



**CENTRO UNIVERSITÁRIO CHRISTUS  
NÚCLEO DE TECNOLOGIA  
ENGENHARIA CIVIL**

**MARIO ALEX DE ANDRADE BATISTA**

**USO DA BORRA DE CAFÉ NO CONCRETO PARA CONTROLE DE ATAQUES  
POR CLORETOS E PROCESSO DE CARBONATAÇÃO**

**FORTALEZA**

**2020**

MARIO ALEX DE ANDRADE BATISTA

USO DA BORRA DE CAFÉ NO CONCRETO PARA CONTROLE DE ATAQUES  
POR CLORETOS E PROCESSO DE CARBONATAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)  
apresentado ao curso de Engenharia Civil  
do Centro Universitário Christus, como  
parte das exigências para obtenção do  
título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Elayne Valério  
Carvalho.

FORTALEZA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Centro Universitário Christus - Unichristus  
Gerada automaticamente pelo Sistema de Elaboração de Ficha Catalográfica do  
Centro Universitário Christus - Unichristus, com dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B333 BATISTA, Mario.  
USO DA BORRA DE CAFÉ NO CONCRETO PARA  
CONTROLE DE ATAQUES POR CLORETOS E PROCESSO DE  
CARBONATAÇÃO / Mario BATISTA. - 2020.  
50 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Centro  
Universitário Christus - Unichristus, Curso de Engenharia Civil,  
Fortaleza, 2020.  
Orientação: Profa. Dra. Elayne Valério Carvalho.

1. Borra de café. 2. Concreto. 3. Carbonatação. 4. Cloretos. 5.  
Adições. I. Título.

CDD 624

MARIO ALEX DE ANDRADE BATISTA

USO DA BORRA DE CAFÉ NO CONCRETO PARA CONTROLE DE ATAQUES  
POR CLORETOS E PROCESSO DE CARBONATAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)  
apresentado ao curso de Engenharia Civil  
do Centro Universitário Christus, como  
parte das exigências para obtenção do  
título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Profa. Dra. Elayne Valério  
Carvalho

Aprovada em \_\_/\_\_/\_\_

BANCA EXAMINADORA

---

Profa. Dra. Elayne Valério Carvalho  
Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS)

---

Prof. Ma. Mariana de Araújo Leite  
Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS)

---

Prof. Me. Kalil Nobrega Hissa Sampaio  
Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Deus pelo dom da vida e por me dar forças nos dias mais difíceis.

Aos meus pais Batista e Edna, meu irmão Elexandro, que sempre nos dias mais árduos, mais frustrantes sempre foram umas das principais peças a me motivar e me fazer continuar na faculdade, por meio do afeto, da dedicação irrestrita, da paciência, do apoio financeiro e da formação do meu caráter. Não tenho palavras para agradecer ou para retribuir tal dedicação a mim. À eles dedico e dedicarei todas minhas vitórias e conquistas da minha vida.

À minha noiva Lavina, pois se não fosse ela o ingresso nesse curso não teria acontecido, sempre esteve ao meu lado desde antes da entrada no meu percurso acadêmico e permanece agora no final, sempre nos altos e baixos da minha vida, sendo ela umas pessoas que mais me motivou nos momentos que pensei em desistir, nos quais não foram poucos. Sou eternamente grato à sua força e confiança em mim depositados, sempre acreditando no meu potencial mesmo eu mesmo duvidando de tal. Obrigado por ser essa grande parceira, sem você teria sido tudo mais difícil.

A todos os companheiros de graduação, em especial a Ana Carolina, Antônio Wemerson Carlos Magno, Cláudia Mariana, Dara Nascimento, João Victor Monteiro, João Vitor Sousa, Lázaro Farias, Nayara Gurjão, Tim Lucas e Yuri Torquato.

Aos integrantes do NPT, em especial ao Lindomar e ao César Bündchen, que contribuíram para o meu crescimento e a desenvoltura do meu TCC, sem a dedicação de cada um, não teria sido possível a realização do meu TCC.

À minha orientadora, Profa. Elayne Valério, que contribuiu diretamente no meu aprendizado, crescimento e evolução acadêmica. Sempre lembrarei com muita gratidão e respeito por todos os ensinamentos e as assistências que foram me passados.

## RESUMO

O concreto armado é um material suscetível aos mais distintos ataques, em consequência à exposição contínua à agentes agressivos, levando a manifestações patológicas, com potencial de afetar a durabilidade e o desempenho das estruturas. Estudos que investigam a adição de materiais com atividade pozolânicas no concreto vêm se tornando bastante relevantes neste contexto, especialmente em cidades litorâneas que apresentam grande agressividade atmosféricas, visto que aumentam a capacidade do concreto em resistir à diferentes ataques externos. Nesse sentido, este estudo tem como objetivo avaliar o desempenho do resíduo da borra de café como material pozolânico, atuando como retardador de ataques de substâncias agressivas. Para isso, inicialmente, caracterizou-se a borra de café por meio de ensaio de granulometria e a medição do Índice de Atividade Pozolânica (IAP). Em seguida, confeccionou-se os corpos de provas (CPs) com diferentes concentrações de borra de café para avaliação por meio de ensaios de consistência, tempo de pega, resistência à compressão e à tração, à carbonatação e ao ataque de cloretos em meio ácido e em meio neutro. Com o presente trabalho, esperava-se que a adição da borra de café, relatada como um eficiente inibidor de corrosão, retardasse o processo de carbonatação, como também o ataque por íons  $\text{Cl}^-$ . Os resultados iniciais indicaram que, para taxas mínimas de adição de 2%, a capacidade de compressão axial não teve comprometimentos maiores que 12%. Contudo, para taxas maiores que 5% de adição, a incorporação do resíduo da borra de café se mostrou inviável. Percebeu-se uma mudança na taxa de absorção de água da mistura, na qual mesmo com a utilização de superplastificantes o *slump test* não obteve resultados satisfatórios para garantir uma boa trabalhabilidade, como também o comprometimento estrutural da peça, pois o tempo de pega se elevou de forma considerável.

**Palavras-chave:** Carbonatação. Ataque por cloretos. Borra de café. Patologias. Concreto.

## ABSTRACT

Reinforced concrete is a material susceptible to the most different attacks, as a result of continuous exposure to aggressive agents, leading to pathological manifestations, with the potential to affect the durability and performance of structures. Studies that investigate the addition of materials with pozzolanic activity in concrete have become quite relevant in this context, especially in coastal cities that present great atmospheric aggressiveness, since they increase the capacity of concrete to resist different external attacks. In this sense, this study aims to evaluate the performance of coffee grounds residue as pozzolanic material, acting as a retarder for attacks of aggressive substances. For this, initially, the coffee grounds were characterized by means of a granulometry test and the measurement of the Pozzolanic Activity Index (IAP). Then, the specimens (CPs) were made with different concentrations of coffee grounds for evaluation by means of consistency tests, setting time, resistance to compression and traction, carbonation and the attack of chlorides in acid medium and in a neutral environment. With the present work, it was expected that the addition of coffee grounds, reported as an efficient corrosion inhibitor, would delay the carbonation process, as well as the attack by Cl<sup>-</sup> ions. The initial results indicated that, for minimum addition rates of 2%, the axial compression capacity had no compromises greater than 12%. However, for rates higher than 5% of addition, the incorporation of the coffee grounds residue proved to be unfeasible. It was noticed a change in the water absorption rate of the mixture, in which even with the use of superplasticizers the slump test did not obtain satisfactory results to guarantee a good workability, as well as the structural compromise of the piece, as the setting time increased considerably.

**Key words:** Carbonation. Chloride. Coffee grounds. Concrete.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Relação água/cimento 0,60 (a) Água/cimento 0,50 (b) Água/cimento 0,40 (c) Água/cimento 0,30 (d) .....                                       | 19 |
| Figura 2 – Rocha matriz e sua influência sobre o concreto fresco e o concreto endurecido.....  | 21 |
| Figura 3 – Fatores que influenciam no módulo de elasticidade do concreto .....   | 24 |
| Figura 4 – Corrosão em decorrência da carbonatação (a) e verificação da carbonatação por meio da fenolftaleína (b).....                                | 26 |
| Figura 5 – Teor de Cloretos em diferentes países .....   | 27 |
| Figura 6 – Eflorescência no concreto .....   | 29 |
| Figura 7 – Esquema do circuito que determina o potencial de elétrico de corrosão .   | 29 |
| Figura 8 – Diferença de porosidade do concreto na ausência da sílica ativa (a) e na presença (b). .....  | 32 |
| Figura 9 – Fluxograma que representa a sequência operacional do desenvolvimento do estudo.....   | 38 |
| Figura 10 – Curva Granulométrica da Borra de café.....   | 42 |
| Figura 11 – Ensaio de massa específica em que se adicionou um volume de 22,5 ml para 32 gramas de borra de café. ....                                  | 43 |
| Figura 12 – <i>Slump test</i> para 0,8% de aditivo.....  | 44 |
| Figura 13 – <i>Slump test</i> de 6 cm para 1,5% de aditivo .....   | 45 |
| Figura 14 – <i>Slump</i> menor que 1 cm para 3,5kg de água .....   | 45 |
| Figura 15 – <i>Slump</i> menor que 1 cm para 3,7 kg de água .....  | 45 |
| Figura 16 - Teste de compressão do Traço Padrão sem adição de borra de café e com variação na taxa de aditivo superplastificante .....                 | 47 |
| Figura 17 – Gráfico referente à taxa de adição de borra de café e a tensão de compressão suportada em cada traço aos 7 dias .....                      | 47 |
| Figura 18 – Gráfico referente à taxa de adição de borra de café e a tensão de compressão suportada em cada traço aos 21 dias com 0,57% de aditivo..... | 48 |
| Figura 19 – Gráfico referente à taxa de adição de borra de café e a tensão de compressão suportada em cada traço aos 21 dias com 1,5% de aditivo ..... | 48 |
| Figura 20 - Teste de compressão do Traço Padrão sem adição de borra de café e com variação na taxa de aditivo superplastificante .....                 | 50 |
| Figura 21 – Falha do teste de Índice Atividade Pozolânica.....   | 50 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Análises químicas de cimento Portland, expressas em óxidos (%).....   | 17 |
| Tabela 2 – Resistência do concreto para diferentes relações a/c e tipos de cimento Portland no Brasil.....   | 23 |
| Tabela 3 – Teor de cloretos em percentual em relação à massa de cimento .....  | 28 |
| Tabela 4 – Desenvolvimento da resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos ao longo do tempo e com diferentes concentrações de sílica ativa ..... | 33 |
| Tabela 5 – Caracterização do cimento.....  | 41 |
| Tabela 6 – Dados de granulometria obtidos no laboratório.....  | 42 |
| Tabela 7 – Variação do Slump em relação à quantidade de borra de café adicionada e aditivo.....  | 46 |

## LISTA DE QUADROS

|   |    |
|---|----|
| Quadro 1 – Principais tipos de cimento.....                                     | 18 |
| Quadro 2 – Siglas e composições dos cimentos.....                               | 31 |
| Quadro 3 – Classificação dos materiais pozolânicos segundo a NBR1263:2014. .... | 34 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|      |  |
|------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| CE   | Ceará                                    |
| DRX  | Difração de Raio-X                       |
| FRX  | Fluorescência Raio-x                     |
| IAP  | Índice de Atividade Pozolânica           |
| ISA  | <i>Internal Sulfate Attack</i>           |
| SDA  | <i>Spray Dryer Ash</i>                   |
| TAP  | <i>Test for Accelerated degradation</i>  |
| ID   | Índice de Desempenho                     |

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....   | <b>12</b> |
| 1.1 Objetivos.....  | <b>14</b> |
| 1.1.1 Objetivo geral.....   | 14        |
| 1.1.2 Objetivos específicos.....  | 14        |
| 1.2 Estrutura do trabalho .....   | <b>15</b> |
| <b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....  | <b>16</b> |
| 2.1 Concreto .....  | <b>16</b> |
| 2.1.1 Composição .....  | 16        |
| 2.1.1.1 Cimento.....  | 17        |
| 2.1.1.2 Água.....   | 18        |
| 2.1.1.3 Agregados .....   | 20        |
| 2.1.1.4 Concreto com resíduos .....   | 21        |
| 2.1.1.5 Resíduo da borra de café .....  | 21        |
| 2.1.2 Propriedades.....   | 22        |
| 2.2 Patologias do concreto.....   | <b>25</b> |
| 2.2.1 Carbonatação .....  | 25        |
| 2.2.2 Ataque por Cloretos (Cl <sup>-</sup> ).....   | 26        |
| 2.3 Aditivos e adição no concreto .....   | <b>30</b> |
| 2.3.1 Sílica Ativa.....   | 31        |
| 2.3.2 Pozolanas.....  | 34        |
| 2.4 Estado da arte: adições minerais como estratégia no controle de ataque químico em concreto..... | <b>35</b> |
| <b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....  | <b>38</b> |
| 3.1 Classificação da pesquisa.....  | <b>38</b> |
| 3.2 Métodos .....   | <b>39</b> |
| 3.2.1 Granulometria .....   | 39        |
| 3.2.3 Índice de Atividade Pozolânica com cal (IAP) .....  | 40        |
| 3.2.6 Slump-Test .....  | 41        |
| <b>3.3 Materiais</b> .....  | <b>41</b> |
| 3.3.1 Cimento.....  | 41        |
| 3.3.2 Borra de café.....  | 42        |
| 3.3.3 Areia Natural .....   | 43        |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....   | <b>44</b> |

|  |    |
|--|----|
| 4.1 Slump-Test.....                            | 44 |
| 4.2 Resistência à compressão .....             | 46 |
| 4.3 Índice de Atividade Pozolânica (IAP) ..... | 50 |
| 4.4 Dificuldades na produção do TCC.....       | 51 |
| <b>5 CONCLUSÃO</b> .....                       | 52 |
| <b>REFERÊNCIAS</b> .....                       | 54 |

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto armado é um material suscetível aos mais distintos ataques, seja do meio do qual está inserido, como os íons cloro contidos na névoa salina da maresia, o gás carbônico expelido pelos carros como também de agentes externos antrópicos, vandalismo, processo construtivo inadequado e o manuseio incorreto. Como consequência à exposição contínua a agentes agressivos, as estruturas de concreto passam a apresentar manifestações patológicas, com potencial de afetar a sua durabilidade e o seu desempenho (PEREIRA *et al.*, 2018). A reação da pasta de cimento tais agentes acarretam em produtos expansíveis no interior, como a expansão por sulfato (ISA), corrosão da armadura no concreto e reação álcali-agregado (RAA) (PEREIRA *et al.*, 2018).

O comprometimento das estruturas de concreto em razão de patologias tem causado prejuízos. Apenas nos Estados Unidos, no ano de 2016, quase 10% de suas pontes foram classificadas como estruturalmente deficientes. Além disso, foi feita uma estimativa de custo para reabilitação dessas obras de 123 bilhões de dólares, em que a maioria dos casos é consequência da carbonatação e do ataque de cloretos (MALHEIRO *et al.*, 2018).

Enquanto no Brasil, de acordo com os trabalhos de Dal Molin (1988) no Rio Grande do Sul, Aranha (1994) na região Norte, Nince (1996) na região Centro-Oeste e Andrade (1997) em Pernambuco, a corrosão de armaduras alcançaram os valores de 12%, 43%, 30,1% e 64% respectivamente, percebe-se que em áreas costeiras a incidência foi maior. Em um estudo realizado na cidade de Fortaleza-CE, a qual é uma região de ambiente predominantemente salino, constatou-se que de 30 estruturas com manifestações patológicas, analisadas entre os anos de 2000 – 2011, as quais 10 estavam na área de entorno urbano, 100% delas apresentavam corrosão de armaduras e 70% de fissuras, além de ter sido observada a mesma porcentagem de patologias para treze obras em área salina (SILVA, 2011).

Esses dois processos de deterioração com concreto estão relacionados, em termos de degradação do concreto por ação do meio, a carbonatação resulta na mudança na microestrutura do concreto e no seu pH, pois ocorre a transformação do  $\text{Ca(OH)}_2$  e de outros hidratos em carbonatos. Conseqüentemente, ocorre a redução do teor total de hidróxido de cálcio no interior dos poros e sua transformação em  $\text{CaCO}_3$ . Assim, o pH é reduzido a valores menores que dez, aumentando a porosidade

do concreto, deixando, portanto, a armadura mais suscetível a ataques de cloretos e outros agentes agressivos, levando à despassivação da armadura. Um concreto em processo de carbonatação pode possuir o dobro de pequenos poros do que um sem carbonatação (FELIX; POSSAN, 2018; MALHEIRO *et al.*, 2018).

A investigação de técnicas visando aumentar a durabilidade do concreto é relevante, especialmente em cidades litorâneas como Fortaleza-CE, onde a forte maresia causa um efeito prejudicial em estruturas de concreto armado devido ao seu alto teor de cloretos, associado ao processo de carbonatação que acelera a difusão de íons cloreto para o interior da peça (SILVA, 2010). Nesse sentido, um estudo realizado em 2016 classificou a agressividade do ar atmosférico na cidade de Fortaleza como muito alta devido à forte concentração de íons cloro. Além disso, avaliou-se a ação dessa atmosfera agressiva a partir da degradação em diferentes tipos de cimento e como esse é intensificado pelas condições climáticas (CAMPOS, 2016).

As manifestações patológicas são intensificadas pela ação da atmosfera agressiva de cidades como Fortaleza desse modo investigações sobre novas adições com satisfatória atividade pozolânica, resolvendo lacunas sobre seus efeitos na microestrutura dos compósitos cimentícios e a respeito de mudanças quanto a velocidade das reações no concreto, devido suas complexidades dos mecanismos físico-químicos da reação e as diferentes composições do seu gel (PEREIRA *et al.*, 2018).

A relação água/cimento e as propriedades pozolânicas são fatores cruciais para prevenção da entrada de agentes nocivos no concreto. Especialmente, a adição de substâncias com propriedades pozolânicas aumenta a capacidade de diminuir os poros do concreto e suas conexões, assim, “vedando” a estrutura de agentes externos (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Assim, com o objetivo de reduzir os custos de produção e melhorar resistência química e mecânica do concreto, muitos resíduos têm sido avaliados e apresentaram bom desempenho como adição quando apresentam atividade pozolânica (BEZERRA *et al.*, 2011).

Uma alternativa é o uso de resíduos gerados pela agroindústria brasileira, pois este setor tem produzido grandes quantidades de rejeitos, promovendo preocupante poluição do solo, de mananciais e do ar. No Brasil, a perda de alimentos varia de 20 a 60% de tudo que se produz no campo, além de que em alguns momentos apenas 40% do que é produzido é consumido, colocando o Brasil como um dos

maiores desperdiçadores de alimentos no mundo (BELIK *et al.*, 2012). Em razão disso, elevou-se também o uso destes resíduos pela construção civil em concretos e em argamassas, através de pesquisas para o uso correto destes descartes industriais (FERNANDES *et al.*, 2015). Os rejeitos da agroindústria têm grande potencial devido sua alta concentração de sílica, como no caso das cinzas da casca de arroz e de outros óxidos, podendo ser utilizados como pozolanas (BEZERRA *et al.*, 2011).

Tendo isso em vista, este estudo tem como objetivo avaliar o desempenho de resíduo de borra de café como retardador de ataque de substâncias agressivas ao concreto, a fim de buscar fins sustentáveis e viáveis financeiramente para este descarte da agroindústria. Para isso, o pó de resíduo da borra do café, serão avaliados quanto ao Índice de Atividade Pozolânica (IAP). Além disso, serão produzidos corpos de prova de concreto com a adição experimental para ensaios de consistência, tempo de pega, resistência à compressão, à carbonatação e ataque de cloretos.

## **1.1 Objetivos**

### *1.1.1 Objetivo geral*

Avaliar o desempenho do resíduo da borra de café como adição no concreto na prevenção de ataques por cloretos e no processo de carbonatação.

### *1.1.2 Objetivos específicos*

- Produzir programa experimental de forma a produzir concretos com diferentes concentrações de adição de resíduo de borra de café;
- Realizar ensaios no concreto produzido de forma a avaliar suas propriedades nos estados fresco e endurecido
- Submeter os corpos de prova dos concretos produzidos a ensaio acelerado de condições ambientais
- Avaliar, qualitativamente e quantitativamente, os corpos de prova quanto ao ataque de cloretos em soluções neutras (NaCl) e ácidas (HCl);
- Analisar os resultados obtidos e sua relação quanto à resistência ao processo de carbonatação, comparando com resultados obtidos por

levantamento bibliográfico.

## **1.2 Estrutura do trabalho**

Este trabalho está dividido em cinco seções. Nesta seção, apresentou-se a contextualização do assunto, a problemática, a justificativa do estudo, os objetivos gerais e os específicos, além da presente estruturação.

Na segunda seção será exposto o referencial teórico onde serão abordadas temáticas pertinentes sobre o assunto, como: a composição e as propriedades do concreto; patologias com foco principal na carbonatação e no ataque por Cloretos; o uso de aditivos e adições no concreto; resíduos com atividades pozolânicas com enfoque no rejeito da borra de café.

Na terceira seção será descrita a metodologia empregada na pesquisa em questão, desde a explicação dos procedimentos de produção dos corpos de provas e suas concentrações, a forma de pesquisa feita, as formas que esses corpos de prova foram testados e que características serão avaliadas.

Na quarta seção será explanado os resultados e em seguida será feita uma discussão com embasamento na literatura e nas normas de desempenho sobre o produto dos procedimentos, além disso será feito um levantamento bibliográfico para composição de um estudo exploratório com resultados secundários para comparação.

Na quinta seção, serão expostas as considerações finais do estudo, as dificuldades enfrentadas, possíveis estudos para o futuro sobre o tema, além da conclusão da pesquisa.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Concreto

O concreto tem grande importância devido a sua capacidade de suportar tensões de compressão e sua resistência à água, além de poder assumir as mais diversas formas e tamanhos (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Hoje o concreto de cimento Portland é o material mais consumido no mundo depois da água. Por isso, países como Estados Unidos e Canadá investem massivamente no estudo de tecnologias inovadoras para este bem, contribuindo para o desenvolvimento da ciência aplicada, da engenharia e da qualidade de vida da sociedade. Logo, busca-se o desenvolvimento de processos construtivos, com redução de custos e mais seguros (HELENE; ANDRADE, 2010).

Estima-se o consumo anual do concreto em 19 bilhões de toneladas métricas anualmente. Além dos motivos já mencionados no decorrer desse trabalho, outra razão para este amplo uso do concreto se dá pelo seu baixo custo, em algumas regiões o valor do m<sup>3</sup> chega a 60 ou 70 dólares. O concreto em comparação ao aço, não necessita de manutenções em curto espaço de tempo, como também possui ganho de resistência com o envelhecimento, maior resistência ao contato com a água (logo dispensando a obrigatoriedade do tratamento superficial, na maioria dos casos) e sua baixa condutividade térmica (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

#### 2.1.1 Composição

O concreto é composto basicamente por um agrupamento de água, agregados graúdos, agregados miúdos e cimento, formando o aglomerante hidráulico. Além disso, pode conter aditivos e adições para alterações no aspecto do concreto resultante, como no tempo de pega ou trabalhabilidade. Esta aglomeração será classificada em fresca quando a pasta cimentícia estiver no estado fluido ou plástico e assim poder sofrer alterações na sua arrumação decorrente de uma ação qualquer (SOBRAL, 2000).

No que diz respeito à resistência a patologias, a composição do concreto é o fator determinante no combate a deterioração química.

### 2.1.1.1 Cimento

O cimento é constituído de material calcário, óxido de ferro e de derivados de argilas ou folhelhos, que são a alumina e sílica. Uma mistura de calcário e argila também é utilizada: a marga. Como resultado, o cimento é constituído de cinco fases: Silicato Tricálcico ( $3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$  ou  $\text{C}_3\text{S}$ ), Silicato Bicálcico ( $2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$  ou  $\text{C}_2\text{S}$ ), Aluminato Tricálcico ( $3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  ou  $\text{C}_3\text{A}$ ), ferro-aluminato tetracálcico ( $4 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$  ou  $\text{C}_2\text{S}$ ) e Sulfato de Cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ), na qual a ordem de hidratação destes irá determinar o tempo de pega e a precipitação dos hidratados proverá as propriedades mecânicas do concreto (PEREIRA *et al.*, 2018).

O clínquer é o resultado da mistura da rocha calcária e da argila moída cozida em um forno de temperatura interna próximo aos  $1450 \text{ }^\circ\text{C}$ , em forma de nódulos de 5 a 25 mm de diâmetro. O pó resultante da trituração desses nódulos ao reagir com a água adquire uma consistência pastosa e logo após endurece, obtendo resistência e durabilidade, sendo estas características as principais propriedades do clínquer tornando-o um ligante hidráulico de elevada resistência (“Boletim técnico: Guia básico de utilização do cimento Portland”, 2002).

Na indústria cimentícia é comum a avaliação do cimento por meio da análise da concentração de óxidos, como pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 – Análises químicas de cimento Portland, expressas em óxidos (%)

| Análises químicas de cimento Portland, expressas em (%) |             |             |             |             |             |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Óxidos  | Cimento n°1 | Cimento n°2 | Cimento n°3 | Cimento n°4 | Cimento n°5 |
| <b>S</b>  | 21,1        | 21,1        | 21,1        | 20,1        | 21,1        |
| <b>A</b>  | 6,2         | 5,2         | 4,2         | 7,2         | 7,2         |
| <b>F</b>  | 2,9         | 3,9         | 4,9         | 2,9         | 2,9         |
| <b>C</b>  | 65,0        | 65,0        | 65,0        | 65,0        | 64,0        |
| <b>S</b>  | 2,0         | 2,0         | 2,0         | 2,0         | 2,0         |
| <b>Outros</b>   | 2,8         | 2,8         | 2,8         | 2,8         | 2,8         |

Em que:  $\text{CaO} = \text{C}$ ;  $\text{SiO}_2 = \text{S}$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F}$ .

Fonte: (NEVILLE, 2016).

Além dos principais compostos já citados, vale ressaltar os óxidos secundários, como o  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{Na}_2\text{O}$ , que, mesmo em pequenas porcentagens, são de extrema importância, pois os álcalis ( $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ ) em contato

com alguns agregados geram uma patologia conhecida como Reação Álcali-Agregado que causa a desintegração do concreto (PEREIRA *et al.*, 2018).

O hidróxido de cálcio compõe de 20 a 25% do volume de sólidos na pasta de cimento e tem grande importância no cimento, pois além de servir como uma forma de medida de hidratação, também é um dos principais responsáveis pela maior alcalinidade do concreto, devido seu caráter básico e de conferir à estrutura menor porosidade (NEVILLE, 2016). O alto pH do cimento conferido pelo  $\text{Ca(OH)}_2$  é responsável pela passivação da armadura metálica.

Silicato de Cálcio Hidratado abreviado como C–S–H é um dos grandes componentes do volume de sólidos da pasta de cimento, ocupando de 50 a 60% do volume total e é ele a principal substância responsável por conferir resistência e durabilidade ao longo do tempo, devido às forças de van der Waals e sua grande área superficial se comparado ao  $\text{Ca(OH)}_2$ , na ordem de 100 a 700  $\text{m}^2/\text{g}$  (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Com o avanço dos estudos quanto a tecnologia do cimento, várias características foram melhoradas afim de torná-lo apto para diferentes ambientes e solicitações, como com adição de sílica ativa, de pozolanas ou de cinzas volantes. Uma amostragem mais simples pode ser vista no Quadro 1 quanto os tipos de cimento Portland e suas adições e nomenclaturas.

Quadro 1 – Principais tipos de cimento

| <b>Designação Britânica Tradicional</b>      | <b>Designação ASTM</b> |
|--|------------------------|
| Portland Comum                               | Tipo I                 |
| Portland de alta resistência inicial         | Tipo III               |
| Portland de elevadíssima resistência inicial | Tipo III               |
| Portland de ultra-alta resistência inicial   | Pega regulada          |
| Portland de baixo calor de hidratação        | Tipo IV                |
| Modificado                                   | Tipo II                |
| Portland resistente a sulfatos               | Tipo V                 |
| Portland de alto-forno                       | Tipo IS, Tipo I (SM)   |
| Portland Branco                              | -                      |
| Portland Pozolânico                          | Tipo IP, Tipo I (PM)   |
| De escória                                   | Tipo S                 |

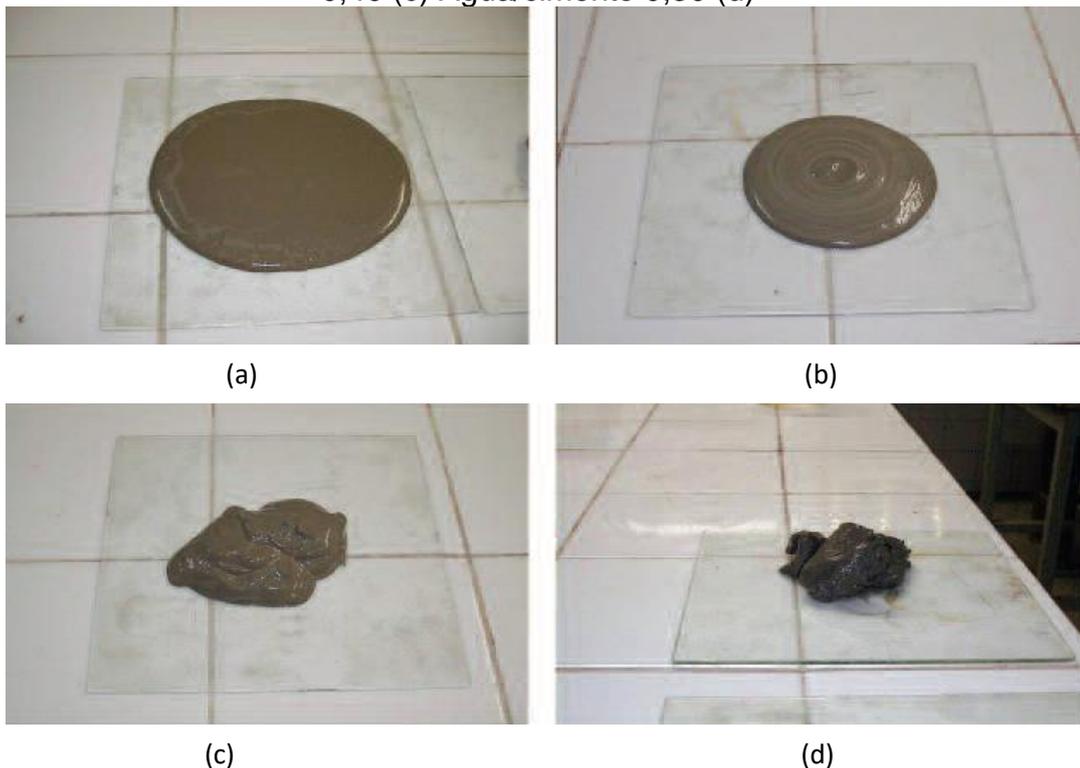
Fonte: (NEVILLE, 2016).

### 2.1.1.2 Água

O concreto é uma mistura essencialmente entre cimento, agregados graúdos e miúdos e a água, podendo ou não receber outros componentes. Quando ocorre a mistura entre cimento Portland e a água, forma-se uma massa mais ou menos fluida, na qual envolverá as partículas de agregados, que nas primeiras horas continuará com em um estado fluido, podendo ser moldado nas mais diferentes configurações. No decorrer do tempo, essa mistura ganha dureza e resistência estrutural (HELENE; ANDRADE, 2010).

A relação água/cimento é um dos fatores primordiais que irão conferir à pasta sua trabalhabilidade, sua fluidez e influenciará formente em sua resistência mecânica. Nas Figuras 1(a) pode-se observar a relação água/cimento de 0,60; 1(b) de 0,50; 1(c) de 0,40 e a 1(d) de 0,30.

Figura 1 – Relação água/cimento 0,60 (a) Água/cimento 0,50 (b) Água/cimento 0,40 (c) Água/cimento 0,30 (d)



Fonte: (HELENE; ANDRADE, 2010)

A resistência mecânica das pastas aumenta com a redução da relação água/cimento, logo, a pasta com a proporção água cimento 0,30 possui maior resistência mecânica do que a com 0,60, devido a menor porosidade e menor permeabilidade. Vale salientar que as baixas relações água/cimento podem ajudar no aumento de alta resistência do concreto, pois no mundo e no Brasil, concretos de alta

resistência de produção em betoneiras alcançam até 150 MPA, com proporções de 0,20 ou menores, mas com um cuidado maior na prescrição dos agregados. (HELENE; ANDRADE, 2010)

Segundo Abrams (1918), que formulou a Lei de Abrams, a relação entre a resistência à compressão, em MPA, e a relação água/cimento ou água/aglomerantes pode ser descrita pela Equação 1, em que  $F_c$  representa a resistência à compressão, em MPA;  $A$  é a constante que depende dos materiais utilizados e da idade;  $R$  é a constante que depende dos materiais e da idade; e  $a/c$  corresponde à relação água/cimento ou água/aglomerantes, em massa.

$$F_c = \frac{A}{R^c} \quad (1)$$

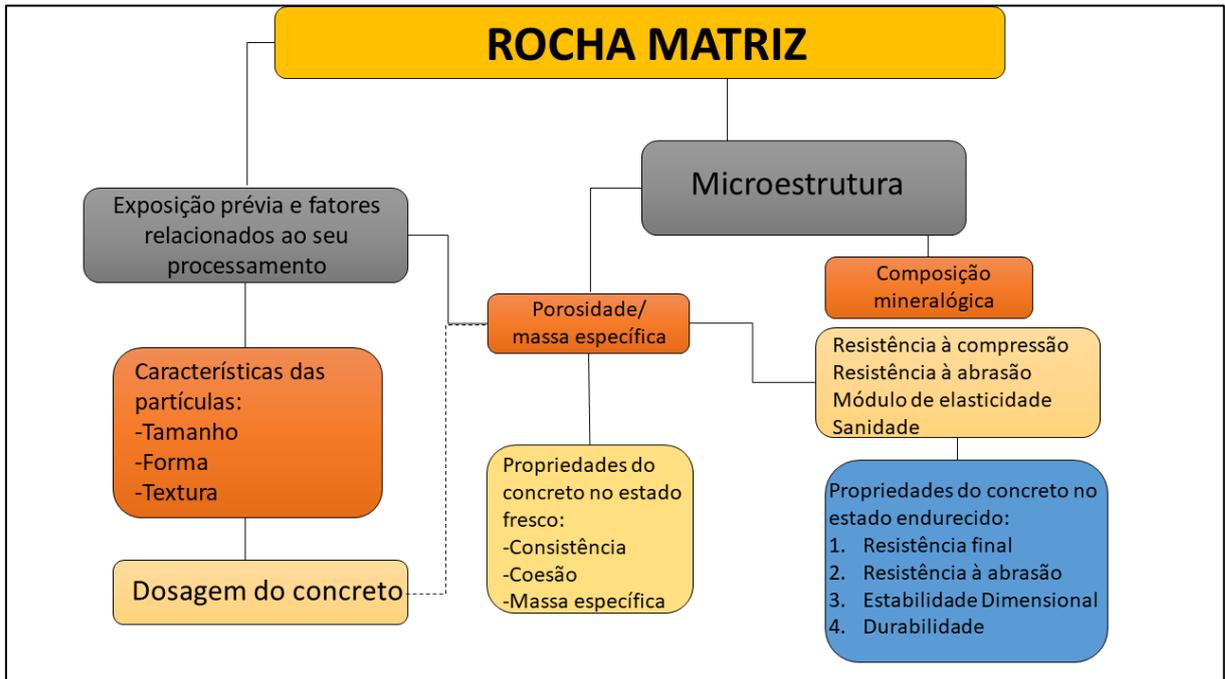
A relação água/cimento também está relacionada à prevenção da entrada de agentes nocivos no concreto. Quanto maior a relação água/cimento e menor o grau de hidratação, maior será a porosidade a permeabilidade do concreto, assim, facilitando a entrada de íons  $Cl^-$ .

### 2.1.1.3 Agregados

Os agregados graúdos e miúdos são definidos como grãos de minerais duros, compactos e limpos, sem impurezas que possam interferir nas características do cimento, como a hidratação e o endurecimento, além de proteção da armadura contra a corrosão e a durabilidade da peça. Os grãos graúdos serão definidos como as partículas que não passarem na peneira com abertura de 4,75mm e passarem com 75mm, enquanto os miúdos serão as que passarem na de 4,75mm (NBR 7211:2009).

O estudo mais amplo acerca dos agregados se torna cada vez mais necessário, pois já questiona-se o fato de eles serem “inertes”, tendo em vista que interferem no concreto endurecido em suas propriedades de resistência, dureza e módulo de elasticidade, além de também ter intervenção na trabalhabilidade do concreto fresco. Na Figura 2, observa-se as características do concreto, que são influenciadas pelo agregado a partir da microestrutura da rocha matriz.

Figura 2 – Rocha matriz e sua influência sobre o concreto fresco e o concreto endurecido



Fonte: (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

#### 2.1.1.4 Concreto com resíduos

A adição de resíduos da agroindústria do concreto já obteve êxitos como no caso da cinza da casca de arroz, a qual segundo PEREIRA *et al.* 2015, em cimento Portland com substituição de teores 5% e 10% apresentaram ganho de resistência à compressão axial em até 24%, além de contribuir para o fechamento dos poros do concreto.

Concreto contendo adição de fibra de bambu e de fibras de cana de açúcar, obtiveram maiores valores de resistência à compressão axial do que o concreto de traço padrão, a qual a primeira adição teve um ganho de 41% de resistência e da cana de açúcar atingiu uma capacidade de compressão 21,6% maior, além de melhor desempenho quanto à tração por compressão diametral, logo, adições de origem vegetal geralmente são soluções viáveis (FERREIRA *et al.*, 2017).

#### 2.1.1.5 Resíduo da borra de café

A borra de café é um resíduo obtido através do tratamento do café com água quente para extração de substâncias aromáticas, porém estima-se que para

tonelada de café, geram-se 480kg de borra, representando quase 50% do que é produzido. A cafeína, segundo estudos realizados, apresenta concentrações nos afluentes e nos afluentes das estações de tratamento de águas residuais em níveis que representam toxicidade aos organismos aquáticos (HERMANN *et al.*, 2019).

Pesquisas apontam que a borra de café é constituída essencialmente de polissacarídeos, oligossacarídeos, lipídios, ácidos alifáticos, aminoácidos, proteínas, alcalóides e fenólicos, além de minerais, lignina, melanoidinas e compostos voláteis (MUSSATTO *et al.*, 2011).

Existem vários estudos relacionados ao reaproveitamento da borra de café na agroindústria para fertilização do solo, devido à sua considerável composição por nitrogênios, porém seu uso também apresentou resultados eficientes como inibidor de corrosão em armaduras, nos quais ,segundo TORRES *et al.* (2011), ao se realizar testes de corrosão em soluções ácidas de HCL com armaduras e utilizando-se da borra de café como medida mitigadora desse desgaste, obteve resultado positivo.

### 2.1.2 Propriedades

A permeabilidade do concreto é diretamente ligada à proporção água/cimento e tem fator de crescimento inverso ao volume de finos na mistura, como o cimento, assim, quanto maior a permeabilidade, menor será o valor de finos e, provavelmente, maior será o fator a/c, pois caso exista mais água na pasta de cimento, no processo de cura, essa água evaporará, deixando poros de maiores dimensões e conexões (PIRES *et al.*, 2014).

Além dos fatores já mencionados, outros também influenciarão na permeabilidade, como a cura, o adensamento, a moldagem e a desmoldagem, pois caso algum desses processos seja feito de maneira equivocada, o concreto irá fissurar (HELENE; ANDRADE, 2010). Na Tabela 2, pode-se observar a variação da resistência do concreto, em Mpa, em diferentes fatores a/c para o mesmo tipo de cimento.

Tabela 2 – Resistência do concreto para diferentes relações a/c e tipos de cimento Portland no Brasil

| Tipos e classes de cimento | Relação a/c |      |      |      |      |
|----------------------------|-------------|------|------|------|------|
|                            | 0,65        | 0,60 | 0,55 | 0,50 | 0,45 |
| P I 32                     | 28          | 32   | 37   | 41   | 47   |
| CP II 32                   | 24          | 28   | 31   | 35   | 39   |
| CP II 40                   | 28          | 32   | 36   | 41   | 46   |
| CP III 32                  | 23          | 27   | 31   | 36   | 41   |
| CP III 40                  | 27          | 32   | 37   | 42   | 49   |
| CP IV 32                   | 24          | 28   | 32   | 36   | 41   |
| CP V ARI.RS                | 30          | 33   | 38   | 42   | 46   |
| CP V ARI                   | 33          | 38   | 42   | 47   | 53   |

Fonte:(HELENE; ANDRADE, 2010).

A permeabilidade também terá grande influência da alcalinidade do concreto, pois caso o pH interno se reduza para valores abaixo de 12,5, isso representará uma diminuição de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , evidenciando-se, conseqüentemente, mais espaços vazios, facilitando a entrada de agentes prejudiciais ao concreto (ARAUJO *et al.*, 2013).

A resistência à compressão do concreto é influenciada por uma cadeia de fatores, como o fator água/cimento e o grau de hidratação. Esses dois elementos são os responsáveis por conferir ao concreto suas propriedades mecânicas e de permeabilidade. Além desses, o agregado, do tipo de aglomerante hidráulico utilizado, do uso de algum aditivo ou de alguma adição mineral também têm forte influência na resistência final do concreto. Logo, deve-se ser sistematicamente avaliado o processo de fabricação (NEVILLE, 2016).

O módulo de elasticidade ( $E_c$ ), primeiramente formulado por Robert Hooke, expunha que, para alguns materiais, a extensão deles até uma determinada solicitação se mantinha proporcional à força aplicada no sentido de alongamento do mesmo (MONTIJA, 2007). A lei de Hooke é explicada a partir da Equação 2, em que  $\sigma$  é a tensão aplicada;  $\varepsilon$  corresponde à deformação específica; e  $E_c$  é o valor da constante que depende da composição do material, ou seja, Módulo de Elasticidade.

$$\sigma = E_c \cdot \varepsilon \quad (2)$$

Logo, conclui-se que módulo de elasticidade é a relação entre uma tensão aplicada e uma deformação. Contudo, é importante salientar que quando, retirada esta tensão à que foi submetida, a peça voltará à sua forma original, sendo esta

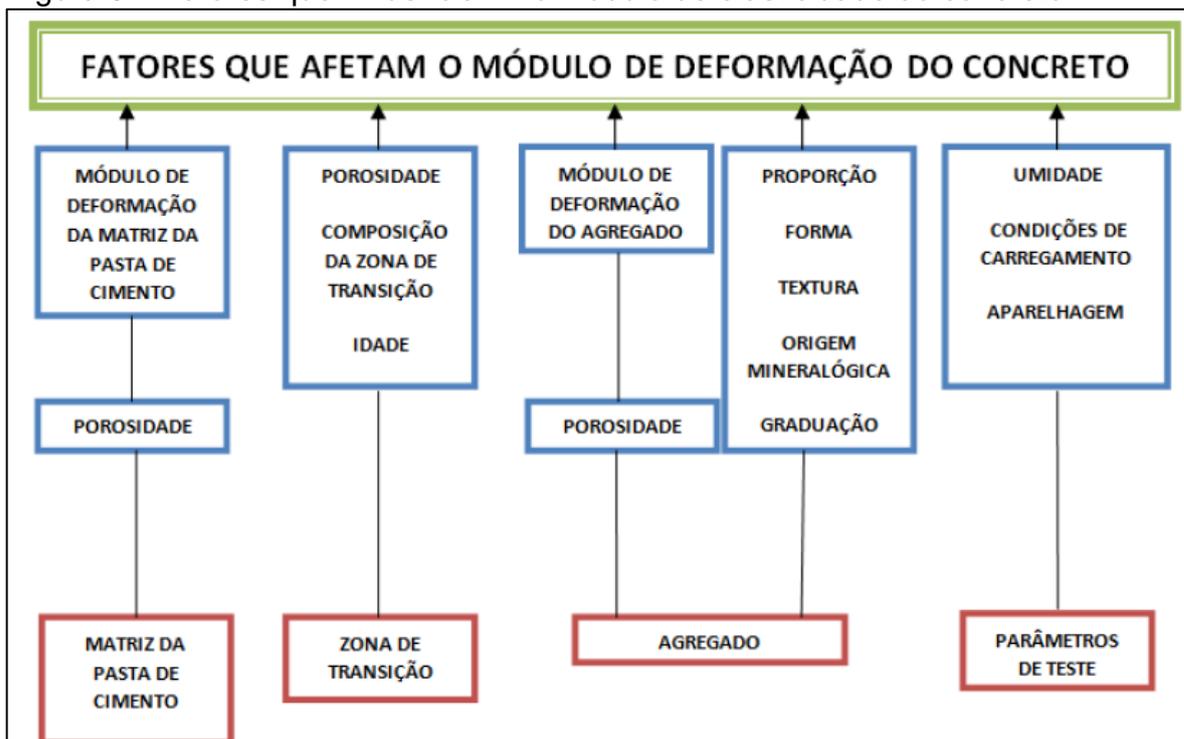
deformação chamada de *elástica*. Entretanto, também é importante compreender que o módulo de elasticidade expressa a tensão máxima que o concreto pode suportar até o concreto deformar permanentemente (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Mas vale ressaltar que esta teoria apenas se aplica para tensões abaixo de 50% da tensão de ruptura do concreto (SANTOS *et al.*, 2017).

A importância do estudo do módulo de elasticidade se dá pela sua influência sobre a capacidade estrutural do concreto, pois quando ocorrem deformações em excesso, a estrutura fissa ou desencadeia outras patologias.

A matriz da pasta cimentícia é uma influência do módulo de elasticidade, pois a composição do agregado pode acarretar em uma variação de até 30% do  $E_c$  (SANTOS *et al.*, 2017). Além da matriz, a zona de transição também interfere, pois com o passar da idade o módulo de elasticidade aumenta em virtude do avanço da densidade da zona de transição na interface, superando a capacidade do concreto em suportar tensões de compressão. A umidade em que as peças foram testadas também influencia no valor do  $E_c$ , tendo em vista que em condições úmidas os valores chegam a ser 15% maior do que nas peças secas (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Na Figura 3, pode-se verificar os fatores que influenciam no módulo de elasticidade do concreto.

Figura 3 – Fatores que influenciam no módulo de elasticidade do concreto



Fonte: (ARRUDA, 2014).

A capacidade que o concreto possui de deformar inelásticamente antes de romper é denominada de ductilidade, essa propriedade é de grande relevância, pois confere à peça segurança, tendo em vista que ela dará indícios que está deformada além de sua capacidade, tendo tempo para a busca de reforços ou outras medidas de reparo (NEVILLE, 2016).

## 2.2 Patologias do concreto

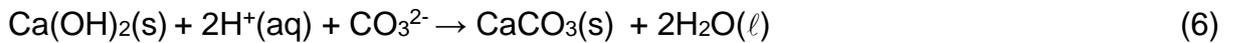
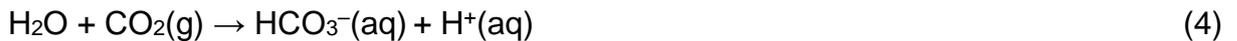
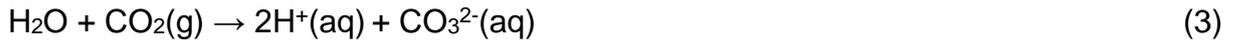
O concreto, mesmo com sua alta durabilidade, tem a necessidade de manutenções mais intensas no decorrer do tempo. Com o avanço da tecnologia e de processos experimentais, foram observadas vulnerabilidades e deteriorações decorrentes de diferentes agentes deteriorantes, como: abrasão, fissuração por gradientes de temperatura e as patologias por agentes químicos, que serão abordados nesse trabalho, carbonatação e o ataque por cloretos (MEDEIROS *et al.*, 2017).

### 2.2.1 Carbonatação

A carbonatação de forma trivial é a diminuição da alcalinidade do concreto, por meio da reação dos seus principais componentes, como  $\text{Ca(OH)}_2$  ou até mesmo do C-S-H na falta do hidróxido de cálcio, com o gás carbônico  $\text{CO}_2$  (NEVILLE, 2016).

A redução do pH se torna mais agressiva quando ocorre com o  $\text{Ca(OH)}_2$ , pois o valor se reduz para valores próximos de 8. Essa redução de alcalinidade no caso do concreto armado, oferece graves riscos a armadura, tendo em vista que a sua camada passivadora é removida por esse ambiente menos alcalino, tornando a superfície do aço mais suscetível à ataques, desde que haja umidade necessária (HELENE *et al.*, 2006).

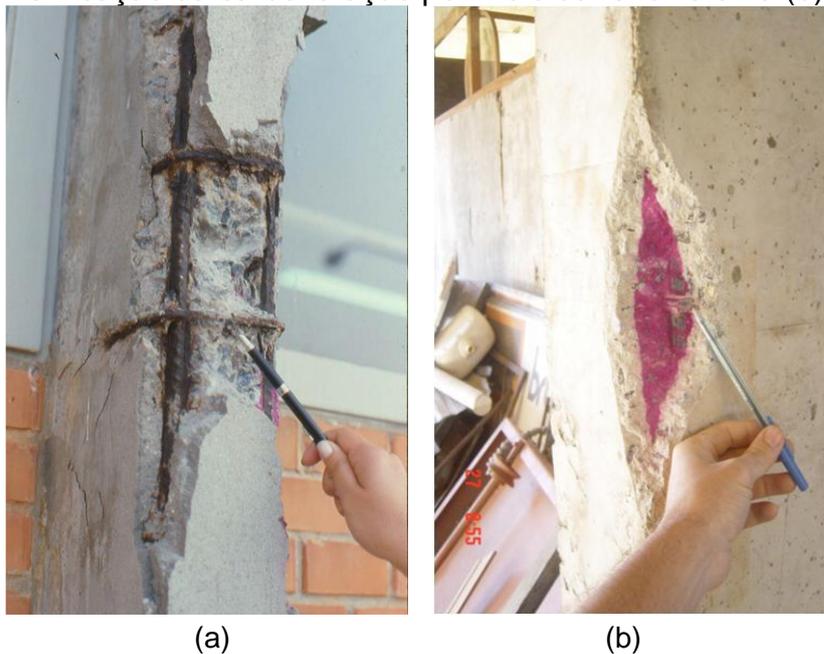
A carbonatação como já mencionado se dá pela reação dos hidróxidos de cálcio e outros hidratos com o gás carbônico, gerando carbonatos, que causam o aumento da porosidade do concreto. De acordo com Johannesson e Utgenannat (2001), o concreto em processo de carbonatação possui até o dobro de poros do que um concreto não carbonatado. Nas Equações 3, 4, 5 e 6 a seguir, representa-se as reações ocorridas no interior da estrutura.



Na Figura 4a, observa-se o concreto em processo de carbonatação e a sua armadura corroída, decorrente também da carbonatação. Na Figura 4b, ilustra-se o método qualitativo de avaliação do concreto quanto ao processo de carbonatação.

A fenolftaleína em contato com o concreto carbonatado permanece incolor, pois o dióxido de carbono entrou em contato com região, reagindo com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Em pHs iguais ou superiores a 9,5, característico de concreto não carbonatado, a fenolftaleína adquire a cor violeta (ANTUNES; PACHECO; GIOVANOLA, 2006)

Figura 4 – Corrosão em decorrência da carbonatação (a) e verificação da carbonatação por meio da fenolftaleína (b).



Fonte: adaptado de Helene *et al.* 2006.

### 2.2.2 Ataque por Cloretos ( $\text{Cl}^-$ )

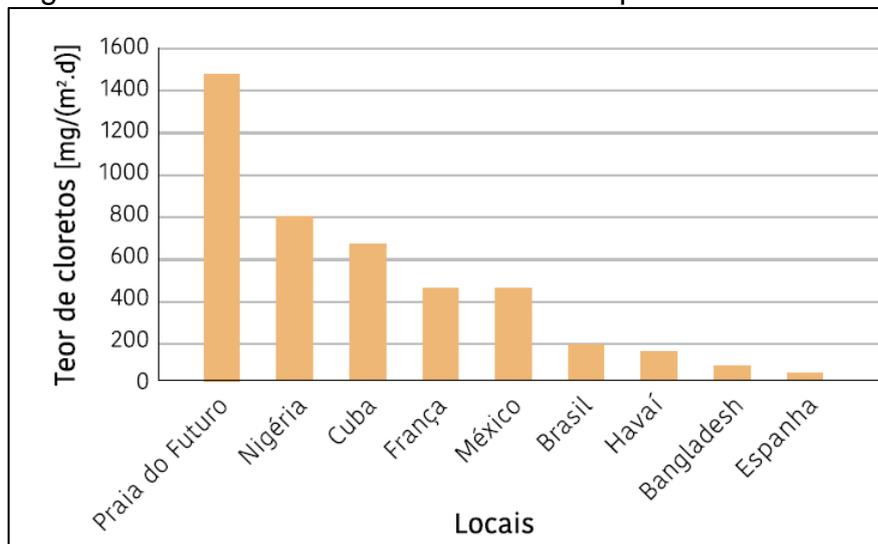
O processo de carbonatação favorece a diminuição do pH, tornando-o mais ácido e formando uma microestrutura porosa. Como consequência, ocorre maior difusão de íons cloreto através da camada de concreto. Assim, esses íons agressivos rompem a camada passiva do aço mesmo em pH alcalino, há o rápido

desencadeamento de uma corrosão localizada (pite) que, ao longo do tempo, favorece a formação de placas, diminuindo a camada protetora do aço. O processo avançado de corrosão compromete a função estrutural do projeto (ARAUJO *et al.*, 2013).

Em ambientes industriais, esse ataque se torna mais nocivo, pois a atmosfera nessas regiões, geralmente, apresenta altas concentrações de ácido clorídrico, sulfúrico ou nítrico em efluentes da indústria química. A reação dessas substâncias com a pasta de cimento Portland produz sais solúveis de cálcio, como o cloreto de cálcio. Devido à alta solubilidade desses sais, o ataque se torna mais severo, tornando o concreto mais poroso e permeável, e favorece cada vez mais a entrada de mais agentes patológicos (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Os íons  $\text{Cl}^-$  estão mais concentrados em atmosferas marítimas. A cidade de Fortaleza - CE, por exemplo, possui uma orla marítima de 34 quilômetros e contém 15 praias com altos índices de produção de íons cloro na atmosfera. Especificamente, a Praia do Futuro possui a maresia mais forte do mundo.

Figura 5 – Teor de Cloretos em diferentes países



Fonte:(CABRAL; CAMPOS, 2016)

Na Figura 5, pode-se observar comparativamente o nível de teor de cloretos em outros países do mundo em relação à Praia do Futuro. O período que compreende o mês de julho é caracterizado como uma temporada de fortes ventos e devido à entrada das correntes de vento do lado da Praia do Futuro, uma alta carga de aerossol marinho, essa praia chega a possuir valores de concentração de cloretos 8,35 vezes maior do que os encontrados na praia vizinha, Praia de Iracema (CABRAL; CAMPOS, 2016).

Em alguns pontos de Fortaleza, em uma distância de 500 metros, a penetração de íons Cloretos em peças de concreto, expostas para o estudo da agressividade atmosférica, atingiu valores de 0,05% de Cl<sup>-</sup> em massa de cimento, ainda longe do máximo especificado pela NBR 12655 (ABNT,2015). Contudo, vale ressaltar que o experimento ocorreu em um curto intervalo de tempo de 6 meses. Na cidade de Fortaleza, existem construções antigas à base de concreto que estão expostas à essa atmosfera agressiva há décadas. Na Tabela 3, observa-se o teor de íons cloreto pela distância presentes na composição da massa de cimento.

Tabela 3 – Teor de cloretos em percentual em relação à massa de cimento

| Ponto | Distância ao mar (m) | CIMENTO CP II F 32 |      |      | CIMENTO CP IV |      |      |
|-------|----------------------|--------------------|------|------|---------------|------|------|
|       |                      | 1 cm               | 2 cm | 3 cm | 1 cm          | 2 cm | 3 cm |
| P01   | 50                   | 0,02               | 0,00 | 0,02 | 0,01          | 0,02 | 0,00 |
| P02   | 250                  | 0,03               | 0,02 | 0,02 | 0,03          | 0,02 | 0,01 |
| P03   | 500                  | 0,01               | 0,00 | 0,00 | 0,01          | 0,00 | 0,00 |
| P04   | 1000                 | 0,01               | 0,01 | 0,01 | 0,00          | 0,1  | 0,01 |
| P05   | 2000                 | 0,00               | 0,01 | 0,02 | 0,01          | 0,01 | 0,01 |
| P06   | 4000                 | 0,02               | 0,02 | 0,01 | 0,01          | 0,01 | 0,01 |
| P33   | 50                   | 0,02               | 0,03 | 0,02 | 0,00          | 0,01 | 0,01 |
| P34   | 250                  | 0,01               | 0,01 | 0,03 | 0,06          | 0,01 | 0,02 |
| P35   | 500                  | 0,05               | 0,03 | 0,02 | 0,03          | 0,03 | 0,05 |
| P36   | 1000                 | 0,03               | 0,07 | 0,03 | 0,07          | 0,00 | 0,04 |
| P37   | 2000                 | 0,03               | 0,01 | 0,02 | 0,00          | 0,02 | 0,03 |
| P38   | 4000                 | 0,03               | 0,01 | 0,05 | 0,01          | 0,07 | 0,00 |

Fonte: (CABRAL; CAMPOS, 2016)

Esse tipo de atmosfera causa grandes malefícios à estrutura metálica do concreto armado por conta da corrosão localizada por pite que nada mais é que uma vacância que se desenvolve rapidamente na armadura, regredindo as capacidades mecânicas do aço (DIETRICH; TELES; VIEIRA, 2017).

Tendo em vista que ambientes marinhos são grandes influenciadores da corrosão de peças por íons cloretos, vale enumerar outros fatores que também influenciam em tal fato como: condições da estrutura, grau de difusividade de cloretos, cobrimento da peça, materiais empregados na concretagem, pois a contaminação do concreto por íons é um fator bastante prejudicial para a peça (MEDEIROS *et al.*, 2017).

A corrosão por cloreto é a formação de uma pilha eletroquímica, a qual ocorre em meio aquoso e nele acontece o transporte de íons e de elétrons entre regiões catódicas e anódicas no metal, nas regiões anódicas sucedem a oxidação do ferro e nas regiões catódicas a redução do oxigênio.

Além do ataque na armadura, o cloreto afeta fortemente o concreto, pois os compostos hidratados como C-S-H e o  $\text{Ca(OH)}_2$  reagem com o cloro, que quando resultam em produtos solúveis estes são lixiviados, resultando em manchas brancas na parte externa da peça, fenômeno este chamado de eflorescência (Figura 6), formando compostos insolúveis, causam desagregação do concreto (NEVILLE, 2016).

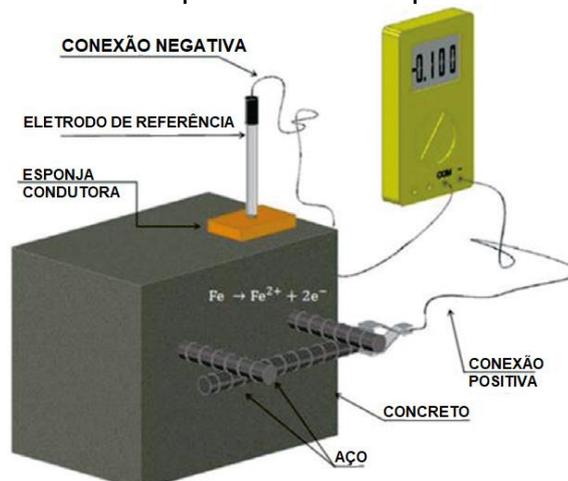
Figura 6 – Eflorescência no concreto



Fonte: (GONÇALVES, 2015, p.72, apud SILVA, 2011).

O meio mais utilizado para avaliação qualitativa do processo de corrosão do aço é a medição da diferença de potencial elétrico entre a armadura e um eletrodo de referência, o qual mantém seu potencial elétrico estável para servir de comparação. Na Figura 7, apresenta-se um esquema representativo do aparelho de avaliação (MEDEIROS *et al.*, 2017).

Figura 7 – Esquema do circuito que determina o potencial de elétrico de corrosão



Fonte: MEDEIROS *et al.* 2017.

Caso ocorra a combinação da determinação do teor de cloretos, profundidade de carbonatação e resistividade elétrica do concreto, é possível haver panorama da situação da peça em questão em diferentes profundidades.

### **2.3 Aditivos e adição no concreto**

Aditivos químicos são substâncias não essenciais para o concreto, mas que são capazes de conferir propriedades que seriam inviáveis com a composição comum do concreto, seja no estado fresco ou no estado endurecido.

Segundo a NBR 11768 (ABNT,2011), aditivo é um composto que em pequena quantidade modifica alguma propriedade do concreto, a fim de adaptá-lo à alguma situação específica, além de não dever superar 5% da massa cimentícia para alterar propriedades no estado fresco e/ou no estado endurecido, porém no caso do concreto projetado pode superar os 5%.

Os aditivos são usados estrategicamente para modificarem o tempo de pega, alterar a fluidez sem perder resistência, diminuir a segregação e o consumo de cimento. Agem também quanto às patologias, atenuando os efeitos dos ataques por sulfatos, corrosão da armadura, reação álcali-agregado, dentre outras propriedades (NAKAMURA, 2009).

Os aditivos necessitam de precauções quanto à sua dosagem, pois quando ocorre o excesso no uso de aditivos, o tempo de pega é acrescido, interferindo no cronograma da obra, além de poder ocorrer o deslizamento das fôrmas, e também pode ocorrer perda da resistência final, como também no estado fresco pode acontecer de segregação do concreto ou a incorporação de ar (NAKAMURA, 2009).

Os aditivos, quando utilizados em conjunto, podem não ser compatíveis, como no caso da mistura entre redutor de água à base de lignossulfonato com um incorporador de ar à base de resina vinsol. Logo, é necessário fazer experimentos acerca das combinações de aditivos, além de buscar introduzir na mistura em momentos diferentes e em betoneiras distintas se possível (NEVILLE, 2016).

O uso de aditivos químicos pode resultar em vantagens econômicas, embora o custo desses produtos seja elevado, pois pode diminuir o número de colaboradores necessários para o adensamento do concreto, o consumo de cimento, além do ganho de tempo, pela melhora da trabalhabilidade (NEVILLE, 2016).

De acordo com a NBR 11768 (ABNT 2019), os aditivos podem ser classificados em redutor de água, retardador ou acelerador de pega; redutor de água e acelerador; redutor de água e retardador; superplastificante, superplastificante e retardador; consistência.

Os cimentos modificados com adições minerais, assim, como os aditivos conferem evoluções no uso do concreto, mas com seu atributo mineral, como escória de alto forno, pozolanas, sílicas, calcário e fíler (NEVILLE, 2016). Tendo em vista as adições a partir de resíduos das agroindústrias com resultados satisfatórios, como a cinza da casca de arroz, este estudo avaliará os efeitos consequentes do uso do resíduo da borra de café.

Contudo, estas adições podem conferir ao concreto maior resistência ao ataque por sulfatos, maior resistência em idades avançadas, maior estabilidade, maior durabilidade, maior impermeabilidade e menor calor de hidratação (MEHTA; MONTEIRO, 2014). No Quadro 2, pode-se observar os tipos de cimento e suas adições.

Quadro 2 – Siglas e composições dos cimentos

| <b>Sigla</b> | <b>Composição</b>   |
|--------------|---|
| CP I         | Portland Comum  |
| CP I-S       | Portland Comum + Fíler carbonatáceo ou Portland Comum + Escória ou Pozolana |
| CP II-E      | Portland Composto com Escória   |
| CP II-Z      | Portland Composto com Pozolana  |
| CP II-F      | Portland Composto com Fíler   |
| CP III       | Portland de Alto-Forno  |
| CP IV        | Portland Pozolânico   |
| CP V-ARI     | Portland de Alta Resistência Inicial  |
| Sufixo BC    | Portland de Baixo Calor de Hidratação                                       |
| Sufixo RS    | Portland Resistente à Sulfatos  |

Fonte: ("Boletim técnico: Guia básico de utilização do cimento Portland", 2002)

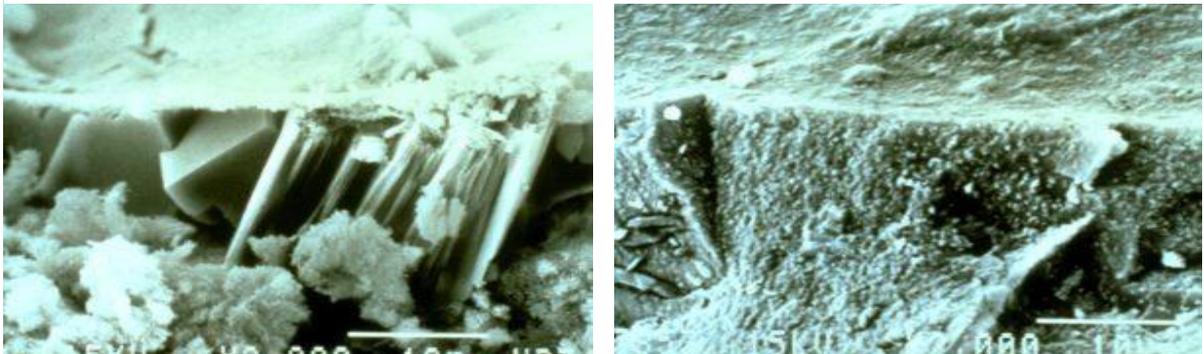
### 2.3.1 Sílica Ativa

Sílica ativa pode ser um subproduto da produção de silício, de ligas de ferrosilício ou também como consequência de quartzo de elevada pureza ou de carvão em fornos a arco submerso, em temperaturas de 2000° C. A Sílica ativa se forma a partir da oxidação de SiO<sub>2</sub> gasoso, que se condensa resultando em partículas

extremamente finas com diâmetros entre 0,03 e 0,3 $\mu$ m e altamente reativa, portanto essas partículas aceleram a reação com o hidróxido de cálcio (NEVILLE, 2016).

A adição de Sílica ativa confere ao concreto maior resistência ao ingresso de agentes externos, como íons cloreto, assim, maior proteção à armadura do concreto. Esse benefício é consequência do maior refinamento e da maior sinuosidade dos poros, conferindo ao concreto seu maior tamponamento frente à atmosfera (HOFFMANN, 2001). Nas Figuras 8a e 8b, pode-se observar a diferença na porosidade do concreto, na ausência da sílica ativa e na presença, respectivamente

Figura 8 – Diferença de porosidade do concreto na ausência da sílica ativa (a) e na presença (b).



Fonte: (MARKETING TECNOSIL, 2018).

As reações pozolânicas acarretam a diminuição de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e o aumento de outros compostos como o C-S-H, que possui ligações mais fortes que a de cristais de hidróxido de cálcio (forças de Van der Waals), conferindo maior aderência entre a pasta/armadura e a pasta/agregado (MEHTA & MONTEIRO, 1997 *apud*. HOFFMAN, 2011, p.11).

A sílica ativa além de seu efeito pozolânico (químico), também exerce sua função física. Devido sua fineza, as partículas se acomodam na interface entre a pasta de cimento e o agregado. Essa área é considerada a mais fraca no concreto, pois as o cimento Portland não consegue se acomodar de forma compacta à superfície do agregado devido ao efeito parede. A exsudação também é reduzida pelo uso de sílica ativa, devido à sua elevada finura, evitando água exsudada abaixo dos agregados graúdos (MEDEIROS; RAISDORFER; HOPPE FILHO, 2017).

O uso da sílica ativa aumenta consideravelmente a demanda de água, devido à grande área superficial das partículas, logo, para concretos com baixa

relação a/c, torna-se necessário o uso de superplastificantes, pois em concretos com aditivo a demanda de água é diminuída em torno de 10kg/m<sup>3</sup>, com a adição da sílica ativa e a ausência do superplastificante, a demanda chega a 40kg/cm<sup>3</sup> de água (NEVILLE, 2016).

Contido, a sílica ativa necessita de cuidados especiais quanto à sua dosagem, pois quando utilizada como substituição parcial do aglomerante, aumenta a velocidade de carbonatação, no entanto quando utilizada como adição na ordem de 10%, diminui a velocidade carbonatação, além de também reduzir em cerca de 46% a adsorção capilar de água (MEDEIROS; RAISDORFER; HOPPE FILHO, 2017).

Na Tabela 4, pode-se observar o desenvolvimento da resistência à compressão de corpos de prova com diferentes concentrações de Sílica ativa ao longo do tempo. A sílica confere ao concreto uma alta resistência inicial, devido à sua ação como fíler a qual confere ao concreto melhor empacotamento, porém em maiores concentrações o desenvolvimento da resistência cessa, pois quanto maior o teor de adição, mais densa será a mistura, portanto a água terá mais dificuldade em chegar ao cimento não hidratado ou às partículas de sílica ativa (NEVILLE, 2016)

Tabela 4 – Desenvolvimento da resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos ao longo do tempo e com diferentes concentrações de sílica ativa

| <b>Resistência à compressão de concreto com diferentes teores de sílica ativa</b> |    |    |    |    |
|---|----|----|----|----|
| IDADE   | 0  | 10 | 15 | 20 |
| 1 dia   | 26 | 25 | 28 | 27 |
| 7 dias  | 45 | 60 | 63 | 65 |
| 28 dias   | 56 | 71 | 75 | 74 |
| 56 dias   | 64 | 74 | 76 | 73 |
| 91 dias   | 63 | 78 | 73 | 74 |
| 182 dias  | 73 | 73 | 71 | 78 |
| 1 ano   | 79 | 77 | 70 | 80 |
| 2 anos  | 86 | 82 | 71 | 82 |
| 3 anos  | 88 | 90 | 85 | 88 |
| 5 anos  | 86 | 80 | 67 | 70 |

Fonte: (NEVILLE, 2016)

### 2.3.2 Pozolanas

Pozolana é um material silicoso ou silicoso-aluminoso, que pode ter sua origem natural como cinzas vulcânicas, terras de diatomáceas calcinadas, cinzas volantes ou barro queimado. Também pode ser obtida artificialmente a partir de processos industriais ou de tratamento térmico de materiais que lhe adicionam atividade pozolânica, sendo a mais comum as cinzas de combustível pulverizadas, além das pozolanas calcinadas, que são resultados da calcinação de certas argilas submetidas à elevadas temperaturas, como o metacaulim. No Quadro 3, estão representadas as classes dos materiais pozolânicos, segundo a NBR 12653:2014.

Quadro 3 – Classificação dos materiais pozolânicos segundo a NBR1263:2014.

| Classificação | Descrição  |
|---------------|--|
| N             | Pozolanas naturais e artificiais, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, cherts silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas. |
| C             | Cinza volante produzida pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas.  |
| E             | Qualquer pozolana que difira das classes anteriores.   |

Fonte: NBR 1263 (ABNT,2014)

A pozolana possui baixo poder aglomerante em si, porém quando na presença de umidade e quando as partículas estão na suas dimensões mais finas e a sílica na sua forma amorfa, possui alto poder de reação com o hidróxido de cálcio formando os silicatos de cálcio hidratado (COIMBRA; DOS SANTOS; MORELLI, 2002).

Pode-se observar a reação química representada pelas Equações 7 e 8, que ocorre entre a sílica ( $\text{SiO}_2$ ) ou a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) com o hidróxido de cálcio [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ] da pasta de cimento, em que CAC é o aluminato de cálcio.



Logo, atividade pozolânica é o resultado da reação de alguns materiais com o hidróxido de cálcio presente no cimento, no qual resulta em silicato de cálcio hidratado sendo este um dos principais responsáveis em conferir ao concreto resistência mecânica.

Adições minerais como a pozolana tem suas vantagens ambientais e

econômicas, tendo em vista que é um material de custo baixo em comparação com o cimento Portland. Com a adição de materiais pozolânicos, diminui-se o uso de cimento, reduzindo, portanto, a produção que causa degradação, promovendo a redução da emissão de gás carbônico. Além dessas vantagens, a pozolana ao aumentar as taxas de C–S–H, confere ao concreto maiores resistências mecânicas, qualidade pelo adensamento, sela os poros, vedando o concreto do ataque de agentes externos, mitigação da reação álcali-agregado, redução da ocorrência da eflorescência (MEDINA, 2011).

#### **2.4 Estado da arte: adições minerais como estratégia no controle de ataque químico em concreto**

Foi realizado um levantamento bibliográfico com o objetivo de fazer um estudo exploratório que aborde os principais achados de diferentes autores sobre o tema deste trabalho. Nesse sentido, JIUNG e NIU (2019) investigaram as reações ocorridas no concreto em uma solução com 10% de sulfato de sódio. Na realização dos experimentos, utilizaram adição mineral de cinza volante, variando-se a taxa entre 10%, 20% e 30%, assim como também a adição de escória de alto forno com taxas de 20% e 30% em outros corpos de prova. Para comprovação dos resultados da reação dessas adições no concreto, foi realizado os testes de perda de peso, a relação do módulo de elasticidade dinâmico, a perda de resistência a compressão, a espessura da camada de dano, o MEV, DRX e a análise térmica.

O trabalho de JIUNG e NIU (2019) teve como conclusão principal o fato de que o grau de deterioração do concreto diminui com o aumento do teor de cinzas volantes. Contudo, obteve os melhores resultados com uma taxa de adição de 20%, enquanto o de 30% obteve um desempenho significativamente abaixo. Por outro lado, a adição de escória, com a taxa máxima de 30%, obteve o melhor resultado contra a deterioração do concreto sob ataque de sulfato de sódio (JIANG; NIU, 2019).

No estudo desenvolvido por COSTA (2019), comparou-se os efeitos da adição de escória de aciaria, do metacaulim e da sílica ativa, frente à exposição de corpos de prova à soluções agressivas de NaCl, por períodos de 35 e 55 dias. Todas as matrizes foram caracterizadas física e quimicamente, por meio de avaliação do índice de vazios, massa específica, resistência à compressão e resistência à compressão por tração diametral. Em seguida, realizou-se a análise da profundidade

de penetração de íons cloreto nos corpos de prova como também da capacidade de formar sal de Friedel. No quesito durabilidade, o concreto produzido com escória de aciaria obteve menor profundidade de penetração de íons cloretos em relação aos outros compósitos. Além disso, os corpos de prova com essa mesma composição tiveram resultados semelhantes aos com adição de sílica ativa quanto a formar cloretos combinados (sal de Friedel). Comparativamente, os corpos de prova em que o metacaulim foi adicionado, obteve-se maiores teores de cloreto combinado e, portanto, é a adição menos recomendada.

IRICO *et al.* (2020) relatou um estudo em que se investigou os efeitos da adição de escória de alto forno granulometricamente otimizada no concreto autoadensável frente ao ataque de ácido sulfúrico. Para isso, foram analisados três métodos: (i) método de pH constante, porém com a chance de testar diferentes geometrias de amostra e ataque aprimorado de sulfato; (ii) método de sulfato constante, o qual o pH é controlado manualmente o pH e permite a fácil análise dos íons lixiviados em solução; Método *Test for Accelerated Degradation* (TAP), no qual é simulado um condição real com ciclos úmidos e secos, controle manual de pH. Nesta pesquisa, concluiu-se que o uso de cinzas volantes contribuiu positivamente contra o ataque ácido, pois na observação eletrônica as cinzas resistiram ao ataque do ácido. Logo, é aconselhável a adição no compósito para aumentar a durabilidade de estruturas expostas à meios ácidos (IRICO *et al.*, 2020).

No estudo feito por Hoppe Filho *et al.* (2015), analisou-se os efeitos da substituição parcial no teor de 10% do cimento CP V – ARI por sílica ativa, metacaulim, sílica de casca de arroz, fíler calcário e quartzoso, além do resíduo de cerâmica vermelha, com diferentes finuras contra ataques de sulfato de sódio. Caracterizou-se física e quimicamente os compósitos. Além disso, aferiu-se o Índice de Atividade Pozolânica (IAP), Ensaio do Chapelle modificado e para medir a resistência ao ataque de sulfato de sódio foi analisada a variação dimensional de barras de argamassa expostas. Como resultados mais relevantes, Hoppe Filho *et al.* (2015) relatou que as substituições à base de sílica ativa, sílica de casca de arroz e o fíler quartzoso obtiveram a redução para valores aceitáveis de expansão, logo, representando maior resistência ao ataque por sulfatos.

SANTANA e CABRAL (2019) realizaram um estudo, no qual foi analisado os efeitos do uso do *Spray Dryer Ash* (SDA), que é uma cinza volante proveniente dos gases de combustão da usina termelétrica do Pecém. Essas cinzas, ao passarem por

um dessulfurizador, misturam-se com produtos sulfurosos, prejudicando o uso desse resíduo em outras aplicações. Foram, então, analisados corpos de prova com substituição da massa de cimento em taxas de 0%, 5%, 10% e 20% por meio de ensaio de resistência à compressão e a variação volumétrica devido ao ataque de sulfatos, além da caracterização do SDA por meio de ensaio de FRX, da determinação da massa específica, da MEV e do DRX. Concluiu-se, assim, que uma adição de 20% de SDA aumenta a resistência à compressão do concreto sem consequência quanto ao ataque por sulfatos, enquanto adições de 5% ou 10% se comportaram de forma similar a um concreto sem adições de SDA.

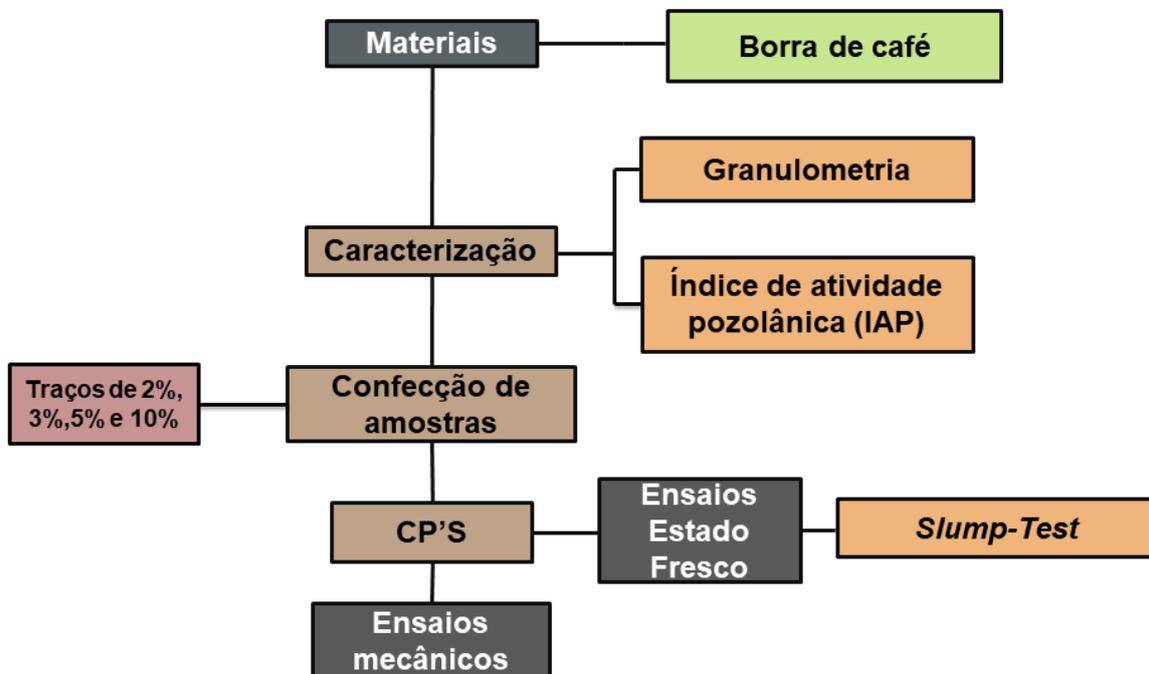
BREKAILO *et al.*(2019) realizou um estudo para avaliar o potencial da adição do resíduo de cerâmica vermelha e de concreto, no qual foi utilizado como referência o concreto com adição de fíler calcário. Para a análise desses resíduos, fez-se o ensaio de IAP com cal, índice de desempenho (ID) com cimento, teor de hidróxido de cálcio fixado no Chapelle modificado e a caracterização por DRX. Os resultados com o resíduo de cerâmica vermelha atenderam aos pré-requisitos físico-químicos para pozolanas, assim como também IAP com cal, ID com cimento. Porém obteve baixa reatividade de acordo com o DRX, além de não atender aos requisitos mínimos do ensaio de Chapelle. Logo, apontou-se que o resíduo de cerâmica vermelha possui potencial pozolânico. Quanto ao pó de concreto, não se obteve resistência à compressão acima da mínima estabelecida por norma, como também confirmou seu caráter inerte. Por fim, quanto ao fíler calcário, obteve-se resultados semelhantes ao pó de concreto quanto a ser quimicamente inerte, mas com desempenho inferior no que diz respeito ao parâmetro pozolanicidade (BREKAILO *et al.*, 2019).

De acordo BARROS *et al.* (2019), em um estudo realizado acerca da adição de resíduos de rochas ornamentais como agregado na argamassa, especialmente o quartzito, analisou-se a durabilidade quando atacado por sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). Para isso, avaliou-se a variação dimensional dos corpos de prova quando imersos em solução de sulfato de sódio, de acordo com os procedimentos descritos pela NBR 13583, além de testes de resistência à compressão simples, DRX e análise termogravimétrica e diferencial. A partir dos ensaios, verificou-se o aumento da resistência mecânica e expansões dimensionais. Entretanto, os corpos de prova sofreram ataques por sulfato, porém não o bastante para deteriorar mecanicamente os corpos de prova.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo está dividido em duas abordagens. A primeira envolve uma sequência de experimentos que estão divididos em etapas organizadas, conforme o esquema representativo da Figura 9. A segunda se trata de um levantamento bibliográfico acerca de adições minerais em pasta cimentícia com o objetivo de retardar os ataques químicos.

Figura 9 – Fluxograma que representa a sequência operacional do desenvolvimento do estudo



Fonte: Autor.

#### 3.1 Classificação da pesquisa

A presente pesquisa é classificada quanto à natureza como aplicada, pois segundo Silva (2004), uma pesquisa aplicada gera produtos com finalidades imediatas decorrente de pesquisa básica e de tecnologias existentes, as quais resultam em conhecimentos que serão aplicados em problemas específicos, que no presente trabalho são a carbonatação e o ataque por cloretos.

A abordagem foi quantitativa, pois os resultados foram avaliados pelos produtos numéricos dos experimentos e os objetivos são descritivos e explicativos,

uma vez que, segundo Provdanov e Freitas (2013), as relações entre o fenômeno e as variáveis serão apenas observados e registrados sem interferência, além de ser explicado os porquês das coisas e suas causas, mediante análise e interpretação dos acontecimentos.

O procedimento de pesquisa será experimental, pois o objeto será influenciado por variáveis pré-determinadas, além de ser definido as formas de controle e de observação que as variáveis resultam no objeto de estudo (PROVDANOV; FREITAS, 2013). As práticas experimentais se situaram no Núcleo de Práticas Tecnológicas (NPT) da Unichristus.

Na segunda etapa deste trabalho, foi realizado um levantamento bibliográfico, uma revisão integrativa da literatura, com a finalidade sintetizar resultados obtidos em pesquisas sobre uso de adições minerais como estratégia no controle de ataques químicos ao concreto, de maneira sistemática, ordenada e abrangente. É denominada integrativa porque fornece informações mais amplas sobre um assunto, constituindo, assim, um corpo de conhecimento (ERCOLE; MELO; ALCOFORADO, 2014). Deste modo, utilizou-se os descritores *concrete*, *mineral* e *chemical attack*, na língua inglesa e portuguesa, com restrição de ano entre 2019 e 2020. A seleção dos artigos foi feita com base na leitura de seus respectivos títulos e resumos. Essa parte da pesquisa é classificada, quanto aos fins, como exploratória, pois visa aprofundar o conhecimento sobre o tema. Além disso, tem uma abordagem qualitativa.

## **3.2 Métodos**

### *3.2.1 Granulometria*

A caracterização granulométrica do café é necessária, pois para se utilizar como adição no cimento, o material deve ter distribuição semelhante ou igual à do cimento.

Primeiramente, o resíduo da borra de café foi levado a estufa por 24 h, em uma temperatura de 110 °C para a completa secagem das amostras, de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2005). Após a secagem, realizou-se a caracterização das amostras por meio do ensaio granulométrico pelo método de peneiramento, utilizando-se peneiras com aberturas de 4,76; 2; 1,19; 0,59; 0,42; e 0,149 mm, de acordo com

os parâmetros estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2005), a qual rege as diretrizes para caracterização dos agregados utilizados no concreto.

Determinou-se a massa específica dos resíduos da borra de café, segundo a NBR 16605 (ABNT, 2017), a qual determina os métodos para se obter a massa específica de Cimento Portland. A amostra foi peneirada na peneira #150mm. O frasco de Le Chatelier foi enchido de Xilol até a marca de 1cm<sup>3</sup> e submetido à um banho termorregulador até o equilíbrio término por no mínimo 30 min, após isso foi realizada a leitura da marca V<sub>1</sub>.

No frasco de Le Chatelier, foi adicionada uma massa (m) de no mínimo 60 g, de tal forma que o volume seja marcado entre 18 cm<sup>3</sup> e 24 cm<sup>3</sup>. Feito isto, o frasco foi tampado e agitado de forma que todas as borbulhas de ar sumissem. Fez-se a leitura da marca V<sub>2</sub>. Os resultados obtidos a partir desse experimento permitem o cálculo da massa específica ( $\gamma$ ) se aplicando a Equação 9.

$$\gamma = \frac{m}{V_2 - V_1} (\text{g/cm}^3) \quad (9)$$

### 3.2.3 Índice de Atividade Pozolânica com cal (IAP)

A determinação da atividade pozolânica da borra de café foi realizada conforme especificado pela NBR 5751 (ABNT, 2015). Após a secagem na estufa em temperatura de 110°C, foram confeccionados três corpos de prova com um volume de material pozolânico duas vezes maior que o de Hidróxido de Cálcio, sendo esta taxa fixada. Misturou-se até ficar bem homogeneizada durante 2 min. Em seguida, adicionou-se água de amassamento em diferentes concentrações e areia, empregando o tempo de amassamento de acordo com as recomendações da NBR 7215 (ABNT, 2019).

Ao fixar as taxas de material particulado e variar o volume de água de mistura, interferiu na resistência à compressão, pois houve interferência na porosidade do sistema, alterando a sua capacidade de ser comprimida (FILHO *et al.*, 2017).

Posteriormente, realizou-se o controle do processo de cura com diferentes temperaturas e foram realizados os testes de compressão, conforme a NBR 7215 (ABNT, 2019). Para a certificação do ensaio, deve-se atender as seguintes condições:

as três resistências iniciais devem ser superiores a 6 Mpa; o cálculo da resistência média deve apresentar o desvio relativo máximo, não excedendo 6%; e deve ser calculada a massa específica, a área específica e o resíduo na peneira de 45 nm do material pozolânico.

### 3.2.6 *Slump-Test*

O ensaio do *Slump-test* foi feito de acordo com a NBR NM 67 (ABNT, 1996), no qual anteriormente ser realizado o ensaio, o molde e a placa de base são umedecidos. O molde foi enchido em três camadas aproximadamente iguais e cada camada é compactada com 25 golpes com uma haste de socamento. Feito isto, o molde é levantado cuidadosamente na direção vertical e imediatamente é aferido o abatimento por meio da medição da diferença entre a altura do molde e a altura do eixo do corpo de prova.

## 3.3 Materiais

Neste tópico, estão expressas as caracterizações dos materiais utilizados na produção de cada traço.

### 3.3.1 Cimento

Foi utilizado o cimento CP II Z-32 RS, com uma concentração de pozolana entre 6 a 14%, além de outras caracterizações na Tabela 5.

Tabela 5 – Caracterização do cimento

| Propriedades Físico-Mecânicas                 | Especificação Norma (NBR 11.578) |
|---|----------------------------------|
| Área específica                               | 3844 cm <sup>2</sup> /g          |
| Massa específica                              | 2,97 g/cm <sup>3</sup>           |
| Finura- Resíduo na peneira de 0,075 mm (#200) | 3,50%                            |
| Finura- Resíduo da peneira de 0,044 mm (#325) | 12,80%                           |
| Início de pega                                | 2:15 h:min                       |
| Fim de pega                                   | 3:15 h:min                       |
| Expansibilidade de Lê Chatelier- A quente     | 0                                |
| Resistência aos 7 dias                        | 24,9 Mpa                         |
| Resistência aos 14 dias                       | 32,0 Mpa                         |
| Resistência aos 28 dias                       | 37,5 Mpa                         |

Fonte: Fabricante (2018).

### 3.3.2 Borra de café

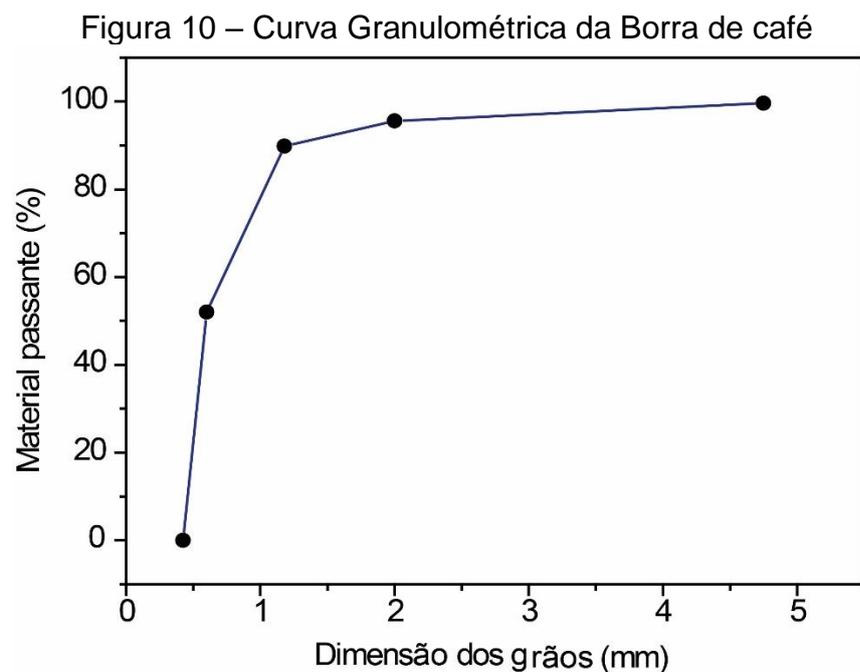
O resíduo da borra de café utilizado foi fornecido por uma padaria e é proveniente de café não adoçado. Corresponde à parcela que passou na peneira nº 4 de abertura 4,75mm, de acordo com a ABNT, pois é a faixa granulométrica que mais se assemelha ao cimento, a qual será empregada para confecção dos corpos de prova e foi obtida após a passagem da água fervente sem açúcar.

Conforme a NBR 7211(ABNT,2005) e a NBR 16605 (ABNT, 2017), foram determinados os dados granulométricos e feita sua curva de granulometria (Figura 11). Obteve-se também a massa específica da borra de café (Figura 12), com resultado de 1,45 g/cm<sup>3</sup>.

Tabela 6 – Dados de granulometria obtidos no laboratório

| Peneira (mm) | Retida (g) | Retida (%) | Passante (%) |
|--------------|------------|------------|--------------|
| 4,75         | 2          | 0,4        | 99,6         |
| 2            | 20         | 4          | 95,6         |
| 1,18         | 29         | 5,8        | 89,8         |
| 0,6          | 189        | 37,8       | 52           |
| 0,425        | 260        | 52         | 0            |

Fonte: Autor.



Fonte: Autor.

Figura 11 – Ensaio de massa específica em que se adicionou um volume de 22,5 ml para 32 gramas de borra de café.



Fonte: Autor

### 3.3.3 Areia Natural

Foi utilizada areia natural obtida em depósito de construção da cidade de Fortaleza-CE. Foram realizados os testes para determinação do módulo de finura, massa específica, massa unitária em estado solto e compactado, além do teor de material pulverulento, segundo suas normas correspondentes.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico foram expostos os resultados de *slump test*, de compressão axial e de IAP, nos quais foram discutidas as possíveis justificativas dos efeitos da adição do resíduo da borra de café no concreto, quanto aos aspectos de cada ensaio.

### 4.1 *Slump-Test*

Visando analisar as condições de trabalhabilidade, foi realizado o *slump test* para verificar os níveis de consistência. No Traço padrão, foi utilizado 1:2:2:0,5, sem nenhum tipo de aditivo, depois foi confeccionado com 0,57% de aditivo superplastificante e outro com 1,5 % de aditivo. Para o traço com adição de 5% de borra de café e 0,8% de aditivo (Traço 1), o *slump test* obteve resultado menor que 1 cm (Figura 13). Tendo em vista o baixo resultado, foi adicionado mais 0,7% de aditivo (Traço 2), resultando em um *slump* de 6 cm (Figura 14).

Figura 12 – *Slump test* para 0,8% de aditivo



Fonte: Autor

Figura 13 – *Slump test* de 6 cm para 1,5% de aditivo



Fonte: Autor

Para o Traço 3, aumentou-se a adição de borra de café para 10%, mantendo-se constante a quantidade de água. O *slump* também foi menor que 1 cm (Figura 15). Assim, foi adicionado 200 gramas de água, mas que não houve alteração do *slump* (Figura 16).

Figura 14 – *Slump* menor que 1 cm para 3,5kg de água



Fonte: Autor

Figura 15 – *Slump* menor que 1 cm para 3,7 kg de água



Fonte: Autor

O traço padrão estabelecido como 1:2:2:0,5 (cimento, areia, brita e água, respectivamente) foi alterado devido à trabalhabilidade ter sido prejudicada pelo baixo *Slump*, na maioria dos casos menores que 1 cm apesar da adição de superplastificante. Na Tabela 7, é possível verificar os valores de *slump* correspondentes para cada valor de aditivo e de água utilizados no traço.

Tabela 7 – Variação do *Slump* em relação à quantidade de borra de café adicionada e aditivo

| Traço | Adição Café (%) | Aditivo (%) | Água (kg) | <i>Slump</i> (cm) |
|-------|-----------------|-------------|-----------|-------------------|
| 1     | 5               | 0,8         | 3,5       | <1                |
| 2     | 5               | 1,5         | 3,5       | 6                 |
| 3     | 10              | 1,5         | 3,5       | <1                |
| 4     | 10              | 1,5         | 3,7       | <1                |
| 5     | 2               | 0,57        | 3,5       | 13                |
| 6     | -               | 0,57        | 3,5       | 18,5              |

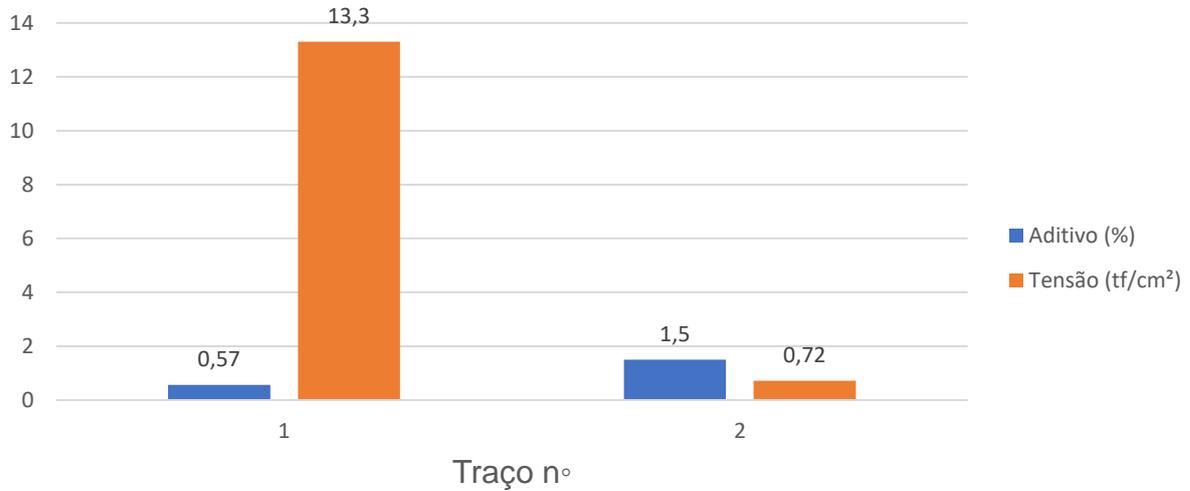
Fonte: Autor

O baixo *slump*, provavelmente se justifica pelas características morfológicas do resíduo da borra de café que apresenta uma estrutura visualmente porosa e com partículas irregulares, mesmo passando pelo torreamento e peneiramento antes da mistura do traço, como também a alta absorção de água decorrente da adição do resíduo da borra de café. Tendo isso em vista, essa elevada absorção de água é explicada pelo fato de a casca de café presente nesse resíduo de borra de café tem a capacidade de absorver água, para que mantenha, a relação de equilíbrio entre seu teor de umidade e a umidade relativa do ar, logo, devido ao processo de secagem, essa borra de café eleva de forma significativa a demanda por água (VIEIRA, 2015).

## 4.2 Resistência à compressão

Na Figura 17, estão relacionados os resultados, após 15 dias de cura dos corpos de prova com Traço padrão, sem adição de café e com alterações nas concentrações de aditivo superplastificante.

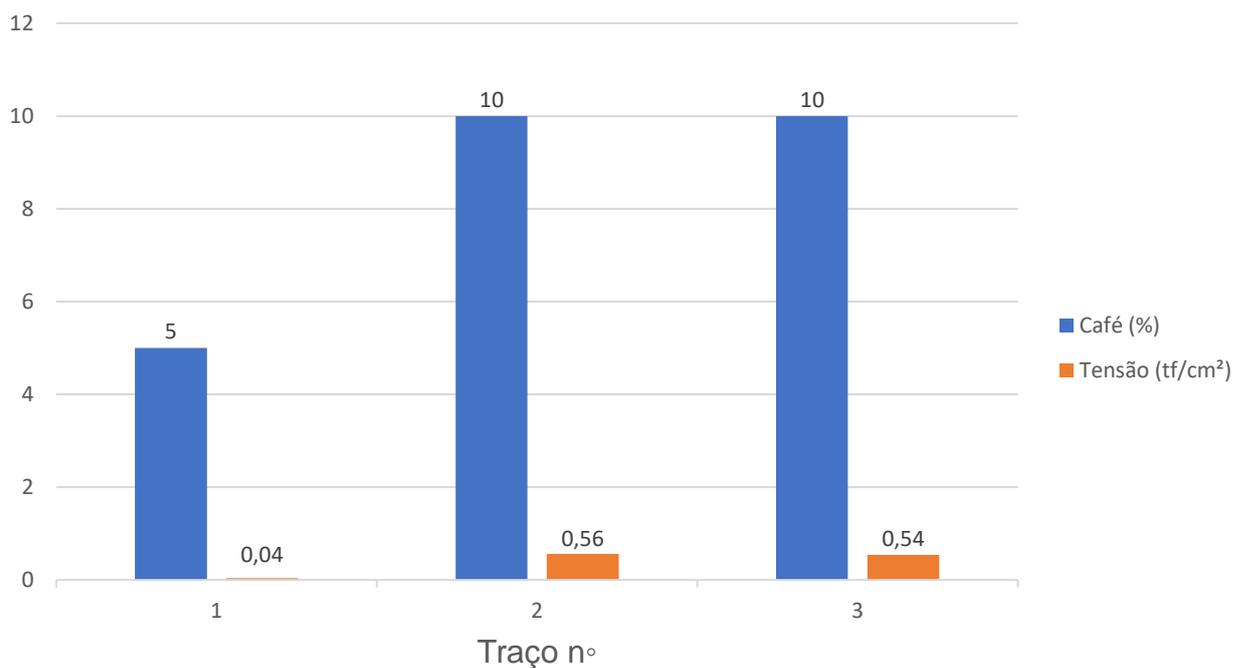
Figura 16 - Teste de compressão do Traço Padrão sem adição de borra de café e com variação na taxa de aditivo superplastificante



Fonte: Autor.

Foram submetidos ao teste de resistência à compressão três corpos de prova, os quais dois tem na sua composição 10% de adição de café e um apresenta 5% desse resíduo, todos estes aos 7 dias de cura. Na Figura 18, pode-se observar as tensões suportadas por cada traço, variando-se a taxa de adição de borra de café e se mantendo constante o aditivo em 1,5%.

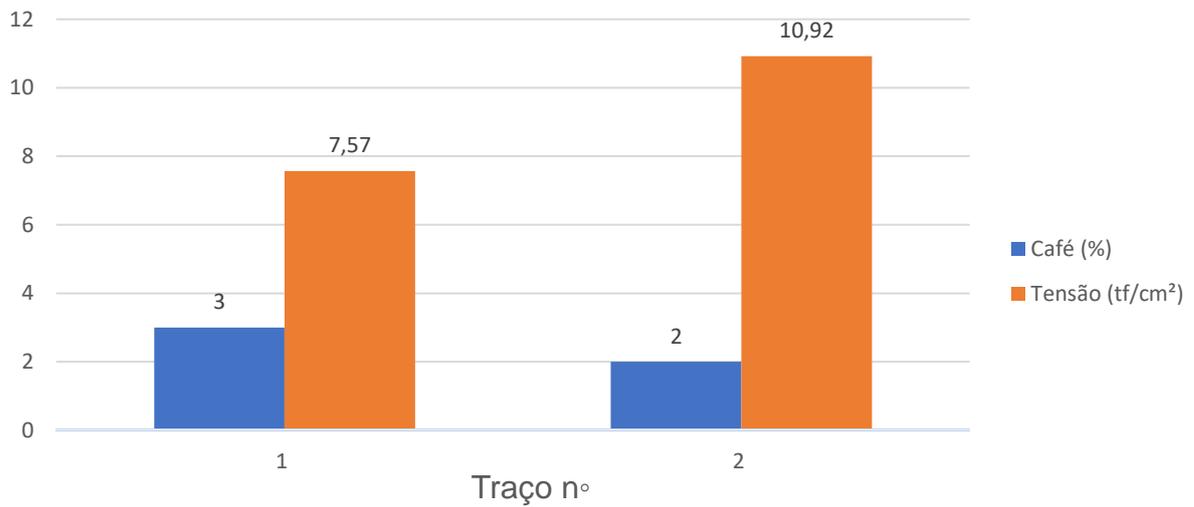
Figura 17 – Gráfico referente à taxa de adição de borra de café e a tensão de compressão suportada em cada traço aos 7 dias



Fonte: Autor.

Na Figura 19, estão relacionados os resultados de compressão axial suportada pelos traços, com variação da taxa de adição de café. Esses resultados foram obtidos com a taxa de aditivo superplastificante constante, em 0,57%.

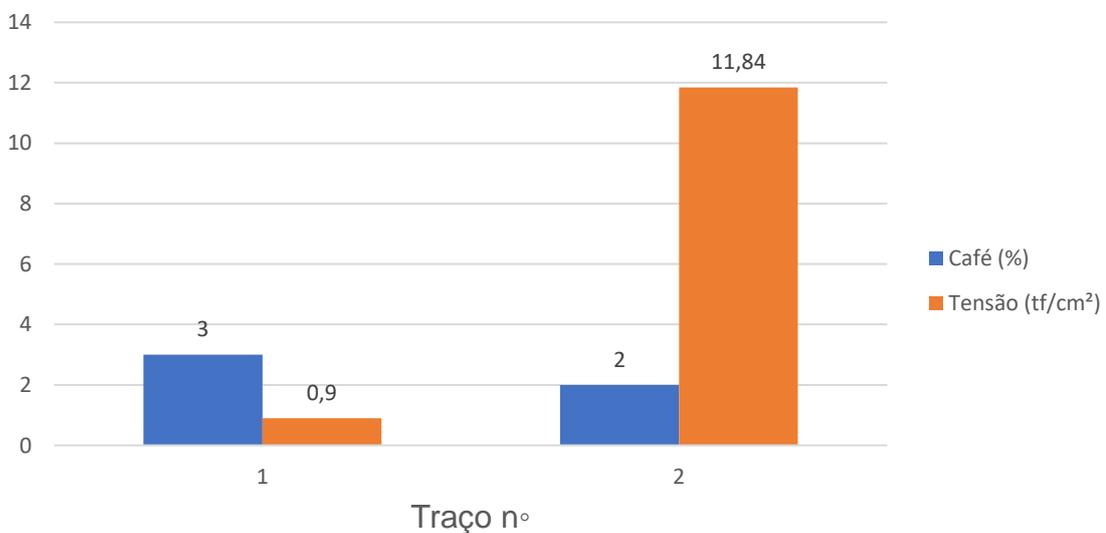
Figura 18 – Gráfico referente à taxa de adição de borra de café e a tensão de compressão suportada em cada traço aos 21 dias com 0,57% de aditivo



Fonte: Autor.

Na Figura 20, estão relacionados os resultados de compressão suportados pelos traços com variação da taxa de adição de borra de café e com a proporção de aditivo constante em 1,5% após 21 dias de cura.

Figura 19 – Gráfico referente à taxa de adição de borra de café e a tensão de compressão suportada em cada traço aos 21 dias com 1,5% de aditivo



Fonte: Autor

Os resultados indicam que o concreto com adição de borra de café, em maiores porcentagens de adição (5% e 10%), perdeu de forma alarmante sua resistência à compressão axial. Contudo, em taxas menores (2%), a capacidade de carga axial se manteve em valores próximos do normal, tendo em vista que se variou cerca de 10% da tensão suportada no traço padrão, como pode-se observar na Figura 19 e na Figura 20.

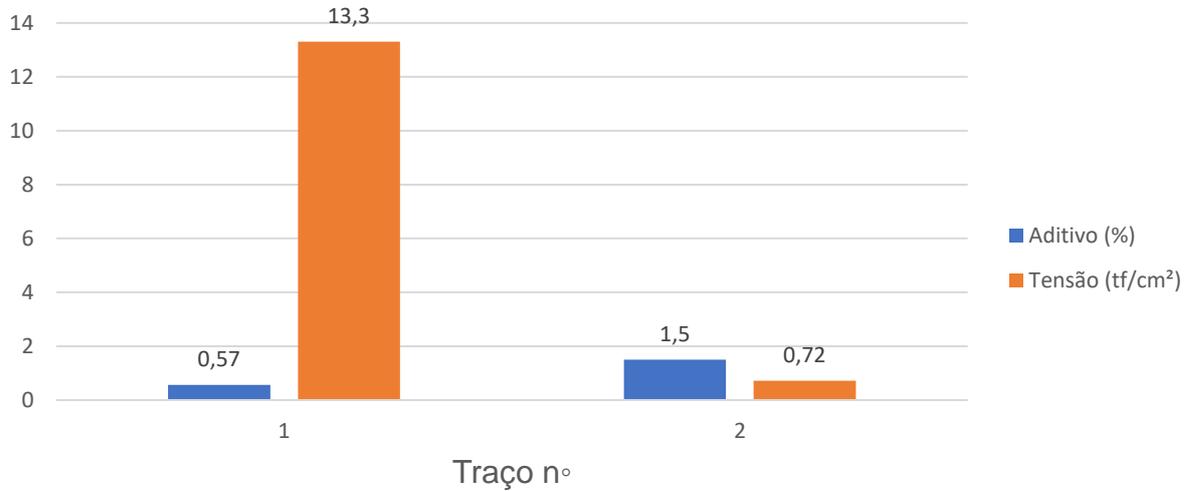
O resíduo da borra de café, objeto de estudo desta pesquisa, não atende aos requisitos físicos da NBR 12653 (ABNT, 2016a). Sugere-se que a estrutura cristalina desse resíduo confere baixa atividade pozolânicas ao material, logo, colaborando para que a adição desse composto não alcançasse resistência à compressão axial maior que os valores observados no Traço padrão. Porém vale ressaltar que a perda de resistência para taxas de adição de 2% foi de menos de 11%.

Outro fator que poderia justificar a queda de resistência do concreto em maiores taxas de adição é a alta capacidade do resíduo da borra de café tem de absorver água, devido à sua característica microestrutural. Logo, no tempo de cura essa água ao ser expelida do concreto, aumenta sua porosidade, assim, diminuindo a sua matriz responsável em conferir resistência mecânica.

Resultado similar a esse foi observado por Kuo *et al.* (2013), no qual ao examinar o comportamento de concretos com ostras, também houve uma diminuição da resistência devido à característica microestrutural do material que elevou sua taxa de absorção de água.

Na Figura 21, estão relacionados os resultados, após 15 dias de cura dos corpos de prova com Traço padrão, sem adição de café e com alterações nas concentrações de aditivo superplastificante.

Figura 20 - Teste de compressão do Traço Padrão sem adição de borra de café e com variação na taxa de aditivo superplastificante



Fonte: Autor.

### 4.3 Índice de Atividade Pozolânica (IAP)

No final do tempo de cura de 7 dias do teste de IAP, ao se tentar retirar o CP do molde, a mistura se desfez (Figura 21). Sugere-se que esse fato se deve a dois possíveis fatores: (i) a homogeneização foi feita incorretamente, devido a utilização de ferramentas adaptadas da norma; e/ou (ii) a quantidade insuficiente de água na mistura. Quanto ao último fator, mesmo tendo sido utilizado mais de 260 g de água, a mistura mostrou-se, mais uma vez, incapaz de atender os requisitos físicos da NBR 12653 (ABNT, 2016a).

Figura 21 – Falha do teste de Índice Atividade Pozolânica



Fonte: Autor.

#### **4.4 Dificuldades na produção do TCC**

Os ensaios para caracterização química e de desempenho do resíduo da borra de café quanto ao tempo de pega, FRX e a reologia não foram realizados devido à quarentena decretada pelo Governo do Estado do Ceará diante da pandemia do COVID-19. Além dessas medidas, não foi possível realizar novamente o teste de IAP, assim como também o ensaio de desempenho da adição desse resíduo contra a carbonatação e o ataque por cloretos, já que foram paralisadas as atividades dos laboratórios do Núcleo de Práticas Tecnológicas (NPT), localizados no Centro Universitário Christus.

## 5 CONCLUSÃO

O uso de borra de café como adição biológica não atua positivamente na composição do concreto de acordo com os resultados dos ensaios ao qual foi submetivo. Apesar de não ter sido possível concluir todos os ensaios, os dados qualitativos indicam que esse resíduo, mesmo tendo passado pelo processo de torreamento e secagem, precisa ser aquecido a uma temperatura suficiente para se obter as cinzas do material.

A partir dos resultados, conclui-se que, para taxas de 2% de adição do resíduo da borra de café, a capacidade de compressão axial não é afetada negativamente. Contudo, taxas acima de 5% torna-se inviável o uso dessa adição, pois os corpos de prova não superaram o valor de 1 MPA com 7 dias de cura.

A mudança da taxa de absorção da água da mistura, mesmo utilizando aditivos superplastificantes, ainda não fornece um *slump* satisfatório, indicando que a borra interfere negativamente na trabalhabilidade, além de promover o comprometimento estrutural da peça, pois a cura do concreto se estende para prazos fora dos estabelecidos por norma. Ocorre também, com a adição do resíduo avaliado, a perda de resistência à compressão.

O tempo de pega do concreto com adição de borra de café aumenta consideravelmente, distanciando-se dos valores máximos estabelecidos pela norma vigente. Sugere-se que essa retardação ocorre devido à possível presença de impurezas orgânicas na composição do resíduo. Mesmo tendo passado pela torragem em sua produção e a secagem em estufa, conclui-se que é necessária a queima a uma temperatura suficiente para eliminar toda a matéria orgânica.

O ensaio de IAP não fornece conclusões consistentes, pois as observações sugerem falta de materiais adequados para atender à norma regulamentadora, que garantem a correta homogeneização dos materiais (água, resíduo da borra de café e a cal). Além disso, a alta absorção de água comprometem a atividade pozolânica do material.

Esse estudo exploratório evidenciou a importância de se investigar o uso de adições minerais no sentido de melhorar as propriedades do concreto, especialmente, a resistência aos ataques de substâncias químicas agressivas. Além de conferir caráter sustentável aos sistemas construtivos, em alguns casos pode-se concluir que o uso de resíduos com atividade pozolânica é uma estratégia eficiente

em retardar o ataque químico à composição do concreto.

Portanto, sugere-se como trabalhos futuros a avaliação das cinzas da borra de café quando a atividade pozolânica, garantindo a eliminação de qualquer tipo de material orgânico, e sua atuação contra a carbonatação e ao ataque por cloretos.

## REFERÊNCIAS

- ABRAMS, Duff Andrew. **Design of Concrete Mixtures**. Chicago, Structural Materials research Laboratory, 1918. (Lewis Institute Bulletin, 1).
- ANTUNES, M.; PACHECO, M. A. R.; GIOVANOLA, M. **Proposta de uma atividade experimental para a determinação do pH no Ensino Médio**. Caxias do Sul: 2006
- ARAUJO, A. *et al.* Carbonated and chloride contaminated concrete structure: the role of molybdenum in corrosion of stainless steel reinforcement. **Corrosão e Proteção de Materiais**, v. 32, n. 2, p. 42–49, 2013.
- Arruda, A. M. **Módulo de elasticidade de concretos produzidos com formações rochosas do Triângulo Mineiro**. 166 p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto- Especificação. Rio de Janeiro 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos- Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto- Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751**: Materiais pozolânicos- Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro ,2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.
- BARBOSA, M. P. *et al.* Determination of rheological parameters of mortar and concrete by alternative techniques Determinação de parâmetros reológicos de argamassas. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 4, n. 3, p. 440–480, 2011.
- BARROS, S. V. A. *et al.* Mechanical behavior and durability of mortars with quartzite and portland cement after sulfate attack. **Revista Materia**, v. 24, n. 4, 2019.
- BASTOS, P. **Estruturas de concreto I - Fundamentos do concreto armado**. p. 98, 2006.
- BELIK, W. *et al.* Crise Dos Alimentos E Estratégias Para a Redução Do Desperdício

No Contexto De Uma Política De Segurança Alimentar E Nutricional No Brasil **Planejamento e Políticas Públicas**, n. 38, 2012.

BEZERRA, I. M. T. *et al.* Aplicação da cinza da casca do arroz em argamassas de assentamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 6, p. 639–645, 2011.

Associação brasileira de cimento portland. **Guia básico de utilização do cimento portland**. 7.ed. São paulo, 2002. 28p.

BREKAILO, F. *et al.* Avaliação do potencial reativo de adições de resíduos de blocos de cerâmica vermelha e de concreto cominuído de RCD em matriz cimentícia. **Cerâmica**, v. 65, n. 375, p. 351–358, 2019.

CABRAL, A.; CAMPOS, A. Estudo da Agressividade do Ar em Fortaleza/CE. **Inovacon; COOPERCON-CE; SINDUSCON-CE; CIMENTO APODI; PEC/UFC**, p. 50, 2016.

CARVALHO, E. V. *et al.* Radiopacity and mechanical properties of dental adhesives with strontium hydroxyapatite nanofillers. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, v. 101, n. September 2019, p. 103447, 2020.

COIMBRA, M. A; DOS SANTOS, W. N.; MORELLI, M. R. Recuperação de resíduos inorgânicos para a construção civil (Recovery of inorganic waste for civil construction). **Cerâmica**, v. 48, n. 306, p. 306, 2002.

CONRAD, W.; JULIUS-MAXIMILIANS, U. B. Fundamentos teóricos da técnica de análise espectrométrica por fluorescência de raios-x. **Manual ARL9900**, n. 1896, p. 15, 2007.

COSTA, L. C. B. Desempenho de concretos de escória de aciaria frente a ataque de cloretos. **Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil**, p. 80, 2019.

DIETRICH, Y. P.; TELES, C. R.; VIEIRA, G. L. Desempenho mecânico e análise da corrosão das armaduras em concretos produzidos com adição de resíduos de rochas ornamentais. **Revista Materia**, v. 22, n. 4, 2017.

ERCOLE, F. F.; MELO, L. S. DE; ALCOFORADO, C. L. G. C. Integrative review versus systematic review. **Reme: Revista Mineira de Enfermagem**, v. 18, n. 1, p. 9–11, 2014.

FELIX, E. F.; POSSAN, E. Balance emissions and CO2 uptake in concrete structures: simulation based on the cement content and type. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 11, n. 1, p. 135–162, 2018.

FERNANDES, S. E. *et al.* Cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBC) como adição mineral em concretos para verificação de sua durabilidade. **Revista Materia**, v. 20, n. 4, p. 909–923, 2015.

FERREIRA, C. R. *et al.* Comparative study about mechanical properties of structural standard concrete and concrete with addition of vegetable fibers. **Materials Research**, v. 20, p. 102–107, 2017.

FILHO, J. H. *et al.* Atividade pozolânica de adições minerais para cimento portland (Parte i): índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios-x (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e chapelle modificado. **Revista Materia**, v. 22, n. 3, 2017.

HELENE, P.; ANDRADE, T. Concreto de Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2. ed. São paulo: IBRACON, 2010. p. 909.

HERMANN, K. A. C. *et al.* Evaluation of the use of coffee grounds for use in cosmetic products. **Revista Virtual de Química**, v. 11, n. 6, p. 1810–1822, 2019.

HOFFMANN, A. T. **Influência da adição de sílica ativa, relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em concretos**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

HOPPE FILHO, J. *et al.* Concrete attack by sodium sulfate: Mineral additions as a mitigation tool. **Ceramica**, v. 61, n. 358, p. 168–177, 2015.

IRICO, S. *et al.* Severe sulfuric acid attack on self-compacting concrete with granulometrically optimized blast-furnace slag-comparison of different test methods. **Materials**, v. 13, n. 6, 2020.

JIANG, L.; NIU, D. The deterioration of admixture concrete in a sulphate environment. **Ceramics - Silikaty**, v. 63, n. 2, p. 149–156, 2019.

MALHEIRO, R. *et al.* Behaviour of cementitious matrices subjected to the combined action of chloride ions and carbonation. **Revista Materia**, v. 23, n. 3, 2018.

MEDEIROS, M. H. F. DE; RAISDORFER, J. W.; HOPPE FILHO, J. Influência da sílica ativa e do metacaulim na velocidade de carbonatação do concreto: relação com resistência, absorção e relação a/c. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 4, p. 125–139, 2017.

MEDEIROS, M. H. F. *et al.* Corrosion potential: influence of moisture, water-cement ratio, chloride content and concrete cover. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 10, n. 4, p. 864–885, 2017.

MEDINA, E. A. Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binários com Cimento Portland e hidróxido de cálcio. **(Dissertação de Mestrado)**. Universidade de São Paulo., p. 134, 2011.

MEHTA, P. KUMA.; MONTEIRO, PAULO J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e materiais**. 2. ed. São paulo: ibracon, 2014.

MUSSATTO, S. I. *et al.* A study on chemical constituents and sugars extraction from

spent coffee grounds. **Carbohydrate Polymers**, v. 83, n. 2, p. 368–374, 2011.

NAKAMURA, J. Tecnologia Aditivos e adições. **TÉCHNE**, p. 5–9, 2009.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** , São Paulo, 1997. 5. ed. São paulo: bookman, 2016.

PEREIRA, A. M. *et al.* Estudo das propriedades mecânicas do concreto com adição de cinza de casca de arroz. **Revista Materia**, v. 20, n. 1, p. 227–238, 2015.

PEREIRA, E. *et al.* Efeito da reação álcali-agregado (raa) associada ao ataque interno por sulfato (isa) na absorção e porosidade de compósito de matriz cimentícia. **Anais do 24º Fórum de Ensino e Pesquisa da Universidade**. 2018

PIRES, D. M. *et al.* Mechanical Resistance of Concretes With Partial Replacement of Large Aggregate By Waste of Civil Construction. **UNIJUI**, p. 1–5, 2014.

PROVDANOV, C. C.; FREITAS, E. C. DE. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Universidade FEEVALE, 2013.

SANTANA, R. A. DE A.; CABRAL, A. E. B. **Desempenho do concreto frente a adições de spray performance of concrete with addition of spray dryer ash from pecém ' s thermoelectric plant**. p. 1–10, 2019.

SANTOS, A. C. DOS *et al.* Estudo comparativo entre valores teóricos e resultados experimentais de módulo de elasticidade de concretos produzidos com diferentes tipos de agregado graúdo. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 3, p. 281–294, 2017.

SILVA, E. P. DA. Avaliação Do Potencial De Corrosão De Concretos Estruturais Produzidos Segundo As Prescrições Da Nbr 6118, Submetido a Ensaio De Corrosão Acelerado. 2010.

SILVA, L. KILVIA DA. **Levantamento de manifestações patológicas em estruturas de concreto armado no estado do Ceará**. [s.l.] Universidade Federal do Ceará, 2011.

SOBRAL, H. S. **Estudo técnico: Propriedades do concreto fresco**. 6. ed. São paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2000.

VIEIRA, T. F. **Equilíbrio higroscópico da casca do café arábica**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.