido à densificação observada da microestrutura da argamassa. O desempenho relativamente melhor de espécimes que incorporam metacaulim sob exposição química no presente estudo merece uma

investigação mais aprofundada para melhor elucidar seus mecanismos e determinar se esta é uma característica prevalente que pode ser duplicada de forma confiável.

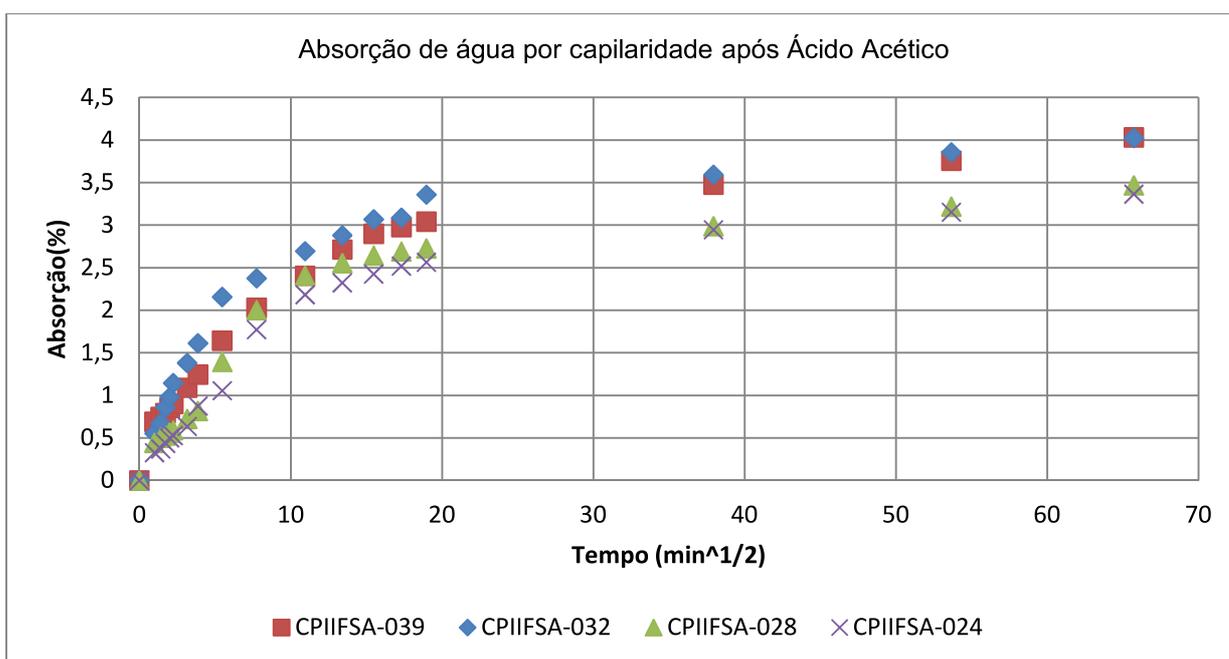
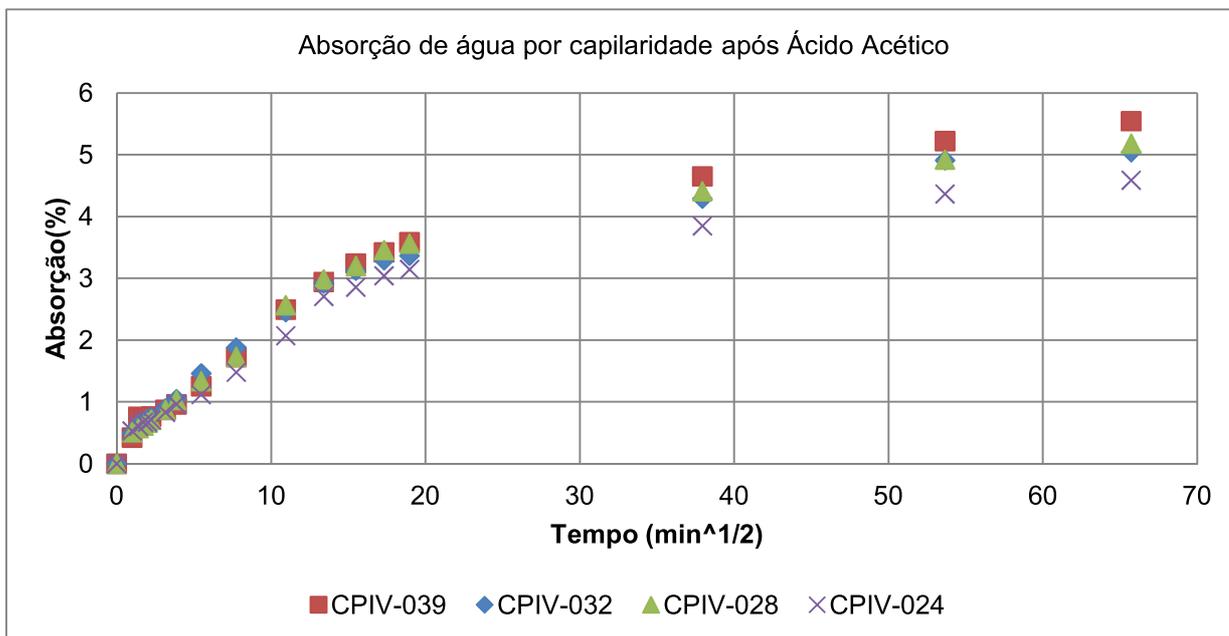
- Todas as argamassas apresentaram redução de resistência mecânica em relação à argamassa de referência, devido ao grande poder de degradação do ácido utilizado.

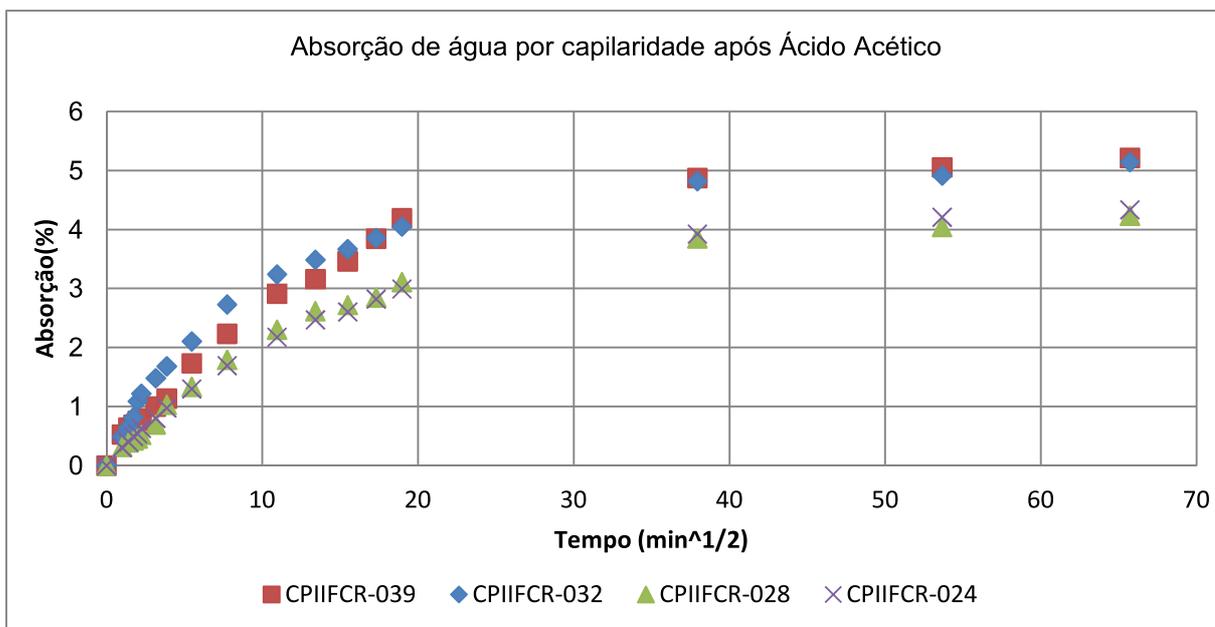
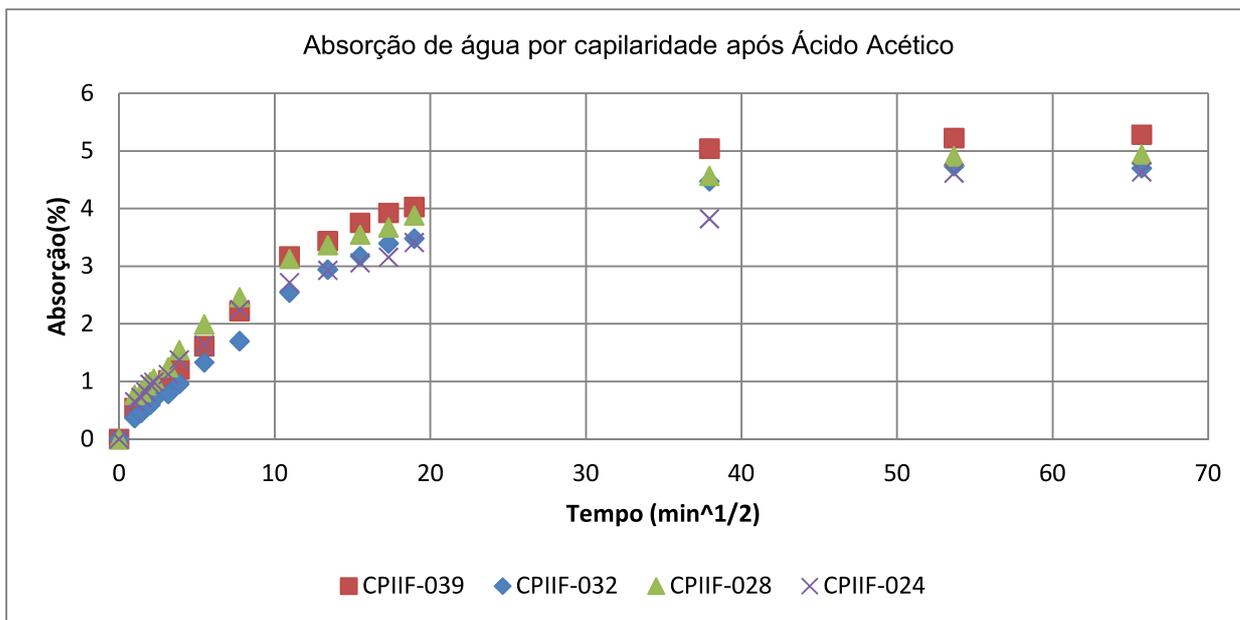
- Formação de produtos expansivos na argamassa geopolimérica mantida na solução de sulfato de sódio. Em todas as soluções ácidas, observou-se a lixiviação do geopolímero, causando apenas a decomposição dos compostos da matriz geopolimérica.

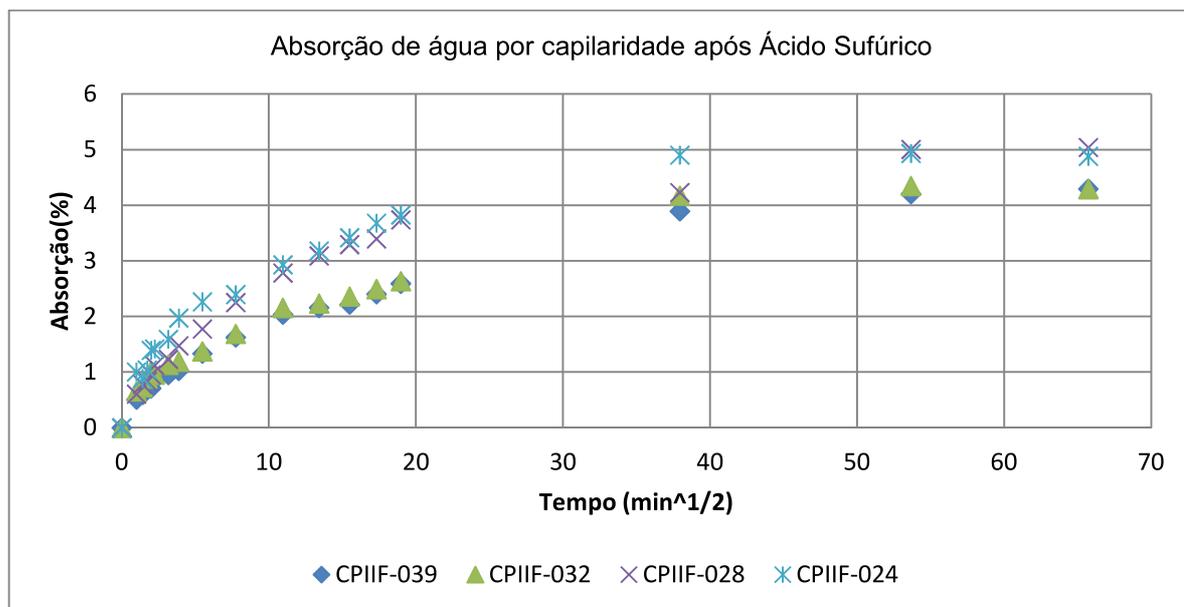
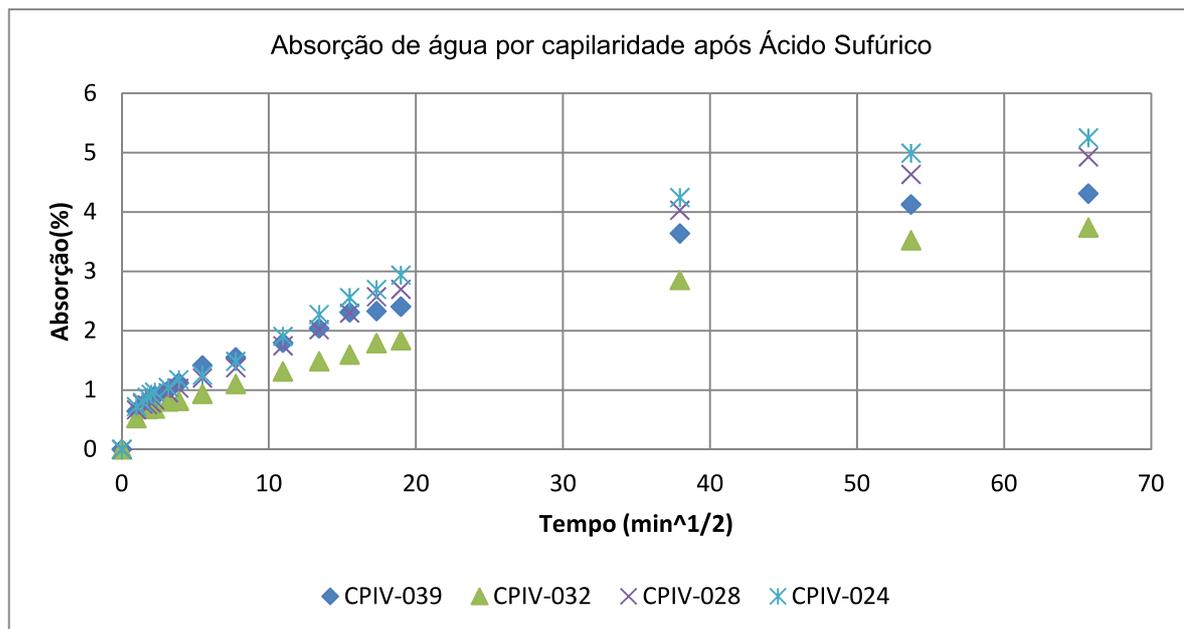
- Amostras alcalinas ativadas mostraram uma alta rugosidade superficial e uma grande perda de massa, o que pode ter uma influência negativa no teste de resistência mecânica devido a uma menor área de contato superficial.

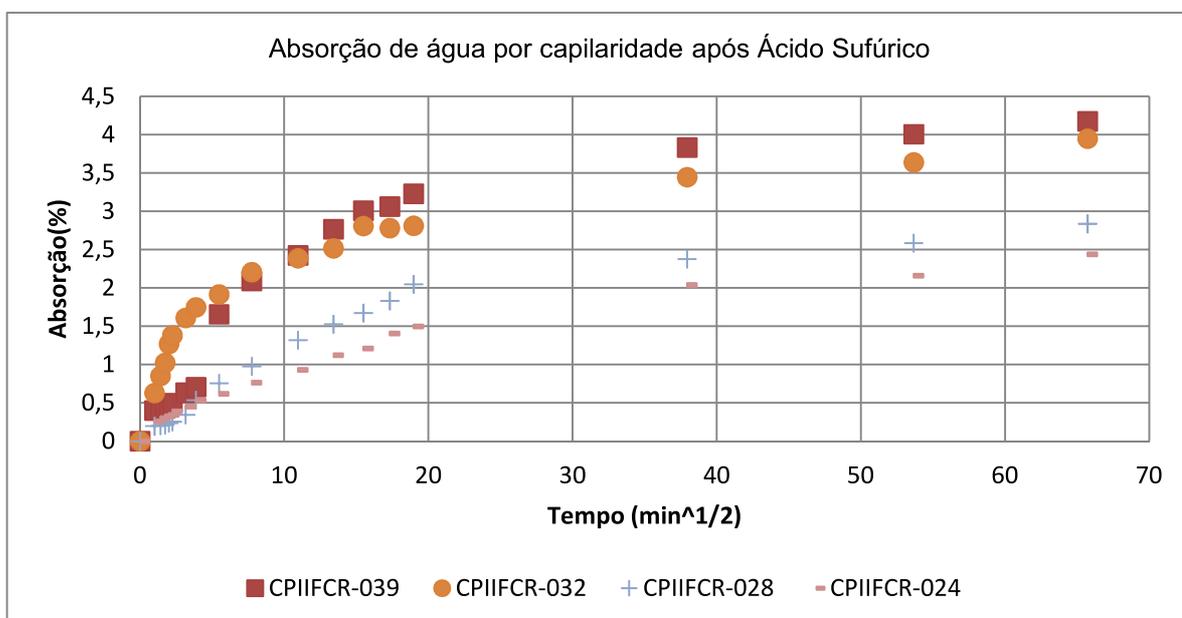
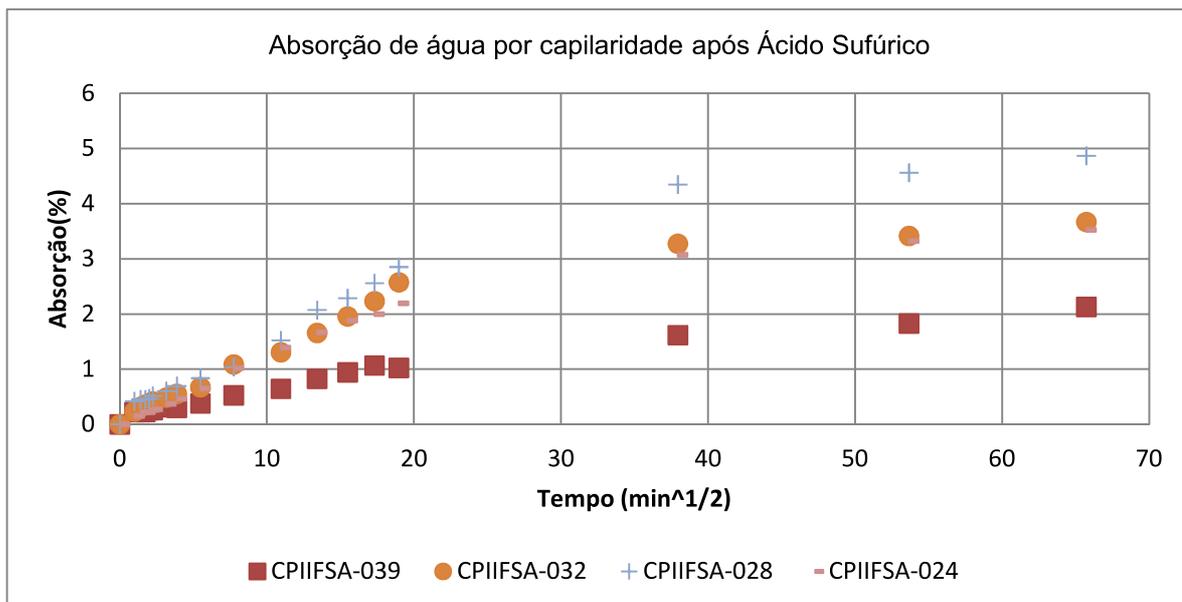
- A resistência à corrosão ácida é um aspecto importante da durabilidade do material. A resistência de uma matriz de cimento à corrosão ácida depende das características da estrutura do material, incluindo duas características de poros, a capacidade de dois componentes de matriz para neutralizar ou acidificar dois produtos de corrosão.

APÊNDICE C – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE









**APÊNDICE D – VALORES DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO
(AMOSTRA SEM ATAQUE QUÍMICO)**

Traço	CP	Resistência à compressão (MPa)								
		Ref. (7 dias)	Média	Potencial	Ref. (28 dias)	Média	Potencial	Ref. (180 dias)	Média	Potencial
CPIV-039	CP 1	35,36			46,48			99,23		
	CP 2	35,98	35,79	36,03	45,43	46,23	46,79	107,74	105,3 4	109,06
	CP 3	36,03			46,79			109,06		
CPIV-032	CP 1	40,69			57,30			121,34		
	CP 2	47,84	45,45	47,84	55,17	56,62	57,41	101,12	106,3 7	121,34
	CP 3	47,83			57,41			96,65		
CPIV-028	CP 1	57,79			67,36			102,72		
	CP 2	57,42	58,65	60,73	70,79	67,95	70,79	94,25	96,12	102,72
	CP 3	60,73			65,70			91,39		
CPIV-024	CP 1	56,81			72,72			140,05		
	CP 2	60,43	58,23	60,43	59,38	65,15	72,72	124,11	130,0 8	140,05
	CP 3	57,44			63,35			126,09		
CPIIF-039	CP 1	81,53			75,68			96,19		
	CP 2	78,14	80,45	81,67	83,08	82,08	87,47	98,92	94,15	98,92
	CP 3	81,67			87,47			87,33		
CPIIF-032	CP 1	74,84			84,35			99,50		
	CP 2	86,76	80,24	86,76	91,90	86,64	91,90	109,70	106,6 7	110,81
	CP 3	79,11			83,67			110,81		
CPIIF-028	CP 1	98,68			105,50			114,90		
	CP 2	88,82	93,50	98,68	94,88	95,05	105,50	106,74	103,9 6	114,90
	CP 3	92,98			84,75			90,24		
CPIIF-024	CP 1	100,10			115,39			131,30		
	CP 2	91,74	89,40	100,10	113,02	111,78	115,39	130,11	131,8 1	134,01
	CP 3	76,36			106,92			134,01		
CPIIFSA-039	CP 1	63,16			93,08			132,39		
	CP 2	62,11	61,14	63,16	88,57	91,20	93,08	135,85	134,9 8	136,72
	CP 3	58,14			91,96			136,72		
CPIIFSA-032	CP 1	77,21			115,33			111,77		
	CP 2	85,51	82,25	85,51	112,19	111,89	115,33	112,85	109,7 2	112,85
	CP 3	84,04			108,15			104,56		
CPIIFSA-028	CP 1	92,49			114,53			143,90		
	CP 2	79,98	84,32	92,49	108,35	108,90	114,53	156,63	151,3 8	156,63
	CP 3	80,49			103,83			153,62		
CPIIFSA-024	CP 1	87,53			108,12			168,22		
	CP 2	74,79	77,32	87,53	70,22	95,56	108,35	141,06	148,9 5	168,22
	CP 3	69,64			108,35			137,58		

CPIIFCR-039	CP 1	70,33			98,11			139,16	132,3 7	139,16
	CP 2	73,15	74,27	79,34	97,22	90,47	98,11	131,91		
	CP 3	79,34			76,08			126,03		
CPIIFCR-032	CP 1	78,90			99,13			108,64	112,4 9	115,68
	CP 2	87,37	80,56	87,37	104,49	102,20	104,49	113,16		
	CP 3	75,42			102,98			115,68		
CPIIFCR-028	CP 1	84,95			103,14			132,87	126,3 1	132,87
	CP 2	71,29	82,53	91,35	103,35	102,71	103,35	124,74		
	CP 3	91,35			101,63			121,33		
CPIIFCR-024	CP 1	97,56			88,03			120,12	124,5 0	126,83
	CP 2	103,38	101,2 2	103,38	108,85	97,71	108,85	126,83		
	CP 3	102,73			96,25			126,56		

**APÊNDICE E – VALORES DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À TRAÇÃO NA
FLEXÃO (AMOSTRA SEM ATAQUE QUÍMICO)**

Traço	CP	Resistência tração na flexão (MPa)					
		Ref. (28 dias)	Média	Potencial	Referência (180 dias)	Média (MPa)	Potencial
CPIV-039	CP 1	14,19			12,87		
	CP 2	15,87	14,42	15,87	11,99	12,62	12,99
	CP 3	13,21			12,99		
CPIV-032	CP 1	16,25			12,64		
	CP 2	17,25	15,93	17,25	12,95	12,74	12,95
	CP 3	14,28			12,63		
CPIV-028	CP 1	14,81			10,41		
	CP 2	16,34	14,38	16,34	9,96	10,41	10,87
	CP 3	12,00			10,87		
CPIV-024	CP 1	14,86			16,27		
	CP 2	14,60	14,24	14,86	16,06	16,27	16,48
	CP 3	13,27			16,48		
CPIIF-039	CP 1	14,96			10,15		
	CP 2	13,99	14,21	14,96	10,86	10,09	10,86
	CP 3	13,68			9,26		
CPIIF-032	CP 1	12,99			14,94		
	CP 2	17,00	15,32	17,00	14,75	14,57	14,94
	CP 3	15,96			14,02		
CPIIF-028	CP 1	15,15			11,52		
	CP 2	14,62	14,88	15,15	11,12	11,23	11,52
	CP 3	14,86			11,06		
CPIIF-024	CP 1	18,23			19,61		
	CP 2	21,00	19,56	21,00	19,43	19,43	19,61
	CP 3	19,45			19,25		
CPIIFSA-039	CP 1	12,89			14,66		
	CP 2	13,68	13,86	15,00	15,00	14,81	15,00
	CP 3	15,00			14,62		
CPIIFSA-032	CP 1	13,30			11,45		
	CP 2	16,66	14,88	16,66	11,39	11,35	11,45
	CP 3	14,69			11,21		
CPIIFSA-028	CP 1	17,08			17,65		
	CP 2	16,68	16,34	17,08	17,12	17,42	17,65
	CP 3	15,25			17,48		
CPIIFSA-024	CP 1	19,13			16,02		
	CP 2	16,29	16,98	19,13	15,12	15,46	16,02
	CP 3	15,53			15,25		

CPIIFCR-039	CP 1	11,04			14,18		
	CP 2	10,47	11,63	13,37	14,65	14,35	14,65
	CP 3	13,37			14,21		
CPIIFCR-032	CP 1	13,93			13,74		
	CP 2	12,82	13,07	13,93	13,05	13,41	13,77
	CP 3	12,46			13,77		
CPIIFCR-028	CP 1	17,47			18,36		
	CP 2	18,14	17,27	18,14	18,13	18,16	18,36
	CP 3	16,19			18,00		
CPIIFCR-024	CP 1	17,64			17,04		
	CP 2	16,18	17,51	18,70	16,69	16,74	17,04
	CP 3	18,70			16,48		

**APÊNDICE F – VALORES DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO
(AMOSTRA APÓS ATAQUE QUÍMICO)**

Tr.	CP	Resistência à compressão (MPa)											
		Acético		Média	Pot.	H ₂ SO ₄		Média	Pot.	Esgoto		Média	Pot.
CPIV-039	CP 1	14,14	17,36			57,77	73,87			101,01	102,40		
	CP 2	49,39	37,69	45,30	82,06	62,40	89,26	66,24	89,26	91,72	142,58	101,64	142,58
	CP 3	82,06	71,15			48,66	65,49			77,19	94,94		
CPIV-032	CP 1	64,63	70,83			60,44	69,00			124,00	100,28		
	CP 2	47,12	56,07	61,38	71,07	41,15	72,19	62,06	72,19	114,81	123,37	118,30	128,79
	CP 3	58,58	71,07			66,20	63,37			118,58	128,79		
CPIV-028	CP 1	59,84	70,86			50,49	55,42			103,58	143,08		
	CP 2	46,62	83,24	62,14	83,24	49,45	44,97	51,26	56,36	102,56	88,66	119,27	147,95
	CP 3	83,24	29,06			56,36	50,89			147,95	129,78		
CPIV-024	CP 1	49,24	71,83			44,11	33,35			136,67	113,29		
	CP 2	77,51	66,05	66,46	77,51	47,56	68,74	48,64	68,74	142,69	76,41	116,89	142,69
	CP 3	66,28	67,85			48,03	50,08			114,65	117,64		
CPIIF-039	CP 1	54,89	51,65			61,15	34,71			69,95	111,56		
	CP 2	34,47	33,22	47,53	56,31	49,89	65,10	59,83	86,43	69,17	122,58	91,57	122,58
	CP 3	54,66	56,31			61,70	86,43			73,46	102,72		
CPIIF-032	CP 1	35,57	57,12			41,44	70,36			68,79	91,80		
	CP 2	52,77	41,93	49,16	58,19	74,42	67,72	61,26	74,42	116,77	83,40	81,23	116,77
	CP 3	58,19	49,39			43,43	70,20			46,33	80,31		
CPIIF-028	CP 1	82,64	79,03			58,71	43,53			75,91	124,18		
	CP 2	29,84	51,91	61,63	82,64	53,06	53,45	51,76	58,71	75,82	135,54	98,08	135,54
	CP 3	50,73	75,62			51,49	50,31			78,27	98,79		
CPIIF-024	CP 1	80,68	38,40			63,90	68,58			134,05	126,43		
	CP 2	45,86	42,48	58,41	80,68	53,06	53,45	56,80	68,58	138,92	90,33	113,98	138,92
	CP 3	71,02	72,01			51,49	50,31			107,69	86,46		
CPIIFSA-039	CP 1	37,25	40,44			34,68	72,64			115,04	114,18		
	CP 2	45,15	40,89	44,34	54,47	62,66	63,46	66,18	93,14	111,80	109,86	112,76	120,46
	CP 3	54,47	47,82			93,14	70,52			105,23	120,46		
CPIIFSA-032	CP 1	68,48	42,99			79,21	71,59			127,84	134,73		
	CP 2	54,53	18,22	51,02	68,84	69,81	50,76	62,82	79,21	123,37	146,22	132,63	146,22
	CP 3	68,84	53,09			63,08	42,46			133,11	130,49		
CPIIFSA-028	CP 1	65,05	47,98			56,91	68,77			149,75	152,19		
	CP 2	59,21	85,41	65,57	85,41	55,23	53,66	58,42	68,77	90,52	92,74	124,90	152,19
	CP 3	68,01	67,77			60,70	55,28			133,50	130,67		
CPIIFSA-024	CP 1	85,79	106,07			49,68	69,79			141,51	151,64		
	CP 2	70,65	19,79	77,86	106,07	42,88	70,73	61,17	70,73	162,63	145,98	148,09	162,63
	CP 3	83,39	101,46			65,62	68,32			142,77	144,00		

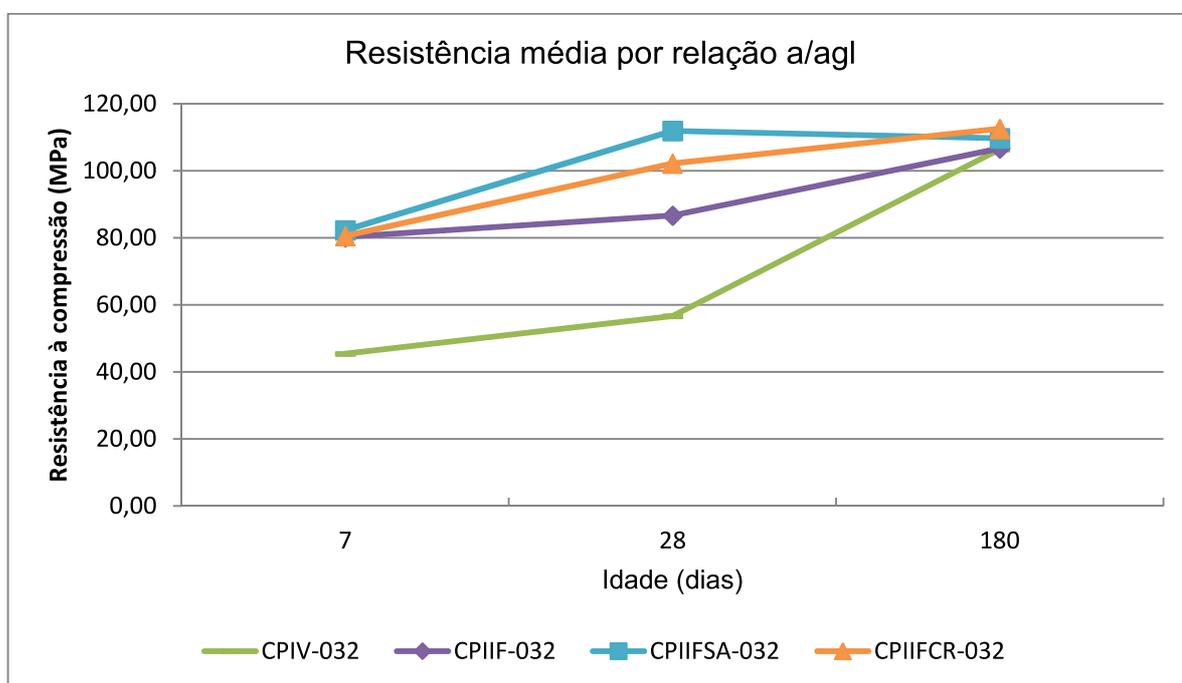
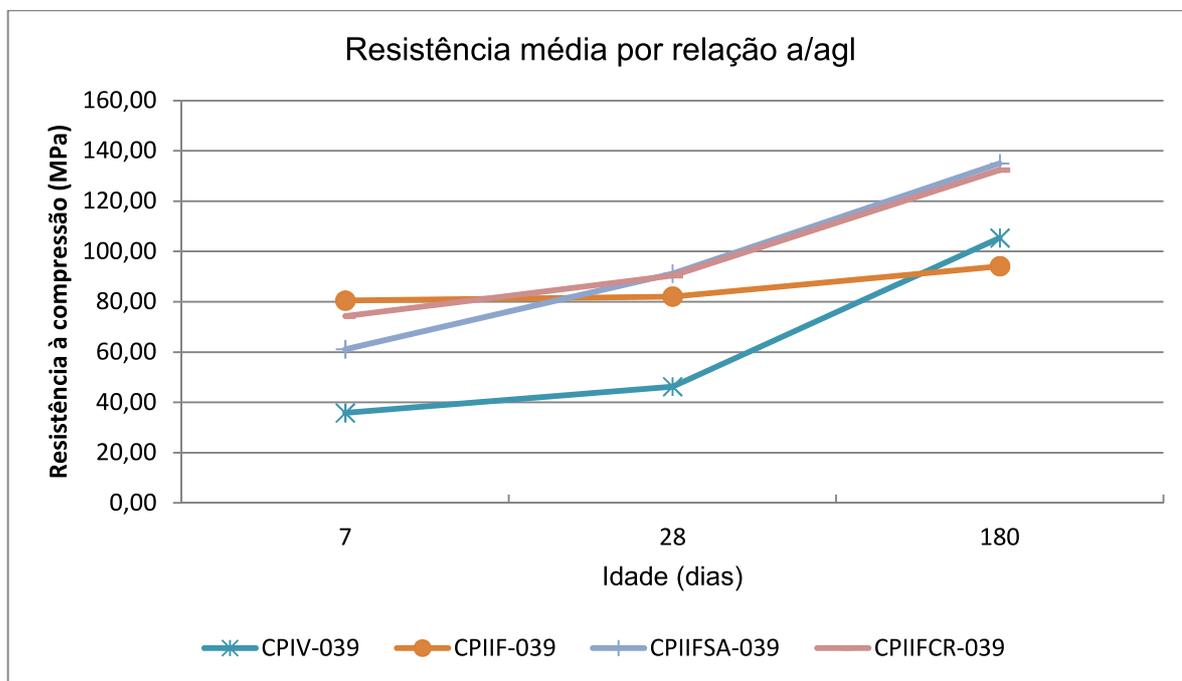
	CP 1	37,41	55,31			51,97	34,94			109,34	96,67		
CPIIFCR-039	CP 2	41,67	34,68	44,85	55,31	52,27	32,21	44,77	52,33	112,69	108,32	97,99	112,69
	CP 3	52,13	47,89			52,33	44,92			74,45	86,46		
	CP 1	53,25	56,67			64,81	42,04			118,11	110,73		
CPIIFCR-032	CP 2	72,55	39,99	54,45	72,55	62,40	81,25	67,69	81,77	112,45	116,07	110,08	118,11
	CP 3	49,03	55,23			81,77	73,84			94,86	108,29		
	CP 1	77,06	70,37			61,67	66,93			112,69	103,34		
CPIIFCR-028	CP 2	78,90	60,56	68,96	78,90	76,38	61,91	60,96	76,38	125,96	106,41	101,63	125,96
	CP 3	67,61	59,26			55,15	43,69			53,48	107,90		
	CP 1	97,67	54,38			76,31	50,85			114,49	100,20		
CPIIFCR-024	CP 2	94,25	63,13	70,09	97,67	61,71	49,30	60,80	76,31	147,24	128,79	123,53	147,24
	CP 3	60,86	50,29			59,26	67,35			144,26	106,17		

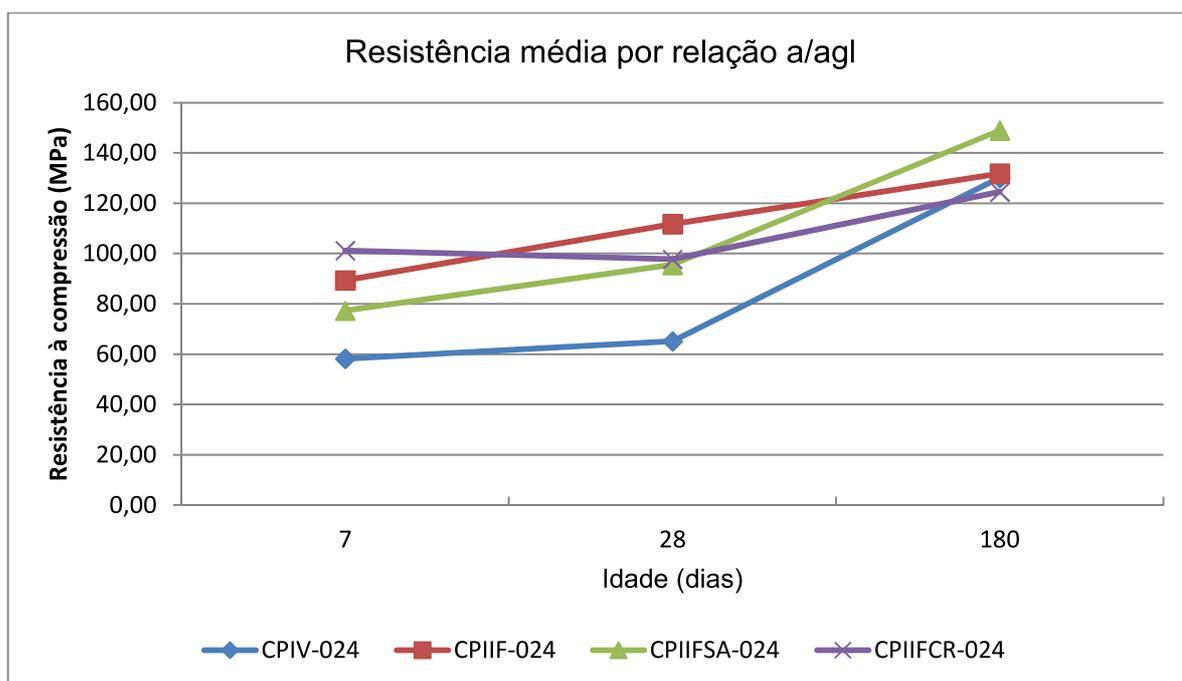
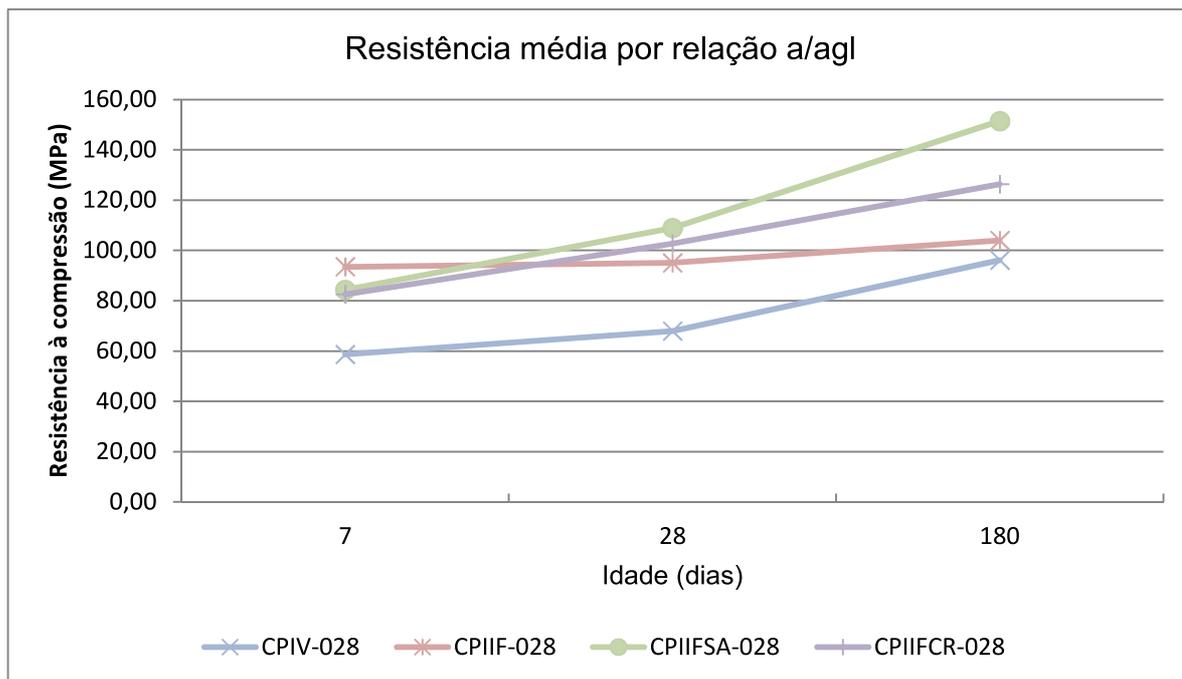
APÊNDICE G – VALORES DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (AMOSTRA APÓS ATAQUE QUÍMICO)

Traço	CP	Resistência tração na flexão (MPa)								
		Acético	Média	Potencial	H ₂ SO ₄	Média	Potencial	Esgoto	Média	Potencial
CPIV-039	CP 1	9,93			11,78			12,67		
	CP 2	8,91	9,99	9,99	8,09	10,22	11,78	12,38	12,28	12,67
	CP 3	11,14			10,79			11,80		
CPIV-032	CP 1	10,81			1,03			13,58		
	CP 2	9,40	9,97	9,97	8,66	5,71	8,66	14,61	13,65	14,61
	CP 3	9,71			7,45			12,75		
CPIV-028	CP 1	11,54			10,34			13,22		
	CP 2	8,97	10,45	10,45	10,39	9,67	10,39	13,36	12,43	13,36
	CP 3	10,84			8,27			10,72		
CPIV-024	CP 1	12,60			10,10			13,27		
	CP 2	11,96	11,35	11,35	10,16	10,17	10,24	13,13	12,75	13,27
	CP 3	9,50			10,24			11,85		
CPIIF-039	CP 1	8,88			10,99			11,57		
	CP 2	8,94	9,52	9,52	10,49	10,74	10,99	12,84	12,21	12,84
	CP 3	10,76			10,75			12,21		
CPIIF-032	CP 1	11,57			8,14			11,60		
	CP 2	9,73	9,85	9,85	8,20	8,54	9,28	14,44	12,54	14,44
	CP 3	8,25			9,28			11,57		
CPIIF-028	CP 1	11,29			9,44			13,52		
	CP 2	9,67	11,38	11,38	11,27	9,95	11,27	13,04	13,54	14,06
	CP 3	13,19			9,15			14,06		
CPIIF-024	CP 1	10,43			8,93			16,28		
	CP 2	11,25	11,43	11,43	8,53	8,71	8,93	17,86	16,87	17,86
	CP 3	12,61			8,67			16,47		
CPIIFSA-039	CP 1	11,37			10,41			11,51		
	CP 2	8,66	9,51	9,51	11,48	11,56	12,79	12,21	12,36	13,37
	CP 3	8,50			12,79			13,37		
CPIIFSA-032	CP 1	12,19			8,64			11,88		
	CP 2	12,65	12,29	12,29	8,50	9,23	10,54	15,40	13,46	15,40
	CP 3	12,03			10,54			13,12		
CPIIFSA-028	CP 1	11,34			10,48			15,25		
	CP 2	13,61	11,67	11,67	8,69	9,42	10,48	14,90	14,57	15,25
	CP 3	10,05			9,08			13,55		
CPIIFSA-024	CP 1	13,61			6,55			17,08		
	CP 2	12,47	13,31	13,31	11,17	9,79	11,64	14,55	15,17	17,08
	CP 3	13,86			11,64			13,87		

CPIIFCR-039	CP 1	8,68			8,32			9,86		
	CP 2	7,62	7,66	7,66	8,99	9,18	10,24	9,35	10,38	11,94
	CP 3	6,68			10,24			11,94		
CPIIFCR-032	CP 1	10,36			11,29			12,44		
	CP 2	9,84	10,07	10,07	9,63	10,68	11,29	11,44	11,67	12,44
	CP 3	10,00			11,12			11,13		
CPIIFCR-028	CP 1	11,96			11,92			15,60		
	CP 2	11,51	11,91	11,91	12,34	11,87	12,34	13,52	14,52	15,60
	CP 3	12,26			11,34			14,45		
CPIIFCR-024	CP 1	11,68			10,52			15,75		
	CP 2	11,95	11,77	11,77	10,66	10,30	10,66	13,55	15,33	16,69
	CP 3	11,68			9,71			16,69		

APÊNDICE H – GRÁFICOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO (AMOSTRA SEM ATAQUE QUÍMICO)





APÊNDICE I – ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO ÁGUA/AGLOMERANTE NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

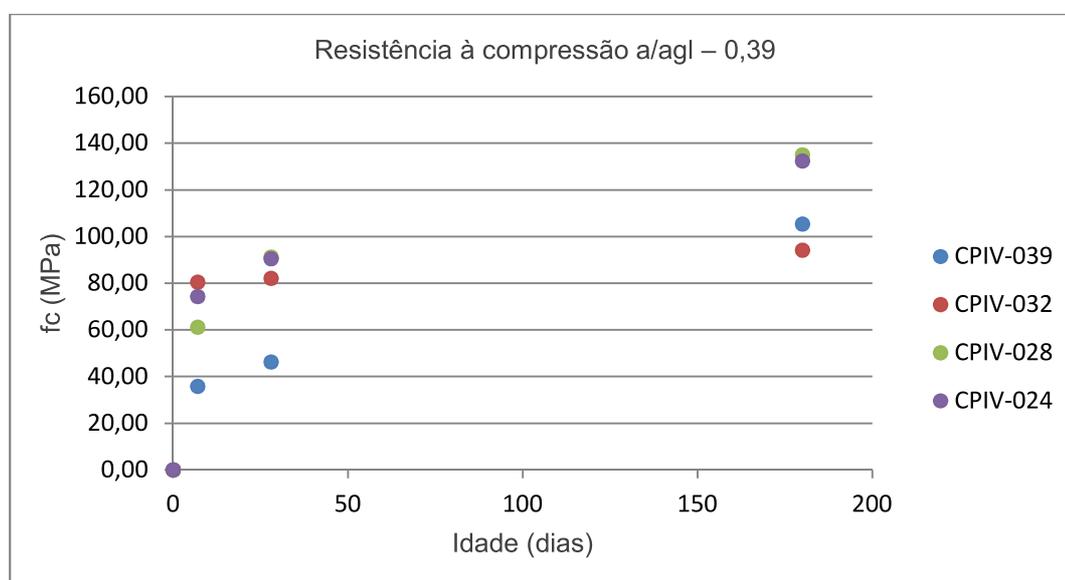
Analisou-se pontualmente cada relação a/agl utilizada em relação à resistência à compressão axial média pelo tempo, na idade de 7, 28 e 180 dias.

De acordo com a literatura, a relação a/agl tem influência direta no que se refere à porosidade. Nota-se que todos os traços apresentam um decréscimo na resistência à compressão axial, à medida que se aumenta a relação a/agl.

Na Figura 49, Figura 79, Figura 80 e Figura 81, são separados quatro grupos por relação de água/aglomerante utilizado nas misturas pela resistência média dos concretos ao longo do tempo, com as resistências aos 7 dias, aos 28 dias e aos 180 dias.

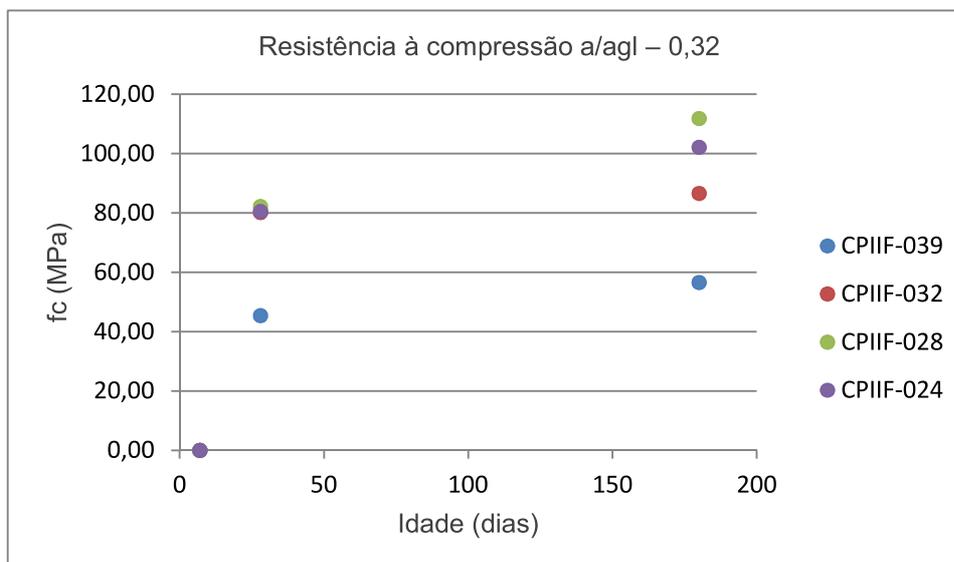
Os concretos com uma alta relação água/aglomerante não apresentaram ganhos substanciais de resistência à compressão nos materiais com substituição de sílica aos 180 dias, o que se atribuiu à diminuição do teor de cimento, não compensado com a reação pozolânica até essa idade.

Figura 79 – Resistência à compressão ao longo do tempo na relação a/agl – 0,39



Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Figura 80 – Resistência à compressão ao longo do tempo na relação a/agl – 0,32

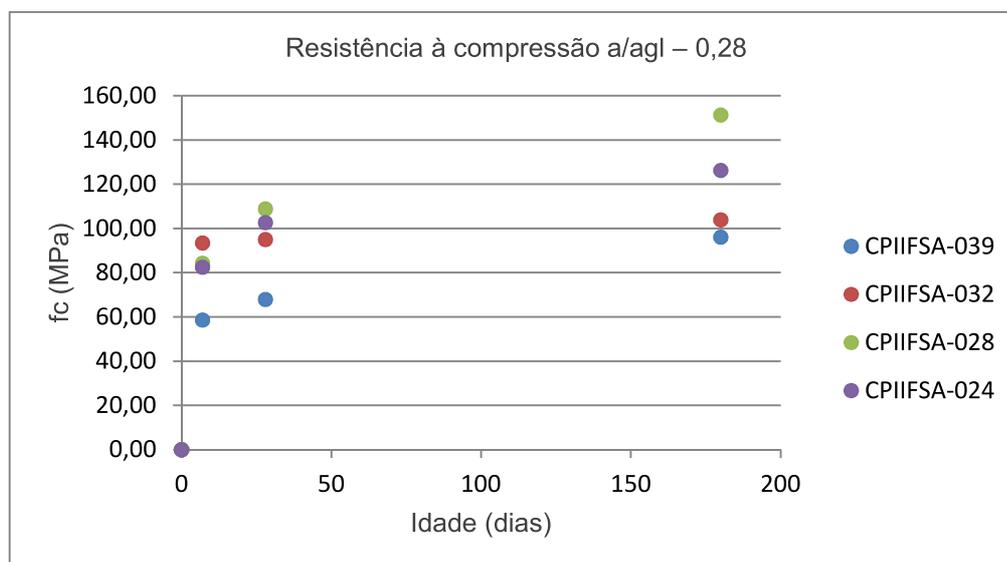


Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Contudo, desde as primeiras idades, os traços com substituição de 20% de sílica ativa, obtiveram uma resistência maior que todos os demais traços, inclusive maior que o traço referência.

O aumento da relação a/aglomerante reduz a resistência à compressão axial na idade de 28 dias, devido a possível formação de uma maior rede de poros. Para a idade de 180 dias, a substituição de sílica no teor de 20% aumenta a resistência em todos os teores de relação água/aglomerante, em comparação ao material de referência.

Figura 81 – Resistência à compressão ao longo do tempo na relação a/agl – 0,28



Fonte: Elaborado pela autora (2020)

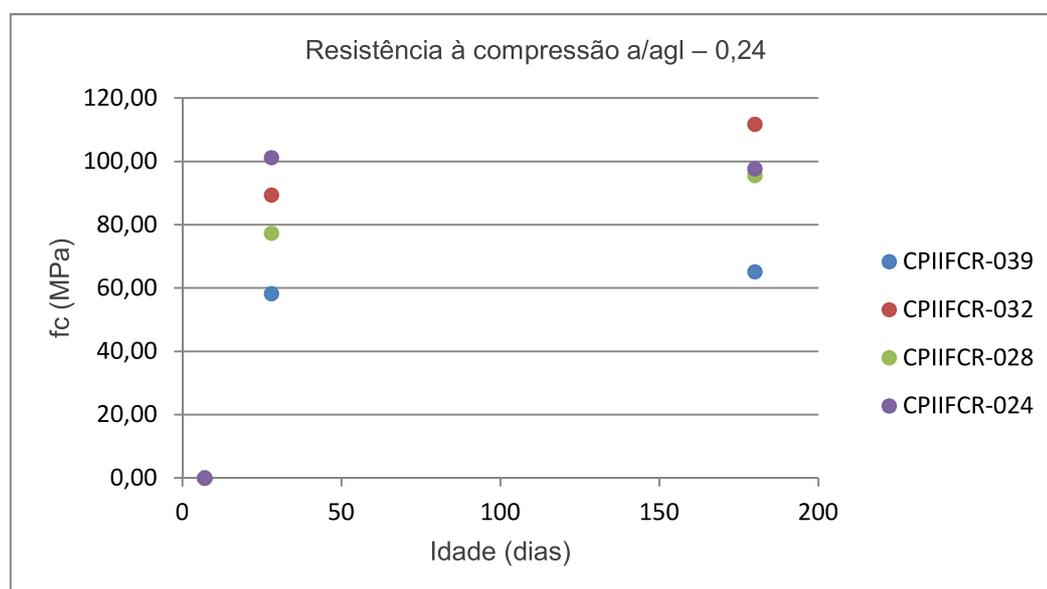
É possível relacionar que quanto maior a relação a/agl , menor é a resistência média obtida.

Freitas (2005) relata que o efeito do aumento da resistência pode ser influenciado pelo efeito fíler, em função de uma diminuição do tamanho do grão, resultando numa maior área de superfície de contato dos grãos da adição mineral.

Apesar de a norma estabelecer que a avaliação de propriedades mecânicas aos 28 dias de idade, tem-se que a avaliação de compostos cimentícios com pozolanas, ocorre após essa idade, pelo fato das reações verificadas na presente pesquisa, até na idade de 180 dias, como já sugerido por mais autores (TAYLOR 1997; PAIVA 2016).

Para baixas relações a/agl , o traço com substituição de cimento Portland por sílica ativa na proporção de 20%, mostraram uma resistência média muito superior (CPIIFSA-028) ao traço de referência (CPIIF-028) para idade de 180 dias (Figura 80).

Figura 82 – Resistência à compressão ao longo do tempo na relação a/agl – 0,24



Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Assim como ocorrido na relação a/agl 0,28, o traço com substituição de SA obteve um aumento na resistência após a idade de 28 dias, fato esse devido às reações pozolânicas que acontecem, prioritariamente, após a idade de 28 dias. Na relação a/agl 0,24, nota-se que a resistência mecânica para os traços com substituição possuem maiores resistências que o traço referência, fato esse observado também por Agassi (2011).

Avalia-se que todas as composições de concreto apresentaram comportamento inicial e final em concordância com o estipulado em norma, variando linearmente com o consumo de cimento e inversamente com a relação água/cimento dos traços. Percebe-se uma maior evolução da resistência nos traços com as menores relações água/ aglomerante, sendo estes os recomendados para uso em áreas de maior agressividade ambiental.