

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SERGIPE
CAMPUS ARACAJU
COORDENADORIA DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

ALYSSON DE SOUZA COELHO

ANÁLISE DA CORROSÃO ACELERADA EM ELEMENTOS DE CONCRETO
ARMADO COM ADITIVO IMPERMEABILIZANTE

MONOGRAFIA

ARACAJU

2023

ALYSSON DE SOUZA COELHO

**ANÁLISE DA CORROSÃO ACELERADA EM ELEMENTOS DE
CONCRETO ARMADO COM ADITIVO IMPERMEABILIZANTE**

Monografia apresentado como requisito parcial
à obtenção do título de Bacharel, da
Coordenação do Curso de Engenharia Civil, do
Instituto Federal de Sergipe – Campus Aracaju.

Orientador: Prof. Me. Marcilio Fabiano Goivinho
da Silva.

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Lima
Santos.

ARACAJU

2023

Ficha Catalográfica elaborada pela Bibliotecária: Elizabete T. Ramos -
CRB-5/1028.

Dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Coelho, Alysson de Souza

C672a Análise da Corrosão Acelerada em Elementos de Concreto Armado
com Aditivo Impermeabilizante. Aracaju/SE. / Alysson de Souza Coelho.
– Aracaju, 2023.

50 f.: il.

Orientador: MSc. Marcilio Fabiano Goivinho da Silva. Monografia
(Graduação - Engenharia civil) - Instituto Federal de Sergipe, 2023.

1. Concreto Armado. 2. Corrosão Acelerada. 3. Perda de Massa. I.
Silva, Marcilio Fabiano Goivinho da. II. Título.

CDU 624.1

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SERGIPE

CAMPUS ARACAJU

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Monografia N° 271

**ANÁLISE DA CORROSÃO ACELERADA EM ELEMENTOS DE CONCRETO
ARMADO COM ADITIVO IMPERMEABILIZANTE**

ALYSSON DE SOUSA COELHO

Esta monografia foi apresentada às 10 h 00 do dia 14 de DEZEMBRO de 2023 como requisito parcial para a obtenção do título de BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados.

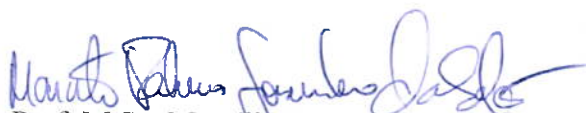
Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.


Prof. Dr. Carlos Henrique de Carvalho

(IFS – Campus Aracaju)


Prof. Dr. Carla Cristina Nascimento Santos
Pereira

(IFS – Campus Aracaju)


Prof. M.Sc. Marcílio Fabiano Goivinho da
Silva

(IFS – Campus Aracaju)
Orientador


Prof. Dr. Pablo Gleydson de Sousa
(IFS – Campus Aracaju)
Coordenador da COEC

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Maria Edilene de Souza Coelho e Edson Coelho, em reconhecimento ao apoio incondicional e amor que me proporcionaram ao longo desta jornada acadêmica. Obrigado.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todas as pessoas que desempenharam papéis cruciais na realização desta monografia. Certamente, essas palavras não conseguem abranger todos aqueles que desempenharam um papel fundamental nesta importante fase da minha vida. Peço desculpas antecipadamente àqueles que não estão mencionados, mas saibam que estão no meu coração e na minha gratidão.

Primeiramente, aos meus pais, Maria Edilene de Souza Coelho e Edson Coelho, cujo amor, apoio inabalável e fé em mim foram a força motriz por trás de todas as minhas conquistas acadêmicas, agradeço por estarem sempre ao meu lado. À minha querida tia, Maria Helena Oliveira, que sempre me apoiou e incentivou, compartilhando sua sabedoria e palavras de encorajamento nos momentos mais desafiadores. Sua presença foi uma bênção em minha jornada.

A Maiara Souza Rodrigues por seu amor, apoio inabalável e compreensão ao longo de toda a jornada. Sua presença em minha vida trouxe inspiração e força nos momentos mais desafiadores. Seu incentivo constante e sua paciência foram fundamentais para que eu alcançasse esse marco.

Aos meus amigos, que estiveram ao meu lado durante toda essa jornada, oferecendo apoio, compartilhando risos e fornecendo o ânimo necessário para seguir em frente. Vocês foram a luz nos dias mais sombrios.

Também sou grato a Manoel Messias Santos Prado, que generosamente me auxiliou com os materiais necessários para a elaboração deste trabalho no laboratório. Sua contribuição foi inestimável.

Por último, ao meu dedicado orientador e coorientador, Prof. Me. Marcilio Fabiano Goivinho da Silva e Prof. Dr. Paulo Cesar Lima Santos, que me inspiraram, guiaram e compartilharam seus conhecimentos ao longo dessa trajetória. Suas orientações desempenharam um papel crucial no sucesso deste trabalho.

Agradeço a todos vocês por fazerem parte desta conquista e por tornarem esta jornada acadêmica uma experiência incrível e inesquecível.

RESUMO

COELHO, Alysson de Souza. **Análise da corrosão acelerada em elementos de concreto armado com aditivo impermeabilizante**. 50. Monografia Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – Campus Aracaju. 2023.

Neste estudo aplicado, conduziu-se uma pesquisa sobre a metodologia de ensaio acelerado conhecida como Corrosão Acelerada por Imersão Modificada (CAIM). O objetivo principal foi examinar o impacto do processo de corrosão acelerada em componentes de concreto armado, considerando variáveis como tempo de corrosão, modificações no traço do concreto (especialmente a relação água-cimento) e a inclusão do aditivo impermeabilizante. Os testes proporcionam valiosos resultados sobre a evolução da corrente de corrosão e a perda de massa dos corpos de prova. Esse estudo comparativo ofereceu uma compreensão mais profunda das condições de aplicação do Método CAIM e como essas variáveis influenciam a corrosão acelerada. Essa pesquisa desempenha um papel significativo no avanço do conhecimento sobre corrosão de armadura de concreto armado, fornecendo uma metodologia de ensaio acelerado confiável. Conclui-se que a manutenção constante das condições do ensaio e a aceleração do processo são cruciais para garantir viabilidade e eficiência nos resultados, visando uma obtenção mais rápida dos mesmos. O ensaio CAIM revelou-se altamente sensível, proporcionando resultados eficazes em períodos de 24 e 48 horas, sob uma tensão de 30V e observando-se um aumento da corrosão em função do aumento da relação água-cimento. Contudo, constata-se que o aditivo impermeabilizante não atua como inibidor de corrosão, pelo contrário, catalisa a corrosão em até o dobro do valor de referência. Assim, sua eficácia nesse contexto específico é questionável. Esses achados representam um avanço relevante para a área, abrindo portas para futuras aplicações práticas e estudos relacionados.

Palavras-chave: Concreto armado; Corrosão acelerada; Perda de massa.

ABSTRACT

COELHO, Alysson de Souza. **Analysis of accelerated corrosion in reinforced concrete elements with waterproofing additives**. 50. Monograph Course (Bachelor's Degree in Civil Engineering) – Federal Institute of Education, Science and Technology of Sergipe – Aracaju Campus. 2023.

In this applied study, research was conducted on the accelerated test methodology known as Modified Accelerated Immersion Corrosion (CAIM). The main objective was to examine the impact of the accelerated corrosion process on reinforced concrete components, considering variables such as corrosion time, changes in the concrete mix (especially the water-cement ratio) and the inclusion of waterproofing additives. The tests provide valuable results on the evolution of the corrosion current and the mass loss of the specimens. This comparative study offered a deeper understanding of the application conditions of the CAIM Method and how these variables influence accelerated corrosion. This research plays a significant role in advancing knowledge about corrosion of reinforced concrete reinforcement by providing a reliable accelerated testing methodology. It is concluded that constant maintenance of test conditions and acceleration of the process are crucial to guarantee viability and efficiency in results, aiming to obtain them faster. The CAIM test proved to be highly sensitive, providing effective results in periods of 24 and 48 hours, under a voltage of 30V and an increase in corrosion was observed due to the increase in the water-cement ratio. However, we found that the waterproofing additive does not act as a corrosion inhibitor, on the contrary, it catalyzes corrosion at up to twice the reference value. Therefore, its effectiveness in this specific context is questionable. These findings represent a relevant advance for the area, opening doors for future practical applications and related studies.

Keywords: Reinforced concrete; Accelerated corrosion; Mass loss.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Tipos de corrosão.....	16
Figura 2 - Demonstração do ensaio de CAIM	19
Figura 3 - Materiais	26
Figura 4 - Aditivo Impermeabilizante	27
Figura 5 - Desmoldante	28
Figura 6 - Limpeza das barras.....	28
Figura 7 - Medições do peso e comprimento da barra	29
Figura 8 - Fixação e posicionamento da barra	29
Figura 9 - Concretagem dos corpos de prova	31
Figura 10 - Demonstração da posição dos corpos de prova para o ensaio de CAIM.....	32
Figura 11 - Ensaio CAIM	33
Figura 12 - Ensaio de compressão.....	34
Figura 13 - Dados do ensaio de compressão.....	35
Figura 14 - Corpo de prova submetido ao ensaio de CAIM por 24 horas	36
Figura 15 - Corpo de prova submetido ao ensaio de CAIM por 48 horas	36
Figura 16 - Gráfico representando a perda de massa em relação ao traço 01 ao longo dos períodos de exposição de 24 e 48 horas.....	37
Figura 17 - Gráfico representando a perda de massa em relação ao traço 02 ao longo dos períodos de exposição de 24 e 48 horas.....	38
Figura 18 - Gráfico representando a perda de massa em relação ao traço 03 ao longo dos períodos de exposição de 24 e 48 horas.....	39
Figura 19 - Corrosão por pite nas barras	40
Figura 20 - Gráfico de grau de corrosão ao longo dos períodos de exposição de 24 e 48 horas.	41
Figura 21 - Gráfico de grau de corrosão ao longo dos períodos de exposição de 24 e 48 horas.	42
Figura 22 - Gráfico de grau de corrosão ao longo dos períodos de exposição de 24 e 48 horas.	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Traços do concreto	30
Tabela 2 - Perda de massa associada ao traço 01 em relação ao tempo de exposição.	37
Tabela 3 - Perda de massa associada ao traço 02 em relação ao tempo de exposição.	38
Tabela 4 - Perda de massa associada ao traço 03 em relação ao tempo de exposição.	39
Tabela 5 - Grau de corrosão em relação ao traço 01.	40
Tabela 6 - Grau de corrosão em relação ao traço 02	41
Tabela 7 - Grau de corrosão em relação ao traço 03.	43
Tabela 8 - Diferença de diâmetro das barras em relação ao grau de corrosão sobre o traço 01	44
Tabela 9 - Tempo real estimado para o grau de corrosão	45
Tabela 10 - Diferença de diâmetro das barras em relação ao grau de corrosão sobre o traço 02	45
Tabela 11 - Tempo real estimado para o grau de corrosão.....	45
Tabela 12 - Diferença de diâmetro das barras em relação ao grau de corrosão sobre o traço 03	46
Tabela 13 - Tempo real estimado para o grau de corrosão	46

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. Justificativas	13
1.2. Objetivo Geral	13
1.3. Objetivos Específicos.....	13
2. REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1. Corrosão	14
2.2. Ensaios de Corrosão	18
2.3. Inibidores de Corrosão.....	22
3. MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1. Materiais	26
3.1.1. Cimento.....	26
3.1.2. Agregado Miúdo.....	26
3.1.3. Agregado Graúdo	26
3.1.4. Armadura	27
3.1.5. Aditivo Impermeabilizante	27
3.1.6. Desmoldante.....	27
3.2. Métodos	28
3.2.1. Preparação e Limpeza.....	28
3.2.2. Moldagem	29
3.3. Ensaios	31
3.3.1. Ajuste do Ensaio CAIM	31
3.3.2. Ensaio CAIM.....	32
3.3.3. Ensaio de Compressão.....	34
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	36
4.1. Análise de Perda de Massa	36
4.2. Análise de Grau de Corrosão.....	40
4.3. Análise de Tempo Real em Relação a Perda de Diâmetro.....	44
5. CONCLUSÃO.....	47
6. REFERÊNCIAS	48

1. INTRODUÇÃO

O concreto armado é amplamente utilizado na construção civil devido à sua resistência mecânica combinada com a capacidade de moldagem em diversas formas. No entanto, segundo Torres *et al.* (2006), deficiências nas etapas de dosagem, transporte, adensamento e cura resultam em concretos com elevada porosidade, segregações e ninhos, que podem criar condições favoráveis para a corrosão das armaduras de aço incorporadas ao concreto.

A corrosão é a degradação eletroquímica das armaduras metálicas, resultado da exposição a ambientes agressivos contendo íons de cloreto, dióxido de carbono, umidade e outros agentes nocivos. Em algumas circunstâncias, esse processo corrosivo pode ocorrer de forma acelerada, levando a danos prematuros nas estruturas o que acarreta em um “envelhecimento prematuro” das estruturas, como cita (CABRAL, 2000).

A corrosão das armaduras em estruturas de concreto armado, conforme observado por Graeff (2007), desempenha um papel crucial na aceleração da deterioração dessas estruturas. Esse fenômeno, devido à sua frequência e severidade, modifica parâmetros estruturais fundamentais, resultando em efeitos prejudiciais, como a redução da seção transversal das barras de armadura e o aumento das tensões internas de tração. Essas alterações, por sua vez, provocam fissuras no concreto devido ao acúmulo de produtos corrosivos. Esse processo pode culminar no deslocamento do concreto em estágios avançados, comprometendo a aderência entre a barra de armadura e o concreto.

Assim, foi estimulado o desenvolvimento de processo de corrosão em corpos de prova de concreto contendo barras de aço, através do ensaio de corrosão acelerada por imersão modificada (CAIM) que é usualmente utilizado no grupo de pesquisa do Laboratório de Estruturas e Materiais de Engenharia (LEME/UFRGS), que consiste num corpo de prova de concreto armado que é imerso numa solução de cloreto de sódio, assim a migração dos íons cloreto é estimulada pela aplicação de uma diferença de potencial entre a barra e a solução.

Dessa forma, propõe-se apresentar e discutir os resultados de corpos de prova expostos a uma solução de cloreto de sódio por diferentes períodos de corrosão, manter a diferença de potencial constante. O objetivo é examinar o impacto da duração do ensaio, assim como a influência da relação água-cimento e do uso de um

aditivo impermeabilizante na perda de massa das barras de aço por corrosão. Os resultados expressos em termos de correntes de corrosão e perda de massa, permitem uma avaliação dos efeitos da corrosão acelerada em relação à concentração dos materiais no concreto, além de uma análise de meios de tratamentos contra a corrosão, através de inibidores de corrosão.

1.1. Justificativas

Diante dos desafios encontrados em laboratório, tornou-se crucial ajustar a técnica de ensaio, mantendo a voltagem constante em 30V por um período estendido. Nesse contexto, a pesquisa busca a imperatividade de modificar o ensaio de aceleração da corrosão, escolhendo o CAIM com uma aplicação contínua de diferença de potencial ao longo de uma exposição prolongada. Essa adaptação visa suprir tanto a viabilidade quanto a eficácia do processo experimental.

1.2. Objetivo Geral

- Analisar como o ensaio CAIM responde a mudanças nos parâmetros considerados essenciais para a consolidação da técnica de ensaio, com especial ênfase no fator água-cimento.

1.3. Objetivos Específicos

- Adaptar o ensaio de CAIM, de modo a avaliar a sua eficácia;
- Verificar o impacto da corrosão em três traços de concreto, especialmente considerando a relação água-cimento e a presença de um aditivo impermeabilizante;
- Aferir a influência de um aditivo impermeabilizante sobre o grau de corrosão e resistência do concreto;
- Avaliar o tempo equivalente de exposição à corrosão em condições ambientais.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Corrosão

A corrosão pode ser compreendida como a interação destrutiva de um material com o ambiente, resultante de reações danosas de natureza química ou eletroquímica, que podem estar associadas ou não a ações físicas ou mecânicas de degradação (HELENE, 1993).

A negligência na execução de estruturas de concreto armado emerge como a principal responsável pelo início prematuro da corrosão das armaduras, conforme observado por Granato (2002). Isso inclui não atender aos valores recomendados pela ABNT para o recobrimento das armaduras. Além disso, a utilização de concreto com elevado fator água/cimento resulta em porosidade elevada e fissuras, enquanto em valores reduzidos comprometem na cura do concreto, que contribui para diminuição da resistência. Problemas como segregação do concreto, erros no traço, lançamento e vibração inadequados, juntamente com formas inadequadas, desempenham também um papel significativo. Todos esses fatores destacam a crucial importância da conformidade com práticas construtivas adequadas para prevenir o início precoce da corrosão.

Segundo Gentil (1996), a corrosão pode manifestar-se de diversas formas, e o entendimento destas é fundamental no estudo dos processos corrosivos. As formas de corrosão podem ser classificadas com base na aparência ou modo de ataque, considerando também as diferentes causas e mecanismos envolvidos. Desta maneira, a corrosão pode ser classificada segundo a:

- Morfologia: uniforme, por placas, alveolar, puntiforme, por pite, intergranular (ou intercristalina), intragranular (ou transgranular ou transcristalina), filiforme, por esfoliação, gráfita, dezincificação, em torno de cordão de solda e empolamento pelo hidrogênio;
- Causas ou Mecanismos: por aeração diferencial, eletrolítica ou por correntes de fuga, galvânica, associada a solicitações mecânicas (corrosão sob tensão fraturante), em torno de cordão de solda, seletiva (gráfita e dezincificação), empolamento ou fragilização pelo hidrogênio;

- Fatores Mecânicos: sob tensão, sob fadiga, por atrito, associada à erosão;
- Meio Corrosivo: atmosfera, pelo solo, induzida por microrganismos, pela água do mar, por sais fundidos, etc.

No caso específico da armadura, ocorrem os processos clássicos de corrosão por ação eletroquímica. Helene (1993) ressalta que a corrosão eletroquímica é uma das principais causas de deterioração precoce nas estruturas de concreto armado, frequentemente reduzindo a vida útil das construções afetadas. Destaca-se também que, em geral, a corrosão é um processo lento. A velocidade de corrosão pode variar dependendo dos materiais envolvidos, das condições ambientais e das características do meio corrosivo.

A corrosão eletroquímica do aço no concreto surge devido à falta de uniformidade no próprio aço (GRANATO, 2002), incluindo diferentes tipos, soldas e elementos ativos na superfície, além da heterogeneidade química e física do concreto que envolve a armadura.

Embora a potencialidade para a corrosão do aço possa decorrer dessa falta de uniformidade, normalmente, a corrosão é impedida pela formação de uma película passiva de óxidos de ferro (GRANATO, 2002). Contudo, quando ocorrem condições adversas do ambiente sobre o concreto armado, a capa passivante é perdida, desencadeando um tríplice consequência: o aço reduz sua seção, transformando-se totalmente em óxidos; o concreto pode fissurar devido à pressão de expansão dos óxidos; e a aderência da armadura diminui ou desaparece.

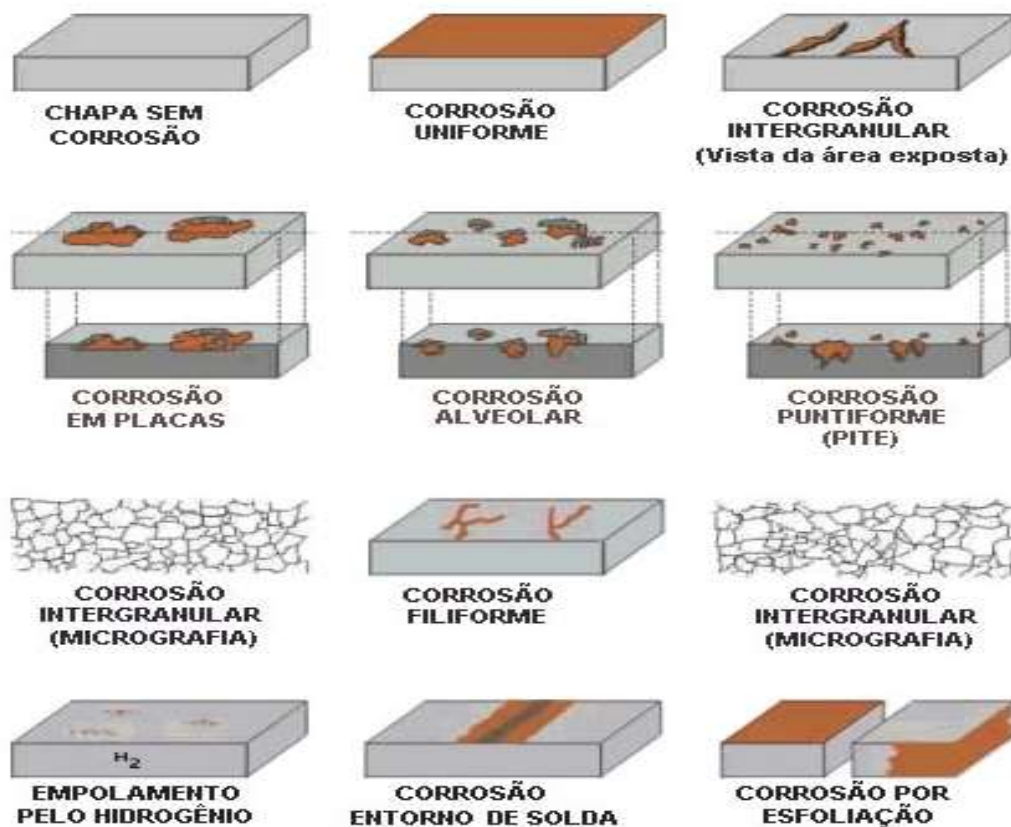
Dessa maneira, Gentil (1996) classifica os tipos de corrosão eletroquímica da seguinte forma:

- Uniforme: A corrosão ocorre em toda a extensão da superfície, resultando em uma perda uniforme de espessura. Alguns referem-se a isso como corrosão generalizada, mas essa terminologia não deve ser exclusiva para a corrosão uniforme, uma vez que também pode ocorrer corrosão por pite ou alveolar generalizadas, afetando toda a superfície corroída.
- Por Placas: A corrosão localiza-se em regiões específicas da superfície metálica, formando placas com escavações.
- Alveolar: A corrosão ocorre na superfície metálica, produzindo sulcos ou escavações semelhantes a alvéolos, apresentando fundo arredondado e profundidade geralmente menor que o seu diâmetro.

- Puntiforme ou por Pite: A corrosão acontece em pontos ou em pequenas áreas localizadas na superfície metálica, formando pites, que são cavidades com fundo em forma angulosa e profundidade geralmente maior que o seu diâmetro.

Assim, na Figura 1 tem-se a representação dos tipos de corrosão eletroquímica descrita anteriormente.

Figura 1 - Tipos de corrosão



Fonte: Gentil (1996)

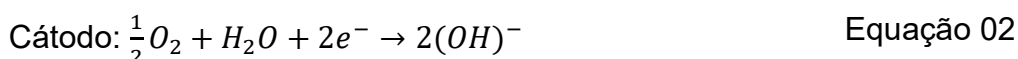
De acordo com Graeff (2007), a corrosão uniforme e a corrosão puntiforme, também conhecida como por pite, são as formas mais prevalentes. A corrosão uniforme se manifesta ao longo de toda a extensão da armadura, geralmente sem causar danos severos, dependendo do estágio da corrosão. Por outro lado, a corrosão por pite, concentrada em pontos específicos, é a mais prejudicial em termos de perda de desempenho estrutural, podendo levar à ruptura do aço.

Uniforme refere-se a um tipo de corrosão em que alguns denominam isso de corrosão generalizada, embora tal terminologia não deva ser exclusiva para a corrosão uniforme, pois também pode englobar a corrosão por pite ou alveolar

generalizadas, ou seja, afetando toda a extensão da superfície corroída (GENTIL, 1996). Algumas formas de corrosão, como placas e alveolar, podem ser consideradas de maneira diferente por alguns, que preferem evitar o uso desses termos específicos.

De acordo com Helene (1993), a corrosão localizada (ou puntiforme) associada à tensão de tração é a mais crítica, pois a estrutura pode romper sem aviso prévio. Em outras palavras, há o risco de uma ruptura frágil em uma seção definida, sem que haja deformação prévia na estrutura com magnitude suficiente para alertar os usuários e permitir a correção do problema a tempo.

A corrosão eletroquímica resulta da formação de pilhas de corrosão, onde partes do metal tornam-se anódicas e outras catódicas. Cascudo (1997) sugere a existência de reações de oxidação e redução, com a circulação de íons no eletrólito. Trethewey e Chamberlain (1992) explicam que o início de um pite é precedido por uma corrosão generalizada ao longo da superfície da barra. O consumo de oxigênio pela reação catódica causa um gradiente de concentração de oxigênio no eletrólito, retardando a difusão do oxigênio e acelerando o processo anódico no centro do pite. Esse fenômeno leva a uma reação de autocatálise. Processos semelhantes ocorrem em corrosões localizadas em fissuras ou defeitos no aço. As mudanças químicas fundamentais nas áreas anódicas e catódicas durante o processo de corrosão podem ser representadas pelas equações 01 e 02.



Os cloretos, em forma de cristal sólido, não representam um alto risco à durabilidade das estruturas devido à dificuldade de penetração, uma vez que os poros do concreto são menores que os cristais. Helene (1993) considera que os cloretos podem entrar no concreto endurecido por mecanismos como absorção capilar, difusão, permeabilidade e migração de íons. Quando o concreto está completamente saturado, os cloretos penetram principalmente por difusão, enquanto em condições parcialmente saturadas, podem ocorrer por absorção e capilaridade (ANDRADE, 1993). A sucção capilar é identificada como a forma mais rápida de penetração da água em concretos relativamente secos. Os cloretos no concreto podem existir quimicamente ligados, fisicamente adsorvidos e livres, sendo apenas os livres responsáveis pela quebra da película passiva do aço (TUUTTI, 1980). A fixação dos cloretos ocorre por meio da reação do aluminato tricálcico (C3A), formando cloro

aluminato, os quais são instáveis em ambientes alcalinos, mas podem ser liberados em ambientes ácidos, como devido à carbonatação. O ataque por sulfatos pode resultar na decomposição dos cloros aluminatos, tornando íons cloreto disponíveis para a corrosão.

2.2. Ensaios de Corrosão

Para analisar a agressividade de um ambiente corrosivo específico e estabelecer os fundamentos essenciais para o controle da corrosão, são realizados os chamados ensaios de corrosão, conforme Gentil (1996). A corrosão de materiais metálicos sofre a influência de vários fatores que modificam o ataque eletroquímico, o que implica na inexistência de um único método de ensaio de corrosão. Na prática, os fenômenos corrosivos se diversificam, o que exige uma ampla variedade de ensaios.

A condução de ensaios de corrosão pode ocorrer tanto em ambientes laboratoriais quanto em campo, conforme os objetivos desejados. Em ensaios de laboratório, são empregados pequenos corpos de prova devidamente definidos, onde a composição precisa do meio corrosivo é controlada. Isso permite a manutenção constante das condições do ensaio e a aceleração do processo, visando a obtenção de resultados mais rápidos.

Vale ressaltar que os ensaios acelerados distorcem as condições de agressividade, o que dificulta a correlação entre esses ensaios e as condições naturais, praticamente impossibilitando a estimativa da vida útil com base na análise dos tempos de ensaio. Apesar dessa limitação, tais ensaios podem servir como ferramentas úteis para análises comparativas, visando identificar como variações nos materiais afetam os resultados.

Porém, devido às restrições de tempo para conduzir experimentos em laboratório e à lentidão do processo de corrosão em estruturas reais, torna-se imperativo recorrer a métodos acelerados para provocar o fenômeno corrosivo em corpos de prova de concreto armado.

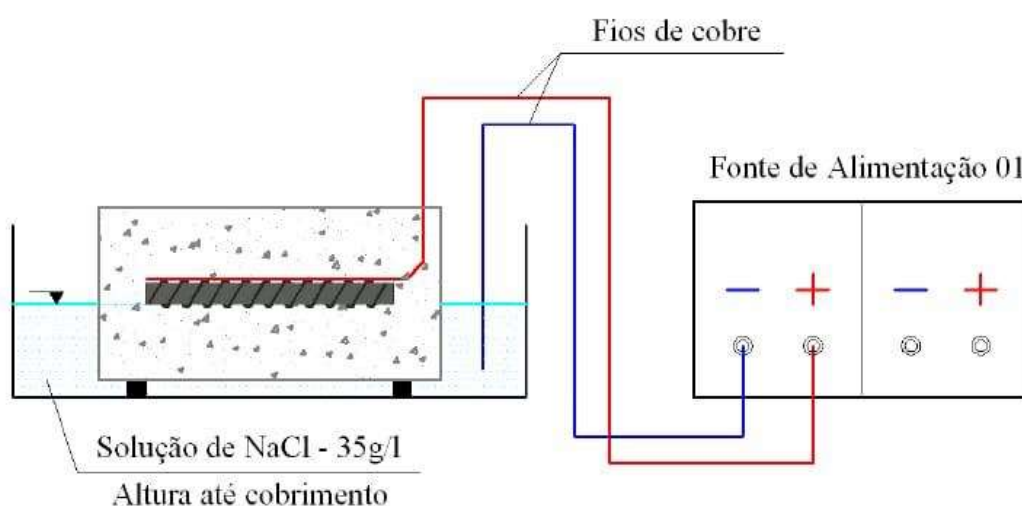
Existem vários estudos que buscam demonstrar métodos de corrosão acelerada. Dentre eles, destacam-se os trabalhos de Varela e Espinosa (1988) e Torres *et al.* (2006). No estudo de Varela e Espinosa (1988), foi analisado um recipiente de vidro fixado sobre um corpo de prova por meio de massa vedante. No interior do recipiente, uma solução com concentração de 3,5% de cloreto de sódio (NaCl) era utilizada,

juntamente com uma placa metálica conectada ao polo negativo da fonte de alimentação. A barra de armadura do corpo de prova era parcialmente inserida na amostra e conectada ao polo positivo da fonte, aplicando-se uma diferença de potencial de 60V para favorecer a propagação de cloretos para a barra de armadura, conforme ilustrado na Figura 2.

O teste CAIM foi concebido por Lima (1990) no LEME/UFRGS, baseando-se em um experimento semelhante conduzido por Varela e Espinosa (1988). Ao longo do tempo, o ensaio passou por diversas alterações por parte de diferentes pesquisadores. Torres *et al.* (2006) estabeleceu as variáveis do teste como a diferença de potencial e a relação água-cimento, investigando as variações desses parâmetros.

Por sua vez, o estudo mais recente de Torres *et al.* (2006) consistiu em analisar a sensibilidade dessa técnica de ensaio a variações em uma série de parâmetros fundamentais. Foram alvos de estudo a voltagem aplicada, o tempo de ensaio e a altura da solução de cloretos no corpo de prova. O objetivo foi investigar o comportamento do ensaio para corpos de prova com relações água-cimento variando de 0,35 a 0,70, quando submetidos a voltagens de excitação de 15, 45 e 70V, durante períodos de ensaio que variaram de 8 a 40h.

Figura 2 - Demonstração do ensaio de CAIM



Fonte: Graeff (2007)

Assim Torres *et al.* (2006) percebeu, em seus estudos, que as técnicas de avaliação da resistência à corrosão tendem a se dividir em três vertentes: visuais, gravimétricas e eletroquímicas. O ensaio de CAIM busca se enquadrar nestas

vertentes, de modo a apresentar resultados por meio da perda de massa da armadura e por ser estimulado por meios eletroquímicos. Com base nas condições apresentadas e na experiência da equipe do (LEME) com o método CAIM, decidiu-se adotá-lo como referência para o desenvolvimento do método empregado neste trabalho.

O teste CAIM é um teste eletroquímico que determina a perda de massa da barra ao final do teste. Esta perda de massa é determinada pela diferença de massa do material antes e depois do teste acelerado, segundo retratado na equação 03.

$$P_{massa} = m_{inicial} - m_{final} \quad \text{Equação 03}$$

Assim, o grau de corrosão é expresso pela porcentagem de massa que foi consumida em relação à massa inicial da barra de armadura Graeff (2007), conforme demonstrado na equação 04.

$$GC (\%) = \frac{P_{massa}}{m_{inicial}} \times 100 \quad \text{Equação 04}$$

Também, pode-se prever a perda de massa e, conseqüentemente, calcular o grau de corrosão utilizando a lei de Faraday, que também fora empregada por Helene (1993), tal como mostrado na equação 05.

$$P_{massa} = \frac{M \times i \times t}{z \times F} \quad \text{Equação 05}$$

Onde, P_{massa} é a massa de aço consumida em grama, M é o peso atômico do metal que é igual a 56 para o ferro, i é a corrente aplicada em Ampére, t é o tempo de aceleração da corrosão em segundos, z é a carga iônica que é igual a 2, F é a constante de Faraday que é igual 96500 Ampére/segundo.

É relevante enfatizar que esta expressão visa antecipar a perda de massa observada nos experimentos. Contudo, conforme destacado por Graeff (2007), os resultados iniciais para as perdas de massa revelaram uma disparidade entre os valores previstos e os efetivamente medidos. As perdas de massa obtidas foram consideravelmente menores do que as inicialmente previstas, indicando uma não correspondência entre os valores teóricos e os encontrados experimentalmente no estágio inicial. Em outras palavras, o fenômeno mostra-se mais lento na prática do que na teoria no início do experimento.

Conforme mencionado anteriormente no item 2.1, quando uma barra de armadura é exposta à ação de cloretos, é comum a ocorrência de corrosão puntiforme. Nessas áreas, a integridade da barra de armadura pode ser comprometida, com uma significativa redução de seção ou até mesmo ruptura completa de determinados segmentos. Com base em Andrade e Martinez (2005) *apud* Graeff (2007), é possível estabelecer uma relação geométrica entre o grau de corrosão, expresso pela perda de massa das barras de armadura, e a diminuição do diâmetro equivalente da barra.

Uma pesquisa conduzida por Apostolopoulos *et al.* (2006) revelou que o diâmetro das barras de armadura diminui ao longo do tempo de exposição à névoa salina.

A partir disso, pode-se expressar que a diminuição do diâmetro das barras de armadura tende a acompanhar, em termos de grandeza, a perda de massa expressa pelo grau de corrosão. Segundo Andrade e Martinez (2005) *apud* Graeff (2007), propuseram uma formulação que correlaciona valores de corrente com redução do diâmetro da seção transversal para estruturas reais, como demonstrado na equação 06.

$$P_{\phi} = 0,0115 \times i_{corr} \times t \quad \text{Equação 06}$$

Onde P é a perda de diâmetro, i_{corr} a densidade de corrente (em A/cm²). Esses valores são obtidos do acompanhamento ao longo da vida útil da estrutura após a corrosão, em anos.

Assim, é possível reformular a equação de forma a isolar o tempo, como demonstrado na equação 07, possibilitando determinar em quantos anos os efeitos ou grau de corrosão observados nestes ensaios podem ser percebidos.

$$t = \frac{P_{\phi}}{0,0115 \times i_{corr}} \quad \text{Equação 07}$$

Importante ressaltar que o valor 0,0115 representa um fator de conversão de A/cm² para perdas em mm/ano no aço. O diferencial da equação reside no fator que transforma medidas de densidade de corrente na profundidade do diâmetro das barras de aço consumidas anualmente.

Dessa forma, pode-se também representar a perda de diâmetro como a diferença entre o diâmetro inicial, mensurado antes do ensaio de corrosão, e o diâmetro final, medido após a conclusão do ensaio, como destacado na equação 08.

$$P_{\phi} = \phi_{inicial} - \phi_{final} \quad \text{Equação 08}$$

É crucial salientar que a medição dos diâmetros não é realizada por meio de instrumentos como o micrômetro. Isso se deve ao fato de que, conforme mencionado anteriormente neste item, quando uma barra de armadura é exposta à ação de cloretos, é comum ocorrer corrosão puntiforme. Essa ocorrência resultaria em uma variação significativa do diâmetro ao longo do comprimento da barra, o que poderia acarretar a resultados imprecisos. Portanto, os diâmetros foram determinados com base na densidade, conforme indicado na equação 09.

$$d = \frac{m}{v} \quad \text{Equação 09}$$

Dessa forma, deve-se reformular a equação 09 para expressar o volume conforme apresentado na equação 10. Em seguida, é isolado o diâmetro, como demonstrado na equação 11.

$$d = \frac{m}{\frac{\pi \times \phi^2}{4} \times L} \quad \text{Equação 10}$$

$$\phi = \sqrt{\frac{4m}{d \times \pi \times L}} \quad \text{Equação 11}$$

Assim, é possível observar que, com a densidade determinada pelo fabricante e as medidas de massa inicial e final, juntamente com o comprimento da barra, torna-se possível determinar seus diâmetros inicial e final.

Destaca-se, que estudos que realizam comparações entre dados experimentais de aceleração de corrosão e estruturas reais, como aquele realizado por Andrade e Martinez (2005), ainda são escassos na literatura.

2.3. Inibidores de Corrosão

Inibidores são substâncias que, quando presentes em concentrações adequadas no meio corrosivo, têm a capacidade de reduzir a corrosão, sendo reconhecidos como métodos eficazes de proteção contra esse processo (GENTIL, 1996). Para assegurar a eficácia dos inibidores, é essencial considerar quatro aspectos fundamentais.

O entendimento das causas da corrosão no sistema é fundamental para a identificação de problemas passíveis de resolução por meio do uso de substâncias inibidoras. A avaliação do custo desses inibidores em comparação com as perdas

resultantes do processo corrosivo é crucial, considerando fatores como aumento da vida útil do equipamento, eliminação de paradas não programadas e prevenção de acidentes (GENTIL, 1996). Posteriormente, torna-se imperativo examinar as propriedades e os mecanismos de ação dos inibidores, garantindo sua compatibilidade com o processo em operação e os materiais metálicos utilizados, a fim de evitar efeitos secundários prejudiciais. Por fim, é essencial estabelecer condições adequadas de adição e controle para prevenir inconvenientes, tais como formação de espuma, depósitos excessivos, efeitos tóxicos, poluição e perda de inibidores devido à deficiente solubilidade ou reações com contaminantes.

Existem diferentes classificações para os inibidores, sendo elas baseadas na composição e no comportamento. Quanto à composição, há inibidores orgânicos e inorgânicos; no que diz respeito ao comportamento, existem inibidores oxidantes, não-oxidantes, anódicos, catódicos e de adsorção. Essa categorização visa organizar os inibidores de acordo com suas propriedades distintas (GENTIL, 1996).

Simultaneamente, Andrade e González (1988) categorizam os métodos de proteção das armaduras em duas classes: aqueles que agem diretamente sobre a armadura, como proteção catódica, recobrimentos metálicos galvanizados e pinturas epóxicas; e aqueles que atuam sobre o concreto que envolve a armadura, incluindo aditivos inibidores de corrosão e pinturas epóxicas.

Atualmente, existem aditivos químicos acrescentados ao cimento e ao concreto que aprimoram sua resistência à corrosão no estado endurecido. Entre as adições ao cimento estão a microssílica, cinzas volantes e escória de alto forno. Comercialmente disponíveis, o látex de estireno butadieno, inibidores de corrosão como aditivos à base de nitrito de cálcio e eteraminas, são empregados. Além disso, há aditivos redutores de água que facilitam a redução do fator água/cimento, necessário para a produção de concretos resistentes à penetração de agentes agressivos (GRANATO, 2002). Essas melhorias visam fortalecer a durabilidade e a resistência do material frente à corrosão.

Geralmente, os inibidores devem ser integrados a um abrangente sistema de proteção e reparo, que pode incluir a aplicação de revestimentos sobre o concreto ou impregnação hidrofóbica. Quando utilizados adequadamente, os inibidores de corrosão demonstram ser uma valiosa contribuição para o desenvolvimento de reparos duráveis em concreto e para a estratégia de manutenção, conforme destacado por (FADAYOMI, 1997).

A impermeabilização na construção civil tem como objetivo evitar a passagem indesejável de água, fluidos e vapores, direcionando-os para locais específicos quando necessário (GRANATO, 2002). Além de contribuir para a habitabilidade e funcionalidade das estruturas, a impermeabilização desempenha um papel crucial na proteção contra problemas patológicos resultantes da infiltração de água, associada ao oxigênio e outros agentes atmosféricos agressivos. Muitos materiais utilizados na construção civil são suscetíveis à deterioração e degradação na presença desses agentes.

A negligência com a impermeabilização pode resultar em consequências patológicas como corrosão de armaduras, eflorescência, degradação de concreto e argamassa, formação de bolhas em tintas, curtos-circuitos, entre outros, gerando custos elevados de manutenção e recuperação.

Como já mencionado previamente por Helene (1993), os cloretos têm a capacidade de ingressar no concreto endurecido por meio de mecanismos como absorção capilar, difusão, permeabilidade e migração de íons. Portanto, a incorporação de aditivo impermeabilizante busca prevenir a corrosão pelos meios mencionados anteriormente. Isso visa a expectativa de uma redução nos resultados de perda de massa durante o ensaio de CAIM.

Conforme mencionado por Almeida (2014), a liga de aço utilizada em armaduras de concreto armado, denominada liga CA50A, é classificada como uma liga ferrosa. Nesse contexto, é observado que ocorre a quebra da camada passiva quando o pH está acima de 8 ou abaixo de 12. Esse rompimento da camada passiva pode ser desencadeado pela presença local de íons cloreto, resultando na dissolução pontual dessa película. Como resultado, na presença de água e oxigênio, facilita-se o início do processo corrosivo. Também se destaca que a ruptura da camada protetora de passivo pelos cloretos gera áreas ativas em pequena escala, com um pH significativamente baixo, atuando como ânodo, onde o metal é dissolvido e/ou corroído.

No seu trabalho, Almeida (2014) foram utilizados grupos amínicos ou carboxílicos como inibidores de corrosão. Nesse contexto, fatores essenciais para reduzir a suscetibilidade aos processos corrosivos em armaduras de concreto armado incluem a posição e o número de substituintes na estrutura química, a influência dos grupos elétron-doadores e elétron-atratores, bem como o comprimento da cadeia de carbono nas substâncias orgânicas utilizadas como inibidores de corrosão. Destacando-se, a

utilização de benzoato de sódio ($\text{C}_6\text{H}_5\text{COONa}$) e íons carboxilatos ($-\text{COOH}$) pretendendo reduzir os processos corrosivos nas armaduras de concreto armado.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Dessa forma, serão apresentados os métodos empregados, os equipamentos utilizados e os materiais selecionados para a execução do programa experimental.

3.1. Materiais

3.1.1. Cimento

Para a produção do concreto utilizado na confecção dos corpos de prova, foi empregado um cimento Portland, categorizado como CP II F-32, os materiais estão dispostos na Figura 3.

Figura 3 - Materiais



Fonte: Autor (2023)

3.1.2. Agregado Miúdo

Foi empregada areia média, que passou em uma peneira com abertura da malha de 6,3 mm, proveniente de fontes típicas da região de Aracaju, localizada no nordeste do Brasil.

3.1.3. Agregado Graúdo

Para o agregado graúdo, optou-se por utilizar uma rocha basáltica britada com diâmetro máximo de 19 mm e com granulometria nº 1.

3.1.4. Armadura

As barras empregadas nos ensaios foram produzidas com aço CA-50A, exibindo uma resistência nominal à tração de 550 MPa. Essas barras possuíam um diâmetro de 10,0 mm e um comprimento de 250 mm, de acordo com as dimensões estabelecidas para corpos de prova pela norma ABNT NBR 05738 (2015), assim como o recobrimento mínimo para vigas, conforme especificado pela norma ABNT NBR 6118 (2023).

3.1.5. Aditivo Impermeabilizante

Foi utilizado o ImperSika pó, que é um aditivo em pó para impermeabilizar concretos e argamassas, sua composição inclui quartzo, distearato de cálcio, carbonato de sódio, além de sais e ácidos graxos. A Figura 4 ilustra o aditivo empregado.

Figura 4 - Aditivo Impermeabilizante



Fonte: Autor (2023)

3.1.6. Desmoldante

Para facilitar a retirada dos corpos de prova dos moldes foi utilizado o Vedacit desmoldante para concreto, que forma uma fina camada entre o concreto e as formas, impedindo a aderência entre ambos, sua composição é composta principalmente por emulsão de ácidos graxos. A Figura 5 apresenta o desmoldante utilizado.

Figura 5 - Desmoldante



Fonte: Autor (2023)

3.2. Métodos

3.2.1. Preparação e Limpeza

Inicialmente, é essencial proceder com a limpeza das barras destinadas à corrosão. Utilizando uma escova de aço, elimina-se qualquer produto oxidado ou resíduos presentes na superfície do metal, como demonstrado na Figura 6.

Figura 6 - Limpeza das barras



Fonte: Autor (2023)

Após a limpeza, as barras são pesadas, determinando-se suas massas iniciais. Adicionalmente, são realizadas medições de comprimento com o auxílio de um paquímetro, como ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - Medições do peso e comprimento da barra inicial



Fonte: Autor (2023)

3.2.2. Moldagem

Em seguida, um fio de cobre com 1,5 mm de diâmetro é desencapado e fixado ao longo de toda a extensão da barra. São posicionados apoiados, em contato com a barra, e presos nas extremidades e no centro por um pedaço de cobre, conforme descrito por Graeff (2007). O conjunto é centralizado na forma, utilizando espaçadores de concreto (cocada) com espessura determinada pelo recobrimento da armadura, que é de 25 mm para todos os corpos de prova, conforme ilustrado na Figura 08.

Figura 8 - Fixação e posicionamento da barra



Fonte: Autor (2023)

Os corpos de prova utilizados no ensaio de corrosão CAIM adotaram a forma prismática, com dimensões de 10x10x30 cm. Por outro lado, corpos de prova cilíndricos medindo 10x10x20 cm foram empregados para avaliar a resistência do concreto por meio do ensaio de compressão. Ambos os tipos de corpos de prova seguem as medidas estabelecidas pela norma ABNT NBR 05738 (2015), a qual define os procedimentos para a moldagem, cura e desforma desses elementos. Na sequência, o concreto é produzido com as proporções indicadas na Tabela 1.

O traço foi determinado para atender aos valores mínimos de consumo e resistência à compressão estipulados pela norma ABNT NBR 12655 (2015).

Tabela 1 - Traços do concreto

TRAÇO DO CONCRETO						
	Concreto	Cimento	Areia	Brita	Relação a/c	Aditivo Imp.
TRAÇO 01	25 MPa	1	2,82	2,88	0,55	0
TRAÇO 02	25 MPa	1	2,9	3,6	0,66	0
TRAÇO 03	25 MPa	1	2,82	2,88	0,55	0,02

Fonte: Autor (2023)

Antes de realizar a moldagem do concreto, efetuou-se a aplicação do desmoldante para concretos revestidos da Vedacit sobre o molde do corpo de prova, conforme orientado pela norma ABNT NBR 14931 (2004). Essa aplicação é feita de maneira diluída em água, considerando o tipo e o estado da fôrma, seguindo a proporção recomendada pelo fabricante de 1 para 5. Utiliza-se uma trincha ou rolo de lã para aplicar o desmoldante em uma camada fina, garantindo a formação de um filme apropriado. É recomendável aguardar pelo menos 2 horas antes de iniciar a concretagem.

Posteriormente, a areia é disposta em uma bandeja, em seguida, o cimento é adicionado. Utilizando uma colher de pedreiro, o cimento e a areia são misturados até obter uma uniformidade na composição. Vale ressaltar que para o traço 03 nesse instante também é adicionado o aditivo impermeabilizante que é misturado aos demais. Posteriormente, acrescenta-se a brita e mistura-se novamente, assegurando uma distribuição homogênea de todos os materiais. Em seguida, cria-se um espaço no centro, gradualmente adiciona-se água e os materiais são misturados

manualmente até que se forme uma massa consistente e homogênea, todas as proporções dos materiais estão indicadas na Tabela 1.

Assim, após a preparação, foram confeccionados quatro corpos de prova, dois cilíndrico e dois prismático, conforme ilustrado na Figura 9. Em seguida, esses corpos de prova foram armazenados em ambiente seco, por um período de 24 e 48 horas, respectivamente, conforme orientação da norma ABNT NBR 05738 (2015). Posteriormente, realizou-se a desmoldagem, seguida pela imersão em água saturada com cal, conforme preconizado pela ABNT NBR 9479 (2006), onde todos permaneceram até atingirem a idade de 21 dias como mencionado por Graeff (2007). Após esse período, foram retirados para a execução dos ensaios de compressão e do ensaio de CAIM.

Figura 9 - Concretagem dos corpos de prova



Fonte: Autor (2023)

3.3. Ensaios

3.3.1. Ajuste do Ensaio CAIM

Conforme conduzido por Torres *et al.* (2006), o estudo concentrou-se na análise da sensibilidade desta técnica de ensaio frente a variações em diversos parâmetros fundamentais. O propósito da pesquisa é compreender o mecanismo do processo de corrosão acelerada em elementos de concreto armado. Porém para alcançar esse objetivo, devido a dificuldades de limitações dos equipamentos de tensão a pesquisa visa adaptar o ensaio de CAIM, dentro desse escopo, foram alvos de investigação a diferença de potencial e o tempo de corrosão. Esses corpos de prova foram expostos

a uma voltagem constante de 30V ao longo de períodos de ensaio de 24 e 48 horas. A fim de demonstrar sua eficácia como método de avaliação, destacando a importância de considerar a relação água-cimento de 0,55 e 0,66 e a influência de um aditivo impermeabilizante como agente anticorrosivo, explorando seus potenciais contribuições na prevenção do processo corrosivo em estruturas de concreto armado.

3.3.2. Ensaio CAIM

Foram realizadas 09 (nove) concretagens, resultando na fabricação de um total de 18 corpos de prova. Esses corpos de prova foram utilizados para representar dois períodos distintos de aceleração da corrosão. A cada concretagem, foram produzidos dois corpos de prova irmãos, provenientes do mesmo processo de moldagem. O estudo investigou variáveis em duas relações água-cimento (0,55 – 0,66) e a adição de aditivo impermeabilizante ao longo de períodos de teste de 24 e 48 horas. Com o propósito de avaliar o impacto do processo corrosivo, foram analisados três corpos de prova para cada combinação de variáveis.

Após realização das etapas anteriores, o ensaio de CAIM foi conduzido, no qual os corpos de prova foram parcialmente imersos em uma solução de NaCl com concentração de 35 g/l, semelhante à encontrada na água dos mares brasileiros como destacado por Graeff (2007). A altura da solução na superfície dos corpos de prova correspondeu ao meio da barra, com o objetivo de criar condições para facilitar o acesso tanto da umidade quanto do oxigênio, como ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Demonstração da posição dos corpos de prova para o ensaio de CAIM



Fonte: Autor (2023)

Durante a moldagem das amostras, o fio de cobre (vermelho) é posicionado acima da barra de armadura, esse fio de cobre é conectado ao polo positivo da fonte de alimentação, atuando como ânodo no processo eletroquímico. Por outro lado, um segundo fio de cobre (preto) é colocado na solução e conectado ao polo negativo da fonte de alimentação, funcionando como cátodo no processo eletroquímico. Essa metodologia segue os procedimentos detalhados descritos por Torres *et al.* (2006), assim como ilustrado na Figura 11.

Figura 11 - Ensaio CAIM



Fonte: Autor (2023)

Em seguida, a fonte é ligada, dando início ao ensaio do processo de corrosão acelerada com uma voltagem constante de 30V com exposições de 24 e 48 horas. Neste ensaio, estão sendo analisados os efeitos da relação água-cimento e da inclusão de aditivo impermeabilizante no grau de corrosão ou na variação do diâmetro. Também o tempo estimado equivalente de exposição ambiente, ou seja, sob corrosão espontânea.

Após passado o período determinado anteriormente, a fonte é desligada e os corpos de prova retirados da solução salina, em seguida são rompidos manualmente, para retirada da barra corroída, assim o excesso de concreto ao redor da barra é retirado manualmente, sendo efetuada uma limpeza final da barra através do uso da escova de aço e limpeza na água corrente, prontamente são colocadas na estufa, para secagem por um período de 10 minutos.

Por fim, as barras são pesadas para determinar sua massa final. A partir desse valor, é possível calcular a perda de massa causada pelo processo corrosivo e também o grau de corrosão.

A fim de facilitar a compreensão, as amostras serão categorizadas da seguinte forma: amostra, relação água-cimento, período de exposição e presença de aditivo. Por exemplo, (A/55/24/SA).

Onde A é a amostra com relação água-cimento 0,55 utilizada no concreto; com exposição de 24 horas; e sem aditivo impermeabilizante.

3.3.3. Ensaio de Compressão

Após realização das etapas anteriores, os corpos de prova são colocados na prensa hidráulica conforme estabelecido pela norma ABNT NBR 5739 (2018) que define o procedimento de ensaio de compressão de prova cilíndricos, assim com extremidades niveladas e garantindo que a carga seja aplicada uniformemente. Sua fixação cuidadosa na máquina assegura um alinhamento adequado. A prensa, então, aplica gradualmente uma carga axial sobre o corpo de prova até que ocorra a ruptura ou se atinja uma carga pré-determinada de 25 MPa tal como mostrado na Figura 12.

Figura 12 - Ensaio de compressão



Fonte: Autor (2023)

Ao longo do ensaio, registram-se dados como a carga aplicada e o deslocamento do corpo de prova. Essa resistência é determinada pela divisão da carga máxima suportada pelo corpo de prova pela área da seção transversal, conforme demonstrado na Figura 13.

Figura 13 - Dados do ensaio de compressão

Corpo de Prova	Diâmetro (mm)	Força @Força Max. (kgf)	Tensão @Força Max. (MPa)
CP 1	100.0	12109.58	15.12
CP 2	100.0	13149.85	16.42
Número CPs	2	2	2
Média	100.0	12630	15.77
Mediana	100.0	12630	15.77
Desv. Padrão	0.0000	735.6	0.9185
Coef. Var. (%)	0.0000	5.824	5.824
Mínimo	100.0	12110	15.12
Máximo	100.0	13150	16.42

Fonte: Autor (2023)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Análise de Perda de Massa

Na Figura 14 e Figura 15 a seguir, é possível observar o estado aparente de corrosão dos corpos de prova após 24 e 48 horas do ensaio, respectivamente.

Figura 14 - Corpo de prova submetido ao ensaio de CAIM por 24 horas



Fonte: Autor (2023)

Figura 15 - Corpo de prova submetido ao ensaio de CAIM por 48 horas



Fonte: Autor (2023)

A partir das Figura 14 e Figura 15, nota-se o extravasamento dos produtos provenientes da corrosão, por meio de rachaduras nos corpos de prova, devido a expansão da barra pela corrosão, atestando o funcionamento do experimento.

As perdas de massa foram calculadas utilizando a equação 03. Os resultados foram obtidos nos ensaios dos corpos de prova, sujeitos a 24 e 48 horas de aceleração de corrosão. Na Tabela 2 estão apresentados os valores de perda de massa associado ao traço 01, que contém uma relação água-cimento de 0,55.

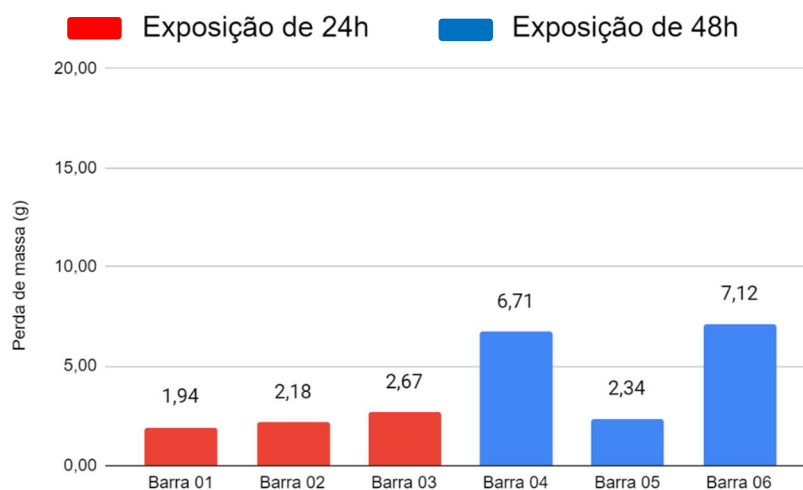
Tabela 2 - Perda de massa associada ao traço 01 em relação ao tempo de exposição.

MASSAS DAS BARRAS						
	EXPOSIÇÃO DE 24h			EXPOSIÇÃO DE 48h		
	Barra 01	Barra 02	Barra 03	Barra 04	Barra 05	Barra 06
m inicial (g)	144,90	146,81	145,75	149,99	148,62	145,84
m final (g)	142,96	144,63	143,08	143,28	146,28	138,72
Perda de massa (g)	1,94	2,18	2,67	6,71	2,34	7,12

Fonte: Autor (2023)

Na Figura 16, apresenta-se o gráfico que representa a perda de massa para o traço 01.

Figura 16 - Gráfico representando a perda de massa em relação ao traço 01 ao longo dos períodos de exposição de 24 e 48 horas.



Fonte: Autor (2023)

Na barra 05, foi observada uma perda de massa relativamente baixa. Essa ocorrência pode ser atribuída a uma falha em uma das fontes de corrosão. Durante o ensaio, foi identificado que a fonte, embora estivesse ligada, não apresentou nenhuma reação aparente, como bolhas na solução ao redor do polo negativo, ao contrário do observado nas barras 05 e 06.

Na Tabela 3, observam-se os valores de perda de massa para o traço 02 com uma relação água-cimento de 0,66, evidenciando-se valores mais elevados de corrosão do que na Tabela 2.

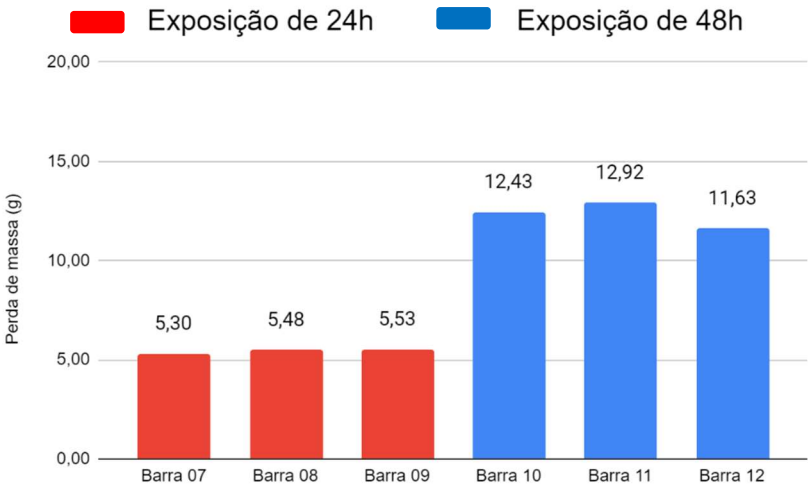
Tabela 3 - Perda de massa associada ao traço 02 em relação ao tempo de exposição.

MASSAS DAS BARRAS						
	EXPOSIÇÃO DE 24h			EXPOSIÇÃO DE 48h		
	Barra 07	Barra 08	Barra 09	Barra 10	Barra 11	Barra 12
m inicial (g)	151,02	149,29	152,61	149,19	151,73	149,37
m final (g)	145,72	143,81	147,08	136,76	138,81	137,74
Perda de massa (g)	5,30	5,48	5,53	12,43	12,92	11,63

Fonte: Autor (2023)

A Figura 17 abaixo ilustra o gráfico com as perdas de massas do traço 02 ao longo dos períodos de exposições.

Figura 17 - Gráfico representando a perda de massa em relação ao traço 02 ao longo dos períodos de exposição de 24 e 48 horas.



Fonte: Autor (2023)

Entretanto, na Tabela 4, a relação água-cimento foi mantida igual à do traço 01, representado na Tabela 2, porém com a adição do aditivo impermeabilizante com o propósito de usá-lo como inibidor de corrosão, visando prevenir a corrosão e, por conseguinte, reduzir a perda de massa.

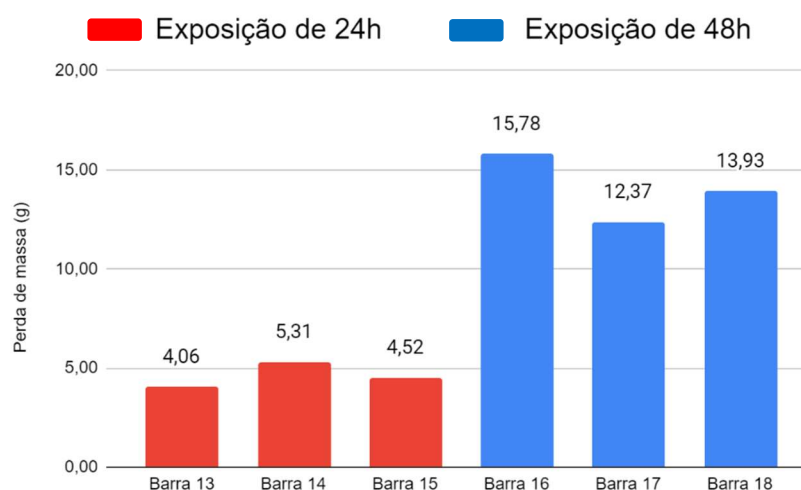
Tabela 4 - Perda de massa associada ao traço 03 em relação ao tempo de exposição.

MASSAS DAS BARRAS						
	EXPOSIÇÃO DE 24h			EXPOSIÇÃO DE 48h		
	Barra 13	Barra 14	Barra 15	Barra 16	Barra 17	Barra 18
m inicial (g)	149,27	149,94	149,72	149,63	149,14	149,33
m final (g)	145,21	144,63	145,2	133,85	136,77	135,4
Perda de massa (g)	4,06	5,31	4,52	15,78	12,37	13,93

Fonte: Autor (2023)

O gráfico na Figura 18 representa os dados obtidos no ensaio de CAIM para o traço 03 com presença do aditivo impermeabilizante em função dos períodos de exposição de 24 e 48 h.

Figura 18 - Gráfico representando a perda de massa em relação ao traço 03 ao longo dos períodos de exposição de 24 e 48 horas.



Fonte: Autor (2023)

Nas Figura 19, é possível observar as condições das barras após o ensaio. É perceptível, principalmente, a formação de corrosão em pontos específicos ou em

pequenas áreas localizadas na superfície metálica ao longo de toda a barra. Essa corrosão é característica da corrosão por pite. Além disso, nota-se a presença de pequenas escavações com fundo arredondado e profundidade, sugerindo possivelmente uma característica associada à corrosão alveolar.

Figura 19 - Corrosão por pites nas barras



Fonte: Autor (2023)

4.2. Análise de Grau de Corrosão

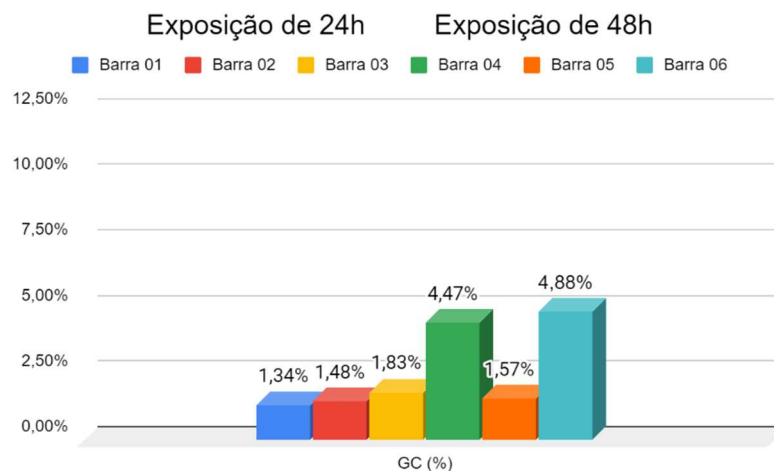
Dessa forma, na Tabela 5 estão representados os valores encontrados do grau de corrosão para o traço 01.

Tabela 5 - Grau de corrosão em relação ao traço 01.

GRAU DE CORROSÃO (GC)						
	EXPOSIÇÃO DE 24h			EXPOSIÇÃO DE 48h		
	Barra 01	Barra 02	Barra 03	Barra 04	Barra 05	Barra 06
GC (%)	1,34%	1,48%	1,83%	4,47%	1,57%	4,88%

Fonte: Autor (2023)

Assim, é possível constatar na Tabela 5 que as amostras com relação água-cimento 0,55 expostas por 24 horas, sem o aditivo (A/55/24/SA) apresentou o grau de corrosão das barras que variou em média de 1,55%, enquanto as barras expostas sobre mesma relação água-cimento, mas expostas por 48 horas (A/55/48/SA) apresentaram um grau de corrosão em média de 4,68%. Isso representa uma variação média de 3,13% entre os períodos de 24 a 48 horas, como ilustrado na Figura 20.

Figura 20 - Gráfico de grau de corrosão ao longo dos períodos de exposição de 24 e 48 horas.

Fonte: Autor (2023)

Ao analisar os resultados de Almeida (2014), que conduziu o ensaio de corrosão CAIM com uma diferença de potencial de 30V e um período de exposição de 24 horas, utilizando uma relação água-cimento de 0,5, observou-se um grau de corrosão de 1,38%. Ao comparar esses dados com os obtidos sob as mesmas condições, verifica-se um valor médio de 1,55%, que são numericamente muito próximos. A diferença de 0,17% entre os dados pode ser atribuída à variação na relação água-cimento e a possíveis erros de precisão nos instrumentos de medição.

Vale ressaltar que, conforme mencionado anteriormente, na barra 05 foi registrada uma significativa redução no grau de corrosão.

Na Tabela 6, nota-se que o grau de corrosão das barras expostas por 24 horas (A/66/24/SA) está na faixa de 3,51 a 3,67%, mais que o dobro do observado na Tabela 5 para (A/55/24/SA). O mesmo padrão pode ser identificado ao analisar e comparar os dados referentes (A/66/48/SA) em relação a (A/55/48/SA).

Tabela 6 - Grau de corrosão em relação ao traço 02

GRAU DE CORROSÃO (GC)						
	EXPOSIÇÃO DE 24h			EXPOSIÇÃO DE 48h		
	Barra 07	Barra 08	Barra 09	Barra 10	Barra 11	Barra 12
GC (%)	3,51%	3,67%	3,62%	8,33%	8,52%	7,79%

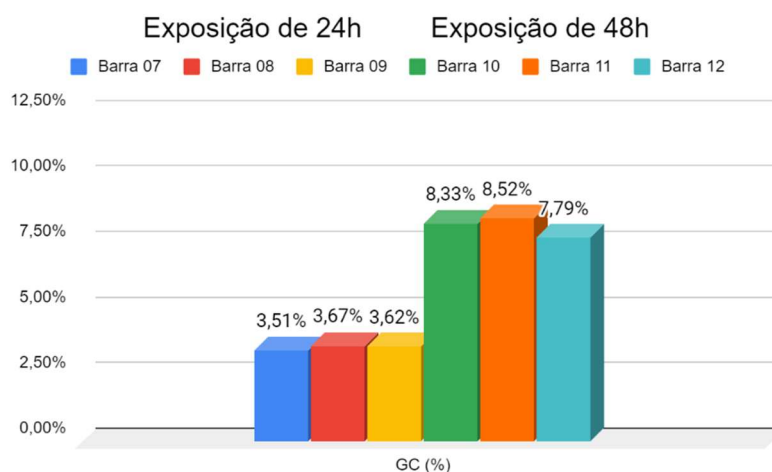
Fonte: Autor (2023)

Isso ocorre devido ao aumento da relação água-cimento, tornando o corpo de prova mais poroso. Conforme Helene (1993) destaca, os cloretos podem penetrar no concreto por mecanismos como absorção capilar, difusão, permeabilidade e migração de íons. Quando o concreto está completamente saturado, os cloretos penetram principalmente por difusão, enquanto em condições parcialmente saturadas, podem ocorrer por absorção e capilaridade (ANDRADE, 1993). Assim, é possível inferir que o corpo de prova com uma relação água-cimento mais elevada demonstra uma corrosão mais acentuada, conforme evidenciado pelos resultados coletados.

Ao comparar as análises de grau de corrosão e a avaliação visual realizadas por Torres *et al.* (2006), os resultados são bastante consistentes. Torres verificou uma perda de massa significativa na relação água-cimento 0,7, com voltagens de 45V, e os valores de grau de corrosão em proporção à diferença de potencial (ddp) foram próximos aos encontrados neste estudo, com uma precisão média entre os valores de 95,81%. Além disso, foram registradas perdas de massa consideráveis nos corpos de prova com relação água-cimento 0,5, embora com uma redução em comparação com aqueles de maior teor de água-cimento.

Isso reforça a conclusão de que o aumento da relação água-cimento torna o corpo de prova mais poroso, tornando-o mais propenso à corrosão. A Figura 21 abaixo mostra o gráfico com o grau de corrosão do traço 02 ao longo dos períodos de exposições. Como mencionado anteriormente no item 3.3, ao final do ensaio, realiza-se uma limpeza final, observou-se em ensaios uma dificuldade na remoção da corrosão, que poderia acarretar em valores um pouco maiores.

Figura 21 - Gráfico de grau de corrosão ao longo dos períodos de exposição de 24 e 48 horas.



Fonte: Autor (2023)

Contudo, ao examinar a Tabela 7, nota-se que os valores de grau de corrosão são superiores aos apresentados na Tabela 5. Enquanto na Tabela 5 o grau de corrosão médio para (A/55/24/SA) foi de 1,55%, já na Tabela 7 obtêm-se valores (A/55/24/CA) médios de 3,09%, o dobro do observado nas amostras anteriores. Essa tendência também é percebida para as amostras (A/55/48/SA) e (A/55/48/CA). Portanto, o aditivo impermeabilizante deveria atuar como inibidor de corrosão e consequentemente, diminuir a perda de massa. No entanto, seu efeito foi contrário ao esperado.

No entanto, como mostrado anteriormente na Tabela 1, a proporção água-cimento foi mantida igual à do traço 01, mas com a inclusão do aditivo impermeabilizante. Na Tabela 7 podemos observar os valores de grau de corrosão expresso para o traço 03.

Tabela 7 - Grau de corrosão em relação ao traço 03.

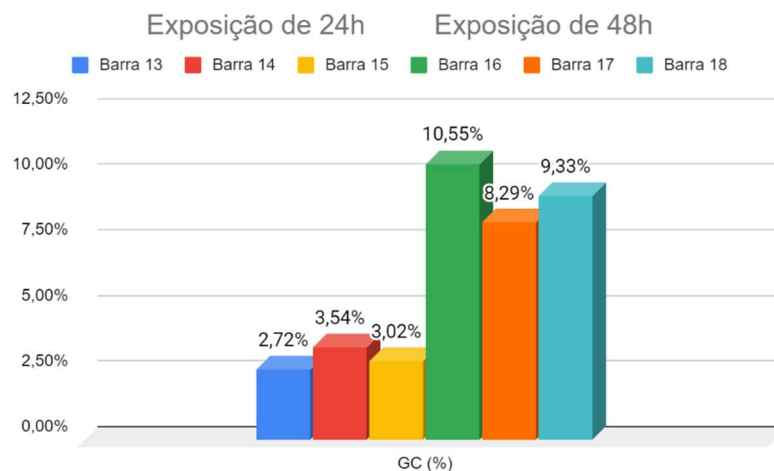
GRAU DE CORROSÃO (GC)						
	EXPOSIÇÃO DE 24h			EXPOSIÇÃO DE 48h		
	Barra 13	Barra 14	Barra 15	Barra 16	Barra 17	Barra 18
GC (%)	2,72%	3,54%	3,02%	10,55%	8,29%	9,33%

Fonte: Autor (2023)

A possível causa desse fenômeno pode ser atribuída a diversos fatores, entre eles a composição do material, que pode ter alterado o pH do meio. A liga de aço CA50A, é uma liga ferrosa suscetível à corrosão. Essa liga apresenta ruptura da camada passiva quando o pH está acima de 8 ou abaixo de 12. Almeida (2014) destaca que a ruptura da camada protetora de passivo pelos cloretos cria pequenas áreas ativas com pH significativamente baixo, atuando como ânodo, onde o metal é dissolvido e/ou corroído.

A Figura 22 exibe o gráfico que representa o grau de corrosão durante os diferentes períodos de exposição para o traço 03. Nota-se uma variação nos valores do grau de corrosão, que pode ser atribuída à dificuldade de remoção da corrosão da barra.

Figura 22 - Gráfico de grau de corrosão ao longo dos períodos de exposição de 24 e 48 horas.



Fonte: Autor (2023)

4.3. Análise de Tempo Real em Relação a Perda de Diâmetro

Assim, de acordo com Graeff (2007), é possível estabelecer uma relação entre o grau de corrosão, representado pela perda de massa das barras de armadura, e a redução do diâmetro do aço, como exemplificado na equação 06. Os valores resultantes da redução de diâmetro, calculados conforme a equação 11, para os graus de corrosão indicados na Tabela 5, estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Diferença de diâmetro das barras em relação ao grau de corrosão sobre o traço 01

DIFERENÇA DE DIÂMETRO						
	Barra 01	Barra 02	Barra 03	Barra 04	Barra 05	Barra 06
D' (cm)	0,9762	0,9811	0,9675	0,9826	0,9825	0,9829
D (cm)	0,9697	0,9738	0,9586	0,9604	0,9748	0,9586
D' - D (mm)	0,0656	0,0731	0,0890	0,2223	0,0777	0,2429
L (cm)	24,6420	24,7200	25,2360	25,1780	24,9520	24,4670

Fonte: Autor (2023)

Assim, os valores de tempo em anos correspondentes aos graus de corrosão estão registrados na Tabela 9. É importante destacar que, com o valor de grau de corrosão de 1,55%, podem-se estimar um período real de corrosão de aproximadamente 7,35 anos.

Tabela 9 - Tempo real estimado para o grau de corrosão

TEMPO REAL						
	Barra 01	Barra 02	Barra 03	Barra 04	Barra 05	Barra 06
t (ano)	3,8386	4,2801	5,2117	13,0138	4,5460	14,2211

Fonte: Autor (2023)

Na Tabela 10, observam-se valores mais elevados para a diferença de diâmetro, refletindo em períodos mais longos em termos de tempo real. Isso é evidenciado na Tabela 11, que apresenta um tempo real de até 28 anos. Como mencionado anteriormente, as limitações de tempo para realizar experimentos de campo e a natureza lenta do processo de corrosão em estruturas reais destacam as condições do ensaio e a aceleração do processo, buscando alcançar resultados mais rapidamente.

Tabela 10 - Diferença de diâmetro das barras em relação ao grau de corrosão sobre o traço 02

DIFERENÇA DE DIÂMETRO						
	Barra 07	Barra 08	Barra 09	Barra 10	Barra 11	Barra 12
D' (cm)	0,9759	0,9765	0,9911	0,9745	0,9923	0,9904
D (cm)	0,9586	0,9584	0,9730	0,9330	0,9491	0,9510
D' - D (mm)	0,1728	0,1809	0,1812	0,4148	0,4319	0,3934
L (cm)	25,7010	25,3750	25,1810	25,4620	24,9730	24,6820

Fonte: Autor (2023)

Tabela 11 - Tempo real estimado para o grau de corrosão

TEMPO REAL						
	Barra 07	Barra 08	Barra 09	Barra 10	Barra 11	Barra 12
t (ano)	11,3402	11,8735	11,8949	27,2253	28,3480	25,8193

Fonte: Autor (2023)

Na Tabela 13, encontram-se os maiores valores de tempo real, destacando um resultado de 32,24 anos, correspondente a um grau de corrosão de 10,55%. Conforme mencionado por Graeff (2007), danos significativos são mais evidentes em corpos de prova com graus de corrosão superiores a 10%, exigindo tratamento ou recuperação obrigatórios em casos mais críticos. Isso evidencia que estruturas com 30 anos de

idade podem apresentar problemas, impactando a durabilidade esperada. Destaca-se, assim, a importância desses ensaios e estudos sobre inibidores para combater esses problemas.

Tabela 12 - Diferença de diâmetro das barras em relação ao grau de corrosão sobre o traço 03

DIFERENÇA DE DIÂMETRO						
	Barra 13	Barra 14	Barra 15	Barra 16	Barra 17	Barra 18
D' (cm)	0,9702	0,9786	0,9817	0,9759	0,9838	0,9902
D (cm)	0,9569	0,9611	0,9667	0,9230	0,9421	0,9429
D' - D (mm)	0,1329	0,1748	0,1493	0,5289	0,4168	0,4732
L (cm)	25,7010	25,3750	25,1810	25,4620	24,9730	24,6820

Fonte: Autor (2023)

Tabela 13 - Tempo real estimado para o grau de corrosão

TEMPO REAL						
	Barra 13	Barra 14	Barra 15	Barra 16	Barra 17	Barra 18
t (ano)	8,0968	10,6560	9,1000	32,2364	25,4038	28,8372

Fonte: Autor (2023)

5. CONCLUSÃO

A manutenção constante das condições do ensaio e a aceleração do processo são cruciais para garantir viabilidade e eficiência nos resultados, visando uma obtenção mais rápida dos mesmos, sendo assim necessária a análise para determinação dos valores de corrosão sob variadas condições.

O ensaio CAIM é um teste acelerado de corrosão altamente sensível, fornecendo resultados eficazes em períodos de 24 a 48 horas. Sob uma tensão de 30V e uma relação água-cimento de 0,55, pode-se obter valores de corrosão variando de 1,30% a 5,00% respectivamente. Em condições semelhantes, mas com uma relação de água-cimento de 0,66, observou-se um aumento nos valores de corrosão, atingindo até 10,55%. percebendo-se então que à medida que a relação água-cimento aumenta, verifica-se um incremento nos resultados corrosivos.

Além disso, infere-se que o aditivo impermeabilizante estudado não age como agente anticorrosivo, uma vez que acelera a corrosão em até o dobro do valor esperado. Portanto, sua eficácia contra a corrosão é questionável com base nos resultados obtidos.

Pode ser considerada uma análise rápida, pois viabiliza a avaliação visual do comportamento ao longo do tempo, revelando a corrosão equivalente a períodos extensos que podem resultar em significativos problemas estruturais em um prazo inferior à vida útil da estrutura. Um exemplo disso é a obtenção de um grau de corrosão de 10,55% em aproximadamente 32 anos. Além disso, permite a apreciação da intensidade da corrosão, que dita a dinâmica do processo.

A condução do ensaio demanda atenção e dedicação por parte do pesquisador para monitorar a evolução e a intensidade da corrente, bem como as modificações visuais nos corpos de prova.

Assim, isso abre perspectivas para futuras pesquisas no campo, visando: avaliar distintos tipos de cimento e aditivos, ou comparar o ensaio CAIM com outros testes sob as mesmas condições ambientais.

6. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, P. *et al.* **Efeito inibidor dos ânions carboxilatos e benzoato na corrosão de armaduras de concreto armado.** Fortaleza, 2014.

ANDRADE, C. **Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements.** Cement and Concrete Research, Vol. 23, pp. 724-742, 1993.

ANDRADE, C.; GONZÁLEZ, J. A. **Tendencias actuales en la investigación sobre corrosión de armaduras.** Informes de la Construcción, Vol. 40, nº 398, nov/dec, 1988.

ANDRADE, C.; MARTINEZ, I. **Advanced methods of corrosion measurement in real concrete structures.** In: QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES AND RECENT ADVANCES IN CONCRETE MATERIALS AND TESTING, 2005, Olinda. Proceedings: Fourth International Conference. Olinda: ACI, 2005.

APOSTOLOPOULOS, C. A.; PAPADOPOULOS, M. P.; PANTELAKIS, S. G. **Tensile behavior of corroded reinforcing steel bars BSt 500s.** Construction and Building Materials. Vol. 20, pp. 782-789, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos de prova de argamassa e concreto.** ABNT/NBR 9479. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento.** ABNT/NBR 12655. Rio de Janeiro, 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Confecção de corpos de prova e cura de corpos de prova de concreto cilíndrico ou prismáticos – método de ensaio.** ABNT/NBR 5738. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Execução de estruturas de concreto - Procedimento**. ABNT/NBR 14931. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projetos de estruturas de concreto - Procedimento**. ABNT/NBR 6118. Rio de Janeiro, 2023.

CABRAL, A. E. B. **Avaliação da Eficiência de Sistemas de Reparo no Combate à Iniciação e à Propagação da Corrosão do Aço Induzida por Cloretos**. Porto Alegre – RS, 2000. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CASCUDO, O. **O Controle da Corrosão de Armaduras em Concreto. Inspeções e técnicas eletroquímicas**. São Paulo: Pini; Goiânia, GO: Editora UFG, 1997. 237p.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3. ed. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos editora S.A. 1996. 345 p.

FADAYOMI, J. **Corrosion Inhibitors**. Concrete, Vol. 31, Nº 8, 1997. p. 21-22.

GRAEFF, A. G. **Avaliação experimental e modelagem dos efeitos estruturais da propagação da corrosão em elementos de concreto armado**. Porto Alegre-RS, 2007. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

GRANATO, J.E. **Patologia das construções**. 2002.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em estruturas de concreto armado**. 1993. Tese de Livre Docência – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

LIMA, M. G. **Influência dos componentes do concreto na corrosão de armaduras**. 1990. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

TORRES, A. S. *et al.* **Qualificação do ensaio CAIM de corrosão acelerada**. In: 48º IBRACON, 2006, Rio de Janeiro. Anais... IBRACON, 2006.

TRETHEWEY, K. R.; CHAMBERLAIN, J. **Corrosion for Students of Science Engineering**. London: Longman Scientific & Technical, 3ª ed., 1992. 382p.

TUUTTI, K. **Service life of structures with regard to corrosion of embedded steel**. In: ACI Publication (SP-65). International Conference on Performance of Concrete in Marine Environment. Proceedings. August, 1980.

VARELA, H; ESPINOZA, L. V. **Penetrabilidad De Iones Cloruros En Morteros Con Y Sin Revestimiento**. In: VII Jornadas Chilenas Del Hormigón E I Jornada Latinoamericana Del Cimento Y Hormigón, Curso: Avances Tecnológicos En El Uso De Cementos Y Hormigones, 1988, Santiago De Chile. Anais... Santiago De Chile: Instituto Profesional De Santiago, 1988. p. 82-91.