



Ministério da Educação
Secretaria de Educação
Profissional e Tecnológica

**DIRETORIA DE ENSINO DO CAMPUS DE SALVADOR
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
(EDIFICAÇÕES)**

CARLOS GUILHERME BURGOS SANTOS

Estudo do sistema de proteção catódica no concreto armado

SALVADOR

2023

CARLOS GUILHERME BURGOS SANTOS

Estudo do sistema de proteção catódica no concreto armado

Projeto de Pesquisa para o Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao IFBA - Campus Salvador, como integrante dos requisitos para obtenção do grau técnico em edificações.

Orientador: (Prof. Dr. Adriano Fortes)

SALVADOR

2023

CARLOS GUILHERME BURGOS SANTOS

ESTUDO DO SISTEMA DE PROTEÇÃO CATÓDICA NO CONCRETO ARMADO

Trabalho de conclusão de curso como parte integrante dos requisitos para obtenção do grau de Técnico em Edificações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Adriano Silva Fortes
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA BAHIA
(IFBA),

Prof. Dr. Élvio Antonino Guimarães
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA BAHIA
(IFBA),

Prof. Me. Ubiratan Félix Pereira dos Santos
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA BAHIA
(IFBA).

DEDICATÓRIA

A

Alice, minha heroína e mãe, por todo o apoio e incentivo.

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus, por todo livramento, energia e capacidade dada em todo o processo.

À minha mãe, principalmente, por batalhar todos os dias para me dar a condição de realizar esse desafio e sempre me dar um apoio incondicional.

A meus amigos, que me deram confiança em todo o trajeto e ouviram minhas lamentações.

Ao meu orientador, Adriano Silva Fortes, que me guiou em todo o processo e fez o possível e o impossível para garantir um trabalho com o máximo de qualidade.

A empresa Concrelab, que abriu as portas para a realização de todo o experimento e garantiu os materiais para sua confecção.

Por fim, agradeço a todos que torceram pelo meu êxito.

Nada detém a inexorável marcha do tempo.
(Exército Brasileiro).

RESUMO

Essa pesquisa estudou o método de proteção catódica, por meio do sacrifício de dois metais com potenciais de oxidação maior do que o aço, para precaver a ação da corrosão nele. Neste estudo, foi realizada a análise comparativa entre dois metais zinco e alumínio. Para avaliar a eficácia de ambos os ânodos no sistema de proteção catódica. Durante o experimento, foi confeccionado corpos de provas visando simular uma estrutura de concreto armado com resistências similares às usadas nas construções e armazenadas em um ambiente extremamente agressivo a fim de tratar em um pior cenário. No fim de 7 meses, foram coletados os dados finais do experimento. A partir disso, as análises visuais indicaram indícios de reações pois a lâmina de alumínio possuía uma degradação aparente e de forma significativa. Entretanto, a análise feita com as massas iniciais e finais não apresentaram uma diferença que pudesse evidenciar todo o fenômeno fazendo com que o resultado não fosse satisfatório. Todavia, evidenciou a necessidade de um estudo mais aprofundado sobre o tema.

Palavras-chave: Concreto. Aço. Corrosão. Ânodo de sacrifício. Sistema de proteção catódica.

ABSTRACT

This research studied the cathodic protection method, through the sacrifice of two metals with greater oxidation potentials than steel, to prevent the action of corrosion on it. In this study, a comparative analysis was carried out between two metals zinc and aluminum. To evaluate the effectiveness of both anodes in the cathodic protection system. During the experiment, specimens were created to simulate a reinforced concrete structure with resistance similar to those used in construction and stored in an extremely aggressive environment in order to deal with a worst-case scenario. At the end of 7 months, the final data of the experiment were collected. From this, visual analyzes indicated signs of reactions as the aluminum sheet had apparent and significant degradation. However, the analysis carried out with the initial and final masses did not show a difference that could highlight the entire phenomenon, making the result unsatisfactory. However, it highlighted the need for a more in-depth study on the topic.

Keywords: Concrete. Steel. Corrosion. sacrificial node. Cathodic protection system.

TABELA DE ILUSTRAÇÕES

TABELA 1 – PORCENTAGEM DE SUBSTÂNCIA NO CIMENTO.....	13
GRÁFICO 1 – RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO X RESISTÊNCIA.....	14
TABELA 2 –TABELA DE AGRESSIVIDADE DO MEIO.....	16
FIGURA 1 – REAÇÃO QUÍMICA QUE AGE NAS PEÇAS DE CONCRETO.....	18
FIGURA 2 – FLUXO DE CORRENTE NO CONCRETO ARMADO.....	18
FIGURA 3 – EQUAÇÕES DA REAÇÃO.....	19
TABELA 3 – SÉRIE GALVÂNICA.....	20
FIGURA 4 – CORTE DA PEÇA DE CONCRETO ARMADO.....	20
FIGURA 5 – CIMENTO USADO PARA A CONFECÇÃO DO CORPO DE PROVA...22	
QUADRO 4 – CARACTERÍSTICAS DO CIMENTO.....	22
FIGURA 6 – AREIA USADA NA PESQUISA.....	23
FIGURA 7 – BRITA.....	24
QUADRO 5 E 6 - ESPECIFICAÇÃO DO FORNECEDOR.....	24
FIGURA 8 – BARRAS DE AÇO.....	25
QUADRO 7 - DOSAGEM DE CONCRETO DE 20MPA.....	26
QUADRO 8 - DOSAGEM DE CONCRETO DE 30MPA.....	26
FIGURA 9– BALANÇAS DE PRECISÃO.....	27
FIGURA 10 – MISTURA DE MATERIAIS.....	28
FIGURA 11 E 12- PILHA.....	29
FIGURA 13 E 14– CORPOS DE PROVA.....	30
FIGURA 15– CORPO DE PROVA ENDURECIDO.....	31
FIGURA 16 E 17 – CORPOS DE PROVA APÓS EXPOSIÇÃO.....	32
FIGURA 17– ENSAIO DESTRUTIVO.....	33
FIGURA 18 – AÇO RETIRADO.....	33
FIGURA 19 E 20 - LÂMINA DE ALUMÍNIO DESGASTADA.....	34
QUADRO 8 E 9 – COMPARAÇÃO DAS FASES DO EXPERIMENTO.....	34
FIGURA 21 E 22 – COMPARAÇÃO ENTRE AS PILHAS.....	35

TABELA DE ABREVIações

Zn	Zinco
Al	Alumínio
O ₂	Oxigênio
C	Óxido de cálcio
S	Sílica
A	Alumina
F	Óxido de ferro
CP	Corpo de prova

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	12
1.2 JUSTIFICATIVA.....	14
1.3.1 GERAL.....	14
1.3.2 ESPECÍFICOS.....	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1 CONCRETO.....	16
2.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO.....	16
2.2.1 ESTADO FRESCO.....	16
2.3 COMPONENTES DO CONCRETO.....	17
2.3.3. ÁGUA.....	18
2.3.3 CIMENTO.....	19
2.3.4 HIDRATAÇÃO DO CIMENTO.....	20
2.4. CONCRETO ARMADO.....	20
2.5 FATORES PREJUDICIAIS AO CONCRETO ARMADO.....	21
2.5.1 PROCESSOS DE DETERIORAÇÃO DO CONCRETO.....	21
2.5.1 PROCESSOS DE DETERIORAÇÃO DA ARMADURA.....	21
2.6 AMBIENTES AGRESSIVOS.....	22
2.7. COMO OPERA A CORROSÃO.....	23
2.8 PROTEÇÃO CATÓDICA.....	26
3 - METODOLOGIA.....	28
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS.....	28
3.1.1 CIMENTO.....	28
3.1.2 AREIA.....	29
3.1.2 BRITA.....	29
3.1.3 AÇO.....	30
3.1.4 Formação da pilha.....	30
3.2 DOSAGEM.....	31
3.3 PRODUÇÃO DO CONCRETO.....	32
3.4 ADAPTAÇÃO DA ARMADURA COM O ÂNODO.....	33
3.5 MOLDAGEM.....	34
3.6 ARMAZENAMENTO.....	36
3.4 ENSAIO DESTRUTIVO.....	37
4 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	39
4.1 ANÁLISE VISUAL.....	39
4.2 ANÁLISE POR MEIO DA MASSA.....	40
5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	42
5.1 DISCUSSÃO.....	42
6 REFERÊNCIAS.....	43

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A construção civil é de suma importância à humanidade. Por meio dela, os seres humanos detêm privacidade, segurança, conforto e proteção contra intempéries. Por conta disso, há uma constante necessidade na busca de artifícios para aumentar as propriedades resistivas e duráveis do imóvel.

Ao longo dos avanços na área da construção civil, chegaram às atuais edificações feitas com concreto armado, isto é, uma peça que mistura o aço com o concreto. Trata-se de uma combinação completa, levando em consideração que o concreto resiste muito bem à compressão, mas não à tração que fica sob responsabilidade do aço.

Entretanto, a maioria dos metais estão sujeitos a corrosão que reduz de forma significativa essas virtudes, afetando a vida útil e colocando em risco a construção.

As cidades litorâneas são ambientes extremamente agressivos que aceleram esse fenômeno, por conta da sua proximidade com o mar, umidade e poluição do ar.

O concreto está sujeito a sofrer algum tipo de deterioração, principalmente, em regiões agressivas, o que gera uma reação em cadeia, ou seja, abre um caminho para que o oxigênio reaja com o aço, promovendo a corrosão da armadura. O concreto fica mais suscetível à degradação de acordo com a localidade que utiliza-o.

Na norma da ABNT 6118, há uma classificação dos ambientes mais agressivos, levando em consideração as ações químicas e físicas que o meio gerará (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS, 2003). A partir disso, a cidade de Salvador, região é considerada extremamente agressiva já que as características climatológicas, a alta umidade no ar, o elevado regime de chuva e a proximidade do mar agrava, cada vez mais, o processo corrosivo nas edificações. Sendo assim, provoca-se uma deterioração do concreto e posteriormente o lascamento, abrindo espaços para agentes agressivos.

Após a entrada, há uma degradação da partícula passivadora, principal protetora do aço, a qual diminui a zero a possibilidade de corrosão do aço pré-existente no concreto por conta do seu pH alcalino em torno de 12,5. Com isso, acarretando na entrada do oxigênio (O₂), da umidade e de cloretos, componentes necessários para a formação de uma pilha.

Atualmente, a corrosão vem sendo combatida de duas formas, geralmente, com o uso de uma solução química e com o próprio sistema de proteção catódica. Nesse sentido, a solução química disponível no mercado é um líquido fosfatizante que promete retirar a camada mais externa da película de ferrugem residual, transformando-a em fosfato de ferro que impede a formação da corrosão, para que após esse processo seja feita uma pintura, geralmente com tinta epóxi, no metal visando construir um meio que evite o contato da barra com o oxigênio proveniente da atmosfera, esse processo é conhecido como galvanização a frio. Há também, o uso do sistema de proteção catódica no concreto armado usando com metal de sacrifício o zinco (Zn).

Entretanto, os inibidores químicos passaram pelo teste Salt Spray que expõe o material em um meio salino demonstrou, em média, uma durabilidade de 1200 horas. Enquanto, o processo de proteção catódica possui uma vida útil de cerca de 15 a 20 anos, a depender do material utilizado. Sendo assim, em ambientes agressivos esse sistema é utilizado em larga escala, uma vez que apresenta uma maior durabilidade e facilidade de aplicação.

Embora o zinco (Zn) seja um dos principais metais de sacrifício preterido na construção civil, pois ele possui a tendência de oxidar no lugar do ferro. Tendo isto em vista, o alumínio pode apresentar uma qualidade igual ou até mesmo superior que ele? Trata-se da pergunta que desejasse responder.

O alumínio é um metal muito utilizado na indústria de bebidas em todo o mundo. Além disso, possui uma facilidade em reciclagem, tornando possível a recuperação quase completa do material. Sendo assim, uma lata poderá ser a resposta para proteger uma viga estrutural da corrosão.

Portanto, espera-se que esse sistema de proteção catódica, com o alumínio sendo o metal de sacrifício, proteja de uma forma mais eficaz e garantindo a

manutenção da propriedade de resistir aos esforços solicitantes. Pois, há uma falta de debate sobre o assunto.

1.2 JUSTIFICATIVA

A corrosão é uma anomalia que deteriora a edificação e põe em risco a integridade das construções em que ela assola.

No dia 6 de fevereiro de 2018, um viaduto cedeu, em Brasília, por conta do rompimento da secção do aço, felizmente, não deixou feridos.

A perícia fez o inquérito e concluiu: “O laudo pericial nº 6540/2018-IC/PCDF conclui que o desabamento ocorreu por perda de secção de aço após processo corrosivo decorrente de infiltração de água de forma progressiva e por tempo prolongado. Os peritos também apontam que havia sinais externos de deterioração e que era possível identificar e corrigir as patologias nas estruturas.” Segundo o Henrique Peres, editor do jornal Correio Braziliense.

A partir desse caso, é necessário aumentar os estudos na área para proteger o imóvel e as pessoas que fazem parte dele. Nesse sentido, o estudo busca solucionar essa mazela que atinge o aço, por meio da utilização do alumínio como metal de sacrifício para o aço.

Em consonância, a utilização do alumínio vai aumentar sua utilidade e favorecer o processo de reciclagem desse componente. Embora eles estejam, infelizmente, em grande quantidade nas ruas urbanas, tem uma capacidade de reciclagem o que garante a reutilização dele.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 GERAL

Realizar uma análise comparativa se o alumínio, utilizado como ânodo no sistema de proteção catódica, é capaz de defender o aço da corrosão tão quanto ou melhor que o zinco.

1.3.2 ESPECÍFICOS

- Elaborar corpos de provas, pretendendo simular a utilização prática.
- Inserir o alumínio e o zinco em contato direto com o aço, em uma solução de cloreto de sódio, para visualizar melhor o fenômeno e acelerar a reação.
- Analisar a superfície de contato do aço com o metal para ver se há a coloração característica, a principal marca da corrosão.
- Comparar os resultados dos dois ânodos para verificar o desempenho do alumínio.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONCRETO

O concreto simples é uma mistura entre aglomerante hidráulico (cimento), água agregado miúdo e graúdo, além de aditivos. Em vista disso, cada um desses componentes possui uma função e a quantidade de material varia de acordo com a finalidade.

Inicialmente, o aglomerante utilizado em larga, no Brasil, é o cimento Portland que com a adição de água garante uma reação físico-química tornando-o um elemento com alto valor resistivo. Ademais, os agregados garantem resistência à compressão, absorção de água e porosidade. Por fim, o aditivo são substâncias inseridas no concreto visando alterar ou adicionar uma propriedade nele.

De acordo com Adam Neville (2013), o projetista deve conhecer as propriedades e o comportamento do concreto, enquanto o executante e o fornecedor devem controlar a qualidade efetiva dele.

No concreto armado há presença de barras de aço além de todo o material do concreto simples. A partir disso, esse tipo de concreto é utilizado em estruturas, pavimentação, pré-moldados e entre outros.

2.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO

2.2.1 ESTADO FRESCO

Primeiramente, após a mistura de todos os componentes o concreto se encontra no estado plástico. Logo, fornece propriedades que garantem uma maior trabalhabilidade, consistência, coesão e plasticidade. Enfim, aumentam a facilidade no transporte e na aplicação dele.

É de vital importância que a consistência ou a trabalhabilidade do concreto fresco seja tal para que ele seja transportado, lançado, adensado, sem sofrer segregação, o que pode ser prejudicial ao adensamento. NEVILLE(2013, p. 78)

2.2.2 ESTADO ENDURECIDO

Neste estado o concreto apresenta propriedades de suma importância para a construção civil. Uma vez que o ele apresenta propriedades como: Alta resistência mecânica, aderência à tração, estabilidade química e volumétrica, baixa capacidade de deformação, durabilidade e entre outras. Basicamente, o projetista pode confeccionar um concreto com as características que ele deseje.

Vale ressaltar que a resistência à compressão é a propriedade mais desejada, por conta da sua capacidade de suportar os esforços solicitantes. Nesse sentido, há a necessidade de analisar se todas as etapas de formação do concreto foram realizadas de maneira satisfatória são realizados testes com amostras, conhecida como corpo de prova, que passarão por ensaios.

A partir disso, há uma comparação do que foi planejado com o que foi executado por meio do ensaio de compressão. Tem em vista que se o valor não for condizente com o planejado uma das etapas foi realizada de maneira errônea podendo ser no fator água/cimento, dimensão do corpo de prova, cura e até mesmo a qualidade dos materiais.

2.3 COMPONENTES DO CONCRETO

“O concreto é qualquer produto ou massa produzido por a partir de um meio cimentante. Mas atualmente mesmo essa definição pode cobrir uma larga gama de produtos. O concreto pode ser produzido com vários tipos de cimento e também conter pozolanas, escória de alto-forno, sílica ativa, adições minerais, agregados de concreto reciclado, aditivos, polímeros, água, agregados (miúdos e graúdos) e aditivos.” NEVILLE (2013, p.2).

Petrucci defende que a qualidade do concreto dependerá da qualidade dos materiais que o compõem. Ou seja, a escolha dos materiais é imprescindível para as propriedades do concreto serem garantidas. Além disso, pode ser feita alterações, adições e aditivos para conferir propriedades especiais ao concreto de acordo com a necessidade.

Sabe-se que a mistura dos materiais deve seguir uma proporção com relação cimento e agregados, agregado miúdo e agregado graúdo e água/cimento.

2.3.1. AGREGADOS

Os agregados não são apenas materiais granulares e inertes, mas também elementos constituintes da argamassa e do concreto. Fornecem ao concreto resistência mecânica, a intempéries, a variações de volume aliado a redução de custos da obra.

As características estão ligadas a rocha matriz, local de origem do agregado, como porosidade, massa específica e composição mineralógica. Podem ser classificados enquanto a sua origem e suas dimensões.

Os agregados ditos naturais são encontrados na natureza sob a forma de agregados. Há também, os artificiais que necessitam da ação humana para chegar na forma de agregado.

Em consonância, as dimensões são critérios para classificá-los. Segundo a NBR 7211, norma brasileira, que especifica os agregados para o concreto, define gráudo cujo os grãos passam pela peneira que possui a abertura de malha de 75mm e ficam retidas nas de 4,75 mm. Já os miúdos os grãos passam pela peneira com a abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidas na de 150 μ m

Os agregados são de suma importância para a resistência à compressão do concreto. Nesse sentido, são realizados diversos ensaios, como granulométrico, finura, massa específica real e aparente, a fim de garantir que essa propriedade não seja afetada.

2.3.3. ÁGUA

A água possibilita a reação entre os elementos, uma vez que ele hidrata o cimento para gerar a pega. Entretanto, deve ser feita uma análise rigorosa porque caso esteja contaminada pode afetar o tempo de pega, a resistência mecânica, a estabilidade de volume e gerar eflorescências. Sendo assim, há algumas impurezas que geram efeitos representados a seguir:

- **Carbonatos e bicarbonatos alcalinos:** em pequenas quantidades alteram o tempo de pega;

- **Cloretos e Sulfatos de sódio:** corrói e expande;
- **Água do mar:** corrói e reduz a resistência aos 28 dias iniciais;
- **Águas alcalinas:** reduz a resistência final do concreto;
- **Sal:** retarda a pega e gera eflorescências brancas pela absorção de umidade do ambiente.

2.3.3 CIMENTO

“O cimento pode ser descrito como um material com propriedades adesivas e coesivas que o fazem capaz de unir fragmentos minerais na forma de uma unidade compacta. Essa definição abrange uma grande variedade de materiais cimentícios.” (NEVILLE, 2016, p.1).

Em princípio, o aglomerante mais utilizado no Brasil e no mundo é o cimento, por conta de todas suas propriedades que garantem versatilidade, durabilidade e menor custo. Em definição, o cimento é um material pulverulento, aglomerante hidráulico oriundos da pulverização do clínquer Portland proveniente de uma mistura entre materiais calcários e argilosos, praticamente sem cal livre, em temperatura acima de 1000° C.

Eládio Petrucci, engenheiro brasileiro, determinou a presença dos seguintes componentes por meio de análise química: Cal(CaO), sílica(SiO₂), alumina(Al₂O₃), óxido de ferro(Fe₂O₃), magnésia(MgO), álcalis(K₂O e Na₂O) e sulfatos. Depois do aquecimento, há a reação entre entre si formando outros compostos, como mostra na tabela abaixo.

Tabela 1 – Porcentagem de substância no cimento

Tabela 2.3.3		
Substância	Abreviatura	Porcentagem(%)
CaO	C	60 a 67
SiO ₂	S	17 a 25
Al ₂ O ₃	A	3 a 8
Fe ₂ O ₃	F	1 a 6
SO ₃		1 a 3
MgO		0,1 a 6,5
K ₂ O e Na ₂ O		0,5 a 1,3

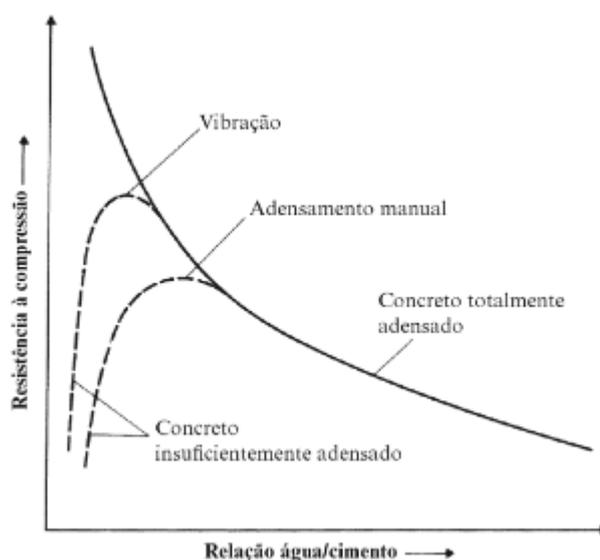
Fonte: Petrucci, 1975.

Após a reação, os compostos formados conferem características diferenciais ao cimento. Por exemplo, C3S e C2S são responsáveis por fornecer resistência mecânica inicial e final respectivamente. Além disso, a formação do C3A e C4AF os quais são responsáveis pelas primeiras reações. Porém, o C3S e C3A liberam muito calor na hidratação.

2.3.4 HIDRATAÇÃO DO CIMENTO

A quantidade de água inserida no cimento afeta diretamente a resistência final do concreto. De acordo com Neville (1997), a relação água/cimento determina a porosidade da pasta de cimento endurecida em qualquer grau de hidratação. O gráfico abaixo representa a relação entre ambos.

Gráfico 1 : Relação água/cimento x resistência



Fonte: Neville, 1997.

2.4. CONCRETO ARMADO

O concreto tem uma deficiência para resistir aos esforços de tração. Nesse sentido, a adição de aço garante-lhe o amparo e suporte. Mesmo assim, deve-se realizar um detalhamento na peça de concreto a fim de obter o estado-limite último de ruína. Visto que há um valor máximo de esforço de compressão e de tração suportado pelo concreto e aço, respectivamente. Para isso, precisa-se definir o

momento fletor que atua na peça de concreto armado. O momento fletor pode ser definido como de ação de todas as forças que agem no eixo transversal e longitudinal que gerem momento (tender a girar a peça) e causa flexões.

“Esteja uma viga de concreto armado simplesmente apoiada, sujeita a um carregamento crescente que causa flexão pura na região central; na secção central, a viga é submetida a um momento fletor crescente, que varia de zero até um valor que leve ao colapso.” (CARVALHO, 2014, p.104).

Portanto, a análise dos tipos de tensões a que a peça estrutural está submetida é de suma importância para garantir a durabilidade.

2.5 FATORES PREJUDICIAIS AO CONCRETO ARMADO

2.5.1 PROCESSOS DE DETERIORAÇÃO DO CONCRETO

Há fatores que reduzem a vida útil do concreto, isto é, perde a sua durabilidade. A partir disso, faz-se necessário um maior controle e a utilização de artifícios que protejam o concreto. Segundo a NBR 6118, os principais mecanismos de deterioração são:

- Lixiviação: entrada de águas puras, carbonatadas e ácidas pelos poros e fissuras do concreto e dissolvem compostos hidratados da pasta de cimento;
- Expansão por sulfato: É associado a solos e água contaminado por sulfato, logo, a utilização desses materiais contaminados ocasiona fissuras;
- Reação álcali-agregado: É a reação entre os álcalis provenientes do concreto e a sílica dos agregados.

Após a danificação do concreto, surgem espaços vazios que deixam-o desprotegido contra as ações de agentes agressivos.

2.5.1 PROCESSOS DE DETERIORAÇÃO DA ARMADURA

Os metais de maneira geral sofrem com a corrosão que reduz as capacidades de resistir aos esforços de tração e sua vida útil. Entretanto, a combinação do concreto com o aço fornece uma proteção química ao metal, a chamada película passivadora.

“O concreto apresenta um ph de cerca de 12,5. Nesse ambiente, as armaduras entram em estado passivo, com um taxa de corrosão virtual igual a zero” (GOMES, 1995, p.165). A partir disso, essa alta alcalinidade e o cobrimento feito a ela impedem a reação de corrosão. Todavia, se o ph dele estiver entre 8 e 9,5 a película não se faz presente essa redução está associada a carbonatação e a ação de íons de cloreto.

A carbonatação surge quando o dióxido de carbono e outros gases ácidos, presentes no ambiente, reagem com hidróxidos alcalinos provenientes do cimento e reduzem o ph do concreto. Além disso, materiais contaminados e ambientes agressivos podem trazer a íons de cloreto em quantidades elevadas geram prejudicial para a estrutura. Ou seja, ambos propiciam a aparição da corrosão, na prática ambos ocorrem simultaneamente, segundo Luiz Paulo Gomes, diretor na instalação e engenharia de corrosão, há um aumento na taxa de corrosão como no valor limiar de corrosão.

2.6 AMBIENTES AGRESSIVOS

As ações físicas e químicas em que a estrutura será exposta também influi na vida útil da peça. Por isso, a NBR 6118 fez uma análise medindo o grau de interferência que o meio causa. Para fazer esta classificação leva em consideração gases nocivos, umidade, salinidade da região e etc. logo, foi construído a seguinte tabela:

Tabela 2 – Tabela de agressividade do meio

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{a, b}	Pequeno
III	Forte	Marinha ^a	Grande
		Industrial ^{a, b}	
IV	Muito forte	Industrial ^{a, c}	Elevado
		Respingos de maré	
^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).			
^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.			
^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.			

Fonte:(NBR 6118, 2014, p. 17).

Uma vez que o concreto esteja sujeito a um ambiente agressivo deve ser usadas técnicas para proteger a peça. Visto que, com a aparição de fissuras e ao longo do tempo irão evoluir até gerar o lascamento e expor a armadura.

2.7. COMO OPERA A CORROSÃO

O fenômeno pode ser visto de duas formas: químico e eletroquímico (que possui maior incidência). A corrosão química, basicamente, é a interação do metal com gases do ambiente que de maneira lenta os óxidos produzem uma película ao redor dele reduzindo a velocidade da reação. Por outro lado, a corrosão eletrolítica ou eletroquímica é mais agressiva e surge a partir da formação de uma pilha, isto é,

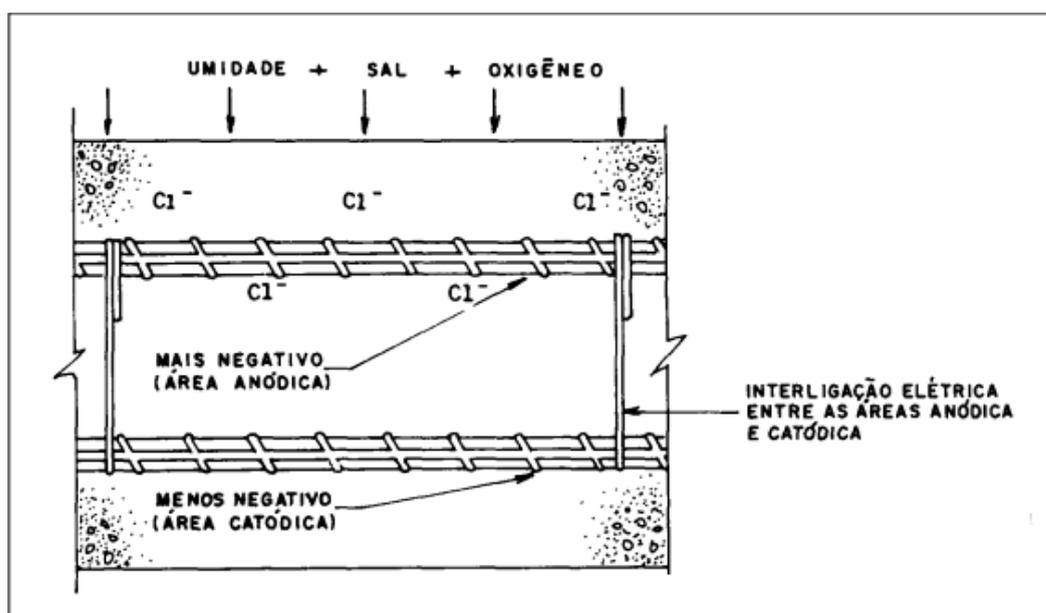
um circuito fechado com o deslocamento de elétrons de um elemento que tende a perder elétrons com outro que tende a ganhar. Essa reação é composta por:

- Agente oxidante: Induz com o que o outro elemento perda elétrons;
- Agente Redutor: É aquele que perde elétrons;
- Catalisadores: Aceleração a reação mas não reagem.

No caso da armadura do concreto, o aço é uma liga metálica constituída por ferro e carbono. Nesse sentido, esse metal de transição (agente redutor) reage com o oxigênio (agente oxidante) e acaba oxidando, ou seja, cedendo elétrons para ele. Além disso, há a presença de gases, como CO₂ e SO₂, que funcionam como catalisadores da reação originando a corrosão.

Nas estruturas da engenharia civil, deve-se tomar cuidado com a corrosão eletrolítica. Os intemperismos físicos e químicos principalmente pela ação da umidade, cloretos e agentes agressivos que acabam danificando o concreto. Uma vez exposto, começasse a surgir as primeiras fissuras, lascamento e posteriormente a despassivação da armadura. Conforme a figura a seguir:

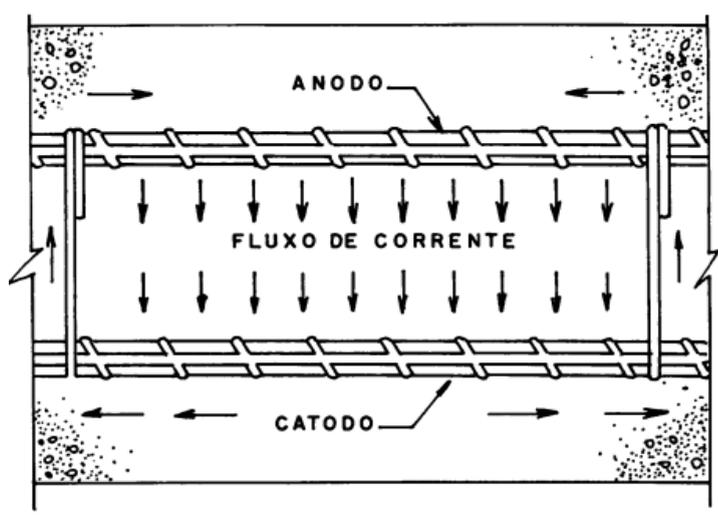
Figura 1 – reação química que age nas peças de concreto.



Fonte: Gomes, 1970.

A região em que haja um menor cobrimento está mais exposta a agressividade do meio. Com isso, as ferragens mais profundas têm suas características conservadas. A partir disso, há a diferença de potencial que as ferragens mais superficiais (anodos) e as mais profundas (catodos) atrelado a conexões feitas pelos estribos que fecham o circuito garantem a circulação de corrente elétrica. Representado pela figura exposta abaixo:

Figura 2 – Fluxo de corrente no concreto armado.

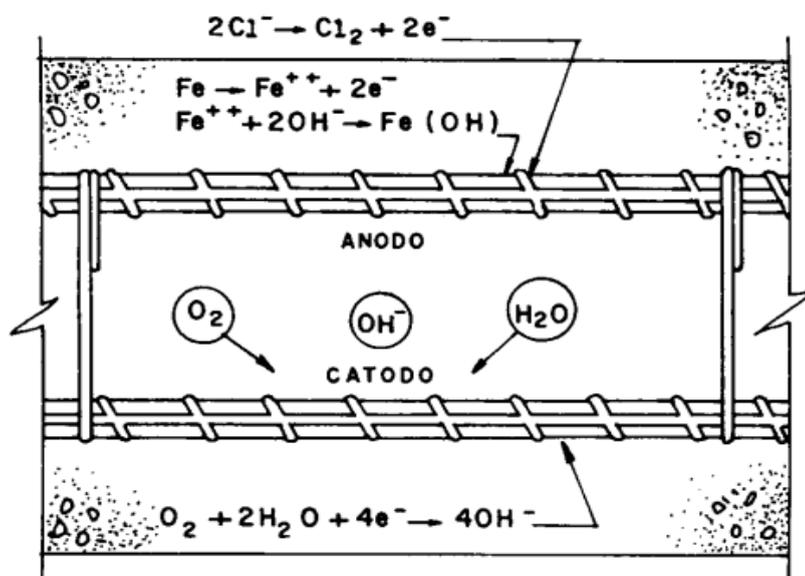


Fonte: Gomes, 1970.

O fluxo da corrente parte da região anódica, corroendo a liga metálica, para a catódica passando pelo metal que faz a amarração. Já os elétrons fazem o movimento contrário.

Levando em consideração o contexto químico, o ferro presente na liga metálica aço cede 2 elétrons e fica eletropositivo. Em consonância, os cloretos se dissociam e fornecem mais 2 elétrons para o meio. Por fim o oxigênio, a água e esses 4 elétrons produzem 4 hidroxilas. Vale ressaltar que o produto corrosivo se forma com a associação entre o ferro com a hidroxila, conforme a figura abaixo:

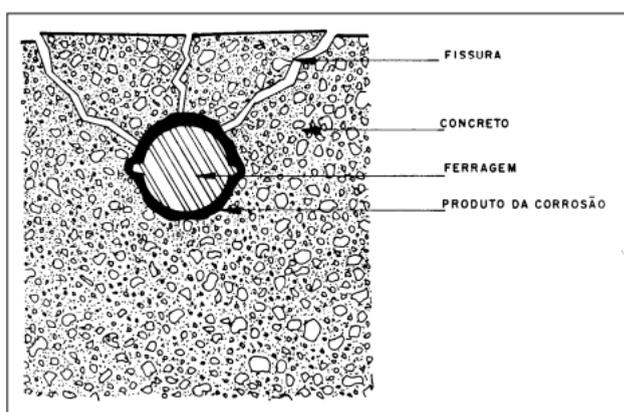
Figura 3 – Equações da reação



Fonte: Gomes, 1970.

Uma vez que a corrosão esteja presente, há um aumento do volume anteriormente ocupado pelo aço, danificando ainda mais o concreto e aumentando o espaço para entrada de agentes agressivos e corroendo ainda mais a armadura. A figura abaixo evidencia o fenômeno.

Figura 4 – Corte da peça de concreto armado



Fonte: Gomes, 1970.

2.8 PROTEÇÃO CATÓDICA

A proteção catódica consiste em colocar um metal para sofrer a ação da corrosão no lugar de um outro. Para isso, deve-se entender a série galvânica que

apresenta a diferença de potencial que a interação entre dois metais. Conforme a tabela abaixo:

Tabela 3 - série galvânica

Série Galvânica Prática

Metal	Potencial (volts) (1)
Magnésio comercialmente puro	-1,75
Liga de magnésio (6% Al, 3% Zn, 0,15% Mn)	-1,60
Zinco	-1,10
Liga de alumínio (5% Zn)	-1,05
Alumínio comercialmente puro	-0,80
Aço (limpo)	-0,50 a -0,80
Aço enferrujado	-0,20 a -0,50
Ferro fundido (não grafitizado)	-0,50
Chumbo	-0,50
Aço em concreto	-0,20
Cobre, bronze, latão	-0,20
Ferro fundido com alto teor de silício	-0,20
Carbono, grafite, coque	+0,30

Fonte: Gomes, 2023.

O sentido convencional da corrente é estabelecido a partir do metal de potencial mais negativo para o de menos negativo, ocasionando o fenômeno da corrosão. Evidentemente, o magnésio comercialmente puro, seguindo a série galvânica prática, possui o maior potencial

3 - METODOLOGIA

Neste capítulo, será descrito todo o passo a passo na confecção de corpos de prova com um sistema de proteção catódica acoplado no aço. Explicitando toda a metodologia aplicada no traço, peneiramento, confecção e arranjo utilizado.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais escolhidos atendem as necessidades que mais se aproximam da realidade. A especificação será descrita na metodologia de acordo com o que é definido pelos fornecedores.

Vale ressaltar que os materiais que compuseram os corpos de prova são da mesma natureza, isto é, o cimento do mesmo pacote, e a areia usada foi oriunda do mesmo local em todos os CP's.

3.1.1 CIMENTO

O aglomerante definido no projeto foi o cimento Portland CII F-32, por ser o mais difundido na região para diversos serviços na área de construção civil, fabricado pela empresa de Nacional, regulamentado pela ABNT NBR 11578:1991.

O uso deste material está associado à disponibilidade no local da realização da pesquisa, Salvador-Ba. Em consonância, o fornecedor garante a aplicação para

confeção de pré-moldados e construções estruturais que são base para o estudo. A figura abaixo apresenta o aglomerante usado.

Figura 5– Cimento usado para a confecção do corpo de prova



Fonte: Acervo do Autor, 2023.

O quadro 1 relata as principais características ressaltadas pelo fornecedor

Quadro 4 – Características do cimento

Cimento Nacional CPII F-32	
Resistência inicial	Superior
Coloração	Escura
Secagem e pega	Rápida
Composição	Material carbonático
Indicação	Todas as obras

Fonte: Fabricante, 2022.

3.1.2 AREIA

O agregado miúdo usado para a produção do experimento foi uma areia branca natural composta majoritariamente por quartzo.

Adquiridos a partir da doação feita pela empresa Concrelab em Salvador. Em que parte dela passou por ensaios tecnológicos e respeitou os parâmetros definidos na norma ABNT NBR 7211:2005.

Figura 6 – Areia usada na pesquisa



Fonte: acervo do autor, 2023.

3.1.2 BRITA

O agregado graúdo usado para produção do experimento com dimensão máxima de 19mm. De composição basicamente gnáissica obtida a partir da decomposição de uma rocha gnaisse. Altamente difundida na construção civil por possuir elevada dureza, superfície áspera e rugosa. Representação da brita usada na figura abaixo.

Figura 7 – Brita



Fonte: acervo do autor, 2022.

O ensaio granulométrico foi realizado no laboratório da empresa Concrelab, Salvador, seguindo a ABNT NBR 7211:2005.

3.1.3 AÇO

O aço definido em projeto foi o CA50 com uma bitola de 12,5 mm resistente a impactos e deformações. Além disso, apresenta nervuras para garantir uma maior

aderência ao concreto. Adquiridos a partir da doação do Instituto Federal da Bahia, Campus Salvador. Exposto na figura abaixo:

Figura 8 – Barras de aço.



Fonte: acervo do autor, 2022.

3.1.4 Formação da pilha

Os anodos de sacrifícios foram adquiridos por uma empresa especializada na produção de materiais para experimento. Nesse sentido, as lâminas possuíam como especificações os critérios abordados nas tabelas abaixo:

Quadros 5 e 6 da especificação do fornecedor:

LÂMINA DE ALUMÍNIO	
ELEMENTO QUÍMICO	Zn
GRAU DE PUREZA	92,00%
ESPESSURA	1 mm
Há possibilidade de variação de acordo com o lote	

a) Lâmina de alumínio;

LÂMINA DE ALUMÍNIO	
ELEMENTO QUÍMICO	Zn
GRAU DE PUREZA	92,00%
ESPESSURA	1 mm
Há possibilidade de variação de acordo com o lote	

b) Lâmina de zinco.

Fonte: DidáticaSP, 2022.

Evidentemente, os materiais apresentam características satisfatórias para realização do experimento. Uma vez que apresentam um grau de pureza superior a 90% e sua confecção é especializada para testes em laboratório.

3.2 DOSAGEM

A quantidade de cada material é definida por meio do traço. Sendo assim, pode-se definir a porosidade, a absorção e a permeabilidade do concreto a ser

confeccionado. A partir disso, pode ser feita a análise comparativa, foi determinado um traço de referência para um concreto convencional.

Vale ressaltar, a relação água/cimento está diretamente relacionada com o resultado final do seu concreto, isto é, à medida que se aumenta a quantidade de água na etapa de mistura para conseguir uma maior trabalhabilidade há uma redução na resistência final.

Para esse experimento, foram realizados dois traços distintos para assemelhar com estruturas de concreto armado como pilares e vigas. No primeiro, buscava-se alcançar a resistência de 20MPa. Nesse sentido, foi definido um traço de (1:6,5), o teor de concreto (b) de 51%. Já conhecendo a quantidade de cimento necessária, tem-se:

Sendo assim o traço definido possuía o traço de 1:2,82:3,74 (cimento, areia e brita), formando assim o traço geral. Esse traço foi usado para representar 3 corpos de prova com um teor de 0,7% de aditivo superplastificante para garantir uma maior trabalhabilidade e a mistura foi feita com uma betoneira.

Além disso, foi realizado outro traço para alcançar 30MPa. Com isso, foi definido um traço de (1:4,5), o teor de concreto (b) de 61%. Logo, o traço definido foi 1:1,74:2,76 (cimento, areia e brita), formando assim o traço geral conforme os quadros abaixo. Em suma,

Quadro 7 - Dosagem de concreto de 20MPa

DOSAGEM DE CONCRETOS - MÉTODO		
TIPO DE CONCRETO		CONENCIONAL
AGREGADOS TOTAIS (m)		6,5
TEOR DE ARGAMASSA (b)		0,51
QUANTIDADE DE BRITA (KG)		3,243
TRAÇO	CIMENTO	289
	AREIA	815
	BRITA	1081
	RESÍDUO	
ÁGUA ADICIONADA (KG)		
RELAÇÃO ÁGUA CIMENTO (A/C)		0,51

Fonte: acervo do autor, 2023.

Quadro 8 - dosagem de concreto de 30MPa

DOSAGEM DE CONCRETOS - MÉTODO		
TIPO DE CONCRETO		CONENCIONAL
AGREGADOS TOTAIS (m)		4,5
TEOR DE ARGAMASSA (b)		0,51
QUANTIDADE DE BRITA (KG)		3,225
TRAÇO	CIMENTO	390
	AREIA	680
	BRITA	1075
	RESÍDUO	
ÁGUA ADICIONADA (KG)		
RELAÇÃO ÁGUA CIMENTO (A/C)		0,61

Fonte: acervo do autor, 2023.

3.3 PRODUÇÃO DO CONCRETO

O concreto foi produzido no dia 23 de dezembro de 2022 com as quantidades definidas no traço, realizado na sede da empresa de Concrelab em Salvador – Bahia.

A figura apresenta as balanças usadas para alcançar as quantidades definidas nos cálculos.

Figura 9– Balanças de precisão.



Fonte: acervo do autor, 2022.

A figura expõe o processo de mistura dos componentes do concreto

Figura 10 – mistura de materiais



Fonte: acervo do autor, 2022.

3.4 ADAPTAÇÃO DA ARMADURA COM O ÂNODO

Visando adaptar o experimento a uma situação real, foi realizado um corte do aço (definido anteriormente) para atingir a altura de 20 cm a modo de se encaixar no recipiente. Além disso, as placas de zinco e alumínio precisaram ser adaptadas para não impedir o adensamento dos agregados com as dimensões 2,5 x 5 cm.

A barra de aço foi fixada ao anôdo de sacrifício com o auxílio de arame a ser desprezado. Conforme as figuras 11 e 12.

Figura 11 e 12 - Pilha



a)Vista de frontal;

b) vista posterior.

Fonte: acervo do autor, 2022..

3.5 MOLDAGEM

De acordo com a NBR 5738 – 2015 foi realizado o processo de moldagem de 6 CP'S.

As formas utilizadas para configurar as dimensões dos corpos de prova:

Paralelepípedo: possuindo uma altura de 20 cm e 10 cm de comprimento e 5 cm de largura. Os planos laterais estão perpendiculares ao eixo longitudinal do molde.

O material das formas é de madeira não absorvente, para que não reaja com o cimento Portland, e resistentes para manter intacto durante todo o processo de adensamento, pega e endurecimento. Vale ressaltar, o molde possuía a face oposta à abertura maior para que não haja fuga da água de amassamento.

Primeiramente, os moldes foram revestidos com uma fina película de óleo vegetal a fim de evitar a aderência entre o concreto e a forma.

O concreto foi inserido aos poucos em camadas. A partir de cada camada, foi feito o adensamento para tirar todos os vazios. O método de adensamento foi manual com 12 golpes em cada camada. Sendo que os golpes foram distribuídos em todas as camadas de forma uniforme por toda secção longitudinal.

Vale ressaltar, a última camada possuía uma camada mais espessa, seguindo a norma, para que possa ser feito o rasamento com o auxílio de uma colher de pedreiro eliminando o excesso.

Figura 13 e 14 – corpos de prova



a) corpos de prova recém moldados;



b) detalhe da confecção.

Fonte: acervo do autor, 2022.

Após 3 dias, os corpos de prova chegaram ao seu estado endurecido.
Exposto na figura abaixo:

Figura 15 – Corpo de prova endurecido



Fonte: acervo do autor, 2022.

3.6 ARMAZENAMENTO

Seguindo a NBR 6118 – 2014, os corpos de prova foram armazenados em um píer que fica de frente para o mar no condomínio Professor José Silveira no corredor da vitória, Campo Grande, Salvador, Bahia. O armazenamento durou 7 meses visando obter um resultado mais satisfatório.

O ambiente propício para o experimento já que está em contato direto com o mar e possui um regime de maré bem característico. Durante esse período, as forças das ondas foram tão fortes que derrubaram os corpos de prova e deslocavam ele de uma região para outra.

No fim de 7 meses, foram recuperados os 6 CP'S e pode-se notar a degradação da película superficial nas figuras abaixo.

Figura 16 e 17 – corpos de prova após exposição a ambiente agressivo.



a) corpos de prova;



b) detalhe da camada de matéria orgânica.

Fonte: acervo do autor, 2023.

Nota-se que a presença de matéria orgânica na extremidade superior do CP evidencia que ele ficou exposto em zona de respingo. Zona de extrema agressividade para o concreto.

3.4 ENSAIO DESTRUTIVO

O ensaio destrutivo foi realizado no instituto de educação, ciência e tecnologia da Bahia a fim de alcançar a barra de aço juntamente com os anodos. Nesse sentido, com o auxílio de uma marreta, quebrou-se os corpos de prova visando manter intacta a armadura e o ânodo conforme as figuras abaixo:

Figura 17– Ensaio destrutivo



Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 18 – Aço retirado



Fonte: acervo do autor, 2023.

4 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 ANÁLISE VISUAL

Antes de tudo, pode-se notar visualmente marcas de início de corrosão e marcas de degradação da pastilha de alumínio representada nas figuras abaixo:

Figura 19 e 20 - Lâmina de alumínio desgastada



a) vista frontal;



b) vista posterior.

Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 21 e 22 – Comparação entre as pilhas



a) Pilha com ânodo de alumínio;

b) pilha com ânodo de zinco.

Fonte: acervo do autor, 2023.

4.2 ANÁLISE POR MEIO DA MASSA

Inicialmente, foram registrados os pesos iniciais dos aços dos ânodos a fim de relacionar com os resultados finais da experiência. A tabela abaixo apresenta os dados

Quadro 9 e 10 – comparação das fases do experimento

DADOS INICIAIS DO EXPERIMENTO		
Zn	Peso do aço (g)	Peso do ânodo (g)
CP1	119	6,00
CP2	123	8,00
Al		
CP3	118	1,00
CP4	120	2,00

a) fase inicial;

DADOS FINAIS DO EXPERIMENTO		
Zn	Peso do aço (g)	Peso do ânodo (g)
CP1	120	5,48
CP2	124	7,48
Al		
CP3	118	0,48
CP4	120	0,48

b) fase final.

Fonte: acervo do autor, 2023.

Evidentemente, houve uma redução significativa nas duas fases do experimento para ambos os metais de sacrifício. O zinco se desgastou de maneira mais lenta e conservou cerca de 90% da sua massa inicial.

Em consonância, o alumínio deteriorou-se de maneira mais nítida desde a análise visual quanto na medição da massa resultante. Pode-se inferir que houve uma redução significativa perdendo mais do que 50% da sua massa inicial.

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 DISCUSSÃO

Com os resultados obtidos durante este trabalho, compreende-se que mesmo que houvesse marcas visuais de reações a análise a partir da massa evidenciou o sacrifício das lâminas, uma vez que houve uma redução significativa da massa.

Nesse sentido, comparativamente, o alumínio se desgasta de maneira rápida e perde uma quantidade significativa da massa inicial. Enquanto, o zinco garante uma proteção com uma duração maior.

Além disso, pode-se notar uma diferença visual entre o anodo de sacrifício de alumínio para o de zinco. Visualmente, o ânodo de zinco parecia intacto se comparado ao de alumínio que estava nitidamente degradado pela ação da corrosão.

O estudo evidenciou a necessidade de estudos mais aprofundados em torno do tema, a fim de encontrar maiores parâmetros de proteção que ambos os anodos forneçam à armadura contra a ação da corrosão.

6 REFERÊNCIAS

GOMES, Luiz. **Sistema de proteção catódica**. Rio de Janeiro : IEC (Instalações e Engenharia de Corrosão. Ltda), 1995.

TAVARES, Lisiane. **Estudo do processo de corrosão por íons cloreto no concreto armado utilizando armaduras comuns e galvanizadas**. Porto Alegre : PUCRS (Pontifícia Universidade Católica de Rio Grande do Sul Pró-Reitoria de pesquisa e pós-graduação), 2006.

SALOMÃO, Pedro *et al.* **Estudo de proteção contra corrosão em armaduras de aço da construção civil**. Barbacena; UNIPAC, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: projeto de estruturas de concreto: Procedimento**. Rio de Janeiro, 2003.

NEVILLE, Adam. **Tecnologia do concreto**. Rio de Janeiro : Bookman, 2013.

ARAÚJO, Fernanda Wanderley. **Estudo da eficácia da repassivação da armadura em concretos carbonatados através da técnica de realcalinização química**. 2009. Trabalho de conclusão de curso (Doutorado em engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, [S. l.], 2009.

SANTANA, Gabrielle Costa; NASCIMENTO, Gabriel Barbosa. **Estudo sobre a resistência à compressão de concreto de cimento portland com a substituição parcial do agregado graúdo por resíduo de polipropileno**. 2020. 54 f. Trabalho de conclusão de curso (Técnico em edificações) - Instituto federal de educação, ciência e tecnologia da Bahia, [S. l.], 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578: Norma Brasileira para cimentos Portland compostos**. São Paulo, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Norma Brasileira procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. São Paulo, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 65: Norma Brasileira para Cimento Portland - Determinação do tempo de pega**. São Paulo, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Norma Brasileira Agregados para Concreto**. São Paulo, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 248: Norma Brasileira para Agregados - Determinação da composição granulométrica**. São Paulo, 2003.