

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

IGOR MARLON DEVAI

AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DO ENSAIO CAIM – CORROSÃO ACELERADA POR
IMERSÃO MODIFICADA – EM CORPOS DE PROVA COM ARMADURAS

PONTAL DO PARANÁ

2023

IGOR MARLON DEVAI

AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DO ENSAIO CAIM – CORROSÃO ACELERADA POR
IMERSÃO MODIFICADA EM CORPOS DE PROVA COM ARMADURAS

Monografia apresentada como requisito parcial à
obtenção do título de Engenheiro Civil, Curso de
Engenharia Civil, Centro de Estudos do Mar,
Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Prof^a Dr^a.Elizabete Yukiko Nakanishi

PONTAL DO PARANÁ

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DO CENTRO DE ESTUDOS DO MAR

D49a Devai, Igor Marlon
Avaliação da aplicação do ensaio CAIM – Corrosão Acelerada por Imersão Modificada em corpos de prova com armaduras / Igor Marlon Devai. – Pontal do Paraná, 2023.
1 arquivo [88 f.] : PDF.

Orientadora: Profa. Dra. Elizabete Yukiko Nakanishi Bavastri

Monografia (Graduação) – Universidade Federal do Paraná, Campus Pontal do Paraná, Centro de Estudos do Mar, Curso de Engenharia Civil.

1. Concreto. 2. Concreto - Corrosão. 3. Eletricidade. I. Bavastri, Elizabete Yukiko Nakanishi. II. Título. III. Universidade Federal do Paraná.

CDD – 620.1



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ATA DE REUNIÃO

TERMO DE APROVAÇÃO

Igor Marlon Devai

“AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DO ENSAIO CAIM –CORROSÃO ACELERADA POR IMERSÃO MODIFICADA EM CORPOS DE PROVA COM ARMADURAS”

Monografia aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos membros:

Profª. Drª. Elizabete Yukiko Nakanishi Bavastri Profª. Orientadora - CPP-CEM/UFPR

Prof. Dr. Wellington Mazer UTFPR/Curitiba

Prof. Dr. Aldo Leonel Temp UNIPAMPA/Alegrete

Dr. Alexandre Robison Meyer CPP-CEM/UFPR

Pontal do Paraná, 08 de dezembro de 2023.



Documento assinado eletronicamente por **ELIZABETE YUKIKO NAKANISHI BAVASTRI, COORDENADOR(A) DE CURSO DE GRADUAÇÃO (CURSO DE ENGENHARIA CIVIL)** - PP, em 28/01/2024, às 09:50, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **ALEXANDRE ROBISON MEYER, QUIMICO**, em 29/01/2024, às 08:54, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Aldo Temp civilmente Aldo Leonel Temp, Usuário Externo**, em 29/01/2024, às 10:32, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **WELLINGTON MAZER, Usuário Externo**, em 30/01/2024, às 10:12, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida [aqui](#) informando o código verificador **6224430** e o código CRC **28874FE1**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por todo o cuidado nas muitíssimas idas e vindas durante o período da graduação, por sempre me amparar e me dar coragem de conquistar meus sonhos.

À minha mãe, mulher virtuosa e cheia de cuidado, não posso conter as lágrimas ao lembrar de tudo que fez e faz por mim, se cheguei até aqui foi por todo seu suporte e suas orações. E ao meu pai, que me educou e me deu condições de ir mais longe, me apoiando sem medir esforços em qualquer situação.

Agradeço especialmente ao amor da minha vida, minha Gabriele, cujo amor e cuidado me acompanharam durante cada dia desde o primeiro dia dessa etapa e que se Deus permitir, permanecerá durante toda essa vida. Sem você não seria metade do homem que me tornei, você me estimula a sonhar e ser forte, a não ter medo de perseguir meus objetivos. Com você nem o infinito fica distante.

Aos meus irmãos. Bianca, que sempre me suportou, comprou minhas ideias e foi uma fonte presente de carinho durante essa jornada. Willie, que durante esses anos tem aguentado minhas bagunças e é sempre tão cuidadoso. Alan, que sempre foi companheiro, bem-humorado e encorajador, sua falta sempre faz falta em meus dias,

Agradeço à Thalise, pelo grande suporte na realização deste trabalho, sem sua ajuda com certeza estaria em apuros, sou extremamente grato por sua ajuda e dedicação.

Aos meus fiéis escudeiros durante a graduação, Marcelo, Sandro, Vinicius e João Victor. Sem vocês essa caminhada teria sido solitária, sua companhia durante todos os dias, as risadas e tantas horas de estudo me mantiveram sempre animado e feliz por estar exatamente onde deveria. Parafraseando Newton, se cheguei mais longe, foi por estar sobre o ombro de vocês, gigantes.

Agradeço especialmente à minha orientadora, Professora Elizabete, por toda a paciência e dedicação em me ajudar na realização desse trabalho, para sempre terei em minha memória o que fez por mim.

Aos colegas da graduação, cada professor que se dedicou e participou na minha formação, à Universidade Federal do Paraná e a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

“Pois tu és a minha esperança,
ó Soberano Senhor,
em ti está a minha confiança
desde a juventude”.
Salmos 75:1

RESUMO

O aumento do tempo de vida útil das edificações vem se tornando um dos grandes desafios da engenharia civil. A corrosão da armadura de aço das estruturas de concreto armado é uma das principais patologias em edificações, causando grandes impactos econômicos e ambientais, e, esses efeitos da deterioração podem ser ainda intensificados em ambientes hostis. Conhecer como ocorre essa corrosão é uma excelente estratégia para sua prevenção e futura manutenção. Uma das formas de estudar e conhecer o comportamento das estruturas de concreto armado é por meio de simulações aceleradas. O objetivo desse trabalho foi reproduzir o ensaio de Corrosão Acelerada por Imersão Modificada (CAIM) utilizando diferentes níveis de imersão em corpos de prova de concreto com armaduras de aço e avaliar variáveis como a taxa de corrosão, características químicas e características físicas do concreto nos estados fresco e endurecido, e principalmente de perda de massa, avaliando a eficácia do método CAIM na observação de processos de corrosão e comparando os resultados obtidos com formulações teóricas. Os valores de perda de massa chegaram próximo de 15% em um dos corpos de prova, indicando forte grau de deterioração da armadura. Além disso os ensaios químicos evidenciaram a ocorrência de um processo de corrosão intenso.

Palavras-chave: Manifestações patológicas. Concreto. Corrosão. Ensaio acelerado.

ABSTRACT

Extending the service life of buildings has become one of the major challenges in civil engineering. The corrosion of steel reinforcement in reinforced concrete structures is a primary pathology in buildings, causing significant economic and environmental impacts, and these effects of deterioration can be further intensified in hostile environments. Understanding how this corrosion occurs is an excellent strategy for its prevention and future maintenance. One way to study and understand the behavior of reinforced concrete structures is through accelerated simulations. The aim of this study was to replicate the Modified Immersion Accelerated Corrosion (MIAC) test using different levels of immersion in concrete specimens with steel reinforcements and to evaluate variables such as the corrosion rate, chemical characteristics, and physical properties of the concrete in both fresh and hardened states, and especially mass loss, assessing the effectiveness of the MIAC method in observing corrosion processes and comparing the results obtained with theoretical formulations. The mass loss values reached close to 15% in one of the specimens, indicating a strong degree of deterioration of the reinforcement. Furthermore, chemical tests showed the occurrence of an intense corrosion process.

Key words: Pathological manifestations. Concrete. Corrosion. Accelerated tests.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - REPRESENTAÇÃO DO AVANÇO DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO E DA DESTRUIÇÃO DA CAMADA PASSIVADORA.	17
FIGURA 2 - AGREGADOS UTILIZADOS	26
FIGURA 3 - FRASCO DE CHAPMAN.....	29
FIGURA 4 - ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE.....	33
FIGURA 5 - COESÃO E CONSISTÊNCIA (MÉTODO IPT/EPUSP).....	34
FIGURA 6 - MONTAGEM DAS FÔRMAS	35
FIGURA 7 - MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS.....	36
FIGURA 8 - FLUXOGRAMA DA MONTAGEM DAS FORMAS	36
FIGURA 9 – ENSAIO DE ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE	39
FIGURA 10 – CORPOS DE PROVA EM CONTATO COM LÂMINA D'ÁGUA.	40
FIGURA 11 – CORPOS DE PROVA APÓS ROMPIMENTO.	40
FIGURA 12 – ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL.....	42
FIGURA 13 – DIMENSÕES INTERNAS NA MONTAGEM DA FORMA.	43
FIGURA 14 - ESPAÇADOR, ARMADURA E FIO DE COBRE	44
FIGURA 15 - CONFECÇÃO DO CONCRETO NAS FÔRMAS	44
FIGURA 16 - LIGAÇÃO ESQUEMÁTICA DO SISTEMA DE MEDIÇÃO	46
FIGURA 17 - LIGAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO	46
FIGURA 18 - DEMONSTRAÇÃO DA LIGAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO.....	47
FIGURA 19 - MEDIÇÃO DA CORROSÃO: 1 DIA	47
FIGURA 20 - LIMPEZA DAS ARMADURAS DE AÇO.....	48
FIGURA 21 - INSTRUMENTAÇÃO DO ENSAIO	50
FIGURA 22 - MEDIÇÃO DO POTENCIAL HIDROGENIÔNICO NO CONCRETO EM BECKER.....	50
FIGURA 23 - DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE NA ÁGUA DO MAR	51
FIGURA 24 - DETERMINAÇÃO DA ALCALINIDADE	52
FIGURA 25 - REAÇÃO DE NITRATO DE PRATA COM O CLORETO DE SÓDIO	54
FIGURA 26 - COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA: BRITA 1 E 2.....	56
FIGURA 27 - COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA: AREIA	57
FIGURA 28 - AMOSTRAS DOS AGREGADOS	58
FIGURA 29 - COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA: BRITA 1, BRITA 2 E AREIA	59
FIGURA 30 - MASSA ESPECÍFICA DA AREIA	61
FIGURA 31 - MASSAS DOS CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS.	64

FIGURA 32 - ABSORÇÃO DE ÁGUA INICIAL.....	65
FIGURA 33 - ALTURA DA ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE.....	66
FIGURA 34 - ARMADURAS DE AÇO CA50	68
FIGURA 35 - CORROSÃO NA ARMADURA II DO CP4	69
FIGURA 36 - PERDA DE MASSA.....	70
FIGURA 37 - EFEITOS DA CORROSÃO NO CONCRETO.....	71
FIGURA 38 - ROMPIMENTO DOS CORPOS DE PROVA.....	72
FIGURA 39 - RETORNO DA COLORAÇÃO NO ENSAIO DE ALCALINIDADE.....	76

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - ENSAIO FÍSICOS, QUÍMICOS E MECÂNICOS DO CIMENTO CII-Z-32	25
TABELA 2 - MASSA DOS CP'S E VOLUME DE ÁGUA DO MAR	48
TABELA 3 - CARACTERÍSTICAS DO CIMENTO PORTLAND CII-Z-32	55
TABELA 4 - COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA: BRITA 1 E 2	56
TABELA 5 - COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA: AREIA	57
TABELA 6 - PROPRIEDADES DOS AGREGADOS	59
TABELA 7 - DENSIDADE E ABSORÇÃO DAS BRITAS	60
TABELA 8 - MASSA ESPECÍFICA, RENDIMENTO E TEOR DE AR INCORPORADO	62
TABELA 9 - MASSAS DOS CORPOS DE PROVAS	64
TABELA 10 - ABSORÇÃO E ÍNDICE DE VAZIOS	64
TABELA 11 - ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE	66
TABELA 12 - ENSAIO DE COMPRESSÃO	67
TABELA 13 - PERDA DE MASSA DAS ARMADURAS	69
TABELA 14 - CLASSIFICAÇÃO DOS GRAUS DE DETERIORAÇÃO SEGUNDO O COMITÉ EURO- INTERNACIONAL DU BETON.	73
TABELA 15 - POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (PH)	74
TABELA 16 - CONDUTIVIDADE ELÉTRICA	74
TABELA 17 - ALCALINIDADE	75
TABELA 18 - TEOR DE CLORETOS	77

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	OBJETIVOS	11
1.1.1	Objetivo Geral	11
1.1.2	Objetivo Específico	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1	CONCRETO ARMADO	12
2.2	DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS.....	13
2.3	MECANISMOS DE CORROSÃO DE ARMADURAS EM CONCRETO ARMADO.....	16
2.4	CORROSÃO ACELERADA	20
2.5	ENSAIO CAIM	22
3	MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1	CIMENTO PORTLAND.....	25
3.2	AGREGADOS	26
3.2.1	Composição Granulométrica.....	26
3.2.2	Massa Unitária e Índice de Vazios.....	27
3.2.3	Densidade de Absorção de Água da Brita	28
3.2.4	Massa Específica da Areia.....	28
3.3	DOSAGEM DO CONCRETO	30
3.4	ENSAIO NO CONCRETO NO ESTADO FRESCO	30
3.4.1	Massa Específica, rendimento e teor de ar incorporado	30
3.4.2	Consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone.....	32
3.4.3	Coesão e consistência	33
3.4.4	Moldagem e cura de corpos de prova	34
3.5	ENSAIOS NO CONCRETO: ESTADO ENDURECIDO	36
3.5.1	Absorção de água, índice de vazios e massa específica.....	37
3.5.2	Índice de absorção de água inicial (AAI)	38
3.5.3	Absorção de água por capilaridade	39
3.5.4	Resistencia à compressão axial.....	41
3.6	CORROSÃO ACELERADA PELO MÉTODO CAIM	42
3.6.1	Montagem das fôrmas e preparação dos corpos de prova	42
3.6.2	Montagem do experimento para a medição da corrosão.....	45

3.7	ENSAIOS QUÍMICOS.....	49
3.7.1	Potencial hidrogeniônico (pH).....	49
3.7.2	Condutividade.....	50
3.7.3	Alcalinidade	51
3.7.4	Cloretos	53
4	RESULTADOS E ANÁLISES	55
4.1	ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS.....	55
4.1.1	Composição granulométrica	55
4.1.2	Massa unitária e índice de vazios	59
4.1.3	Densidade e absorção de água da brita	60
4.1.4	Massa específica da areia.....	61
4.2	ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO.....	62
4.2.1	Massa específica, rendimento e teor de ar incorporado.....	62
4.2.2	Coesão e Consistência	63
4.3	ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO.....	64
4.3.1	Absorção de água, índice de vazios e massa específica.....	64
4.3.2	Índice de absorção inicial (AAI).....	65
4.3.3	Absorção de água por capilaridade	66
4.3.4	Resistência à compressão axial.....	67
4.4	ENSAIO CAIM	68
4.4.1	Comparação das perdas de massa e taxas de corrosão real e teórica .	68
4.4.2	Efeitos do processo de corrosão na estrutura do concreto	71
4.5	ENSAIOS QUÍMICOS.....	73
4.5.1	Potencial hidrogeniônico.....	73
4.5.2	Condutividade elétrica	74
4.5.3	Alcalinidade	75
4.5.4	Teor de Cloretos	76
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	79
	REFERÊNCIAS	81

1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material mais amplamente utilizado nas construções ao redor do mundo. A sua plasticidade e a resistência são duas de suas principais características, a partir da associação do concreto com o aço, obtém-se concreto armado. Essa combinação robusta de materiais vem sendo muito utilizada na construção ao longo dos anos. Contudo, as patologias têm acompanhado essas edificações, expondo assim a necessidade de estudos e melhorias dos métodos e tecnologias estruturais (Mehta; Monteiro, 2008; Guo, 2014; Bicelli, *et al.*, 2021).

As manifestações patológicas em estruturas de concretos são um fator de grande preocupação para a engenharia civil devido aos recursos necessários para sua avaliação e reparos, que muitas vezes se sobrepõe ao gasto inicial para sua edificação, além do grande impacto negativo na busca pelo desenvolvimento sustentável de construções (Felix *et al.*, 2018; Valdés; Medeiros; Macioski, 2021).

A corrosão da armadura de aço das estruturas de concreto armado ocorre frequentemente por processo eletroquímico, sendo uma das principais patologias em edificações. No Brasil pode chegar a afetar mais da metade das construções dependendo da região e ambiente analisados. Em um ambiente mais agressivo, como o marítimo, o risco de corrosão e deterioração são amplificados, em razão dos compostos salinos presentes no mar. Conhecer as condições ambientais, a resistência dos materiais, as novas tecnologias e os processos construtivos é fundamental para minimizar esses impactos e aumentar o tempo de vida útil das construções (Costa; Appleton, 2002; Andrade; Possan; Dal Molin, 2017; Felix, *et al.*, 2018).

Para Meira e Ferreira (2019), a corrosão de armaduras desencadeada por cloretos é um dos principais problemas que afetam as estruturas de concreto armado. Considerando o estudo desse tipo de problema, a velocidade na coleta dos dados e a possibilidade de controle das variáveis que influenciam o processo de corrosão na realização dos testes, têm sido aspectos motivadores da opção por realizar ensaios acelerados para indução da corrosão por cloretos ao invés de ensaios baseados em exposição natural.

A ação dos íons cloreto é uma das principais responsáveis por desencadear a corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado. Embora ainda haja

dúvidas em relação ao modo como ocorre a ruptura da capa passiva e a ativação das armaduras, vários esforços em pesquisa têm sido feitos no sentido de estudar a ação dos cloretos sobre estruturas de concreto (Meira; Ferreira, 2019).

Uma das formas de estudar e conhecer o comportamento das estruturas de concreto armado é por meio de simulações aceleradas. Simular a corrosão das estruturas em concreto armado em um intervalo de tempo reduzido é uma excelente estratégia e deve fazer parte de todo o planejamento estrutural, seja para construção ou intervenção (Meira; Ferreira, 2019; Bicelli, *et al*, 2021).

Nesse sentido, Torres (2006), explica que o método CAIM (Corrosão Acelerada por Imersão Modificada), como uma das metodologias de ensaio para a avaliação da degradação gerada pela corrosão na estrutura. Explica ainda que o ensaio CAIM é um ensaio eletroquímico que permite determinar a evolução da corrente durante o teste e a perda de massa de armadura no final do ensaio. Esta perda de massa é gerada pela diferença de massas das armaduras antes e após o ensaio acelerado. Ao final, a autora expõe que após muitos testes, este ensaio tem se apresentado com uma grande sensibilidade nos resultados do processo corrosivo.

Assim, este trabalho tem como escopo principal analisar a perda de massa das armaduras do concreto armado submetidos ao ensaio CAIM (Corrosão Acelerada por Imersão Modificada).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Estudar o comportamento a corrosão acelerada de armaduras de concreto armado pelo ensaio CAIM (Corrosão Acelerada por Imersão Modificada).

1.1.2 Objetivo Específico

- Explorar as características físicas dos materiais utilizados nos corpos de prova do concreto;
- Analisar os resultados obtidos no ensaio CAIM através da imersão parcial de níveis diferentes da água do mar nos corpos de prova;
- Examinar os resultados de perda de massa das barras de aço após o ensaio CAIM;
- Verificar as características químicas da água do mar e dos corpos de prova do concreto antes e após o ensaio CAIM.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCRETO ARMADO

A história da civilização humana está associada à construção de um local para morar e estabelecer suas relações pessoais e profissionais. Inicialmente, as moradias e edificações tinham como matéria-prima a pedra e a madeira.

Um grande avanço ocorreu com o desenvolvimento dos chamados materiais aglomerantes, que endurecem em contato com a água, e tornaram possível a fabricação de uma pedra artificial, denominada concreto ou betão. Os romanos já utilizavam um tipo de concreto, tendo como aglomerantes a cal e a pozolana, de extração natural ou como subprodutos de outros materiais. As primeiras regras de dosagem para o concreto são atribuídas a Leonardo da Vinci, mas seu uso se propagou, principalmente, a partir do estabelecimento de um processo de fabricação industrial do cimento Portland, por Joseph Apsdin, na Inglaterra, em 1824, que passou a ser reproduzido em todo o mundo (Clímaco, 2023, p.16).

Segundo Giongo (2007), o concreto é um material capaz de se adaptar a qualquer forma estrutural, atendendo, portanto, a diversas concepções arquitetônicas, sendo utilizado em larga escala no Brasil e em todo o mundo. Para ser considerado adequado como material estrutural em construções, é fundamental que ele possua resistência, longevidade e seja facilmente acessível. Assim, esse material resistente à compressão, certamente passou a agregar muito às construções contemporâneas.

Segundo Reinartz (1965), antes da Segunda Revolução Industrial, o aço era um material caro e escasso. A produção industrial em massa de aço marca o início da Segunda Revolução Industrial por volta de 1850. A disponibilidade de aço barato transformou as indústrias, permitindo a construção de pontes maiores, ferrovias, arranha-céus e navios, além de melhorar o equipamento militar. Passa-se então a associar-se vergalhões de aço e o já conhecido concreto para trazer à existência o concreto armado. Juntos, o concreto e a armadura de aço formam um material de construção extremamente robusto e versátil.

O concreto é o corpo principal do concreto armado. Assim, o comportamento mecânico da estrutura do concreto armado depende, em grande parte, do comportamento do material do concreto e das ações de apoio e confinamento do concreto à armação (Guo, 2014). Os componentes essenciais do concreto armado são quatro: cimento, agregados, água e aço, podendo em seu estado fresco ser adicionados aditivos para fins específicos em sua composição.

O cimento é o principal elemento ligante do concreto, capaz de unir fragmentos de materiais sólidos em um corpo compacto. Para a construção, utiliza-se o cimento Portland, por atuar diretamente na qualidade e durabilidade do concreto. Foi em 1824 que o britânico Joseph Aspdin patenteou e nomeou a mistura das pedras de calcário e argila de “cimento Portland”, devido sua durabilidade e solidez se assemelharem às rochas da ilha britânica de Portland (Kihara; Centurione, 2005).

Quanto aos agregados, eles podem se diferenciar quanto sua origem, sendo os naturais aqueles obtidos na natureza como a areia e o cascalho ou os industrializados, obtido por processo de britagem de rochas. Além disso, os agregados também se diferenciam em tamanho de partículas. Segundo a NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2022), os agregados graúdos são compreendidos como pedras ou britas que passam pela malha com abertura de 76 mm e ficam retidos na peneira de 4,8mm e os agregados miúdos passam pela peneira de 4,8mm e ficam retidos na peneira de 0,15 mm.

A água tem importante papel na durabilidade e resistência do concreto. Merece consideração também a qualidade da água utilizada, pois as impurezas contidas nela podem influenciar o produto final. Já o aço, associado ao concreto armado, atuará na tração e direcionamento das cargas (Trazzi; Giandon, 2016).

Segundo Clímaco (2023), essa associação do concreto com o aço promove características muito desejáveis nas construções:

- a) Boa resistência à compressão;
- b) Elevada resistência à tração
- c) Atuação conjunta bastante positiva do concreto armado, já que o aço em forma de vergalhão e o concreto possuem ótima aderência entre si;
- d) Proteção do aço contra ações corrosivas pelo concreto;
- e) Valores muito próximos dos coeficientes de dilatação térmica, minimizando efeitos da variação de temperatura em estruturas.

2.2 DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS

A durabilidade de estruturas de concreto é um tópico complexo que depende de uma compreensão profunda das propriedades intrínsecas do concreto e de como ele interage com o ambiente circundante. Especialmente em ambientes marinhos, é fundamental considerar fatores como resistência, módulo de elasticidade, fluência,

retração e permeabilidade para garantir que as estruturas de concreto se mantenham intactas e funcionais ao longo de sua vida útil. Uma descrição sucinta de algumas características do concreto é apresentada a seguir:

1. Resistência do Concreto - A resistência à compressão é comumente usada para avaliar a qualidade do concreto. A capacidade de um material suportar a tensão sem colapsar é dita como resistência (Mehta; Monteiro, 2008). No entanto, essa medida pode não refletir adequadamente outras propriedades essenciais, como resistência à tração e flexão. Simplificando, embora o concreto seja resistente à esforços de compressão, ele pode fissurar sob grandes tensões. O cimento, em contato com a água, sofre um processo físico-químico e torna-se sólido e resistente à compressão, à água e a sulfatos. Alguns testes moldando corpos de prova são realizados para verificar a resistência do concreto, quando após 28 dias de cura eles são quebrados para se obter o resultado da resistência à compressão.

2. Comportamento e Deformação - O concreto, por natureza, não é flexível. Quando submetido a cargas contínuas, ele pode se deformar gradualmente, um processo conhecido como fluência. Além disso, à medida que o concreto seca ou esfria, ele tende a retrair, e essa retração pode levar a fissuras se o movimento for restrito.

3. Permeabilidade - A capacidade do concreto de resistir à penetração de substâncias, ou sua permeabilidade, é crucial para sua durabilidade, especialmente em ambientes marinhos. Práticas inadequadas de concretagem ou mudanças bruscas de temperatura podem aumentar a permeabilidade do concreto, tornando-o mais vulnerável a danos em ambientes agressivos (Mehta; Monteiro, 2008).

No cimento endurecido, o tamanho e a conexão dos poros estão intimamente relacionados com a permeabilidade. A permeabilidade do concreto depende do aditivo usado na mistura, uma vez que ele atuará na quantidade, tamanho e interligação dos poros, mas principalmente, depende da relação água/cimento. O volume de poros capilares está diretamente relacionado ao grau de hidratação (afetado por condições de cura) e à relação água/cimento (Mehta; Monteiro, 2008).

Essas características são importantes para compreender melhor a durabilidade, que é essencial para que as estruturas de concreto continuem a desempenhar suas funções pretendidas, mantendo sua resistência e funcionalidade

durante sua vida útil esperada. O concreto durável é aquele que resiste a processos de deterioração. A previsão de duração da vida útil das estruturas de concreto já vem sendo estudadas há alguns anos, com o objetivo de se estabelecer um modelo ideal entre a curva de desempenho e o tempo dessas estruturas (Andrade, 2001).

Assim, para que seja possível ser feita uma boa previsão da durabilidade das estruturas, é fundamental dar ênfase em todos os processos de planejamento e execução da obra, produzindo peças menos permeáveis, mais compactas, além de treinamento pessoal qualificado e técnicas atualizadas para lidar melhor com os desafios ambientais (Andrade, 2016).

A combinação de concreto e armaduras de aço permite a construção de estruturas duráveis e robustas, capazes de suportar uma variedade de cargas e condições ambientais. No entanto, a durabilidade do concreto armado não é inabalável e pode ser comprometida por uma série de fatores. Apesar de reconhecido por sua resistência e durabilidade, e não sofrer danos graves como a madeira e o aço sozinho, por exemplo, quando expostos à água, ele não está imune aos efeitos do tempo e do ambiente (Mehta; Monteiro, 2008).

Além disso, a reação álcali-agregado, uma reação química entre os álcalis no cimento e certos tipos de agregados, pode levar à formação de um gel expansivo, causando fissuração e comprometendo a integridade estrutural do concreto armado, permitindo a entrada de umidade e a corrosão precoce das armaduras.

A corrosão, ao transformar os materiais, altera suas características e afeta as estruturas civis de modo que sua durabilidade e desempenho deixam de satisfazer aos fins que se destinam (Torres, 2006, p.2).

Quanto ao papel do cobrimento de concreto, uma das grandes vantagens do concreto armado em relação a outros materiais de construção que ele pode, por natureza e desde que bem executado, proteger a armadura contra a corrosão, essa proteção baseia-se no impedimento do progresso da corrosão através de uma barreira física e de uma proteção de natureza química (Helene, 1993).

No item a seguir, é discutido sobre os mecanismos de corrosão de armaduras em concreto armado.

2.3 MECANISMOS DE CORROSÃO DE ARMADURAS EM CONCRETO ARMADO

Em materiais metálicos a corrosão representa um custo adicional considerável, seja pela necessidade de substituição do material, pelas perdas indiretas associadas à manutenção, pelo uso de materiais anti-corrosivos mais caros ou pelas interrupções na produção. Quando se refere à armadura de aço em estruturas de concreto, Ribeiro (2018) explica que a corrosão não só prejudica as propriedades mecânicas, mas também produz compostos volumosos, como o hidróxido de ferro, que eventualmente se transforma em óxido de ferro ou ferrugem. Esse aumento de volume exerce pressão no concreto circundante, podendo levar ao descolamento da camada protetora.

Em se tratando da deterioração de aço, dois são os processos de corrosão que podem agir; o denominado de corrosão eletroquímica, de grande importância no campo da corrosão das armaduras, e o de oxidação direta (Helene, 1993, p.17).

Conforme indicado por Helene (1993), na corrosão eletroquímica, o fenômeno acontece devido à formação de pilhas ou células de corrosão, causadas pela presença de umidade, água ou uma solução aquosa na superfície do aço ou no concreto circundante, atuando como eletrólito. A dissolução do aço acontece nas áreas anódicas, e não é uniforme, pois nas áreas catódicas o ataque é mínimo. A corrosão das armaduras de aço em condições de umidade ou temperatura ambiente é, na sua maioria, um processo eletroquímico.

Na oxidação direta, os átomos do aço reagem com o oxigênio, resultando em uma reação direta entre gás-metal ou íon-metal, formando uma camada uniforme e contínua de óxido de ferro. Esta forma de corrosão é lenta em temperaturas ambiente e se torna mais relevante em altas temperaturas. Normalmente, resulta em uma corrosão uniforme, manifestando-se de forma consistente em toda a superfície da armadura.

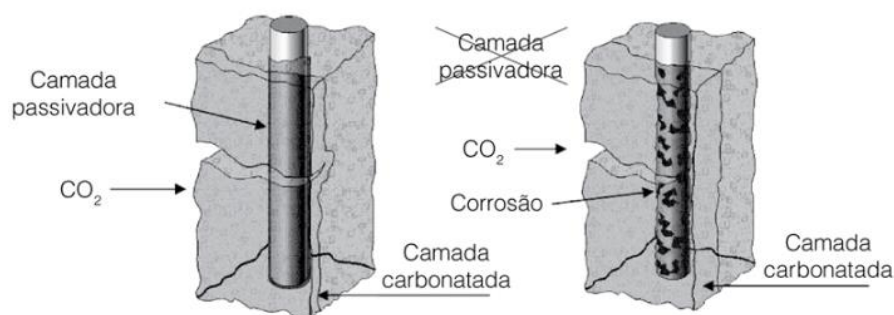
De acordo com o estudo de Gonzales *et al.*, (1996), os resíduos resultantes da corrosão têm um volume maior do que o aço não corroído. Isso pode causar um aumento nas tensões internas que, por sua vez, pode levar a fissuras e ao descolamento do revestimento de concreto. A integridade estrutural é afetada negativamente tanto no aço — com a diminuição da área transversal e enfraquecimento mecânico — quanto no concreto — que pode fissurar, mostrar sinais

de oxidação e perda da cobertura protetora. Esses problemas contribuem ainda para a redução da adesão entre o aço e o concreto.

A corrosão das armaduras em concreto armado é uma preocupação significativa na engenharia civil, pois pode comprometer a integridade estrutural e a vida útil de uma estrutura. Vários mecanismos podem levar à corrosão das armaduras em concreto armado:

1. Corrosão por Carbonatação: A carbonatação ocorre quando o dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera reage com a água e forma ácido carbônico. Este ácido, por sua vez, reage com os hidróxidos de cálcio no concreto, formando carbonato de cálcio. Este processo reduz o pH do concreto, tornando-o menos alcalino. Quando estão expostos a um ambiente alcalino, como é o caso do concreto, se forma na superfície de metais, como o aço, a película passivadora. A FIGURA 1 é uma representação dessa película e da sua quebra quando ocorre um processo corrosivo.

FIGURA 1 - Representação do avanço da frente de carbonatação e da destruição da camada passivadora.



Fonte: Ribeiro (2018)

Essa película é uma fina camada protetora formada principalmente de óxidos e hidróxidos e tem a propriedade de proteger o metal contra processos corrosivos. Porém, se essa camada for danificada ou rompida, por exemplo, devido à carbonatação ou ingresso de cloretos, a armadura pode tornar-se suscetível à corrosão, especialmente quando a armadura permanece em contato prolongado com a umidade presente no concreto.

2. Corrosão por Cloretos:

A ação dos íons cloreto é um dos principais fatores da corrosão de armaduras em concreto armado. Essa ativação nas armaduras estão relacionadas com a influência dos materiais e ambiente no transporte de cloretos, na modelagem de transporte e propagação da corrosão e o ambiente marinho e a presença salina e sua interação com as estruturas de concreto (Meira; Ferreira, 2019) Assim, construções expostas a ambientes muito agressivos e com alto teor de salinidade como pontes e edifícios próximos ao mar podem se beneficiar de ensaios de corrosão acelerada para auxiliar na prevenção à corrosão (Bicelli, *et al*, 2021).

A presença de íons cloreto, conforme Broomfield (1998), que podem originar de água do mar, sais descongelantes ou outros contaminantes, é uma das causas mais comuns de corrosão em armaduras de concreto armado, mas o efeito de cloretos adicionados diretamente à mistura fresca do concreto não deve ser negligenciado pois tem potencial de rapidamente dar início ao processo corrosivo. Quando a concentração de cloretos no concreto atinge um certo nível crítico, ela pode iniciar a corrosão do aço, especialmente se a alcalinidade do concreto tiver sido comprometida. “Pode-se afirmar que na grande maioria dos casos, os mecanismos de transporte dos cloretos presentes no concreto são a absorção capilar e a difusão iônica” (Cascudo, 2000).

3. Corrosão Eletroquímica: Quando existem diferenças de potencial na superfície do aço, podem formar-se pilhas de corrosão. Nestas pilhas, uma área da armadura atua como ânodo e outra como cátodo. No ânodo, o aço se oxida e é consumido, enquanto no cátodo, ocorre a redução de oxigênio. Segundo Andrade (2001) o processo corrosivo em si começa após a despassivação da armadura, com o início da fase de propagação, em função da dissolução do ferro (oxidação), gerando os chamados produtos de corrosão.

Conforme explicado por Helene (1993), é necessário que exista:

- um eletrólito: geralmente a água pode atuar como eletrólito, transportando os íons,
- diferença de potencial: diferença entre dois pontos da barra como, tensões, concentração salina, fugas de corrente, umidade etc.
- presença de oxigênio: o processo de corrosão e o produto gerado é a ferrugem, cuja origem advém de um processo de oxidação, portanto, a

presença de oxigênio permite e aumenta o risco da ocorrência de processos corrosivos.

Segundo Torres (2006), a presença de agentes agressivos do tipo sulfetos, cloretos, dióxido de carbono, nitritos, gás sulfídrico, cátion amônio, óxidos de enxofre e fuligem, entre outros, pode favorecer o desenvolvimento de processos corrosivos, ao aumentar a eficiência do eletrólito, reduzir o pH ou atacar a camada passivadora de óxidos que normalmente existe em torno da armadura.

4. Corrosão por Ataque Químico: O concreto pode ser exposto a vários produtos químicos que podem afetar sua integridade e, conseqüentemente, a das armaduras. Ácidos e álcalis fortes são exemplos de substâncias que podem causar corrosão.

As reações químicas que resultam na produção de substâncias expansivas no concreto endurecido podem causar danos significativos. Inicialmente, a expansão pode não mostrar danos visíveis no concreto. No entanto, o aumento das tensões internas pode levar ao fechamento de juntas de expansão, causar deformações, e resultar em deslocamentos em várias partes da estrutura. Outras conseqüências incluem fissuração, lascamento e esfarelamento. Os quatro fenômenos relacionados a estas reações químicas expansivas são: a reação álcali-agregado, o ataque por sulfatos, a hidratação tardia de CaO e MgO, e a corrosão das armaduras do concreto (Mehta; Monteiro, 2008).

5. Efeitos Físicos: Movimentos cíclicos de expansão e contração devido a flutuações de temperatura ou umidade podem causar fissuras no concreto, permitindo a entrada de agentes corrosivos. Um dos principais agentes de deterioração do concreto, mas não exclusivamente dele, é a água. Com moléculas muito pequenas capazes de penetrar em poros e materiais diversos, em especial os porosos, podem ser afetados por movimentações e transformações estruturais da água internamente. São exemplos destes efeitos:
 - O congelamento da água, onde a formação de uma estrutura ordenada de gelo nos poros finos pode causar danos.
 - Desenvolvimento de pressão osmótica devido a diferenças na concentração iônica.
 - Pressões hidrostáticas formadas por diferenças de vapor

6. Corrosão Microbiológica: Conforme explicado por Videla (1981), certos microrganismos podem participar de forma ativa nos processos corrosivos, ajudando a produzir ácidos que atacam o concreto e as armaduras. Este tipo de corrosão é mais comum em ambientes específicos, como sistemas de esgoto. Os ácidos penetram nos poros do material à base de cimento e, ao longo do tempo, sua concentração aumenta, iniciando a degradação da matriz de cimento do concreto. Isso resulta na criação de substâncias expansivas dentro da estrutura, tais como etringita e gipsita. (Hvitved-Jacobsen; Vollertsen; Nielsen, 2013).

2.4 CORROSÃO ACELERADA

De acordo com Cabral (2000), na análise da corrosão de armaduras, os aspectos mais impactantes incluem as propriedades do concreto, as condições ambientais, o processo de carbonatação e a existência de íons de cloreto.

Estruturas de concreto presentes em ambientes hostis sofrem os efeitos da deterioração de forma muito mais intensa, reduzindo assim sua vida útil. Elevados investimentos sem sido feitos com o objetivo de retardar esses efeitos e aumentar o tempo de sobrevivência dessas construções. Uma das formas de atuar nessas manutenções e prever seus riscos é por meio de ensaios de corrosão acelerada (Bicelli, *et al.*, 2021).

Simular a corrosão das estruturas em concreto armado em um intervalo de tempo reduzido é a forma mais viável de se estudar e buscar soluções para esse fenômeno patológico, uma vez que apenas a observação e análise das situações em tempo real demorariam muito para se chegar em um diagnóstico, provavelmente tardio para intervenções. Além disso, esses ensaios não demandam um alto custo, se tornando ainda mais vantajosos (Meira; Ferreira, 2019).

Alguns dos métodos acelerados de indução da corrosão em concretos armados de maior representatividade na literatura com referências relevantes são os seguintes;

- Adição de cloretos à massa de concreto – Segundo Medeiros, *et al.* (2017), Monteiro, Gjorv e Mehta (1985) e Liu, *et al.* (2018), é a metodologia que consiste literalmente na adição de íons de cloreto, geralmente cloreto de sódio, diretamente na massa de concreto fresco, muito empregada entre

as décadas de 1960 e 1980. Simula a a contaminação de concreto através da utilização de agregados ou água contaminados.

- Ciclos de imersão e secagem – Cabral (2000), Monteiro (2002) e Silva (2006). Esse tipo de ensaios consiste em realizar ciclos de imersão de corpos de prova em solução agressiva e em seguida realizar a secagem deles em estufa. A sucção capilar e as características físicas do concreto são determinantes na avaliação dos resultados já que o ataque às armaduras decorre da ação da solução que penetra nos poros do concreto até atingir o aço.
- Câmara de névoa salina – Santos (2010), Monteiro (2002) e Kishimoto (2010¹ citado por Meira; Ferreira, 2019). Um ambiente de atmosfera marinha é simulado, onde corpos de prova de concreto armado sofrem ação de névoa contendo íons de cloreto, sendo atingidos por solução salina vaporizada.
- Piscina ou *Salt ponding test* – Yoon, *et al.* (2000) e Raupach (1996). O processo é similar à imersão realizada nos ciclos de imersão e secagem, a diferença é que os corpos de prova permanecem sempre em contato com a solução estando sempre saturados já que estão mergulhados em reservatório preenchido com a solução de cloretos.
- Eletromigração – Torres (2006), Miranda, *et al.* (2017² Citado Por MEIRA; FERREIRA, 2019) e Abosrra, Ashour e Youseffi (2011). Já na eletromigração, a penetração de cloretos é estimulada por um campo elétrico, com os íons de cloreto migrando em direção às armaduras. Os corpos de prova ficam inseridos em soluções salinas.

¹ KISHIMOTO, I. Experimental Study on the corrosion condition of steel bars in cracked reinforced concrete specimen. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE AGEING MANAGEMENT & MAINTENANCE OF NUCLEAR POWER PLANTS, Tokyo, 2010. **Proceedings...** Tokyo, 2010.

² MIRANDA, L. R. M. et al. Avaliação da resistência à compressão e do desempenho frente à corrosão por cloretos de um concreto auto-adensável produzido com adição de Biopolímero. In: CONFERÊNCIA NACIONAL DE PATOLOGIA E RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS, 17., Recife, 2017. Anais... Recife: CONPAR, 2017.

2.5 ENSAIO CAIM

O ensaio de corrosão acelerada por imersão modificada (CAIM), proposto inicialmente por Varela e Espinoza³ (1988 citado por Torres, 2006) e aplicado posteriormente por Lima⁴ (1990 citado por Torres, 2006) é descrito por Torres (2006) como sendo um ensaio de aceleração da corrosão da categoria eletroquímica, sendo melhor associado a ensaios gravimétricos para compreender e quantificar o processo corrosivo que incide uma estrutura de concreto armado.

Sendo o ensaio de eletromigração escolhido para ser executado neste trabalho, segundo Torres (2006), ele envolve um conjunto de configurações de ensaios acelerados que se baseia na penetração de cloretos a partir da aplicação de um campo elétrico. Na literatura é comum encontrar ensaios de eletromigração que utilizam o cloreto de sódio como sal (Spainhor; Wootton, 2008; Cabrera;1996) geralmente em concentração de 35 g por litro (3,5% NaCl), valor equivalente ao encontrado nos mares brasileiros (Torres, 2006).

De acordo com Song e Saraswarhy (2007), a solução aquosa contida na rede de poros do concreto atua como um eletrólito e, dessa forma, o aço desenvolve um potencial elétrico que pode variar de um local para outro das peças estruturais em função das descontinuidades que possam ser geradas na estrutura de concreto armado como: carbonatação, contaminação por cloretos, variações na porosidade e na umidade, entre outros. Assouli, Ballivy e Rivard (2013) também corroboram sobre o efeito destas fontes de descontinuidade nas leituras do potencial de corrosão de armaduras no concreto.

Desta forma a avaliação da corrosão pelo método CAIM é um meio eficaz de observar os efeitos corrosivos no concreto armado.

³ VARELA, H.; ESPINOZA, L.V. Penetrabilidad de lones cloruors em morteiros com y sin revestimento. VII Jornadas chilenas del hormigon e I Jornada lationameticana del cemento y hormigones, Chile, 1988.

⁴ LIMA, M.G. **Influência dos componentes do concreto na corrosão de armaduras**. Tese (mestrado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1990.

As técnicas de avaliação da resistência à corrosão tendem a se dividir em três vertentes: visuais, gravimétricas e eletroquímicas. O ensaio CAIM se enquadra na segunda e na terceira categorias pelo fato de a resposta ser em função da perda de massa da armadura, o cálculo da perda de massa é realizado pela pesagem da armadura antes e após a realização do ensaio. E ao mesmo ser um ensaio estimulado por meio eletroquímicos, pois penetração dos cloretos nos corpos de prova é estimulada eletricamente, através da aplicação de uma diferença de potencial entre a armadura e a solução salina na qual o corpo de prova está imerso (Torres, 2006).

Torres (2006) concorda com Rodríguez, Ramírez e González (1994) e Cascudo (1997) sobre as técnicas de destaque na identificação e quantificação de processos corrosivos, elencando as técnicas visuais, gravimétricas e as eletroquímicas como as mais vantajosas.

O método gravimétrico, aplicado exclusivamente em ambientes laboratoriais, tem como objetivo medir o nível de deterioração por meio da quantificação da perda de massa das armaduras, após um período específico de avanço do processo corrosivo, conforme descrito por Cascudo (1997).

Segundo Spainhour e Wootton, (2008), a quantidade de massa perdida por corrosão pode ser estimada usando a equação (01), que é baseada na Lei de Faraday.

$$\Delta m_{teórico} = \frac{t \times i \times M}{z \times F} \quad (01)$$

onde

t é o tempo (s), i a corrente (A), M o peso atômico do ferro (55.847 g/mol), z a carga do íon (assumido como 2) e F a constante de Faraday (96,487 A s).

Segundo Helene (1993), apesar de ser uma determinação destrutiva, é um dos parâmetros quantitativos mais confiáveis.

Segundo Spainhour e Wootton (2008), esta técnica foi utilizada com sucesso por pesquisadores que estudavam o comportamento de aderência de barras de reforço corroídas em amostras de concreto, que descobriram que quando a corrente era passada por uma barra suspensa em uma solução salina, a correlação entre a perda de massa real e a prevista era quase perfeita. Além disso, descobriram que quando uma barra corroída era retirada de um bloco de concreto, a resistência de aderência era substancialmente reduzida.

Além disso, com os resultados gravimétricos, é possível calcular a taxa de corrosão conforme a equação (02);

$$T_{corr} = \frac{W_I \times W_F}{A \times t} \quad (02)$$

Onde:

T_{corr} = Taxa de corrosão, geralmente em mg/cm² por hora

W_F = Massa final (g)

W_I = Massa inicial (g)

A = Área submetida à corrosão (cm²)

t = Tempo (s)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo serão descritos os materiais utilizados e os procedimentos de ensaios para a caracterização dos agregados, as etapas para determinar o traço do concreto pelo método da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), os ensaios do concreto no estado fresco e endurecido, a execução da moldagem dos corpos de prova utilizados para os ensaios de corrosão em armaduras de concreto armado.

3.1 CIMENTO PORTLAND

Na realização deste trabalho optou-se por utilizar o cimento Portland CII-Z-32 com adição de material pozzolânico que varia de 6 a 14% em massa e podendo ter também Filer (até 10%). Foi escolhido por ser de fácil obtenção no comércio local da região (Pontal do Paraná e Paranaguá). Não foram realizados ensaios de caracterização no cimento Portland CII Z 32, para prover celeridade no andamento deste, bem como por falta de equipamentos laboratoriais específicos em ligantes. Assim considerou-se a descrição contida na ficha técnica deste cimento utilizado, conforme descrito na TABELA 1.

TABELA 1 - Ensaio Físicos, Químicos e Mecânicos do cimento CII-Z-32

CIMENTO CP II - Z - 32 - Período mar/18											
Ensaio			Químicos					Físicos e Mecânicos			
Teores (%)			Finura (%)		Blaine (cm ² /g)	Blaine		Tempo de pega		Resistência à Compressão (Mpa)	
MgO	SO ₃	#200	#325			Início (min)	Fim (min)	01 dia	03 dias	07 dias	28 dias
Limites norma	≤6,5	≤4,0	≤12,0	N/A	≥2600	≥60	≤600	N/A	≥10,0	≥20,0	≥32,0
Média	5,31	2,79	2,02	10,3	3620	290,95	365,48	12,17	22,4	27,6	37,32
Desvio p.	0,17	0,14	0,33	1,43	159,22	19,66	23,34	1	1,18	1,33	1,23
Mínimo	4,95	2,58	1,2	6,8	3350	260	330	10,1	20,9	26,1	35,7
Máximo	5,61	3,01	2,6	12	3970	320	400	14,3	25,5	30,9	39

Fonte: VOTORANTIM Cimentos (2023).

3.2 AGREGADOS

Os agregados (areia e brita) foram adquiridos no comércio local pela facilidade de obtenção. Devido a limitação de equipamentos no laboratório didático do curso, foram realizados os ensaios limitados a esta condição. Assim a seguir, são descritos sucintamente os procedimentos realizados no presente estudo.

3.2.1 Composição Granulométrica

Para a realização da composição granulométrica dos agregados baseou-se a recomendação dada na Norma NBR 17054 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2022).

Dessa maneira utilizou-se 300g de areia e 3000g de brita 1 e brita 2 conforme indicação da norma. Assim a FIGURA 2 ilustra esses agregados utilizados.

FIGURA 2 - Agregados utilizados



Fonte: O autor (2023).

Então, após procedimentos de peneiramento de maneira manual para cada uma das amostras (areia, brita 1 e brita 2) foi determinada a porcentagem retida, em massa, em cada peneira, bem como as porcentagens retidas e acumuladas.

Segundo a NBR 17054 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2022), a grandeza associada à dimensão máxima característica (DMC) correspondente à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5 % em massa. Enquanto o módulo de finura é a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100.

Com isso, é possível obter a curva granulométrica dos agregados em estudo, o diâmetro máximo característico (DMC) e o módulo de finura (MF), sendo este último

definido como a soma das porcentagens acumuladas nas peneiras de série normal dividida por 100.

3.2.2 Massa Unitária e Índice de Vazios

A determinação das características dos agregados foi preparada conforme estabelecida na norma NBR 16972 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021): Agregados – Determinação da massa Unitária e do Índice de Vazios. Ademais, entende-se por massa unitária a relação entre a massa do agregado lançado no recipiente (de acordo com o procedimento estabelecido nesta Norma), e o volume desse recipiente, e por índice de vazios o espaço que fica entre os grãos de uma massa de agregado.

O cálculo para determinar a massa unitária e o índice de vazios, encontra-se nas equações (03) e (04), respectivamente.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (03)$$

Onde:

- ρ_{ap} massa unitária do agregado (kg/m³);
- m_{ar} massa do recipiente com o agregado (kg);
- m_r massa do recipiente vazio (kg);
- V volume do recipiente (m³);

$$E_V = \frac{100[(d_1\rho_w) - \rho_{ap}]}{d_1\rho_w} \quad (04)$$

Onde:

- E_V índice de vazios nos agregados (%);
- d_1 densidade do agregado seco kg/m³
- ρ_w densidade da água (kg/m³);
- ρ_{ap} densidade média do agregado (kg/m³);

3.2.3 Densidade de Absorção de Água da Brita

A norma NBR 16917 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021) estabelece o procedimento para determinar a densidade de agregado graúdo, na condição seca e saturada e ainda a absorção de água adquirida pelas britas, sendo este o aumento da massa devido ao preenchimento dos poros permeáveis por água.

Assim, conforme estabelecido na referida norma, determina-se as densidades e a absorção das britas 1 e 2, utilizando-se as etapas das expressões dadas nas equações (05 a 07).

$$\rho_s = \frac{m_A}{m_B - m_C} \quad (05)$$

Onde:

ρ_s densidade do agregado na condição seca (g/cm³);

m_A massa da amostra seca em estufa a (105±5)°C (g);

m_B massa da amostra na condição saturada superfície seca (g);

m_C massa da amostra submersa em água na condição saturada superfície seca (g);

$$\rho_{sss} = \frac{m_B}{m_B - m_C} \quad (06)$$

ρ_{sss} densidade do agregado na condição saturada superfície seca (g/cm³);

m_B massa da amostra na condição saturada superfície seca (g);

m_C massa da amostra submersa em água (g);

$$A = \frac{m_B - m_A}{m_A} \times 100 \quad (07)$$

Onde:

A absorção de água (%);

m_A massa da amostra seca em estufa a (105±5)°C (g);

m_B massa da amostra na condição saturada superfície seca (g);

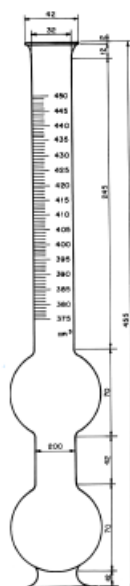
3.2.4 Massa Específica da Areia

Segundo a norma NBR9776 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1987) Agregados – Determinação da massa específica de agregados

miúdos por meio do frasco de Chapman, descreve o procedimento utilizando-se o frasco de Chapman. No entanto, esta norma foi cancelada e substituída pela norma NBR16916 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021), Agregado Miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água.

Por não ter o material especificado na norma mais recente, a determinação da massa específica da areia foi feito com base na antiga norma NBR 9776 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1987), que usa o frasco ilustrado na FIGURA 3.

FIGURA 3 - Frasco de Chapman



Fonte: NBR 9776 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1987).

Dessa maneira, para determinar a massa específica da areia utilizou-se a equação (08) dada na NBR9776 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1987).

$$\gamma = \frac{500}{L - 200} \quad (08)$$

Onde:

γ massa específica do agregado miúdo (g/cm³);

L leitura do frasco (volume ocupado pelo conjunto água-agregado miúdo);

3.3 DOSAGEM DO CONCRETO

Na dosagem do traço do concreto, utilizou-se o método ABCP/ACI, que é uma adaptação da norma ACI (*American Concrete Institute*) para agregados brasileiros. O método fornece uma aproximação da quantidade dos materiais necessários para a confecção de concreto. Assim a seguir serão descritos os passos utilizados para determinar o traço do concreto, utilizando-se os materiais encontrados no comércio local.

A resistência do concreto de projeto (f_{ck}) aos 28 dias considerada foi de 20MPa, tendo um desvio padrão de 3,0. Com isso a resistência de dosagem é determinada aplicando-se a equação (09).

$$f_{c28} = f_{ck} + 1,65S_d \quad (09)$$

Ao final do processo de dosagem para os ensaios e moldagens em concreto utilizou-se o traço;

$$1: 2,04: 3,78: 0,59$$

Intencionalmente não se efetuou nenhum tipo de ajuste na dosagem do traço. O cálculo apresentado considera que os insumos para o preparo do concreto estão secos, entretanto, é de interesse deste trabalho simular condições reais de obras, nas quais geralmente se utilizam agregados que contam com a presença de umidade e na maior parte das vezes não se fazem ensaios nos agregados e não se corrige o traço considerando essa umidade.

3.4 ENSAIO NO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

3.4.1 Massa Específica, rendimento e teor de ar incorporado

A norma NBR 9833 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008), Concreto Fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico, estabelece os procedimentos para esses ensaios.

Assim, a massa específica considerada é a massa da unidade de volume do concreto fresco adensado (conforme esta norma), incluindo o volume de ar aprisionado e incorporado. Nesse sentido, o ar aprisionado pode ser reduzido da massa do concreto com o adensamento, e o ar incorporado é o somatório do ar que não foi eliminado durante o adensamento do concreto (ar aprisionado) e aquele que é introduzido por meio de aditivos (optativo). Já o rendimento é o volume resultante da mistura fresca adensada, e o teor de ar é o volume de ar aprisionado ou incorporado ao concreto fresco.

Então, o cálculo para determinar a massa específica (ρ_{ap}) do concreto fresco, utiliza-se a equação (14). Para encontrar o rendimento (R), que se refere à quantidade de concreto produzida a partir de uma determinada quantidade de materiais, utiliza-se a equação (15).

$$\rho_{ap} = \frac{m}{V} 1000 \quad (14)$$

Onde:

- ρ_{ap} massa específica aparente do concreto (kg/m³);
- m massa de concreto (kg);
- V é o volume do recipiente (dm³)

$$R = \frac{m_c + m_f + m_g + m_a}{\rho_{ap}} \quad (15)$$

Onde:

- R rendimento(m³);
- m_c massa de cimento da betonada(kg);
- m_f massa total de agregado miúdo da betonada, na condição de umidade em que foi utilizado para o preparo do concreto (kg);
- m_g massa total de agregado graúdo da betonada, na condição de umidade em que foi utilizado para o preparo do concreto (kg);
- m_a massa total de água adicionada na betonada(kg);
- ρ_{ap} massa específica aparente do concreto (kg/m³).

Uma vez calculado o rendimento (R), pode-se encontrar o índice de ar (I_a) pela equação (16) e, após, determina-se o teor de ar (A) aplicando-se a equação (17).

$$I_a = \frac{R}{V_t} \quad (16)$$

Onde

R é o rendimento e V_t é o volume total dos componentes da betonada (m^3):

$$A = \left(1 - \frac{1}{I_a}\right) 100 \quad (17)$$

3.4.2 Consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone

A determinação da consistência do concreto fresco é feita pela medida de seu assentamento, ou seja, pela massa que se abate após a retirada da fôrma (tronco de cone) que deve ser sustentada apenas pelo seu peso próprio sem o apoio das laterais. Assim, o procedimento deste ensaio é descrito na norma NBR 16889 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2020): Concreto – Determinado da consistência pelo abatimento do tronco de cone.

Nesse sentido, o procedimento experimental resumidamente seguiu-se os passos descritos abaixo, determinado com isso o abatimento da massa do concreto (FIGURA 4).

- Posicionamento da placa de base em uma superfície rígida e plana que esteja livre de vibrações.
- Umedecimento do molde e a placa de base e alocação do molde sobre a placa.
- Preenchimento do molde rapidamente com concreto, seguindo a NBR 16889 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2020), em três camadas, onde cada camada tem cerca de um terço da altura do molde.
- Adensamento de cada camada do concreto com 25 golpes de uma haste de adensamento.
- Medição do abatimento da massa de concreto.

FIGURA 4 - Abatimento do tronco de cone



Fonte: O autor (2023).

3.4.3 Coesão e consistência

O método de dosagem do concreto IPT/EPUSP, foi desenvolvido na EPUSP/IPT (Escola Politécnica da universidade de São Paulo/Instituto de Pesquisa Tecnológico). Tem como propósito fornecer uma avaliação quantitativa e qualitativa da coesão e consistência do concreto fresco, sendo uma ferramenta interessante para visualizar na massa do concreto ainda no estado fresco algumas características importantes, tais como coesão e consistência.

A FIGURA 5, ilustram as três etapas descritas para visualmente verificar a coesão e a consistência na massa do concreto. Nesse sentido, segue-se algumas das etapas desse método:

- Nivelar a superfície do concreto através do vai e vem da colher de pedreiro, e com isso, escutar se o som da colher com as britas som audíveis. Caso escute um som com “rangidos” significa que tem excesso de brita, e pouco teor de argamassa (falta). Após nivelamento da massa, verificar se a sua superfície se apresenta sem buracos e com aparência homogênea. Fazer um buraco na massa e em seguida empurrá-la com a colher de pedreiro, fazendo uma espécie de “parede”. Então observar se a massa fresca se mantém firme, sem desmoronar.
- Pegar uma porção da massa com a colher de pedreiro e deixar cair (escorregar livremente), observando se a massa se apresenta coesa e homogênea durante a queda, ou se despedaça de maneira não homogênea.

FIGURA 5 - Coesão e consistência (método IPT/EPUSP).



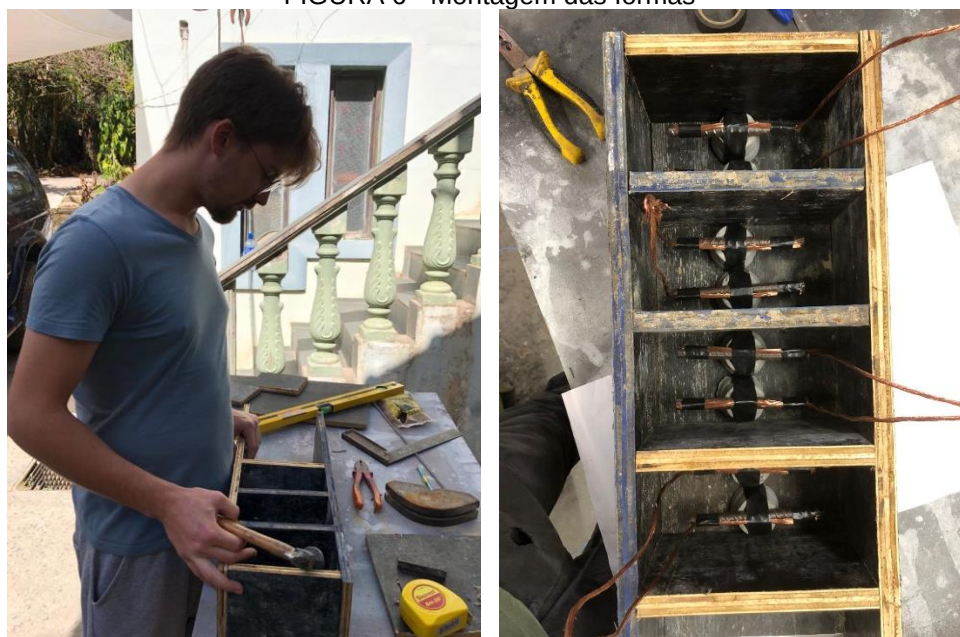
Fonte: O autor (2023).

3.4.4 Moldagem e cura de corpos de prova

Foram estruturados para o presente estudo a utilização de 2 (dois) tipos de corpos de prova, sendo o primeiro cilindro com as dimensões de 10x20cm, ou seja, o diâmetro interno com 10cm e altura de 20cm, conforme prescrição na norma NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016), Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Devido ao fato de essa dimensão do corpo de prova ser normalizada, a fôrma utilizada na moldagem foi de resina (plástico) encontradas facilmente em lojas comerciais.

A segunda fôrma para a medição da corrosão acelerado foi feita por confecção própria, utilizando-se como material a madeira. As dimensões internas foram de 16,0x8,0cm (comprimento e largura) e altura 12,0cm, sendo montadas 4 (quatro) fôrmas, conforme ilustrada na FIGURA 6.

FIGURA 6 - Montagem das fôrmas



Fonte: O autor (2023).

Assim, resumidamente, para a investigação dos resultados nos corpos de prova de concreto (CPs) no estado endurecido, foram confeccionados 5 CPs cilíndricos de 10x20cm e 4 CPs retangulares de 16x8,0x12,0cm.

Seguindo o procedimento para a moldagem dos CPs 1 (cilíndrico) e CPs 2 (retangular) foram executados conforme indicação na norma NBR5738/2015. Assim o preenchimento dos 05 CPs 1 foram adensados mecanicamente (vibração com 3500 RPM) com a quantidade de golpes estabelecida na NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015).

Devido ao fato da dimensão do CP 2 retangular não ser de tamanho normalizado, decidiu-se proceder a moldagem da mesma maneira realizada com os CPs 1 cilíndricos. Assim, a FIGURA 7 ilustra imagens do procedimento de moldagem dos CPs 1 cilíndricos. Já a preparação e moldagem detalhada dos CPs 02 retangular estão descritos no item 3.6.1.

FIGURA 7 - Moldagem dos corpos de prova cilíndricos.

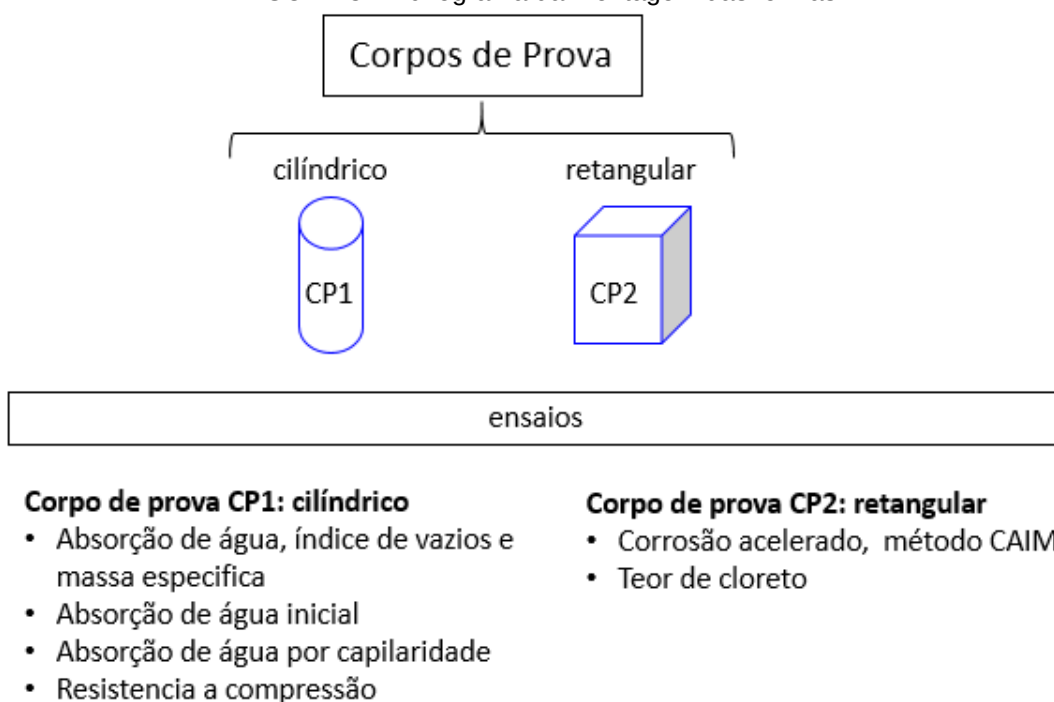


Fonte: O autor (2023).

3.5 ENSAIOS NO CONCRETO: ESTADO ENDURECIDO

A FIGURA 8 mostra o fluxograma de ensaios que serão realizados nos corpos de prova CPs 1 (cilíndrico) e 2 (retangular) no estado endurecidos. Assim a seguir são descritos sucintamente os procedimentos de cada ensaio a ser analisado neste trabalho.

FIGURA 8 - Fluxograma da montagem das formas



Fonte: O autor (2023).

3.5.1 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

A norma NBR9778 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009) Argamassa e concreto endurecido – determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica detalha o procedimento para a determinar essas características físicas. Então, entende-se como absorção de água por imersão (A): processo pelo qual a água é conduzida e tende a ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido poroso, ou seja, é também o incremento de massa de um corpo sólido poroso devido à penetração de água em seus poros permeáveis, em relação à sua massa em estado seco.

O índice de vazios (I_v): é a relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra. Já a massa específica da amostra seca (ρ_s): é a relação entre a massa do material seco e o volume total da amostra, incluindo os poros permeáveis e impermeáveis. A massa específica da amostra saturada (ρ_{sat}): é a relação entre a massa do material saturado o volume total da amostra, incluindo os poros permeáveis e impermeáveis. Por fim, a massa específica real (ρ_r): é a relação entre a massa do material seco e o seu volume, excluindo os poros permeáveis.

Após a realização do procedimento descrito na referida norma, obtém-se os resultados aplicando-se as equações (18 a 22), assim descritos.

- Absorção (A), em porcentagem;

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} 100 \quad (18)$$

- Índice de vazios (I_v), em porcentagem;

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} 100 \quad (19)$$

- Massa específica da amostra seca (ρ_s);

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (20)$$

- Massa específica da amostra saturada(ρ_{sat});

$$\rho_s = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \quad (21)$$

- Massa específica real da amostra (ρ_r);

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (22)$$

Onde:

m_{sat} massa da amostra saturada em água após imersão;

m_s massa da amostra seca em estufa;

m_i massa da amostra saturada imersa em água;

3.5.2 Índice de absorção de água inicial (AAI)

A determinação do índice de absorção de água inicial (AAI) está descrita na norma NBR 15270-2 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017) Componentes cerâmicos – blocos e tijolos para alvenaria. Apesar de esta norma ser apropriada a obtenção do ensaio para elementos da alvenaria, como blocos e tijolos, julga-se ser relevante a extração desse valor para concreto, uma vez que a argamassa de revestimento é também lançada na alvenaria, bem como nos elementos de concreto armado como em pilares, vigas e lajes. Então, uma vez realizado os procedimentos desta norma, calcula-se o índice de absorção inicial de acordo com a equação (23).

$$AAI = 194 \frac{\Delta p}{Área} \quad (23)$$

Onde:

AAI índice de absorção d'água inicial (sucção) da face ensaiada dos blocos ou tijolos(g/cm²) /min;

Δp variação de massa obtida no ensaio(g);

$Área$ área líquida da face ensaiada dos blocos ou tijolos (cm²);

Dessa maneira, sucintamente esse ensaio consiste em inserir os corpos de prova, completamente secos em uma lâmina d'água de $(3\pm0,2)$ mm e fazer o procedimento de imersão e secagem. Após a primeira imersão na água, retirar o corpo de prova após (60 ± 1) segundos, então, remover o excesso de água da face ensaiada com uma toalha e determinar a sua massa, procedendo com o ensaio a cada minuto até atingir 10 minutos. Assim, a FIGURA 9 mostra alguns passos executados durante o procedimento do ensaio.

Figura 9 – Ensaio de absorção por capilaridade



Fonte: O autor (2023).

3.5.3 Absorção de água por capilaridade

A determinação da absorção de água, através da ascensão capilar nos corpos de prova foi realizada seguindo a norma NBR 9779 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012) Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Uma vez que, este teste de capilaridade examina como o concreto absorve água através dos poros quando em contato direto com ela.

Inicia-se com a colocação dos corpos de prova de concreto em contato com uma lâmina de água de maneira que toque apenas a base. A lâmina da água deve atingir uma altura constante de (5 ± 1) mm. Os corpos de prova quando em contato com a lâmina da água deve permanecer pelos períodos de 3, 6, 24, 48 e 72 horas do início do ensaio, conforme estipulado na norma. A ascensão capilar na superfície externa dos CP's foi visível com o passar do tempo, o que é mostrado na FIGURA 10.

Figura 10 – Corpos de prova em contato com lâmina d'água.



Fonte: O autor (2023).

Então, uma vez atingidos cada um desses tempos de ensaio, deve retirá-los da água, enxugar a base, que tem excesso de água, e assim realizar a pesagem, de maneira a monitorar a quantidade de água absorvida em períodos de tempos diferentes.

Após o último intervalo, foi realizado o ensaio de rompimento das amostras para observar a altura de ascensão capilar da água (FIGURA 11).

Figura 11 – Corpos de prova após rompimento.



Fonte: O autor (2023).

Por fim, procedido o ensaio a determinação da absorção de água por capilaridade, expresso pela quantidade de água absorvida por unidade de área da base exposta à água conforme a equação (24).

$$C = \frac{A - B}{S} \quad (24)$$

Onde:

C = absorção de água por capilaridade (g/cm²)

A = massa após a absorção de água nos tempos indicados

B = massa seca do corpo de prova

S = área da seção transversal (cm²)

3.5.4 Resistência à compressão axial

A norma NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018) orienta como realizar a determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto, sejam moldadas em laboratório ou retiradas de estruturas existentes.

Assim, seguiu-se o procedimento constante na referida norma, que preconiza que os corpos de prova cilíndricos sejam comprimidos em uma máquina ajustada e calibrada (ISO 7500-1), com pratos de tamanho padronizado. Então, passados os 28 dias de cura imerso em água, foram determinadas suas dimensões com um paquímetro, medindo o diâmetro e altura com exatidão de $\pm 0,1$ mm.

O rompimento dos corpos de prova foi realizado pela equipe do laboratório QUALILAB na região de Araucária-PR, e a prensa utilizada modelo EMIC PC200C com capacidade de aplicação de carga máxima de 200000 kgf, velocidade de aplicação de cerca de 0,5 Mpa/s, elétrica e com módulo eletrônico para leitura de informações. A FIGURA 17 mostra imagens do procedimento realizado para determinar a resistência à compressão dos corpos de prova.

Figura 12 – Ensaio de compressão axial.



Fonte: O autor (2023).

Assim, a resistência é calculada pela expressão da equação (25).

$$f_c = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (25)$$

Onde:

f_c resistência à compressão (Mpa)

F força máxima alcançada (N)

D diâmetro do corpo de prova (mm)

3.6 CORROSÃO ACELERADA PELO MÉTODO CAIM

A corrosão acelerada de corpos de prova, pode ser obtida pelo método CAIM (Corrosão Acelerada por Imersão Modificada) utilizado para avaliar a resistência à corrosão das armaduras em concreto armado.

3.6.1 Montagem das fôrmas e preparação dos corpos de prova

Conforme explorado por Torres (2006), diversos métodos eletroquímicos desenvolvidos em laboratórios utilizam corpos de prova confeccionados com argamassa ou concreto armado. Os corpos de prova são submetidos a situações similares à real, estimando-se a taxa de corrosão (Gonzales *et al.*, 1996).

Assim, a seguir estão apresentados os passos de produção dos corpos de prova para os estudados:

- I. Foram desenvolvidas fôrmas retangulares com as dimensões internas de 16,0x8,0x12,0 cm, montada com material em madeira (FIGURA 13). Utilizados espaçadores de concreto com 2,5cm de espessura a fim de permitir o cobrimento mínimo necessário para as armaduras de aço.

Figura 13 – Dimensões internas na montagem da forma.



Fonte: o Autor

- II. As armaduras de aço foram pesadas e tiveram as posições marcadas. Para realizar a ligação entre armadura e a fonte de alimentação, foi utilizado fios de cobre ($\varnothing=4,0\text{mm}$) e as barras de aço CA-50 com diâmetro $\varnothing=10,0\text{mm}$, que foram fixados dentro das formas de madeira, devidamente identificados para posterior pesagem e análise de perda de massa. Em cada CP retangular foram colocadas duas armaduras em paralelo, cada uma medindo 11cm de comprimento. A FIGURA 14 esta ligação e montagem feito no interior do corpo de prova para as análises.

FIGURA 14 - Espaçador, armadura e fio de cobre



Fonte: O autor (2023).

- III. Dessa maneira, após item II, o concreto foi produzido conforme o traço e quantidades especificadas no item 3.3. Assim a (FIGURA 15) mostra o procedimento de confecção do concreto nas fôrmas retangulares, já com a armaduras, espaçada do fundo com 2,50cm e fixadas com fios de cobre para a ligação com a Fonte de Alimentação. Após 24hrs da moldagem, foram imersos em água realizando a cura por um período de 28 dias.

FIGURA 15 - Confecção do concreto nas fôrmas



Fonte: O autor (2023).

3.6.2 Montagem do experimento para a medição da corrosão

O ensaio de corrosão acelerada utilizando o método CAIM, iniciou-se 32 dias após a moldagem dos corpos de prova. Para asseverar-se a indução eletroquímica no sistema de medição (FIGURAS 16 e 19) o ensaio propõe a imersão parcial dos corpos de prova em uma solução de íons cloreto, ou seja, migram da solução para as barras das armaduras dispostas no interior do concreto, através de estímulos elétricos, impondo a diferença de potencial, conseqüentemente iniciar-se-á a corrosão dessas armaduras.

Neste sentido, a taxa de corrente para induzir a corrente elétrica foi de $500\mu\text{A}/\text{cm}^2$, conforme dado por Graeff (2007), em que a autora considera um maior controle sobre o grau de corrosão, ademais, expressa que a corrente aplicada no sistema é diretamente dependente das barras de aço utilizado para a corrosão. Assim, o diâmetro empregado no presente estudo foi de 10mm, e o comprimento de 11cm, a corrente elétrica calculada a ser aplicada pela fonte de alimentação foi de 28mA, permanecendo constante (sem variação) durante todo o período de estudo. Devido ao fato de obter diretamente a água do mar (água com cloreto de sódio (NaCL)), por estar o curso da engenharia civil no litoral do Paraná, foi utilizado no ensaio de corrosão acelerado a água do mar da praia de Mirassol, balneário que abriga o *Campi* do Estudo do Centro de Estudos do Mar da UFPR.

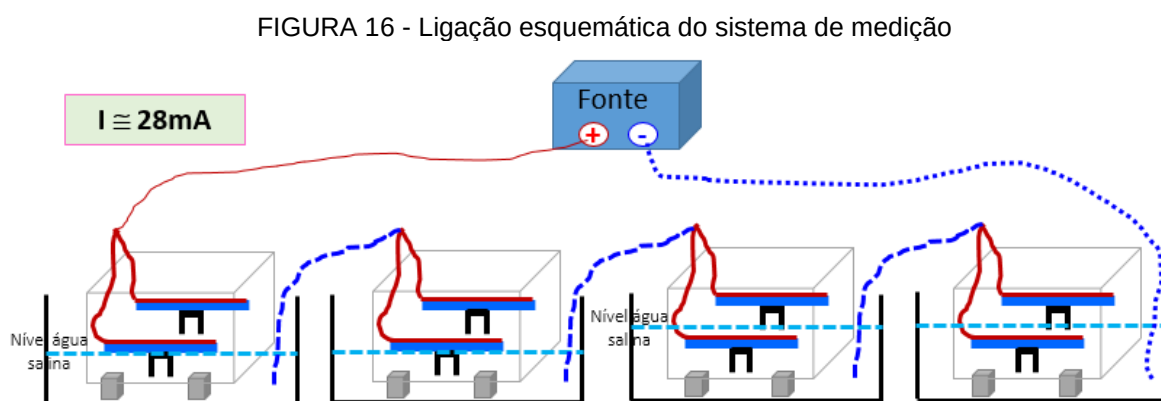
Inicialmente, para que não houvesse dúvidas na montagem do sistema de medição e no decurso do experimento, foi montada uma prévia das ligações elétricas do ensaio. Em virtude correta desta, passou-se para um local definitivo e assim facilitar melhor as medições durante todo o tempo do experimento.

Utilizou-se recipientes idênticos para receber os corpos de prova, contendo água do mar e, ainda todo o aparato de ligação do ensaio com a fonte de alimentação e o multímetro para análise/verificação da corrente passante.

A fonte de alimentação utilizada é da marca PASCO scientific®, modelo SF-9585A capaz de gerar tensões até 500V com medidores para exibir tensão e corrente. Foi utilizado multímetro digital classe 1, modelo DT9205A MB TOOLS com capacidade entre 2mA e 20A ligado em série aos CP's, e assim registrar a corrente com maior precisão em relação à fonte.

A FIGURA 16 mostra esquematicamente a ligação em série feita para a realização dos ensaios para a obtenção da corrosão das armaduras. Já a FIGURA 17, ilustra a montagem real do experimento.

Para analisar melhor a influência do cobrimento proposto de 2,50cm entre o fundo da fôrma e a armadura (devidamente espaçada com espaçador) foi idealizado na elaboração do experimento de que a água do mar teria 2 (dois) níveis de alturas diferentes. Assim, em 2 CPs retangulares foi colocado uma camada da água do mar de 2,48cm, ou seja, ficando a altura da água logo baixo da armadura. Já a segunda camada de água (mar) ultrapassou a altura das duas armaduras contidas no interior dos CPs, ou seja, uma camada com 4cm com água do mar. Então, para facilitar a visualização da descrição das camadas da água do mar nos corpos de prova, a FIGURA 18, mostra esquematicamente os dois níveis considerados no experimento.



Fonte: O autor (2023).



Fonte: O autor (2023).

FIGURA 18 - Demonstração da ligação do sistema de medição



Fonte: O autor (2023).

Após a prévia da ligação e montagem final, deu-se início à medição. A fonte de alimentação permaneceu ligada circulando com uma corrente de 28mA (mili amperes) por 28 dias (4 semanas), sendo a corrente ajustada frequentemente devido às variações da resistência do circuito decorrentes do processo natural de oxidação que foram ocorrendo no decurso. Assim a FIGURA 19 mostra o sistema montado no 1º dia da experimentação.

FIGURA 19 - Medição da corrosão: 1 dia



Fonte: O autor (2023).

Durante os 28 dias de análise da corrosão da armadura, é sabido que no processo a água do mar poderia ser evaporada naturalmente, ou ainda pela aceleração da corrente induzida no sistema. Assim, registrou-se a massa inicial de cada CP e o volume de água adicionados, que estão constantes na TABELA 2, e assim ter maior controle da evaporação e reposição da água perdida para o ambiente.

TABELA 2 - Massa dos CP's e volume de água do mar

RECIPIENTE	MASSA CP (g)	VOLUME DE ÁGUA ADICIONADO (ml)
1	3847,8	500
2	3868,9	500
3	3710,7	950
4	3804,6	950

Fonte: O autor (2023).

Antes do rompimento dos corpos de prova para retirada das armaduras, cada CP passou por análise visual para verificar a ocorrência ou não de rachaduras e/ou fissuras no concreto.

O procedimento em seguida foi romper os corpos de prova para extrair as armaduras de cada amostra, efetuando a limpeza e pesagem delas. Como a limpeza das barras antes do ensaio foi feita por abrasão com escova giratória de aço (não danifica a armadura), após o ensaio foi aplicado o mesmo processo, como na FIGURA 23.

FIGURA 20 - Limpeza das armaduras de aço



Fonte: O autor (2023).

3.7 ENSAIOS QUÍMICOS

Para complementar as análises foram idealizadas a realização de ensaios químicos na água do mar (antes e após ensaio de corrosão) e no concreto endurecido (antes e após ensaio de corrosão). Duas amostras de água do mar utilizada para o ensaio de corrosão acelerada foram guardadas, uma antes e outra depois do ensaio de corrosão.

A realização dos ensaios químicos no concreto endurecido, foram separadas amostras dos CP's cilíndricos após o ensaio de compressão axial (sem processo de corrosão), bem como dos CP's retangulares pós-ensaio de corrosão. Dessa maneira os ensaios passíveis de serem feitos no Laboratório Didático de Química do CPP/CEM foram 4 (quatro) determinações: 1 Ensaio do potencial hidrogeniônico pH; 2. Ensaio de condutividade; 3. Ensaio de alcalinidade e 4. Ensaio de cloretos.

Assim, a seguir são descritos os procedimentos realizados para a obtenção dos resultados químicos na água do mar e no concreto endurecido, em ambos, antes e após a realização do ensaio de corrosão acelerada.

3.7.1 Potencial hidrogeniônico (pH)

O ensaio de pH é um ensaio simples de ser feito, utilizando-se um peagâmetro da marca Anvalyser®, modelo 350M. Primeiramente foi realizada a calibração com duas soluções de pH distintos, uma neutra (pH 7,0) e outra ácida (pH 4,0), limpando o eletrodo medidor após o uso com água destilada.

Foi separada duas quantidades de 100 ml de água do mar, antes e após o ensaio de corrosão. Devido ao fato de visualmente a água do mar (após ensaios) apresentar partículas pulverulentas ou sólidas, uma vez que em repouso o líquido mais denso decantava-se no fundo do recipiente, utilizou-se um agitador magnético para promover uma mistura homogênea. A instrumentação de ensaio, bem como a medição com a água do mar antes e após ensaios de corrosão, estão ilustradas nas imagens da FIGURA 21.

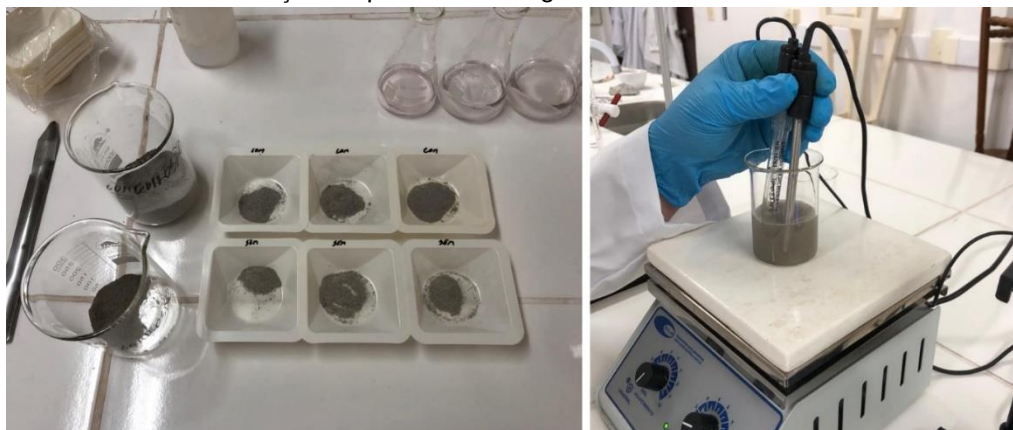
FIGURA 21 - Instrumentação do ensaio



Fonte: O autor (2023).

Para a realização da medição do potencial hidrogeniônico no concreto endurecido (antes e após ensaios de corrosão), retirou-se dos CPs uma pequena quantidade do concreto, sendo apenas 01 (um) grama de material em estado pulverulento, e colocando-o em um Becker de vidro transparente com 50 ml de água destilada para a medir o pH de cada amostra, conforme FIGURA 22.

FIGURA 22 - Medição do potencial hidrogeniônico no concreto em Becker



Fonte: O autor (2023).

3.7.2 Condutividade

A realização da condutividade de um material líquido mede a quantidade de eletrólitos presentes para detectar presença e concentração de sais, metais e outras substâncias dissolvidas na água. Devido ao fato de utilizar a água do mar que contém

cloreto de sódio (NaCl) e outras substâncias, realizou-se a medição com o intuito de aferir a condutividade elétrica presente para conduzir eletricidade.

Assim, para determinar a condutividade na água do mar (antes e após ensaio de corrosão), foi feito por um condutivímetro da marca AKSO®, modelo AK51 com faixa de medição de condutividade entre 0,01 e 19,99mS/cm, conforme mostrado na FIGURA 23.

FIGURA 23 - Determinação da condutividade na água do mar



Fonte: O autor (2023).

Para ampliar a comparação da condutividade com a água do mar (antes e após ensaio de corrosão) fez-se ainda a medição com a água da torneira fornecida por abastecimento público local (Sanepar) e com a água destilada, que já estava disponibilizada no laboratório de química para uso em geral.

3.7.3 Alcalinidade

O ensaio de alcalinidade foi realizado em triplicata para obter um valor médio e mais preciso da alcalinidade da água do mar e do concreto endurecido, ambos antes e pós ensaio de corrosão. Para ensaio de titulação foram utilizados Erlenmeyers, Beckers, pipeta volumétrica e uma Bureta de 50ml para adição do ácido.

A medição da alcalinidade consiste em realizar a titulação de uma alíquota de 50 ml da amostra com uma solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) com concentração 0,02N como titulante. Um indicador é adicionado a amostra para tornar visível o ponto final da titulação. Para o ensaio realizado com a água do mar foi utilizado 1ml de

tiosulfato de sódio para remover o cloro residual. Como indicador, foram utilizadas 5 gotas de fenolftalina, que confere uma coloração rosa choque a mistura em meio alcalino. Com a adição do ácido sulfúrico, o ponto final da titulação é obtido com o desaparecimento da cor rosa obtendo-se uma solução incolor, indicando a neutralização da mistura.

O volume de ácido sulfúrico gasto até a amostra se tornar incolor é registrado, e a determinação da alcalinidade à fenolftaleína é calculada pela equação (26).

$$\text{Alcalinidade (mg de CaCO}_3\text{/L)} = \frac{V_{H_2SO_4} \times \text{Norm. Ácido} \times 50 \times 10^3}{V_{\text{amostra(ml)}}} \quad (26)$$

A determinação da alcalinidade das amostras com o concreto endurecido, triturado até obtenção de material particulado (polverulento) foi realizada seguindo o mesmo procedimento com a água do mar. Então, acrescenta-se água 50 ml de água destilada em 1 (um) grama do material pulverulento do concreto (antes e depois do ensaio de corrosão), e em seguida 3 (três) gotas de fenolftaleína. Segue-se com a titulação, registrando o consumo de ácido até a amostra atingir coloração incolor. Na FIGURA 24 são apresentadas etapas dos ensaios.

FIGURA 24 - Determinação da alcalinidade



Fonte: O autor (2023).

3.7.4 Cloretos

O ensaio de cloretos foi realizado em triplicata para obtenção de valor médio, procedendo com uma titulação, nesse caso de uma solução padrão de Nitrato de prata ($AgNO_3$) contido em 50ml na bureta, e 1 (um) ml de cromato de potássio como indicador, conferindo uma cor amarelada à amostra (FIGURA 25). Ao final do ensaio, a coloração inicial (amarelada) deve passar para uma cor alaranjado (coloração próximo ao tijolo cerâmico).

Iniciou-se o ensaio utilizando nitrato de prata em concentração de 0,1N, com 5ml da amostra de água do mar diluída em 10ml de água destilada. Desta forma foi possível titular a solução, sendo o volume de nitrato de prata registrada para o cálculo da concentração de cloretos (em Cl/L) através da equação (27).

$$Cloretos (mg\ de\ Cl/L) = \frac{(A - B) \times N \times 35,45 \times 10^3}{V_{amostra(ml)}} \quad (27)$$

Onde:

A = ml gasto para amostra (Nitrato de prata)

B = ml gasto para o branco = 0,1ml

N = normalidade de nitrato de prata ($AgNO_3$)

O que resta como produto (sólido) da reação do nitrato de prata com o cloreto de sódio presente na amostra é o cloreto de prata, e o excesso do nitrato de prata reage com o indicador, alterando a cor da mistura de amarela para um alaranjado tom de tijolo conforme mostra a FIGURA 25.

FIGURA 25 - Reação de nitrato de prata com o cloreto de sódio



Fonte: O autor (2023).

Para o ensaio com as amostras pulverulentas (concreto endurecido) procedeu-se da mesma forma com o procedimento feito com a água do mar, adicionando-se 50 ml de água destilada em 1 (um) grama de material pulverulento de concreto (antes e após o ensaio de corrosão) e registrando o volume de nitrato de prata gasto para passar a coloração amarelada para a coloração alaranjada.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo serão inseridos os resultados obtidos, conforme procedimentos descritos na metodologia contida no capítulo 3.

4.1 ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

As características dos materiais, cimento, agregados graúdo e miúdo são apresentadas segundo os procedimentos descritos no capítulo 3. Assim, as características físicas do cimento Portland CII-Z-32 utilizado na confecção do concreto, foram obtidas no catálogo do fabricante, sendo apresentadas na TABELA 3;

TABELA 3 - Características do cimento Portland CII-Z-32

Tipos de ensaio	Resultados	Norma
Massa unitária (g/cm ³)	1,08	NBR 6474
Massa específica (g/cm ³)	2,98	NBR 23
Finura na peneira #200(%)	≤12	NBR 11579
Resist. à compressão 7 dias (Mpa)	≥20	NBR 7215
Resist. à compressão 7 dias (Mpa)	≥32	NBR 7215

Fonte: VOTORANTIM Cimentos (2023).

4.1.1 Composição granulométrica

Foram realizados os ensaios da composição granulométrica conforme a norma NBR 17054/2022. Então, na TABELA 4, apresentam-se os resultados das britas. A norma NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019) Agregados para concreto – Especificações (TABELA 6 da norma) traz os limites da composição granulométrica dos grãos que devem atender na preparação em concretos e argamassas. Dessa maneira, a TABELA 4 além de indicar a granulometria das britas utilizadas no ensaio, mostra também os valores recomendado na norma.

Assim, a FIGURA 26 ilustra o gráfico das curvas granulométricas da TABELA 5, para facilitar a visualização e comparação entre os grãos dos agregados graúdos.

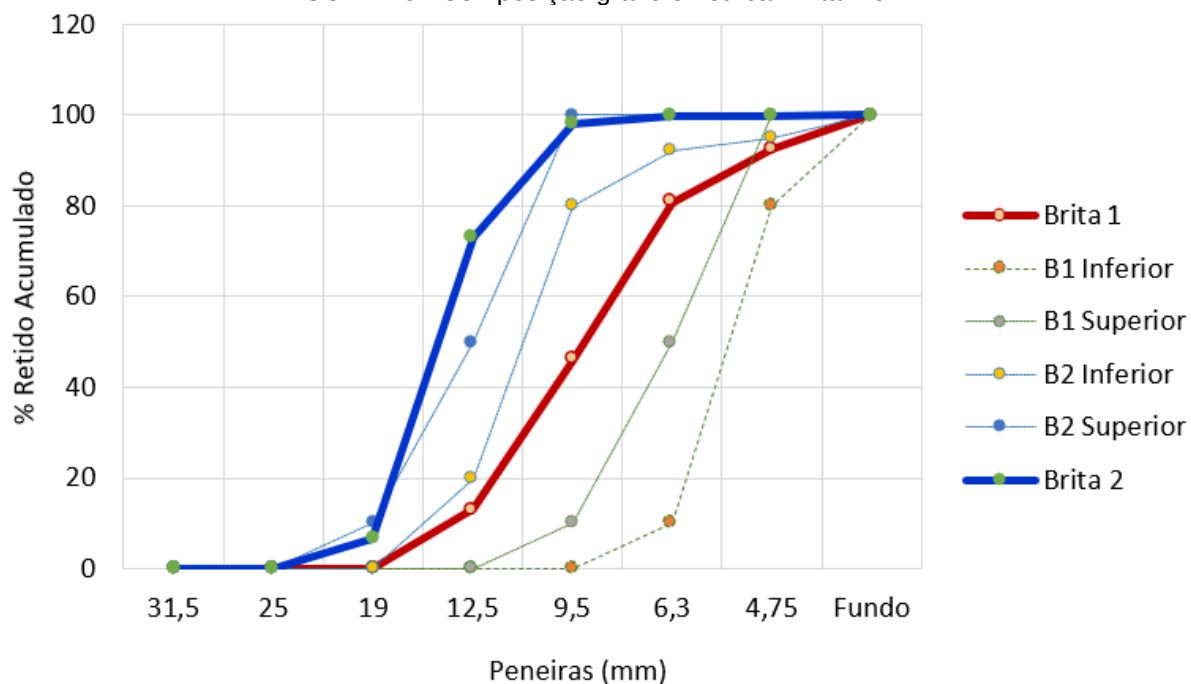
Os resultados granulométricos da areia (agregado miúdo) estão apresentados na TABELA 5 e na FIGURA 27. Nesses, estão indicados também os valores dos limites recomendados na norma NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019), separados em 4 (quatro) zonas: utilizável e ótima para os limites inferiores e superiores.

TABELA 4 - Composição granulométrica: brita 1 e 2

PENEIRA (mm)	ENSAIO		NBR 7211/2019			
	Brita 1	Brita 2	B1 L.Inferior	B1 L.Superior	B2 L.Inferior	B2 L.Superior
31,5	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0
19	0	7	0	0	0	10
12,5	13	73	0	0	20	50
9,5	46	98	0	10	80	100
6,3	81	100	10	50	92	100
4,75	92	100	80	100	95	100
Fundo	100	100	100	100	100	100
DMC	19	25				
MF	1,38	2,048				

Fonte: O autor (2023).

FIGURA 26 - Composição granulométrica: Brita 1 e 2



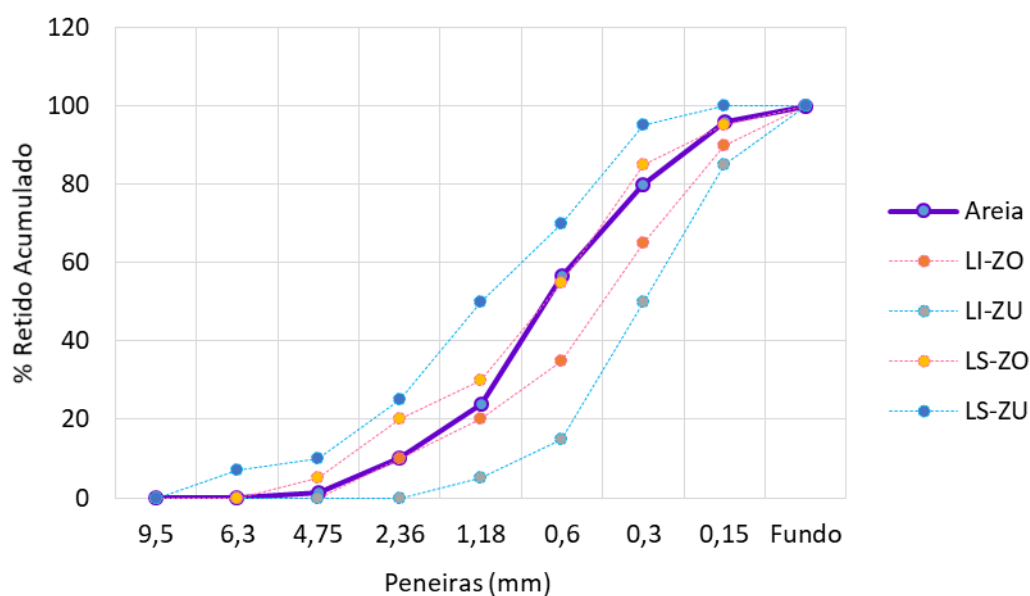
Fonte: O autor (2023).

TABELA 5 - Composição granulométrica: areia

PENEIRA (mm)	ENSAIO Areia	NBR 7211/2019			
		Limite Inferior		Limite Inferior	
		Z.Utilizável	Z.Ótima	Z.Ótima	Z.Utilizável
9,5	0	0	0	0	0
6,3	0	0	0	0	7
4,75	1	0	0	5	10
2,36	10	0	10	20	25
1,18	24	5	20	30	50
0,6	57	15	35	55	70
0,3	80	50	65	85	95
0,15	96	85	90	95	100
Fundo	100	100	100	100	100
DMC	4,75				
MF	2,68				

Fonte: O autor (2023).

FIGURA 27 - Composição granulométrica: areia



Fonte: O autor (2023).

Analisando a FIGURA 26 percebe-se que a brita 1 comercialmente vendida no comércio local (Pontal do Paraná), possui grãos maiores que os limites dados na norma, bem como a brita 2, com valores superiores aos recomendados na norma. No entanto, não se optou por realizar a correção das britas 1 e 2 para realizar a dosagem do concreto, com a finalidade de utilizar os agregados da maneira em que são vendidos (sem correção), ou seja, neste caso mesmo sem estar dentro dos limites normalizados.

Ademais, verifica-se que a brita 2 possui grande quantidade do mesmo tamanho de grãos, ou seja, na peneira com abertura de 12,5mm ficam retidas 66% dos grãos, tendo assim grãos uniformes (de mesmo tamanho), não sendo interessante na dosagem de concretos, já que pode ocorrer mais vazios entre os grãos, que deverá ser preenchido por argamassa, consequentemente, elevando-se custo final do concreto.

Examinando a curva granulométrica da areia (FIGURA 27) utilizada na dosagem do concreto, que a distribuição dos grãos se encontra entre os limites mais estreitos sugeridos na NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019), ou seja, dentro das faixas da zona ótima (inferior e superior), conduzindo a grãos contínuos, abrangendo todos os tamanhos dadas nas peneiras granulométricas.

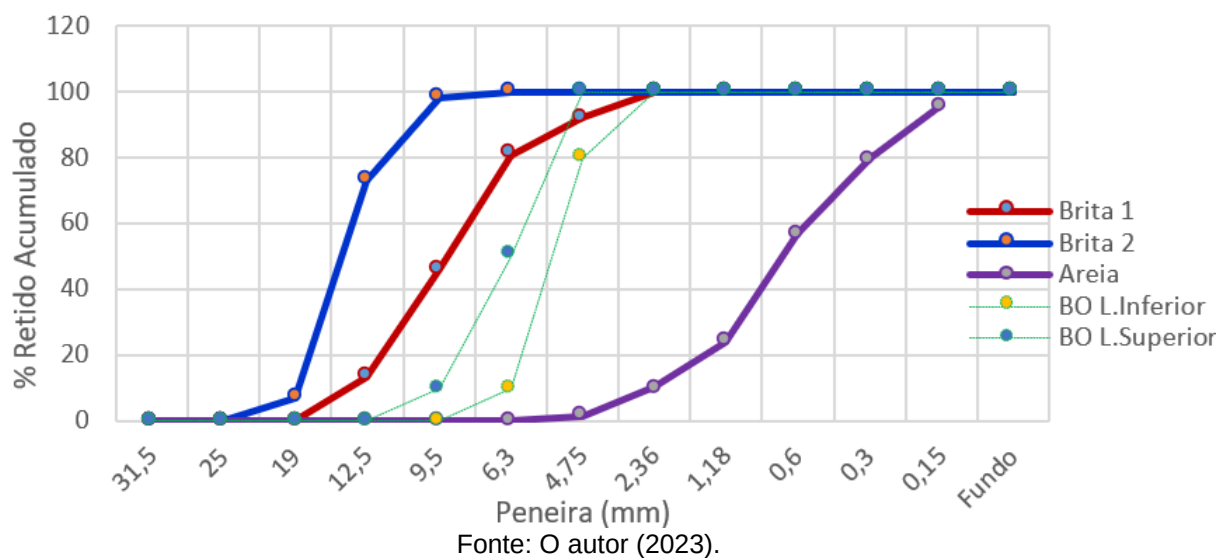
A FIGURA 28 expõe imagens da areia, brita 1 e brita 2, respectivamente, após realização do peneiramento dos grãos. Já a FIGURA 29 mostra as curvas granulométricas dos agregados utilizados no concreto.

Figura 28 - Amostras dos agregados



Fonte: O autor (2023).

FIGURA 29 - Composição granulométrica: Brita 1, Brita 2 e Areia



Percebe-se claramente através das FIGURAS 28 e 29 que ocorre a ausência de grãos em algumas peneiras, principalmente entre a brita 1 com a brita 2, bem como entre a areia com a brita 1, uma vez que a curva da brita 1 encontra-se acima dos limites recomendados na norma, ou seja, grãos maiores, distanciando dos grãos da areia, conseqüentemente maior índice de vazios ocorrerá entre os agregados dosados nos corpos de prova de concreto.

4.1.2 Massa unitária e índice de vazios

A propriedade da massa unitária e índice de vazios dos agregados encontra-se na TABELA 6.

TABELA 6 - Propriedades dos agregados

Material	Ensaio	Resultado	Norma
Areia	Massa unitária (g/cm ³)	1,59	NBR 16972
	Índice de vazios (%)	38,54	NBR 16972
Brita 1	Massa unitária (g/cm ³)	1,68	NBR 16972
	Índice de vazios (%)	40,00	NBR 16972
Brita 2	Massa unitária (g/cm ³)	1,47	NBR 16972
	Índice de vazios (%)	46,22	NBR 16972

Fonte: O autor (2023).

Segundo Basílio (1995), a maioria dos agregados miúdos possui massa unitária próxima a 1,5 g/cm³. Conforme TABELA 6, verifica-se que o valor para a massa unitária da areia utilizada é bem próximo a valores encontrados na literatura, por exemplo, segundo Pczieczek (2017) em seu estudo sobre encontrou 1,47 g/cm³ para massa unitária, e Graeff (2007) um valor de 1,57 g/cm³.

No caso dos agregados graúdos, Graeff (2007) encontrou valores de 1,48 g/cm³ de massa unitária para brita basáltica com o mesmo DMC (brita 2), enquanto Sartori, Santos e Esteves (2021) encontraram valores de cerca de 1,35 g/cm³, indicando que as características da brita utilizada no presente estudo encontram-se em outros estudos técnicos realizados por diversos autores no Brasil.

4.1.3 Densidade e absorção de água da brita

A densidade e absorção de água da brita 1 e 2 (agregados graúdos), estão apresentados na TABELA 7.

TABELA 7 - Densidade e absorção das britas

Material	Tipo de ensaio	Resultados	Norma
Agregado graúdo (BRITA 1)	Densidade na condição seca (g/cm ³)	2,81	NBR 16917/2021
	Densidade na condição saturada superfície seca (g/cm ³)	2,74	
	Absorção de água (%)	1,38	
Agregado graúdo (BRITA 2)	Densidade na condição seca (g/cm ³)	2,73	NBR 16917/2021
	Densidade na condição saturada superfície seca (g/cm ³)	2,75	
	Absorção de água (%)	0,63	

Fonte: O autor (2023).

A norma NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019), recomenda que os agregados produzidos a partir de rochas devem possuir a absorção de água inferior a 1%, e comparando com os resultados da TABELA 7,

percebe-se que a quantidade de água que brita 1 é capaz de absorver está acima da norma, já a brita 2, a quantidade de água a ser absorvida é de 0,63%.

Nos trabalhos de Sartori, Santos e Esteves (2021), Graeff (2007) e Silva e Capuzzo (2020), os valores encontrados em seus ensaios para a brita 2 são de 2,75, 2,65 e 2,73 g/cm³, respectivamente tendo os índices de absorção próximos de 2%. E para brita 1 valores entre 2,7 e 2,9 g/cm³. Indicando que mesmo estando acima da sugestão da norma os agregados foram utilizados em seus trabalhos, já que é praticamente impossível controlar a densidade e a absorção de materiais naturais.

4.1.4 Massa específica da areia

A análise da massa específica da areia através da medição com o frasco de Chapman resultou em uma elevação da coluna d'água de 392ml (FIGURA 30). A massa específica do agregado miúdo, calculado de de 2,60 g/cm³.

FIGURA 30 - Massa específica da areia



Fonte: O autor (2023).

Comparando novamente as características da areia utilizada com o trabalho de Pczieczek (2017), que ao contrário do valor de massa unitária que foi bastante divergente do presente estudo, já para o valor de massa específica da areia estudada pelo autor foi de $2,55\text{g/cm}^3$, ou seja, muito próximo de $2,60\text{g/cm}^3$ encontrado na areia do comércio local de Pontal do Paraná. Comumente se encontra valores semelhantes a $2,6\text{g/cm}^3$, como Graeff (2007), $2,62\text{g/cm}^3$ ou Meier (2011) em seu estudo sobre diversas areias na região de Curitiba-PR, com valores mínimos de $2,51\text{ g/cm}^3$ e máximo de $2,61\text{ g/cm}^3$.

4.2 ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

4.2.1 Massa específica, rendimento e teor de ar incorporado

A determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar incorporado no concreto fresco enseja na qualidade, eficiência e durabilidade da mistura. A TABELA 8 mostra os resultados calculados da massa específica, rendimento e teor de ar incorporado da massa de concreto no estado fresco.

TABELA 8 - Massa específica, rendimento e teor de ar incorporado

Material	Cimento	Areia	Brita	Água
Traço	1	2,04	3,78	0,59
Quantidade (kg)	5,00	10,00	18,00	3,00
Concreto no estado fresco				
Volume Recipiente (cm3)	3001			
Massa concreto fresco (kg)	6,86			
Massa específica (kg/m3)	2284,2			
Índice de ar	1,0047			
Teor de ar (%)	4,6			

Fonte: O autor (2023).

Conforme Sartori, Santos e Esteves (2021), a variação de teor de ar incorporado em concretos varia entre os valores de 1% a 4%. Portanto, espera-se uma diminuição na resistência do concreto endurecido a compressão axial dos corpos de prova, já que o teor de ar tem relação direta com a resistência final, ou seja, maior teor de ar incorporado, maior quantidade de vazios, consequentemente, menor a resistência.

Em relação à massa específica de concretos a ABNT [NBR 8953](#) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015) classifica como concreto normal, apresentando massa específica aparente com valores de 2000 a 2800 kg/m³ ou 2,0 a 2,8 g/cm³, intervalo no qual o concreto produzido neste estudo para moldagem dos CP's está inserido.

4.2.2 Coesão e Consistência

Conforme procedimento realizado no item 3.4.3 e ilustração da FIGURA 5, deu-se a continuidade nos passos seguintes, ou seja, realizando o ensaio do abatimento de tronco de cone, descrito passo-passo no item 3.4.2.

Durante o ensaio do slump-test (abatimento), verificou-se quantidade de água em excesso, já que durante o adensamento, na base metálica do conjunto ocorreu o surgimento de água de amassamento do concreto. Fato esse que diminuirá a resistência final do concreto, uma vez que, conforme a Lei de Abrams diz que quanto maior a quantidade de água de amassamento, menor é a resistência final do concreto endurecido.

Lembrando ainda que, tanto a areia como as britas adquirida no comércio local estavam umidade. Assim, como na composição granulométrica optou-se pela não correção dos grãos, a correção da umidade também não foi realizada, ou seja, a quantidade de água calculada na dosagem do concreto, considera-se que os agregados encontram em estado fresco e não úmidos. Uma vez que, em pequenas obras, não se realiza a correção da granulométrica, e tão pouco da umidade presentes nos agregados. Assim, a moldagem dos corpos de prova deu-se apesar desta constatação.

4.3 ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

4.3.1 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

A obtenção dos valores das massas seca e saturada dos corpos de prova estão na TABELA 9 e 10, e na FIGURA 31 estão os valores encontrados no experimento.

FIGURA 31 - Massas dos corpos de prova cilíndricos.



Fonte: O autor (2023).

TABELA 9 - Massas dos corpos de provas

	Massa seca (g)	Massa saturada (g)	Massa imersa (g)
CPi	3599,7	3645,1	2147,3
CPii	3576	3619,2	2121,3

Fonte: O autor (2023).

TABELA 10 - Absorção e Índice de Vazios

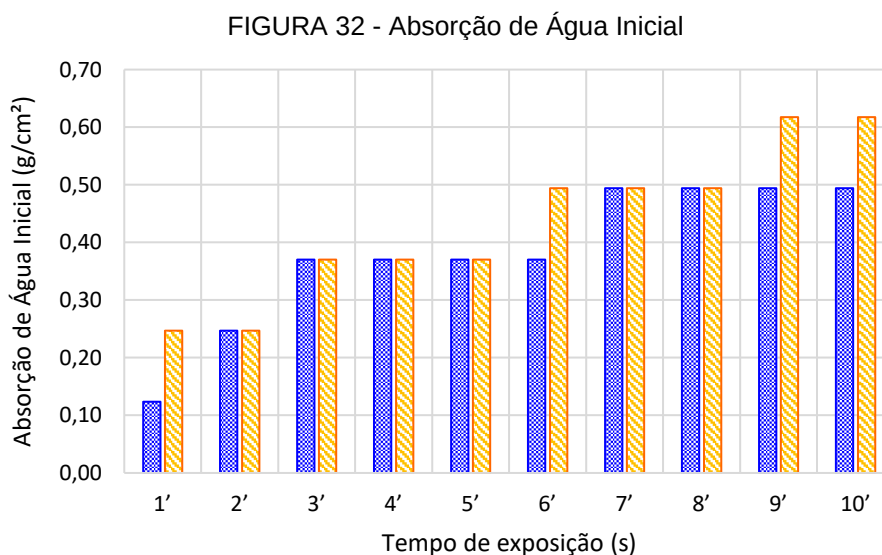
	Absorção (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica da amostra seca	Massa específica da amostra saturada	Massa específica real da amostra
CPi	1,26	3,03	2,40	2,43	2,48
CPii	1,21	2,88	2,39	2,42	2,46

Fonte: O autor (2023).

A umidificação de um concreto seco com solução salina por um período de apenas um dia, por exemplo, pode fazer com que os cloretos penetrem mais profundamente (Baronghel-Bouny; Capra; Laurens, 2014). Essa característica aliada à uma relação a/c alta, maior que 0,6, e a uma camada de cobrimento pequena ou menor que os mínimos recomendados em norma, pode gerar cenário ideal para a absorção de ions de cloreto, podendo causar de forma precoce a despassivação das armaduras.

4.3.2 Índice de absorção inicial (AAI)

A TABELA 10, expões os valores encontrados durante os períodos de ensaios para obtenção do índice de absorção inicial. Lembrando que a norma NBR15270-2 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017) prediz que o ensaio demore apenas 1minuto (60 segundos) imersa em uma lâmina de água de 3mm. Mas, para analisar se ocorre mudança na absorção inicial nos outros minutos, o ensaio seguiu até os 10minutos finais. A FIGURA 32, mostra os resultados da AAI.



Fonte: O autor (2023).

Analisando os resultados (FIGURA 32) percebe-se que com o passar do tempo, maior é a absorção de água pelo corpo de prova, e que esta absorção não é constante a cada minuto. Assim como os blocos cerâmicos e/ou de concreto na

execução de fechamento da alvenaria esses materiais absorvem certa quantidade de água, garantindo a aderência entre a argamassa de assentamento e/ou revestimento.

Os CPs de prova possuem capacidade de absorção, inicial, consequentemente ajudará a interação da argamassa na fixação com os elementos de concreto armado.

4.3.3 Absorção de água por capilaridade

Os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade estão resumidos na TABELA 11, e indicam a progressão na absorção com o passar do tempo.

TABELA 11 - Absorção por capilaridade

		Absorção por capilaridade (g/cm ²)					
	Massa seca	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs
		3hrs	6hrs	12hrs	24hrs	48hrs	72hrs
CP1	3599,3	0,019	0,036	0,062	0,094	0,115	0,127
CP2	3576	0,015	0,029	0,059	0,089	0,111	0,125

Fonte: O autor (2023).

A altura média de absorção por capilaridade após 72 foi medida após rompimento manual dos corpos de prova, resultando em um valor de aproximadamente 8cm, conforme mostra a FIGURA 33.

FIGURA 33 - Altura da absorção por capilaridade



Fonte: O autor (2023).

Cascudo (1997) menciona que um dos principais mecanismos de transporte dos cloretos é justamente a absorção capilar. Os ensaios de absorção de água e índice de vazios estão mais associados à porosidade total da massa de concreto, enquanto os ensaios de capilaridade estão relacionados com características dos poros superficiais (Araújo Jr, 2004). A princípio os resultados de absorção por capilaridade quando comparados com outros trabalhos, por exemplo (Santana; Aleixo, 2017) não parecem ser muito elevados, entretanto a altura de capilaridade é maior do que se esperaria para esses resultados, o que leva a crer que a quantidade de poros superficiais é elevada.

4.3.4 Resistência à compressão axial

A TABELA 12 expõe os resultados obtidos nos ensaios a compressão axial dos corpos de prova cilíndricos.

TABELA 12 - Ensaio de compressão

	D (mm)	h (mm)	F (kn)	<i>fck28 (Mpa)</i>
CP1	99	197	152000	19,7
CP2	99	196	168800	21,9
CP3	99	198	176960	22,9

Fonte: O autor (2023).

Os resultados (TABELA 12) indicam que os três corpos de prova cilíndricos não atingiram a resistência à compressão calculada (item 3.3), ou seja, de 25MPa. Tal ocorrência pode-se ter sido devido ao fato da não correção na quantidade da água de amassado do concreto, pois os agregados encontravam-se com umidade presentes no momento da mistura. Além disso, a granulometria da brita 1 e brita 2 possuem vazios entre esses agregados e agregados uniforme, contribuindo para a diminuição da resistência final.

4.4 ENSAIO CAIM

4.4.1 Comparação das perdas de massa e taxas de corrosão real e teórica

As perdas de massa obtidas pelo processo de pesagem foram comparadas com o valor teórico calculado com base na lei de Faraday através da equação (01) exibida no item 2.5. A FIGURA 34 apresenta o estado das armaduras logo após retirada de dentro dos CP's e limpeza.

FIGURA 34 - Armaduras de aço CA50



Fonte: O autor (2023).

A perda de massa teórica foi calculada, e está na TABELA 13 e gráfico da FIGURA 36, sendo esperado para o cenário abordado com corrente de 28mA e 28 dias de ensaio, uma perda de massa de aproximadamente 19,6g.

TABELA 13 - Perda de massa das armaduras

Perda de massa armadura CA-50 Ø10mm								
Nível d'água	Abaixo da armadura (2,48cm)		Acima da armadura (4,0cm)		Acima da armadura (4,0cm)		Abaixo da armadura (2,48cm)	
Identificação da armadura	CP1		CP2		CP3		CP4	
	I	II	I	II	I	II	I	II
Massa inicial (g)	64,6	65,4	65,2	65	64,9	64,7	65,3	66,1
Massa final (g)	55,8	56,2	59,7	57,4	58,1	56,9	56,9	56,2
Perda de massa (g)	8,8	9,2	5,5	7,6	6,8	7,8	8,4	9,9
Perda de massa (%)	13,62	14,07	8,44	11,69	10,48	12,06	12,86	14,98

Fonte: O autor (2023).

A taxa de corrosão também pode ser calculada, fornecendo uma análise da intensidade da corrosão. Segundo a equação (02) baseada nas leis de Faraday, o processo de eletromigração resultaria em uma taxa de corrosão teórica de 37,14 mg/cm² por hora.

A barra II do CP4 (FIGURA 38), sofreu a maior perda de massa entre as armaduras, apresenta uma taxa de corrosão obviamente menor, de 28,38 mg/cm² por hora, uma diferença de cerca de 23,59%.

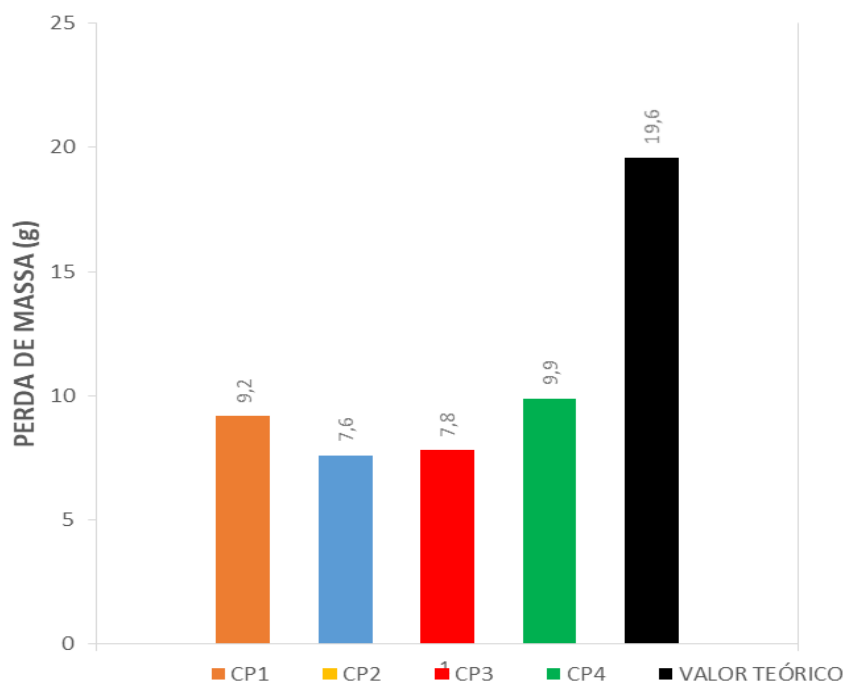
A densidade de corrente utilizada em ensaios de eletromigração por outros autores como Duffó *et al* (2015), Ortega e Robles (2016) e Pereira *et al.* (2013) variam desde 50 a 750µA/cm², a corrente fixa de 28mA adotada forneceu uma densidade de corrente de aproximadamente 356µA/cm².

FIGURA 35 - Corrosão na armadura II do CP4



Fonte: O autor (2023).

FIGURA 36 - Perda de massa



Fonte: O autor (2023).

Verifica-se que a perda de massa e a taxa de corrosão real foram menores que os valores teóricos. Alguns possíveis fatores que podem ter influenciado nessas diferenças entre os valores reais e teórico são:

- Imprecisão nos valores adotados referente à composição das armaduras de aço, a equação de Faraday que calcula a perda de massa teórica assume o valor do aço puro, sendo que há por exemplo a presença de carbono na sua composição, podendo levar a diminuição da perda de massa.
- Variação da corrente durante o processo de corrosão pode levar à divergência entre o resultado real e teórico por influenciar diretamente no resultado da perda de massa segundo Faraday.
- A lei de Faraday considera que a barra de aço estaria sendo colocada diretamente em uma solução salina, porém, no caso da análise explorada, as barras estão protegidas por uma cobertura de concreto, com propriedades que alteram a passagem da corrente e penetração dos sais presentes na água salgada.
- Apesar da passagem da corrente, a corrosão começa a ocorrer após a despassivação da armadura, só então efetivamente começa a se ter perda de massa.

Segundo Helene (1993), é necessário que haja oxigênio para a formação da ferrugem, e a presença de elementos agressivos, principalmente cloretos Cl^- , pode ter influência decisiva na despassivação da armadura, dando origem a reações precoces de corrosão eletroquímica. Por esse fato, a influência do nível d'água praticado na imersão dos corpos de prova parece ter tido influência nos resultados de perda de massa das armaduras.

Através da TABELA 13 e do gráfico da FIGURA 36 fica fácil a visualizar que coincidentemente as armaduras que não ficaram “mergulhadas” (CPs 1 e 4) na água do mar foram as que sofreram maiores taxas de corrosão, resultando em uma perda de massa elevada. Conforme explicado por Helene (1993), o risco de corrosão em uma estrutura com suas armaduras submersas é menor que àquela exposta a ciclos de imersão e secagem ou em casos em que a armadura não é completamente coberta. Nesta última, existem sais de cloreto provenientes da água do mar e a presença de oxigênio, obrigatório para a ocorrência de processos de oxidação, redução e/ou formação de ferrugem.

4.4.2 Efeitos do processo de corrosão na estrutura do concreto

Na análise visual realizada na parte externa dos CPs, verificou-se a ocorrência de fissuras causadas pela expansão do volume das armaduras, conforme mostra a FIGURA 37.

FIGURA 37 - Efeitos da corrosão no concreto



Fonte: O autor (2023).

Durante o rompimento dos CPs, notou-se certa facilidade para desprender algumas armaduras da massa de concreto endurecido após o ensaio de corrosão acelerada, pressupondo ser indício na perda ou diminuição da aderência causada pela expansão do volume das armaduras. Especialmente no CP4 (FIGURA 38), que apresentou rachaduras externas no concreto, e as armaduras foram destacadas com facilidade, apresentou ainda com pouco concreto impregnado na armadura.

FIGURA 38 - Rompimento dos corpos de prova



Fonte: O autor (2023).

Segundo o boletim 162 do Comitê EURO-INTERNACIONAL do BETON (CEB), que classifica graus ou níveis de deterioração das estruturas de concreto em função de manifestações patológicas como perda de secção de armadura por efeito de corrosão, o nível ou grau de deterioração dos corpos de prova são classificados entre os níveis III e IV – Intensa a Forte degradação, conforme a TABELA 14.

TABELA 14 - Classificação dos graus de deterioração segundo o Comitê Euro-Internacional do Beton.

Níveis ou graus de deterioração					
Sintomas visuais	Inicial I	Médio II	Intenso III	Forte IV	Muito forte V
Manchas de corrosão	visíveis	visíveis	visíveis	visíveis	visíveis
Fissuras	longitudinais poucas	longitudinais e estribos	generalizada	generalizada	generalizada
Destacamento do concreto de cobrimento	-	inicial	generalizado	até em zonas onde não há armadura	até em zonas onde não há armadura
Redução de secção*	-	-5%	-10%	-25%	estribos seccionados
Flechas	-	-	-	possíveis	visíveis
R/S** obra nova	0,95	0,80	0,60	0,35	-
R/S** obra velha	0,85	0,70	0,50	0,25	

Fonte: Boletim 162 CEB (2023).

4.5 ENSAIOS QUÍMICOS

A seguir são apresentados os ensaios químicos realizados na água do mar e nos corpos de provas, em ambos, antes e após a exposição da corrosão acelerada.

4.5.1 Potencial hidrogeniônico

O pH é a sigla usada para potencial (ou potência) hidrogeniônico, porque se refere à concentração de $[H^+]$ (ou de H_3O^+ em uma solução. Assim, o pH serve para nos indicar se uma solução é ácida, neutra ou básica. A escala de pH varia entre 0 e 14 na temperatura de 25°C. Se o valor do pH for igual a 7 (pH da água), o meio da solução (ou do líquido) será neutro. Mas se o pH for menor que 7, será ácido, e se for maior que 7, básico (Manual Da Química, 2023).

A TABELA 15 mostra os valores obtidos no laboratório didático de química.

TABELA 15 - Potencial hidrogeniônico (pH)

Amostra	pH
Água do mar inicialmente	7,67
Água do mar pós-corrosão	10,1
Concreto Inicialmente	10,6
Concreto pós-corrosão	10,8

Fonte: O autor (2023).

Castellote, Andrade e Alonso (2002) e Trejo e Pillai (2003) relatam que íons hidroxila são gerados no cátodo pela eletrólise das moléculas de água e posteriormente migram para o anodo, aumentando o pH do meio.

Nesse sentido, verifica-se que o pH da água do mar foi elevado consideravelmente, na faixa de 10,0, contribuindo para o processo de carbonatação e evidenciado o que já era esperado.

4.5.2 Condutividade elétrica

Condutividade Elétrica, também conhecida como EC, é a capacidade de uma substância ou solução de conduzir (transmitir) uma corrente elétrica sobre uma área definida. A corrente pode fluir através de líquidos em nível atômico ou iônico. A facilidade com que a corrente é transmitida sobre uma área definida ajuda a quantificar a concentração iônica de uma amostra. No entanto, a concentração iônica dada por uma medição de condutividade elétrica não é específica, isso significa que não é possível diferenciar os tipos de íons presentes na amostra (DIGITAL WATER, 2023). Então, a TABELA 16 mostra os resultados da condutividade analisadas no presente estudo.

TABELA 16 - Condutividade elétrica

Amostra	Condutividade (mS/cm)
Água do mar inicialmente	12,22
Água do mar pós-corrosão	11,65
Água da torneira	0,18
Água destilada	0,01
Concreto Inicialmente	0,96
Concreto pós-corrosão	0,87

Fonte: O autor (2023).

Os íons são formados quando um sólido, como o sal, é dissolvido em um líquido para formar componentes elétricos com cargas elétricas opostas. O cloreto de sódio se separa para formar íons Na^+ e Cl^- . Todos os íons presentes nas soluções contribuem para a corrente que flui através do sensor e, portanto, contribuem para a medição da condutividade. A condutividade pode ser usada como uma medida da concentração de íons presentes na amostra (Haacke, *et al.*, 2019).

Nesse sentido, verifica-se que a água da torneira e água destilada possuem baixos valores na condutividade em comparação com a água do mar (antes e após ensaio). O concreto também possui baixo valor, mas acima da água da torneira e destilada, indicando que ocorre a penetração da água do mar no interior dos corpos de prova.

4.5.3 Alcalinidade

A alcalinidade é a medida da capacidade de neutralização de ácidos. Nesta análise, considera-se a alcalinidade devida ao teor de hidróxidos (OH^-), carbonatos (CO_3^{2-}) e/ou bicarbonatos (HCO_3^-) que se encontram presentes na amostra, ela não sofre influência da sazonalidade e geralmente não se encontra presente em águas naturais, no entanto, poderá estar presente quando há contaminação por efluentes industriais. Amostras com elevada alcalinidade e associadas à dureza podem provocar precipitação de carbonatos em tubos de águas quentes e caldeiras causando a incrustação (Haacke, *et al.*, 2019).

A TABELA 17 indica os valores encontrados das alcalinidades nas amostras.

TABELA 17 - Alcalinidade

Amostra	Alcalinidade	Unidade
Água do mar inicialmente	8,67	mg de $CaCO_3$ /L
Água do mar pós-corrosão	5,89	mg de $CaCO_3$ /L
Concreto Inicialmente	10,71	mg de $CaCO_3$ /kg
Concreto pós-corrosão	3,80	mg de $CaCO_3$ /kg

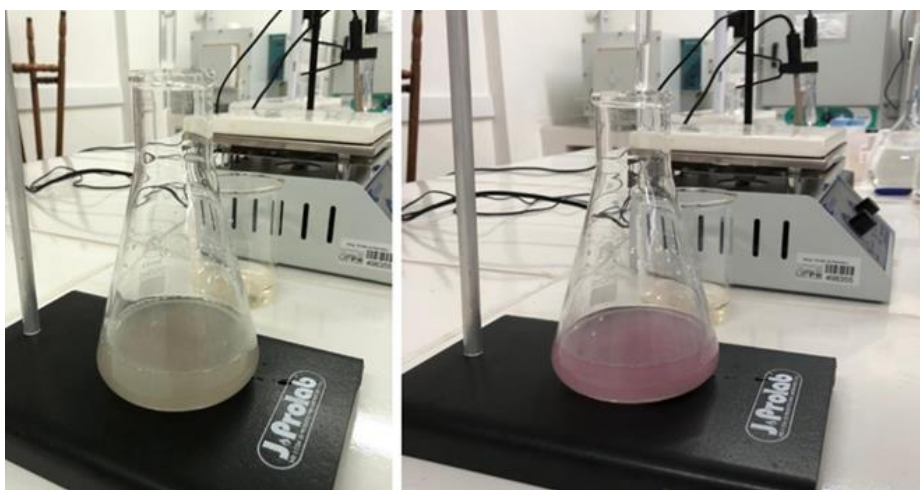
Fonte: O autor (2023).

Alcalinidade é diferente de pH. Enquanto o pH indica se uma solução é ácida ou básica, a alcalinidade indica quanto ácido a solução pode absorver sem alterar o

pH, ou seja, a capacidade de tamponamento de uma solução (no caso, da água). Portanto, soluções com alcalinidade baixa possuem uma baixa capacidade de tamponamento e o pH é alterado rapidamente quando algo ácido é adicionado. Inversamente, amostras com alcalinidade alta possuem uma alta capacidade de tamponamento e são menos afetadas quando algo ácido é adicionado, sendo necessário adicionar muito mais ácido para obter a mesma alteração de pH que ocorreria em uma amostra com alcalinidade baixa (DIGITAL WATER, 2023).

Fato curioso percebido durante o processo foi que após alguns minutos da titulação atingir a coloração incolor, as amostras retornaram a apresentar certa coloração do indicador (rosa claro), pois com o passar do tempo a amostra com o concreto endurecido continuou a ser solubilizado pelo ácido (FIGURA 39).

FIGURA 39 - Retorno da coloração no ensaio de alcalinidade



Fonte: O autor (2023).

Nesse sentido, comparado os valores obtidos (TABELA 18), tanto a água do mar quanto o concreto, após ensaio de corrosão acelerado, tiveram os valores iniciais minimizados, essa perda de alcalinidade acentuada no concreto é ocasionada pela carbonatação, e dá indícios da ocorrência de um processo de corrosão generalizado.

4.5.4 Teor de Cloretos

A norma NBR 12655 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015), em função da classe de agressividade a que a estrutura está submetida, determina o teor máximo de cloretos permitido. Para concreto armado em brandas condições de exposição, o teor máximo de cloretos é de 0,4% em relação à massa de

cimento, em concreto não exposto a cloretos, de 0,3% e para concretos expostos a cloretos em classes de agressividade forte ou muito forte, o máximo teor de cloretos permitido é de 0,15% em relação à massa de cimento. Assim, a TABELA 18 mostra os resultados obtidos.

TABELA 18 - Teor de cloretos

Amostra	Teor de cloretos	Unidade
Água do mar inicialmente	14,49	mg de Cl^- /L
Água do mar pós-corrosão	16,97	mg de Cl^- /L
Concreto Inicialmente	5,08	mg de Cl^- /kg
Concreto pós-corrosão	4,02	mg de Cl^- /kg

Fonte: O autor (2023).

Foi observado que o teor de cloretos na água sofreu um incremento de quase 15%, entretanto, o concreto teve aparente diminuição. Segundo Helene (1993) há muita controvérsia em relação ao teor crítico de cloretos solúveis capaz de despassivar o aço envolvido por concreto.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A deterioração do concreto armado ocorre de maneira intensa e prejudicial à integridade estrutural.

A expansão volumétrica das barras de aço, resultado da corrosão, resultou na perda de ligação entre o concreto e a armadura em vários pontos, levando à formação de fissuras no material, o que em pouco tempo se traduz em lascamentos da estrutura de concreto e facilita cada vez mais a entrada de umidade, sais e íons de cloreto.

A umidade facilitou a entrada de cloretos pelos poros do concreto, que, ao reagirem com o oxigênio e estimulados pela corrente elétrica provocaram a corrosão do aço das armaduras, comprometendo a estrutura internamente e enfraquecendo-a significativamente. Entretanto, os valores de perda de massa encontrados foram menores que o esperado teoricamente, por conta de o concreto proteger as armaduras dos processos corrosivos, daí a importância de se produzir concretos de alta resistência e baixa porosidade/permeabilidade.

Fica evidenciada a necessidade de realizar dosagem correta dos insumos para o concreto mesmo em obras de pequeno porte, e se possível a realização de ensaios básicos de caracterização dos agregados, visto que o excesso de umidade e de vazios no concreto facilita a absorção por capilaridade e acelera a entrada de umidade e consequentemente sais de cloreto.

Foi possível ainda observar a diferença considerável entre uma estrutura cuja armadura está imersa e outra não, apresentando valores superiores de perda de massa já que esta última permite a presença de oxigênio em seus poros não saturados, fornecendo condição propícia, conforme explicado por Helene (1993), para a corrosão.

Os ensaios químicos indicam a ocorrência de um processo intenso de corrosão, seja pela minimização da alcalinidade do concreto ou pelo aumento do teor de cloretos da água pós ensaio. Sobre a quantidade de cloretos no concreto, pode ser que o resultado obtido pós-ensaio seja consequência de as amostras pulverulentas não terem sido retiradas de uma região mais próximas das armaduras onde efetivamente ocorre o processo de corrosão de forma mais intensa, o esperado com base na literatura é que o teor de cloretos pós ensaio fosse superior ou ligeiramente maior. Estima-se que maiores teores de cloreto poderiam ser encontrados na região imediatamente próxima às armaduras.

Durante o teste de CAIM, utilizou-se corrente elétrica nos espécimes para promover a movimentação dos cloretos na solução em direção à barra de aço no núcleo do espécime. Isso resultou no depósito dos cloretos nos espaços porosos do concreto. Neste estudo, as variáveis selecionadas para avaliação exercem um impacto visível no processo de corrosão. Evidências disso podem ser observadas nas diferenças dos valores de perda de massa dos corpos de prova com a solução abaixo e acima das armaduras.

Este trabalho abre um leque muito amplo de possibilidades de continuação do estudo dos ensaios CAIM, permitindo-se explorar mais variáveis e melhor relacionar os procedimentos acelerados aqui estudados com as ocorrências naturais de corrosão em estruturas de concreto armado.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os ensaios de corrosão acelerada pelo método CAIM são muito amplos e ainda tem muito a ser explorado, neste trabalho optou-se por trabalhar com poucas variáveis e avaliar seus resultados, entretanto, existem muitas possibilidades de estudo que poderiam ser abordados.

Neste sentido, algumas sugestões para trabalhos futuros são apresentadas:

- i. Realizar o mesmo estudo com mais variáveis além do nível de água cujos corpos de prova estão imersos, combinando este com diferentes níveis de cobrimento e valores de corrente, bem como utilizar um traço de referência com a devida correção de umidade na dosagem.
- ii. Realizar um estudo da perda de massa e taxas de corrosão de estruturas expostas em ambientes agressivos (litoral) a fim de comparar os valores de corrosão reais com os valores encontrados nos ensaios de corrosão acelerada, tentando estabelecer uma equivalência entre o tempo gasto no ensaio acelerado e a corrosão natural.
- iii. Incluir algum tipo de aditivo impermeabilizante no traço de concreto e comparar com os valores de corrosão encontrados em um concreto de referência.

- iv. Realizar um estudo acerca de métodos de reparo e mitigação da ocorrência de corrosão eletroquímica em estruturas expostas à água marinha ou salobra em regiões de litoral.

REFERÊNCIAS

ABOSRRA, L.; ASHOUR, A. F.; YOUSEFFI, M. Corrosion of steel reinforcement in concrete of different compressive strengths. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 3915-3925, 2011. DOI.10.1016/201104023.

ANDRADE, B. S. O. **Concreto armado: um estudo sobre o processo histórico, características, durabilidade, proteção e recuperação de suas estruturas**. 2016. 72p. Monografia (Especialista em Construção Civil), Universidade Federal de Minas Gerais, Rio de Janeiro, 2016.

ANDRADE, J. J. O. **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos**. 2001. 256 p. Tese (Doutorado em Engenharia civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

ANDRADE, J. J. O.; POSSAN, E.; DAL MOLIM, D. C. C. Considerations about the service life prediction of reinforced concrete structures inserted in chloride environments. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**. v.2, n.6, 2017. DOI. 10.1007/S41024-017-0025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16917: Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054: Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776: Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman**. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972: Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade.** Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-2: Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria.** Parte 2: Métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2017.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico.** Rio de Janeiro, 2008.

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

ASSOULI, B.; BALLIVY, G.; RIVARD, P. **Influence of environmental parameters on application of standard ASTM C876-91: half cell potential measurements.** Corrosion Engineering, Science and Technology, v.43, n.1, p.93-96, 2013. DOI. 10.1179/174327807X214572.

BAROGHEL-BOUNY, V.; CAPRA, B.; LAURENS, S. **A durabilidade das armaduras e do concreto de cobrimento.** In: OLLIVIER, J.; VICHOT, A. (Ed.). Durabilidade do Concreto: Bases científicas para formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. Ed. Tradução: CASCUDO, O.; CARASEK, H. São Paulo: IBRACON, p. 255-326, 2014.

BASILIO, E. S. **Agregados para concreto ET 41.** ABCP, 1995.

BICELLI, A. R. A. *et al.* Efeitos da corrosão acelerada na aderência de vergalhões em concretos com fibras de aço. **Matéria.**, v.26, n.3, 2021. DOI. 10.1590/S1517-707620210003.13004.

BROOMFIELD, J. P. **Corrosion of steel in concrete.** London: E & FN SPON, 1998.

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.** 2000. 187p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

CABRERA, J. G. Deterioration of concrete due to reinforcement steel corrosion. **Cement and Concrete Composites**, v.18, n.1, p.47-59, 1996. DOI. 10.1016/0958946595000437.

CARASEK, H. Argamassas. In: ISAIA, Geraldo C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2 ed. v.2, São Paulo: IBRACON, 2010. 1745p.

CASCUDO, O. **Controle da corrosão de armaduras em Concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo: Pini, 1997.

CASCUDO, O. **Influência das características do aço carbono destinado ao uso como armaduras para concreto armado no comportamento frente à corrosão**. 2000. 310p. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

CASTELLOTE, M.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. Accelerated Simultaneous Determination of the Chloride Depassivation Threshold and of the Non-Stationary Diffusion Coefficient Values. **Corrosion Science**, v. 44, p. 2409-2424, 2002. DOI. 10.1016/S0010-938X02000604.

CLÍMACO, J. C. T. de S. **Estruturas de concreto armado: fundamentos de projeto, dimensionamento e verificação**. Brasília: Editora UNB, 3 ed., 2023.

COSTA, A., APPLETON, J. Case studies of concrete deterioration in a marine environment in Portugal. **Cement and Concrete Composites**, v.24, n.1, p.169-179, 2002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946501000373>. Acesso em: 13 out. 2023.

DIGITAL WATER. **Condutividade Elétrica: Guia Definitivo**. Disponível em: <https://www.digitalwater.com.br/condutividade-eletrica-guia-definitivo/>. Acesso em: 15 nov. 2023.

DUFFÓ, G. *et al.* Application of gamma-ray radiography and gravimetric measurements after accelerated corrosion tests of steel embedded in mortar. **Cement and Concrete Research**, v.74, p.1-9, 2015. DOI. 10.1016/201503017.

FELIX, E. F. *et al.* Análise da vida útil de estruturas de concreto armado sob corrosão uniforme por meio de um modelo com RNA acoplado ao MEF. **Revista ALCONPAT**, v.8, n.1, p.1-15, 2018. DOI. 10.21041/RA. V8I1.256.

GIONGO, J. S. **Concreto armado: projeto estrutural de edifícios**. Apostila, São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos – USP, Departamento de Engenharia de Estruturas, 2007, 184p.

GONZALES, J. A. *et al.* Some questions on the corrosion of steel in concrete – Part I: when how and how much steel corrodes. **Materials and Structures**, v.29, jan-fev. p.40-46, 1996. DOI. 10.1007/BF02486005.

GRAEFF, A. G. **Avaliação experimental e modelagem dos efeitos estruturais da propagação da corrosão em elementos de concreto armado**. 2007. 184p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

GUO, Z. **Principles of Reinforced Concrete**. Oxford: Elsevier Inc. 1 ed. 2014. ISBN-13: 978-0-12-800859-1. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800859-1.12001-8>>. Acesso em: 13 set. 2023.

HELENE, P. R. L. Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. 1993. 231p. Tese. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HAACKE, P. S. et al. Análise de alcalinidade, dureza e condutividade em amostras do rio Itajaí-mirim. v. 1 n. 1, 2019. Anais da Semana de Formação Acadêmica e Científica e Cultural e Humanística e... FACCHU – IFC, Campus Brusque, 2019.

HVITVED-JACOBSEN, T.; VOLLERTSEN, J.; NIELSEN, A. **Sewer processes: microbial and chemical process engineering of sewer networks**. EUA: CRC Press. 2 ed., 2013.

IBITIRAMA Cimentos. Disponível em: <https://www.ibitiramacimentos.com.br>. Acesso em: 10 set. 2023.

KAEFER, L. F. **A evolução do concreto armado**. 43p. Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 1998. Disponível em: <https://wwwp.feb.unesp.br/lutt/Concreto%20Protendido/HistoriadoConcreto.pdf>. Acesso em: 6 ago. 2023.

KIHARA, Y.; CENTURIONE, S, L. O Cimento Portland. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: Editora IBRACON, 2005. v.1. Cap. 10, p. 295-321.

LIU, W. *et al.* Discussion and experiments on the limits of chloride, sulphate and shell content in marine fine aggregates for concrete. **Construction and Building Materials**, v. 159, n. 20, p. 725-733, jan. 2018. DOI. 10.1016.2017.10.078.

MANUAL DA QUÍMICA. Conceito de pH. Disponível em: <https://www.manualdaquimica.com/fisico-quimica/conceito-ph.htm>. Acesso em: 14 nov. 2023.

MEDEIROS, M. H. F. *et al.* Potencial de Corrosão: influência da umidade, relação água/cimento, teor de cloretos e cobrimento. **Revista IBRACON de Estrutura e Materiais**, v. 10, n. 4, p. 864-885, jul. 2017. DOI. 10.1590/S198341952017000400005.

MEIER, D. Análise da qualidade do agregado miúdo fornecido em Curitiba e Região Metropolitana. 2011. 73p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2011.

MEIRA, G. R.; FERREIRA, P. R. R. Revisão sobre ensaios acelerados para indução da corrosão desencadeada por cloretos em concreto armado. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.19, n.4, p. 223-248, out-dez. 2019. DOI. 10.1590/S1678-86212019000400353.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Editora IBRACON, 2008.

MONTEIRO, E. C. B. **Avaliação do Método de Extração Eletroquímica de Cloretos Para Reabilitação de Estruturas de Concreto Com Problemas de Corrosão de Armaduras**. 2002. 229p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MONTEIRO, P. J. M.; GJORV, O. E.; MEHTA, P. K. Microstructure of the Steel-Cement Paste Interface in the Presence of Chloride. **Cement and Concrete Research**, v. 15, p. 781-784, mar. 1985. DOI. 10.1016/0008-884685901437.

ORTEGA, N. F.; ROBLES, S. I. Assessment of Residual Life of concrete structures affected by reinforcement corrosion. **HBRC Journal**, v.12, n.2, p.114-122, 2016. DOI. 10.1016/201411003.

PCZIECZEK, A. **Análise das propriedades físicas e mecânicas de argamassa para revestimento utilizando cinza volante e resíduos de borracha de pneus inservíveis**. 2017. 141p. Dissertação (Mestrado). Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2017.

PEIXOTO, R. A. F. **Desenvolvimento de placas de concreto leve de argila expandida aplicada a coberturas de instalações para produção animal**. 2004. 157p. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.
TORRES, A. S.; GUIMARÃES, D.; FILHO, L. C. P. Avaliação do método CAIM de corrosão acelerada em diferentes condições de ensaio. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 14p. [2006].

PEREIRA, E. *et al.* **Avaliação do grau de corrosão das armaduras para diferentes espessuras de cobrimento**. In: 52 Congresso Brasileiro do Concreto CBC2010, 2010. Anais... IBRACON, 2010.

RAUPACH, M. Chloride-Induced macrocell corrosion on steel in concrete: theoretical background and practical consequences. **Construction and Building Materials**, v. 10, n. 5, p. 329-338, jul. 1996. DOI. 10.1016/0950061895000186.

REINARTZ, L. F. Review of Iron and Steel in the Industrial Revolution. **Technology and Culture**, v. 6, n. 1, 1965, p. 118-121.

RIBEIRO, D. **Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2018. E-book. ISBN 9788595152359. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#!/books/9788595152359/>. Acesso em: 12 jun. 2023.

RODRIGUES, P. P. F. **Parâmetros de dosagem do concreto (ET-67)**. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland. 3 ed. 1998.

RODRÍGUEZ, P.; RAMÍREZ, E.; GONZÁLEZ, J. A. Methods for studying corrosion in reinforced concrete. **Magazine of Concrete Research**, v.46, n.167, p.81-90, 1994. DOI. 10.1680/1994.4616781.

SANTANA, B. V. de.; ALEIXO, I. VENÂNCIO. **Avaliação da absorção por capilaridade de argamassas para revestimento com diferentes aditivos impermeabilizantes.** Brasília: UniCEUB. 217. 62p. Relatório Final de Iniciação Científica,

SANTOS, F. C. M. **Estudo da Polianilina e da Polianilina-Melamina como revestimento anticorrosivo para armaduras do concreto armado.** 2010. 91p. Dissertação (Mestrado em Engenharia dos Materiais), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

SARTORI, M. R.; SANTOS, W. de S.; ESTEVES, J. S. **Análise da variação do ar aprisionado no concreto usinado com aplicação de diferentes proporções de agregado miúdo. estudo de caso: areia natural e areia artificial.** Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 06, ed. 05, v.15, p.73-104, mai.2021. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/variacao-do-ar>. Acesso em: 11 nov. 2023.

SILVA, C.M.M.A.; CAPUZZO, V.M.S. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregados de resíduo de concreto utilizando a abordagem de mistura dois estágios.** Revista Matéria, v.25,n.1, ISSN 1517-7076, 2020.(PDF) *Estudo da Produção do Agregado Sintético Fabricado com Resíduo do Processo Bayer para indústria da construção civil - Parte I.* Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/360636712_Estudo_da_Producao_do_Agregado_Sintetico_Fabricado_com_Residuo_do_Processo_Bayer_para_industria_da_construcao_civil_-_Parte_I . Acesso em: 02 nov. 2023.

SILVA, F. G. **Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos.** 2006. 236p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

SONG, H.; SARASWARY, V. Corrosion monitoring of reinforced concrete structures - A review. **International Journal of Electrochemical Science**, v.2, p.1-28, 2007. DOI. 10.1016/S1452398123170490.

SPAINHOUR, L. K.; WOOTTON, I. A. Corrosion process and abatement in reinforced concrete wrapped by fiber reinforced polymer. **Cement and Concrete Composites**, v.30, p.535-543, jul. 2008. DOI. 10.1016/200802004.

TOKUDOME, N. Carbonatação do concreto. 22 jun. 2009. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/carbonatacao-do-concreto/>. Acesso em: 14 nov. 2023.

TORRES, A. da S. **Avaliação da sensibilidade do ensaio CAIM – Corrosão Acelerada Por Imersão Modificada – frente ao processo de corrosão em armaduras de concreto armado.** 2006. 159p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

TRAZZI, L. C.; GIANDON, A. C. Execução de pilares de concreto armado moldados in-loco e suas possíveis manifestações patológicas. **Revista UNINGÁ Review**. v.28, n.3, p.16-23, out-dez. 2016. Disponível em: <https://revista.uninga.br/uningareviews/article/view/1898>. Acesso em: 25 out. 2023.

TREJO, D.; PILLAI, R. G. Accelerated Chloride Threshold Testing: part I - ASTM A615 and A706 reinforcement. **ACI Materials Journal**, v.100, n.6, p.519-527, 2003. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/281535318_Accelerated_Chloride_Threshold_Testing_Part_I_-_ASTM_A_615_and_A_706_Reinforcement. Acesso em: 15 nov. 2023.

VALDÉS, A. C.; MEDEIROS, M. H. F.; MACIOSKI, G. Sensor de corrosão para monitoramento de estruturas de concreto armado: Testes em corpos de prova de concreto armado. **Revista ALCONPAT.**, v.11, n.3, p.64-87, 2021. DOI. 10.21041/RA. V1I3.529.

VIDELA, H. A. **Biotecnologia: Corrosão Microbiológica**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, v.4, 1981.

VOTORAN Cimentos. Disponível em: <http://www.votoran.com.br>. Acesso em: 14 set. 2023.

VOTORANTIM Cimentos. Disponível em: <https://www.votorantimcimentos.com.br>. Acesso em: 14 set. 2023.

YOON, S. *et al.* Interaction between loading, corrosion and serviceability of reinforced concrete. **ACI Materials Journal**, v. 97, n. 7, p.72-85, 2000. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/279605392_Interaction_between_loading_corrosion_and_serviceability_of_reinforced_concrete. Acesso em: 10 ago. 2023.