

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL**

Alysson Santos Resende

**DESEMPENHO DE CONCRETOS COM ADITIVO CRISTALIZANTE EXPOSTOS A  
SULFATOS.**

Belo Horizonte  
2023

Alysson Santos Resende

**DESEMPENHO DE CONCRETOS COM ADITIVO CRISTALIZANTE EXPOSTOS A  
SULFATOS.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Carmen Couto Ribeiro

Coorientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Marys Lene Braga Almeida

Belo Horizonte

2023

R433d	<p>Resende, Alysson Santos.  Desempenho de concretos com aditivo cristalizante expostos a sulfatos [recurso eletrônico] / Alysson Santos Resende. – 2023.  1 recurso online (88 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientadora: Carmen Couto Ribeiro.  Coorientadora: Marys Lene Braga Almeida.</p> <p>Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Bibliografia: f. 83-88.  Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Construção civil - Teses. 2. Concreto - Teses. 3. Aditivos - Teses.  4. Durabilidade (Engenharia) - Teses. 5. Geopolímeros - Teses.  6. Pozolanas - Teses. 7. Sulfatos - Teses. I. Ribeiro, Carmen Couto.  II. Almeida, Marys Lene Braga. III. Universidade Federal de Minas Gerais.  Escola de Engenharia. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 691(043)</p>
-------	---



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL  
MESTRADO EM CONSTRUÇÃO CIVIL



## FOLHA DE APROVAÇÃO

DESEMPENHO DE CONCRETOS COM ADITIVO CRISTALIZANTE EXPOSTOS A SULFATOS

**ALYSSON SANTOS RESENDE**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Mestrado em CONSTRUÇÃO CIVIL, como requisito para obtenção do grau de Mestre em CONSTRUÇÃO CIVIL, área de concentração TECNOLOGIA NA CONSTRUÇÃO CIVIL.

Aprovada em 30 de junho de 2023, pela banca constituída pelos membros:

  
Profa. Maria Carmen Couto Ribeiro - Orientadora  
UFMG

  
Profa. Marys Lene Braga Almeida - Coorientadora  
UFMG

  
Prof. Felipe de Souza Abreu  
PUC-MINAS

Profa. Júnia Nunes de Paula  
CEFET-MG

Belo Horizonte, 30 de junho de 2023.

*À Sílvia com amor!*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Profª Carmen Couto Ribeiro que, ao longo do desenvolvimento desse trabalho, ensinou-me a enxergar a engenharia por outra perspectiva, acreditou no meu potencial e na relevância do trabalho.

À Profª Marys Lene Braga Almeida pela contribuição com os ensaios e com o desenvolvimento da pesquisa.

À Brennand Cimentos (Cimento Nacional) e em especial ao Ednaldo Martins, Engº Tiago Couto, Engº Fernando Ribeiro e demais funcionários do Laboratório de Concreto da Unidade de Matozinhos pela elaboração das dosagens e dos ensaios que foram essenciais para o desenvolvimento da pesquisa.

À Penetron Brasil e Penetron Internacional pelo envio de amostras de material e pelas orientações técnicas quanto a utilização, dosagem e aplicação.

À Essencis/MG através da equipe da ETE da unidade Betim pela contribuição com amostras para execução do ensaio de perdas de massa.

À Camila Souza, secretária da pós-graduação, pela dedicação e presteza na solução de questões acadêmicas e aos professores do Departamento de Engenharia de Materiais de Construção da UFMG.

Ao técnico do laboratório de Materiais de Construção da UFMG, Ricardo Barbosa, pelo apoio em etapas dos ensaios dos concretos.

Aos colegas do mestrado pelo apoio e troca de experiências.

À toda minha família que entendeu os momentos de dedicação dando o apoio e o amor necessários para conclusão do trabalho.

## RESUMO

A produção de concretos com maior durabilidade é fundamental no desenvolvimento de construções sustentáveis pois minimiza a necessidade de manutenção, demolição e construção de novas estruturas sendo assim colaborativa com a redução de emissão de carbono. Entre as causas da deterioração das estruturas de concreto, a predominante está relacionada à sua capacidade de resistência contra a penetração de agentes agressivos. A utilização de aditivos cristalizantes e adições que promovam a auto cicatrização do concreto, bem como sua proteção mecânica com geopolímero a base de silicatos visam manter a absorção de água e agentes agressivos em baixos níveis. Este trabalho apresenta a avaliação de desempenho quanto a resistência, absorção e perdas de massa de um concreto de referência e de concretos aditivados com cristalizante e com material pozolânico substituindo 50% de cimento, posteriormente protegidos por camada de proteção em geopolímero, submetidos a meio agressivo ácido ( $H_2SO_4$  a 2,5%) por imersão. A partir dos estudos de dosagens foi definido um concreto de referência sujeito a ambientes de classe de agressividade forte segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014) com  $382 \text{ kg/m}^3$  de cimento, relação água/cimento de 0,50 e fck igual a 30 MPa. Todos os concretos apresentaram boa trabalhabilidade e resistência à compressão aos 28 dias acima de 30 MPa. O concreto de referência apresentou uma absorção inferior ao preconizado de 10% para concreto de boa qualidade. A utilização do aditivo cristalizante nos concretos reduziu a absorção de água na comparação com os concretos sem a aditivação. Após a exposição a sulfatos, realizada através da imersão em solução de ácido sulfúrico por 7 dias, a avaliação por inspeção visual demonstrou que os concretos apresentaram perda de coesão da pasta de cimento em menor grau, redução de absorção de água e índice menores de perdas de massa nos concretos com aditivo cristalizante. Houve melhora no desempenho dos concretos com a aplicação de proteção com geopolímero quanto à absorção e perdas de massa. A combinação entre aditivo cristalizante mais a proteção com geopolímero apresentou reduções expressivas principalmente nas perdas de massa. Esta pesquisa permite comprovar que a utilização de aditivos cristalizantes tanto em concretos produzidos com cimento sem adições quanto em concretos com adição de material pozolânico melhora o desempenho do concreto exposto a sulfatos e apresenta resultados ainda melhores quando utilizados em conjunto com camada protetora de geopolímero.

Palavras-chave: concreto; aditivo cristalizante; material pozolânico; geopolímero; durabilidade.

## ABSTRACT

*The production of concrete with greater durability is fundamental in the development of sustainable constructions, as it minimizes the need for maintenance, demolition and construction of new structures, thus collaborating with the reduction of carbon emissions. Among the causes of deterioration of concrete structures, the predominant one is related to their resistance capacity against the penetration of aggressive agents. The use of crystalline admixtures and additions that promote the self-healing of the concrete, as well as its mechanical protection with geopolymer based on silicates, aim to keep the absorption of water and aggressive agents at low levels. This work presents a performance evaluation regarding resistance, absorption and mass loss of a reference concrete and concrete added with crystalline admixture and with pozzolanic material replacing 50% of cement, later protected by a geopolymer protection layer, submitted to an aggressive environment acid (2.5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) by immersion. Based on the dosage studies, a reference concrete was defined subject to environments with a strong aggressiveness class according to NBR 6118 (ABNT, 2014) with 382 kg/m<sup>3</sup> of cement, water/cement ratio of 0.50 and fck equal to 30 MPa. All concretes showed good workability and compressive strength at 28 days above 30 MPa. The reference concrete showed an absorption lower than the recommended 10% for good quality concrete. The use of the crystalline admixture in the concrete reduced the water absorption in comparison with the concrete without the admixture. After exposure to sulfates, carried out by immersion in a sulfuric acid solution for 7 days, the evaluation by visual inspection showed that the concretes presented a lesser degree of loss of cohesion of the cement paste, reduced water absorption and lower loss rates mass in concrete with crystallizing additive. There was an improvement in the performance of concretes with the application of geopolymer protection in terms of absorption and mass loss. The combination of crystalline admixture plus geopolymer protection showed significant reductions, mainly in mass loss. This research demonstrates that the use of crystalline admixtures both in concrete produced with cement without additives and in concrete with the addition of pozzolanic material improves the performance of concrete exposed to sulfates and presents even better results when used in conjunction with a geopolymer protective layer.*

Keywords: concrete; crystalline admixture; pozzolanic material; geopolymer; durability.



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Imagem de MEV e análise de espectroscopia de raios X (EDS) de aditivo cristalizante.....	19
FIGURA 2 - Imagens MEV da amostra de referência sem aditivo após 540 dias de cura em 90% de umidade relativa .....	20
FIGURA 3 - Imagens MEV da amostra com aditivo cristalizante após 540 dias de cura a 90% de umidade relativa. ....	21
FIGURA 4 - Imagens MEV da amostra com aditivo cristalizante após 540 dias de cura a 90% de umidade relativa. ....	21
FIGURA 5 - Imagens de MEV e análises de espectroscopia de raios X após três meses de imersão na água. ....	22
FIGURA 6 - Imagens de MEV e análises de espectroscopia de raios X nos pontos de fissuração com auto cicatrização. ....	23
FIGURA 7 - Fatores que influenciam na vida útil do concreto.....	42
FIGURA 8 - Esquema da corrosão microbiana .....	44
FIGURA 9 - Tratamento superficial do concreto.....	46
FIGURA 10 - Difração de Raios-X do aditivo cristalizante utilizado neste trabalho. ....	51
FIGURA 11 - Ensaio de abatimento do tronco de cone – “Slump”. ....	53
FIGURA 12 - Ruptura do concreto à compressão.....	54
FIGURA 13 - Componentes do Geopolímero.....	57
FIGURA 14 - Curva Granulométrica Areia .....	62
FIGURA 15 - Curva Granulométrica Brita 1 .....	64
FIGURA 16 - Materiais separados para dosagens.....	65
FIGURA 17 - Corpos de prova confeccionados. ....	65
FIGURA 18 - Misturador utilizado. ....	67
FIGURA 19 - Resistência à compressão.....	70
FIGURA 20 - Módulo de elasticidade.....	70
FIGURA 21 - Evolução da absorção de água por capilaridade .....	72
FIGURA 22 - Índice de vazios e Absorção de água amostras – NBR 9778 (ABNT, 2005)...	74
FIGURA 23 - Corpo de prova 10x20cm imersos em solução de ácido sulfúrico (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) a 2,5%. ....	75
FIGURA 24 - Corpos de prova revestidos com geopolímero.....	75
FIGURA 25 - Amostras antes e depois do ataque ácido – Referência e CPV+Cristalizante (imagens ampliadas digitalmente 250%).....	77

FIGURA 26 - Amostras antes e depois do ataque ácido – CPV+pozolana e CPV+Pozolana+Cristalizante (imagens ampliadas digitalmente 250%).	77
FIGURA 27 - Curvas de variação de resistência à compressão dos concretos antes e após ataque	79
FIGURA 28 - Desempenho dos concretos expostos a sulfatos	83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Componentes Clinquer .....	24
Tabela 2 - Tipos de Cimento Portland.....	25
Tabela 3 - Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	28
Tabela 4 - Limite da composição granulométrica do agregado graúdo .....	29
Tabela 5 - Desvio-padrão a ser adotado em função de condição de preparo do concreto ...	32
Tabela 6 - Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental .....	36
Tabela 7 - Classes de agressividade ambiental.....	37
Tabela 8 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto .....	38
Tabela 9 - Ácidos agressivos ao concreto.....	40
Tabela 10 - Composição Química do material pozolânico .....	49
Tabela 11 - Resultado Ensaio Caracterização Cimento.....	60
Tabela 12 - Resistência à compressão CPV.....	60
Tabela 13 - % Retida Acumuladas Peneiras ABNT Areia .....	61
Tabela 14 - Resultado Ensaio de Caracterização Areia .....	62
Tabela 15 - % Retida Acumuladas Peneiras ABNT Brita .....	63
Tabela 16 -- Resultado Ensaio de Caracterização Brita.....	64
Tabela 17 - Dosagens dos materiais utilizados no concreto.....	66
Tabela 18 - Resultado de abatimento segundo NBR16889 (ABNT,2020).....	67
Tabela 19 - Resistência à compressão aos 56 dias nos concretos antes e após ataque ácido. ....	78
Tabela 20 - Absorção de água e índices de vazios antes e após ataque com ácido.....	80
Tabela 21 - Perdas de massa por ataque ácido.....	81

## **LISTA DE NOTAÇÕES, ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI - American Concrete Institute

CAA – Classe de Agressividade Ambiental

COP26 - Conferência do Clima da Organização das Nações Unidas - Pacto de Glasgow

CSH - Silicato de Cálcio Hidratado -  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$

EDS - Espectroscopia de raios X

INT - Instituto Nacional de Tecnologia

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológica de São Paulo

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MF – Módulo de finura

MPa – Mega Pascal

NBR – Norma Brasileira Registrada

pH – Potencial Hidrogeniônico

PRAH - Aditivos redutores de permeabilidade sob pressão hidrostática.

RA1-R – Aditivo redutor de água tipo 1

RP – Aditivo redutor de permeabilidade

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>16</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>17</b>
3.1. AUTO CICATRIZAÇÃO .....	17
3.2. ADITIVO CRISTALIZANTE .....	18
3.3. MATERIAIS COMPONENTES DO CONCRETO .....	23
<b>3.3.1. Cimento portland</b> .....	<b>24</b>
<b>3.3.2. Material pozolânico</b> .....	<b>26</b>
<b>3.3.3. Agregados</b> .....	<b>27</b>
<b>3.3.4. Aditivos</b> .....	<b>29</b>
3.4. DOSAGEM .....	30
3.5. DESEMPENHO DO CONCRETO .....	32
<b>3.5.1. Estabilidade dimensional</b> .....	<b>33</b>
<b>3.5.2. Durabilidade</b> .....	<b>34</b>
3.6. GEOPOLÍMERO CAMADA DE PROTEÇÃO SUPERFICIAL .....	45
<b>4. METODOLOGIA</b> .....	<b>47</b>
4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS CONSTITUINTES .....	48
<b>4.1.1. Cimento</b> .....	<b>48</b>
<b>4.1.2. Material pozolânico</b> .....	<b>48</b>
<b>4.1.3. Agregados</b> .....	<b>49</b>
<b>4.1.4. Aditivos</b> .....	<b>50</b>
<b>4.1.5. Água</b> .....	<b>51</b>
4.2. COMPOSIÇÃO DE MÉTODOS DE DOSAGEM .....	51
4.3. PRODUÇÃO DOS CONCRETOS .....	52
4.4. ANÁLISE DOS CONCRETOS NO ESTADO FRESCO .....	53
4.5. ANÁLISE DOS CONCRETOS NO ESTADO ENDURECIDO .....	54
<b>4.5.1. Moldagem dos corpos de prova</b> .....	<b>54</b>
<b>4.5.2. Resistência à compressão</b> .....	<b>54</b>
<b>4.5.3. Módulo de elasticidade</b> .....	<b>55</b>
4.6. ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS CONCRETOS .....	56
4.7. CAMADA PROTETORA DOS CONCRETOS .....	56
4.8. ATAQUE POR ÁCIDO AOS CONCRETOS .....	57

4.9. PERDAS DE MASSA.....	58
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>59</b>
5.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	59
<b>5.1.1. Cimento .....</b>	<b>59</b>
<b>5.1.2. Material pozolânico.....</b>	<b>60</b>
<b>5.1.3. Agregado miúdo .....</b>	<b>61</b>
<b>5.1.4. Agregado graúdo .....</b>	<b>62</b>
5.2. DOSAGENS E ENSAIOS .....	64
5.3. CONCRETO FRESCO.....	66
5.4. CONCRETO ENDURECIDO.....	68
<b>5.4.1. Resistência à compressão e módulo de elasticidade .....</b>	<b>68</b>
<b>5.4.2. Absorção de água.....</b>	<b>71</b>
5.5. ATAQUE POR ÁCIDO AOS CONCRETOS .....	74
5.6. INSPEÇÃO VISUAL DOS CORPOS DE PROVA.....	76
5.7. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS APÓS O ATAQUE .....	77
5.8. INFLUÊNCIA DA ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS CONCRETOS ANTES E APÓS ATAQUE COM ÁCIDO .....	79
5.9. PERDAS DE MASSA DOS CONCRETOS.....	81
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>83</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>85</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A melhoria das características do concreto principalmente quanto à permeabilidade colabora com a diminuição do custo de manutenção durante o ciclo de vida e, por consequência, aumenta sua durabilidade. A utilização de aditivos cristalizantes no concreto e proteção mecânica por geopolímero contribui para a redução da permeabilidade. Segundo a Penetron (2023), a proteção impermeabilizante permanente nos concretos reduz a necessidade de manutenção das estruturas. Fora isso, obtém-se a diminuição da pegada de carbono na medida em que se prolonga a vida da estrutura de 50 para até 100 anos.

Há uma preocupação mundial com a durabilidade das estruturas confeccionadas em concreto armado uma vez que as obras estão precocemente degradadas e a maioria está se aproximando do final da sua vida útil (REITERMAN et al, 2020). Entre as causas estão: a falta de conhecimento em relação aos processos de degradação, sua origem, mecanismos e evolução; o rápido avanço tecnológico dos materiais utilizados nos concretos, principalmente no que tange aos aglomerantes, adições, agregados e aditivos sem estarem suficientemente esgotadas as pesquisas sobre a sua influência no comportamento dos concretos e os seus efeitos colaterais e a falta de conhecimento por parte daqueles que são os responsáveis pela manutenção e conservação das estruturas (AGUIAR, 2006). Além disso, substâncias agressivas estão cada vez mais presentes no ambiente com a evolução industrial, chuvas ácidas e alterações climáticas.

Ainda sobre as alterações climáticas, a Penetron (2023) cita que a indústria global do cimento é a segunda maior produtora de CO<sub>2</sub>, ou seja, o cimento está entre os focos centrais das metas climáticas da COP26 (Conferência do Clima da Organização das Nações Unidas, em 2021 - Pacto de Glasgow). Por isso, 40 fabricantes globais de concreto e cimento estão empenhados em cortar pela metade as emissões de CO<sub>2</sub> até 2030.

Segundo Helene et al. (2018), a razão predominante da deterioração das estruturas está relacionada com a capacidade de resistência do concreto contra a penetração desses agentes agressivos. Com o objetivo de favorecer a diminuição da permeabilidade desses componentes e a redução da difusividade dos concretos por meio da auto cicatrização, a utilização de aditivo cristalizante desponta como opção muito interessante. Segundo a Penetron (2023) o aditivo cristalizante reduz a permeabilidade do concreto, na medida em que oferece uma proteção

abrangente contra ataques químicos e corrosões, ele pode prolongar a vida útil das estruturas. Esse fator é fundamental quando pensamos a respeito de sustentabilidade e concreto de carbono zero.

Na mesma linha, Ferrara et al. (2016) citam que adições pozolânicas inovadoras também podem promover a auto cicatrização do concreto por causa da hidratação retardada, uma vez que altas quantidades desses aglutinantes permanecem não hidratadas, mesmo em idades tardias por causa das suas reações lentas.

Diferentes pesquisas têm estudado a produção de cimentos Portland de baixo impacto ambiental e que não apresentem prejuízos de desempenho em relação aos cimentos convencionais (MONTEIRO et al., 2017 citado por COSTA, 2020). Dentre estes estudos, destaca-se a substituição parcial do cimento Portland por materiais de elevada reatividade, incluindo os materiais pozolânicos ou pozolanas (HOSSAIN et al., citado por COSTA, 2020).

Quanto à impermeabilização, a NBR 9575 (ABNT, 2010) a define como o conjunto de técnicas construtivas (serviços), compostos por uma ou mais camadas, que tem por finalidade proteger as construções contra a ação deletéria de fluidos, de vapores e da umidade. Lafin (2015) define que a utilização de sistemas de impermeabilização é, sem dúvida, uma importante técnica construtiva para garantir a proteção e vida útil de projeto esperada. Dentre os diversos sistemas de impermeabilização, a utilização de geopolímero à base de silicatos, com ou sem cimentos, tem sido amplamente difundida no meio técnico, tendo em vista a facilidade de aplicação, alta produtividade, além da possibilidade de aplicação diretamente sobre a estrutura de concreto armado, sem a necessidade de camadas intermediárias de regularização, viabilizando custos e cronogramas cada vez mais desafiadores.

Esse trabalho propôs produzir concretos com aditivos cristalizantes e substituição de 50 % de cimento por material pozolânico com o objetivo de verificar o desempenho desses materiais, considerados auto cicatrizantes do concreto, no que tange à permeabilidade, durabilidade e desempenho quando expostos a ambientes agressivos. Além disso, foi promovida proteção dos concretos com geopolímero para avaliar se a ação de proteção em conjunto com o cristalizante e a pozolana promove desempenho superior.



## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Essa dissertação tem como objetivo geral investigar o desempenho de concreto produzido com aditivo cristalizante comparado a concreto convencional de referência. Além disso também foi proposta a mesma investigação em concreto com a substituição de 50% de cimento por pozolana de classe E segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014). Posteriormente submeter os concretos à exposição a sulfatos para verificar a durabilidade dos compósitos. Abaixo estão listados os objetivos específicos.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar os concretos com aditivção de 0,8% de aditivo cristalizante.
- Avaliar as propriedades no estado fresco e estado endurecido dos concretos produzidos.
- Analisar os resultados dos ensaios de absorção de água por imersão e capilaridade para verificar a influência da porosidade e a eficácia da cristalização e da pozolanicidade na auto cicatrização e fechamento da porosidade dos concretos.
- Analisar os concretos após ataque de ácido sulfúrico (solução de  $H_2SO_4$  a 2,5%) com exposição submersa durante 7 dias.
- Verificar a influência da porosidade e da permeabilidade na vulnerabilidade dos concretos ao ingresso de agentes agressivos através de ensaios de absorção de água por imersão.
- Avaliar a degradação da matriz cimentícia dos concretos através de inspeção visual e ensaios de perdas de massa.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão aborda estudos sobre a auto cicatrização do concreto, aditivo cristalizante, concreto: seus materiais componentes e desempenho através das propriedades como: resistência, estabilidade dimensional e durabilidade.

Abreu (2014) relaciona a durabilidade do concreto à qualidade dos materiais, processo de produção, cuidados na utilização e uso de proteções. Dessa forma são abordados os conceitos de permeabilidade e absorção de água, mecanismos de ataque ao concreto e exposição a ataques químicos.

#### 3.1. AUTO CICATRIZAÇÃO

A auto cicatrização é o processo pelo qual um material é capaz de recuperar suas propriedades, degradadas depois de ter sofrido algum dano, com pouca ou nenhuma ajuda externa. Esse processo é bem conhecido em ossos e árvores, que são capazes de reparar danos e recuperar seu desempenho. Estruturas construídas com materiais auto cicatrizantes irão apresentar vida útil prolongada e custos de manutenção mais baixos. No caso do concreto, as pesquisas têm se concentrado no fechamento de fissuras e na recuperação de suas propriedades mecânicas ou referentes à durabilidade. A impermeabilidade é necessária para a estabilidade estrutural evitando a entrada de substâncias nocivas que podem ativar ou acelerar a corrosão da armadura, levando à perda de suporte de carga capacidade (ROIG-FLORES et al., 2016).

Helene et al. (2018) definem a cicatrização autógena como uma capacidade auto curativa, onde sua cicatrização é proporcionada pelos componentes hidratados do concreto, que podem ou não serem ativados. Do ponto de vista da microestrutura, a cicatrização autônoma é caracterizada pela utilização de microcápsulas preenchidas com agentes cicatrizantes ou na vascularização de tubos ociosos que bombeiam os agentes cicatrizantes. É relevante destacar que o mecanismo de auto cicatrização autógena tende a ocorrer por colmatação natural do concreto em decorrência de reações químicas (hidratação contínua, formação de  $\text{CaCO}_3$ ) e ações mecânicas (partículas soltas nas fissuras ou suspensas na água) ou ainda em virtude da indução por catalisadores ativos. A formulação de concretos auto cicatrizantes

pela abordagem autógena é favorecida pela utilização de componentes especiais como o aditivo cristalizante.

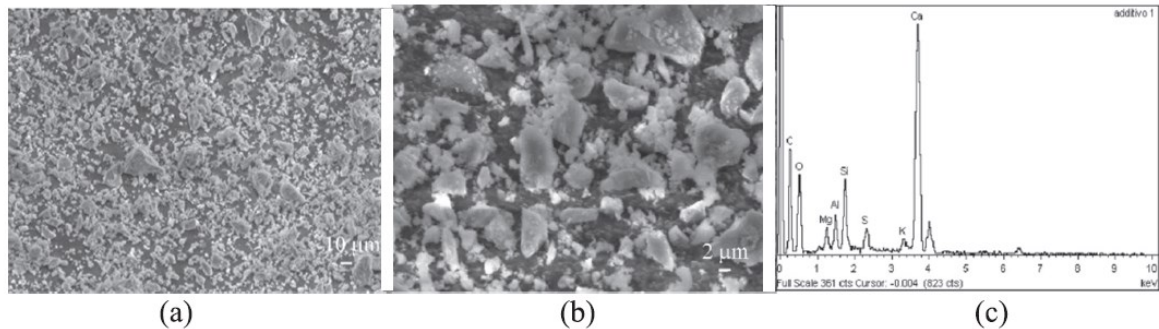
### 3.2. ADITIVO CRISTALIZANTE

O comitê ACI 212 (ACI212.3R16, 2016) indica como cristalizantes aditivos redutores de permeabilidade sob pressão hidrostática (PRAH). Esses produtos são inerentemente hidrófilos porque reagem facilmente com a água e compreendem substâncias químicas ativas de cimento e areia. Sua reação química com cimento e água produz depósito de cristais insolúveis com resistência à penetração de água (NASIM et al., 2020).

Ferrara et al. (2016) classificam o aditivo cristalizante como um produto patenteado composto por elementos químicos ativos, dosados em um transportador de cimento e areia, que, devido à sua natureza altamente hidrofílica, são capazes de reagir com água, partículas de cimento, mas também com a fase solúvel de produtos de hidratação de cimento,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , e formar hidratos de silicato de cálcio e outros precipitados bloqueadores de poros. Esses produtos de reação, por um lado, aumentam a densidade da fase CSH, Silicato de Cálcio Hidratado -  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  e, por outro lado, o depósito nos capilares existentes e microfissuras ativando o modo autorreparador. O mecanismo é análogo à formação de CSH e os depósitos cristalizantes resultantes tornam-se integralmente ligados à pasta de cimento hidratado, contribuindo assim a uma resistência significativamente aumentada a água. Além disso, nas fissuras formadas ao longo da vida do concreto, o aditivo cristalizante armazena elementos inertes ativados em presença de água nessas novas manifestações. Essa capacidade contribui para a recuperação das propriedades mecânicas do compósito, também em função das condições de exposição e durações do mecanismo de cura.

Ainda segundo Ferrara et al. (2016), o aditivo cristalizante consiste em uma mistura de cimento, areia e microssilica; A visualização das partículas ampliadas por MEV são mostradas na FIGURA 1 (a) e (b): elas têm forma irregular e tamanho na faixa de cerca de 1–20  $\mu\text{m}$  e sua morfologia é semelhante ao dos grãos de cimento; A análise de espectroscopia de raios X confirmou a presença de cálcio, oxigênio, silício, magnésio, alumínio e potássio (FIGURA 1(c)). Este espectro é comparável com a de um Cimento Portland comum, exceto pelo leve pico mais alto de enxofre.

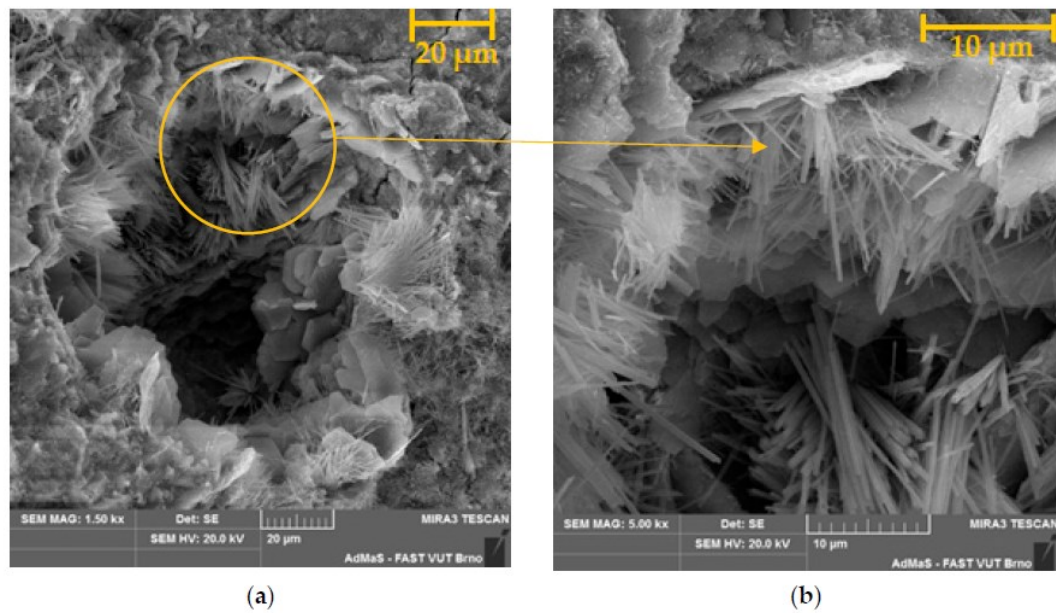
FIGURA 1 - Imagem de MEV e análise de espectroscopia de raios X (EDS) de aditivo cristalizante



FONTE: Ferrara et al, 2016

Hodul et al. (2020) analisaram a microestrutura de amostras de argamassas com e sem aditivos cristalizantes por MEV. Algumas diferenças são observadas na microestrutura da argamassa de referência sem aditivo cristalizante (FIGURA 2) e da argamassa com aditivo cristalizante e cinza volante (FIGURA 3), armazenadas em ambiente com alta umidade relativa, por 540 dias. As FIGURAS à direita (b) mostram uma ampliação dos produtos de hidratação individuais para melhor identificar sua morfologia. O agulhamento, com geometria em formato de “rosas”, dos resíduos de calcário e aditivo cristalizante estão muito visíveis conforme indicado na FIGURA 4.

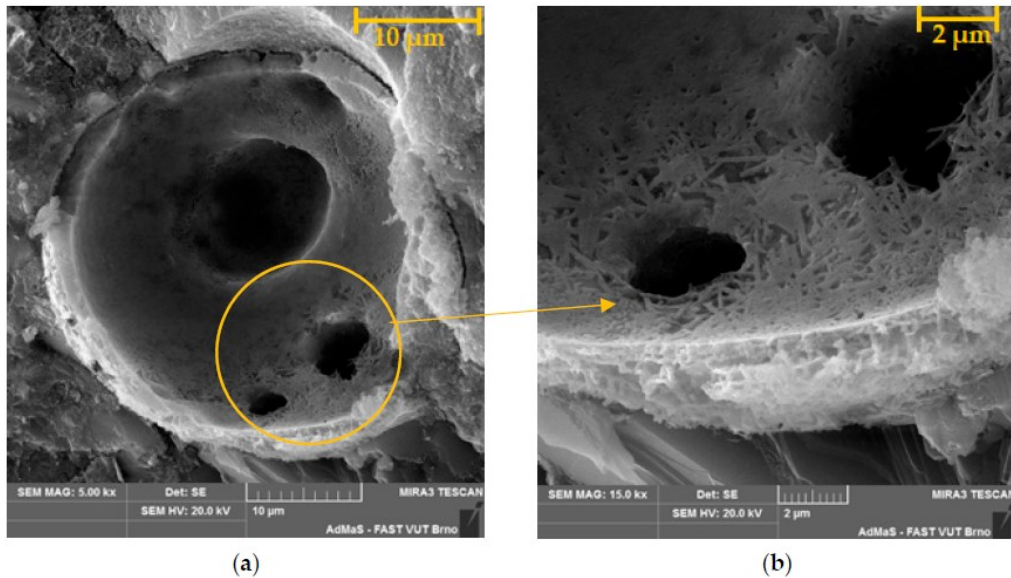
FIGURA 2 - Imagens MEV da amostra de referência sem aditivo após 540 dias de cura em 90% de umidade relativa



(a) Produtos de hidratação nos poros da amostra (géis CSH, Portlandita, etringita); (b) Detalhe das agulhas de etringita e cristais de Portlandita.  
FONTE: Hodul et al, 2020

A formação de cristais nos poros (FIGURA 2) pode levar a uma diminuição da porosidade total da matriz. Isso também pode ser benéfico em desconectar a rede de poros de matriz interconectada, resultando em valores de permeabilidade mais baixos.

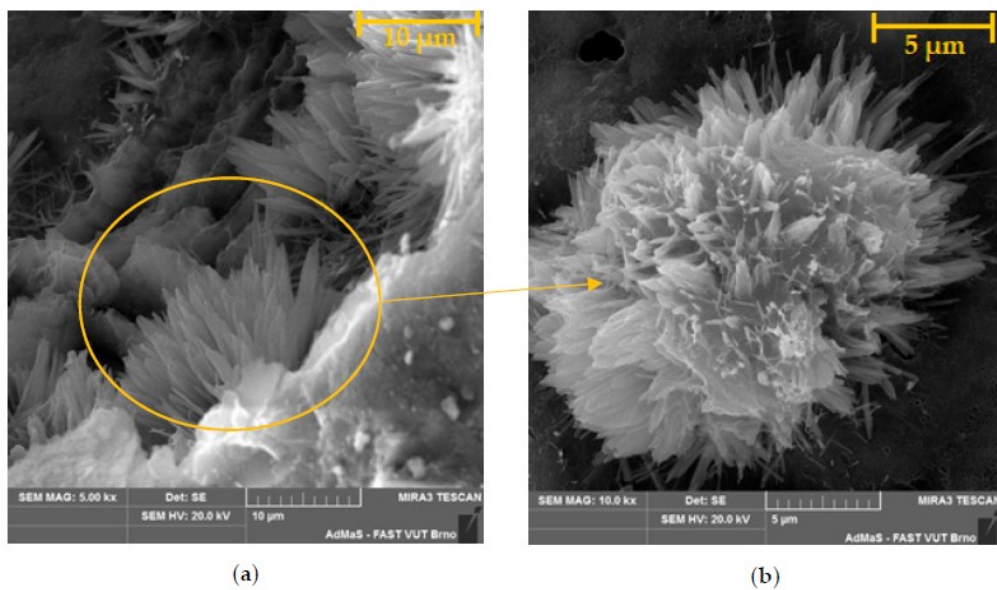
FIGURA 3 - Imagens MEV da amostra com aditivo cristalizante após 540 dias de cura a 90% de umidade relativa.



(a) Cenosfera visível quebrada de 3 µm de espessura com microfuros na concha; (b) Detalhe da cenosfera com a formação da fase C-S-H na superfície.

FONTE: Hodul et al, 2020

FIGURA 4 - Imagens MEV da amostra com aditivo cristalizante após 540 dias de cura a 90% de umidade relativa.

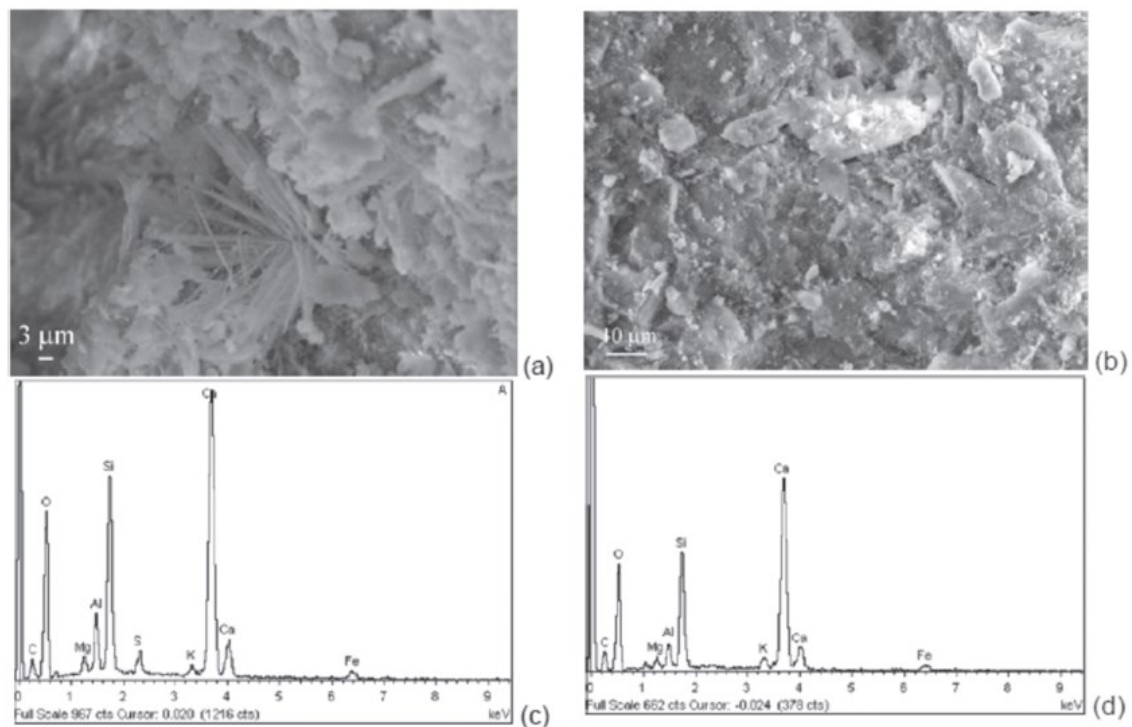


(a) Produto do aditivo cristalizante recém-formado visível encontrado no poro; (b) Detalhe do produto.

FONTE: Hodul et al, 2020

Nos experimentos de Ferrara et al. (2016), amostras de concreto foram pré-fissuradas para a avaliação do processo de auto cicatrização provocado pela ação do aditivo cristalizante. As análises através do MEV e da espectroscopia de raios X mostram formações semelhantes às encontradas na amostra de aditivo cristalizante, apresentada na FIGURA 5.

FIGURA 5 - Imagens de MEV e análises de espectroscopia de raios X após três meses de imersão na água.

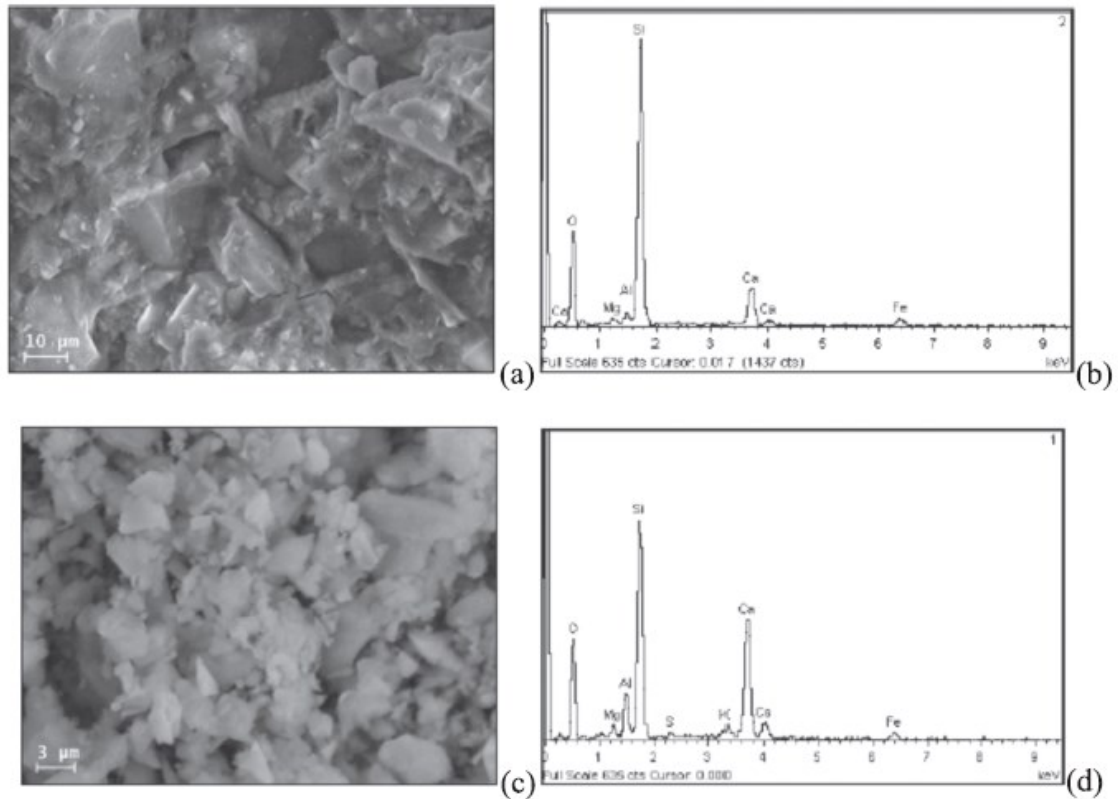


amostras (a) e (c) com aditivo cristalizante e amostras (b) e (d) sem aditivo cristalizante  
 FONTE: Ferrara et al, 2016

Amostras dos pontos onde houve fissuração com auto cicatrização também foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de raios X. Os resultados obtidos por Ferrara et al. (2016) mostram a presença de material com estrutura amorfa cobrindo os agregados, típico da hidratação do cimento, nas amostras sem aditivo.

Tal fato confirma que a cicatrização é processada pela hidratação tardia do aglutinante que não foi hidratado no processo de cura, FIGURA 6 (a) e (b). Nas amostras com aditivo cristalizante, a estrutura de cristais formada na região cicatrizada tem composição química compatível com a observada na do aditivo cristalizante, apresentada na FIGURA 1.

FIGURA 6 - Imagens de MEV e análises de espectroscopia de raios X nos pontos de fissuração com auto cicatrização.



amostras (a), (b) sem aditivo cristalizante e amostras (c) e (d) com aditivo cristalizante  
 FONTE: Ferrara et al, 2016

### 3.3. MATERIAIS COMPONENTES DO CONCRETO

Segundo Mehta e Monteiro (2014), concreto é um material composto constituído de um meio aglomerante, cimento e água, no qual estão aglutinadas partículas ou fragmentos de agregado, material granular como areia, pedrisco, pedregulho, rocha britada ou resíduos de construção ou demolição. Como quarto componente há as adições e/ou aditivos que promovem correções ou propriedades adicionais ao concreto no estado fresco ou endurecido.



### 3.3.1. Cimento Portland

O Cimento Portland é um material seco, finamente pulverizado composto basicamente por silicatos reativos de cálcio. Esses silicatos quando hidratados são os principais responsáveis pela característica aglomerante sendo estáveis em ambiente aquoso (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Segundo Ribeiro et al. (2013), o cimento Portland é resultante da moagem de clínquer, produto obtido a partir da calcinação de uma mistura crua de calcário e argila, dosados e homogeneizados. Após a queima é adicionado gesso para impedir a hidratação imediata com a presença de água.

As variações das propriedades do cimento acontecem devido à composição química do clínquer (Tabela 1) e adições como escória, pozolana, materiais carbonáticos dentre outros com proporções definidas a partir das características que se deseja obter (RIBEIRO et al., 2013).

Tabela 1 - Componentes Clinquer

Compostos	Fórmula química	Abrev.	Propriedades específicas decorrentes dos compostos do clínquer
Silicato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	Endurecimento rápido, alto calor de hidratação, alta resistência inicial.
Silicato dicálcico	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	Endurecimento lento, baixo calor de hidratação, baixa resistência inicial.
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	Pega muito rápida controlada com adição de gesso, suscetível ao ataque de sulfatos, alto calor de hidratação, alta retração, baixa resistência final.
Ferro aluminato tetracálcico	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ $\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$	Endurecimento lento, resistente a meios sulfatados, não tem contribuição para resistência, cor escura.
Cal livre	$\text{CaO}$	C	Aceitável somente em pequenas quantidades; em maiores quantidades, causa aumento de volume e fissuras.

FONTE: Ribeiro et al, 2013.

A Norma Brasileira NBR 16697:2018 (ABNT, 2018) define os principais tipos de cimento comercializados no Brasil e sua composição sugerida, apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Tipos de Cimento Portland

Cimento Portland		Composição (% em massa)				
Designação normalizada	sigla	Clínquer+sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material Pozolânico	Material Carbonático	
Cimento Portland comum	CP I	95-100		0-5		
	CP I-S	90-94	0	0	6-10	
Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno	CP II-E	51-94	6-34	0	0-15	
Cimento Portland composto com material pozolânico	CP II-Z	71-94	0	6-14	0-15	
Cimento Portland composto com material carbonático	CP II-F	75-89	0	0	11-25	
Cimento Portland de alto forno	CP III	25-65	35-75	0	0-10	
Cimento Portland Pozolânico	CP IV	45-85	0	15-50	0-10	
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V	90-100	0	0	0-10	
Cimento Portland Branco	Estrutural	CPB	75-100	-	-	0-25
	Não estrutural		50-74	-	-	26-50

FONTE: Adaptado de NBR 16697:2018.

Conforme indicado na Tabela 2, a produção de cimento com material pozolânico, CP IV, largamente utilizado no Brasil tem dosagem permitida variando de 15 a 50%.

### 3.3.2. Material Pozolânico

Ferrara et al. (2016) citam que há investigação, por diversos pesquisadores, da capacidade de auto cicatrização do concreto pela ação de pozolanas inovadoras por causa da hidratação retardada, uma vez que altas quantidades desses aglutinantes permanecem não-hidratadas mesmo em uma fase posterior de idade por causa das lentas reações pozolânicas.

Segundo Silva et al. (2017), pozolanas são todos os aluminossilicatos reativos naturais, predominantemente na forma vítrea, que se solubilizam em meio alcalino e reagem em solução com íons de  $\text{Ca}^{2+}$  levando à precipitação de silicatos de cálcio hidratados. O principal produto dessa reação é o silicato de cálcio hidratado, mas também podem ser formados aluminatos, e sílico-aluminatos, em função da composição química das pozolanas. O índice de reatividade desses materiais é denominado atividade pozolânica ou pozolanicidade.

As pozolanas, isoladamente, não possuem capacidade aglomerante e necessitam de uma fonte de cálcio. As pozolanas podem ser naturais, como cinzas vulcânicas e a terra diatomácea, ou originadas de algum processo industrial, como a cinza volante, a sílica ativa, a cinza de casca de arroz e a argila calcinada (SILVA et. al, 2017).

Quando adicionados ao cimento Portland, os materiais pozolânicos reagem com o  $\text{Ca(OH)}_2$  produzido durante a hidratação do cimento, dando origem a compostos hidratados, especialmente silicato de cálcio hidratado (CSH) ou aluminossilicato de cálcio hidratado (CASH), de composição química e microestrutura similares aos compostos formados pela hidratação do cimento (LIU et al., 2017 citado por COSTA, 2020). Estes compostos hidratados preenchem os vazios da microestrutura e propiciam o refinamento de poros (FRÍAS; CABRERA, 2000 citado por COSTA, 2020). Também, as micropartículas de pozolana que não reagiram atuam no refinamento de poros e aumentam a densidade da microestrutura da matriz cimentícia, configurando o mecanismo conhecido como efeito filler que pode estimular a hidratação do cimento, por meio de nucleação heterogênea dos produtos hidratados e da diluição das partículas de cimento anidro na mistura (BERODIER; SCRIVENER, 2014 citado por COSTA, 2020).

Dessa forma, materiais pozolânicos são empregados como substituição parcial ou adição em cimento. Concretos e argamassas com teores de materiais pozolânicos ou filler podem

apresentar redução da permeabilidade, além de maior resistência aos ataques de sulfatos em relação aos compostos cimentícios convencionais (BOROSNYÓI, 2016 citado por COSTA, 2020).

As pozolanas utilizadas atualmente na produção de cimentos e concretos são, normalmente, subprodutos de algum processo industrial. A cinza volante, por exemplo, material pozolânico mais utilizado na produção de cimentos, é um resíduo da queima de carvão nas centrais termoelétricas, cujas cinzas são coletadas por meio de precipitadores eletrostáticos (LAFIN, 2015).

A NBR 12653 (ABNT, 2014), classifica as pozolanas em: classe N, pozolanas naturais e artificiais que obedecem aos requisitos desta Norma, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, cherts silicosos que, segundo a USP (2023), são rochas sedimentares constituída por sílica ( $\text{SiO}_2$ ) microcristalina (grãos de quartzo invisíveis a olho nu), criptocristalina (grãos não visíveis ao microscópio petrográfico) ou mesmo amorfa (não cristalina), formada quando esqueletos silicosos de animais marinhos são acumulados e consolidados, e durante a diagênese a sílica é dissolvida e então precipitada da solução resultante; terras diatomáceas e argilas calcinadas; classe C, cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas, que obedecem aos requisitos desta Norma; classe E, quaisquer pozolanas, não contempladas nas classes N e C, que obedecem aos requisitos desta Norma.

### **3.3.3. Agregados**

Agregados são materiais granulares misturados em um meio cimentício para produzir concreto. Agregado graúdo se refere a partículas maiores que 4,75 mm normalmente britas, produtos resultantes da cominuição industrial de rochas. Agregado miúdo, partículas menores que 4,75 mm, areias, produtos resultantes da desintegração natural ou da britagem de rocha (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Segundo Ribeiro et al. (2013), os agregados constituem aproximadamente 70% do volume total do concreto, devem ser inertes, ou seja, não provocar reações indesejáveis. Eles têm

importantes papel na composição dos custos e propiciam menor retração e aumentam resistência ao desgaste superficial do concreto.

Dessa forma, a escolha correta e verificação da qualidade do agregado favorece a durabilidade do concreto, por isso tamanha importância de realização desta caracterização completa de cada agregado que será utilizado.

Os parâmetros que devem ser observados quanto à qualidade são a resistência aos esforços mecânicos, ao desgaste, presença de substâncias nocivas como torrões de argila, materiais pulverulentos ou impurezas orgânicas.

As características físicas são importantes para a determinação da composição das misturas. Devem ser avaliadas massa unitária e específica, forma dos grãos, dimensão através da composição granulométrica, dimensão máxima característica e módulo de finura.

A NBR 7211 (ABNT, 2022) propõe a classificação do agregado miúdo para aqueles que passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm, ressalvado os limites estabelecidos na Tabela 3.

Tabela 3 - Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

Nota 1: O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90

Nota 2: O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20

Nota 3: O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50

FONTE: NBR 7211 (ABNT, 2022)

Quanto a agregado graúdo são aqueles que passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm, ressalvados os limites estabelecidos na Tabela 4.

Tabela 4 - Limite da composição granulométrica do agregado graúdo

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada				
	Zona granulométrica d/D <sup>a</sup>				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75 mm	-	-	-	-	0-5
63 mm	-	-	-	-	5-30
50 mm	-	-	-	0-5	75-100
37,5 mm	-	-	-	5-30	90-100
31,5 mm	-	-	0-5	75-100	95-100
25 mm	-	0-5	5-25 <sup>b</sup>	87-100	-
19 mm	-	2-15 <sup>b</sup>	65 <sup>b</sup> -95	95-100	-
12,5 mm	0-5	40 <sup>b</sup> -65 <sup>b</sup>	92-100	-	-
9,5 mm	2-15 <sup>b</sup>	80 <sup>b</sup> -100	95-100	-	-
6,3 mm	40 <sup>b</sup> -65 <sup>b</sup>	92-100	-	-	-
4,75 mm	80 <sup>b</sup> -100	95-100	-	-	-
2,36 mm	95-100	-	-	-	-

<sup>a</sup>Zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensões do agregado graúdo.

<sup>b</sup>Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados com 2). Essa variação pode também estar distribuída em vários desses limites.

FONTE: NBR 7211 (ABNT, 2022)

### 3.3.4. Aditivos

A NBR 11768-1 (2019) define aditivo como produto adicionado e misturado no concreto, em quantidade normalmente não superior a 5% da massa de ligante total contida no concreto, com o objetivo de modificar suas propriedades no estado fresco e/ou no endurecido. Nos concretos comerciais usualmente se utiliza um aditivo polifuncional que promove plasticidade do concreto e reduz água. Esse tipo de aditivo traz como principais benefícios a redução do consumo de água proporcionando ganho de resistência mecânica final e, principalmente, a

melhora da trabalhabilidade do concreto em estado fresco com a redução de água de amassamento para uma mesma consistência, aumento da fluidez e manutenção de abatimento; facilitando o adensamento e o lançamento e aumentando a coesão do concreto.

### 3.4. DOSAGEM

Segundo Mehta e Monteiro (2014) dosagem do concreto é o processo de obtenção da combinação correta de cimento, agregado, água, adições e aditivos, para produzir o concreto de acordo com as especificações requeridas. Convencionalmente os requisitos mais importantes são a trabalhabilidade no estado fresco e a resistência à compressão em uma determinada idade no estado endurecido. Essa combinação deve ter o menor custo possível e gerar um produto durável.

Há na literatura diversos métodos de dosagem que se diferem, entretanto, segundo Abreu (2014), certas considerações são comuns a todos como: o cálculo da resistência de dosagem, a correlação da resistência à compressão com a relação água/cimento para determinado tipo e classe de cimento, a evolução do crescimento da resistência com o tempo, o consumo de água por unidade de volume para obtenção da trabalhabilidade requerida, certos ajustes experimentais em laboratório e as correções.

Ribeiro et al. (2013), complementam que o estudo de dosagem deve levar em conta também os materiais disponíveis na região para a composição da mistura. A dosagem pode ser empírica ou experimental sendo a primeira, permitida somente para concretos com resistência característica à compressão de 10 MPa e consumo mínimo de 300 kg de cimento por metro cúbico de concreto.

Na dosagem experimental os materiais constituintes e o concreto obtido são previamente ensaiados em laboratório. Os métodos mais conhecidos no Brasil são o da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológica de São Paulo), INT (Instituto Nacional de Tecnologia) e ACI (American Concrete Institute). Ela está ligada diretamente à fixação da relação água-cimento, depende da resistência de dosagem, das características da obra e da definição de uma trabalhabilidade compatível para materiais e

execução (RIBEIRO et al., 2013). Dosagem experimental não garante que a resistência será atingida, portanto o controle tecnológico se faz extremamente necessário.

A NBR 12655 (ABNT, 2022) define que a composição de cada concreto de resistência de 20 MPa ou superior, a ser utilizado na obra, deve ser definida, em dosagem racional e experimental, com a devida antecedência em relação ao início da concretagem da obra. O estudo de dosagem deve ser realizado com os mesmos materiais e condições semelhantes às daquelas da obra, tendo em vista as prescrições do projeto e as condições de execução.

Segundo a NBR 12655 (ABNT, 2022) a resistência de dosagem deve atender às condições de variabilidade prevalentes durante a construção. Esta variabilidade medida pelo desvio-padrão,  $S_d$ , é levada em conta no cálculo da resistência de dosagem, segundo a equação:

$$f_{cmj} = f_{ckj} + 1,65 \times S_d$$

onde

$f_{cmj}$  é a resistência média do concreto à compressão, prevista para a idade de  $j$  dias, expressa em megapascals (MPa);

$f_{ckj}$  é a resistência característica do concreto à compressão, aos  $j$  dias, expressa em megapascals (MPa);

$S_d$  é o desvio-padrão da dosagem, expresso em megapascals (MPa).

O cálculo da resistência de dosagem do concreto depende, entre outras variáveis, das condições de preparo do concreto: (A) onde o cimento e os agregados são medidos em massa, a água de amassamento é medida em massa ou volume com dispositivo dosador e corrigida em função da umidade dos agregados; (B) onde o cimento é medido em massa, a água de amassamento é medida em volume mediante dispositivo dosador e os agregados medidos em massa combinada com volume; (C) onde o cimento é medido em massa, os agregados são medidos em volume, a água de amassamento é medida em volume e a sua quantidade é corrigida em função da estimativa da umidade dos agregados e da determinação da consistência do concreto (NBR 12655, ABNT, 2022).



O valor do desvio-padrão (Sd) deve ser adotado para o cálculo da resistência de dosagem. Os valores a serem considerados são apresentados na Tabela 5 (NBR 12655, ABNT,2022).

Tabela 5 - Desvio-padrão a ser adotado em função de condição de preparo do concreto

<b>Condição de preparo do concreto</b>	<b>Desvio-padrão (Sd) MPa</b>
A	4,0
B	5,5
C	7,0

FONTE: NBR 12655 (ABNT, 2022)

### 3.5. DESEMPENHO DO CONCRETO

Segundo Lafin (2015), estruturas de concreto armado podem apresentar inúmeras modificações em seus comportamentos quando sujeitas às ações ambientais, alterando consideravelmente seus desempenhos. Essas degradações trazem efeitos negativos na resistência dos elementos e estabilidade das estruturas, gerando altos custos de manutenção e, principalmente, riscos à segurança dos usuários.

Em concretos a durabilidade está, em grande parte, relacionada às propriedades de sua microestrutura. Compósitos cimentícios apresentam poros em suas estruturas e a interconectividade deles pode ter impactos significativos sobre a permeabilidade do material pois permite o transporte de fluidos, incluindo gases, líquidos e substâncias químicas do meio externo para o interior das estruturas. Esse carreamento promove um impacto negativo nas estruturas de concreto afetando seu desempenho de diferentes maneiras, incluindo o enfraquecimento da estrutura como resultado de propriedades mecânicas reduzidas, ou diminuindo a durabilidade como resultado da penetração de agentes nocivos na estrutura, resultando na degradação da armadura de aço ou concreto (GOJEVIĆ et al. 2021).

Segundo Neville (2016), os avanços em cimento e na tecnologia do concreto concentraram-se na obtenção de resistências cada vez mais elevadas, supondo que concreto resistente é concreto durável com ressalvas a ciclos de gelo-degelo e ataques químicos. Devido a várias

condições de exposição das estruturas de concreto, resistência e durabilidade devem ser consideradas explicitamente na etapa de projeto. A deterioração do concreto raramente é decorrente de uma única causa, mas a qualidade do concreto quase sempre está envolvida.

Todas as influências negativas sobre a durabilidade do concreto envolvem o transporte de fluidos através do seu interior com exceção as causas mecânicas (NEVILLE, 2016). As propriedades no estado fresco e endurecido são essenciais para o estabelecimento do desempenho das estruturas. Os estudos se concentram na resistência, estabilidade dimensional e durabilidade (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

### **3.5.1. Estabilidade Dimensional**

O concreto apresenta, deformações de retração por secagem ou resfriamento quando entra em processo de cura. A restrição dessas deformações resulta em padrões de tensão complexos que costumam causar fissuração (MEHTA e MONTEIRO, 2014). A pasta de cimento e a zona de transição na interface com o agregado, assim como a resistência do concreto, influenciam no módulo de elasticidade.

O concreto apresenta fluência pois a deformação aumenta com o tempo quando há carregamento de longa duração. As magnitudes dessa fluência e das retrações descritas anteriormente têm a mesma ordem da deformação elástica decorrente das tensões usuais, logo todas essas deformações devem ser consideradas (NEVILLE, 2016).

A não-linearidade da relação tensão-deformação do concreto e os efeitos da retração por secagem, possuem causas básicas e fatores de controle comuns. São parâmetros de influência o consumo de agregados, de água, de cimento, tempo de exposição, umidade relativa e tamanho e forma do elemento de concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

O aspecto da estrutura da pasta de cimento endurecida relevante para a permeabilidade é a natureza do sistema de poros no interior da pasta de cimento e na região próxima à interface entre ela e o agregado. Os poros importantes para a permeabilidade são os necessariamente contínuos, com diâmetro mínimo de 120 ou de 160 nm (NEVILLE, 2016).

A relação inversamente proporcional entre porosidade, volume de vazios, e resistência é fundamental no concreto que é um material multifásico, a porosidade de cada componente pode ser limitante para a resistência. Os agregados são geralmente densos e fortes, logo a porosidade da matriz da pasta cimentícia e da zona de transição na interface entre ela e o agregado graúdo é o que determina a característica de resistência do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2014). A qualidade potencial do concreto depende da interface entre relação água/cimento e porosidade. São esses os dois principais parâmetros que, independentemente de outros fatores, afetam a porosidade da matriz cimentícia e da zona de transição na interface entre ela e o agregado graúdo.

### **3.5.2. Durabilidade**

Segundo Ribeiro et al. (2013) um concreto durável é aquele que resiste às condições para as quais foi projetado, sem deterioração, por muitos anos. As causas que afetam a durabilidade podem ser decorrentes do ambiente ou inerentes ao próprio concreto. A permeabilidade é o principal determinante da vulnerabilidade aos agentes externos, dessa forma concreto durável deve ser o menos permeável possível.

A estrutura de concreto armado pode apresentar inúmeras modificações em seu comportamento quando sujeitas às ações ambientais, gerando alterações consideráveis em seu desempenho. Essas degradações trazem efeitos negativos na resistência dos elementos e estabilidade das estruturas, gerando altos custos de manutenção e, principalmente, riscos à segurança dos usuários (LAFIN, 2015).

A água é um ingrediente necessário para a hidratação do cimento e atua como agente facilitador da mistura dos componentes do concreto estando presente desde o princípio da dosagem. Dependendo das condições ambientais e da espessura do elemento concretado, a maior parte da água evaporável por capilares e parte da que foi adsorvida, é perdida deixando os poros vazios ou não saturados (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Na pasta de cimento, o tamanho e a continuidade dos poros controlarão o coeficiente de permeabilidade. O teor da água de amassamento é indiretamente responsável por isso pois determina o espaço total e o não preenchido após a água que é consumida no processo de

hidratação do cimento ou que evapora. Já quando se adiciona os agregados, a permeabilidade aumenta em função das microfissuras presentes na zona de transição da interface com a pasta de cimento. A interconectividade entre os poros gerados pelo processo de evaporação pode ter impactos significativos sobre a permeabilidade do concreto pois permite o transporte de fluidos, incluindo gases, líquidos e substâncias químicas do meio externo para o interior das estruturas. Esse carreamento promove um impacto negativo nas estruturas de concreto afetando seu desempenho de diferentes maneiras, incluindo o enfraquecimento da estrutura como resultado de propriedades mecânicas reduzidas, ou diminuindo a durabilidade como resultado da penetração de agentes nocivos na estrutura, resultando na degradação da armadura de aço ou concreto (GOJEVIĆ et al. 2021).

Alguns dos mecanismos preponderantes de deterioração relativo ao concreto e ao aço são a lixiviação e a despassivação por carbonatação, respectivamente. Lixiviação é o mecanismo responsável por dissolver e carrear os compostos hidratados da pasta de cimento por ação de águas puras, carbônicas agressivas, ácidas e outras (NBR 6118 (ABNT,2014)). Despassivação por carbonatação é a ação do gás carbônico da atmosfera sobre o aço da armadura NBR 6118 (ABNT,2014).

Para ambos os casos, a norma NBR 6118 (ABNT,2014) preconiza restringir a fissuração, sejam oriundas de utilização ou retração, do concreto de maneira a minimizar a infiltração de água dificultando o ingresso de agentes agressivos ao interior do concreto. A norma ainda determina os limites de fissuração das estruturas visando sua durabilidade, cabendo ressaltar que, caso as fissuras afetarem a funcionalidade da estrutura, como a estanqueidade de reservatórios, devem ser adotados limites menores para as aberturas. Se as fissuras passam a causar desconforto psicológico aos usuários, embora não representem perda de segurança da estrutura, limites mais severos de suas aberturas podem ser estabelecidos.

A Tabela 6 indica as exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental segundo a NBR 6118 (ABNT,2014).

Tabela 6 - Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão	Exigências relativas à fissuração
Concreto simples	CAA I a CAA IV	Não há
Concreto armado	CAA I	Estado limite de abertura de fissuras $\leq 0,4$ mm
Concreto armado	CAA II e CAA III	Estado limite de abertura de fissuras $\leq 0,3$ mm
Concreto armado	CAA IV	Estado limite de abertura de fissuras $\leq 0,2$ mm
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração com CAA I ou Pós-tração com CAA I e II	Estado limite de abertura de fissuras $\leq 0,2$ mm
Concreto protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré-tração com CAA II ou Pós-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo: Estado limite de formação de fissuras Estado limite de descompressão
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	Pré-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo: Estado limite de formação de fissuras Estado limite de descompressão

FONTE: NBR 6118 – ABNT, 2014- adaptado

As estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que, sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas conforme preconizado em

projeto, de acordo com o que estabelece a NBR 6118 (ABNT, 2014) apresentem segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil de projeto. A agressividade ambiental é classificada de acordo com o apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Classes de agressividade ambiental

<b>Classe de agressividade ambiental</b>	<b>Agressividade</b>	<b>Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto</b>	<b>Risco de deterioração da estrutura</b>
I	Fraca	Rural Submersa	Insignificante
II	Moderada	Urbana (a,b)	Pequeno
III	Forte	Marinha (a) Industrial (a,b)	Grande
IV	Muito Forte	Industrial (a,c) Respingos de maré	Elevado

(a) Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

(b) Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

(c) Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

FONTE: NBR 6118 – ABNT, 2014- adaptado

A NBR 12655 (ABNT, 2021) estabelece que devido à existência de uma forte correspondência entre a relação água/cimento, a resistência à compressão do concreto e sua durabilidade, permite-se adotar os requisitos mínimos expressos na Tabela 8.

Tabela 8 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto

Concreto	Classe de agressividade			
	I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
Resistência do concreto (MPa)	≥ 20	≥ 25	≥ 30	≥ 40
consumo de cimento por m <sup>3</sup> de concreto (kg/m <sup>3</sup> )	≥ 260	≥ 280	≥ 320	≥ 360

FONTE: NBR 12655 – ABNT, 2021- adaptado

### 3.5.2.1. Permeabilidade e absorção de água

Abreu (2014) estabeleceu que a avaliação do desempenho do concreto quanto à sua capacidade de impedir a penetração de agentes agressivos, reduzindo o efeito destes agentes aos constituintes do concreto e às armaduras, tem se mostrado cada vez mais importante nos estudos de durabilidade.

Neville (2016) definiu permeabilidade como sendo a facilidade com que líquidos ou gases se movimentam através do concreto, sendo uma propriedade essencial para a estanqueidade das estruturas que precisam conter os ataques químicos. Nos concretos produzidos com agregados comuns essa permeabilidade é governada pela porosidade da pasta de cimento. Já Helene (1993) definiu a permeabilidade como sendo a movimentação de um fluido submetido à ação de um gradiente de pressão, sendo dependente do diâmetro e da intercomunicação dos poros do material.

A absorção capilar é responsável pelo transporte de um líquido devido a tensão superficial que atua nas paredes dos poros e capilares do concreto. A penetração por meio de forças capilares é o mais comum dos mecanismos de transporte (HELENE, 1993).

Zaccardi et al. (2017) definiram que as propriedades de transporte de água dependem do tamanho dos poros e a conectividade no concreto. Quando o concreto insaturado está em contato direto com a água, a absorção capilar ocorre devido à ação das forças de adesão das moléculas de água às paredes dos poros do concreto. Este processo de transporte pode

promover a entrada de agentes agressivos no concreto e, conseqüentemente, afetar a durabilidade. Uma baixa taxa de absorção de água indica propriedades satisfatórias para garantir uma vida útil aceitável de uma estrutura de concreto.

A absorção de água não pode ser usada como medida da qualidade de um concreto, porém grande parte dos concretos de boa qualidade têm absorção abaixo de 10% (NEVILLE, 2016). Portanto, segundo Abreu (2014), um concreto durável tem que ser impermeável, dificultando a penetração de substâncias agressivas.

Abreu et al. (2020) consideram que a absorção e a permeabilidade são propriedades determinantes para a durabilidade de um concreto que sofre ataques ácidos externos. Ensaio realizados com concretos submetidos a ataques ácidos, demonstram que o processo de degradação é mais significativo em concretos com maior taxa de absorção e permeabilidade. Além disso a degradação promove a diminuição da resistência à compressão, aumento das perdas de massa e amplia ainda mais as taxas de absorção e permeabilidade, tornando o composto cada vez menos resistente mecanicamente e mais vulnerável a ataques externos.

### *3.5.2.2. Mecanismos de ataque ao concreto*

Soluções ácidas em contato com os constituintes da pasta de cimento, formam sais solúveis de cálcio que podem ser removidos pelo processo de lixiviação, levando ao aumento de porosidade e conseqüentemente da permeabilidade do concreto. A ação deletéria direta dos ácidos sobre o concreto se dá por meio da reação com o hidróxido de cálcio, provocando a desagregação da matriz cimentícia. (HELENE, 2002; NEVILLE e BROOKS, 2013; RIBEIRO, 2018 citado por ABREU, 2021).

Os principais agentes agressivos ácidos do concreto e seus efeitos de deterioração foram citados por Pinto (2006) a partir do trabalho de Andrade (1997) e são resumidos na Tabela 9.



Tabela 9 - Ácidos agressivos ao concreto

<b>Ácido</b>	<b>Efeitos no concreto</b>
Sulfuroso	Desintegração
Sulfúrico	
Carbônico	
Nítrico	
Clorídrico	
Lático	
Muriático	
Fosfórico	Ataque lento à superfície
Bórico	Nenhum
Oxálico	
Esteárico	Desintegração Lenta
Oleico	
Acético	
Tânico	
Sulfídrico	Desintegração quando dissolvido em água

FONTE: Pinto (2006) adaptado

As estruturas de concreto podem estar expostas a ataques por sulfatos presentes em vários meios, como solos, águas subterrâneas, efluentes domésticos, ambientes industriais e agrícolas, pântanos, lagos pouco profundos, poços de mineração e na atmosfera. A degradação do concreto, como resultado de reações químicas entre o cimento portland hidratado e sulfatos de fontes externas, pode ocorrer de duas formas: por expansão do concreto e pela perda progressiva de massa e de resistência. Estas formas de deterioração dependem da concentração dos sulfatos presentes nos agentes de contato e da composição da pasta de cimento no concreto. O ataque por sulfato, que pode se manifestar na forma de expansão, provoca a fissuração do concreto, aumentando a sua permeabilidade e facilitando a penetração do agente agressivo. O ataque por sulfato pode, também, provocar uma perda progressiva de massa e resistência, devido à deterioração na coesão dos produtos de hidratação do cimento (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Segundo Pinto (2006), os fatores que influenciam o ataque dependem da natureza e quantidade do sulfato presente, do nível da água e sua variação sazonal, do fluxo da água subterrânea e porosidade do solo, assim como, da qualidade do concreto e da construção. Em função do grau de severidade do ataque por sulfato, são propostas algumas precauções visando garantir a durabilidade do concreto: ataque negligenciável - sulfato abaixo de 0,1%

no solo, ou abaixo de 150 ppm (mg/l) na água - sem restrições quanto ao tipo de cimento e fator água/cimento propostos; ataque moderado - sulfato entre 0,1 a 0,2% no solo, ou 150 a 1500 ppm (mg/l) na água - usar cimentos tipo Portland composto, pozolânico ou de alto-forno, com fator água/cimento menor que 0,5; ataque severo - sulfato entre 0,2 a 2,0% no solo, ou 1500 a 10.000 ppm (mg/l) na água - fator água/cimento menor que 0,50 e resistência mínima à compressão aos 28 dias de 28 MPa; ataque muito severo - sulfato acima de 2% no solo, ou acima de 10.000 ppm (mg/l) na água - fator água/cimento menor que 0,45 e resistência mínima à compressão aos 28 dias de 28 MPa.

A degradação de estruturas de concreto expostas a agentes agressivos, ambientes com ácido sulfúrico, é um problema chave de durabilidade que afeta o desempenho do ciclo de vida e os custos de manutenção civil. O ácido sulfúrico em águas subterrâneas, resíduos químicos ou gerados a partir da oxidação de compostos contendo enxofre no aterro podem atacar membros de concreto da infraestrutura. Além disso, estruturas de concreto em zonas industriais são suscetíveis à deterioração devido à chuva ácida, da qual ácido sulfúrico é o componente principal. Danos consideráveis podem ocorrer em sistemas de esgoto por corrosão por ácido sulfúrico biogênico produzido a partir de uma interação químico-microbiana (BASSUONI e NEHDI, 2007).

Neville (2016) define que os ataques descritos provocam uma deterioração que comumente começa nos cantos e arestas, seguida por uma fissuração progressiva e um desprendimento de lascas que reduzem o concreto a uma condição friável ou até fraca.

Segundo Abreu (2021) é comum observar estruturas de concreto que estão deterioradas devido à exposição a ácidos, sendo os ácidos sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) e clorídrico (HCl) os mais comuns. Ao ser submetido a um ambiente ácido, o concreto é enfraquecido pela degradação dos constituintes e de suas ligações, levando ao comprometimento de suas propriedades físicas e mecânicas (ABREU et al., 2020; MEHTA e MONTEIRO, 2014; THOMAS et al., 2016 citado por ABREU 2021).

Os sulfatos presentes nas soluções de águas sulfatadas podem reagir com a pasta de cimento endurecida, reagindo com o  $Ca(OH)_2$  e com o aluminato tricálcico hidratado ( $C_3A$ ) presentes no cimento, sendo que os produtos dessas reações, gesso e sulfo-aluminato de cálcio, têm

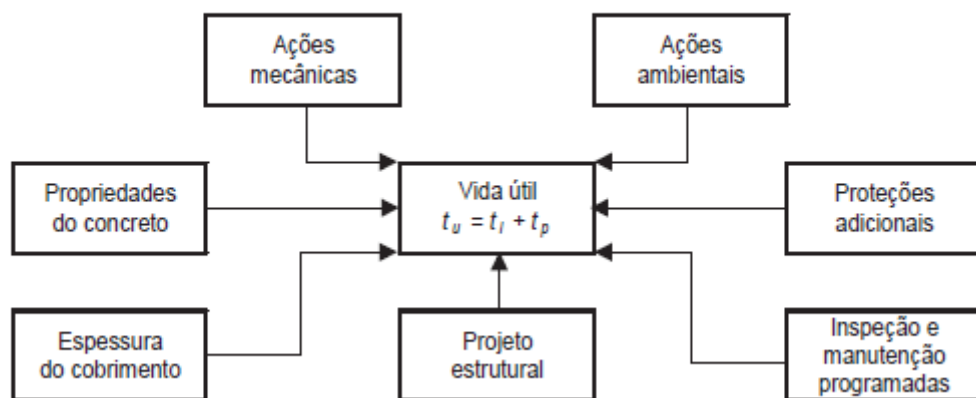
um volume consideravelmente maior do que os compostos iniciais, o que provoca a expansão e desagregação do concreto (NEVILLE, 2016).

### 3.5.2.3. Agressividade do ambiente

A NBR 6118 (ABNT, 2014) determina que agressividade do meio ambiente está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto, independentemente das ações mecânicas, das variações volumétricas de origem térmica, da retração hidráulica e outras previstas no dimensionamento das estruturas.

Bertolini (2010) define que a ação do ambiente nas estruturas de concreto armado pode determinar um dano progressivo da estrutura, tanto no próprio concreto como nas armaduras. O dano pode ser do tipo físico, como efeito de temperatura; químico, como substâncias presentes no ambiente; biológico ou mecânico, como efeito da abrasão ou de cargas aplicadas à estrutura. Há uma correlação de diversos fatores que influenciam na vida útil das peças executadas em concreto armado, de acordo com a FIGURA 7.

FIGURA 7 - Fatores que influenciam na vida útil do concreto



FONTE: Bertolini, 2010

#### 3.5.2.4. Concreto exposto a ataques químicos

Aguiar (2006) expôs que o contato do concreto com ácidos em altas concentrações não é habitual. Já a ação de chuvas ácidas nos grandes centros e nas áreas industriais é mais frequente. Os ácidos sobre o concreto atuam destruindo seu sistema poroso e produzindo uma transformação completa na pasta de cimento endurecida. O resultado destas ações é a perda de massa e uma redução da seção do concreto. Esta perda acontece em camadas sucessivas, a partir da superfície exposta, sendo a velocidade da degradação proporcional à quantidade e concentração do ácido em contato com o concreto. As reações químicas se manifestam através de efeitos físicos nocivos, tais como o aumento da porosidade e permeabilidade, diminuição da resistência, fissuração e destacamento.

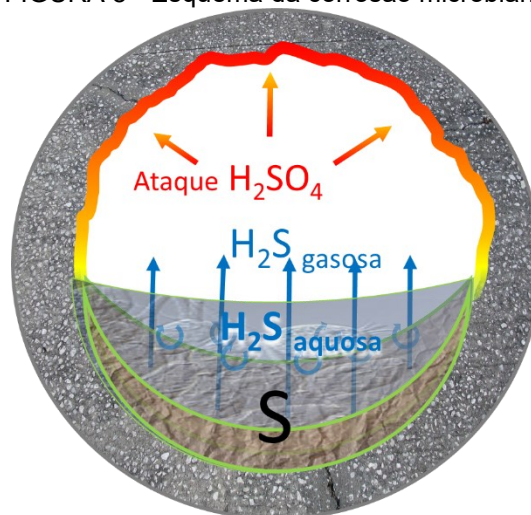
As reações químicas provocadas por agentes externos que deterioram o concreto reduzindo suas propriedades e durabilidade caracterizam os ataques químicos. De acordo com Souza e Ripper (1998), o concreto possui pH entre 12,5 e 14. Aguiar (2006) cita que o  $\text{CO}_2$ , o  $\text{SO}_2$  e outros gases ácidos presentes na atmosfera em ambientes úmidos atacam o concreto, dissolvendo e removendo parte da pasta de cimento Portland endurecido, que não é resistente aos ácidos.

O ataque ocorre em valores de pH próximos de 6,5. Para pH entre 3 e 6 a velocidade do ataque é proporcional à raiz quadrada do tempo, sendo determinante a difusão através dos produtos pouco solúveis que permanecem, depois que o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  foi dissolvido. A velocidade de ataque depende não só do pH, mas também da capacidade dos íons serem transportados. As tubulações com esgotos sofrem deteriorações acentuadas quando os compostos de enxofre são transformados em  $\text{H}_2\text{S}$  por bactérias anaeróbicas. Este agente, mesmo não sendo agressivo, sofre oxidação pelas bactérias aeróbicas, dando como produto o ácido sulfúrico, sendo que o ataque se processa acima do nível do líquido. O cimento se dissolve gradativamente e degrada o concreto (AGUIAR, 2006).

Essa deterioração acentuada é chamada de corrosão microbiana induzida, processo no qual as bactérias fornecem ácido sulfúrico sustentado na reação. A taxa pode ser tão alta quanto 12 mm/ano em muitos sistemas de esgoto e até 14 mm/ano em laboratório. Nos sistemas de esgoto sanitário, o progresso dessa corrosão muitas vezes determina a vida útil da estrutura de concreto (WU et al., 2018).

No processo o  $H_2S_{(aq)}_{(aq)}$  é primeiramente convertido para sulfato por atividades de bactérias em uma camada de limo. Depois disso, o  $H_2S_{(g)}$  é liberado do esgoto para a superfície da tubulação, acima da lâmina de água. Este  $H_2S_{(g)}$  então se dissolve no filme de umidade formado na superfície. Finalmente, o  $H_2S_{(d)}$  é convertido em ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) sob as reações de bactérias oxidantes de enxofre (Thiobacillus). A superfície do concreto tem seu pH reduzido para 1 a 2. Em tais ambientes ácidos, a hidratação do cimento os produtos podem ser facilmente decompostos, ou seja, portlandita, aluminato de cálcio hidratado, etringita e hidrato de sílica de cálcio se dissolvem sequencialmente quando o pH da solução diminui gradualmente de 12,5 para 8,8 ou menos. São cinco os subprocessos: carbonatação, geração de  $H_2S$  em esgoto, Acúmulo de  $H_2S$  na superfície do concreto, geração de ácido sulfúrico e reação de corrosão (WU et al., 2018). A FIGURA 8 representa o esquema da corrosão.

FIGURA 8 - Esquema da corrosão microbiana



FONTE: Parker (1945) adaptado

O gás sulfídrico, Sulfeto de Hidrogênio ( $H_2S$ ), é o produto final de um processo no qual o sulfato e outros compostos a base de enxofre, presentes no esgoto, são reduzidos através da ação de um grupo de bactérias anaeróbias estritas, denominadas bactérias sulforredutoras, O mecanismo de gatilho é a turbulência do fluxo do esgoto, que liberam os gases  $H_2S$  e  $CO_2$ , que tendem a condensar-se sobre a parede úmida do concreto, diminuindo e neutralizando o pH desta superfície, de forma abiótica (TAKAGI et al., 2021).

O ácido sulfúrico biogênico é resultante da oxidação do  $H_2S$  por meio de atividade bacteriana. Primeiro, a umidade na atmosfera do túnel condensa-se na parede de concreto, formando uma película úmida. Então, devido à carbonatação, o pH da superfície do concreto cai para cerca de 9, e a bactéria começa a colonizar na superfície do concreto. O  $H_2S$  (dissolvido) no filme de umidade durante o acúmulo de sulfeto é então oxidado pela bactéria, que forma ácido sulfúrico (WU et al., 2018). A formação de ácido sulfúrico é afetada principalmente por dois fatores: temperatura atmosférica e a umidade relativa. A alta temperatura atmosférica aumenta as atividades microbianas, aumentando assim a taxa de corrosão. Por exemplo, as taxas de oxidação de sulfeto a 25 °C foram encontradas 15% mais altas do que aquelas a 20 °C. A temperatura abaixo de 15,6 °C inibe a atividade de oxidação de sulfeto pelas bactérias. A umidade relativa é o outro fator de influência na formação do ácido sulfúrico. Um valor mínimo de 87% umidade relativa é necessário para ativar bactérias. Em geral, a alta umidade aumenta a taxa de formação do ácido sulfúrico. Por exemplo, o pH em uma superfície de concreto foi reduzido de forma mais significativa quando a umidade foi de 95-100% do que quando era de 85–95% (WU et al., 2018).

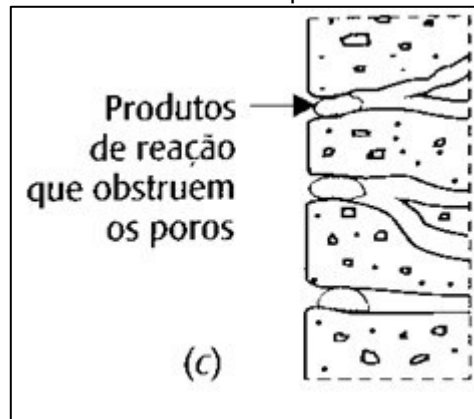
### 3.6. GEOPOLÍMERO CAMADA DE PROTEÇÃO SUPERFICIAL

Lafin (2015) cita que grande parte dos materiais de construção, em especial o concreto armado quando exposto à situação de umidade, sob todas as formas de ações, pode acabar desenvolvendo uma série de manifestações patológicas que degradam o material e diminuem, consideravelmente, sua vida útil, podendo gerar desconforto e instabilidade das estruturas. Tendo em vista todas as interfaces envolvidas na construção de uma estrutura de concreto armado e suas variantes, faz-se necessária a aplicação de materiais e sistemas de impermeabilização que contribuam, de forma decisiva, para a estanqueidade destas estruturas, garantindo assim a vida útil de projeto esperada.

Bertolini (2010) indica que a aplicação de um revestimento impermeável pode realmente impedir que haja penetração de agentes agressivos sobre a superfície do concreto. Ele apresenta quatro tipos de tratamentos superficiais para as estruturas de concreto armado, relatando que alguns tipos de tratamento superficial levam ao fechamento dos poros, graças à ação de substâncias como silicatos ou fluossilicatos, que, penetrando no interior dos poros,

reagem com os constituintes do concreto, em particular com o hidróxido de cálcio, conforme a FIGURA 9.

FIGURA 9 - Tratamento superficial do concreto



FONTE: Bertolini (2010) - adaptado

Superfícies de concreto com áreas onde condições anaeróbicas produzem ácidos fortes na zona de gás ativado por ácido estão sujeitas à corrosão. Essas estruturas devem ser protegidas. Uma das opções é a pintura com um geopolímero classificado como protetor mineral especificamente desenvolvido para condições anaeróbicas. O ácido sulfúrico, ativa a reação química dentro do produto convertendo o revestimento em uma camada resistente que protege e prolonga a vida do substrato de concreto onde está aplicado (PENETRON, 2022).

Esse geopolímero é um composto de silicato de sódio, escória de alto forno e sílica cristalina e é recomendado para instalações de tratamento de esgoto; tubos de esgoto pré-fabricados; operações com banho de Ácido Sulfúrico ou qualquer aplicação em que seja necessária a proteção contra formação ácidos durante a atividade anaeróbica ou biogás (PENETRON, 2022).

Os geopolímeros são produtos de grande potencial de uso na indústria da construção civil, são compostos por aluminossilicatos ativados por uma solução alcalina, podem ser fabricados com qualquer material ou resíduo que apresente uma quantidade adequada de silício (Si) e alumínio (Al) semicristalinos ou amorfos (BHARATH, 2014 citado por PAIVA et al, 2020). Materiais que são rejeitos industriais e não tem um descarte adequado na natureza são utilizados para sua produção (ROSETTO, 2017 citado por PAIVA et al, 2020).

## 4. METODOLOGIA

A metodologia proposta consistiu na comparação entre o concreto de referência - constituído por cimento, areia, brita, água e aditivo polifuncional, concretos aditivados com cristalizante e concretos com substituição de 50% de cimento por material pozolânico - com ou sem cristalizante. A comparação avaliou as características físicas, o potencial de utilização e a durabilidade dos concretos quando expostos a sulfatos.

A metodologia foi realizada seguindo-se os seguintes passos:

- Caracterização dos materiais constituintes;
- Elaboração de dosagens de concreto de referência e de concretos aditivados com aditivo cristalizante e com substituição de 50% de cimento por pozolana classe E;
- Avaliação dos concretos no estado fresco quanto a trabalhabilidade (abatimento de tronco de cone);
- Análise das propriedades dos concretos no estado endurecido: resistência à compressão e módulo de elasticidade;
- Avaliação da propriedade de absorção por imersão e capilaridade e de índice de vazios das amostras pelas metodologias previstas nas normas brasileiras NBR 9778 (ABNT, 2005) e NBR 9779 (ABNT, 2012) antes e depois da exposição a sulfatos;
- Inspeção visual dos corpos de prova de concreto submetidos a imersão em solução de ácido sulfúrico a 2,5% com e sem aplicação de camada de proteção a base de geopolímero para analisar a deterioração da matriz cimentícia;
- Medição das perdas de massa das amostras dos concretos com e sem proteção de geopolímero.



## 4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS CONSTITUINTES

### 4.1.1. Cimento

Para composição das dosagens de concreto foi escolhido o cimento CPV por ser um produto composto quase que em sua totalidade, 90 a 100%, de clínquer e sulfatos de cálcio, segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018).

### 4.1.2. Material pozolânico

Para verificar a capacidade de auto cicatrização de concretos com adição de material pozolânico, foi definida a utilização de um subproduto de processo industrial de siderurgia classificado como material pozolânico, classificado como uma pozolana classe E (quaisquer pozolanas, não contempladas nas outras classes, que obedecem aos requisitos da norma), segundo a NBR 12653 (2014).

Essa pozolana é o mesmo material utilizado como adição na fabricação do cimento CPIV do fornecedor do cimento CPV definido para a dosagem do concreto de referência. A definição do percentual de substituição levou em conta a quantidade descrita na NBR 16697 (ABNT, 2018) de adição permitida de pozolana na composição de CPIV. Como o objetivo era avaliar a atuação da pozolana na redução de absorção e permeabilidade, definiu-se como referência o valor de 50% de substituição do cimento.

A composição química é apresentada na Tabela 10 conforme informação do fornecedor do material.

Tabela 10 - Composição Química do material pozolânico  
**Material Pozolânico**

Item	Percentual
SiO <sub>2</sub>	39,84%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,68%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,95%
CaO	34,96%
MgO	1,65%
SO <sub>3</sub>	0,08%
K <sub>2</sub> O	0,49%
Na <sub>2</sub> O	0,35%
IB	1,187
Fe <sup>o</sup>	1,10%
Umidade	1,02%
RI	2,90%

FONTE: Cimento Nacional - certificado de análise maio/2022

#### 4.1.3. Agregados

Os agregados miúdo e graúdo utilizados seguiram as determinações da NBR 7211 (2022) sendo a areia produzida artificialmente a partir da britagem de Gnaisse se classificando, segundo a norma, como média e a brita classificada como 1 também de gnaisse. Ambos os agregados foram extraídos a partir de uma mineração na região metropolitana de Belo Horizonte/MG.

#### **4.1.4. Aditivos**

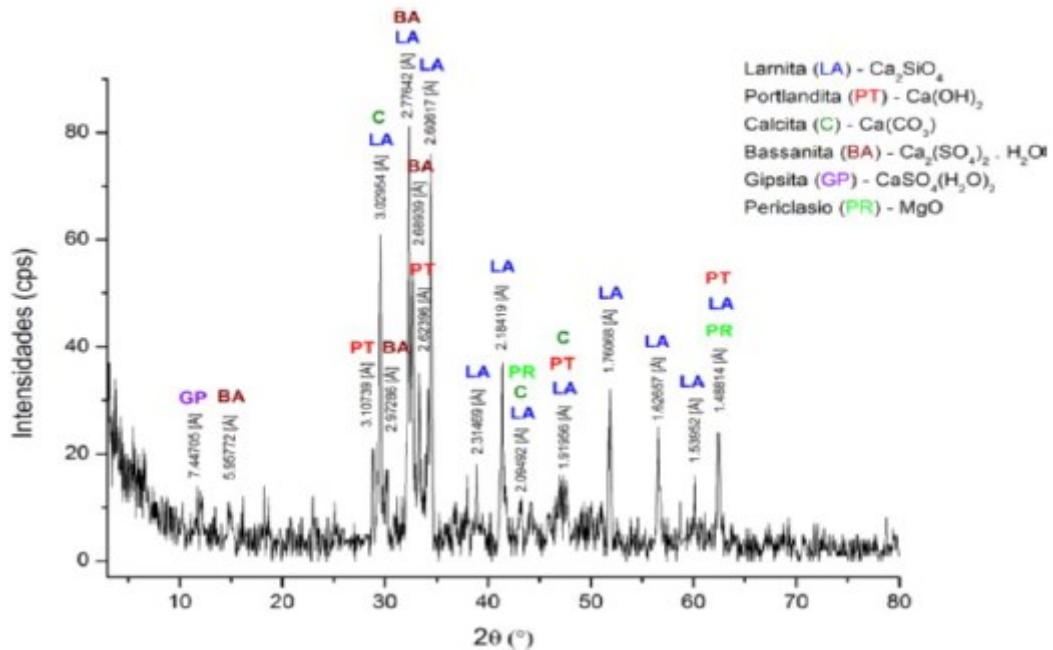
##### *4.1.4.1. Aditivo polifuncional*

O aditivo polifuncional foi utilizado para promover plasticidade do concreto em todas as amostras. Foi escolhido o redutor de água tipo 1/ RA1-R segundo a NBR 11768-1 (ABNT, 2019). Esse tipo de aditivo tem aplicações múltiplas e é isento de cloretos. Ele foi desenvolvido para aplicação em temperaturas elevadas com alto poder dispersante das partículas de cimento e boa manutenção de plasticidade da mistura sem perda de abatimento durante o lançamento do concreto. Em concreto fresco ele proporciona boa redução de água de amassamento para uma mesma consistência, aumenta a fluidez com manutenção por tempo prolongado, facilita o adensamento e o lançamento, aumenta a coesão do concreto. No estado endurecido ele contribui para altas resistências mecânicas iniciais e finais, melhora na aderência e textura da superfície do concreto, redução da permeabilidade, retrações e fissuras de origem plástica, podendo aumentar a durabilidade e prolongar a vida útil das estruturas.

##### *4.1.4.2. Aditivo Cristalizante*

O aditivo cristalizante utilizado está classificado como aditivo redutor de permeabilidade para condições hidrostáticas (PRAH) segundo o ACI 212.3 R-16 (2016) ou simplesmente aditivo redutor de permeabilidade (RP) segundo a NBR 11768-1 (ABNT, 2019). Eles são compostos de Cimento Portland, areia de quartzo especialmente tratada, e uma mistura de produtos químicos com o objetivo de diminuir a permeabilidade capilar do concreto pela cristalização. Os compostos que fazem esse bloqueio devem ser suficientemente estáveis para resistir à água sob pressão. A redução ocorre devido ao aumento da densidade do silicato de cálcio hidratado. A FIGURA 10 mostra a composição, por difração de raios X, do aditivo cristalizante utilizado.

FIGURA 10 - Difração de Raios-X do aditivo cristalizante utilizado neste trabalho.



FONTE: Soterio, 2020

#### 4.1.5. Água

A água utilizada nos ensaios é proveniente da companhia sanitária COPASA da região de Matozinhos, MG, Brasil.

## 4.2. COMPOSIÇÃO DE MÉTODOS DE DOSAGEM

A dosagem do concreto foi realizada a partir dos dados obtidos da caracterização do cimento, pozolana e avaliação da qualidade e composição granulométrica dos agregados, areia artificial e brita de gnaiss disponíveis para ensaios no laboratório da Brennan Cimentos (Cimento Nacional)

Foram utilizados os métodos de dosagem do American Concrete Institute (ACI) e do Instituto de Pesquisa Tecnológica de São Paulo (IPT), com o objetivo de se obter um concreto de qualidade e com a resistência proposta. As dosagens foram parametrizadas pelas indicações

da NBR 6118 (ABNT,2014), na correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto, fixando a relação água/cimento para a classe de agressividade III como menor ou igual a 0,55 para concreto armado. Definiu-se 0,50 como essa relação para um fck estimado de 30 MPa e desvio padrão com condição A, 4,0 MPa, conforme relação definida pela NBR 12655 (ABNT, 2021).

Foi definida a utilização de aditivo polifuncional em todas as dosagens para garantir melhor trabalhabilidade.

O aditivo cristalizante foi utilizado na proporção de 0,8% sobre a massa de aglomerante.

A dosagem do concreto com material pozolânico foi elaborada a partir da substituição de 50% do cimento definido para o concreto de referência conforme indicado em no item 4.1.2.

### 4.3. PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

Os concretos foram produzidos a partir dos estudos de dosagem, utilizando os equipamentos disponíveis no Laboratório de Concreto da Brennand Cimentos na unidade Matozinhos/MG. Esta produção corresponde às etapas de homogeneização dos materiais constituintes, lançamento, adensamento e cura, que são fundamentais para garantir a obtenção de concretos resistentes e duráveis.

A mistura dos materiais constituintes, foi feita em misturador com eixo vertical, em um tempo de cinco minutos, necessário para garantir uma boa homogeneização e, por consequência, não haver perda de resistência mecânica e de durabilidade do concreto.

O adensamento foi realizado manualmente conforme descrito na NBR 5738 (ABNT, 2015) nos corpos-de-prova de dimensões 10 x 20 cm, de forma a evitar a segregação dos compostos do concreto.

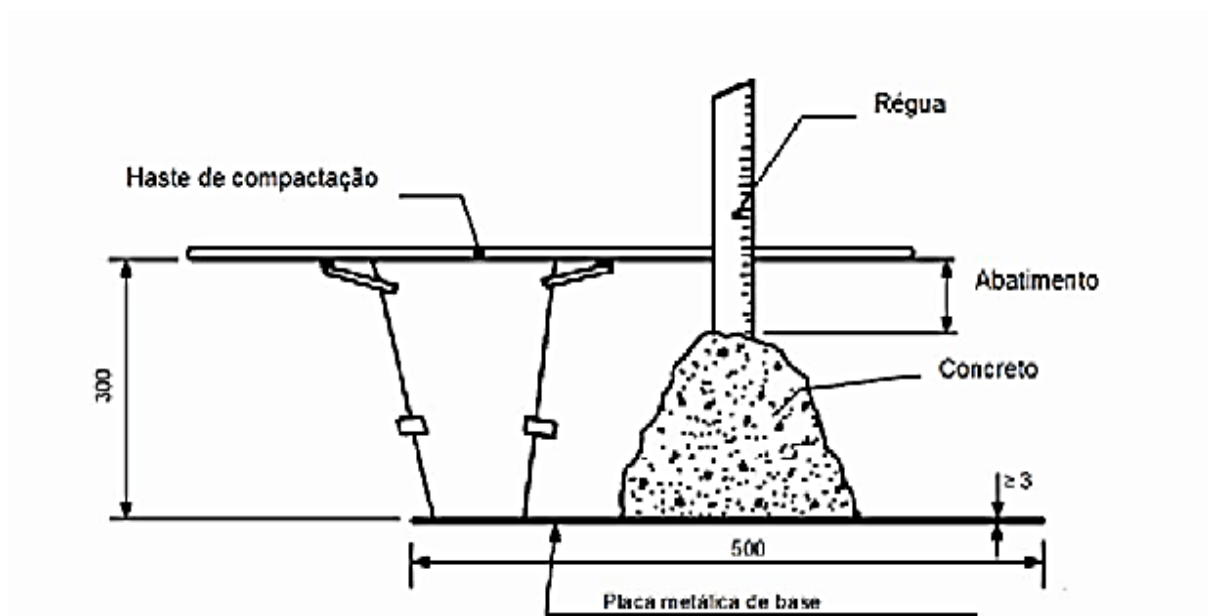
Os corpos-de-prova ficaram à temperatura ambiente durante as primeiras 24 horas, sendo posteriormente desmoldados e acondicionados câmara para cura úmida, onde permaneceram

até a data dos ensaios de resistência à compressão aos 1 (um), 7 (sete), 28 (vinte e oito) e 56 (cinquenta e seis) dias (NBR 5738, ABNT 2015).

#### 4.4. ANÁLISE DOS CONCRETOS NO ESTADO FRESCO

A avaliação dos concretos no estado fresco foi feita por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone, normalizado pela NBR16889 (ABNT,2020), que permite visualizar a consistência do material, conforme a FIGURA 11. Este método consiste no enchimento de um molde tronco- cônico com concreto em três camadas, adensadas com 25 golpes cada e, em seguida, o molde é retirado. Em decorrência do peso próprio, o concreto é abatido na ausência do molde e a diminuição da altura do tronco de cone é chamada de abatimento do concreto conhecida como "slump", que tem como objetivo verificar a trabalhabilidade.

FIGURA 11 - Ensaio de abatimento do tronco de cone – “Slump”.



FONTE: NBR 16889 (ABNT, 2020)

A determinação da trabalhabilidade visou avaliar a influência da relação água/cimento de 0,50, aliado ao aditivo proposto, a fim de verificar o abatimento e a performance do concreto, assim como garantir a hidratação e a homogeneização da pasta.

## 4.5. ANÁLISE DOS CONCRETOS NO ESTADO ENDURECIDO

### 4.5.1. Moldagem dos corpos de prova

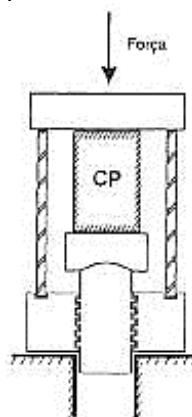
Os corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm foram moldados de acordo com o determinado na norma NBR 5738 (ABNT, 2015) e rompidos de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018). Os moldes foram preenchidos com concreto em camadas e adensadas manualmente com haste metálica, desformados após 24 horas e colocados em cura úmida até as datas de rompimento.

### 4.5.2. Resistência à compressão

Conforme indicado por Neville (2013), a resistência à compressão é o ensaio mais utilizado para o concreto na construção, por ser uma das características mais importantes para estrutura e por ser uma característica relacionada qualitativamente a outras desejadas.

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018). Foram rompidos corpos de prova cilíndricos 10 x 20 cm, nas idades de 1, 7, 28 e 56 dias, utilizando a prensa hidráulica, FIGURA 12.

FIGURA 12 - Ruptura do concreto à compressão.



### 4.5.3. Módulo de Elasticidade

Os ensaios para obtenção do módulo de elasticidade seguiram o item 7.3.1 da NBR 8522-1 (ABNT, 2021) Metodologia A – Tensão  $\sigma_a$  fixa. Foram utilizados 05 corpos de prova 100 x 200 mm para cada dosagem e seguidas 4 etapas.

Na primeira etapa, carrega-se o corpo de prova até a força correspondente à tensão do limite superior ( $\sigma_b$ ) e a força é mantida neste nível por 60 s. A tensão  $\sigma_b$  corresponde a 30 % da tensão de ruptura ( $f_c$ ) obtida pelo ensaio de resistência à compressão.

Em seguida, descarrega-se o corpo de prova até uma força próxima de zero ou a primeira marcação correspondente a uma divisão da escala. O prato superior da máquina de ensaios não deve perder o contato com o topo do corpo de prova.

Na etapa 2, carrega-se o corpo de prova até a força correspondente à tensão de 0,5 MPa ( $\sigma_a$ ) e a força é mantida neste nível por 60 s. Em seguida, carrega-se o corpo de prova até a força correspondente à tensão do limite superior ( $\sigma_b$ ) e mantém-se a força neste nível por 60 s. Descarrega-se o corpo de prova até uma força próxima de zero ou a primeira marcação correspondente a uma divisão da escala. Da mesma forma anterior, o prato superior da máquina de ensaios não deve perder o contato com o topo do corpo de prova. A etapa 3 é uma repetição da etapa 2.

Na etapa 4, carrega-se o corpo de prova até a força correspondente à tensão de 0,5 MPa ( $\sigma_a$ ) e mantém-se a força neste nível por 60 s. Registra-se as deformações lidas,  $\epsilon_a$ , tomadas em no máximo 30 s. Em seguida, carrega-se o corpo de prova até a força correspondente à tensão do limite superior ( $\sigma_b$ ) e mantém-se a força neste nível por 60 s. Registra-se as deformações lidas,  $\epsilon_b$ , tomadas em no máximo 30 s. Após a leitura das deformações, libera-se a instrumentação, se necessário, e carrega-se o corpo de prova na mesma taxa de velocidade utilizada durante as etapas, até que se produza a ruptura, obtendo-se a resistência efetiva ( $f_{c,ef}$ ).



#### 4.6. ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS CONCRETOS

A absorção de água do concreto pode ser avaliada através de dois métodos de ensaio normalizados: por imersão, segundo a NBR 9778 (2005) e por capilaridade, de acordo com a NBR 9779 (2012). Neste estudo foram utilizados os dois métodos para avaliar o volume total de poros e absorção por capilaridade. Os corpos de prova foram preparados e ensaiados conforme procedimentos descritos em ambas as normas.

#### 4.7. CAMADA PROTETORA DOS CONCRETOS

Para os estudos, foi utilizada camada protetora à base de geopolímero para os concretos de referência, com material pozolânico e os aditivados com cristalizante. A proteção dos concretos é uma condição suplementar quando as estruturas estão expostas a ambientes agressivos, o que já é um consenso entre os pesquisadores de todo o mundo (ALMUSALLAM et al., 2003).

A camada protetora foi aplicada nos concretos em 1 demão com trincha, em 1 corpo de prova para cada dosagem, respeitando o consumo de 0,6 a 0,8 kg/m<sup>2</sup>. Além disto, antes da aplicação da camada protetora, foi feita ainda a secagem dos corpos de prova em estufa por 36 horas a 105 °C para que a umidade interna do concreto não prejudicasse a qualidade da película.

A camada protetora utilizada foi de um geopolímero mineral ativo desenvolvido especificamente para condições anaeróbicas. Ele deve ser aplicado em superfícies de concreto em áreas onde condições anaeróbicas produzem ácidos fortes na zona de gás. Estes ácidos, em particular o Ácido Sulfúrico, reagem quimicamente com o geopolímero tornando o revestimento após a aplicação resistente a ácidos fortes que protegerá e prolongará a vida útil substrato do concreto. É recomendada sua utilização em instalações de tratamento de esgoto, tubos de esgoto pré-fabricados, operações com banho de Ácido Sulfúrico, qualquer aplicação em que seja necessária a proteção contra formação ácidos durante a atividade anaeróbica ou biogás (PENETRON, 2022).

O geopolímero utilizado é um produto bi-componente: um sólido em pó composto de sílica cristalina (quartzo) e escória de alto forno e metais ferrosos; o outro componente é líquido,

solução de silicato de sódio entre 10 e 25% de concentração (PENETRON, 2022). Seus componentes estão representados na FIGURA 13.

FIGURA 13 - Componentes do Geopolímero



FONTE: desenvolvido pelo autor

#### 4.8. ATAQUE POR ÁCIDO AOS CONCRETOS

Foi realizado ataque nos concretos em solução de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) a 2,5%, por imersão durante sete dias, uma vez que segundo Almusallam (2003), muitas pesquisas têm atribuído a deterioração do concreto exposto a ambientes agressivos a uma má avaliação da exposição ao meio.

O ataque realizado teve como principal objetivo, portanto, simular uma deterioração acelerada aos concretos, para permitir uma comparação com os efeitos decorrentes de exposição a sulfatos.

#### 4.9. PERDAS DE MASSA

A degradação dos concretos foi avaliada através das perdas de massa em corpos de prova de concreto sem proteção e protegidos, antes e após ataque químico.

Este ensaio permite avaliar a perda de massa (PM) do concreto através de uma abordagem quantitativa que correlaciona a massa do corpo de prova de concreto antes ( $M_s$ ) e após o ataque por ácido ( $M_f$ ) segundo a Equação.

$$PM (\%) = \left| \frac{(M_f - M_s)}{M_s} \right|$$

Onde,

PM - Perda de massa do concreto (%).

$M_s$  - Massa seca antes do ataque (g)

$M_f$  - Massa seca após o ataque (g)

Para os corpos de prova com proteção, o cálculo de perda de massa do concreto (PM) deve considerar a quantidade de proteção aplicada (PA) em cada corpo de prova. Os valores foram obtidos segunda a Equação modificada:

$$PM (\%) = \left| \frac{(M_f - M_s) + PA}{M_s} \right|$$

Onde,

PM - Perda de massa do concreto (%).

$M_s$  - Massa seca antes do ataque (g).

$M_f$  - Massa seca após o ataque (g).

PA – Quantidade de proteção aplicada (g).

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Nesse capítulo estão apresentados os resultados obtidos em cada um dos ensaios realizados: determinação da dosagem de referência e as aditivadas com cristalizante e com a substituição de 50% de cimento por pozolana classe E, avaliação de trabalhabilidade dos concretos frescos, resistência mecânica, módulo de elasticidade e absorção de água dos concretos endurecidos. Os concretos foram submetidos a ataque ácido e reavaliados quanto a absorção e resistência além das perdas de massa resultantes do ataque.

### **5.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS**

#### **5.1.1. Cimento**

O cimento utilizado foi o Portland de Alta Resistência Inicial por ser um produto sem índices variáveis de adições. O produto seguiu as recomendações da Norma Brasileira NBR16697 (ABNT, 2018) fabricado em abril de 2022 em Sete Lagoas, Minas Gerais. A amostra utilizada para confecção das dosagens apresentou massa específica de  $3,11 \text{ g/cm}^3$ , superfície específica de  $4541 \text{ cm}^2/\text{g}$ , início de pega de 156 minutos, final de pega de 216 minutos e resistência à compressão aos 7 dias de  $45,7 \text{ MPa}$ , segundo certificado de produção do fabricante.

A Tabela 11 apresenta o resultado dos ensaios de caracterização realizados para o cimento utilizado e a norma referente a cada ensaio.

Tabela 11 - Resultado Ensaio Caracterização Cimento

Ensaio		CPV – ARI
Índice de Finura Peneira 75 µm (NBR 11579)	(%)	1,86
Superfície específica - Blaine (NM76)	S (cm <sup>2</sup> /g)	4541
Expansibilidade (NBR 11582)	a (mm)	0

FONTE: Cimento Nacional - certificado abril/2022

A Tabela 12 apresenta resultados de ruptura a compressão do cimento CPV.

Tabela 12 - Resistência à compressão CPV

NBR 7215 (ABNT, 2019)	Idade (dias)					
	1		3		7	
	Resultado	Desvio padrão	Resultado	Desvio padrão	Resultado	Desvio padrão
Resistência à compressão (MPa)	27,7	2,3	38,7	1,2	45,7	1,9

FONTE: Cimento Nacional - certificado abril/2022

### 5.1.2. Material Pozolânico

O material pozolânico utilizado é uma pozolana de classe E. Esse material faz parte da composição do cimento CPIV do mesmo fabricante do CPV utilizado no concreto de referência. A Tabela 10 do item 4.1.2 mostra sua composição química com 85 % divididos em óxidos de Silício, Cálcio e Alumínio. A referência de substituição levou em conta o % que a NBR 16697 (ABNT, 2018) indica para a fabricação do CPIV.

### 5.1.3. Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado segue as determinações da NBR 7211 (2022) sendo a areia produzida artificialmente a partir da britagem de Gnaisse se classificando, segundo a norma, como média. O material extrapola apesar de ultrapassar os limites granulométricos é utilizável.

A Tabela 13 e Tabela 14 apresentam o resultado dos ensaios de caracterização realizados para a areia utilizada e a norma referente a cada ensaio. O material utilizado estava disponível para dosagens de concreto no laboratório experimental da Brennand e fazem parte de estoque antigo.

Tabela 13 - % Retida Acumuladas Peneiras ABNT Areia

<b>Peneira ABNT</b>	<b>Abertura Nominal (mm)</b>	<b>% Retida</b>	<b>% Retida Acumulada</b>
	4,8	0	0
	2,4	25	25
	1,2	21	46
	0,6	17	63
	0,3	11	74
	0,15	11	85
	Fundo	15	100

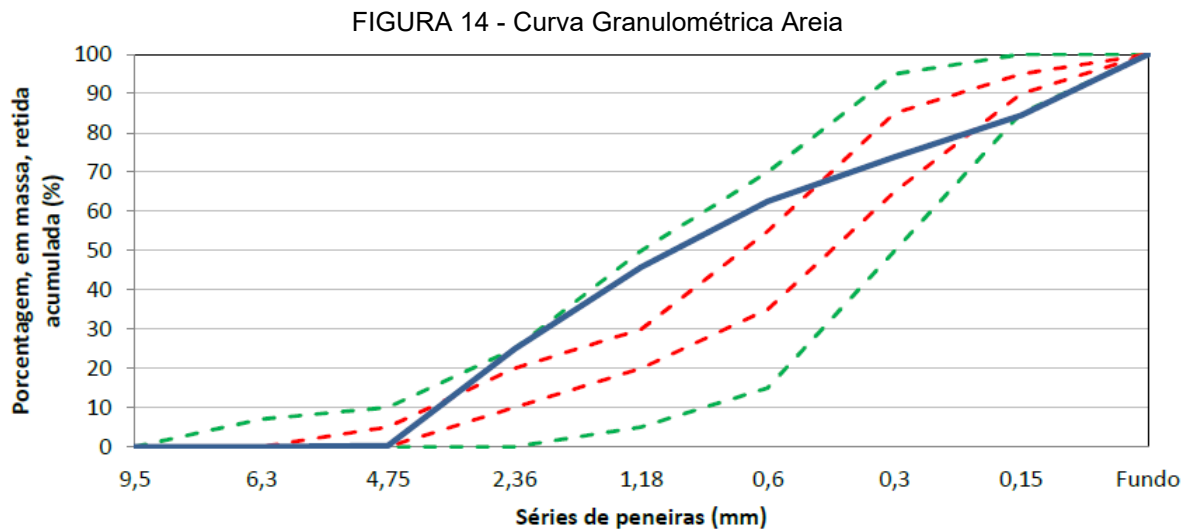
FONTE: Cimento Nacional - certificado 201.060 – dezembro/2020

Tabela 14 - Resultado Ensaio de Caracterização Areia

Ensaio	Areia artificial lavada média	Norma
Módulo de Finura	2,93	NBR 17054
Dim. Máxima Característica (mm)	4,75	NBR 17054
Massa Unitária (kg/m <sup>3</sup> )	1670	NBR 16972
Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	2630	NBR 16916

FONTE: Cimento Nacional - certificado 201.060 – dezembro/2020

O gráfico apresentado na FIGURA 14 apresenta a curva granulométrica obtida.



FONTE: Cimento Nacional - certificado 201.060 – dezembro/2020

#### 5.1.4. Agregado graúdo

O agregado graúdo também é originado do Gnaisse e classificado como brita 1. Ambos foram extraídos de reservas da região de Contagem, Minas Gerais. Da mesma forma que o agregado miúdo, o material utilizado estava disponível para dosagens de concreto no

laboratório experimental da Brennand e fazem parte de estoque antigo e não possui uma granulometria ideal, mas é utilizável.

A Tabela 15 e Tabela 16 apresentam o resultado dos ensaios de caracterização realizados para a areia utilizada e a norma referente a cada ensaio.

Tabela 15 - % Retida Acumuladas Peneiras ABNT Brita

<b>Peneira ABNT Abertura Nominal(mm)</b>	<b>% Retida</b>	<b>% Retida Acumulada</b>
31,5	30	0
25	0	0
19	12	12
12,5	71	83
9,5	13	96
6,3	3	99
4,8	0	99
2,4	0	99
Fundo	1	100

FONTE: Cimento Nacional - certificado 201.061 – dezembro/2020

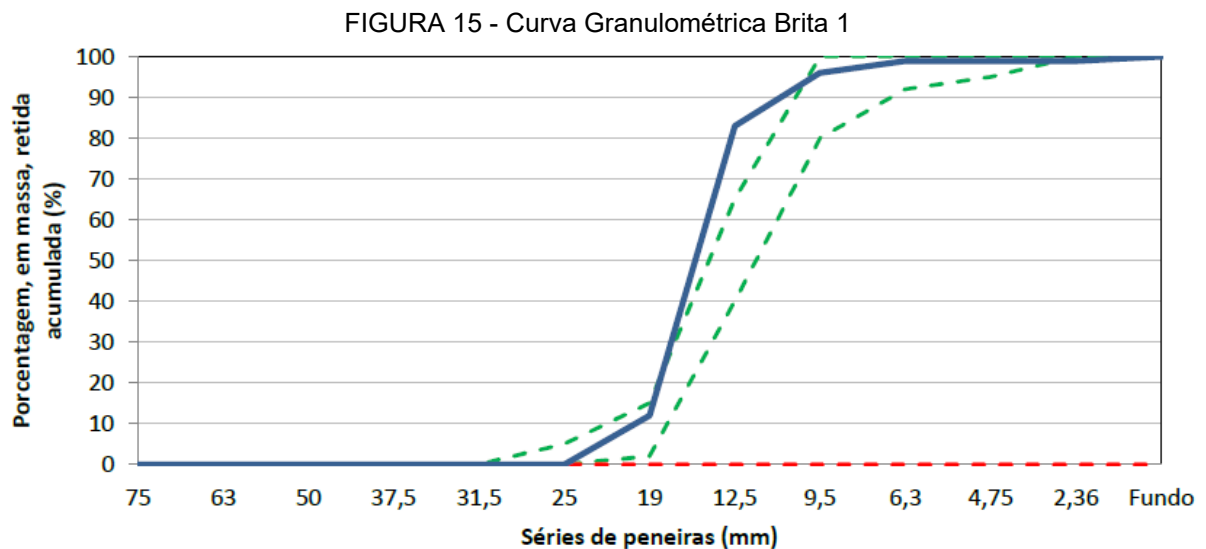


Tabela 16 -- Resultado Ensaio de Caracterização Brita

Ensaio	Brita 1	Norma
Módulo de Finura	7,02	NBR 7217
Dim. Máxima Característica (mm)	25	NBR 17054
Massa Unitária (kg/m <sup>3</sup> )	1420	NBR 16972
Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	2640	NBR 16917

FONTE: Cimento Nacional - certificado 201.061 – dezembro/2020

O gráfico apresentado na FIGURA 15 apresenta a curva granulométrica obtida.



FONTE: Cimento Nacional - certificado 201.061 – dezembro/2020

## 5.2. DOSAGENS E ENSAIOS

Foram produzidos corpos de prova para 04 dosagens de concreto sendo uma com cimento de alta resistência inicial (CPV), sem aditivo cristalizante e sem material pozolânico definida como referência, uma com substituição de 50% da quantidade de CPV por material pozolânico; duas com as mesmas dosagens, mas com adição de aditivo cristalizante na proporção que o fabricante recomenda, 0,8% sobre a massa do cimento e 0,8% sobre o

somatório das massas, no caso das amostras com material pozolânico. Os materiais separados e os corpos de prova produzidos estão ilustrados na FIGURA 16 e FIGURA 17.

FIGURA 16 - Materiais separados para dosagens



FONTE: desenvolvida pelo autor

FIGURA 17 - Corpos de prova confeccionados.



FONTE: desenvolvida pelo autor

A partir das características dos materiais disponíveis para elaboração do concreto, foram calculadas e determinadas a proporção dos demais constituintes. As características das dosagens estão indicadas na Tabela 17.

Tabela 17 - Dosagens dos materiais utilizados no concreto.

Dosagem	Concreto	CPV (kg/m <sup>3</sup> )	Pozolana (kg/m <sup>3</sup> )	Areia (kg/m <sup>3</sup> )	Brita 1 (kg/m <sup>3</sup> )	Água (l/m <sup>3</sup> )	Adit. Plast. (%)	Rel. A/C	Adit. Crist. (%)
1	Referência - CPV	382	0	821	1059	191	0,6	0,5	0
2	CPV+cristalizante	382	0	821	1059	191	0,6	0,5	0,8
3	CPV+pozolana	191	191	821	1059	191	0,6	0,5	0
4	CPV+poz+crist.	191	191	821	1059	191	0,6	0,5	0,8

FONTE: desenvolvida pelo autor

As dosagens de concreto foram avaliadas qualitativamente em estado fresco através do ensaio de abatimento de tronco de cone, Slump test, conforme procedimento da norma NBR 16889 (ABNT, 2020).

No estado endurecido as dosagens de concreto foram avaliadas quanto a resistência à compressão segundo a NBR 5739 (ABNT, 2018), índice de vazios e absorção de água em concreto endurecido, segundo a NBR 9778 (ABNT, 2005), Determinação da absorção de água por capilaridade, segundo a NBR 9779 (ABNT, 2012) e Módulo de Elasticidade aos 28 dias – NBR 8522-1 (ABNT, 2021).

### 5.3. CONCRETO FRESCO

Cada dosagem foi executada por 2 vezes em misturador de eixo vertical, FIGURA 18, com material para moldagem de 12 corpos de prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, cada dosagem, totalizando 24 corpos de prova.

FIGURA 18 - Misturador utilizado.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Os concretos, no estado fresco, foram submetidos a avaliação de trabalhabilidade pelo slump test que variou de 105 a 130 mm. Os resultados mostraram que o aditivo cristalizante não influencia na trabalhabilidade dos concretos uma vez que os valores obtidos estão dentro da variação do desvio padrão das dosagens sem aditivação. A utilização da pozolana elevou o abatimento em 6,5% em relação à dosagem de referência o que se explica pela manutenção da quantidade de água na dosagem e a diminuição do consumo de cimento em 50%, ou seja, se a pozolana não for considerada como parte do material aglomerante, o fator água/cimento se eleva para 1. Resultados na Tabela 18.

Tabela 18 - Resultado de abatimento segundo NBR16889 (ABNT,2020)

<b>Dosagem</b>	<b>Concreto</b>	<b>Abatimento (Slump test) - mm</b>
1	Referência - CPV	115 ± 14
2	CPV+cristalizante	110 ± 0
3	CPV+pozolana	123 ± 4
4	CPV+poz.+crist.	125 ± 7

FONTE: desenvolvida pelo autor

## 5.4. CONCRETO ENDURECIDO

São apresentados a seguir os resultados de resistência à compressão, módulo de elasticidade e absorção de água nas dosagens estudadas.

### 5.4.1. Resistência à compressão e módulo de elasticidade

A resistência do concreto é um elemento fundamental e estipulado no projeto estrutural e é a partir dela que se consegue avaliar a qualidade de todo concreto (NEVILLE, 2016). Para determinar a resistência à compressão foram usados os corpos de prova 10 x 20 cm, rompidos nas idades de 1, 7, 28 e 56 dias, de acordo com as prescrições da NBR 5739 (ABNT, 2018) que regula os procedimentos de ensaios de compressão.

Os ensaios para obtenção do módulo de elasticidade seguiram o item 7.3.1 da NBR 8522-1 (ABNT, 2021) Metodologia A – Tensão  $\sigma_a$  fixa. Foram feitas duas amostras por dosagem com 05 corpos de prova cada.

O objetivo da utilização do aditivo cristalizante é diminuir a permeabilidade do concreto à medida que há a formação de cristais fechando a porosidade. Dessa maneira, é previsto que o concreto ganhe resistência em uma inclinação maior da curva com idades mais avançadas devido à formação de cristais nos poros. Os resultados comprovaram esse aumento de resistência tardio quando comparado a amostra de referência sem aditivo, o resultado é 11% menor com 7 dias e com 28 dias já não apresenta diferença. Ambas as dosagens atingiram a resistência esperada para 28 dias. Foram considerados os resultados da média aritmética dos 3 resultados mais altos com desvio padrão abaixo de 4,0 MPa conforme indicado pela NBR 12655 (ABNT, 2021).

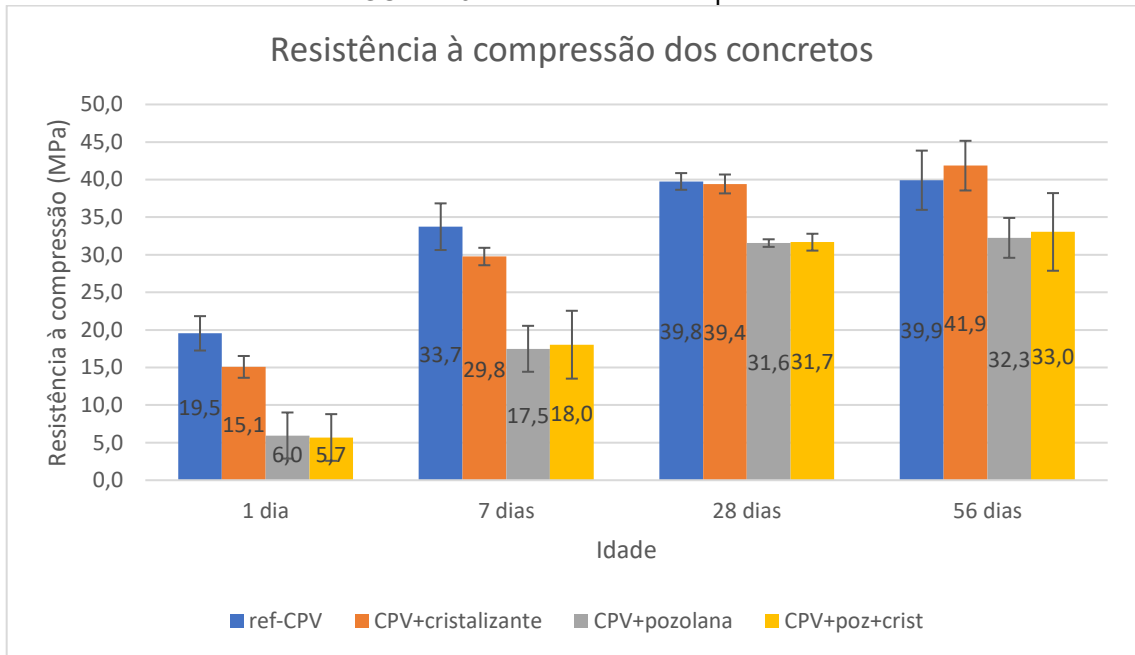
A adição de material pozolânico representou uma queda de 68% na resistência inicial em relação à dosagem somente com CPV o que é explicado pelo processo mais lento de cura da pozolona e da redução de capacidade aglomerante do cimento. Nas idades finais essa diferença já reduz para 20%. A adição de cristalizante conforme previsto, não sinalizou variação na resistência. Diferente das dosagens sem pozolana, a dosagem com aditivo cristalizante apresenta uma curva de crescimento de resistência semelhante à da dosagem

sem aditivação. Como foi adotada a mesma dosagem para ambas as referências, a substituição de 50% de cimento por material pozolânico proporcionou uma redução esperada uma vez que foi mantida a quantidade de água. Mesmo com a redução, de aproximadamente 20% na resistência aos 28 dias, os concretos com pozolana substituindo o cimento ainda ficaram acima do valor de resistência de 30 MPa considerado no cálculo de dosagem evidenciando que a substituição de cimento por pozolana não comprometeu a especificação do concreto quanto à resistência. O ganho tardio de resistência implica em cuidados adicionais na utilização desses concretos em obras: devem ser considerados tempos maiores para desforma e retirada do escoramento das peças de concreto armado. Sua utilização é mais recomendada em peças de infraestrutura.

No módulo de elasticidade, ao se considerar a variação de desvio-padrão dos resultados obtidos, não houve variação nos concretos com aditivo cristalizante, acompanhando a mesma tendência observada nos resultados de resistência à compressão. Nos concretos com pozolana, houve uma redução entre 10 e 16 % do módulo na comparação ao concreto de referência também condizentes com o resultado da resistência à compressão. Esses resultados permitem concluir que a utilização do aditivo cristalizante não exerce influência negativa nessas propriedades aos 28 dias e há tendência de curva de crescimento de resistência em idades mais avançadas confirmando que a formação dos cristais pode aumentar a resistência ao longo do tempo o que foi observado nos resultados apresentados por Takagi (2013).

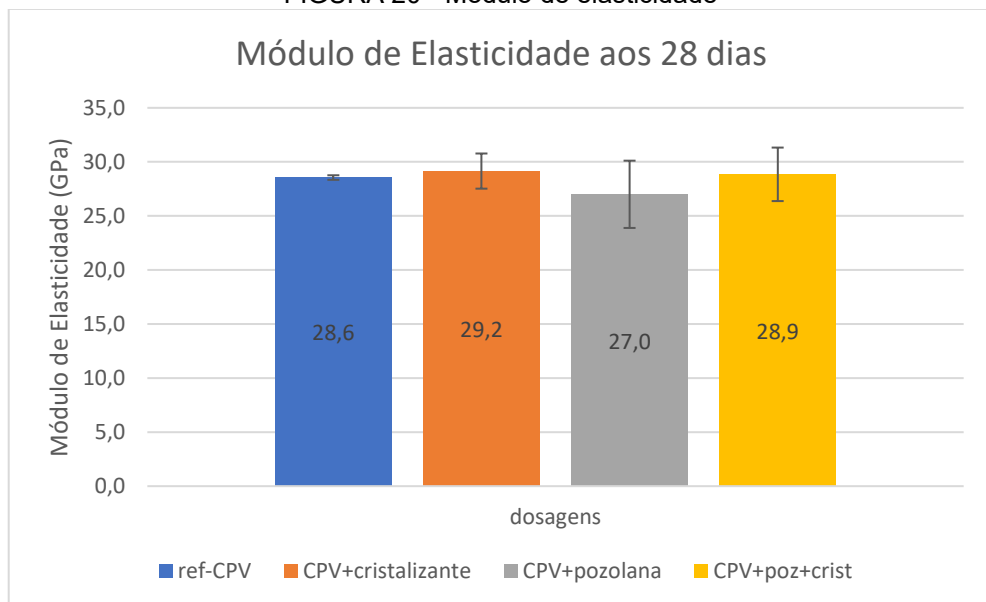
O resumo dos resultados está apresentado na FIGURA 19 e FIGURA 20.

FIGURA 19 - Resistência à compressão



FONTE: desenvolvida pelo autor.

FIGURA 20 - Módulo de elasticidade



FONTE: desenvolvida pelo autor

## 5.4.2. Absorção de água

A absorção de água do concreto foi avaliada através de dois métodos de ensaio normalizados: por imersão, segundo a NBR 9778 (ABNT, 2005) e por capilaridade, de acordo com a NBR 9779 (ABNT, 2012).

### 5.4.2.1. Absorção por capilaridade

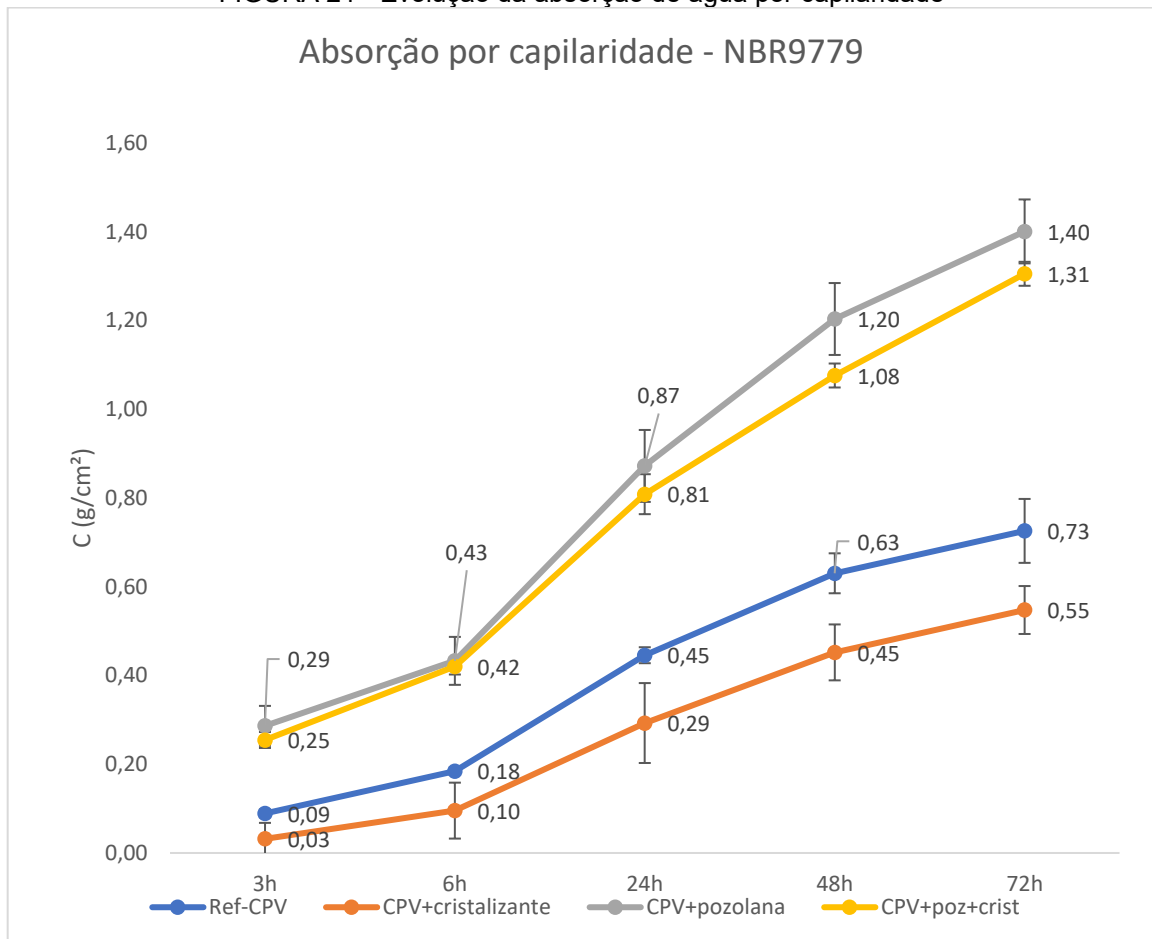
Para a determinação da absorção de água por capilaridade foi seguido o método estabelecido pela NBR 9779 (ABNT, 2012) através da ascensão capilar que consiste em quantificar a capacidade do concreto em absorver água devido à ascensão capilar.

Os corpos de prova, 02 de cada dosagem, foram retirados da cura aos 28 dias, procedendo-se a secagem em estufa pelo período de 36 horas e, após seu resfriamento em temperatura ambiente, foram obtidos os valores de massa seca. Os corpos de prova, então, foram colocados em contato com uma lâmina d'água de  $(5 \pm 1)$  mm acima de sua face inferior, e realizadas pesagens após os períodos de 3, 6, 24, 48 e 72 horas, contados a partir do primeiro contato dos corpos de prova com a lâmina d'água. A espessura da lâmina d'água foi mantida durante todo o ensaio, completando-se a água, sempre que necessário.

Os resultados das amostras produzidas com cimento CPV indicaram que a utilização do aditivo cristalizante contribuiu para a diminuição da absorção apresentando valores 24% mais baixos que a dosagem de referência. Já nas amostras produzidas com material pozolânico, a utilização do aditivo cristalizante resultou em uma redução de absorção de água de aproximadamente 6,5% quando comparada à amostra sem cristalizante. Os resultados confirmam a evolução de diminuição de permeabilidade dos concretos com cristalizante pela ação de formação dos cristais conforme indicado por Hodul et al. (2020) e por Ferrara et al (2016). As curvas de absorção de capilaridade mostram que há tendência de redução de absorção em maiores idades nos concretos com cristalizante e com pozolana evidenciando o poder de auto cicatrização dos concretos com esses materiais. Resultados na FIGURA 21.



FIGURA 21 - Evolução da absorção de água por capilaridade



FONTE: desenvolvida pelo autor.

#### 5.4.2.2. Absorção de água por imersão e determinação de índice de vazios

Para a determinação dos índices de vazios no concreto e de absorção de água por imersão foi seguido o método estabelecido pela NBR 9778 (ABNT, 2005).

Através dessa metodologia obteve-se a absorção de água por imersão (A) caracterizado pelo processo em que a água é conduzida e tende a ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido poroso considerado também o incremento de massa de um corpo sólido poroso devido à penetração de água em seus poros permeáveis, em relação à sua massa em estado seco (NBR 9778, ABNT, 2005).

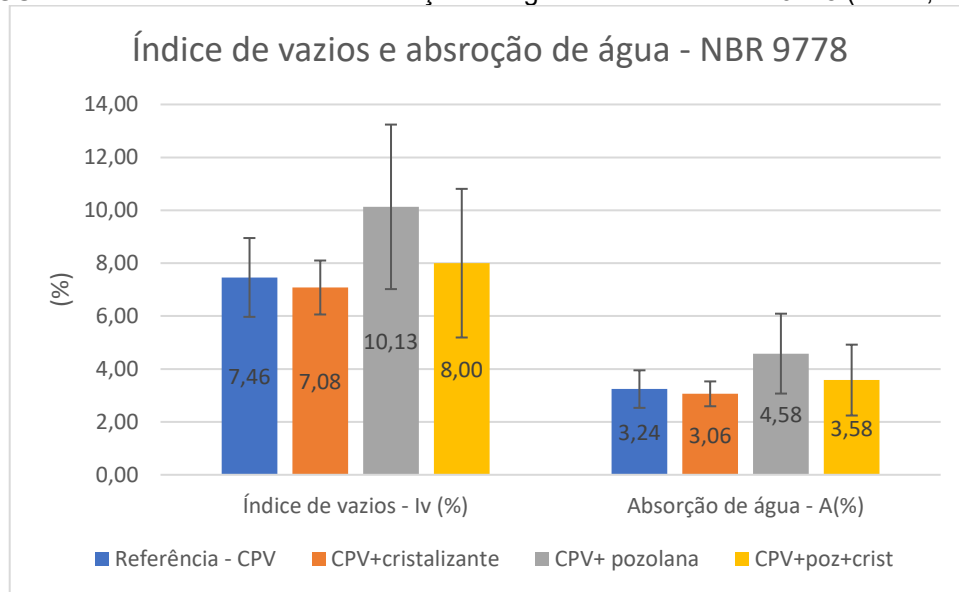
Obtêm-se também o índice de vazios ( $I_v$ ) - relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra; massa específica da amostra seca ( $\rho_s$ ) - relação entre a massa do material seco e o volume total da amostra, incluindo os poros permeáveis e impermeáveis; massa específica da amostra saturada ( $\rho_{sat}$ ): Relação entre a massa do material saturado o volume total da amostra, incluindo os poros permeáveis e impermeáveis; massa específica real ( $\rho_r$ ): Relação entre a massa do material seco e o seu volume, excluindo os poros permeáveis.

Para as amostras com cimento CPV, os resultados de 28 dias da dosagem com cristalizante mostram uma redução de 5% no índice de vazios e na absorção de água quando comparado à dosagem referência.

Para as amostras com material pozolânico houve um aumento de cerca de 10% na absorção de água quando comparadas à dosagem referência. A utilização do aditivo cristalizante indicou uma redução de aproximadamente 22% quando comparada a amostra com pozolana sem aditivação.

Assim como os resultados da absorção por capilaridade, o desempenho dos concretos com cristalizante nos ensaios de absorção por imersão confirmam a formação de cristais com fechamento da porosidade e diminuição do índice de vazios. O aditivo cristalizante também foi efetivo nos concretos com pozolana evidenciando que o seu poder de auto cicatrização combinado com o da pozolana. Essas dosagens, entretanto, apresentaram índices de vazios superiores 30% em média aos concretos sem pozolana o que explica o índice de absorção maior em 10%. A não proporcionalidade nessa diferença de resultados de índices de vazios e absorção evidencia que houve o fechamento da interligação de poros pela cristalização. Os resultados dos ensaios realizados estão apresentados na FIGURA 22.

FIGURA 22 - Índice de vazios e Absorção de água amostras – NBR 9778 (ABNT, 2005)



FONTE: desenvolvida pelo autor

## 5.5. ATAQUE POR ÁCIDO AOS CONCRETOS

Foi realizado ataque aos concretos por solução de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) 2,5%, por imersão, durante sete dias, FIGURA 23. O ataque realizado teve como principal objetivo simular um ataque acelerado ao concreto, para permitir uma comparação com os efeitos decorrentes de meios agressivos. Um corpo de prova de cada dosagem foi revestido com geopolímero para a eficácia dessa proteção ser averiguada, FIGURA 24.

FIGURA 23 - Corpo de prova 10x20cm imersos em solução de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) a 2,5%.



FONTE: desenvolvida pelo autor

FIGURA 24 - Corpos de prova revestidos com geopolímero.



FONTE: desenvolvida pelo autor

## 5.6. INSPEÇÃO VISUAL DOS CORPOS DE PROVA

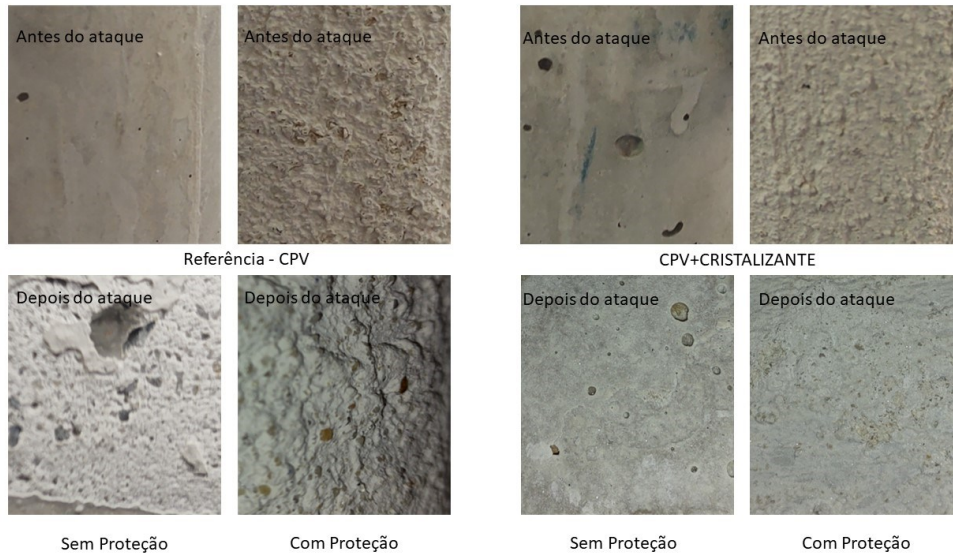
A degradação superficial dos concretos foi avaliada através de inspeção visual de corpos de prova, antes e após ataque químico, permitindo visualizar a falta de coesão da pasta e seu esfarelamento, em função da degradação provocada pelo ácido sulfúrico, assim como a minimização dos efeitos desta agressividade, obtida através da proteção superficial com geopolímero em todos os concretos.

O concreto de referência foi o mais afetado com aumento da porosidade, esfarelamento de pasta com percepção visual e tátil. O cristalizante amenizou a degradação com percepção de mudança de tonalidade da pasta, percepção tátil menor de esfarelamento. Essa avaliação se repetiu nos concretos com pozolana sendo a amostra com cristalizante com percepção de conservação de sua integridade tanto visual como tátil.

Em todas as amostras, a camada de proteção de geopolímero minimizou a degradação da estrutura do concreto dos corpos de prova. A inspeção visual e tátil mostrou desgastes da camada protetora sem atingir o substrato de concreto. Houve esfarelamento e desprendimento da camada sem deterioração visual do concreto.

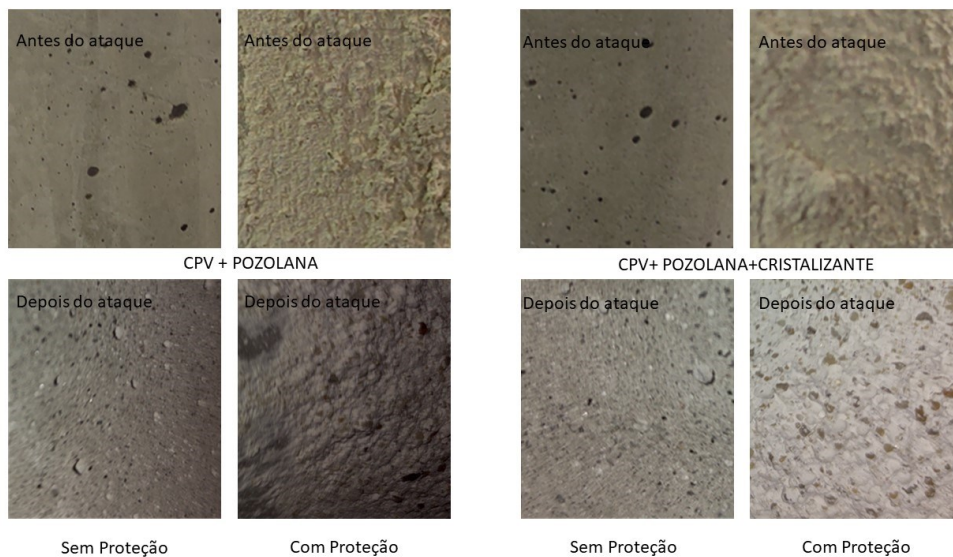
A FIGURA 25 e FIGURA 26 apresentam os corpos de prova antes e depois do ataque por ácido, visualmente percebe-se a deterioração da matriz de argamassa em maior grau nas dosagens sem cristalizante principalmente na referência que também não possui material pozolânico. Nas amostras com proteção de geopolímero, nota-se que há degradação da superfície de proteção sem afetar a matriz de argamassa. Nas amostras com material pozolânico a proteção mecânica chegou a se desprender em alguns pontos.

FIGURA 25 - Amostras antes e depois do ataque ácido – Referência e CPV+Cristalizante (imagens ampliadas digitalmente 250%)



FONTE: desenvolvida pelo autor

FIGURA 26 - Amostras antes e depois do ataque ácido – CPV+pozolana e CPV+Pozolana+Cristalizante (imagens ampliadas digitalmente 250%).



FONTE: desenvolvida pelo autor

## 5.7. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS APÓS O ATAQUE

Em função da degradação da matriz cimentícia, era esperada a queda da resistência à compressão em todos os concretos após o ataque. A expectativa foi confirmada com um

decréscimo de resistência nos concretos após ataque ácido de 12,3% no concreto de referência e de 8,3% no concreto com aditivo cristalizante. Nos concretos com material pozolânico o desempenho se repetiu com uma perda de 17,2% no concreto sem cristalizante e de 10,5% no concreto com cristalizante. Os menores índices de queda nas amostras com cristalizantes mostram que a atuação do aditivo diminuindo a permeabilidade com a formação de cristais colabora com a menor incidência da ação do agente agressivo na degradação da matriz.

Apesar da inspeção visual indicar que a matriz cimentícia aparentemente não havia sido afetada pela ação do ácido, houve perda de resistência em menor grau. Quando comparadas às amostras não protegidas observou-se um acréscimo de resistência de 1,9% no concreto de referência, 2,9% no concreto com cristalizante, 8% no concreto com pozolana e 6,6% no concreto com pozolana e cristalizante. Esses resultados, qualitativamente, indicam que a proteção com geopolímero tem uma atuação na conservação da integridade dos concretos quanto à exposição ao ácido sulfúrico. Os resultados obtidos de resistência à compressão do concreto de referência e dos demais concretos antes e após ataque por ácido sulfúrico são apresentados na Tabela 19 e FIGURA 27.

Tabela 19 - Resistência à compressão aos 56 dias nos concretos antes e após ataque ácido.

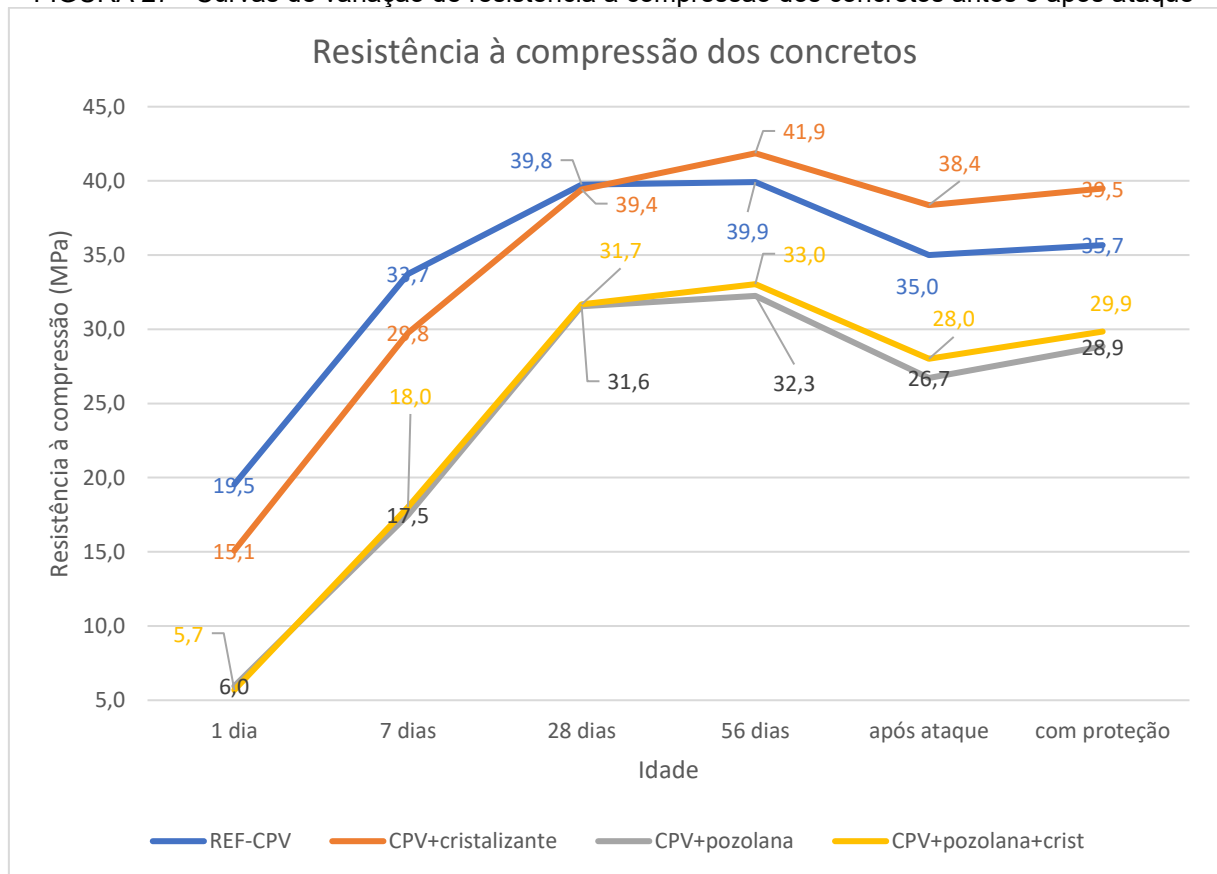
Dosagem	Concreto	Proteção geopolímero	Resistência à compressão após 56 dias (MPa)	
			Antes Ataque	Após Ataque
1	Referência - CPV	Sem proteção	39,92	35,00
		Com proteção		35,66
2	CPV+cristalizante	Sem proteção	41,86	38,37
		Com proteção		39,49
3	CPV+pozolana	Sem proteção	32,25	26,71
		Com proteção		28,85
4	CPV+poz.+crist.	Sem proteção	33,04	28,01
		Com proteção		29,85

FONTE: desenvolvida pelo autor

A FIGURA 27 mostra que a curva de crescimento dos concretos com cristalizante e pozolana é interrompida pelo ataque ácido, entretanto há uma queda menor no concreto com cristalizante, 3,5 MPa e 5,0 MPa, quando comparadas às amostras sem aditivação evidenciando o desempenho quanto à durabilidade do concreto. A utilização da proteção

mecânica com geopolímero contribui com a resistência do concreto minimizando as perdas quando comparados aos concretos sem cristalizantes e sem proteção.

FIGURA 27 - Curvas de variação de resistência à compressão dos concretos antes e após ataque



FONTE: desenvolvida pelo autor

## 5.8. INFLUÊNCIA DA ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS CONCRETOS ANTES E APÓS ATAQUE COM ÁCIDO

Os resultados obtidos nos ensaios de absorção de água aos 56 dias e índice de vazios segundo a NBR 9778 (ABNT, 2005), antes e após ataque por ácido sulfúrico, são apresentados na Tabela 20.



Tabela 20 - Absorção de água e índices de vazios antes e após ataque com ácido

Dosagem	Concreto	Proteção geopolímero	Absorção (%)		Índice de Vazios (%)	
			Antes Ataque	Após Ataque	Antes Ataque	Após Ataque
1	Referência - CPV	Sem proteção	3,24	5,35	7,46	12,09
		Com proteção		5,15		11,49
2	CPV+cristalizante	Sem proteção	3,06	5,23	7,08	11,76
		Com proteção		4,28		9,64
3	CPV+pozolana	Sem proteção	4,58	9,28	10,13	19,11
		Com proteção		8,55		17,99
4	CPV+poz.+crist.	Sem proteção	3,58	8,91	8,00	19,02
		Com proteção		8,37		18,03

FONTE: desenvolvida pelo autor

Os resultados obtidos nos ensaios de absorção após ataque permitem verificar que há uma diminuição de absorção de água no concreto com cristalizante de 2,2% quando comparado com o concreto de referência. Para os concretos com material pozolânico, a utilização do cristalizante resultou numa redução de absorção após ataque de 4,0% em relação à amostra sem aditivação. O desempenho da proteção mecânica com geopolímero também foi eficiente reduzindo em 3,7% no concreto de referência, 18% no concreto com cristalizante, 7,9% no concreto com pozolana e 6,0% no concreto com pozolana e cristalizante. O desempenho se repetiu para o índice de vazios.

Conforme evidenciado por Neville (2016), concretos com índice de absorção menores que 10% são considerados de boa qualidade. Todos os concretos haviam apresentados resultados abaixo desse valor antes de serem submetidos ao ataque ácido. Os ensaios de absorção realizados após o ataque ácido confirmaram a afirmação de Neville pois houve um aumento na absorção acima de 70 %, mas todas as amostras continuaram com índices inferiores ao considerado ideal para concreto durável, 10%. A menor absorção nos concretos com cristalizante reforça a manutenção dos quesitos de durabilidade do concreto. A aplicação de proteção com geopolímero colabora com o aumento da vida útil do concreto por constituir uma barreira quanto à penetração e ação dos sulfatos na matriz cimentícia.

## 5.9. PERDAS DE MASSA DOS CONCRETOS

O resultado das perdas de massa pelo ataque por ácido nos concretos com e sem proteção são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Perdas de massa por ataque ácido

Dosagem	Concreto	Proteção geopolímero		Massa seca (g)		Perdas de massa - PM (%)
		Aplicada PA (g)		Antes Ataque (M <sub>s</sub> )	Após Ataque (M <sub>f</sub> )	
1	Referência - CPV	Sem proteção	0	3575	3514	1,71
		Com proteção	52	3640	3574	0,38
2	CPV+cristalizante	Sem proteção	0	3547	3501	1,30
		Com proteção	44	3654	3598	0,33
3	CPV+pozolana	Sem proteção	0	3409	3287	3,58
		Com proteção	53	3573	3480	1,12
4	CPV+poz.+crist.	Sem proteção	0	3434	3344	2,62
		Com proteção	51	3384	3322	0,33

FONTE: desenvolvida pelo autor

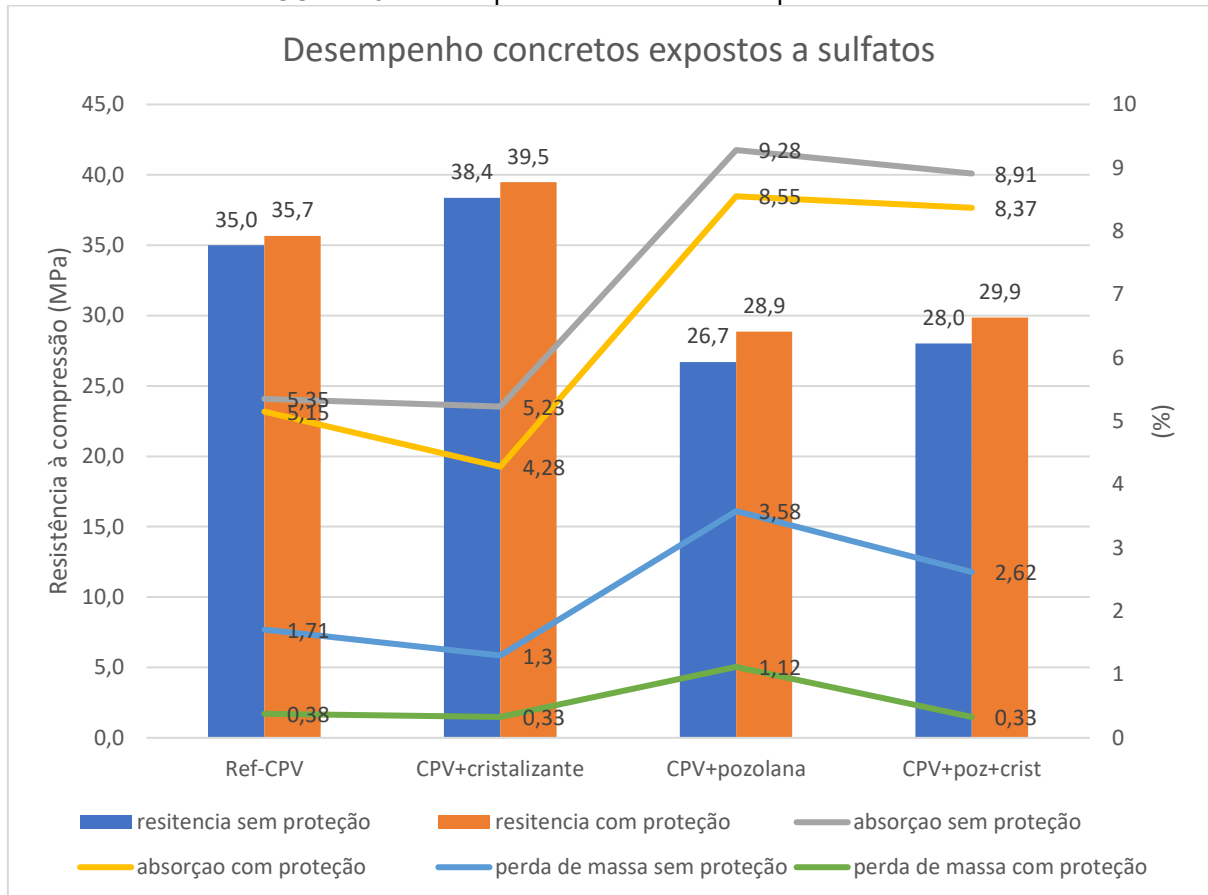
A análise do resultado permite verificar que a proteção mecânica com geopolímero reduziu as perdas de massa do concreto de referência em 77% e em 75% no concreto com cristalizante. Observa-se também que o concreto com cristalizante apresentou uma redução de perdas de massa de 24% quando comparado ao concreto de referência. Esse desempenho se repetiu no concreto com pozolana com uma redução de perda de 26,8%. Nos concretos com pozolana a proteção com geopolímero também apresentou bom desempenho reduzindo as perdas em 69% no concreto sem cristalizante e 87,4% no concreto cristalizante.

As reduções de perdas de massa demonstraram que a utilização de aditivo cristalizante, ao diminuir o índice de absorção reduzindo a permeabilidade do concreto pelo fechamento das interligações entre os poros e redução das suas dimensões pela formação dos cristais de cálcio, colabora com a durabilidade do concreto. A ação do aditivo reduz a penetração do ácido no concreto minimizando sua degradação quando submetido à exposição. A presença dos silicatos, cálcio e alumínio da pozolana também contribui para a cicatrização dos poros de concreto, pois induz a maior formação de cristais já que esses elementos reagem com o cristalizante segundo Takagi (2013).

A utilização combinada com a proteção com geopolímero se mostra ainda mais eficaz para o aumento da vida útil das estruturas submetidas a ambientes com exposição severa, pois em todas os concretos ela colaborou para reduções de perdas de massa na ordem de 70%.

A FIGURA 28 mostra a compilação dos resultados dos concretos expostos a sulfatos quanto à resistência, absorção e degradação destacando que o desempenho do concreto de referência foi satisfatório atendendo todos os parâmetros para que foi calculado. A aditivação com cristalizante resultou na elevação do desempenho. A utilização da pozolana em substituição do cimento não comprometeu o desempenho da especificação inicial referenciada. O geopolímero corroborou com a ampliação do nível de proteção dos concretos.

FIGURA 28 - Desempenho dos concretos expostos a sulfatos



FONTE: desenvolvida pelo autor.

## 6. CONCLUSÃO

Este trabalho comprova que a utilização de aditivos cristalizantes tanto em concretos produzidos com cimento sem adições quanto em concretos com adição de material pozolânico melhora o desempenho do concreto exposto a sulfatos e apresenta resultados ainda melhores quando utilizado em conjunto com camada protetora de geopolímero.

Todos os concretos estudados apresentaram resistência superior a 30 MPa, valor estabelecido como parâmetro de referência e absorção por imersão abaixo de 10% sendo, portanto, classificados como concretos duráveis. Os concretos com aditivo cristalizante apresentaram crescimento tardio de resistência à compressão com valores 12% abaixo da referência aos 7 dias, igualando aos 28 dias e superiores em 5% aos 56 dias. Os resultados de módulo de elasticidade tiveram resultados similares. Essa tendência de curva de

crescimento de resistência em idades mais avançadas confirma que a formação dos cristais pode aumentar a resistência ao longo do tempo. A absorção por capilaridade e imersão, bem como índices de vazios comprovaram que a ação do aditivo reduz a interligação entre os poros do concreto e reduz os diâmetros uma vez que os concretos aditivados apresentaram diminuição de absorção de 5 a 20 % quando comparados aos concretos não aditivados além da curva de índice de absorção por capilaridade manter uma diferença entre 0,10 e 0,20 com o passar do tempo evidenciando o desenvolvimento do processo de cristalização.

Os resultados da exposição a sulfatos mostraram que os concretos sem proteção sofreram desgaste superficial da matriz cimentícia com desagregação em sua superfície identificados pela inspeção visual. Os resultados obtidos em corpos de provas, antes e após ataque, demonstraram que os concretos com cristalizante conservam as propriedades que elevam sua durabilidade pois apresentaram resistências cerca de 10 % maiores, absorção entre 2 e 4 % menores e perdas de massa também por volta de 25 % menores.

A avaliação da proteção foi obtida mediante a comparação de corpos de prova através da inspeção visual, pela avaliação de perdas de massa e de absorção. Visualmente a matriz cimentícia de todas as amostras estavam íntegras; a resistência, quando comparadas às amostras sem proteção, foram de 2 a 8 % maiores e houve redução da absorção entre 3 e 18 %. Quanto às perdas de massa, a redução foi muito significativa na ordem de 70% em todas as amostras.

Este estudo, ao verificar o desempenho dos concretos com cristalizantes expostos a sulfatos, demonstra que a utilização de cristalizantes corrobora para o aumento da durabilidade dos concretos e, por consequência, diminui os custos de manutenção de estruturas de concreto armado uma vez que promove a redução da permeabilidade de concreto e da penetração dos agentes agressivos. Os bons resultados nos concretos com substituição de pozolana demonstraram que a combinação com o cristalizante contribui com a redução do consumo de cimento atendendo aos requisitos contemporâneos de durabilidade e sustentabilidade das construções.

## REFERÊNCIAS

ABREU, F.S. Análise da durabilidade de concreto leve de argila expandida com camada protetora submetido a meio agressivo ácido. 2014. 57 f. **Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia**, Belo Horizonte/MG.

ABREU, F. S. Concreto reforçado com fibras de carbono submetido a ataque por ácido clorídrico. 2021. 156 f. – 2021. **Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia**, Belo Horizonte/MG.

ABREU F. S., RIBEIRO C., C., PINTO J., D., S., OLIVEIRA D., M., RIBEIRO S., E., C., FIGUEIREDO E., J., P., Análise da eficiência da tinta de base epoxídica na proteção do concreto leve com argila expandida contra o ataque por ácido sulfúrico, **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 3, 11p. fev. 2020.

AGUIAR, J.E. Avaliação dos Ensaio de Durabilidade do Concreto Armado a partir de Estruturas Duráveis. 2006. 173 f. **Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia**, Belo Horizonte/MG.

ALMUSALLAM, A.A.; KHAN, F.M.; DULAIJAN, S.U.; B.AL-AMOUDI, O.S. Effectiveness of surface coatings in improving concrete durability. **Cement & Concrete Composites**, n. 25, p.473-481, 2003.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, Detroit. ACI212.3R16; **Report on Chemical Admixtures for Concrete**. Detroit, 2016. 6p.

AMIN M.N., HISSAN S., SHAHZADA K., KHAN K., BIBI T. - Pozzolanic Reactivity and the Influence of Rice Husk Ash on Early-Age Autogenous Shrinkage of Concrete. **Front. Mater.**,2019, 6:150.

ANDRADE, W. P. Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades. **Equipe de FURNAS, Laboratório de Concreto**. São Paulo: Pini,1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR-3310-1; **Peneiras de Ensaio - Requisitos Técnicos e Verificação - Parte "I Peneiras de Ensaio com Tela de Tecido Metálico (Lso 3310-1 :2000, Idt)**. Rio de Janeiro, 2018. 20p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR-5738; **Concreto - Procedimento para Moldagem e Cura de Corpos de Prova**. Rio de Janeiro, 2015. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR-5739; **Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR-6118; **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014. 256p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR-7211; **Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 2022. 10p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR-7215; **Cimento Portland - Determinação da Resistência à Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2019. 12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR-8522-1; **Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação Parte 1: Módulos estáticos à compressão**. Rio de Janeiro, 2021. 24p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR-9575; **Impermeabilização - Seleção e Projeto**. Rio de Janeiro, 2010. 14p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR-9778; **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2005. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR-9779; **Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade**. Rio de Janeiro, 2012. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR-11579; **Cimento Portland — Determinação do Índice de Finura por meio da Peneira 75 µm (Nº 200)**. Rio de Janeiro, 2012. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR-11582; **Cimento Portland - Determinação da Expansibilidade Le Chatelier** Rio de Janeiro, 2016. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR-11768-1; **Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2019. 27p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR-12653; **Materiais pozolânicos — Requisitos**. Rio de Janeiro, 2014. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR-12655; **Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento**. Rio de Janeiro, 2022. 22p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR-16697; **Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018. 12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR-16889; **Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 2020. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR-16916; **Agregado Miúdo - Determinação da Densidade e da Absorção de Água**. Rio de Janeiro, 2021. 7p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR-16917; **Agregado Graúdo - Determinação da Densidade e da Absorção de Água**. Rio de Janeiro, 2021. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR-16972; **Agregados - Determinação da Massa Unitária e do Índice de Vazios**. Rio de Janeiro, 2021. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR-17054; **Agregados - Determinação da Composição Granulométrica - Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, 2022. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NM-76; **Cimento Portland - Determinação da Finura pelo Método de Permeabilidade ao Ar (Método de Blaine)**. Rio de Janeiro, 1996. 13p.

BASSUONI, M. T.; NEHDI M.L. Resistance of self-consolidating concrete to sulfuric acid attack with consecutive pH reduction. **Cement and Concrete Research**, 2007, Vol 37 pp. 1070–1084. DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.04.014

BERTOLINI, L. **Materiais de construção – patologia, reabilitação e prevenção**. São Paulo: Editora Oficina de textos, 2010.

CHERT-MATERIAIS DIDÁTICOS. 2023. Disponível em <https://didatico.igc.usp.br/rochas/sedimentares/chert>. Acesso em 28 jun. 2023.

CIMENTO NACIONAL – **Caracterização de Agregados Miúdos: areia – 201.060** – Sete Lagoas, MG – dezembro, 2020.

CIMENTO NACIONAL – **Caracterização de Agregados Graúdos: brita 9,5/25 – 201.061** – Sete Lagoas, MG – dezembro, 2020.

CIMENTO NACIONAL - **Certificado de Análise – Pozolana** – Sete Lagoas, MG – maio, 2022.

CIMENTO NACIONAL - **Certificado de ensaios em cimento – CPV ARI MAX** – Sete Lagoas, MG – abril, 2022.



COSTA, L.M. Influência da pozolanicidade na ativação alcalina. 2020. 120 f. **Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia**, Belo Horizonte/MG.

FERRARA, Liberato ; KRELANI, Visar ; MORETTI, Fabio - On the use of crystalline admixtures in cement based construction materials: from porosity reducers to promoters of self healing - **Smart Materials and Structures**, 2016, Vol.25(8), p.084002 (17pp) – [DOI: 10.1088/0964-1726/25/8/084002](https://doi.org/10.1088/0964-1726/25/8/084002)

GOJEVIĆ, A.; DUCMAN, V.; GRUBEŠA, I.N.; BARIČEVIĆ, A.; PEČUR, I.B. The Effect of Crystalline Waterproofing Admixtures on the Self-Healing and Permeability of Concrete. **Materials** 2021, 14, 1860.

HELENE, Paulo; GUIGNONE, G; VIEIRA, G; RONCETTI, L; MORONI, F – Avaliação da Penetração de Cloretos e da Vida Útil de Concretos Autocicatrizantes ativados por Aditivo Cristalizante – **Revista Ibracon**, 11 (03), 2018 – [DOI: 10.1590/S1983-41952018000300007](https://doi.org/10.1590/S1983-41952018000300007)

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI, 349p.,1993.

HODUL, J; ŽIŽKOVÁ, BORG, R.P. - The Influence of Crystalline Admixtures on the Properties and Microstructure of Mortar Containing By-Products. **Buildings**, 2020, Vol.10, 146. – DOI: 10.3390/buildings10090146

LAFIN, M.K. Impermeabilização de Estação de Tratamento de Efluentes de Concreto Armado com Cimento CP-IV, Utilizando Silicato Bioquimicamente Modificado. 2015. 28 f. **Artigo apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Patologia nas Obras Civis, pelo Curso de Especialização em Patologia nas Obras Civis da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS**, São Leopoldo/RS.

MEHTA, P.K; MONTEIRO, P. J. M. – **Concreto Microestrutura, Propriedades de Materiais** – 2ª ed. N. P. Hasparyk – Ibracon SP, 782p., 2014.

NASIM M., DEWANGAN U.K., DEO S.V. - Autonomous healing in concrete by crystalline admixture: A review. **Materials Today: Proceedings**, 2020, Vol.32, 638-644.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. Tradução: Ruy Alberto Cremonini. - 5. ed. – Porto Alegre: Bookman,523 p., 2016.

OLIVEIRA C.D. Estudo da Penetração de Cloretos em Compósitos Cimentícios Produzidos com Aditivos Redutores de Permeabilidade por Cristalização Capilar. 110 p. **Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia**, Belo Horizonte, 2018.

PAIVA, M.V.; CARVALHO, C. M.; SIMAS, T. B. Geopolímeros: Uma revisão das características e aplicações na construção civil. In: **Congresso Araguaense de Ciências Exata, Tecnológica e Social Aplicada**, p. 1-11, 2020, Santana do Araguaia. Anais... Santana do Araguaia: II CONARA, 2020.

PARKER C. The corrosion of concrete. **Australian Journal of Experimental Biology and Medical Science**. 1945; 23(2): p. 81-90. DOI: 10.1038/icb.1945.13.

PENETRON. FT044 – Penetron ARC. **FTP – Ficha Técnica de Produto**, rev. 07, Lorena/SP 20/05/2022, p. 1-2.

PENETRON BRASIL **Rumo ao Concreto de Carbono Zero**. Lorena, São Paulo, 2023. 12p. Manual.

PINTO, J.D.S. Análise da influência de superfícies protetoras na durabilidade do concreto para uso em meio agressivo: uma abordagem topográfica e da estrutura do material. 2006. 114 f. **Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia**, Belo Horizonte/MG.

RAHHAL, V.; BONNAVETTI, V.; TRUSILEWICZ, L.; PEDRAJAS, C.; TALERO, R. Role of the filler on Portland cement hydration at early ages. **Constr. Build. Mater**. 2011, 27, 82–90.

REITERMAN, P.; DAVIDOVÁ, V.; PAZDERKA, J.; KUBISSA, W. Reduction of concrete surface permeability by using crystalline treatment. **Rev. Româna Mater. Rom. J. Mater**. 2020, 50, 69–74.

RIBEIRO, C. C.; PINTO, J.D.S.; STARLING, T. - **Materiais de Construção Civil**, 4ª ed. Revisada. Editora UFMG, 103p., 2013.

ROIG-FLORES, M ; PIRRITANO, F ; SERNA, P ; FERRARA, L - Effect of crystalline admixtures on the self-healing capability of early-age concrete studied by means of permeability and crack closing tests - **Construction & building materials**, 01 July 2016, Vol.114, pp.447-457 – DOI:[10.1016/j.conbuildmat.2016.03.196](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.196)

SILVA, M.G.; BATTAGIN, A.F.; GOMES, V. - Cimentos Portland com adições minerais. In: ISAIA, G. C. (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais** – 3ª ed. – volumes 1 e 2. São Paulo: Editora Ibracon 2017.

SOUZA, V. C.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: PINI, 262p., 1998.

SOTERIO, A. D. Estudo de Mecanismo de Inibição da Reação Álcalis-Agregado e de Autocicatrização em Concreto – **Projeto para Dissertação de mestrado - Universidade do Extremo Sul Catarinense UNESC**, Criciúma, SC, 2020.

TAKAGI, E. et al. Antibiose e Estanqueidade do Concreto com o Uso de Aditivo Cristalino Antimicrobiano para Estruturas de Saneamento. **Revista Concreto e Construções - Ibracon**, ano 49, ed. 102, abr-jun. 2021, p. 69 – 75. DOI: 10.4322/1809-7197.2021.102.0004.

TAKAGI, E. M. Concretos Autocicatrizantes com Cimentos Brasileiros de Escória de Alto-forno ativados por Catalisador Cristalizante. 2013. 130 f. **Dissertação de Mestrado em Engenharia de Infraestrutura Aeroportuária – Instituto Tecnológico de Aeronáutica**, São José dos Campos/SP.

WU, L.; HU, C.; LIU, W. V. The Sustainability of Concrete in Sewer Tunnel – A Narrative Review of Acid Corrosion in the City of Edmonton, Canada. **Sustainability**. v.10, 517, 2018. DOI: 10.3390/su10020517.

ZACCARDI, Y.A.V.; ALDERETE, N. M.; SERNA, P.; DE BELIE, N. – Improved model for capillary absorption in cementitious materials: Progress over the fourth root of time – **Cement and Concrete Research**, 14 July 2017, Vol.100, pp.153-165 – DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.07.003