



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA- CCET  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

THAÍS HORTIZ SANTOS ALVES

**ESTUDO BIBLIOGRÁFICO COMPARATIVO DOS PARÂMETROS  
FÍSICOS E QUÍMICOS QUE ATUAM NO PROCESSO DE CORROSÃO  
DAS ARMADURAS DE ESTRUTURAS DE CONCRETO COM USO DA  
LAMA VERMELHA.**

São Luís - MA

2024

THAÍS HORTIZ SANTOS ALVES

**ESTUDO BIBLIOGRÁFICO COMPARATIVO DOS PARÂMETROS FÍSICOS E QUÍMICOS QUE ATUAM NO PROCESSO DE CORROSÃO DAS ARMADURAS DE ESTRUTURAS DE CONCRETO COM USO DA LAMA VERMELHA.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Maranhão, para a obtenção do título de Engenheira Civil.

**Orientador:** Prof. Dr. Paulo César de Oliveira Queiroz.

**Coorientadora:** Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup> Maria Eliziane Pires de Souza.

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Alves, Thaís Hortiz Santos.

ESTUDO BIBLIOGRÁFICO COMPARATIVO DOS PARÂMETROS FÍSICOS E QUÍMICOS QUE ATUAM NO PROCESSO DE CORROSÃO DAS ARMADURAS DE ESTRUTURAS DE CONCRETO COM USO DA LAMA VERMELHA / Thaís Hortiz Santos Alves. - 2024.

42 f.

Coorientador(a) 1: Maria Eliziane Pires Souza.

Orientador(a): Paulo César de Oliveira Queiroz.

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Maranhão, Universidade Federal do Maranhão, 2024.

1. Lama Vermelha. 2. Corrosão. 3. Estrutura de Concreto Armado. 4. . 5. . I. Queiroz, Paulo César de Oliveira. II. Souza, Maria Eliziane Pires. III. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO

**ESTUDO BIBLIOGRÁFICO COMPARATIVO DOS PARÂMETROS FÍSICOS E QUÍMICOS QUE ATUAM NO PROCESSO DE CORROSÃO DAS ARMADURAS DE ESTRUTURAS DE CONCRETO COM USO DA LAMA VERMELHA.**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Maranhão com requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em : / / .

BANCA EXAMINADORA

---

**Prof. Dr. Paulo Cesar de Oliveira Queiroz**  
Orientador

---

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Eliziane Pires de Souza -**  
**UFMA**  
Co-orientadora

---

**Prof. Dr. George Fernandes Azevedo -**  
**UFMA**  
1º Membro Interno

---

**Prof. Dr. Wener Miranda Teixeira dos**  
**Santos - UFMA**  
1º Membro Externo

*Dedico aos meus pais, Aucinilde e Celso,  
por sempre estarem comigo em todos os momentos e aos meus irmãos.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por me capacitar a ser mais forte e aos pais que Ele me honrou, minha mãe Aucinilde e meu pai Celso. Sem eles eu não teria conquistado um terço das minhas vitórias, por seus amor, apoio, conselhos e carinho. Eu tenho muita gratidão. Aos meus irmãos por serem minha base e apoio nos momentos de aflições. Agradeço a Deus por minha Família. Ao professor Paulo César pelo apoio, orientações e amizade no decorrer da minha graduação e a professora Maria Eliziane. Aos meus amigos que me ajudaram nesta caminhada, em especial a Claudyane.

## RESUMO

A sílica ativa e a lama vermelha são adições de elevada reatividade que podem ser utilizadas como substituições parciais de cimento na fabricação de concreto. Estudos revelam a influência destas adições no prolongamento da vida útil das estruturas devido ao aumento da capacidade de resistência à penetração de íons cloreto, decorrente de microestruturas mais densas e compactas do que em estruturas de concreto produzidas com cimento Portland Comum. Este trabalho objetiva comparar os resultados de quatro amostras obtidas de quatro referências bibliográficas por meio da relação água/cimento, resistência à compressão, resistência à tração do concreto por adição sílica e substituição parcial do cimento por lama vermelha, para verificar a taxa de corrosão e penetração das armaduras do concreto. Desse modo, as amostras da Referência 1 foram verificadas o traço de concreto de 1,0:2,74:1,52 com água/aglomerante de 0,4 por substituição de 5%, 10%, 15% e 20% de cimento por lama vermelha. As amostras de Referência 2 foram estudadas o comportamento do traço de 1:3,29:1,85 pela substituição de cimento por lama vermelha e adição constante de metacaulim por relação água cimento constante de 0,4. A Referência 3, o traço unitário foi 1,0:1,61:1,61 com água/aglomerante de 0,36 e substituição parcial de cinza volante por lama vermelha nas dosagens de 0% a 100%, em incrementos de 25% . As amostras da Referência 4 foram estudadas a resistência à penetração dos íons cloreto em adições de 5% e 10 % de sílica ativa. Os resultados indicaram que há incrementos na resistência à compressão em relação as amostras controles em incrementos de lama vermelha, mas não supera as resistências adquiridas pela adição de sílica em 10%. Todavia, os resultados foram incertos, as variações foram não lineares e a variabilidade dos fatores na reatividade no concreto são imprevistas. Novos estudos devem ser amplificados. A substituição de 10% do cimento para ambas as amostras mostraram resultados significativos. Porém, deve-se avaliar o andamento dessas interações em tempos de curas maiores.

**Palavras-chave:** lama vermelha, corrosão, estrutura de concreto armado.

## ABSTRACT

Silica fume and red mud are high-reactivity additions that can be used as partial replacements for cement in concrete manufacturing. Studies reveal the influence of these additions on the duration of the useful life of the structures due to the ability to resist the penetration of chloride ions by the formation of denser and more compact structures than those presented in concrete structures produced with Common Portland cement. This work aims to compare the results of four samples obtained from four bibliographic references through the water/cement ratio, compressive strength, tensile strength of the concrete by addition of silica and partial replacement of the cement by red mud, to verify the corrosion rate and penetration of the concrete reinforcements. Thus, the samples of Reference 1 were verified the concrete mix of 1.0:2.74:1.52 with water/binder of 0.4 by substitution of 5%, 10%, 15% and 20% of cement by red mud. The Reference 2 samples were studied the trait behavior of 1:3.29:1.85 by replacing cement with red mud and constant addition of metakaolin by constant water-cement ratio of 0.4. At Reference 3, the unit trace was 1.0:1.61:1.61 with water/binder of 0.36 and partial replacement of fly ash by red mud in the dosages of 0% to 100%, in increments of 25%. The Reference 4 samples were studied the resistance to penetration of chloride ions in additions of 5% and 10% of silica fume. The results indicated that there are increases in compressive strength in relation to the control samples in red mud increments, but it does not exceed the strengths acquired by the addition of silica by 10%. However, the results were uncertain, the variations were nonlinear and the variability of the factors in the reactivity in the concrete are unforeseen. Further studies should be expanded. The replacement of 10% of the cement for both samples showed significant results. However, the progress of these interactions in times of greater healing should be evaluated.

**Keywords:** Red mud, corrosion, reinforced concrete structure.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fases de iniciação e propagação da corrosão. . . . .	16
Figura 2 – Processo de corrosão das estruturas. . . . .	17
Figura 3 – Representação esquemática do processo de carbonatação . . . . .	22
Figura 4 – Etapas do projeto . . . . .	25
Figura 5 – Composição dos cimentos de referência . . . . .	29
Figura 6 – % da Composição da Lama Vermelha e da Sílica ativa . . . . .	30
Figura 7 – Comparação dos ganhos de resistência à compressão aos 28 dias por Referência	31
Figura 8 – Imagem SEM de concreto com 0% LV e relação a/c de 0,4 . . . . .	32
Figura 9 – Imagem SEM de concreto com 10% LV com relação a/c de 0,4 . . . . .	32
Figura 10 – Resistência à compressão aos 56 dias por amostra de Referência . . . . .	33
Figura 11 – Incremento da resistência à tração entre 28 e 56 dias . . . . .	34
Figura 12 – Incremento da resistência à tração entre 28 e 56 dias da Referência 3 . . . . .	35
Figura 13 – Penetração do íons cloreto nas amostras das Referência 1 e 2. . . . .	36
Figura 14 – Potencial de Corrosão Referência 3. . . . .	36
Figura 15 – Teor de penetração de cloreto na amostra de Referência 4. . . . .	37

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Autores de referência no estudo das adições e aditivo em concreto.

Tabela 2: Traço da amostra de controle.

Tabela 3: Comparação entre as composições químicas dos cimentos de referência.

Tabela 4: Comparação entre as composições químicas das lamas vermelhas das referências 1, 2 e 3 e da sílica ativa de referência 4.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LV	Lama vermelha
CV	Cinza volante
MT	Metacaulim
SA	Sílica ativa
A.Graúdo	Agregado graúdo
REF	Referência
AG.MIÚDO	Agregado miúdo
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
SEM	(Scanning electron microscopy)- Microscópio eletrônico de varredura

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1	Problema	13
1.2	JUSTIFICATIVA	13
1.3	Objetivos	13
1.3.1	<b>Geral</b>	13
1.3.2	<b>Específicos</b>	13
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>15</b>
2.1	Mecânismo da corrosão	15
2.1.1	<b>Fatores físicos e químicos que influenciam o processo corrosivo</b>	18
2.1.1.1	<i>Temperatura: Congelamento e Descongelamento</i>	18
2.1.1.2	<i>Relação água aglomerante</i>	18
2.1.1.3	<i>pH</i>	19
2.1.1.4	<i>Compassidade/porosidade/permeabilidade</i>	19
2.1.1.5	<i>Difusividade de cloreto</i>	20
2.1.1.6	<i>Carbonatação</i>	21
2.1.2	<b>Influência das adições minerais na durabilidade do concreto</b>	22
2.1.2.1	<i>Sílica ativa</i>	22
2.1.2.2	<i>Bauxita: Lama Vermelha</i>	23
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>25</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>27</b>
4.1	Caracterização das amostras de controle	28
4.2	Resistência à compressão	31
4.3	Resistência à tração	34
4.4	Proposição dos testes de avaliação da corrosão submetidos às amostras de referência.	35
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>38</b>
<b>6</b>	<b>Sugestões para trabalhos futuros</b>	<b>39</b>
	<b>Referências</b>	<b>40</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Pesquisas que incluem métodos de avaliação da durabilidade por meio de adições e aditivos minerais nas estruturas de concreto armado em exposições severas são de interesse global para engenheiros projetistas, proprietários, pesquisadores e empresários que prestam serviços de manutenção de infraestruturas (RICHARD, 2020). A presença de íons cloreto e o processo eletroquímico da interação entre o aço carbono e o concreto geram grandes impactos econômicos quando influenciam na capacidade monolítica da estrutura. Dentre tantos processos, a carbonatação e a corrosão induzida por carbonatação são as principais patologias que geram perdas de segurança e altos custos de manutenção (TIAN et al., 2023). As interações químicas nos interstícios são fatores intervenientes para promover a despassivação da armadura de um concreto armado, assim como a interação física é intermediadora no processo.

Oferecer novas funcionalidades a resíduos de alta periculosidade são alternativas para reduzir fatores que causam efeitos nocivos ao meio ambiente. A representatividade da lama vermelha como passivo ambiental devido aos riscos ambientais de contaminação do solo, contaminação da água superficial e subterrânea por hidróxido de sódio, alumínio, agentes químicos, além a propagação do pó contendo elementos pesados e formação de poeira alcalina, em uma área de grande exposição, são exemplos de citações de problemas ambientais (CUNHA; CORRÊA, 2011). Por outro lado, a propensão do resíduo da bauxita como substituto parcial do cimento na fabricação de concreto estimam resultados significativos sobre as características físicas, químicas e mecânicas de um concreto Portland Comum (VENKATESH; NERELLA; CHAND, 2020). A contribuição da composição química rica em elementos que contribuem na reatividade do cimento e no incremento à resistência do concreto são valorizados como apostas para as futuras gerações das construções.

Naturalmente, a escolha adequada dos materiais, a fase de elaboração do projeto, execução, construção, manutenção e desempenho das estruturas até ao final da sua vida útil constituem os procedimentos mínimos das normas de construção civil para retardar quaisquer patologias (RICHARD, 2020).

Contudo, a complexidade das composições e as interações desses elementos atribui a esse processo o controle de várias variáveis em uma série de combinações. Como exemplo, a proteção das barras, controle da execução das estruturas, controle da cura, conhecimento das interações cimentícias entre aditivos e adições, relação água cimento e o cumprimento das

normas da construção civil são parâmetros que servem como avaliações no processo.

Neste contexto, o estudo da investigação dos resultados da ciência dos materiais em estruturas de concreto armado e do impacto das adições e dos aditivos minerais nas futuras gerações das construções embasam nas formas de substituição do cimento, garantindo-lhe a mesma qualidade, ao mesmo passo que contribui ao meio ambiente. Atualmente, emprego de técnicas não destrutivas são formas mais adequadas para as investigações das proposições consideradas, quanto a quantificação do desempenho mecânico e monitoramento das estruturas sob corrosão.

## 1.1 Problema

O estudo apresenta como problemática central: Qual a correlação entre os resultados dos testes de corrosão obtidos através de ensaios não destrutivos de concretos que apresentam substituições parciais de cimento por lama vermelha?

## 1.2 JUSTIFICATIVA

As ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto armado são problemas frequentes para gerar perdas na segurança, confiabilidade e durabilidade estrutural e, portanto, aumento dos custos de manutenção e reparos. E a necessidade de produzir estruturas mais sustentáveis implica na necessidade de propor novas funcionalidades a resíduos prejudiciais ao meio ambiente que garanta o mesmo desempenho ou superior as propriedades mecânicas, com ênfase na durabilidade.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Geral

Estudar comparativamente a influência da lama vermelha por adições secundárias nas propriedades físicas e químicas do concreto e a progressão da corrosão pelo ataque de íons cloreto.

### 1.3.2 Específicos

Comparar o desempenho mecânico do concreto e penetração a íons cloreto nas estruturas de concreto armado a partir dos resultados obtidos de quatro referências bibliográficas em

diferentes países pelas relações de:

- a) Primeira amostra: substituição de cimento por lama vermelha;
- b) Segunda amostra: substituição de cimento por lama vermelha e adição de metacaulim;
- c) Terceira amostra: cimento constante e substituição da cinza volante por lama vermelha;
- d) Quarta amostra: a adição de sílica ativa no concreto.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

A corrosão das estruturas de concreto armado expostas a ambientes quimicamente agressivos é problema frequente relacionado a patologias das construções, que causa deterioração das estruturas e redução da vida útil e, portanto, aumento dos custos de manutenção e reparos (NOVAES; POZNYAKOV, 2021).

Prejuízos econômicos gerados por exposições ambientais severas ao dióxido de carbono, emitidos por grandes indústrias, e íons cloreto da zona de pulverização marítima instigaram empresas multinacionais a investir em estudos de longo prazo que levam em consideração compreender os mecanismos de corrosão e mitigar os impactos e custos da deterioração em escala global (TIAN et al., 2023).

Estudos confirmam que a interação física, química, térmica e mecânica estão ligados à escolha dos materiais para as disposições técnicas da elaboração do projeto das estruturas, o cumprimento dos requisitos mínimos para garantir a durabilidade, o controle da execução e dias de cura de concreto (BREYSSE, 2010). Partindo da mutualidade da composição cimentícia entre aditivos e adições, grau de hidratação dos compósitos, mecanismos de transporte de oxigênio nos interstícios do concreto, redutibilidade do pH da solução dos poros devido a reação alcali-agregado e alcali- sílica, transporte do dióxido de carbono e a difusão de cloreto na despassivação das estruturas, são processos irreversíveis para uma lenta degradação (DHIR; EL-MOHR; DYER, 1996); (MORRIS; VICO; VÁZQUEZ, 2004); (RICHARD, 2020). Somados a exotermicidade que acompanha as fissurações causadas pela hidratação dos ligantes e o impacto na estabilidade mecânica nos pontos de flexão e intersecção das armaduras contribuem ao aumento do nível de corrosão de uma estrutura (CASTEL; FRANÇOIS; ARLIGUIE, 2001); (SELVARAJ; MURALIDHARAN; SRINIVASAN, 2003).

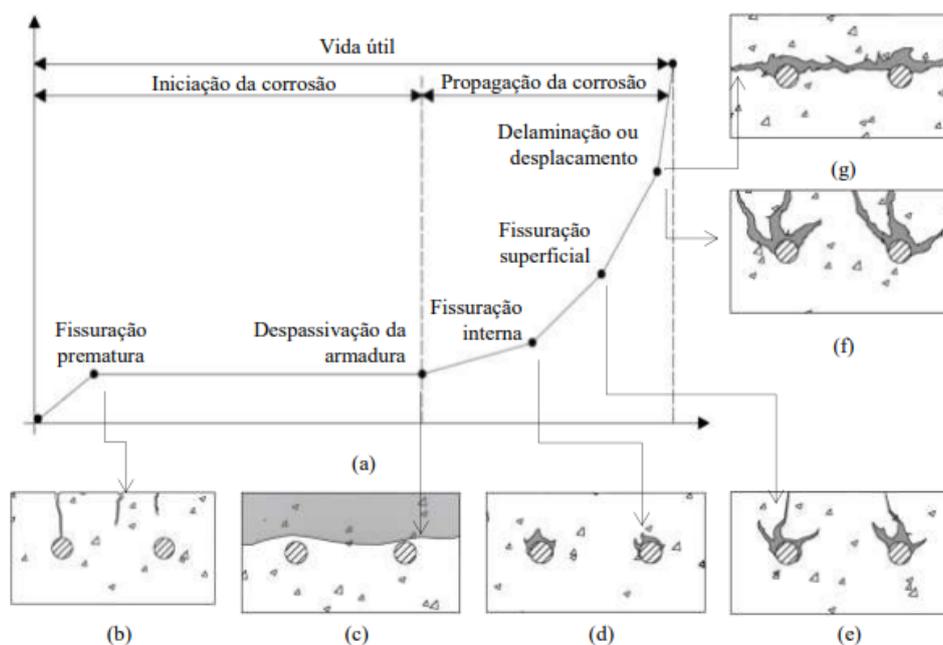
A ampliação dos conhecimentos por aplicação de métodos de ensaios não destrutivos para monitor a corrosão por combinações de adições e aditivos, contribuíram em resultados que assemelham-se a resultados de estudos feitos em uma escada de tempo muito extensa. Os testes acelerados são meios mais rápidos de se obter uma visão geral dessa problemática.

### 2.1 Mecanismo da corrosão

O concreto atuando como uma barreira física protetora de elevada alcalinidade ( $\text{pH} > 13,5$ ) (ALMUSALLAM, 2001) possui variáveis internas que estimulam o processo de corrosão

das estruturas em dois períodos: iniciação e propagação. O tempo de iniciação compreende o tempo necessário para iniciar a despassivação da estrutura e a propagação são as consequências dos produtos da corrosão degradativa (TUUTTI, 1982). Na Figura 1 é representado o processo de corrosão no concreto armado.

Figura 1 – Fases de iniciação e propagação da corrosão.

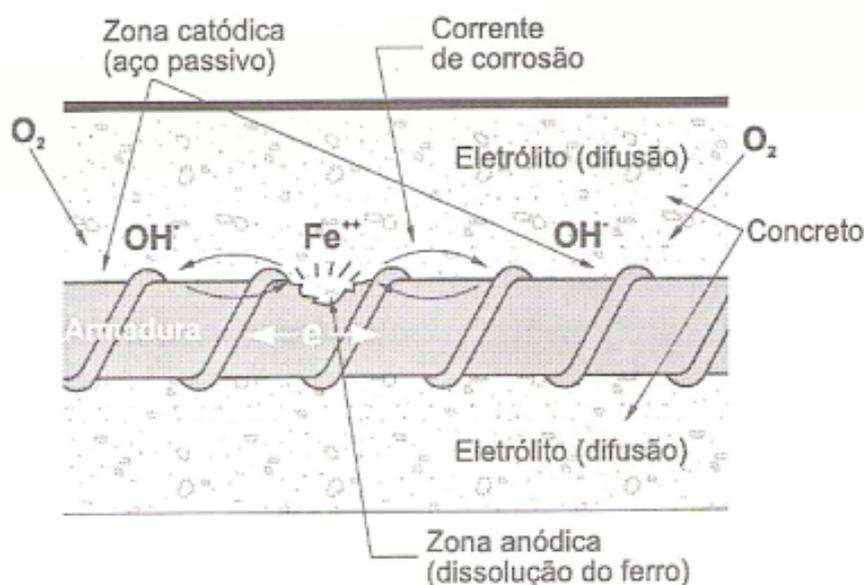


Fonte: (ARAUJO et al., 2017).

A nível microestrutural, os interstícios do concreto e ar aprisionado em seu interior são fatores para o desenvolvimento da carbonatação e a agressividade da área de exposição potencializam para a deterioração das armaduras nas estruturas por corrosão (FUSCO, 2017). Fatores como umidade e difusão de oxigênio no concreto constituem a parte inicial do processo eletroquímico na interface do aço carbono e o concreto, pela redução do pH das soluções dos poros induzido pela mobilidade iônica dos íons solvatados durante o processo de carbonatação. Dentre as causas estão a segregação e variação do recobrimento do concreto gerados na fase de execução da estrutura que está representado na Figura 1b. A medida que surgem condições favoráveis, como temperatura, umidade e a disponibilidade de íons quimicamente ligados para realizar a ligação química, ocorre oxi-redução entre os íons da solução e a barras de aço. A quebra da barreira do óxido de ferro na superfície do vergalhão impõe à armadura uma superfície eletricamente carregada gerando uma diferença de potencial elétrico entre a reação anódica do ferro ( $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ ) e a redução catódica do oxigênio dissolvido na água dos poros ( $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ ) (RODRIGUES et al., 2021) (NUNES, 2007), ver Figura 2, a qual

resulta na oxidação do ferro e a geração dos principais produtos de corrosão: quartzo, a goethita, óxidos ( magnetita ou maghemita e a hidróxido de ferro, os qual expandem entre 20 a 500  $\mu$  de espessura , ocorrendo o aumento de duas a seis vezes o volume original do vergalhão (ZHAO et al., 2016);(POUPARD et al., 2006);(POUPARD et al., 2006). Ver Figura de 1b-1d.

Figura 2 – Processo de corrosão das estruturas.



Fonte: (LODI, 2000).

O aumento da pressão entre a barra de aço e o concreto geram tensões incapazes de serem resistidas pelo concreto, promovendo fissuras no entorno da seção do aço (MICHEL et al., 2011) Figura 1e. A radiação das fissuras progride em trincas, sendo fator determinante ao ingresso de ácidos bóricos e íons para o interior da estrutura aumentando ainda mais a probabilidade da velocidade de corrosão com tendência ao deslocamento localizado ou delaminação (ARAUJO et al., 2017); (MICHEL et al., 2011). Ver Figura 1f.

A formação da barreira passivadora impermeável de óxido de ferro no entorno das vergalhões contribui na redução da taxa da velocidade de dissolução do íons  $Fe^{++}$ , em uma variável de tempo que retarda o processo de corrosão posterior (ALMUSALLAM, 2001). Consequentemente, o processo eletroquímico é continuado quando o filme passível é desintegrado pela queda do pH da solução dos poros pela elevação do potencial de corrosão (DHIR; EL-MOHR; DYER, 1996). Em sequência, ocorre a perda significativa da seção da armadura e perda de aderência ao concreto, comprometendo a deterioração e a perda capacidade útil de serviço da estrutura (ARAUJO et al., 2017), representado na Figura 1g.

A preponderância da corrosão não uniforme em relação a degradação por carbonatação (XU; JIN, 2018), são maiores por corrosão por pites, uma vez que os íons cloro presentes nas soluções dos poros atuam localmente em detrimento do dióxido de carbono atmosférico (MORENO et al., 2015).

## **2.1.1 Fatores físicos e químicos que influenciam o processo corrosivo**

### **2.1.1.1 Temperatura: Congelamento e Descongelamento**

A temperatura implica em termos físicos e químicos uma relação equivalente entre as ações internas e externas de uma estrutura, o que causa danos de diferentes dimensões (CHIARADIA et al., 2024). O mecanismo da retração plástica, decorrente da perda de água do concreto fresco através de poros capilares para compensar a diferença de energia da superfície com o ambiente, progride à formação de trincas, retração e a acessibilidade à difusão de sais para a armadura (BREYSSE, 2010).

A exotermicidade da hidratação do cimento viabiliza a propagação do calor do núcleo do concreto até a superfície em uma distribuição diferencial de tensões, dado que a temperatura interna é mais elevada do que a superfície. No entanto, este processo é perseguido contínuo e mais lento no estado endurecido (BREYSSE, 2010).

O proporcionamento da variação climática sobre a estrutura na formação de gelo e degelo, dado pela diferença de temperatura, conduz a uma diferença da resistividade elétrica, consequência da mobilidade iônica no concreto, portanto interfere na cinemática da corrosão das armaduras. No estudo de (CHIARADIA et al., 2024), relatam que quando a estrutura é submetida a temperaturas elevadas há diminuição da resistividade e alta probabilidade da corrosão das armaduras, enquanto que a resistividade é mais alta em temperaturas baixas, assim ínfima probabilidade de corrosão. A temperatura é o principal fator que controla a umidade do concreto, que conseqüentemente afeta a ligação do íon cloro (ANDRADE et al., 2012).

### **2.1.1.2 Relação água aglomerante**

A investigação experimental semiquantitativa de (DELAGRAVE et al., 1996) sobre a indução do íons cloro, os níveis pH e a relação água/ (cimento+ 6% sílica ativa) em forma de pasta no controle da degradação da estrutura durante um período de 3 anos, relata que a redução da água do cimento não afeta o processo, mas determina a velocidade que a reação

ocorrerá. A verificação das misturas nas proporções de 0,25 e 0,38 submetidas a solução de 3% de NaCl com pH= 8,5, 0% de NaCl e pH= 8,5 e 0% de NaCl com pH= 4,5 apresentam maiores desenvolvimentos de hidratação a 0,38 da proporção correspondente à produção de cloroaluminatos e portlandita do que para a proporção de 1/4 da mistura, enquanto há uma diminuição da portlandita devido a reação de cloreto na estrutura. No entanto, em termos de sustentabilidade, a porcentagem mais baixa da relação água/cimento representaram melhores significâncias, pois mesmo que submetido a exposição salina de 3% de NaCl, esse teor não foi o suficiente para promover a formação de cloroaluminato, que pode ser explicado pela baixa porosidade da microestrutura do concreto (DELAGRAVE et al., 1996).

### **2.1.1.3 pH**

O nível do pH é baseado na composição das soluções nos poros do concreto, que varia 12,5 e 13,8, o que fornece as condições normais de estabilidade para estruturas de concreto armado (ALMUSALLAM, 2001). O teor de metais alcalinos, principalmente os íons de Na e K, e a concentração de aditivos minerais adicionais, como a sílica ativa, favorecem valores altos de pH da solução. O estabelecimento de um pH elevado promove a passividade da armadura, evita a corrosão, enquanto valores baixos, a redução do nível alcalino, confere a descalcificação, lixiviação do cálcio e a permeabilidade da estrutura (DELAGRAVE et al., 1996). O pH contribui para a estabilidade das estruturas, pois é o fator que regula as reações químicas no concreto. Por exemplo, a capacidade de ligar íons cloros livres às partículas de cimento é atribuída ao pH das soluções presentes nos poros (MANGAT; OJEDOKUN, 2020).

### **2.1.1.4 Compassidade/porosidade/permeabilidade**

A magnitude da porosidade em uma estrutura induz a forma de propagação, em termos de difusibilidade, permeabilidade e absorção capilar de agentes que interferem na corrosão das armaduras (SELVARAJ; MURALIDHARAN; SRINIVASAN, 2003). Os poros são defeitos nas microestruturas desenvolvidos nas reações das composições, por exsudação da água em excesso e ar aprisionado no fluido (FILHO, 1994). Água e o ar são os principais fatores intervenientes no processo da permeabilidade e absorção capilar. Em termos, o tamanho dos poros determina a forma que os agentes agressivos podem penetrar; poros com diâmetro superior a 2 nm são proeminentes à difusão e poros com diâmetros superior a 200 nm à permeabilidade (MENG, 1994).

O desenvolvimento de uma estrutura porosa é dependente da cristalização das reações das composições, assim como é mormente às condições de cura e exposição. Por outro lado, os agregados contribuem para a redução do número de vazios. A compactação também é alcançada pela adições minerais e da mistura de álcalis no clínquer (SELVARAJ; MURALIDHARAN; SRINIVASAN, 2003). Contudo, há distinção entre porosidade e permeabilidade, enquanto que porosidade é uma medida do número de vazio no concreto, a permeabilidade está pela interligação entre eles para a passagem de fluidos (SELVARAJ; MURALIDHARAN; SRINIVASAN, 2003).

O controle da estabilidade das soluções intersticiais, mantendo seu pH elevado, garante a durabilidade da estrutura pela formação de óxidos que garantem a passibilidade da armadura.

#### **2.1.1.5 Difusividade de cloreto**

Dentre os diversos fatores que favorecem a degradação das estruturas por difusão de cloretos, seja através da permeabilidade e/ou da capacidade de ligação dos íons cloreto, o processo prossegue quando existem condições suficientes para que ocorra a troca de íons na solução intersticial (MANGAT; OJEDOKUN, 2020). O cloreto pode estar presente no concreto por meio de aditivos, água, agregado, penetração e respingo da zona de pulverização marítima (ESTACECHEN; CORMIN, 2017). A velocidade de penetração parte majoritariamente da presença de íons de cloreto de cálcio em detrimento do cloreto de sódio, além do tipo de ligação associado ao cloreto, tipo e consumo de cimento, temperatura, umidade relativa e interações eletrostáticas (LIN, 1992); (SELVARAJ; MURALIDHARAN; SRINIVASAN, 2003).

Nas soluções dos poros do concreto existem dois tipos de íons cloreto, os quimicamente ligados e os fisicamente ligados, a degradação é exclusivamente dependente de suas proporções (MANGAT; OJEDOKUN, 2020). A concentração de cloreto livre disponível para realizar ligação e a composição da solução nos poros por íons de cálcio, potássio, sódio e do cloreto puro indicam relações significativas de troca iônica, estabilidade e solubilidade dos íons cloreto, principalmente quando este está saturado por vácuo, pois restringe a mobilidade do íons ao ataque ao aço-carbono dentro do concreto (SHAKOURI; TEYMOURI, 2023). Ainda conforme os pesquisadores, o concreto insaturado possui menor capacidade de ligação e maior a taxa de penetração do íons cloro para a armadura, os estudos estão de acordo com a referência de (SHAKOURI; TEYMOURI, 2023). A redução da difusão é diretamente proporcional à porosidade do concreto, compactação e recobrimento da armadura (LIMA, 1990).

Teores entre 0,15% e 0,40% (NBR-12655, 2015) de cloretos totais da massa de cimento

é o limite crítico para ocorrer a troca iônica entre a película de óxido formada no entorno do vergalhão e ocorrer a despassivação (SHAKOURI; TEYMOURI, 2023). Dentre as principais consequências da penetração dos íons na estrutura são citados por (ARAUJO et al., 2017):

1. Quanto maior a concentração de Cl menor é a resistividade elétrica;
2. Quanto maior a saturação dos poros, umidade, e oxigênio, mantendo-se pH constante, maior será o aumento da concentração de cloreto livres para acelerar a taxa de corrosão para formação de ferrugem;
3. A concentração de cloro favorece as reações de oxi-redução, absorção e retenção de água.

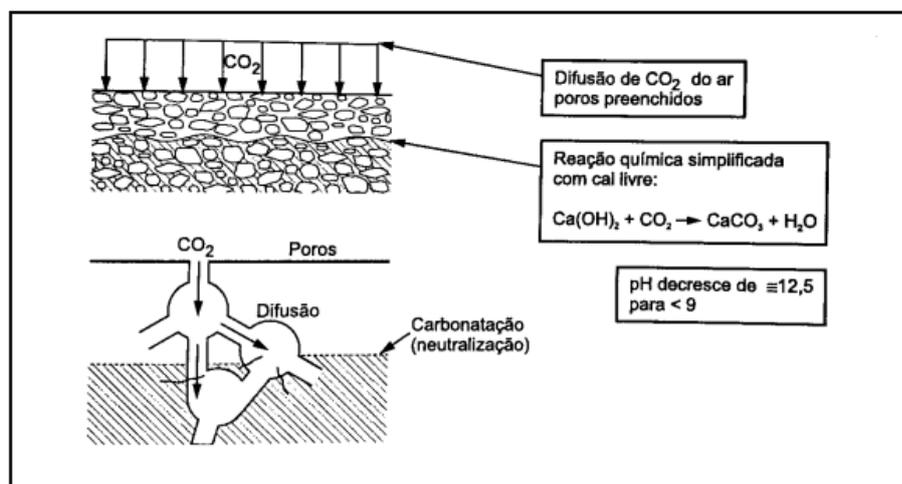
A movimentação iônica dos cloros se dá por dois mecanismos, a absorção capilar e a difusão iônica. A absorção capilar surge da incorporação do íons na zona de respigo de maré, geralmente as estruturas são afetadas quando estão dentro de uma raio de 630 m de distância do litoral (GUIMARÃES; CASTAGNO; HELENE, 2003). A absorção depende dos níveis de porosidade e diâmetro, poros com diâmetro superior a 2 nm tem alta forças capilares de sucção (ESTACECHEN; CORMIN, 2017);(MENG, 1994). Enquanto que, a difusão iônica é o gradiente de concentração iônica no interior do concreto ou entre o sistema concreto e meio ambiente (CASCUDO, 1999).

#### **2.1.1.6 Carbonatação**

A velocidade de carbonatação depende da concentração de dióxido de carbono no ambiente, que por sua vez é transportado para as soluções dos poros do concreto, envolvendo a redução do pH intersticial,  $\text{pH} = 9$ , do concreto e argamassas endurecidos com elevada relação água/cimento (GUIMARÃES; CASTAGNO; HELENE, 2003) . A neutralização das soluções dos poros é desencadeada pela reação entre os hidróxido de cálcio e dióxido de carbono, resultando em  $\text{CaCO}_3$ , e outros compostos alcalinos hidratados do concreto saturado que produzem a sílica, alumina e óxido férrico hidratados (ESTACECHEN; CORMIN, 2017), ver Figura 3.

Quando a reação do hidróxido de cálcio na solução finaliza, a carbonatação interage com o silicato de cálcio formando o gel sílica. Dentre os fatores que influencia no processo , cita-se: a umidade, relação água cimento, tipo e quantidade de cimento, condições de cura e fissuras na estrutura (LODI, 2000) .

Figura 3 – Representação esquemática do processo de carbonatação



Fonte: (CASCUDO, 1999)

## 2.1.2 Influência das adições minerais na durabilidade do concreto

### 2.1.2.1 Sílica ativa

A sílica ativa consiste em micropartículas pozolânicas 100 vezes menores que os grãos de cimento, sendo altamente reativa (SELVARAJ; MURALIDHARAN; SRINIVASAN, 2003). Sua capacidade de autocontenção na pasta de cimento na interface cimento- agregado garante uma mistura mais trabalhável com uma necessidade relativamente menor de relação água cimento. Para se ter uma ideia, a dosagem de 8% de sílica do peso do cimento, 100.000 partículas são necessárias para preencher o espaço de água no concreto fresco (SHARMA; KHATRI; KANOUNGO, 2014). Naturalmente, a participação da sílica na formação do gel de silicato de cálcio hidratado (CSH) a partir da reação de hidratação do hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) influencia a microestrutura do concreto, resultando em maior compactação do concreto fresco, devido a capacidade de micro-enchimento dos grãos, e elevada resistência a compressão, associado à redução do tamanho dos poros da matriz e da zona de transição na interface (SELVARAJ; MURALIDHARAN; SRINIVASAN, 2003).

A aplicação de derivados de sílica ativa como aditivos suplementares às bases cimentícias melhora as características do concreto, em termos de resistência à corrosão por sulfatos, proporciona alta resistência química, baixa porosidade e, portanto, alta impermeabilidade, baixa exotermicidade durante a hidratação e boa resistência ao desgaste (SELVARAJ; MURALIDHARAN; SRINIVASAN, 2003).

Contudo, de acordo com (ESKANDARI-NADDAF; ZIAEI-NIA, 2018), a influência da granulometria da sílica ativa pode apresentar efeitos indesejáveis, comparando a resistência a corrosão em misturas de concreto com adições de nano e micropartículas de sílica ativa. As nanos partículas em certas dosagens mostraram-se prejudiciais a durabilidade da estrutura, pois diminui a resistência. Além disso, o fator água/cimento e a variação da sílica ativa na dosagem possuem influência quanto a carbonatação do concreto. De acordo com (TANG et al., 2019), para a concentração de adição de 0% (amostra controle) e de 5 a 20% de sílica ativa não tem significativas na carbonatação, enquanto que para água/cimento superior a 0,70, a carbonatação aumenta em 50% em relação à amostra controle.

### **2.1.2.2 Bauxita: Lama Vermelha**

A bauxita é um material heterogêneo formado uma por mistura de hidróxidos de alumínio hidratados e impurezas: óxido de ferro, sílica, óxido de titânio e aluminossilicato (CONSTANTINO et al., 2002). É a principal rocha mineral que permite a extração de alumina e posteriormente do alumínio em grande escala. Sua coloração determina a quantidade de óxido de alumínio presente, por exemplo, a bauxita vermelha é composta por 25% deste elemento (CONSTANTINO et al., 2002). O alto pH o torna um material muito alcalino, o que causa grandes problemas ambientais. Durante a fase de extração da alumina é gerado a lama vermelha pelo processo de clarificação. A lama vermelha é constituída das impurezas de produção, é extremamente fina, com módulo de finura inferior a 2,4 micrômetros (CONSTANTINO et al., 2002). Devido a sua alcalinidade, entre 10 e 13, quando misturada ao concreto, reflete baixo potencial elétrico e elevada resistência elétrica e, portanto a menor probabilidade de corrosão (RIBEIRO; LABRINCHA; MORELLI, 2012). A medida que aumenta os níveis de lama vermelha em substituição de cimento confere ao concreto, no estado endurecido, maior resistência à penetração de íons cloreto com a idade de cura, maior resistência à compressão e flexão comparado a caracterização de um cimento Portland comum (VENKATESH; RUBEN; CHAND, 2020). Em detrimento, a mistura de concreto e lama vermelha no estado fresco, reduz a trabalhabilidade, pois as partículas têm elevada capacidade de absorção de água (VENKATESH; NERELLA; CHAND, 2020).

Resultados similares foram encontrados por (TANG et al., 2019) no concreto autoadensável na substituição de 75% de cimento do concreto por lama vermelha há um aumento as propriedades mecânicas e elevação da resistência contra os íons cloreto, uma vez que na

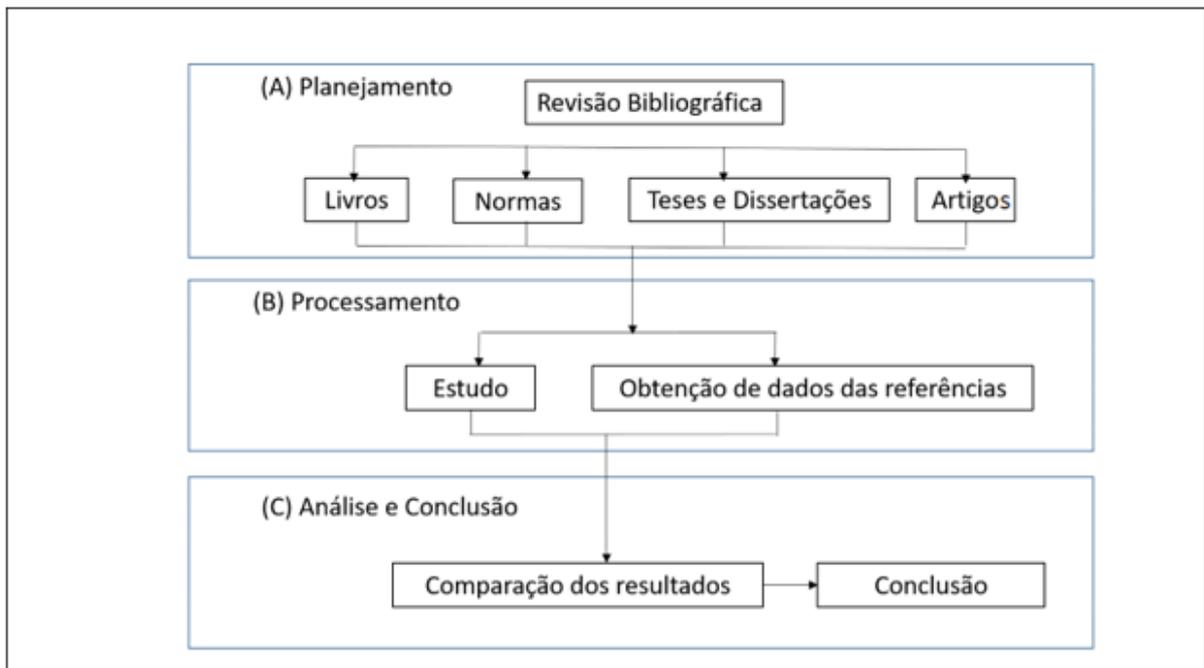
hidratação dos compósitos apresenta formação de materiais mais densos (TANG et al., 2019). Contudo, segundo (TANG et al., 2019), relata que a lama vermelha apresenta alto teor de álcalis, propiciando maior probabilidade de reação álcali- agregado e a promoção de rachaduras nas estruturas, no entanto, possuem muitos estudos que divergem resultados. Quanto aos estudos de (RIBEIRO et al., 2011) mostraram que, ao contrário de (TANG et al., 2019), a lama vermelha não possui influencia sob o processo reação alcali-agregado, todavia teve alta contribuição no fenômeno da carbonatação a teores mais elevados de substituições do cimento a partir de 20% por lama vermelha. Ainda, ambos os autores confirmam que a adição da lama vermelha na pasta e no concreto aumenta a viscosidade plástica, devido a hidratação do cimento e menor quantidade de água livre, reduzindo à penetração do íons cloreto no concreto.

Por outro lado, a variabilidade das composições químicas da lama vermelha favorecem a formação produtiva de fases minerais de hematita, goethita e anatásio, a partir dos elevados teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (31,22%) e  $\text{TiO}_2$  (4,55%). A gibbsita, caulinita, chantalita e sodalita pela presença de  $\text{Al}_2\text{O}_2$  (20,77%) e a caulinita, chantalita e sodalita a partir de  $\text{SiO}_2$  (MERCURY et al., 2010).

### 3 METODOLOGIA

A metodologia proposta para o trabalho consistiu em 3 etapas que compreenderam: Planejamento, Processamento e Análise e Conclusão. As atividades que englobaram cada fase estão apresentadas na Figura 4:

Figura 4 – Etapas do projeto



Fonte: O autor.

#### (A) Planejamento

Esta etapa compreendeu o levantamento bibliográfico em livros, normas, teses e artigos a fim de obter um embasamento sobre o assunto.

#### (B) Processamento

Esta etapa compreendeu a seleção de quatro artigos de estudos experimentais sobre a influência da sílica ativa e da lama vermelha no processo dos parâmetros envolvidos na corrosão. O critério de seleção dos artigos envolveu a presença de ao menos 50% dos parâmetros necessários para a descrição do projeto.

Em seguida, os dados foram organizados em tabelas para análise de comparação de resultados. Nos quais foram analisados os parâmetros:

1. Tipo e composição química do cimento utilizado para teste;
2. Composição química das principais adições do estudo: lama vermelha e sílica ativa;
3. País de origem dos materiais utilizados pelos autores;
4. Porcentagem das substituições do cimento por lama vermelha, lama vermelha e metacaulium, substituição cinza vermelha por lama vermelha e adição de sílica ativa;
5. Relação água/ ligantes;
6. Dias de cura para realização dos testes mecânicos;
7. Porcentagem da solução de cloreto utilizado para a degradação da estrutura;
8. Resultados da resistência à tração e à compressão por porcentagens de adições;
9. Penetração dos íons cloreto.

#### (C) Análise e Conclusão

A etapa de análise e conclusão consiste na análise dos resultados extraídos dos artigos da literatura e compará-los. Deste ponto, serão elaboradas conclusões acerca do tema deste trabalho.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O critério geral utilizado neste trabalho foi obter dados dos artigos referentes aos parâmetros relacionados aos procedimentos de ensaios de corrosão em estruturas de concreto armado. Foram selecionadas quatro publicações, sendo duas referências da Índia, uma da Austrália e uma do Brasil, recuperadas através da plataforma do *Google article*, listadas na Tabela 1.

Tabela 1: Autores de referência no estudo das adições e aditivo em concreto.

Referência	Autores	Adições/aditivos	País
1	(VENKATESH; RUBEN; CHAND, 2020)	LV	Índia
2	(VENKATESH; NERELLA; CHAND, 2020)	LV+ MT	Índia
3	(TANG et al., 2019)	LV+ CV	Austrália
4	(VAGHETTI, 2005)	SA	Brasil

As investigações experimentais dos autores contemplaram o efeito da potencialização da lama vermelha e da sílica ativa nas propriedades mecânicas e na durabilidade do concreto.

Os autores da Referência 1, (VENKATESH; RUBEN; CHAND, 2020), investigaram a lama vermelha como material cimentício suplementar no concreto em idades de cura de 28 e 56 dias. No experimento foi utilizado a substituição do cimento Portland comum de resistência à compressão de 35 MPa, nas proporções de 5%, 10%, 15% e 20%, por lama vermelha. Para melhorar a trabalhabilidade do concreto no estado fresco, um aditivo superplastificante redutor de água à base de policarboxilato de éter foi utilizado pelos autores para uma relação de água/ligante constante no valor de 0,40. As proporções da água, do agregado graúdo, agregado miúdo e aditivos também mantiveram-se constantes.

Para a referência 2, (VENKATESH; NERELLA; CHAND, 2020) produziram misturas com adição de metacaulim para aumentar a reatividade pozolânica da lama vermelha em quantidade constante. A predominância do óxido de alumínio e do dióxido de silício presente no metacaulim influenciam na resistência e na permeabilidade do concreto. A lama vermelha substituiu parcialmente o cimento em 0% a 15%, em incremento de 2,5%, os quais foram avaliados em 28 e 56 dias de cura. O cimento utilizado foi de resistência de  $53Kg/mm^2$ . A massa do agregado graúdo, agregado miúdo, água, metacaulim e aditivos superplastificante redutor de água foram estabelecidos em quantidades constantes e relação água/ligante = 0,4.

Para o referencial bibliográfico de (TANG et al., 2019), os autores investigaram a subs-

tituição das cinzas volantes em concreto autoadensável pelo uso de lamas vermelhas sobre o desempenho mecânico e da durabilidade do concreto em uma relação água/cimento de 0,36. A substituição da cinza volante por lama vermelha foi em percentuais, em incrementos de 25%, variando de 0% a 100%. Para este estudo, o cimento, a água, o agregado gráudo e o agregado miúdo foram mantidos as massas constantes, enquanto que o aditivo superplastificante redutor de água, a cinza volante e a lama foram variáveis. Os testes foram realizados após 28 e 56 dias de cura.

Por fim, para a Referência 4, (VAGHETTI, 2005) estudou a carbonatação e a corrosão induzida por carbonatação do concreto por adição de sílica ativa. O cimento do concreto para teste foi o cimento Portland CP V-ARI. O autor avaliou o desempenho pela variação de dosagens da sílica em até 20% de adição e uma relação água/ligante variando de 0,30 a 0,80, esta pesquisa foi limitada para uma amostra com relação água/ ligante de 0,40, por adição de sílica de 5% e 20%, em um período 14 e 63 dias de cura.

#### 4.1 Caracterização das amostras de controle

As amostras de controle analisadas pelos autores foram determinadas para monitorar os resultados com base na capacidade de resistência à compressão, tração e ao ataque de íons cloreto e, portanto, a degradação da estrutura por substituição de lama vermelha e adição de sílica ativa em proporções definidas. As porcentagens iniciais da lama vermelha e da sílica ativa mantiveram-se ausentes, 0%, para comparar a progressão das resistências, ver Tabela 2.

Tabela 2: Traço da amostra de controle

Referência	Cimento (Kg)	Água (Kg)	A.Graúdo (Kg/m <sup>3</sup> )	Agr.Miúdo(kg/m <sup>3</sup> )	CV (Kg)
1	431,05	172,42	1180,26	654,13	0
2	383,16	153,26	1262,08	709	0
3	320,00	195	870	645	220
4	463	185,2	1138,98	680,61	0

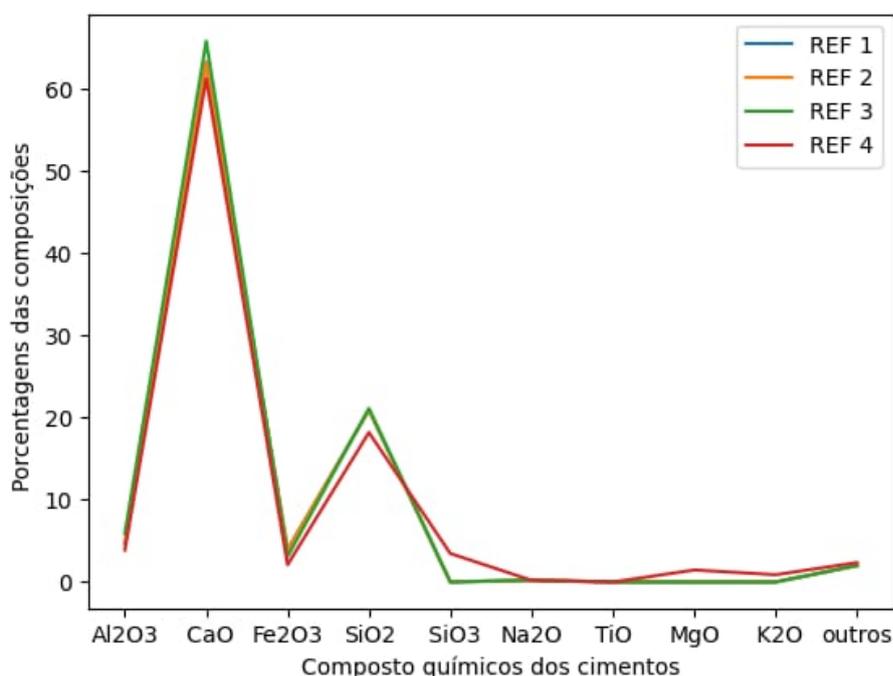
Para os percentuais das composições químicas dos cimentos utilizados pelos autores estão na Tabela 3.

Tabela 3: Comparação entre as composições químicas dos cimentos de referência.

Composição %	Referência 1	Referência 2	Referência 3	Referência 4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,73	4,73	5,9	3,90
CaO	63,29	63,29	65,85	61,30
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,95	3,95	3,10	2,10
SiO <sub>2</sub>	20,93	20,93	21,14	18,20
SiO <sub>3</sub>	-	-	-	3,47
Na <sub>2</sub> O	0,22	0,22	0,2	0,20
TiO	-	-	0,54	-
MgO	-	-	1,2	1,46
K <sub>2</sub> O	-	-	-	0,89
Outros	2	2	-	2,36
Fck (MPa)	53	35	35	35
País	Índia	Índia	Austrália	Brasil

Conforme a Figura 5, apesar dos cimentos serem de outros países as porcentagens das composições químicas encontradas são iguais. Os compostos de óxido de cálcio e de dióxido de silício apresentaram maiores teores na composição, o que está de acordo com a literatura.

Figura 5 – Composição dos cimentos de referência



Fonte: Adaptado de (VENKATESH; RUBEN; CHAND, 2020); (VENKATESH; NERELLA; CHAND, 2020);(TANG et al., 2019);(VAGHETTI, 2005);

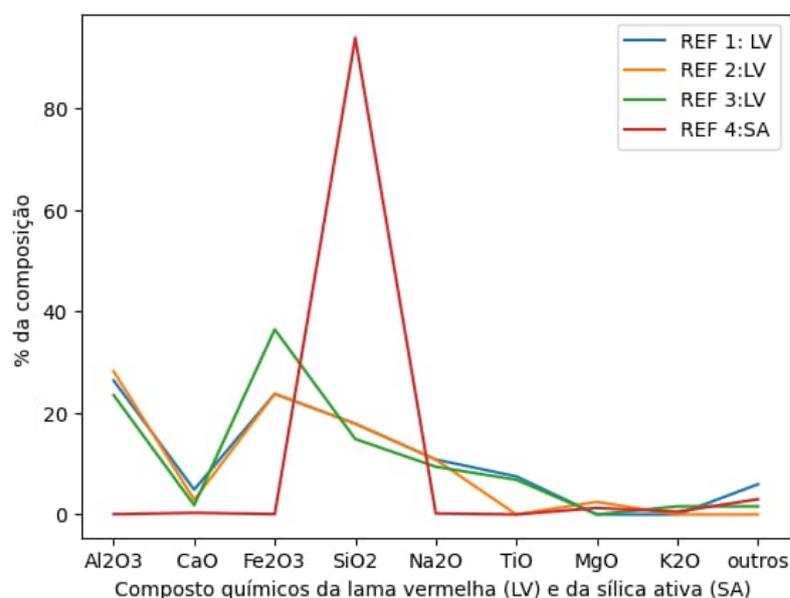
Para os valores percentuais dos compostos químicos das adições e aditivos utilizados como referência, os autores os obtiveram por Análise de Fluorescência de Raios X, e estão listadas na Tabela 4.

Tabela 4: Comparação entre as composições químicas das lamas vermelhas das referências 1, 2 e 3 e da sílica ativa de referência 4.

Composição	Referência 1 (%)	Referência 2 (%)	Referência 3 (%)	Referência 4 (%)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26,42	28,24	23,53	0,05
CaO	4,9	2,9	1,83	0,33
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,79	23,79	36,48	0,07
SiO <sub>2</sub>	17,9	17,9	14,88	94,00
Na <sub>2</sub> O	10,83	10,83	9,41	0,20
TiO <sub>2</sub>	7,5	-	6,84	
K <sub>2</sub> O	-	2,49	-	1,28
MgO	-	-	1,61	0,55
Outros	5,96	-	1,61	3,01
País	Índia	Índia	Austrália	Brasil

Para efeito da representação gráfica da comparação das amostras por referência da Tabela 4 está incluída na Figura 6.

Figura 6 – % da Composição da Lama Vermelha e da Sílica ativa



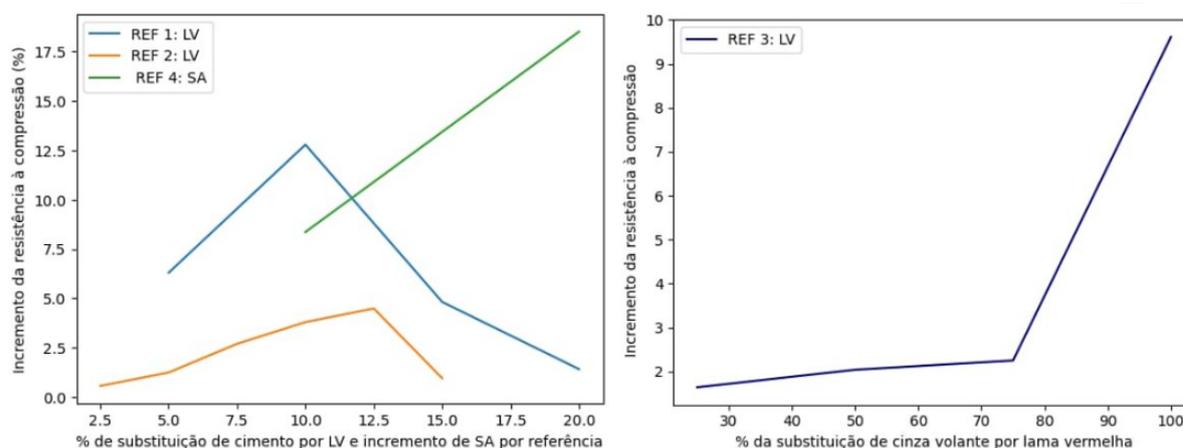
Fonte: Adaptado de (VENKATESH; RUBEN; CHAND, 2020); (VENKATESH; NERELLA; CHAND, 2020);(TANG et al., 2019);(VAGHETTI, 2005)

Observa-se na Figura 6, que as composições químicas e por consequência as propriedades físicas da lama vermelha variam de vários pontos de origem. A lama vermelha oriunda da Índia, obtida da lagoa da Refinaria da Nalco, possui porcentagens de composições diferentes quando extraída de uma mesma área de disposição deste resíduo, pois a taxa de composição química dos elementos depende da natureza da bauxita e da técnica empregada na cristalização do minério (AZZI et al., 2020), como por exemplo, a reutilidade das proporções do óxido de cálcio e do óxido de potássio. Enquanto que, a sílica ativa, apesar de ter baixa composição de outros compostos é rica em dióxido de silício que reflete na densificação da microestrutura do concreto durante sua hidratação (KULAKOWSKI; PEREIRA; MOLIN, 2009).

#### 4.2 Resistência à compressão

Para prestar uma abordagem comparativa dos resultados, optou-se representar a análise da Referência 3 com maiores teores de substituição da cinza volante por lama vermelha separadamente entre os testes. Os incrementos obtidos do teste de resistência à compressão em relação a amostra de controle da Tabela 2, pela substituição da lama vermelha nas Referências 1, 2 e 3; e adição da sílica ativa pelo autor da Referência 4 estão representadas nas Figuras 7.

Figura 7 – Comparação dos ganhos de resistência à compressão aos 28 dias por Referência

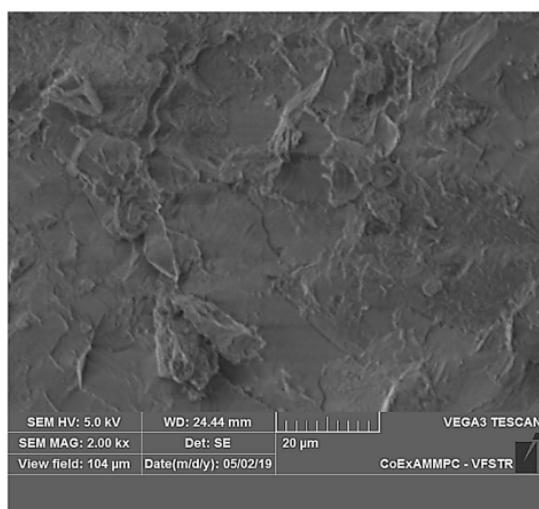


Fonte: O autor.

Para efeito da análise, a união entre os gráficos das amostras das Referências 1, 2 e 4 aos 28 dias de cura e teores de lama vermelha e sílica, mostra que a adição de 10% de lama vermelha em substituição do cimento no concreto influencia no aumento da resistência à compressão da amostra 1 em relação as outras amostras, principalmente da sílica ativa nas idades iniciais. Ao mesmo passo que, observa-se que através da proporção do traço da amostra 1 (1:0,4:4,13:1,52) e

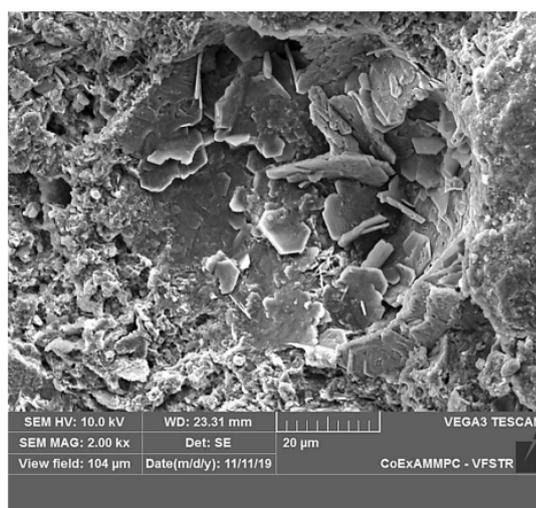
da amostra 2 (1:0,4:3,29:1,85), mantendo uma relação de água/cimento constante, o aumento da dosagem de 25 % do agregado graúdo e a redução de 16,48% do agregado miúdo em relação a amostra de controle 2, por uma substituição de 5% da massa de cimento, a amostra 1 apresentou ganho de 81% de resistência à compressão em relação a amostra 2 que apresentava com adição de metacaulim, o qual não foi suficiente para promover a reatividade do hidróxido de cálcio, hidratação do cimento, aumento a resistência à compressão e menor índice de vazios como mostra a Figura 8 e Figura 9.

Figura 8 – Imagem SEM de concreto com 0% LV e relação a/c de 0,4



Fonte:(VENKATESH; RUBEN; CHAND, 2020)

Figura 9 – Imagem SEM de concreto com 10% LV com relação a/c de 0,4

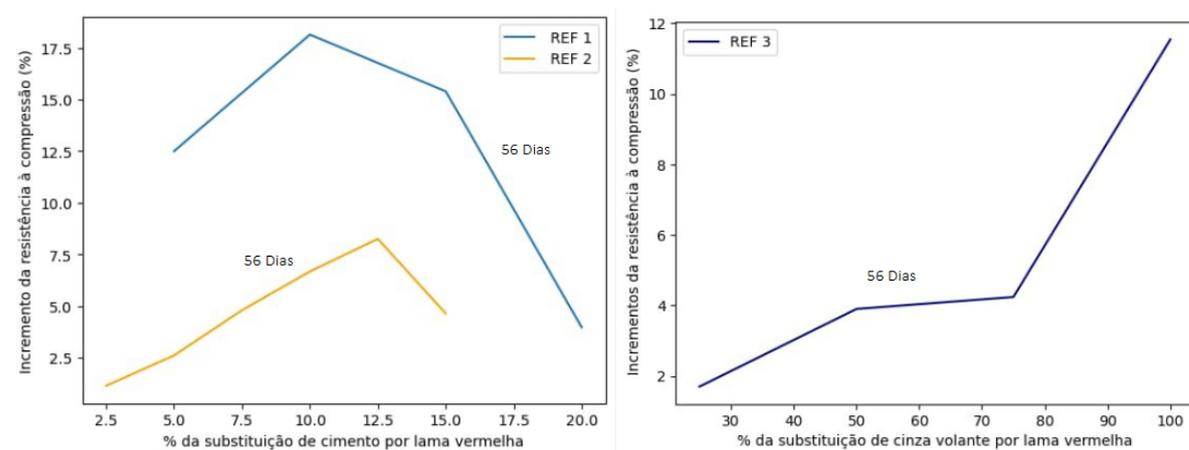


Fonte:(VENKATESH; RUBEN; CHAND, 2020)

De acordo com os resultados, a lama vermelha mostrou uma reatividade superior comparada a amostra 2 que possuía teores constantes de metacaulim e a sílica ativa com 94% de dióxido de carbono. Ainda assim, o teor de 10% de substituição de lama vermelha nas Referências 1 e 2 e na adição de sílica ativa na Referência 4 conduziram a valores ótimos de resistência. Por outro lado, o aumento da dosagem da lama vermelha apresentou ganhos de resistência em relação a amostra controle, contudo o incremento foi muito abaixo do que para uma substituição de 10% concluindo-se que quanto maior o teor de lama vermelha na mistura de concreto, menores incrementos de resistência terá, contudo, superior a amostra controle.

Por conseguinte, analisando o teste para um tempo de cura aos 56 dias, verifica-se que as amostras seguem padrão semelhante de incremento de resistência à compressão em relação à idade inicial de teste para as amostras das Referências 1,2 e 3, como mostra a Figura 10. Os autores da Referência 4 limitaram seus estudos aos 28 dias.

Figura 10 – Resistência à compressão aos 56 dias por amostra de Referência



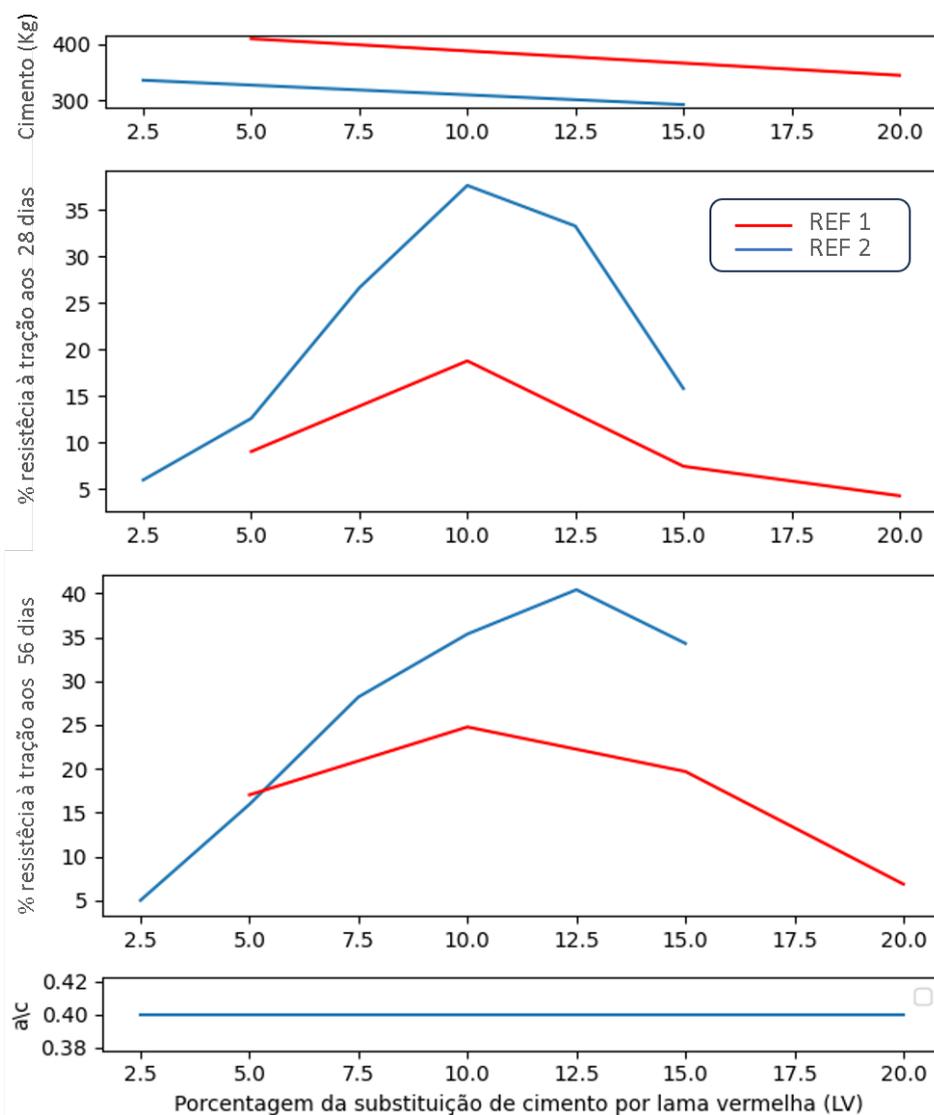
Fonte: O autor

Verifica-se que a amostra 1 mostrou crescimento de resistência à compressão com o aumento dos dias de cura. Ao mesmo passo, observa-se que a substituição de 100% da cinza volante por lama vermelha da amostra 3, apresenta incrementos superiores de compressão, que associado é correspondente a adição de aproximadamente 20% de lama vermelha na mistura da amostra 1. Portanto, conclui-se que a amostra 1 manteve o padrão de crescimento e a substituição por 10% de lama vermelha deteu resultados significativos para uma relação água/cimento igual a 0,40.

### 4.3 Resistência à tração

Quanto a resistência à tração, observa-se que a amostra 2, garantiu ganho superior à resistência a compressão. Pelos dados pode-se deduzir que a amostra 2, constituída de metacaulim confere baixa resistência à compressão, em contrapartida alto valores de resistência à tração.

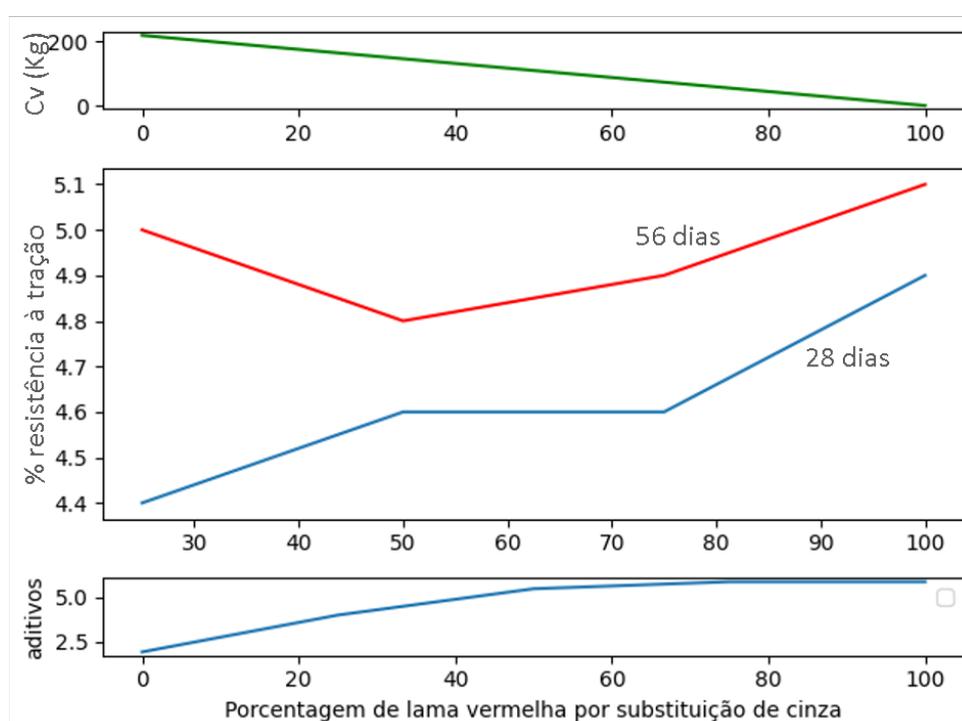
Figura 11 – Incremento da resistência à tração entre 28 e 56 dias



Fonte: O autor

Ainda, o comportamento da resistência à tração dos resultados da referência 3 aos 28 e 56 dias de idade de cura, a adição superior de 12,5 % da substituição do cimento por lama, as resistências foram menores em relação à amostra com substituição parcial de lama vermelha. Embora que os resultados da substituição da cinza volante por lama vermelha no concreto autoadensável foram superiores que 100% da amostra constituída por cinza volante, o incremento da resistência à tração da amostra de controle foi inferior à adição de 2,5% de lama vermelha da amostra 2, como mostra a Figura 12.

Figura 12 – Incremento da resistência à tração entre 28 e 56 dias da Referência 3



Fonte: O autor

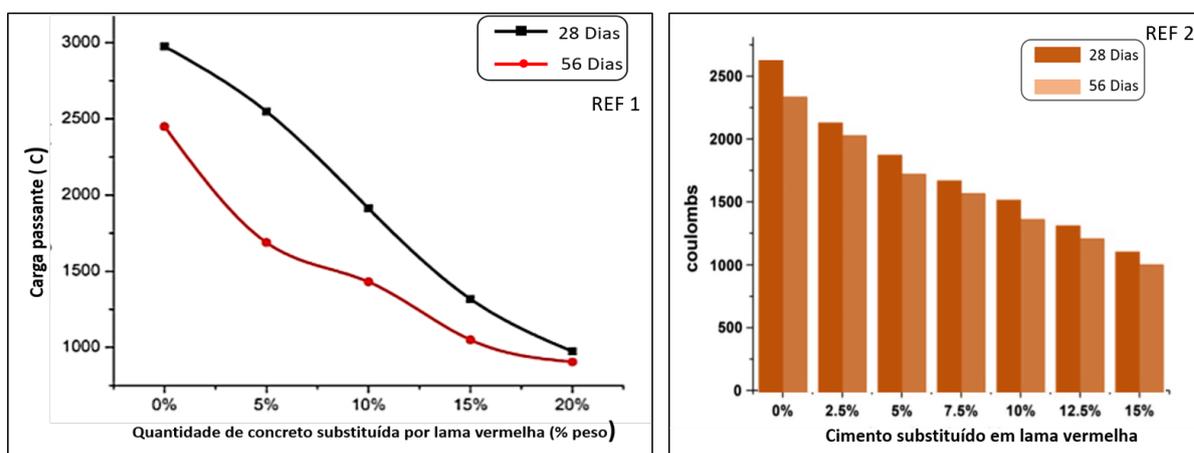
#### 4.4 Proposição dos testes de avaliação da corrosão submetidos às amostras de referência.

Os resultados do ensaio de resistência à penetração de íons cloreto foram avaliados para as Referências 1 e 2 de acordo com o gráfico representado na Figura 8. Enquanto para as amostras das Referências 3 e 4 foram realizadas teste de potencial de corrosão representado no gráfico da Figura 9.

Para as amostras das Referência 1 e 2 submetidas a imersão em solução de NaCl 3% é notável pelos gráficos mostrados na Figura que as condições de cura, duração de hidratação, para os teores de substituições de lama vermelha foram semelhantes entre as amostras de Referência 1

e 2. Ambas desenvolveram iguais capacidades de resistência à penetração do íons cloreto. Além disso, observa-se que quanto maior for o teor de substituição do cimento por lama vermelha, menor será a penetração, por quanto maior for a idade de cura do concreto.

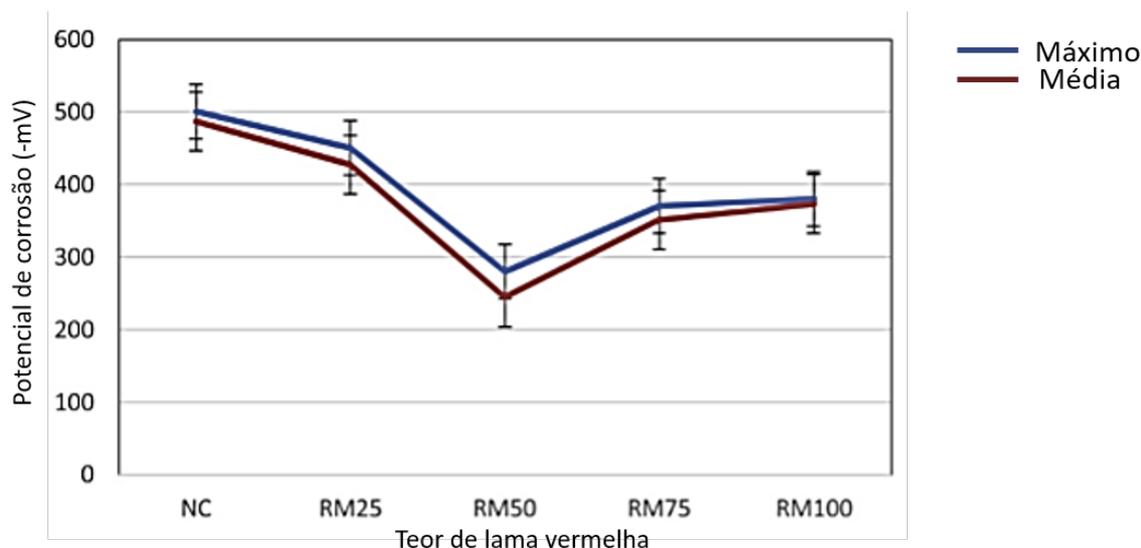
Figura 13 – Penetração do íons cloreto nas amostras das Referência 1 e 2.



Fonte: Adaptado de (VENKATESH; NERELLA; CHAND, 2020);(VENKATESH; NERELLA; CHAND, 2020); (TANG et al., 2019).

Para as amostras da Referência 3, foi proposto o teste de análise de Potencial de corrosão. Dentre as amostras com teores variando de 25% e 100% em substituição de cinza volante por lama vermelha em incrementos de 25% de adição. Figura 14 .

Figura 14 – Potencial de Corrosão Referência 3.



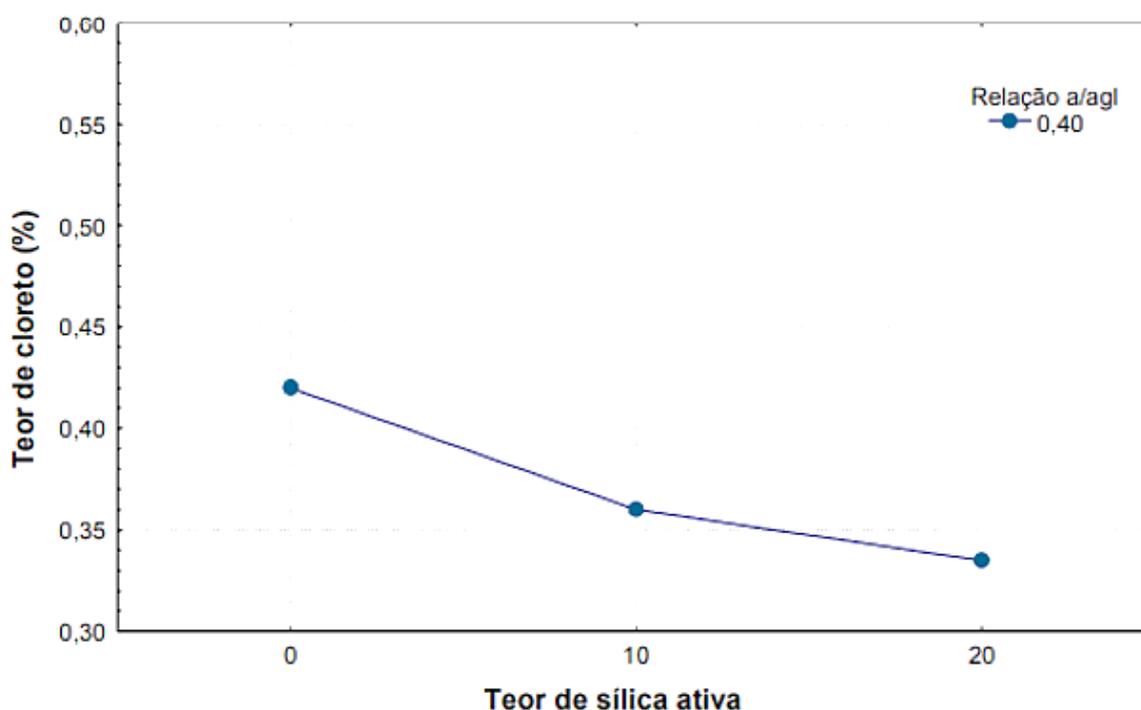
Fonte: Adaptado de (TANG et al., 2019).

Verifica-se que teve uma variabilidade quanto aos teores de lama vermelha em substituição

da cinza, não observando um padrão. Ainda observa-se que a população controle apresentou maior probabilidade de corrosão, uma vez que os potenciais foram muito mais negativos (ASTM et al., 2015). A amostra constituindo 50% em lama vermelha foi o intermediador no potencial de corrosão e menor probabilidade de corrosão.

No geral, as amostras de concreto controle apresentaram muito mais potenciais negativos do que as amostras de concreto de lama vermelha e, de fato, mais danos corrosivos ocorreram nas amostras de controle. A Referência 4, constituída de adição de sílica ativa, mostrou ganhos de resistência à penetração de íons cloreto com o aumento da adição de sílica, como mostra o gráfico da Figura 15.

Figura 15 – Teor de penetração de cloreto na amostra de Referência 4.



Fonte: Adaptado de (VAGHETTI, 2005).

Contudo, obtendo-se uma visão geral entre as três referências é ainda questionável a relação entre os teores da substituição e a relação da durabilidade de uma estrutura.

## 5 CONCLUSÃO

A lama vermelha, por ser altamente reativa, contribuiu para a densificação da microestrutura do concreto resultando em incrementos de resistência a compressão em relação a outras adições de cinza volante (Referência 2) e metacaulim (Referência 3). Contudo, os resultados são incertos, as variações são não lineares, e a variabilidade dos fatores na reatividade no concreto são imprevistas. Novos estudos devem ser amplificados. Contudo, a lama vermelha, apresentou vantagens quanto aos ganhos nas resistências iniciais e resistência à penetração dos íons cloreto pela redução de água livre nos poros. No concreto no estado fresco, a lama vermelha teve resultados negativos quanto aos níveis de adição: apresentou baixa trabalhabilidade, mostrou baixo incremento de resistência para dias de curas maiores, maior relação água cimento e portanto redução da capacidade mecânica.

## **6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Para trabalhos futuros, sugere-se:

Realizar projeto experimental na margem de 10% a 15% de substituição de cimento por lama vermelha , em incrementos de 1%, em um período de 2 anos, a fim de verificar a progressão e o desenvolvimento da reação álcali-agregado, carbonatação, corrosão e resistência mecânica para verificar a adequação da lama vermelha no concreto armado.

## REFERÊNCIAS

- ALMUSALLAM, A. A. Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars. *Construction and building materials*, Elsevier, v. 15, n. 8, p. 361–368, 2001.
- ANDRADE, C. et al. On-site corrosion rate measurements: 3d simulation and representative values. *Materials and Corrosion*, Wiley Online Library, v. 63, n. 12, p. 1154–1164, 2012.
- ARAUJO, A. de et al. Corrosão do aço-carbono em concreto armado. 2017.
- ASTM, C. et al. Standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. *ASTM International: West Conshohocken, PA, USA*, 2015.
- AZZI, S. S. et al. Influência da pozolanicidade e do efeito filer na resistividade elétrica volumétrica e superficial do concreto. Universidade Federal de Minas Gerais, 2020.
- BREYSSE, D. Deterioration processes in reinforced concrete: an overview. *Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures*, Elsevier, p. 28–56, 2010.
- CASCUDO, O. *O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas*. [S.l.]: Pini, 1999.
- CASTEL, A.; FRANÇOIS, R.; ARLIGUIE, G. Modèle de comportement mécanique des poutres en béton armé après fissuration. *Revue française de génie civil*, Taylor & Francis, v. 5, n. 5, p. 527–551, 2001.
- CHIARADIA, L. et al. Influência da temperatura na resistividade elétrica do concreto e na cinética de corrosão da armadura. *Concreto*, Revista ALCOANPAT, v. 14, n. 1, p. 1–12, 2024. Disponível em: <<http://doi.org/10.2104/ra.v14i1.709>>
- CONSTANTINO, V. R. L. et al. Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático. *Química Nova*, SciELO Brasil, v. 25, p. 490–498, 2002.
- CUNHA, M. V. P. d. O.; CORRÊA, J. A. M. Síntese e caracterização de hidróxidos duplos a partir da lama vermelha. *Cerâmica*, SciELO Brasil, v. 57, p. 85–93, 2011.
- DELAGRAVE, A. et al. Influence of chloride ions and ph level on the durability of high performance cement pastes (part ii). *Cement and Concrete Research*, Elsevier, v. 26, n. 5, p. 749–760, 1996.
- DHIR, R.; EL-MOHR, M.; DYER, T. Chloride binding in ggbs concrete. *Cement and Concrete Research*, Elsevier, v. 26, n. 12, p. 1767–1773, 1996.
- ESKANDARI-NADDAF, H.; ZIAEI-NIA, A. Simultaneous effect of nano and micro silica on corrosion behaviour of reinforcement in concrete containing cement strength grade of c-525. *Procedia Manufacturing*, Elsevier, v. 22, p. 399–405, 2018.
- ESTACECHEN, T. A. C.; CORMIN, K. W. Causas e alternativas de reparo da corrosão em armaduras para concreto armado. *CONSTRUINDO*, v. 9, n. 3, p. 36–47, 2017.
- FILHO, L. C. P. d. S. Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito da permeação de água e da adição de microssílica. 1994.

- FUSCO, P. *Tecnologia do Concreto Estrutural: Tópicos Aplicados*. PINI Ltda: Editora Textos, 2017.
- GUIMARÃES, A. T. da C.; CASTAGNO, R. L.; HELENE, P. R. L. Intensidade de ataque de cloretos: considerações sobre a distância do concreto em relação à água do mar. In: . [s.n.], 2003. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:185342245>>.
- KULAKOWSKI, M. P.; PEREIRA, F. M.; MOLIN, D. C. D. Carbonation-induced reinforcement corrosion in silica fume concrete. *Construction and building materials*, Elsevier, v. 23, n. 3, p. 1189–1195, 2009.
- LIMA, M. G. de. *Influência dos componentes do concreto na corrosão das armaduras*. Tese (Doutorado) — Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul., 1990.
- LIN, S. H. Effective diffusion coefficient of chloride in porous concrete. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, Wiley Online Library, v. 54, n. 2, p. 145–149, 1992.
- LODI, V. H. A corrosão das armaduras de concreto. *Santa Catarina, Xanrêre*, 2000.
- MANGAT, P.; OJEDOKUN, O. O. Free and bound chloride relationships affecting reinforcement cover in alkali activated concrete. *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, v. 112, p. 103692, 2020.
- MENG, B. Calculation of moisture transport coefficients on the basis of relevant pore structure parameters. *Materials and Structures*, Springer, v. 27, p. 125–134, 1994.
- MERCURY, J. et al. Estudo do comportamento térmico e propriedades físico-mecânicas da lama vermelha. *Matéria (Rio de Janeiro)*, SciELO Brasil, v. 15, p. 445–460, 2010.
- MICHEL, A. et al. Monitoring reinforcement corrosion and corrosion-induced cracking using non-destructive x-ray attenuation measurements. *Cement and Concrete Research*, Elsevier, v. 41, n. 11, p. 1085–1094, 2011.
- MORENO, J. D. et al. Determining corrosion levels in the reinforcement rebars of buildings in coastal areas. a case study in the mediterranean coastline. *Construction and Building Materials*, Elsevier, v. 100, p. 11–21, 2015.
- MORRIS, W.; VICO, A.; VÁZQUEZ, M. Corrosão induzida por cloreto de ação de refoço avaliada por medições de resistividade do concreto. *Electrochimica acta*, Elsevier, v. 49, n. 25, p. 4447–4453, 2004.
- NBR-12655, A. Concreto de cimento portland — preparo, controle, recebimento e aceitação — procedimento. *Rio de Janeiro*, 2015.
- NOVAES, I. M. de M.; POZNYAKOV, K. Patologias em estruturas de concreto armado. *Boletim do Gerenciamento*, v. 22, n. 22, p. 67–78, 2021.
- NUNES, L. d. P. Fundamentos de resistência à corrosão. *Rio de Janeiro: Editora Interciência*, p. 11, 2007.
- POUPARD, O. et al. Corrosion damage diagnosis of a reinforced concrete beam after 40 years natural exposure in marine environment. *Cement and concrete research*, Elsevier, v. 36, n. 3, p. 504–520, 2006.

- RIBEIRO, D. et al. Estudo de eventuais patologias associadas ao uso da lama vermelha em argamassas colantes e de revestimento. *Cerâmica Industrial*, v. 16, n. 1, p. 31–42, 2011.
- RIBEIRO, D. V.; LABRINCHA, J. A.; MORELLI, M. R. Effect of red mud addition on the corrosion parameters of reinforced concrete evaluated by electrochemical methods. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, SciELO Brasil, v. 5, p. 451–467, 2012.
- RICHARD, B. Comportement des structures en béton armé existantes-cas de la corrosion des armatures. *Techniques de l'ingénieur: Génie du Nucléaire*, p. nc, 2020.
- RODRIGUES, R. et al. Reinforced concrete structures: A review of corrosion mechanisms and advances in electrical methods for corrosion monitoring. *Construction and Building Materials*, Elsevier, v. 269, p. 121240, 2021.
- SELVARAJ, R.; MURALIDHARAN, S.; SRINIVASAN, S. The influence of silica fume on the factors affecting the corrosion of reinforcement in concrete—a review. *Structural Concrete*, Thomas Telford Ltd, v. 4, n. 1, p. 19–23, 2003.
- SHAKOURI, M.; TEYMOURI, M. Investigating the effects of testing protocol factors on chloride binding capacity in cementitious materials. *Construction and Building Materials*, Elsevier, v. 409, p. 134067, 2023.
- SHARMA, U.; KHATRI, A.; KANOUNGO, A. Use of micro-silica as additive to concrete-state of art. *International Journal of Civil Engineering Research*, v. 5, n. 1, p. 9–12, 2014.
- TANG, W. et al. Influence of red mud on mechanical and durability performance of self-compacting concrete. *Journal of hazardous materials*, Elsevier, v. 379, p. 120802, 2019.
- TIAN, Y. et al. Corrosion of steel rebar in concrete induced by chloride ions under natural environments. *Construction and Building Materials*, Elsevier, v. 369, p. 130504, 2023.
- TUUTTI, K. Corrosion of steel in concrete. 1982.
- VAGHETTI, M. A. O. Estudo da corrosão do aço, induzida por carbonatação, em concretos com adições minerais. 2005.
- VENKATESH, C.; NERELLA, R.; CHAND, M. S. R. Experimental investigation of strength, durability, and microstructure of red-mud concrete. *Journal of the Korean Ceramic Society*, Springer, v. 57, n. 2, p. 167–174, 2020.
- VENKATESH, C.; RUBEN, N.; CHAND, M. S. R. Red mud as an additive in concrete: comprehensive characterization. *Journal of the Korean Ceramic Society*, Springer, v. 57, n. 3, p. 281–289, 2020.
- XU, Y.; JIN, R. Measurement of reinforcement corrosion in concrete adopting ultrasonic tests and artificial neural network. *Construction and Building Materials*, Elsevier, v. 177, p. 125–133, 2018.
- ZHAO, Y. et al. Corrosion-induced concrete cracking model considering corrosion product-filled paste at the concrete/steel interface. *Construction and Building Materials*, Elsevier, v. 116, p. 273–280, 2016.