

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

BEATRIZ SCHIMELFENIG DOS SANTOS

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO MÉTODO DE EXTRAÇÃO ELETROQUÍMICA DE
ÍONS CLORETO PARA REABILITAÇÃO DE CONCRETO ARMADO COM
CORROSÃO EM REGIÃO LITORÂNEA**

CURITIBA

2023

BEATRIZ SCHIMELFENIG DOS SANTOS

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO MÉTODO DE EXTRAÇÃO ELETROQUÍMICA DE ÍONS CLORETO PARA REABILITAÇÃO DE CONCRETO ARMADO COM CORROSÃO EM REGIÃO LITORÂNEA

Analysis of the efficiency electrochemical extraction method of ions chloride for rehabilitation of reinforced concrete with corrosion in region coastal

Trabalho de conclusão de curso de Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Wellington Mazer
Coorientadora: Cristina Vitorino da Silva

CURITIBA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir do trabalho licenciado para fins não comerciais, desde que atribuam ao autor o devido crédito. Os usuários não têm que licenciar os trabalhos derivados sob os mesmos termos estabelecidos pelo autor do trabalho original.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba



BEATRIZ SCHIMELFENIG

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO MÉTODO DE EXTRAÇÃO ELETROQUÍMICA DE ÍONS CLORETO PARA REABILITAÇÃO DE CONCRETO ARMADO COM CORROSÃO EM REGIÃO LITORÂNEA

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestra Em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Construção Civil.

Data de aprovação: 19 de Dezembro de 2022

Dr. Wellington Mazer, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Cristina Vitorino Da Silva, Doutorado - Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões (Uri)

Dra. Diniane Baruffi, Doutorado - Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões (Uri)

Dra. Janine Nicolosi Correa, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 19/12/2022.

AGRADECIMENTOS

Uma página nunca será suficiente para expressar a imensa gratidão que tenho por todas as pessoas que até agora passaram por minha vida e que, de alguma maneira, ensinaram-me algo que me ajudou a chegar até este momento.

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me sustentado até aqui, agradeço aos meus pais, Elton e Marzeli, que se dedicam a vida inteira aos meus cuidados e a minha felicidade e que estão presentes a cada conquista. Sou grata por tudo o que aprendo a cada momento passado ao lado de vocês.

Agradeço ao meu esposo e companheiro Jonatas pela força e por sempre acreditar em mim, por sempre me incentivar e não me deixar desanimar, mesmo quando eu já estava cansada de tentar.

Agradeço imensamente ao meu orientador, Prof. Dr. Wellington Mazer e minha coorientadora, Prof^a. Dr^a. Cristina Vitorino da Silva que se fizeram pacientes e sempre mostraram dedicação e suporte para que este trabalho se tornasse realidade.

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, por todo suporte e a todos os seus profissionais que, de alguma maneira, auxiliaram-me nesta trajetória.

Agradeço à empresa Inoue e Lima por incentivar a ciência, colaborando com a doação de equipamento para a realização da pesquisa, bem como, cedendo uma de suas obras para realizar a metodologia.

Aos mestres que tive desde a infância até aqueles com quem tive o prazer de trabalhar lado a lado, minha profunda admiração por esta profissão tão importante, mas, por vezes, pouco reconhecida.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa direciona-se a minha gratidão.

RESUMO

Pelo fato de o Brasil possuir uma extensa costa litorânea, é de extrema importância o estudo sobre as interações entre o concreto e o ambiente marinho, com o intuito de prevenir manifestações patológicas que possam surgir com o tempo e recuperar estruturas danificadas pela ação da maresia. Neste trabalho, procura-se avaliar a eficiência do método de extração eletroquímica de íons cloreto para reabilitação de concreto armado com corrosão devido ao ataque de cloretos em regiões litorâneas. Realizando análises em campo, como carbonatação, por meio da aspensão de fenolftaleína, e de cloretos, por aspensão de Nitrato de prata, além de análises químicas realizadas em laboratório através de amostras retiradas em campo, sendo essas, Fluorescência de Raios X (FRX), Difração de Raios X (DRX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Porosimetria por Intrusão de Mercúrio. Através das análises realizadas verificou-se que a aplicação do método de extração eletroquímica no concreto em estudo mostrou-se eficaz na reabilitação e restauração do concreto estudado. Contudo, através da análise de porosimetria verificou-se um aumento de 19,27% na porosidade total do concreto, comportamento observado nas demais análises realizadas e em conformidade com a revisão da literatura, que afirma o aumento da porosidade do concreto devido à alta densidade de corrente utilizada durante a aplicação do método de extração eletroquímica de íons cloreto.

Palavras-chave: Extração eletroquímica; íons cloreto; concreto armado; corrosão.

ABSTRACT

By the fact that Brazil has an extensive coastline, it is extremely important to study the interactions between the concrete and the marine environment, in order to prevent pathological manifestations that may arise over time and recover structures damaged by the marine action. In this work, we seek to evaluate the efficiency of the method of electrochemical extraction of chloride ions for the rehabilitation of reinforced concrete with corrosion due to the attack of chlorides in coastal regions. Conducted, in the field, selected as a phenolphthale study and designed in a phenolphthale study by means of Nitrate assay, by means of field spray and designed in the laboratory by X-selection sampling (FRX), Selection diffraction by means of testing performed in the laboratory through X-ray samples (FRX), X-ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscopy (SEM) and Mercury Intrusion Porosimetry. Analysis of the complete concrete analyzes to date, Carbonation, Scanning Electronic Closscopy observe (SEM) it is possible to observe a behavior of the reinforced concrete structure, after the execution, however, it is necessary to comply with too much to fulfill the efficiency of the method, since that are in progress and carried out in the research. Through the proposals made in a concrete way, the application of electrochemistry in concrete in reconstruction and reconstruction of the method tested. Through the analysis of the literature, which affirms the porosity of the analysis of the total porosity of the elaborated set and in accordance with the literature review, which affirms the porosity of the high current resistance used in the electrochemical operation of application methods.

Keywords: electrochemical extraction; chloride ions; reinforced concrete; corrosion.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama de Pourbaix para o ferro.	19
Figura 2 - Princípio da extração eletroquímica de cloretos.	27
Figura 3 - Perfil de cloretos antes e depois do Método de Extração Eletroquímica de cloretos.....	31
Figura 4 - Perfil de íons cloreto totais em relação à superfície do concreto.	31
Figura 5 - Tela metálica e feltro.....	40
Figura 6 - Eletrólito Alcanilino (NaOH).	41
Figura 7 - Fonte de corrente contínua.	42
Figura 8 - Arranjo empregado na realcalinização eletroquímica.	43
Figura 9 - Etapas Método de extração eletroquímica de cloretos.	44
Figura 10 - Fluxograma da metodologia da pesquisa.	45
Figura 11 – Matriz experimental.	46
Figura 12 - Preparação das amostras para observação no microscópio eletrônico de varredura.....	48
Figura 13 - Processo de carbonatação.	52
Figura 14 - Processo de Ataque por Íons cloreto.	53
Figura 15 - Micrografia da superfície do concreto com ampliação de 500x: (a) amostra inicial (b) amostra final do tratamento de extração eletroquímica de íons cloreto.	54
Figura 16 - Micrografia da superfície do concreto com ampliação de 1k vezes: (a) amostra inicial (b) amostra final do tratamento de extração eletroquímica de íons cloreto.	55
Figura 17 - Micrografia da superfície do concreto com ampliação de 3k vezes: (a) amostra inicial (b) amostra final do tratamento de extração eletroquímica de íons cloreto.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores críticos de íons cloreto em concreto armado.....	20
Tabela 2 - Classes de agressividade ambiental.....	21
Tabela 3 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto	22
Tabela 4 - Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para $\Delta c=10\text{mm}$	22

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Elementos químicos através da Microscopia Eletronica de Varredura (MEV)	56
--	----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO TEMA	13
1.2 OBJETIVOS.....	14
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	15
1.4 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 CORROSÃO DAS ARMADURAS	17
2.1.1 Corrosão das Armaduras por Íons Cloreto	17
2.1.2 Fatores relevantes à penetração dos íons cloreto	23
2.2 EXTRAÇÃO ELETROQUÍMICA DE CLORETOS	26
2.2.1 Princípio do método	27
2.2.2 Avaliação do método	30
2.2.3 Efeitos colaterais do método de extração eletroquímica	35
3. MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1 MATERIAIS.....	39
3.1.1 Ânodo – Tela metálica e Feltro.....	39
3.1.2 Eletrólito – Hidróxido de sódio.....	40
3.1.3 Fonte e componentes elétricos.....	41
3.2 MÉTODOS E PROCESSOS	42
3.3 MÉTODOS DE ENSAIOS	46
3.3.1. Carbonatação.....	46
3.3.2 Íons Cloreto.....	47
3.3.3. Microscópio eletrônico de varredura (MEV)	47
3.3.4. Fluorescência de raios X (FRX)	48
3.3.5. Porosimetria por intrusão de mercúrio.....	49
3.3.6. Difração de Raios X (DRX).....	50
4. RESULTADOS E ANÁLISES	52
4.1. CARBONATAÇÃO	52
4.2. ÍONS CLORETO	53
4.3. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	54
4.4. FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X.....	57
4.5. POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO	59
4.6. DIFRAÇÃO DE RAIOS X.....	63
5. CONCLUSÕES FINAIS	65
5.1 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	66
REFERÊNCIAS.....	68

1. INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa e importância do tema

A corrosão das armaduras é uma das principais causas de deterioração de estruturas de concreto armado, que ocorre, principalmente, pela ação dos cloretos ou carbonatação do concreto. As manifestações patológicas apresentadas pelas estruturas, decorrentes de falhas ao longo do seu processo construtivo e durante a sua utilização, gera preocupação com a segurança estrutural e com os custos de manutenção, reforços e recuperações estruturais.

A ação de íons cloreto (Cl-) nas estruturas de concreto, além de severa, quando atinge níveis críticos, pode provocar a despassivação das armaduras e o início do processo de corrosão, com surgimento de trincas e deslocamentos do concreto, o que afeta, significativamente, a durabilidade, ocasionando consequências negativas para estabilidade, funcionalidade e estética das estruturas, reduzindo a sua vida útil.

Nos últimos anos, várias metodologias têm sido empregadas para proteger e reparar as estruturas de concreto armado pela corrosão. Segundo Figueiredo (1997), os métodos eletroquímicos têm sido uma ferramenta importante para o estudo da durabilidade do concreto, para a produção de estruturas mais duráveis e para o desenvolvimento de ensaios de desempenho e de métodos de proteção e reabilitação de estruturas atacadas pela corrosão, visando o aumento de sua vida útil.

A escolha dos materiais e do método de correção a ser empregado depende, além do diagnóstico do problema, das características da região a ser corrigida e das exigências de funcionamento do elemento que vai ser objeto de reparação (HELENE, 1992). Uma série de variáveis nas quais intervêm fatores como a possibilidade de acesso à zona a ser reparada, fatores econômicos e àqueles essencialmente técnicos, são fatores que irão influir na eficiência da reparação (ANDRADE, 1992).

A recuperação das estruturas pode ser realizada de duas maneiras, através de métodos tradicionais, ou seja, métodos destrutivos, que consistem na remoção do concreto contaminado, substituindo-o por novos materiais, assim como os métodos eletroquímicos, que englobam a proteção catódica, a realcalinização e a extração de íons cloreto, que na maioria das vezes não necessitam de demolições e reconstituição de parte do elemento estrutural.

A aplicação dos métodos de realcalinização e a extração de íons cloreto baseia-se em eliminar a causa que está produzindo a corrosão das armaduras, em outras palavras, reduzir os íons cloreto e proporcionar o aumento do pH da solução intersticial dos poros do concreto em torno do aço.

Uma vez que os íons cloreto encontram-se dispersos na massa do concreto, o método de extração eletroquímica dos íons cloreto é mais recomendado que o método de reparo localizado. Ensaio exploratórios conseguiram demonstrar que após o tratamento com esse método é possível a redução do teor de íons cloreto a níveis abaixo de 0,4% sobre a massa de cimento, que é o limite considerado como de baixo risco (EGGERS; OLIVEIRA, 1997).

O método de extração eletroquímica de íons cloreto, objetivo principal da pesquisa, consiste na aplicação de um campo elétrico entre as armaduras presentes no interior do concreto e um eletrodo externo constituído por uma malha metálica imersos em água e solução (Hidróxido de sódio). Desta forma, os íons cloreto tendem a migrar pela ação do campo elétrico formado, da armadura (cátodo) até a malha externa (ânodo). Pode ocorrer também a migração de certos cátions para a região próxima à armadura e a produção de íons hidroxila na sua superfície, como consequência das reações catódicas.

1.2 Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa é avaliar a eficiência do método de extração eletroquímica de íons cloreto para reabilitação de concreto armado com problemas de corrosão por ataque de íons cloreto em região litorânea.

Objetivos secundários:

- Analisar a influência do método de extração eletroquímica na microestrutura do concreto;
- Avaliar a restauração do concreto pela aplicação do método de extração eletroquímica.

1.3 Estrutura da dissertação

Nesta introdução, encontra-se a importância do tema, os pesquisadores e os centros de pesquisa no Brasil e no exterior, assim como objetivo e originalidade do trabalho e, por fim, o conteúdo central da pesquisa.

O Capítulo 2 compreende a abordagem de temas julgados importantes para um completo entendimento deste trabalho. Nele apresentam-se desde os aspectos conceituais da corrosão até as técnicas eletroquímicas para avaliação da corrosão.

O Capítulo 3 apresenta os materiais e métodos utilizados para realização do trabalho. Apresentando os procedimentos experimentais, ensaios realizados e métodos utilizados.

A discussão dos resultados encontrados por meio dos ensaios realizados encontra-se no Capítulo 4.

Por fim, no Capítulo 5, estão as conclusões obtidas a partir dos estudos bibliográficos apresentados e ensaios realizados.

1.4 Delimitações do trabalho

A parte experimental apresentada neste trabalho foi realizada em edifício localizado na região litorânea do estado do Paraná, que devido à corrosão e à falta de manutenção, passava por processo de recuperação e restauração da sua estrutura, no ano de 2021.

A empresa responsável pela recuperação do edifício delimitou uma pequena área para a aplicação do método, por um curto período, devido a critérios de segurança aos colaboradores e de modo que não afetasse o desempenho e cronograma da obra.

Além disso, a fonte de alimentação utilizada na pesquisa apresenta tensão de saída entre zero e 32V por meio de dois potenciômetros, além de corrente de saída variando de zero a 5A. Segundo Banfil (1994), a corrente elétrica a ser utilizada para aplicação do método deve ser de aproximadamente 1 A/m². Já Mietz (1998) recomenda que o método seja aplicado de 3 a 14 dias com uma densidade de corrente variando entre 0,8 a 2 A/m².

Baseado nisso, devido a capacidade do equipamento e de restrições impostas pela empresa responsável, a aplicação do método foi realizada em uma pequena área, localizada na caixa d'água do edifício, por um período de 7 dias.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Corrosão das armaduras

A corrosão das armaduras é um dos processos mais significativos de degradação da durabilidade e da vida útil das estruturas de concreto armado. Quando a concentração de íons cloreto atinge níveis críticos, há despassivação das armaduras e o início do processo corrosivo, que reduz a vida útil das estruturas, afetando sua durabilidade, funcionalidade e estética, necessitando de métodos para recuperação da estrutura.

Segundo Gentil (2007), corrosão é definida como a deterioração de um material por ação química ou eletroquímica do meio ambiente juntamente ou não com esforços mecânicos (tração, compressão, flexão e torção). Podendo ocorrer em decorrência de: diminuição de alcalinidade do concreto ocasionado pela carbonatação do concreto; e presença de cloretos livres no concreto (CAVALCANTI; CAVALCANTI, 2010).

O reparo das estruturas pode ser realizado através de métodos tradicionais ou eletroquímicos. Os métodos tradicionais se caracterizam por meio de técnicas destrutivas, que consistem na eliminação do concreto contaminado e a substituição por novos materiais especialmente formulados para o reparo. Já os métodos eletroquímicos consistem na aplicação de um campo elétrico entre as armaduras presentes no interior do concreto e um eletrodo externo, submerso em um reservatório de eletrólito. Dessa forma, os íons cloreto tendem a migrar pela ação do campo elétrico formado, da armadura (cátodo), até o eletrodo (ânodo).

2.1.1 Corrosão das Armaduras por Íons Cloreto

A corrosão de armaduras devido à ação de íons cloreto é um dos mais sérios problemas das estruturas de concreto armado. Sabe-se que os íons cloreto podem ser introduzidos no concreto de diversas formas: pela utilização de aditivos, pela contaminação da água ou da areia, pela penetração de cloretos que possam estar presentes no ambiente onde a estrutura estiver situada, entre outras.

As estruturas de concreto armado localizadas em ambientes marinhos estão mais suscetíveis à corrosão das armaduras devido à presença de íons cloreto, provenientes principalmente da água do mar. Seu contato com a estrutura de concreto

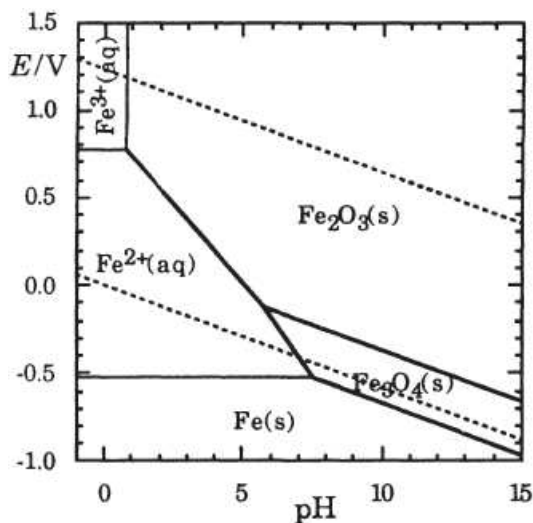
pode ser diretamente pela água do mar ou por meio da maresia. A partir do contato, os cloretos tendem a se depositar sob a superfície de concreto e assim penetrar através dos poros capilares do concreto, principalmente pelos mecanismos de transportes conhecidos como difusão e absorção capilar. No entanto, deve-se atentar que as maiores profundidades de penetração são observadas onde os mecanismos podem atuar simultaneamente (NIELSEN; GEIKER, 2003; LIU; SHI, 2012).

Os íons cloreto podem estar presentes no concreto de duas formas distintas; combinados, quando se encontram quimicamente combinados ao C-S-H, adsorvidos fisicamente às paredes dos poros, ou como cloroaluminatos (Sal de Friedel), livres na solução dos poros do concreto.

A corrosão das armaduras por íons cloreto é caracterizada por um ataque localizado ou corrosão por pites nas armaduras de aço, ocasionando a perda de material ou deterioração da superfície metálica devido a reações eletroquímicas. Esse processo eletroquímico ocorre quando dois metais conectados entram em contato com a água, resultando em uma perda de elétrons por parte do metal com maior potencial de corrosão (DYER, 2014; CHANG; GOLDSBY, 2013).

Em 1938, Marcel Pourbaix desenvolveu um compilado de diagramas que aponta a estabilidade termodinâmica nas diferentes fases do sistema eletroquímico, assim como as suas fronteiras em função do potencial elétrico e do pH (OHRING, 1998; PEREZ, 2004). Analisando a figura 1 é possível observar que o ferro (Fe) está sujeito a oxidação em qualquer pH, quando entra em contato com a água e o gás oxigênio, sendo a sua corrosão inevitável se medidas preventivas não forem tomadas (RIEGER, 1994).

Figura 1 – Diagrama de Pourbaix para o ferro.



Fonte: RIEGER (1994).

Segundo Cascudo (1997), a corrosão ocorre devido a presença de reações nas zonas anódicas (corroídas) e catódicas (não corroídas) quando há presença de água e oxigênio. A primeira reação causada na zona anódica, denominada oxidação, é apresentada na Equação 1. Seguida pela reação catódica, chamada de redução, que utiliza os elétrons liberados, apresentada na Equação 2. Por fim, os íons Fe²⁺ tendem a migrar em direção ao ânodo, produzindo hidróxido ferroso, apresentado na Equação 3 (GONZÁLEZ et al., 2000).



Por meio da diferença de concentração de oxigênio no ambiente, ocorre a corrosão por pites, a qual parte do metal exposto a uma baixa concentração de oxigênio se torna mais suscetível ao processo eletroquímico, ou seja, mais anódica. O mesmo ocorre para o aço em contato com diferentes concentrações de eletrólito em água, onde a parte exposta a uma baixa concentração sofre oxidação (DYER, 2014).

Segundo Aitcin (2000), a corrosão por ação dos íons cloreto tende a gerar microfissuras na camada de cobertura, isso se dá devido às forças expansivas da

formação da ferrugem, que expõem ainda mais a estrutura à entrada deste agente corrosivo, a tal ponto de ocorrerem trincas e descolamentos do concreto que recobre as armaduras.

Sabendo que os íons cloreto que estão combinados podem apresentar riscos de corrosão quando submetidos a certas situações, o teor limite de cloretos aceito por diversas normas e pesquisas tem sido determinado em porcentagem de cloretos totais em relação à massa de cimento ou de concreto, ou ainda em concentração na solução dos poros. Apesar de haver muitos estudos sobre a porcentagem de cloreto necessária para que ocorra a corrosão, ainda não há consenso sobre esses valores (CRAUSS, 2010).

Mehta (2008) afirma que concentrações entre 0,6 e 0,9kg/m³ de cloretos no concreto, ou de 200 a 1200g/l de cloretos na solução dos poros, são o suficiente para o início do processo corrosivo. Já outros autores (ANDRADE, 1992; CASCUDO, 1997) consideram um valor médio aceito como teor limite para a despassivação das armaduras de 0,4% em relação à massa de cimento. Na tabela 1, estão indicados os limites máximos de íons cloreto permitidos pelas normas técnicas de alguns países.

Tabela 1 - Valores críticos de íons cloreto em concreto armado

PAÍS	NORMA	LIMITE DE CL-	REFERÊNCIA
EUA	ACI 318, 2001	0,30%	Cimento
EUROPA	EUROCODE 2, 1991	0,40%	Cimento
JAPÃO	JSCE-SP 2, 1986	0,6 kg/m ³	Concreto
BRASIL	NBR 12655	0,40%	Cimento

Fonte: adaptado de DURAR, 1997.

A fim de minimizar as causas de deterioração das estruturas de concreto, em função da agressividade do ambiente em que se encontram, as normas brasileiras da ABNT – NBR 12655/2015 e NBR 6118/2014 estabelecem algumas diretrizes que classificam os ambientes, para efeito de projeto, em quatro tipos distintos, conforme mostra a tabela 2.

Tabela 2 - Classes de agressividade ambiental

CLASSE DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL	AGRESSIVIDADE	CLASSIFICAÇÃO GERAL DO TIPO DE AMBIENTE PARA EFEITO DE PROJETO	RISCO DE DETERIORAÇÃO DA ESTRUTURA
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{1), 2)}	Pequeno
III	Forte	Marinha ¹⁾	Grande
		Industrial ^{1), 2)}	
IV	Muito forte	Industrial ^{1), 3)}	Elevado
		Respingos de maré	

1) Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

2) Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes, predominantemente, secos, ou em regiões onde chove raramente.

3) Ambientes, quimicamente, agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e de papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6118/2014.

Os parâmetros utilizados para a definição das diretrizes estão relacionados à qualidade do concreto, conforme as condições do ambiente, aos valores mínimos de consumo de cimento e relação água/cimento. Parâmetros esses que influenciam diretamente nas propriedades do concreto quanto a sua permeabilidade e porosidade.

Sabendo dessa forte relação entre a resistência à compressão, a relação água/cimento e a durabilidade do concreto, assim como a partir da classificação de agressividade ambiental, as normas ainda especificam parâmetros para relação água/cimento e resistência à compressão do concreto, conforme tabela 3, e parâmetros para cobrimento nominal das armaduras, conforme tabela 4, a partir da classe de agressividade ambiental.

Tabela 3 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto

Concreto	Tipo	Classe de agressividade ambiental (tabela 2)			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

NOTAS

1 O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.

2 CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.

3 CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: Adaptado ABNT NBR 6118/2014.

Tabela 4 - Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para $\Delta c=10\text{mm}$

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (tabela 2)			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto armado	Laje	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
Concreto protendido	Todos	30	35	45	55

1) Cobrimento nominal da armadura passiva que envolve a bainha ou os fios, cabos e cordoalhas, sempre superior ao especificado para o elemento de concreto armado, devido aos riscos de corrosão fragilizante sob tensão.

2) Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos, como carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, tais como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros tantos, as exigências desta tabela podem ser substituídas pelas equações ^{4), 5), 6)} respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

3) Nas faces inferiores de lajes e vigas de reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Fonte: Adaptado ABNT NBR 6118/2014.

Conforme a NBR 6118/2014, os cobrimentos nominais e mínimos estão sempre referidos à superfície da armadura externa, em geral à face externa do estribo. O cobrimento nominal de uma determinada barra deve sempre ser conforme apresentado nas equações 4, 5 e 6.

$$C_{nom} \geq \emptyset_{barra} \quad (4)$$

$$C_{nom} \geq \emptyset_{feixe} = \emptyset n = \emptyset \sqrt{n} \quad (5)$$

$$C_{nom} \geq 0,5\emptyset_{bainha} \quad (6)$$

2.1.2 Fatores relevantes à penetração dos íons cloreto

Uma vez que a água, o oxigênio e os agentes agressivos penetram no concreto, é possível identificar a corrosão das armaduras e fissurações do concreto, a porosidade do concreto passa ser a grande chave para controlar os vários processos envolvidos no fenômeno. A qualidade do concreto está diretamente relacionada aos tipos de materiais utilizados no processo de fabricação, como o tipo de cimento, aditivos; além dos parâmetros utilizados na dosagem desse concreto, como a relação água/cimento, parâmetros de projeto, espessura de cobrimento, tipo de adensamento e cura do concreto, dentre outros aspectos que podem influenciar na qualidade do concreto.

a) Temperatura

Segundo Andrade et al. (1998) o estudo sobre a influência da temperatura em diversos parâmetros do concreto, tais como a condutividade, a resistividade, o conteúdo de oxigênio dissolvido nos poros, o pH da solução dos poros, a relação Cl^-/OH^- , o potencial de corrosão (E_{corr}) e a intensidade de corrosão (I_{corr}), determinaram que o aumento da temperatura influencia sobre tais parâmetros facilitando a iniciação e a propagação do processo de corrosão. Segundo o CEB (1992), um aumento de temperatura de 10°C dobra a taxa de reação de corrosão.

No entanto, para o autor López et al. (1993), de forma geral, a expectativa de vida das estruturas em ambientes secos aumenta com o aumento da temperatura, dificultando a corrosão devido à perda de eletrólito. Dessa forma, o efeito da

temperatura não pode ser considerado isoladamente, devendo analisar com a umidade relativa do meio ambiente e o grau de saturação dos poros do concreto.

b) Ambiente de exposição

Sabe-se que as ações do meio ambiente influenciam no comportamento das estruturas. A norma NBR 6118 (ABNT, 2014) aborda a preocupação com a proteção geral das estruturas quanto a classes de agressividade ambiental, mostrada na tabela 2. Essa tabela classifica os ambientes em classes de agressividade, como base para critérios mínimos de parâmetros para projetos, como cobrimento, resistência, relação a/c.

A umidade relativa do ambiente tem implicações importantes no comportamento das barras de aço no concreto armado, que inicia durante o período de cura do concreto, influenciando no grau de hidratação do cimento e, conseqüentemente, na porosidade do concreto. Após, a umidade relativa elétrica influenciará no grau de saturação dos poros do concreto, característica que controla a sua resistividade elétrica, sendo um fator limitante na transferência de cargas elétricas entre áreas catódicas e anódicas do aço, quando existe um processo de corrosão ativo (ENEVOLDSEN et al. 1994).

Segundo estudos realizados por Castro, Rincon e Pazini (2001), com corpos de prova cilíndricos expostos ao meio ambiente marinho em localizações geográficas com climas distintos, o mecanismo de penetração de íons cloreto não variou com o microclima. No entanto, a concentração de íons cloreto no cobrimento do concreto, onde estariam as armaduras, decresceu em relação à distância do mar e o aumento da relação a/c.

c) Tipo de cimento e adições minerais

A qualidade do concreto está diretamente relacionada com os materiais utilizados em sua fabricação, como o tipo de cimento e adições mineiras. Segundo Bakker (1998) apud Ribeiro (2009), o efeito químico para fixar o CO₂ é proporcionado pela quantidade de componentes alcalinos presentes no cimento. Assim, o cimento Portland comum, que tem aproximadamente 20 a 25% de Ca(OH)₂ na pasta de cimento hidratada, apresenta maior reserva alcalina que o cimento Portland composto

ou com adições pozolânicas, sabendo que a reação pozolânica consome o hidróxido de cálcio. Para Neville (1997), devido aos cimentos Portland compostos produzirem um teor menor de Ca(OH)_2 na pasta de cimento hidratada, é necessária uma quantidade menor de CO_2 para consumir todo o Ca(OH)_2 na produção de CaCO_3 . Desta forma, quanto menor a reserva alcalina de um cimento, maior será a velocidade de carbonatação.

No entanto, para Cascudo (1997), cimentos com adições de escória de alto-forno e materiais pozolânicos, como a cinza volante ou a sílica ativa, apresentam maior compacidade, significando que o concreto se torna menos suscetível a penetração de líquidos, gases e íons. Embora tais adições tendam a piorar a resistência à carbonatação do concreto, os benefícios superam os efeitos prejudiciais que podem surgir.

Para a escória de alto-forno, além de proporcionar menor difusividade iônica, permeabilidade e resistividade, essa adição proporciona maior capacidade de ligar íons cloreto para formar sais de Friedel, que aderem de forma estável ao concreto (CASCUDO, 1997).

Também, segundo Ferreira (2003), as adições minerais melhoram as condições de durabilidade do concreto. Concretos com adições minerais, da ordem de até 65%, reduziram a permeabilidade dos íons cloreto, também reduzindo a absorção capilar e aumentando a resistividade elétrica do concreto.

d) Resistividade elétrica do concreto

A resistividade elétrica do concreto é um dos parâmetros que, com a presença de oxigênio, controla a velocidade da corrosão do aço no concreto. Segundo Cascudo (1997), a resistividade elétrica é um parâmetro que depende de outros três fatores: a umidade, a permeabilidade e o grau de ionização do eletrólito do concreto. Sendo a resistividade um dos fatores que controlam as reações eletroquímicas na estrutura de concreto, observa-se uma relação direta entre a taxa de corrosão e a condutividade elétrica, inverso da resistividade.

Segundo Monteiro (2002), quando grandes quantidades de cloretos estão presentes na massa, o concreto tende a conservar mais umidade, o que também aumenta o risco da corrosão do aço pela diminuição da resistividade elétrica.

Gjorv (2015) afirma que, quando a resistividade elétrica do concreto se torna alta suficiente, em um patamar entre 50 e $70 \times 10^3 \text{ ohm} \cdot \text{cm}$, a taxa de corrosão pode se tornar muito pequena ou mesmo insignificante.

e) Relação água/cimento

Sabe-se que a relação água/cimento está diretamente relacionada a porosidade do concreto, na forma, no volume e na distribuição do tamanho dos poros, controlando, assim, a penetração de agentes agressivos na estrutura. Para Cascudo (1997), a relação água/cimento é um dos parâmetros de maior importância na dosagem de um concreto, pois afeta diretamente na porosidade da pasta de cimento. Uma relação a/c baixa retarda a difusão de cloretos, além de dificultar a entrada de umidade e agentes agressivos na estrutura de concreto.

Nepomuceno (2005) e Pereira (2001) também apontaram que quanto maior a relação a/c, maior é a porosidade e a permeabilidade do concreto, desta forma, maior será a penetração de agentes agressivos. Para Olliver e Torrenti (2014), a permeabilidade e a difusão dos íons cloreto dependem da interconexão dos poros capilares, característica que está associada à relação a/c e à hidratação do cimento. No entanto, trabalhar com a redução da interconexão dos poros capilares, pode acarretar o aparecimento de microfissuras na estrutura.

Segundo Monteiro (1996), pesquisando três tipos de cimentos nacionais, verificou-se que a redução da relação a/c melhorou o desempenho dos cimentos em relação a corrosão das armaduras por íons cloreto, aumentando significativamente a sua fase de iniciação.

2.2 Extração Eletroquímica de Cloretos

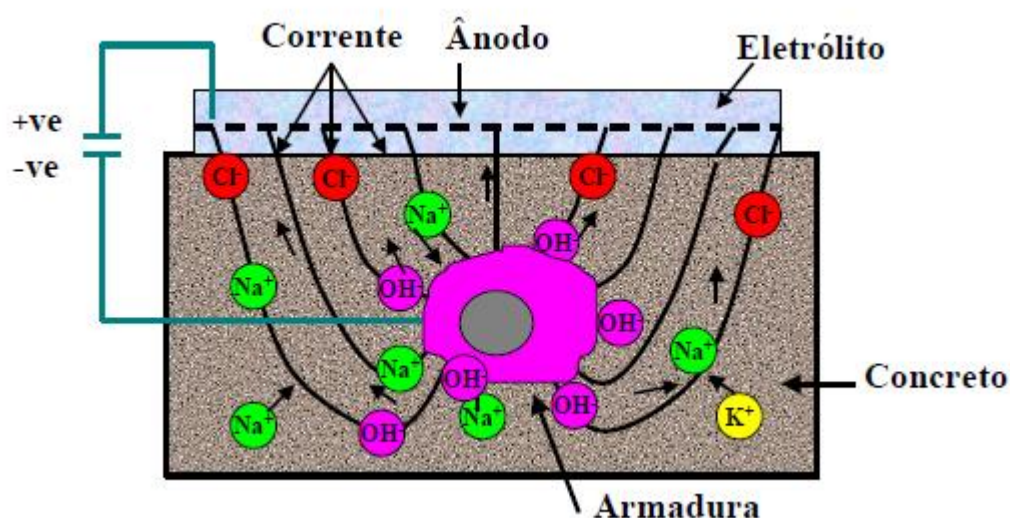
O método eletroquímico, utilizado tanto para a extração eletroquímica de cloretos, foco do presente estudo, quanto para a realcalinização de concretos carbonatos, é considerado um método não destrutivo por não necessitar da quebra e substituição de parte da massa de concreto da estrutura. A aplicação desses métodos baseia-se na remoção da causa da corrosão das armaduras, ou seja, reduzir os íons cloreto e proporcionar o aumento do pH dos poros do concreto em torno do aço.

2.2.1 Princípio do método

O método de extração eletroquímica consiste, basicamente, na aplicação de um campo elétrico entre a armadura (catodo) no interior do concreto e um eletrodo (ânodo) constituído por uma malha metálica, fixada externamente à superfície do concreto, imersos em água e solução alcalina (eletrólito).

Na figura 2, pode-se observar que com a aplicação da corrente, os íons de carga negativa, como os íons cloreto (Cl^-), tendem a migrar pela ação do campo elétrico formado da armadura (cátodo) para a malha metálica externa (ânodo). Podendo ocorrer também a migração de certos cátions (Na^+) para a armadura e a formação de íons hidroxilas (OH^-) na superfície das armaduras, como consequência das reações catódicas.

Figura 2 - Princípio da extração eletroquímica de cloretos.



Fonte: NCT,1996.

Segundo Monteiro (2002), o movimento dos íons cloreto é causado, principalmente, por migração, e o transporte causado por difusão pode ser desconsiderado, devido a sua baixa densidade de correntes relativamente altas aplicadas no método de extração eletroquímica.

No método de extração eletroquímica de cloretos, a diferença de potencial elétrico entre a malha metálica externa (ânodo) e a armadura (cátodo) causa as seguintes reações:



Simultaneamente, são produzidos íons hidroxilas por eletrólise, na superfície da armadura (cátodo):



Por tanto, com o aumento da produção de hidroxilas na superfície da armadura (cátodo) e a redução de íons cloreto extraídos através da aplicação do método permitem que ocorra a repassivação da armadura, entretanto, é necessário que o conteúdo de íons cloreto seja reduzido abaixo do valor limiar crítico.

2.2.2. Componentes utilizados na extração eletroquímica de cloretos

a) Ânodo

O ânodo tem a função de receber a corrente requerida e garantir sua correta distribuição para as armaduras que serão tratadas pelo processo de extração eletroquímica. Em geral, o ânodo deve aderir-se à superfície do concreto e pode ser aplicado a diversos sentidos e formas: horizontal, vertical, curvado etc. (COST 521, 2002).

A malha de titânio é muito utilizada como ânodo no tratamento de extração eletroquímica de cloretos, no entanto, seu alto custo inviabiliza a sua utilização. Cabe salientar que, Ihekwa e Hope (1996) em seu estudo trabalharam com malhas metálicas em aço inoxidável no tratamento de extração eletroquímica e obtiveram bons resultados.

Lachovicz (2020), estudou a influência da malha metálica utilizada no sistema de realcalinização eletroquímica, a fim de comparar o desempenho de três malhas

metálicas distintas, com o mesmo diâmetro de fio e abertura: alumínio, aço galvanizado e aço inox. Em seu estudo, constatou que a malha de aço galvanizado foi a que apresentou pior desempenho. Já as malhas de alumínio e aço inox resultaram na realcalinização dos corpos de prova de concreto, sendo que a malha de alumínio apresentou-se mais forte que a malha de aço inox na influência da reabilitação do pH do concreto. No entanto, a malha de alumínio foi consumida durante o processo, enquanto a malha de aço inox teve maior durabilidade.

b) Eletrólito

Diversas soluções são utilizadas como eletrólito externo, no entanto, as mais usuais são: hidróxido de cálcio saturado, hidróxido de sódio e água tratada. Com a utilização das soluções alcalinas, os íons hidroxila (OH^-) presentes no ânodo se transformam em oxigênio e água, de acordo com a Equação 7, conseqüentemente, o valor do pH do eletrólito diminui.

Já com a utilização da água tratada, que é decomposta no ânodo formando oxigênio e íons hidrogênio, de acordo com a equação 8, que por não possuir sais, os íons cloreto podem mover-se no concreto e serem descarregados facilmente. De acordo com a Equação 9, os íons cloreto que chegam até o ânodo são descarregados e formam gás cloro.

Usando uma solução alcalina, como $\text{Ca}(\text{OH})_2$ saturado, é possível evitar que o eletrólito se torne ácido e ataque o concreto, além de evitar a formação de gás clorídrico, elemento tóxico e prejudicial à saúde. No entanto, para pH acima de 7, praticamente não existe formação de gás cloro, pois a reação, de acordo com a figura 7, acontece com maior facilidade.

Outro fator importante é o eletrólito, os autores Polder, Walker e Page (1995) apud Mietz (1998) constataram que, utilizando carbonato de sódio como eletrólito, ocorreu uma redução na eficiência da extração de íons cloreto, supostamente devido à redução de íons cloreto transportados decorrente do aumento das concentrações de sódio e hidróxido. Contudo, água tratada e hidróxido de cálcio saturado mostraram uma boa eficiência (POLDER, 1996).

c) Fonte

Para a aplicação do método de extração eletroquímica, é necessária a utilização de corrente elétrica contínua que, mediante a transformadores, permite, a corrente alternada recebida da rede, obter corrente contínua com baixa voltagem. Sendo necessário um sistema de controle que permita que a corrente recebida se mantenha constante durante longos períodos.

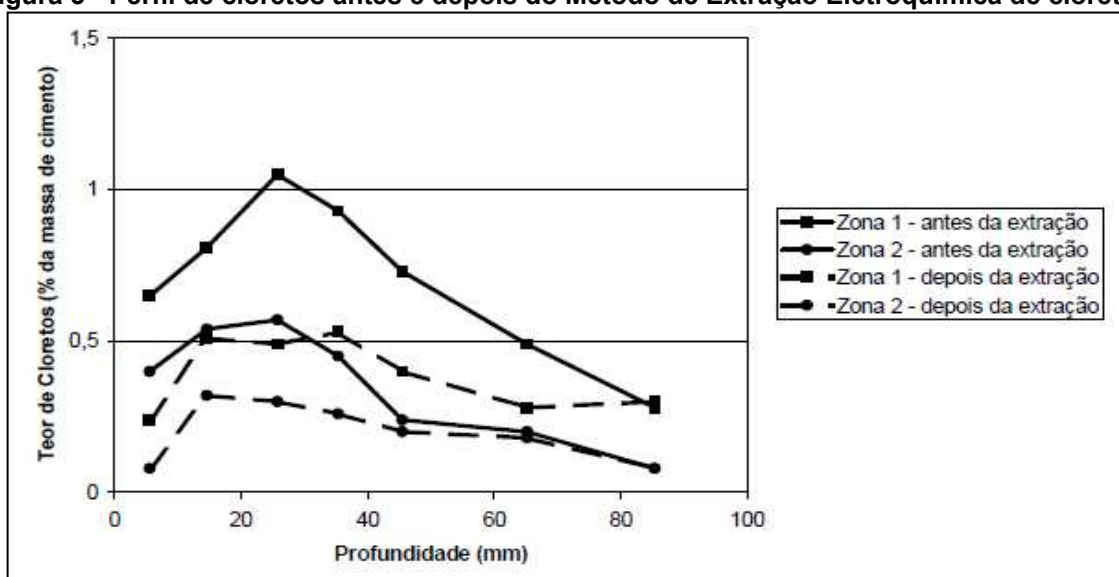
2.2.2 Avaliação do método

Os métodos de extração e realcalinização eletroquímicas são usados, respectivamente, para reabilitação de concreto armado afetado por ataque de íons cloreto e carbonatação. A aplicação dos métodos eletroquímicos apresenta a vantagem de ser mais veloz que os processos convencionais, pois a migração dos íons pelo campo elétrico utilizado ocorre de forma mais rápida que a difusão dos agentes agressivos externos (SIEGWART, LYNESS, MCFARLAND, 2003).

a) Distribuição de íons cloreto

Na aplicação do método de extração de íons cloreto, cuja redução difere de forma considerável para cada caso. Para o autor Elsener, Molina e Bohni (1993) com a aplicação de uma carga de 1400Ah/m^2 , densidade de corrente variando de $0,75$ a $0,30\text{ A/m}^2$ e cobrimento do concreto entre 25 a 35mm , observou-se que as mudanças na distribuição de íons cloreto foram qualitativamente as mesmas em várias profundidades, mas o decréscimo relativo do conteúdo de íons cloreto foi maior nas áreas próximas à superfície do concreto, tornando-se menor, quanto maior fosse a profundidade, conforme mostram os perfis de íons cloreto antes e depois da aplicação do método, em uma parede de metrô, em duas áreas distintas apresentados através da figura 3.

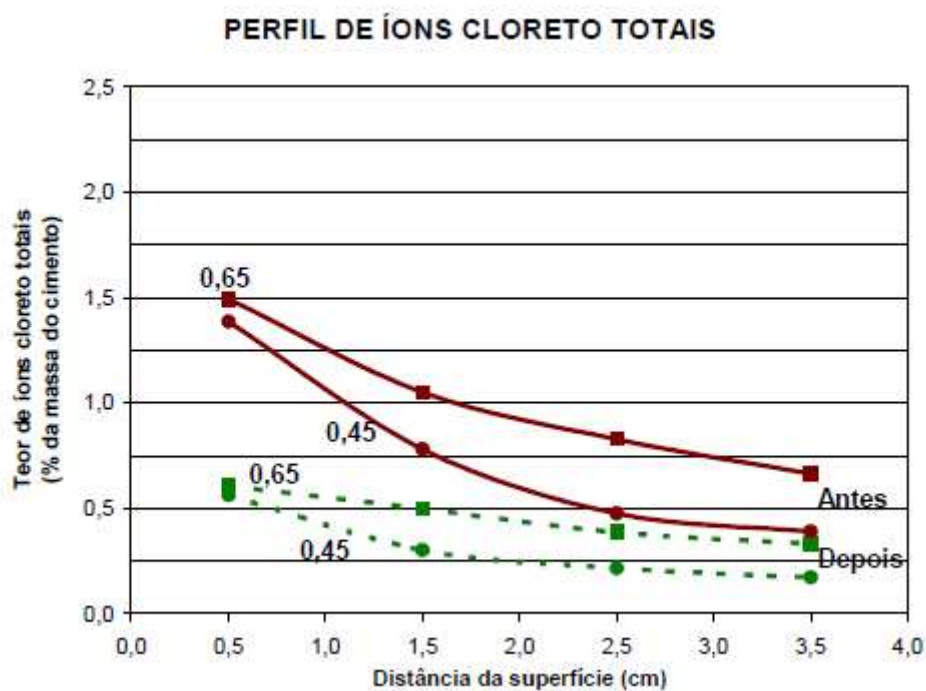
Figura 3 - Perfil de cloretos antes e depois do Método de Extração Eletroquímica de cloretos.



Fonte: Elsener; Molina; Bohni (1993)

Também na figura 4 é possível observar o perfil de íons cloreto totais antes e depois da utilização do método de extração eletroquímica de cloretos para corpos de provas com cobrimento de 4 cm, confeccionados com relações água/cimento de 0,45 e 0,65 aplicado por Monteiro (2002).

Figura 4 - Perfil de íons cloreto totais em relação à superfície do concreto.



Fonte: Monteiro (2002).

Para Monteiro (2002), tais resultados se devem à densidade das linhas de fluxo e, portanto, há maior intensidade do campo elétrico nas regiões mais próximas às barras, resultando em uma velocidade de extração crescente da superfície para as armaduras. Também porque os teores de íons cloreto medidos nas regiões próximas à superfície podem estar incluindo íons que migram das regiões mais profundas e ainda não deixaram os poros do concreto.

Miranda et al. (2006) mostra em sua pesquisa, que concretos novos, sem a presença de carbonatação e ataque por íons cloreto, não foram capazes de restabelecer a camada passivadora do aço que apresentava níveis de corrosão de moderado a alto, durante a pesquisa. Concluindo que a aplicação das técnicas para reabilitação eletroquímica não pode garantir a recuperação das armaduras já deterioradas pela corrosão, mesmo que em condições ideais. No entanto, para os autores, quando as técnicas eletroquímicas forem aplicadas, antes de a frente de carbonatação e cloretos atingir a armadura, podem ser consideradas positivas na prevenção da corrosão, possivelmente, postergando o início de um processo de corrosão indefinidamente.

Nos estudos de Banfill (1994) e Bertolini, Carsana e Redaelli (2008), foi possível identificar que a eletrólise formada ao redor da armadura aparenta ser a reação mais importante no reestabelecimento do pH alcalino no entorno das armaduras. Constatou-se que o tipo de cimento influencia na reserva de produtos alcalinos na pasta, sendo que quanto menor essa reserva, maior o tempo e a corrente necessária para concluir o tratamento. Ainda, Ribeiro et al. (2013), conclui que quanto maior a camada de cobertura do concreto, maior deverá ser o tempo de aplicação do método para completar o tratamento.

No entanto, Tissier et al. (2019) com o objetivo de restaurar prédios históricos, após estudar a aplicação do método de eletroquímica para tratamento de concretos contaminados pela carbonatação pelos íons cloreto, observaram que a aplicação do método eletroquímico utilizado alcançou uma taxa de 90% de extração de cloretos e um aumento no pH para valores em torno de 10, o que apresentou a importância da elevação do pH sobre a velocidade de corrosão das armaduras. No entanto, apesar dos bons resultados, existem incertezas sobre a durabilidade do tratamento, pois a redução na taxa de corrosão e o aumento do pH não alcançaram valores iniciais.

b) Durabilidade

A durabilidade de um tratamento de extração eletroquímica de cloretos depende principalmente do percentual de cloretos não removidos durante o processo, isto é, que ficaram na estrutura depois do tratamento. Após o qual ainda existe o risco da difusão dos íons cloreto remanescentes para a armadura, iniciando então uma futura corrosão. No entanto, alguns parâmetros podem interferir na difusão dos íons cloreto e, sucessivamente, na durabilidade do concreto, tais como: volume e diâmetro dos poros capilares do concreto, capacidade de fixação de íons cloreto do cimento, entre outros.

Através de estudo realizado por Bennett et al. (1993), verificaram que a distribuição de íons cloreto em lajes de concreto expostas à intempérie por 40 meses, após o tratamento de extração eletroquímica de cloretos permaneceram praticamente sem alterações. Em contrapartida, observaram, em lajes de referência, que, sem o tratamento de extração eletroquímica de cloretos, ocorreu troca distinta de íons cloreto da zona externa, já no início da aplicação do método, o conteúdo de íons cloreto foi maior para a zona interna, lugar em que o conteúdo de íons cloreto foi menor.

Esse estudo mostrou que o método de extração eletroquímica garante durabilidade em casos que a maior concentração de íons cloreto é presente, principalmente, no cobrimento do concreto, mesmo não sendo possível a extração dos íons cloreto para valores abaixo do limite crítico em toda a estrutura. No entanto, nas zonas internas, após as armaduras, onde a remoção dos íons cloreto é ineficaz, é previsto um aumento no teor de íons cloreto no entorno da armadura. Além de o problema ser agravado, devido as zonas internas mais profundas não secarem com tanta facilidade, permitindo um transporte por difusão mais rápido que nas zonas externas do concreto, que secam com maior facilidade.

Os autores Elsener; Böhni (1994) aplicando ensaios em campo, mostraram através de monitoramento por medidas de potencial que, as áreas tratadas com a aplicação do método de extração eletroquímica, após a aplicação de um revestimento à base de cimento para evitar futuramente o ingresso de íons cloreto, permaneceram no estado passivo por mais de seis anos.

c) Eficiência

A eficiência do método de extração de íons cloreto depende de diversos fatores. Para os autores Polder; Walker (1993), a eficiência do método de extração eletroquímica de íons cloreto está diretamente relacionada com a quantidade de íons cloreto que pode ser removida através de uma certa quantidade de carga que passa por meio do concreto.

A equação 12 demonstra que a quantidade de íons cloreto removidos por uma certa carga ($I \times t$) é diretamente proporcional ao número de transferência de íons cloreto e ao fator geométrico.

$$C_{cl^-} = I * t_{cl^-} * CRE * \frac{G}{F} \quad (12)$$

Onde:

C_{cl^-} = quantidade extraída de íons cloreto por m² de superfície de concreto;

I = densidade de corrente;

t = tempo do fluxo da corrente;

CRE = fator de eficiência de remoção de íons cloreto (= número de transferência de íons cloreto t_{cl});

G = fator geométrico (aço/superfície de concreto);

F = constante de Faraday.

O fator geométrico é a razão entre a superfície de área do concreto e a área de superfície da barra. O número de transferência de íons cloreto está relacionado aos parâmetros químicos responsáveis pela mobilidade dos íons na água dos poros e sua concentração, além de definir a quantidade de corrente levada pelos íons cloreto em relação à corrente total. O número de transferência e a eficiência são maiores quanto maior a concentração de íons cloreto na solução, e menores, quanto menor a concentração de outros íons negativos. O conceito de número de transferência de íons cloreto foi aplicado para calcular a eficiência por Bennett (1990) apud Mietz (1998). Para estimar o número de transferência de íons cloreto Bennett et al. (1993) utilizaram a equação abaixo:

$$t_{cl} = \frac{NF}{It} \quad (13)$$

Onde:

F = constante de Faraday;

N = número de moles de íons cloreto;

I = densidade de corrente;

t = tempo do fluxo da corrente.

Os autores Elsener; Molina; Böhni (1993) identificaram que quando a remoção de íons cloreto se tornou menos eficiente foi necessário um período de interrupção no fluxo de corrente maior, para continuar novamente a extração aumentando a sua eficiência. Os autores consideram que a causa para isso é que os íons cloreto dissolvidos já foram removidos, enquanto os íons cloreto combinados dissolvem lentamente, e assim um período de repouso maior, permite que mais íons cloreto possam dissolver, resultando no aumento da eficiência.

Ao final do processo de extração de íons cloreto, é possível analisar a eficiência através de medidas de potencial ou, indiretamente, através do teor de íons cloreto (Elsener et al., 1998). No entanto, segundo Elsener; Molina; Böhni (1993), devido à elevada polarização que as armaduras sofrem durante a aplicação do método de extração de cloretos, é preciso esperar semanas ou até meses para obter potenciais representativos.

A eficiência pode ser calculada por meio da redução ou do aumento de concentração de íons cloreto no eletrodo externo. No entanto, não é possível aplicar uma certa eficiência do processo de remoção de íons cloreto, pois pode diferir de caso para caso e depende da concentração de íons cloreto presentes, inicialmente, na estrutura.

2.2.3 Efeitos colaterais do método de extração eletroquímica

A aplicação do método de extração eletroquímica de cloretos pode acarretar alguns efeitos colaterais prejudiciais à estrutura do concreto recuperado.

Tais efeitos podem estar associados à elevada densidade de corrente utilizada durante o processo. Neste item, serão descritos alguns efeitos colaterais.

a) Aumento da porosidade do concreto

Alguns pesquisadores verificaram que após a aplicação do método de extração de íons cloreto ocorreu aumento na porosidade do concreto. Manning (1990) através da análise de porosimetria por intrusão de mercúrio observou-se um aumento na porosidade do concreto, principalmente na quantidade dos poros menores, em torno de 1 μm . Já Marcotte, Hansson e Hope (1999b), avaliando a influência da extração eletroquímica de cloretos, também através da análise de porosimetria por intrusão de mercúrio, identificaram que a distribuição dos tamanhos dos poros indicou uma queda na densidade, e que a porosidade das seções internas da argamassa obteve um aumento de uma a duas ordens de magnitude.

Segundo Castellote, Andrade e Alonso (1999^a), observaram que a aplicação do método de extração eletroquímica acarretou um aumento na porosidade total (próximo ao ânodo e ao cátodo) devido a aplicação do campo elétrico, além de alterações na distribuição do tamanho dos poros, proveniente do aumento da quantidade de pequenos poros capilares ($d < 0,05 \mu\text{m}$), que são atribuídos à dissolução e remoção da Portlandita e etringita.

Em pesquisa realizada em concretos novos, sem a presença do processo de carbonatação ou ataque por cloretos, realizado por Miranda et al. (2006), observaram que os concretos não foram capazes de restabelecer a camada passivadora do aço que apresentava níveis de corrosão de moderado a alto. Deste modo, foi concluído que a aplicação do processo de extração eletroquímica não pode garantir a recuperação de armaduras já deterioradas pela corrosão, mesmo que em condições ideais. No entanto, os autores consideram que a aplicação preventiva e em repetições das técnicas de realcalinização eletroquímica e extração de cloretos podem ser efetivas na prevenção da corrosão quando aplicadas antes que alcancem as armaduras, podendo postergar o início do processo de corrosão indefinidamente.

Com intuito de analisar a influência do tratamento eletroquímico sobre a microestrutura da interface aço-concreto, Reou e Ann (2010), observaram que a aplicação do método aumentou em 12% a quantidade de hidróxido de cálcio presente

na pasta, além de observarem que o composto não forma uma camada contínua na região da interface com o aço. Ainda foi observado que a porosidade no entorno do aço aumentou com a aplicação do método e está diretamente relacionada com a quantidade de corrente elétrica aplicada.

b) Reação álcali/agregado

A aplicação do método de extração eletroquímica de cloretos faz com que haja um aumento da concentração de OH^- na solução aquosa dos poros, no entorno da armadura, logo, ocorre o aumento do pH, podendo iniciar ou acelerar a reação álcali/agregado, no caso de o agregado ter partículas de silício reativo.

Segundo Miller (1997) apud Mietz (1998), o processo de extração eletroquímica de cloretos não tem influência na reação álcali/agregado, no máximo, podendo ocorrer um efeito temporário. Pois, quando o concreto está saturado, como é o caso do concreto durante o processo de extração, não ocorre a expansão devido à reação álcali/agregado. Ocorrendo também, no interior da massa de concreto e não na zona de revestimento, onde acontece o processo de extração. Constatando que o decréscimo da quantidade de íons cloreto presente no concreto reduz os problemas com a reação álcali/agregado em vez de aumentá-los.

No entanto, Bennett et al. (1993), analisando a influência da extração eletroquímica de íons cloreto na formação de reação álcali/agregado, através de ensaios em concretos preparados com diferentes agregados (um inerte e dois reativos), observou-se que ambos os concretos produzidos com os agregados reativos desenvolveram a reação álcali/agregado, sendo que um deles apresentou fissuras e formação do gel criado por meio da reação.

c) Redução da aderência entre o aço e o concreto

A redução na resistência de aderência entre o aço e o concreto é causada por mudanças na composição da matriz de cimento endurecida que ocorre devido ao significativo acúmulo de íons hidroxilas em volta do cátodo (Monteiro, 2002).

Ihekwa e Hope (1996) analisaram a influência da aplicação do método de extração eletroquímica de cloretos na resistência de arrancamento e a aderência entre o aço e o concreto, utilizando corpos-de-prova com concentrações de íons cloreto de

1,7 a 3% em relação a massa de cimento e tratados com densidades de corrente de 1 a 3 A/m². Observaram que a aplicação do método de extração eletroquímica de cloretos provoca uma significativa redução na resistência de arrancamento, enquanto que a diminuição da aderência mostrou ser dependente da densidade de corrente aplicada e da quantidade inicial de íons cloreto.

Segundo Broomfield (2002), a densidade de corrente não deve exceder 2 A/m², concordando com Elsener et al. (1998) que verificaram que para evitar alguns efeitos colaterais, a densidade de corrente, durante o processo de extração, deve ser limitada em 2 A/m². No entanto, Manning (1990) e Polder e Holdel (1992) mostram que densidades de 2-5 A/m² são consideradas como valores limites na extração de íons cloreto.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, apresenta-se o programa experimental que foi desenvolvido neste estudo. Descrevem-se os processos realizados para a aplicação do método de extração eletroquímica de cloretos, procedimentos e materiais, além dos ensaios realizados em campo, carbonatação por meio de aspersão de fenolftaleína e cloretos através do método colorimétrico de aspersão de solução de Nitrato de prata, assim como ensaios laboratoriais, porosimetria por intrusão de mercúrio, fluorescência de raios x (FRX), difração de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

3.1 Materiais

3.1.1 Ânodo – Tela metálica e Feltro

Baseado nos estudos realizados por Aguirre-Guerrero e Gutiérrez (2018) e Lachovicz (2020), optou-se pela utilização de malha metálica de aço inoxidável para a montagem do sistema de realcalinização eletroquímica, devido à facilidade de compra do material, além de eficácia e durabilidade demonstradas.

Portanto, para a realização do método de extração de cloretos, foram utilizadas malhas de aço inoxidável, como ânodo externo. O ânodo tem como função receber a corrente requerida e garantir a sua correta distribuição para as armaduras que vão ser tratadas.

O feltro utilizado para aplicação do método envolve a amostra a fim de manter a umidade, ela deve receber a solução de hidróxido de sódio (eletrólito) diariamente, mantendo a amostra sempre em contato com a solução.

A figura 5 apresenta a tela de aço inoxidável e o feltro utilizado para a aplicação do método de extração eletroquímica.

Figura 5 - Tela metálica e feltro.

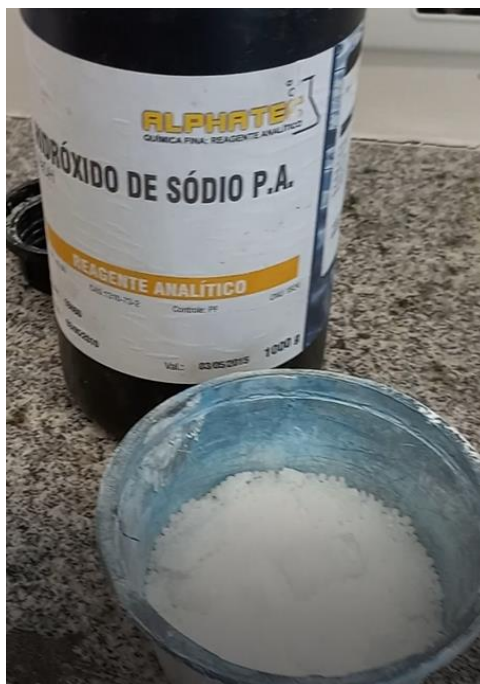


Fonte: Autoria própria (2022)

3.1.2 Eletrólito – Hidróxido de sódio

Para a execução do método de extração eletroquímica é necessária a utilização de uma solução alcalina ou eletrólito alcalino, para esse estudo foi utilizado como eletrólito solução de hidróxido de sódio (NaOH), apresentado na figura 6. A solução alcalina foi diluída em água com percentual de 10%. A utilização do eletrólito alcalino tem como intuito auxiliar na migração dos íons cloreto da armadura (cátodo), até o eletrodo (ânodo) através da reação formada pela ação do campo elétrico durante a aplicação do método de extração eletroquímica.

Figura 6 - Eletrólito Alcanilino (NaOH).



Fonte: A autoria própria (2022)

3.1.3 Fonte e componentes elétricos.

Para a aplicação do método é necessário a utilização de uma fonte de corrente contínua que, recebida mediante transformadores, permite, a partir de corrente alternada da rede, obter corrente contínua de baixa voltagem. Para esse estudo foi utilizada uma fonte de alimentação modelo PS-4005, a qual a tensão de saída é ajustável continuamente entre zero e 32V por meio de dois potenciômetros. A corrente de saída poderá variar de acordo com a carga indo de zero a 5A. Cabos flexíveis nas cores preta e vermelha para ponta de prova com capacidade de 450/750 V com espessura de 1x1,0 mm² foram utilizados nas conexões entre fonte, armadura e malha metálica de aço inoxidável. A figura 7 mostra a fonte de alimentação utilizada na pesquisa.

Figura 7 - Fonte de corrente contínua.



Fonte: Autoria própria (2022)

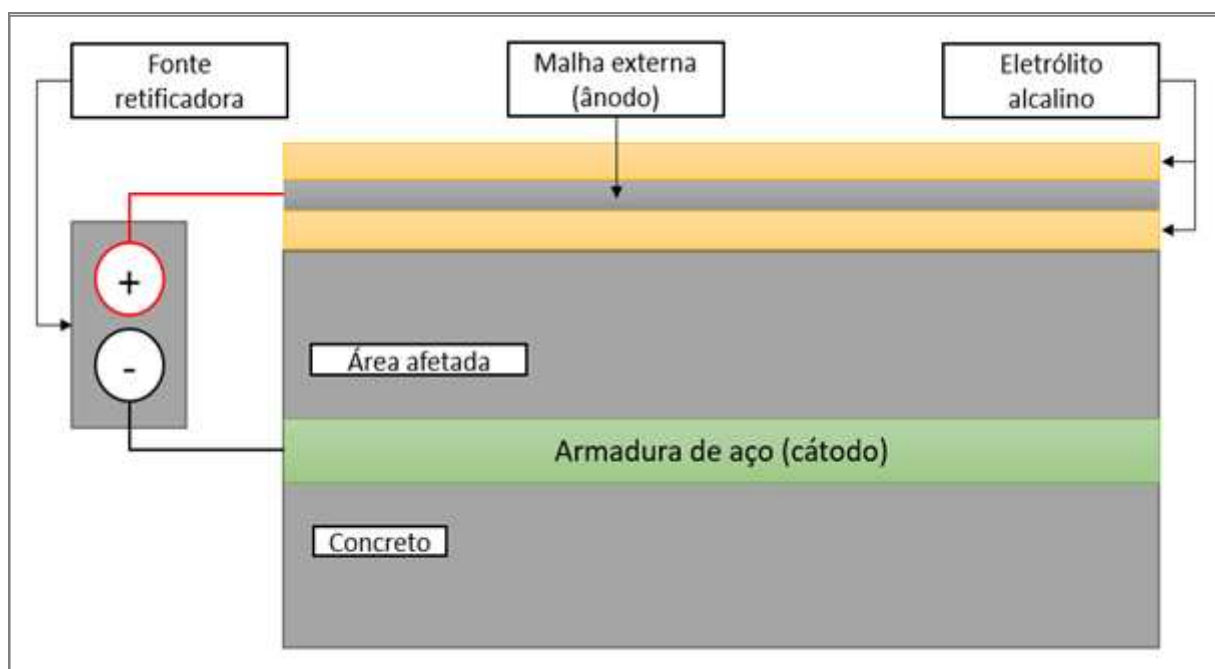
3.2 Métodos e Processos

A metodologia aplicada neste estudo visa atender ao objetivo geral previamente determinado, isto é, estudar a eficiência do método de extração eletroquímica de cloretos em estruturas localizadas em áreas litorâneas.

A aplicação do método de extração de cloretos foi realizada em um edifício no litoral do Paraná que possui seis pavimentos e fica a uma quadra do mar, aproximadamente 150m do mar, a aplicação foi realizada na tampa da caixa d'água na cobertura do edifício. O elemento recuperado não possui nenhum bloqueio em relação à maresia, estando exposto às intempéries do ambiente.

O presente estudo pode ser dividido em duas etapas, sendo a primeira etapa a aplicação do método de extração eletroquímica de íons cloreto em campo e a segunda etapa o processo de análises laboratoriais, a fim de complementar os resultados obtidos com as análises realizadas em campo. A aplicação do método consiste na passagem de uma corrente elétrica através do concreto e da armadura por meio de um sistema ilustrado na figura 8.

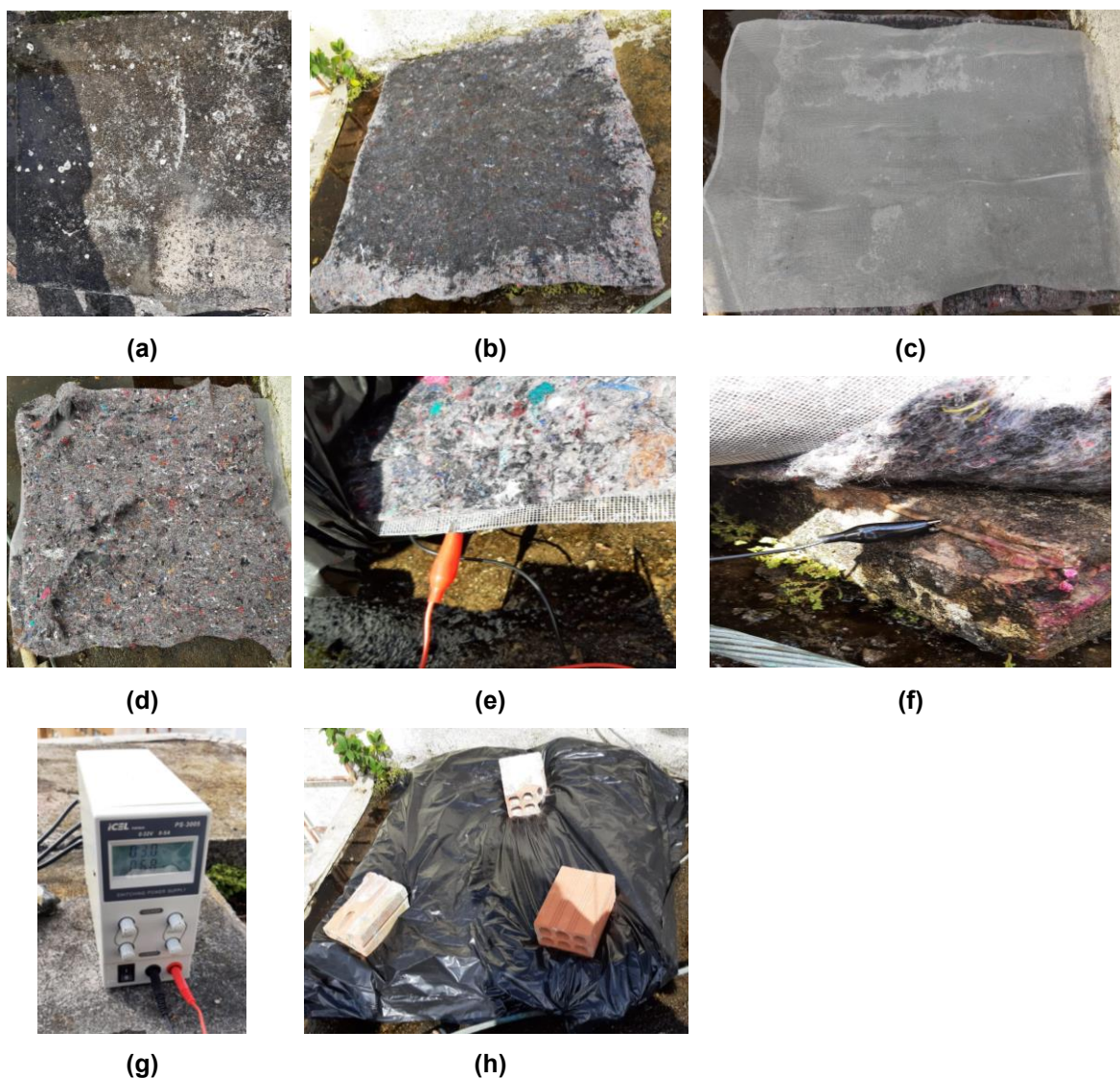
Figura 8 - Arranjo empregado na extração eletroquímica de cloretos.



Fonte: Autoria própria (2022)

Para aplicação do método de extração eletroquímica de cloretos foram utilizadas duas camadas de feltro umedecido diariamente com 10% de hidróxido de sódio (eletrólito alcalino) diluído em água potável, envolvendo a malha de aço inoxidável utilizada como ânodo externo. Para manter a corrente de extração constante a 1 A/m^2 foi utilizado uma fonte de corrente elétrica. O tratamento teve duração de 7 (sete) dias.

A Figura 9 apresenta as etapas do método de extração eletroquímica de cloretos utilizado na pesquisa:

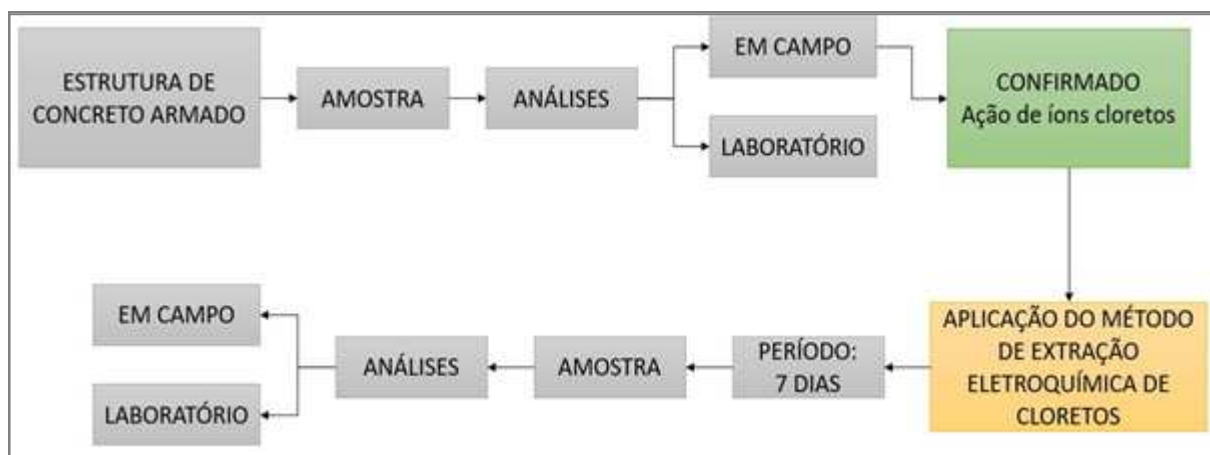
Figura 9 - Etapas Método de extração eletroquímica de cloretos.

Fonte: Autoria própria (2022)

- (a) Local de aplicação do método já úmido (com água potável);
- (b) Primeira camada de manta umidecida com eletrólito;
- (c) Ânodo (tela metálica) sob a manta umidecida com eletrólito;
- (d) Segunda camada de manta umidecida com eletrólito;
- (e) Ligação do polo positivo da fonte no ânodo ;
- (f) Ligação do polo negativo da fonte no cátodo (armadura do concreto);
- (g) Fonte de energia;
- (h) Ligação pronta, coberta por uma lona preta para evitar a evaporação do eletrólito.

Na Figura 10, apresenta um fluxograma dos processos adotados para aplicação do método realizado na pesquisa.

Figura 10 - Fluxograma da metodologia da pesquisa.

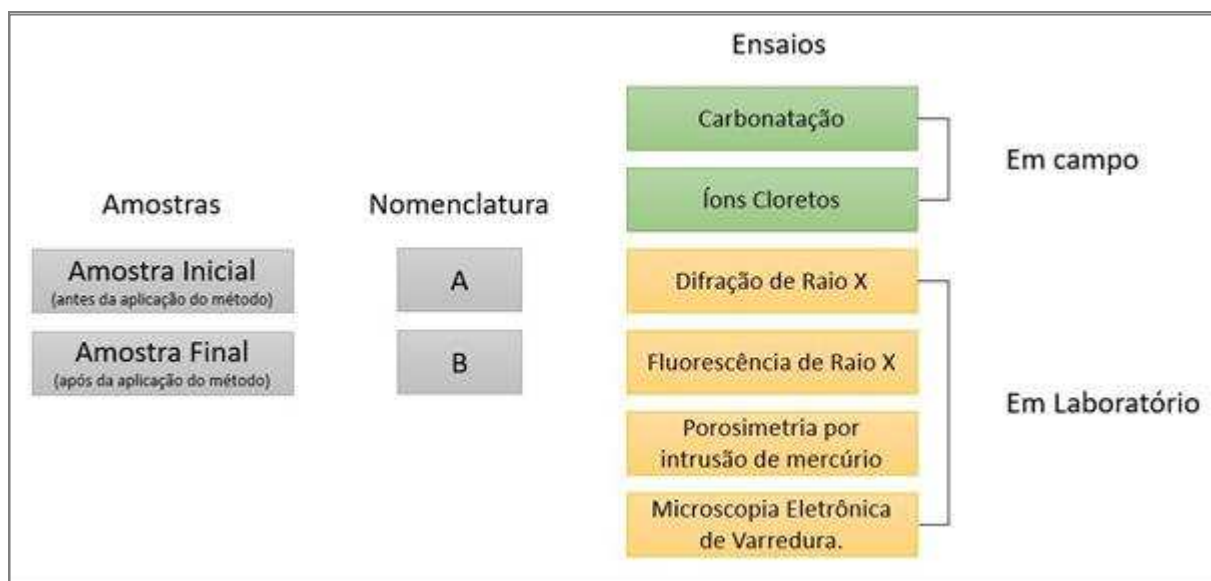


Fonte: Autoria própria (2022)

Inicialmente, foi buscado um local afetado pela ação de íons cloreto, desta forma, para confirmar a sua presença no local, foram removidas amostras do concreto e realizado ensaios em campo, sendo esses: carbonatação por meio de aspensão com solução de fenolftaleína e ação de íons cloreto, por meio de aspensão de Nitrato de prata (AgNO_3). Confirmada a presença desses agentes químicos no concreto, é iniciado o processo de extração eletroquímica dos cloretos. Para análises mais detalhadas do concreto, remove-se amostras para análises laboratoriais. Após o período de tratamento do concreto, o processo se repete, sendo removidas amostras do concreto para realização de análises em campo e em laboratório, a fim de comparar a amostra inicial com a amostra pós-tratamento.

A figura 11 mostra a matriz experimental da pesquisa, apresentando os ensaios realizados em cada etapa, a fim de identificar se a aplicação do método utilizado tem efeito positivo para a recuperação de estruturas afetadas pela ação de íons cloreto.

Figura 11 – Matriz experimental.



Fonte: Autoria própria (2022)

3.3 Métodos de Ensaios

Para avaliar a microestrutura da camada superficial do concreto em estudo foram realizadas técnicas microestruturais, tais como análise de difração de raios x, fluorescência de raios x, porosimetria por intrusão de mercúrio e microscopia eletrônica de varredura. Cujas técnicas foram adotadas a fim de analisar o comportamento na microestrutura do concreto em estudo após a aplicação do método de extração eletroquímica de íons cloreto em concreto armado.

3.3.1. Carbonatação

O ensaio de carbonatação consiste na visualização da coloração gerada pela aspensão da solução de fenolftaleína na superfície do concreto. A fenolftaleína é bastante utilizada para medir pH, ou melhor, para classificar se as substâncias são ácidas ou básicas.

Essa solução química possui a capacidade de alteração da coloração, conforme o pH do componente em contato. Assim, se o pH for menor do que 9, será incolor. Porém, se o pH for superior, a cor apresentada será magenta. Sendo assim, devido ao processo de carbonatação ocasionar uma queda no pH das estruturas de

concreto, por meio da aspersão de fenolftaleína pode-se identificar, facilmente, se a estrutura em análise está sofrendo com o processo de carbonatação.

Para a análise de carbonatação, foi realizada a aspersão de fenolftaleína na superfície do concreto, in loco, antes e após a aplicação do método de extração eletroquímica. Com o intuito inicial de identificar a existência de agentes agressivos no concreto em análise e, posteriormente, verificar se através da aplicação do método de extração eletroquímica de cloretos ocorreu a reestabilização do pH do concreto.

3.3.2 Íons Cloreto

O ensaio para verificação da presença de íons cloreto no concreto consiste na identificação visual através do método colorimétrico de aspersão de solução de Nitrato de prata (AgNO_3). Após a aspersão do AgNO_3 sobre o testemunho de concreto, é formada uma precipitação esbranquiçada, identificada como cloreto de prata (AgCl) nas regiões com a presença de cloretos, já nas regiões onde não há íons cloreto, há o surgimento de uma coloração marrom. Assim, pode-se identificar visualmente, pela alteração da coloração, a presença de cloretos na estrutura analisada.

Para a análise de íons cloreto, foi realizada a aspersão de nitrato de prata na superfície do concreto, in loco, antes e após a aplicação do método de extração eletroquímica. Com o intuito inicial de identificar a presença de cloretos no concreto em análise e, posteriormente, verificar se através da aplicação do método de extração eletroquímica de cloretos ocorreu a remoção dos cloretos no concreto em estudo.

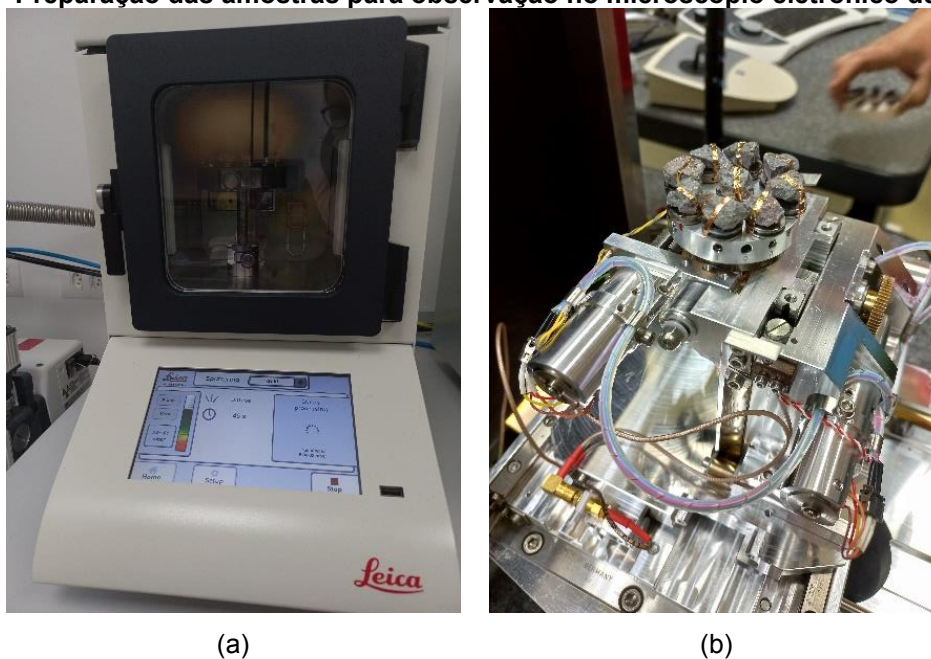
3.3.3. Microscópio eletrônico de varredura (MEV)

As análises microestruturais dos concretos produzidos foram realizadas com a utilização da técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV), a qual permite a obtenção de informações acerca da densificação, da morfologia, do grau de porosidade e da presença de fissuras na matriz cimentícia.

As amostras utilizadas neste ensaio foram retiradas em campo, no início e final do tratamento de extração dos íons cloreto. Primeiramente, as amostras passaram por processo de metalização, sendo que para esse processo foi utilizado o dispositivo de revestimento a vácuo (Leica EM ACE200) e recobrimento com ouro,

método difuso, 45 segundos, 30 mA, conforme figura 13(a). Após a metalização, o ensaio foi realizado em um microscópio eletrônico de varredura com filamento de tungstênio e câmara com movimentos em XYZ de modelo EVO MA 15. A figura 13(b) apresenta as amostras preparadas dentro do microscópio de varredura, no qual foram avaliados de 7 a 8 pontos distintos nas amostras.

Figura 12 - Preparação das amostras para observação no microscópio eletrônico de varredura.



Fonte: Autoria própria (2022)

A metalização das amostras foi realizada no Instituto de pesquisa científica Carlos Chagas, pela Fundação Oswaldo Cruz (FIOCRUZ) em Curitiba/PR. E a análise microscópica eletrônica de varredura foi realizada no Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná em Curitiba/PR.

3.3.4. Fluorescência de raios X (FRX)

O reconhecimento da composição elementar de objetos é de grande interesse para diversas áreas de estudos, esta técnica baseia-se no princípio de que a absorção de raios-X pelo material provoca a ionização interna dos átomos, a qual gera uma radiação característica chamada “fluorescência”. Os raios emitidos têm comprimentos de onda característicos para cada um dos elementos que constituem o material em

estudo. Através de comparação com amostras padrão e de correção do efeito matriz, é possível estabelecer quantitativamente o teor dos elementos presentes.

O ensaio de fluorescência de raios X (FRX) foi realizado no Campus Ecoville da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Para essa análise, foi utilizado o dispositivo Espectrofotômetro de fluorescência de raios x (EDX-720/800HS – SHIMADZU) com faixa de medição de 11Na a 92U / Tubo de Ródio: 50kV e 100µA / Detector Si (Li).

As amostras utilizadas para a análise de fluorescência de raios X (FRX) foram retiradas da superfície do concreto estudado, sendo a amostra inicial retirada antes da realização do ensaio de extração eletroquímica e a amostra final após os 7 (sete) dias de aplicação do método de extração eletroquímica de cloretos.

Para o estudo em questão, a determinação quantitativa da composição química dos materiais em análise, por meio do ensaio de fluorescência, permitirá a obtenção da composição dos óxidos presentes antes e após da aplicação do método de extração eletroquímica, possibilitando, portanto, a identificação de possíveis alterações da composição química da matriz de concreto.

3.3.5. Porosimetria por intrusão de mercúrio

A análise de porosimetria por intrusão de mercúrio baseia-se no fato de que, para que um fluido não molhante passe por um poro de diâmetro d , deve ser aplicada uma pressão p , que é inversamente proporcional ao diâmetro do poro. Sendo essas pressões convertidas em diâmetro equivalente dos poros através da fórmula de Washburn da equação de Laplace, apresentada por meio da equação 14 (COOK; HOVER, 1993; SANTOS, 2006):

$$d = \frac{-4 * \sigma * \cos\theta}{p} \quad (14)$$

Onde:

d = diâmetro equivalente dos poros preenchidos pelo mercúrio;

σ = tensão superficial do mercúrio;

p = pressão aplicada pelo equipamento para a intrusão do mercúrio na amostra;

θ = ângulo de contato entre o mercúrio e a parede do poro.

Para a realização desta análise, a amostra precisa estar seca, a fim de remover qualquer umidade ou fluido existente nos seus poros. Após a secagem, a amostra é levada para câmara no penetrômetro, aparelho em que é realizado o vácuo e onde o mercúrio é introduzido, através da aplicação da pressão. Assim a pressão é progressivamente aumentada e aplicada ao mercúrio, e a intrusão do mercúrio é então monitorada (DIAMOND, 2000).

O ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio foi realizado no Campus Ecoville da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. A faixa de pressão do equipamento pode variar de 0,2 a 33.000 psi, com a faixa de tamanho dos poros variando de 1100 μm a 0,0064 μm . O equipamento utiliza ar sintético a 60 psi e temperatura de 20 °C.

As amostras utilizadas para a análise de porosimetria por intrusão de mercúrio foram retiradas da superfície do concreto estudado, sendo a amostra inicial retirada antes da realização do ensaio de extração eletroquímica e a amostra final após os 7 (sete) dias de aplicação do método de extração eletroquímica de cloretos, a fim de identificar a influência da aplicação do método na microestrutura do concreto estudado.

Os resultados da análise de porosimetria por intrusão de mercúrio são apresentados em forma gráfica, nos quais aparecem os volumes de mercúrio intrudidos, em razão do diâmetro de poro da amostra. Cabe salientar que a porosidade alcançada pelo ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio não é uma medida total de porosidade do sistema, pois os poros finos (poros do gel hidratado), existentes em pastas de cimento, requerem pressão mais elevada do que a capacidade dos instrumentos comerciais para serem penetrados (Silva, 2015).

3.3.6. Difração de Raios X (DRX)

É fundamental conhecer a estrutura cristalina e a microestrutura de um material para poder entender as suas propriedades. O termo estrutura cristalina envolve o arranjo dos átomos, enquanto o termo microestrutura engloba desde os constituintes estruturais, até a composição presente. Uma das técnicas de análise estrutural e microestrutural mais empregada para identificar os diferentes materiais é a difração de raios-x.

Para tanto, foi utilizado o método de análise – DRX (análise padrão), no qual as medidas de difração de raios-X (DRX) foram conduzidas em um difratômetro convencional (Rigaku - Mini flex II), operando na geometria convencional 2 theta. O ângulo da análise estendeu-se entre 1,35 e 70 graus. Condições de análise: velocidades de 5°/min ao passo de 0,05; detector de cobre 1,54nm; voltagem do detector 30 mA.

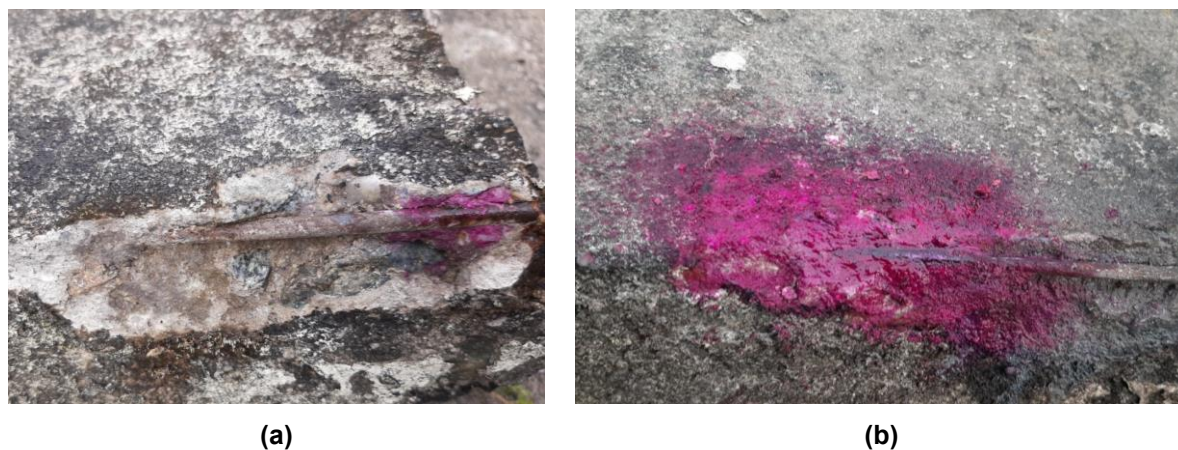
4. RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo, são apresentados os resultados relativos aos ensaios propostos no programa experimental deste estudo. Adicionalmente, será realizada uma análise dos resultados obtidos, com intuito de determinar se os objetivos propostos na presente pesquisa foram alcançados por meio das análises realizadas.

4.1. Carbonatação

Para identificar o reestabelecimento do pH da estrutura em análise, foi realizada a análise do concreto inicial (a), antes da aplicação do tratamento, e final (b), após a aplicação do tratamento de extração eletroquímica de cloretos. Através da aspersão da solução de fenolftaleína na estrutura do concreto, conforme figura 13, é possível observar que, na amostra inicial (a), o concreto não apresentou alteração na sua coloração, indicativo de pH ácido, já na amostra final (b) é possível observar que o concreto apresentou coloração rosada, indicativo de pH básico.

Figura 13 - Processo de carbonatação.



Fonte: Autoria própria (2022)

Através da figura 13 (a) pode-se observar que o concreto em estudo estava sofrendo por processo de carbonatação e, durante esse processo, o dióxido de carbono presente no meio penetra na estrutura de concreto armado que, ao encontrar água em seu interior, reage de forma a consumir, principalmente, os hidróxidos de cálcio (Ca(OH)_2). O consumo de Ca(OH)_2 produz carbonato de cálcio (CaCO_3), o que reduz o pH da pasta de cimento a níveis abaixo do necessário à manutenção da

camada passivadora do aço. A redução do pH do meio favorece a ocorrência da corrosão da armadura que, devido ao processo de carbonatação, pode não mais possuir sua camada protetiva (BANFILL, 1994). Sendo assim, o concreto fica mais suscetível a ataques de agentes corrosivos existentes no meio.

Após a aplicação do método de extração eletroquímica de cloretos, figura 13 (b), é possível observar a alteração na coloração da amostra, indicativo de reestabelecimento do pH do concreto, o que pode indicar que a utilização da corrente de 1 A/m^2 durante 7 dias é suficiente para o reestabelecimento do pH através do processo de extração eletroquímica de cloretos.

4.2. Íons Cloreto

Fazendo uso do método colorimétrico de aspersão de solução de nitrato de prata (AgNO_3), pode-se observar, na figura 14, um comparativo do concreto antes e depois da execução do método de extração eletroquímica de cloretos. Inicialmente, na figura 14 (a), pode-se verificar que, com a aspersão de nitrato de prata (AgNO_3), formam-se partículas esbranquiçadas na superfície do concreto, substância conhecida como cloreto de prata (AgCl), que é formada a partir da combinação de AgNO_3 com os cloretos (Cl). Já na figura 14 (b), pode-se visualizar uma superfície mais escura, com tom marrom, identificando a ausência de cloretos nesta amostra, não ocorrendo a formação de cloreto de prata (AgCl).

Figura 14 - Processo de Ataque por Íons cloreto.



Fonte: Autoria própria (2022)

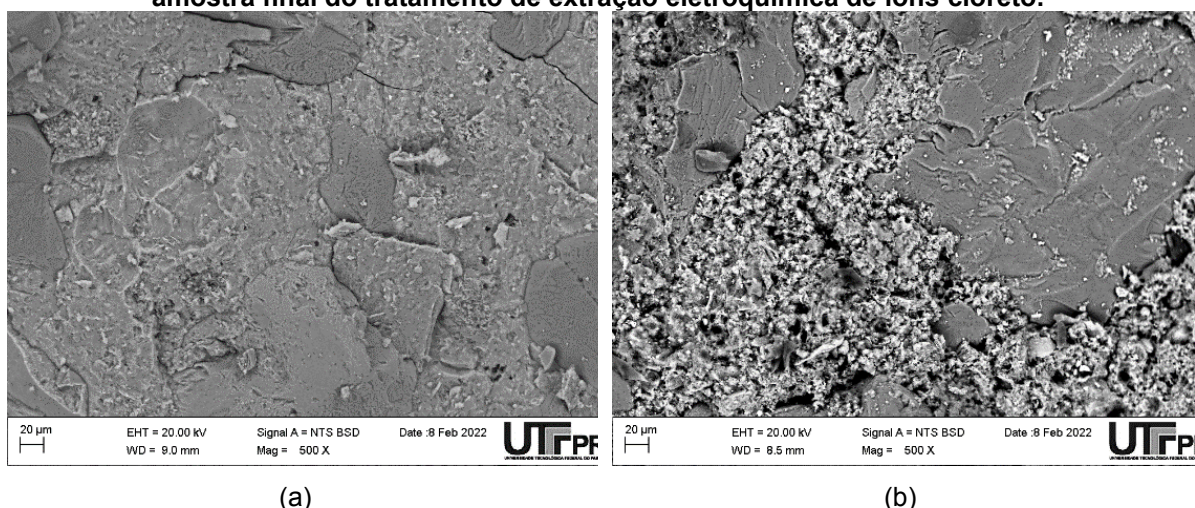
Com base nesta análise, é possível identificar que a aplicação da corrente 1 A/m² no período de 7 (sete) dias, através do método de extração eletroquímica de cloretos, mostrou-se eficaz para a extração dos cloretos presentes no concreto em estudo, devido a não formação de cloreto de prata (AgCl) com a aspersão de nitrato de prata (AgNO₃) na superfície do concreto, conforme pode-se observar através da figura 14.

4.3. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise de microscopia eletrônica de varredura permite a obtenção de imagens da morfologia do concreto, visando ilustrar o aspecto microestrutural da superfície do concreto, destacando as alterações químicas e morfológicas devido ao método de extração eletroquímica de íons cloreto, aplicado no estudo.

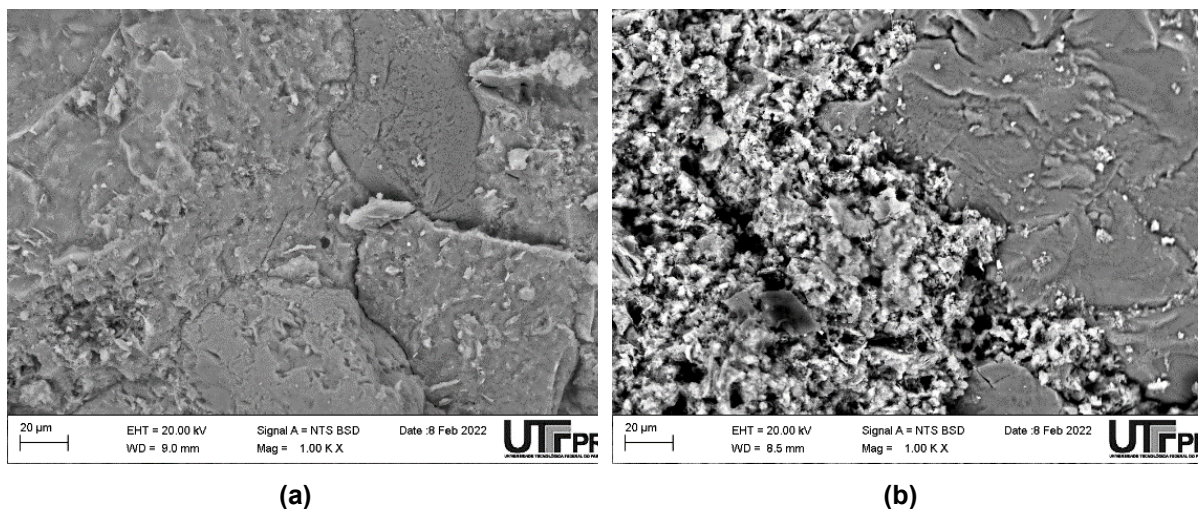
As figuras 15, 16 e 17 apresentam a superfície do concreto estudado, através da análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV), com amostras retiradas na superfície do concreto, sendo: amostra (a) inicial, antes da extração eletroquímica de cloretos e amostra (b), após a extração eletroquímica de cloretos, por meio de imagens obtidas com a mesma ampliação, sendo estas de (500, 1000 e 3000 vezes), respectivamente.

Figura 15 - Micrografia da superfície do concreto com ampliação de 500x: (a) amostra inicial (b) amostra final do tratamento de extração eletroquímica de íons cloreto.



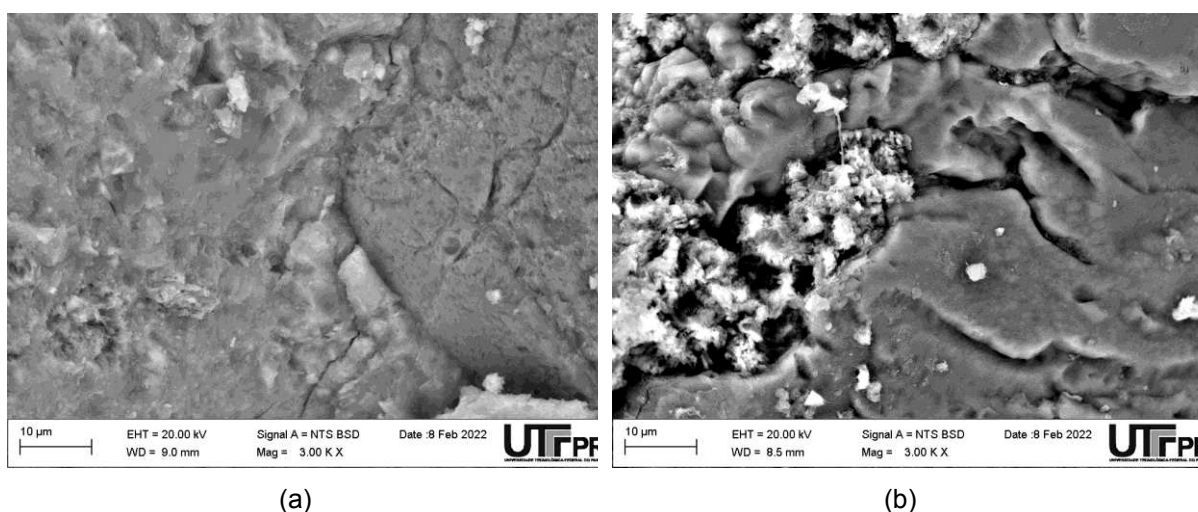
Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 16 - Micrografia da superfície do concreto com ampliação de 1k vezes: (a) amostra inicial (b) amostra final do tratamento de extração eletroquímica de íons cloreto.



Fonte: o Autoria própria (2022)

Figura 17 - Micrografia da superfície do concreto com ampliação de 3k vezes: (a) amostra inicial (b) amostra final do tratamento de extração eletroquímica de íons cloreto.



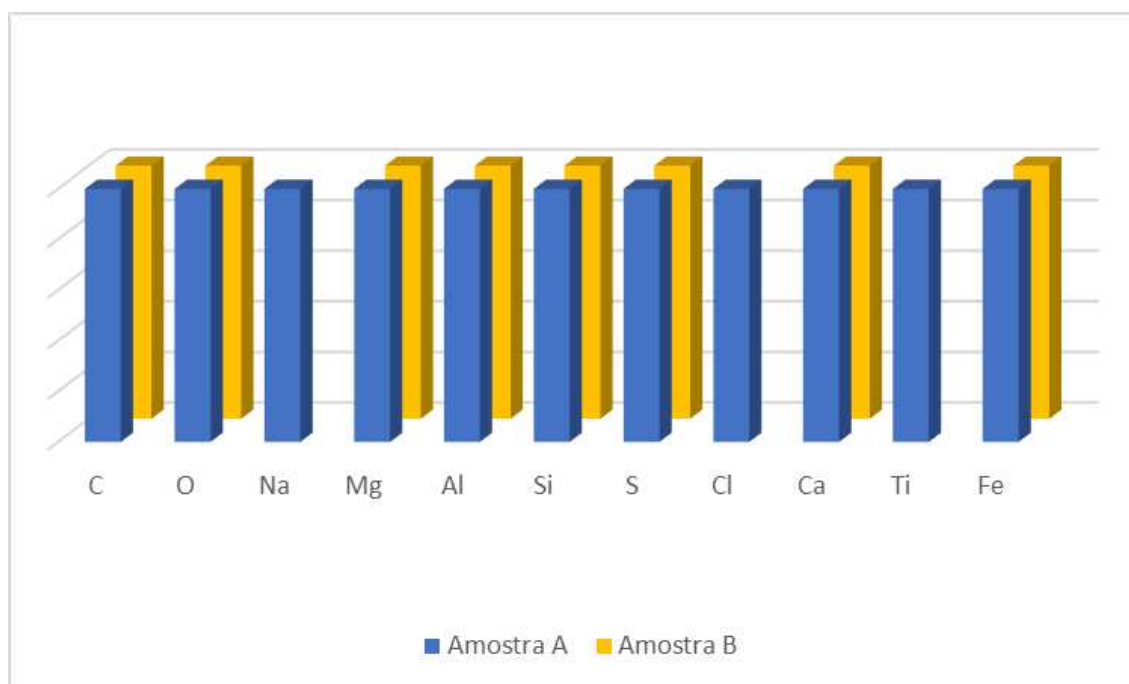
Fonte: o Autoria própria (2022)

Através das figuras 15, 16 e 17 observa-se o aparecimento de microfissuras na amostra inicial (a), antes da execução do processo de extração eletroquímica de cloretos, no entanto, apresenta uma estrutura de concreto pouco porosa. Já nas amostras finais (b), após a execução do processo de extração eletroquímica de cloretos, observa-se uma estrutura de concreto bastante porosa, comportamento similar aos apresentados na literatura cujos estudos apontam um aumento na porosidade da estrutura de concreto após a aplicação do método de extração

eletroquímica na estrutura de concreto (MANNING, 1990; MARCOTTE, HANSSON, HOPPE, 1999; MONTEIRO 2002).

Para complementar os resultados obtidos através da análise das imagens obtidas pelo ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), a figura 18 apresenta os elementos químicos encontrados na amostra inicial (a), antes do processo de extração eletroquímica de cloretos e da amostra final (a), após o processo de extração eletroquímica de cloretos. Cabe salientar, que a análise dos compósitos através do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) é qualitativa, sendo assim não apresenta percentuais dos componentes encontrados no concreto, desta forma, a figura 18 busca apresentar os componentes químicos encontrados nas amostras do concreto em estudo.

Figura 18 - Elementos químicos através da análise de Microscopia Elettronica de Varredura (MEV)



Fonte: Autoria própria (2022)

Mediante a análise da figura 18, é possível identificar a presença de compostos químicos na amostra inicial, isto é, antes da execução do processo de extração eletroquímica de cloretos não identificados na amostra final, realizada após a aplicação do método, sendo esses: (Na), (Cl) e (Ti). Correlacionando com o resultado obtido através da análise de íons cloreto, que com a aspensão de nitrato de

prata, identificou-se a presença de íons cloreto na amostra inicial do concreto em estudo.

Desta forma, é possível verificar a eficiência do método de extração eletroquímica aplicado no estudo para a remoção dos íons cloreto presentes no concreto, contudo, através da análise das figuras 15, 16 e 17, é possível observar que a aplicação do método acarretou o aumento da porosidade do concreto.

4.4. Fluorescência de Raios X

Por meio da análise realizada pelo ensaio de fluorescência de raios x, das amostras inicial (a) antes da aplicação do método de extração eletroquímica de cloretos e final (b) após a extração eletroquímica de cloretos do concreto em estudo, é possível identificar os compostos químicos e seus percentuais encontrados nas amostras.

A tabela 5 apresenta os elementos químicos, suas nomenclaturas e percentuais encontrados em cada amostra, através dela é possível observar que os componentes que sofreram maiores alterações com a aplicação do método foram: Óxido de cálcio (CaO) e Dióxido de Sílica (SiO₂).

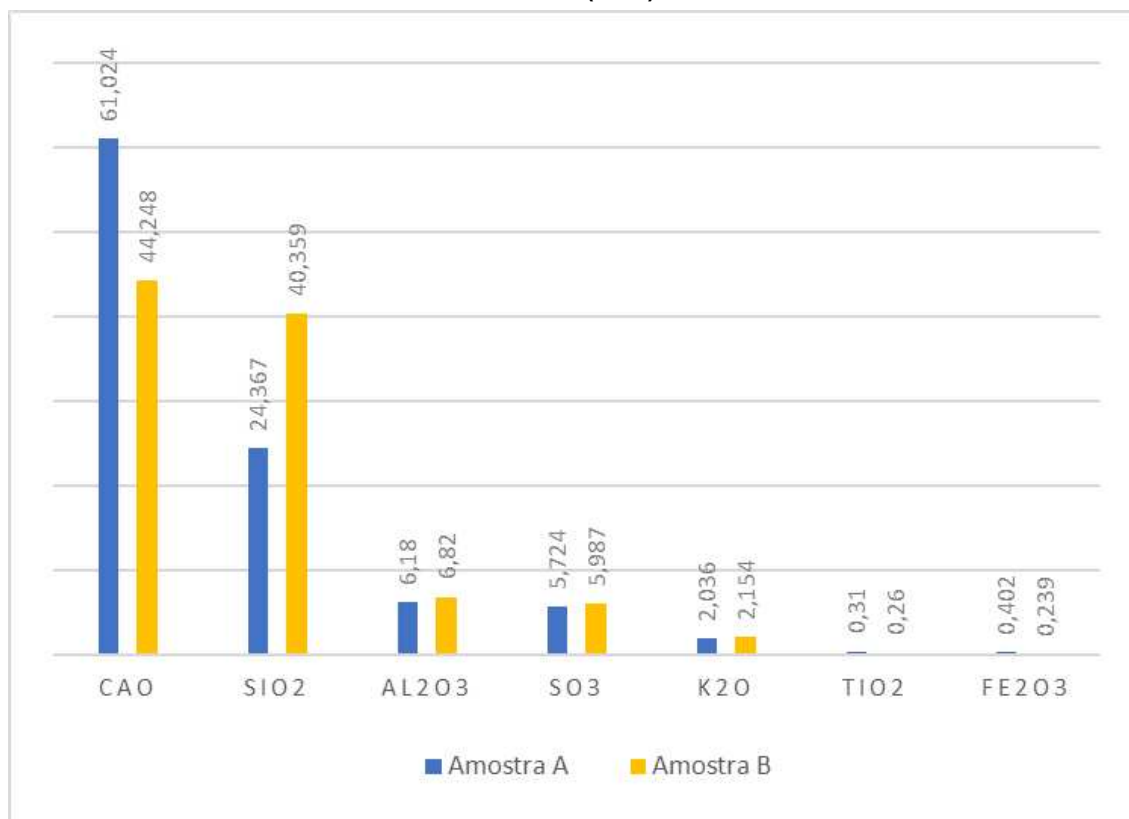
Tabela 5 - Percentual dos elementos químicos obtidos através da análise de Fluorescência de Raios X (FRX)

Descrição	Nomenclatura	Amostra A (%)	Amostra B (%)
Óxido de cálcio	CaO	61,024	44,248
Dióxido de sílica	SiO ₂	24,367	40,359
Óxido de alumínio	Al ₂ O ₃	6,18	6,82
Óxido sulfúrico	SO ₃	5,724	5,987
Óxido de potássio	K ₂ O	2,036	2,154
Dióxido de titânio	TiO ₂	0,31	0,26
Óxido de ferro	Fe ₂ O ₃	0,402	0,239

Fonte: Autoria própria (2022)

A figura 19 apresenta os resultados obtidos através da análise de fluorescência de raios-x, a fim de apresentar graficamente as alterações encontradas nas amostras (a) antes da extração eletroquímica de íons cloreto e (b) após da extração eletroquímica de íons cloreto.

Figura 19 – Percentual dos elementos químicos obtidos através da análise de Fluorescência de Raio X (FRX)



Fonte: Autoria própria (2022)

Através da análise dos resultados obtidos por meio da análise de fluorescência de raios-x, apresentados na tabela 5 e na figura 19, observa-se uma redução de aproximadamente 27,49% do composto de óxido de cálcio (CaO), que, em contato com a água, forma o hidróxido de cálcio (CaOH)₂, principal composto responsável pela alcalinidade do concreto, mantendo pH em torno de 13, o que garante a camada passivadora da armadura.

O composto químico dióxido de sílica, também conhecido como sílica, em seu estado natural, é o principal componente da areia. Assim, através da análise, pode-se constatar que a amostra B (retirada superficialmente após a aplicação do método) contém maior percentual de areia que a amostra A (retirada superficialmente antes da aplicação do método).

4.5. Porosimetria por Intrusão de Mercúrio

A análise de porosimetria por intrusão de mercúrio, embora com suas limitações em aspectos determinados, como a impossibilidade de atingir os poros fechados dos materiais, é válida para efeito comparativo entre amostras de mesma natureza. A tabela 6 apresenta os parâmetros adotados para análise das amostras através do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio.

Tabela 6 – Parâmetros usados no ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio		
	Pressão constante do Penetrômetro [mV/cc] 1730	
Baixa pressão	Taxa de evacuação	5
	Evacuação superior [mm Hg]	200,0000
	Evacuação superior [min]	1,0000
	Evacuação inferior [min]	5,0000
	Pressão constante do Penetrômetro [mV/cc] 1589	
Alta pressão	Pressão constante do Penetrômetro [sec]	5
	Modo de operação	velocidade fixa
	Velocidade do motor	15
	Pressão máxima [PSI] 50,0000	
	Ângulo de contato Hg [graus] 140	
	Tensão superficial Hg [erg/cm²] 480,00	
	Densidade do mercúrio [g/cc] 13500	
	Temperatura [°C] 20	

Fonte: Autoria própria (2022)

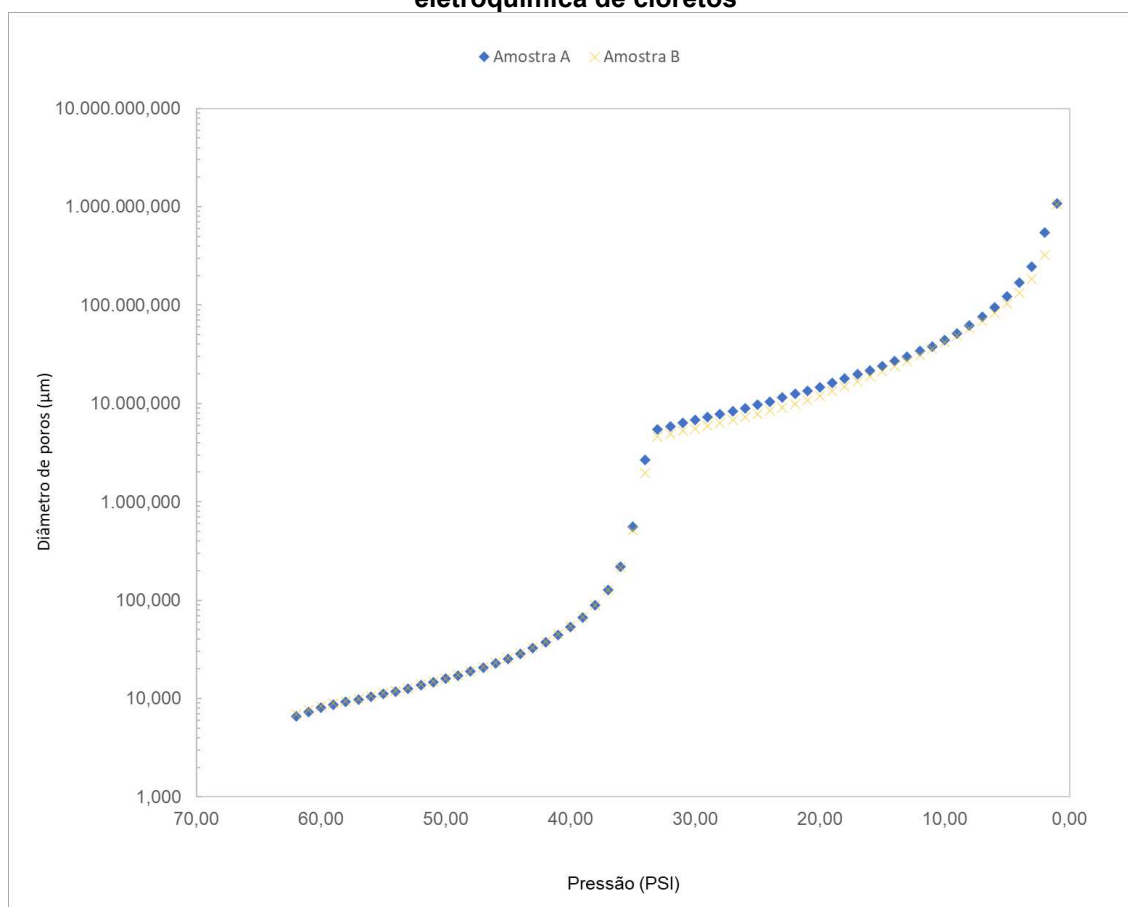
As amostras utilizadas para essa análise foram: A (antes da aplicação do método de extração eletroquímica de cloretos) e B (após a aplicação do método de extração eletroquímica de cloretos). A tabela 7 mostra o resumo dos resultados obtidos na análise de porosimetria por intrusão de mercúrio, na qual se observa um aumento de aproximadamente 19,27% na porosidade total da amostra B em relação a amostra A.

Tabela 7 – Resumo dos resultados obtidos através da análise de porosimetria

Amostra	A	B
Peso da amostra [g]	1,8109	2,1857
Volume intrudido (interpartícula) [cc]	0,0245	0,1478
Porosidade total interpartícula [%]	2,4460	14,7752
Volume intrudido (intrapartícula) [cc]	0,0048	0,0041
Porosidade intrapartícula total [%]	0,4812	0,4092
Volume total de intrusão [cc]	0,0293	0,1518
Porosidade Total [%]	2,9272	15,1844

Fonte: Autoria Própria (2022)

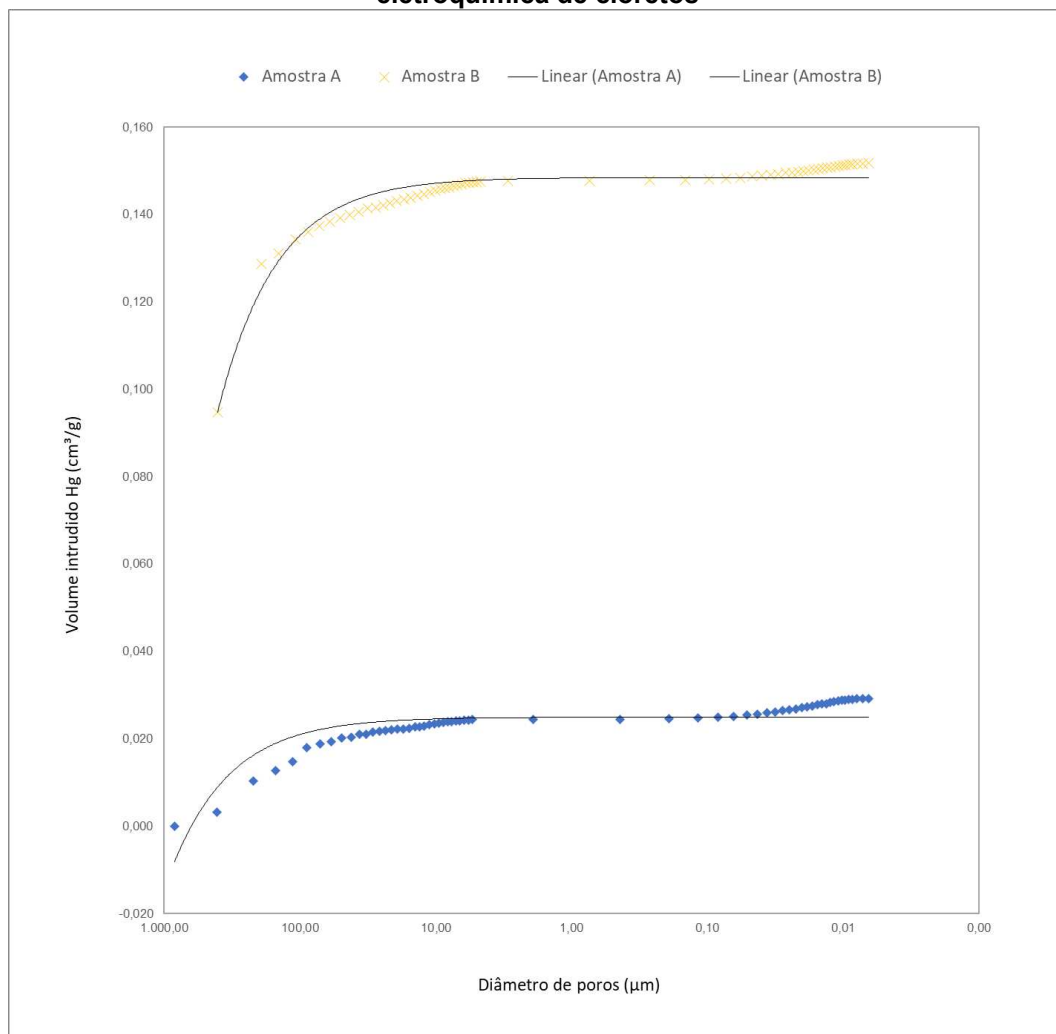
A figura 20 apresenta a pressão obtida durante a análise de porosimetria, em relação ao diâmetro dos poros antes e após a extração eletroquímica de íons cloreto, identificando que, ao comparar as amostras, não ocorreu variações significativas na pressão aplicada durante a análise.

Figura 20 – Comparação da pressão em relação ao diâmetro dos poros antes e após a extração eletroquímica de cloretos

Fonte: Autoria própria (2022)

Na figura 21, são apresentados os resultados das comparações realizadas sobre o volume de mercúrio intrudido, em relação ao diâmetro dos poros antes e após a extração eletroquímica de íons cloreto.

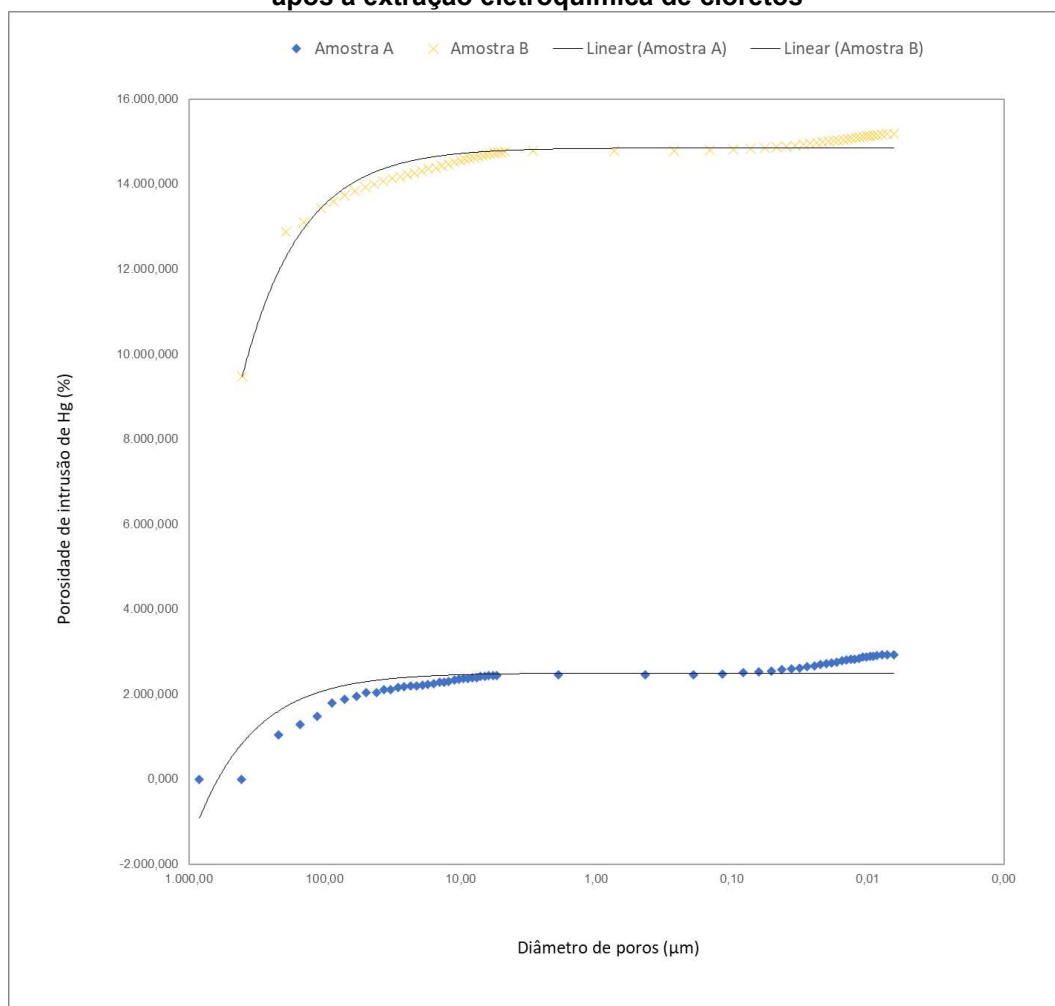
Figura 21 – Comparação da distribuição dos tamanhos dos poros antes e após a extração eletroquímica de cloretos



Fonte: Autoria própria (2022)

A figura 22 apresenta a porosidade a partir da intrusão de mercúrio em relação ao diâmetro dos poros das amostras antes e após a extração eletroquímica de íons cloreto.

Figura 22 – Comparação da porosidade através da distribuição do diâmetro dos poros antes e após a extração eletroquímica de cloretos



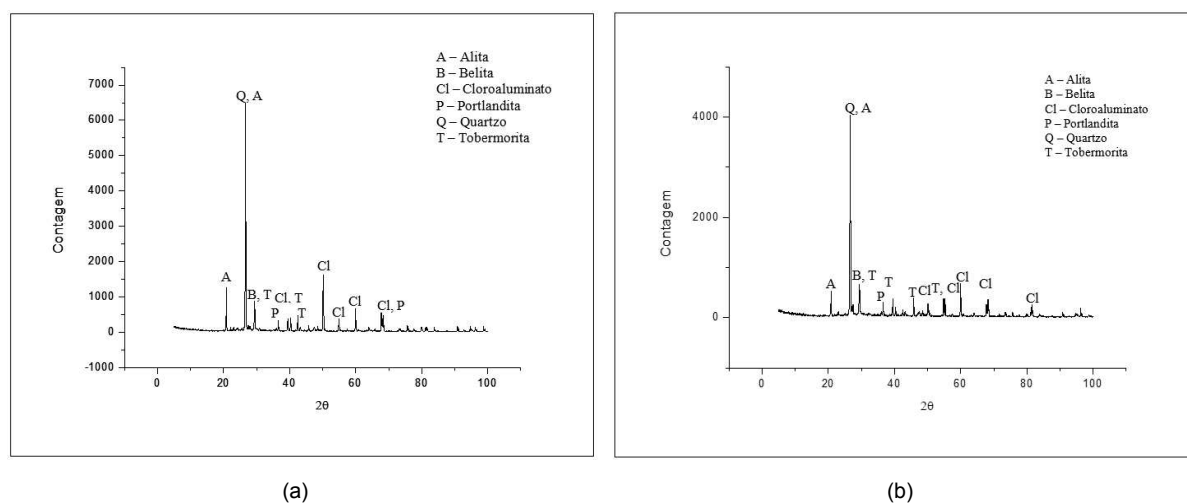
Fonte: Autoria própria (2022)

Analisando as figuras 21 e 22, que apresentam os resultados obtidos através da análise de porosimetria, observa-se que houve um aumento na porosidade do concreto após a aplicação do método de extração eletroquímica de íons cloreto, o que está de acordo com os autores Manning (1990) e Ihekweba e Hope (1996), que observaram através desta mesma análise um aumento na porosidade. Reou e Ann (2010) estudaram a influência do tratamento eletroquímico sobre a microestrutura da interface aço-concreto e observaram que a porosidade no entorno do aço aumenta com a aplicação da técnica eletroquímica, e relacionam o aumento da quantidade de corrente elétrica aplicada durante o tratamento.

4.6. Difração de Raios X

Através da análise do difratograma de raios x observa-se picos de Quartzo, Tobermorita, Cloroaluminato, Portlandita, Belita e Alita, em ambas as amostras, conforme demonstra a figura 23.

Figura 23 – Difratograma de raios-x: (a) amostra inicial antes da aplicação do método, (b) amostra final após a aplicação do método.



Fonte: Autoria própria (2022)

No entanto, nota-se uma redução de picos de Portlandita, também conhecido como hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$, que é um dos principais compostos da pasta de cimento hidratada, constituindo cerca de 20 a 25% do volume dos sólidos; sulfoaluminatos de cálcio e grãos de clínquer não hidratados (METHA E MONTEIRO, 2014). O consumo do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ produz carbonato de cálcio (CaCO_3), que acarreta na redução do pH da pasta de cimento a níveis abaixo do necessário à manutenção da camada passivadora do aço. Além da redução do pH, proporciona um aumento na porosidade da pasta de cimento hidratada, favorecendo a ocorrência da corrosão das armaduras (Banfill, 1994).

Segundo Castellote, Andrade e Alonso (1999a), o campo elétrico aplicado por meio do método de extração induziu um aumento na porosidade total do concreto, além da mudança na distribuição do tamanho dos poros, devido ao aumento da quantidade de pequenos poros capilares. Fato que pode ser atribuído à dissolução e remoção da Portlandita e etringita do concreto.

Por meio da análise de difração de raios X, observa-se uma redução do componente Ca(OH)_2 . De acordo com a literatura e as demais análises realizadas no estudo, foi possível verificar um aumento na porosidade do concreto estudado, tal fato pode ser atribuído à carga elétrica aplicada no método de extração eletroquímica de íons cloreto.

5. CONCLUSÕES FINAIS

O presente trabalho procurou investigar e analisar a influência da aplicação de extração de cloretos em concreto armado em estrutura localizada na região litorânea do PR, através do método de extração eletroquímica de íons cloreto. Diante do conteúdo exposto neste trabalho, é possível inferir as seguintes conclusões:

- Através das análises realizadas em campo, carbonatação e íons cloreto, observou-se que a aplicação do método removeu os cloretos do concreto em estudo e reestabeleceu o seu pH.

- A análise microscópica eletrônica de varredura apresentou através da análise morfológica um aumento na porosidade da microestrutura do concreto estudado. Ainda, de acordo com o método qualitativo apresentado por meio da análise, verifica-se a remoção do composto de cloretos da amostra após a aplicação do método de extração.

- Para o ensaio de fluorescência de raios-x, verificou-se uma redução de aproximadamente 27,49% do composto de óxido de cálcio (CaO), elemento que, em contato com água, forma o composto hidróxido de cálcio (CaOH₂), sendo esse responsável pela manutenção da camada passivadora do concreto. A redução desse composto (CaOH₂) também foi identificada através da análise de difração de raios-x (DRX), que evidenciou uma redução do composto (CaOH₂) na estrutura do concreto após a aplicação do método de extração de íons cloreto. Tal fato tem ligação direta com a porosidade do concreto, devido à redução do composto (CaOH₂) acarretar na diminuição do pH da matriz de concreto e da camada passivadora do concreto.

- Através da análise de porosimetria por intrusão de mercúrio, observa-se um aumento de aproximadamente 19,27% na porosidade total da amostra B (após a aplicação do método) em relação a amostra A (antes da aplicação do método).

Assim, conclui-se que a aplicação do método de extração de íons cloreto mostrou-se eficaz na remoção destes íons encontrados na estrutura, conforme identificado mediante as análises de íons cloreto e microscopia eletrônica de varredura. Tais análises evidenciaram na amostra A (antes da aplicação do método de extração) a presença do composto mencionado, enquanto, que na amostra B (após aplicação do método de extração) tal fato não foi verificado.

No entanto, através das análises de fluorescência de raios-x, difração de raios-x e porosimetria por intrusão de mercúrio, foi possível identificar que o processo de extração de íons cloreto acarretou num aumento na porosidade do concreto. Tal fato pode ser atribuído à densidade de corrente utilizada durante o processo de extração, fazendo com que ocorresse um aumento na porosidade total do concreto. Ainda, através das análises de fluorescência de raios-x e difração de raios-x, observou-se uma redução de compostos responsáveis pela alta alcalinidade do concreto (pH em torno de 13), que é essencial para garantir a camada passivadora da armadura.

Portanto, o método de extração eletroquímica aplicado no estudo mostrou-se eficaz na reabilitação e restauração do concreto contaminado pela ação da carbonatação e íons cloreto. No entanto, acarretou alterações negativas na porosidade da estrutura, afetando a sua durabilidade, podendo ocasionar menor resistência ao ataque futuro de agentes corrosivos.

5.1 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Sugere-se que, em próximas pesquisas, sejam realizados os seguintes estudos:

- Fazer um estudo da durabilidade do método de extração eletroquímica de íons cloreto avaliando diferentes densidades de corrente e períodos, a fim de analisar a influência na porosidade do concreto.
- Estudar a redução da resistência de aderência entre o aço e o concreto, que pode atingir o concreto após a aplicação do método de extração eletroquímica de íons cloreto.
- Analisar a eficiência do método de extração eletroquímica de íons cloreto, aplicando diferentes densidades de corrente e tempos de interrupção.
- Estudar a eficiência do método de extração eletroquímica de íons cloreto aplicando diferentes soluções alcalinas.
- Estudar a eficiência do método de extração eletroquímica de íons cloreto aplicando diferentes malhas metálicas, como ânodo.

REFERÊNCIAS

AGUIRRE-GUERRERO, A. M.; GUTIÉRREZ, R. M. **Efficiency of electrochemical realkalisation treatment on reinforced blended concrete using FTIR and TGA.** *Construction and Building Materials*. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.195>> Acesso em 20 jan 2022.

AÍTCIN, P.C. **Concreto de alto desempenho**. 1. ed. São Paulo: Pini, 2000. 667p.

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. São Paulo: PINI. 1992.

ANDRADE, C.; ALONSO, C.; SARRÍA, J. **Influencia de la humedad relativa y la temperatura en las velocidades de corrosión de estructuras de hormigón.** *Materiales de Construcción*, Vol. 48, Nº 251, 1998.,

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. **NBR 6118**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

BANFILL, P.F.G. **Features of the Mechanism of Re-alkalisation and Desalination Treatments for Reinforced Concrete.** In: Swamy, R.N. ed. *Corrosion and Corrosion protection of steel in concrete*. Sheffield: Sheffield Academic Press, 1994.

BERTOLINI, L.; CARSANA, M.; REDAELLI, E. Conservation of historical reinforced concrete structures by means of electrochemical realkalisation. **Journal of Cultural Heritage**. N. 9, PP. 376-385, 2008. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.culher.2008.01.006>> Acesso em 20 jan 2022.

CAVALCANTI, A. N.; CAVALCANTI, G. A. D. **Inspeção técnica do píer de atracação de Tambaú**. Revista Concreto, n. 57, 2010.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: Inspeção e Técnicas Eletroquímicas**. São Paulo: Ed. PINI, 1997.

CASTRO, P.; DE RINCON, O.T.; PAZINI, E.J. **Interpretation of chloride profiles from concrete exposed to tropical marine environments**. Cement and Concrete Research, v. 31, n.4, p.529-537, April. 2001.

CHANG, R.; GOLDSBY, K. A. **Química**. 11^a Edição. McGraw Hill Education, 2013.

COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BETON (CEB) **Durable concrete structures: design guide**. 1992. Lausanne: 1992 (Bulletin d'Information, n 152).

CRAUSS, C. **Penetração de cloretos em concretos com diferentes tipos de cimento submetidos a tratamento superficial**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria RS.

DYER, T. **Concrete Durability**. Boca Raton: CRC Press, 2014.

EGGERS M.; OLIVEIRA, P.S.F. **Novas técnicas eletroquímicas de recuperação de estruturas de concreto: realcalinização e dessalinização (extração de cloretos)**. In: Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções, 4., Porto Alegre, 1997. Anais. Porto Alegre: UFRGS/CPGEC, 1997, v.2 p.215-222.

ELSENER, B.; MOLINA, M. E.; BOHNI, H.; **Electrochemical removal of chlorides from reinforced concrete structures.** Corrosion Science, v.35, n.5-8, p.1563-1570. 1993.

ENEVOLDSEN, J. N.; HANSSON, C. M.; HOPE, B. B. **The influence of internal relative humidity on the rate of corrosion steel embedded in concrete and mortar.** Cement and Concrete Research, Vol. 24, Nº 7, p. 1373-1382, 1994.

FERREIRA, R. B. **Influência das adições minerais nas características do concreto de cobrimento e seu efeito na corrosão de armadura induzida por cloretos.** 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

GENTIL, V. **Corrosão.** 5ª ed., LTC: Rio de Janeiro, 2007.

GJØRV, O. E. **Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade.** São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

GONZÁLEZ, J. A.; COBO, A.; GONZÁLEZ, M. N.; OTERO, E. On the effectiveness of realcalisation as a rehabilitation method for corroded reinforced concrete structures. **Material and Corrosion.** N.51, PP 97-103, 2000. Disponível em <[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-4176\(200002\)51:2<97::AID-MACO97>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-4176(200002)51:2<97::AID-MACO97>3.0.CO;2-3)> Acesso em 10 fev 2022.

HELENE, P. R. L. **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto.** 2.ed. São Paulo: PINI. 1992. 213 p.

LACHOVICZ, P. O.; **Influência do tipo de malha e do tipo de argamassa na realcalinização eletroquímica de estruturas de concreto armado.** 2020. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, Paraná, 2020.

LIU, Y.; SHI, X. **Stochastic modeling of service life of concrete structures in chloride-laden environments**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 24, n. 4, p. 381-390, 2012.

LÓPEZ, W.; GONZÁLEZ, J. A. **Influence of the degree of pore saturation on the resistivity of concrete and the corrosion rate of steel reinforcement**. Cement and Concrete Research, V. 23, no. 2, pp. 368-376, 1993.

MANNING, D. G. **Electrochemical removal of chloride ions from concrete**. In: Symposium of Electrochemical Protection Measures for Reinforced Concrete Structures, Zurich, 1990. Proceedings. Zurich: SIA Documentation, 1990. P.61-68.

MARCOTTE, T.D; HANSSON, C.M.; HOPE, B.B. **The effect of the electrochemical chloride extraction treatment on steel-reinforced mortar**. Part I – Electrochemical measurements. Cement and Concrete Research, v.29, n.10, p.1555-1560, October. 1999a.

MARCOTTE, T.D; HANSSON, C.M.; HOPE, B.B. **The effect of the electrochemical chloride extraction treatment on steel-reinforced mortar**. Part II – Microstructural characterization. Cement and Concrete Research, v.29, n.10, p.1561-1568, October. 1999b.

MIETZ J. **Electrochemical Rehabilitation Methods for Reinforced Concrete Structures: a state of the art report**. London: The Institute of Materials. 1998, 57p. (European Federation of Corrosion Publication, n.24).

MIRANDA, J. M.; GONZÁLEZ, J. A.; COBO, A.; OTERO, E. Several questions about electrochemical rehabilitation methods for reinforced concrete structures. **Corrosion Science**. N.48 PP. 2172-2188, 2006. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2005.08.014>> Acesso em 24 jan 2022.

MONTEIRO, E.C.B. **Estudo da capacidade de proteção de alguns tipos de cimentos nacionais, em relação à corrosão de armaduras, sob a ação conjunta**

de CO₂ e íons cloreto. 1996. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília. Brasília.

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. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo. São Paulo.

NEPOMUCENO, Antônio Alberto. **Mecanismos de transporte de fluidos no concreto.** In: **ISAIA, Geraldo Cechella (ed.).** Concreto: Ensino, pesquisa e realizações. v. 2. Cap. 26. São Paulo: IBRACON, p. 793-827, 2005.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 2. ed., São Paulo: Pini, 1997, 828p.

NIELSEN, E. P.; GEIKER, M. R. **Chloride diffusion in partially saturated cementitious material.** Cement and Concrete Research, n. 33, p. 133-138, 2003.

OHRING, M. **Reliability and Failure of Electronic Materials and Devices.** 1 ed. Elsevier Academic Press, 1998.

OLLIVER, J. P. TORRENTI, J. M. A estrutura porosa dos concretos e as propriedades de transporte. In: **Durabilidade do Concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente.** São Paulo: IBRACON, 2014.

PEREIRA, V. G. A. **Avaliação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos: Influência do tipo de cimento, da relação a/c, da temperatura e do tempo de cura.** 138p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

PEREZ, N. **Electrochemistry and Corrosion Science.** 1 ed. Boston – USA: Kluwer Academic Publishers, 2004.

POLDER, R.B. **Electrochemical chloride removal from reinforced concrete prisms containing chloride penetrated from sea water.** Construction Building Materials, v.10, n.1, p.83-88, 1996.

RIBEIRO, P. H. L. C. **Realcalinização eletroquímica de estruturas de concreto armado carbonatadas inseridas no meio urbano: influência de características da estrutura no comportamento do tratamento.** 2009. 143 f. Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009.

RIBEIRO, P. H. L. C.; MEIRA, G. R.; FERREIRA, P. R. R.; PERAZZO, N. **Electrochemical realkalisation of carbonated concretes: Influence of material characteristics and thickness of concrete reinforcement cover.** Construction and Building Materials. N. 40, PP. 280-290, 2013. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.076>> Acesso em 10 fev 2022.

RIEGER, P. H. **Electrochemistry.** 2 ed. Chapman & Hall, 1994.

TISSIER, Y.; BOUTEILLER, V.; MARIE-VICTOIRE, E.; JOIRET, S.; CHAUSSADENT, T.; TONG, Y. **Electrochemical chloride extraction to repair combined carbonated and chloride contaminated reinforced concrete.** Electrochimica Acta. N. 317, PP. 486-493, 2019. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.05.165>> Acesso em 11 fev 2022.