



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E

AMBIENTAL

– MESTRADO –

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA DA REALCALINIZAÇÃO NA
REPASSIVAÇÃO DE ARMADURAS**

Por

Mariane Rodrigues de Carvalho

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba
para obtenção do grau de Mestre*

João Pessoa – Paraíba

Agosto de 2018



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E

AMBIENTAL

– MESTRADO –

ESTUDO DA EFICIÊNCIA DA REALCALINIZAÇÃO NA REPASSIVAÇÃO DE ARMADURAS

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre.

Mariane Rodrigues de Carvalho

Orientador: Prof. Dr. Gibson Rocha Meira

João Pessoa – Paraíba

Agosto de 2018

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

C312e Carvalho, Mariane Rodrigues de.
ESTUDO DA EFICIÊNCIA DA REALCALINIZAÇÃO NA REPASSIVAÇÃO
DE ARMADURAS / Mariane Rodrigues de Carvalho. - João
Pessoa, 2018.
70 f. : il.

Orientação: Gibson Rocha Meira.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. corrosão; carbonatação; repassivação. I. Meira,
Gibson Rocha. II. Título.

UFPB/BC

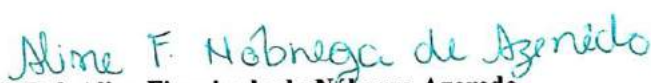
**“ESTUDO DA EFICIÊNCIA DA REALCALINIZAÇÃO NA REPASSIVAÇÃO DE
ARMADURAS”**

MARIANE RODRIGUES DE CARVALHO

**Dissertação aprovada em 21 de agosto de 2018
Período Letivo: 2018.2**

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Gibson Rocha Meira
Orientador


Prof. Dr. Aline Figueiredo da Nóbrega Azeredo
Examinador Interno


Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro
Examinador Externo

**João Pessoa/PB
2018**

*Não é sobre chegar no topo do mundo e saber que venceu
É sobre escalar e sentir que o caminho te fortaleceu
É sobre ser abrigo e também ter morada em outros corações
E assim ter amigos contigo em todas as situações
(Música: Trem bala - Ana Vilela)*

*Aos meus pais, Morizalton e Ana Maria, e a toda minha família,
Agradeço por todo amor e incentivo.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pelo dom da vida, e oportunidades concedidas.

Aos meus pais, **Morizalton** e **Ana Maria**, por todo esforço dedicado a minha formação, tanto como ser humano, quanto acadêmica. Essa conquista só foi possível porque tive a base familiar que vocês construíram juntos. Muito obrigada por tudo, amo vocês infinitamente.

As minhas irmãs, **Maria Antônia** e **Mirtes Aila**, aos meus tios **Heleno**, **Sandra**, **Adriana**, e toda minha família, que não pouparam esforços para essa minha conquista. Nos momentos em que a saudade apertava, cada ligação e mensagem foram fundamentais.

A família Henriques de Mello (**Henrique**, **Lucia**, **Dona Socorro**, **Conceição** e **Fláuber**), que me acolheu com tanto carinho e estiveram sempre apoiando e incentivando minha caminhada.

Ao meu Orientador e Professor Dr. **Gibson**, por tanta generosidade e desprendimento ao compartilhar seus conhecimentos. Agradeço pela confiança depositada em mim, **pela paciência**, pelos muitos conselhos (que mais pareciam de um pai para uma filha), pelos momentos de descontração, pela franqueza nas horas necessárias, mas também por saber me tranquilizar nas horas difíceis, que não foram poucas. Professor, meu MUITO OBRIGADA!

A todos os colegas do PPGECA, em especial, a **Gabryela** e **Fabianne** que estiveram sempre me apoiando, foram mais que amigas, tornaram-se minhas irmãs.

Grata a todos que fazem parte do Grupo de Pesquisa de Materiais e Resíduos da Construção (GMAT - IFPB), a troca de conhecimento e experiências foi de grande contribuição para esse estudo. Agradeço, em especial, a **Pablo** e **Taíssa**, que mesmo com seus compromissos, estiveram sempre dispostos a ajudar-me.

A minha equipe de trabalho GEAESI, em especial a Ingrid e Letícia, que souberam compreender meus momentos de ausência.

Ao Laboratório de Ensaaios de Materiais e Estruturas (LABEME - UFPB), nas pessoas de **Sebastião**, **Ricardo**, **Delby** e **Cláudio**, que nunca mediram esforços para ajudar-me, mesmo em horários e dias de folga.

A banca examinadora Professora Aline Azeredo e ao Professor Arnaldo Carneiro.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, pela oportunidade e apoio dados no transcorrer do estudo.

A CAPES que financiou a bolsa de estudos.

Enfim, a todos aqueles que contribuíram de alguma forma, para a realização deste trabalho.

RESUMO

A corrosão de armaduras desencadeada pela carbonatação do concreto é um dos principais mecanismos de degradação das estruturas de concreto armado. O tratamento por realcalinização é um dos métodos aplicados para restabelecer as condições de alcalinidade da matriz cimentícia e, conseqüentemente, repassivar as armaduras. O presente trabalho buscou analisar o comportamento de armaduras com diferentes graus de corrosão, submetidas ao tratamento de realcalinização. Para isso, armaduras de 6,3 mm de diâmetro foram imersas em dois grupos de células, confeccionadas com diferentes tipos soluções e condições de aceleração da corrosão. Para o primeiro grupo (solução 01) foi empregada uma solução saturada de hidróxido de cálcio, enquanto que, para o segundo grupo (solução 02) foi utilizada uma combinação de hidróxido de cálcio, hidróxido de potássio e hidróxido de sódio. Tais soluções foram utilizadas para simular a fase líquida do concreto carbonatado. Após um período de cerca de 20 dias, essas soluções foram carbonatadas com CO₂ até atingirem um pH de 8. Em seguida, o grupo solução 01 permaneceu em ambiente de laboratório durante 7, 28, 40, 70 e 90 dias, enquanto o grupo solução 02 permaneceu por 7, 14, 28, 56 e 90 dias para atender diferentes graus de corrosão. Posteriormente, as soluções carbonatadas foram realcalinizadas através da substituição por soluções novas. Durante todas as etapas, as armaduras foram monitoradas por meio de medidas eletroquímicas, utilizando a técnica de resistência à polarização linear. Tais medidas mostraram os momentos em que as armaduras foram despassivadas, a redução do potencial de corrosão e o aumento da corrente de corrosão, bem como os momentos em que esses parâmetros alteraram seu comportamento devido à realcalinização. Foi possível concluir que, períodos mais longos de exposição a carbonatação dificultou a repassivação das armaduras.

Palavras-chave: corrosão; carbonatação; repassivação

ABSTRACT

Reinforcement corrosion triggered by concrete carbonation is one of the main degradation mechanisms of reinforced concrete structures. The realkalisation treatment is one of the methods applied to recover the alkalinity condition of the cementitious matrix and, consequently, to meet the possible reinforcement repassivation without any significant destructive procedure to the structure. The present work sought to analyze the behavior of reinforcement with different degrees of corrosion, submitted to the realkalisation treatment. For this purpose, 6.3 mm diameter reinforcement bars were immersed into cells divided into two groups (solution 01 and solution 02), each group with both different solutions and corrosion rate conditions. The first group (solution 01) contained a saturated solution of calcium hydroxide and the second group (solution 02) contained a mixed saturated solution of calcium hydroxide, potassium hydroxide and sodium hydroxide. These solutions were used to simulate the liquid phase of the concrete. After a period of twenty days (average), these solutions were carbonated with carbon dioxide gas (CO_2) until reaching a pH close to 8. Then, solution 01 cells remained in laboratory environment for 7, 28, 40, 70 and 90 days, while solution 02 cells remained for 7, 14, 28, 56 and 90 days, in order to meet different corrosion degrees. Afterwards, the carbonated solutions were realkalised by changing the solutions for new ones (no CO_2). The steel bars were monitored throughout these periods by electrochemical measurements using the linear polarization resistance technique. Such measurements showed the moments in which reinforcements bars were depassivated, the increase of the corrosion current, and the corrosion potential decay, as well as the moments in which these parameters changed their behavior due to the realkalisation. Results showed that longer exposure to carbonated media made it difficult to the reinforcement repassivation occurs.

KEYWORDS: corrosion, carbonation, repassivation.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	JUSTIFICATIVA	19
1.2	OBJETIVOS	19
1.2.1	<i>Objetivo Geral</i>	<i>19</i>
1.2.2	<i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>19</i>
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
2.1	CORROSÃO DE ARMADURAS NO CONCRETO	21
2.2	DESPASSIVAÇÃO DAS ARMADURAS NO CONCRETO.....	22
2.3	INDUÇÃO DA CORROSÃO POR CARBONATAÇÃO	24
2.3.1	<i>Fatores que influenciam na carbonatação</i>	<i>25</i>
2.4	TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS PARA AVALIAÇÃO DA CORROSÃO.....	28
2.4.1	<i>Monitoramento do potencial de corrosão</i>	<i>28</i>
2.4.2	<i>Resistência de polarização</i>	<i>29</i>
2.5	TÉCNICAS DE REALCALINIZAÇÃO	31
2.5.1	<i>Realcalinização passiva ou realcalinização química.....</i>	<i>31</i>
2.5.2	<i>Realcalinização Eletroquímica.....</i>	<i>33</i>
2.5.3	<i>Possíveis efeitos colaterais do tratamento por realcalinização eletroquímica</i>	<i>35</i>
2.5.4	<i>Avaliação da eficiência da realcalinização.....</i>	<i>36</i>
2.6	ESTUDO DA CORROSÃO DE ARMADURAS EM SOLUÇÕES.....	37
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	39
3.1	VARIÁVEIS DE ESTUDO	39
3.1.1	<i>Variáveis independentes</i>	<i>39</i>
3.1.2	<i>Variáveis dependentes</i>	<i>39</i>
3.1.3	<i>Variáveis intervenientes</i>	<i>39</i>
3.2	CONFEÇÃO DAS CÉLULAS DE ENSAIO	40
3.2.1	<i>Preparação das armaduras</i>	<i>40</i>
3.2.2	<i>Confeção das células de ensaio</i>	<i>41</i>
3.3	CARBONATAÇÃO E ACELERAÇÃO DA CORROSÃO	42
3.4	MONITORAMENTO DE pH	43
3.5	TRATAMENTO POR REALCALINIZAÇÃO.....	43

3.6	MONITORAMENTO ELETROQUÍMICO	44
3.7	FLUXOGRAMA DE ATIVIDADES	45
4	APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	46
4.1	CÉLULAS COM SOLUÇÃO DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO (Ca(OH)_2)	46
4.1.1	<i>Potencial de corrosão (E_{corr})</i>	46
4.1.2	<i>Densidade de corrente de corrosão (i_{corr})</i>	48
4.2	CÉLULAS COM SOLUÇÃO COMBINADA DE (Ca(OH)_2), (KOH) E (NaOH)	54
4.2.1	<i>Potencial de corrosão (E_{corr})</i>	54
4.2.2	<i>Densidade de corrente de corrosão (i_{corr})</i>	56
4.2.3	<i>Perda de massa acumulada</i>	59
4.3	TAXA DE CORROSÃO	62
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	66
5.1	CONCLUSÕES	66
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	67
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Formação de pilha de corrosão no concreto (Fonte: Andrade, 2001).....	21
Figura 2.2 - Diagrama de Pourbaix para o sistema $Fe-H_2O$ a 25° C (Fonte: CASCUDO,1997).....	23
Figura 2.3 - Representação do fenômeno de carbonatação (Fonte: BAKKER, 1988)...	25
Figura 2.4 - Representação esquemática da difusão de CO_2 em distintas condições de poros (Fonte: BAKKER, 1988).	26
Figura 2.5 - Influência da concentração de CO_2 no ambiente no coeficiente de carbonatação (Fonte: UOMOTO E TAKADA, 1993 <i>apud</i> POSSAN, 2004)... Erro! Indicador não definido.	
Figura 2.6 - Princípio da Realcalinização passiva (Fonte: MATILLA E PENTTI, 1996)	32
Figura 2.7 - Arranjo empregado para técnica de realcalinização química (Fonte: ARAÚJO, 2009 adaptada de ARAÚJO, 2004).	33
Figura 2.8 - Representação esquemática da técnica de realcalinização eletroquímica (Fonte: MIETZ, 1998).	33
Figura 3.1 - Sequência de preparação das armaduras - (a) barra cortada, (b) barra chanfrada e limpa por escovação mecânica, (c) barra limpa quimicamente e com resina epóxi, (d) barra com conexões e pronta para medidas eletroquímicas (Fonte: Autor, 2018).	41
Figura 3.2 - Configuração das células (Fonte: Autor, 2018).	42
Figura 3.3 - Monitoramento de pH (Fonte: Autor, 2018).....	43
Figura 3.4 - Monitoramento eletroquímico das células (Fonte: Autor, 2018).....	44
Figura 3.5- Esquema gráfico das atividades (Fonte: Autor, 2018).....	45
Figura 4.1 - Potencial de corrosão ESC para 7 dias de aceleração da corrosão	46
Figura 4.2 - Potencial de corrosão ESC para 28 dias de aceleração da corrosão	47
Figura 4.3 - Potencial de corrosão ESC para 40 dias de aceleração da corrosão	47
Figura 4.4 - Potencial de corrosão ESC para 70 dias de aceleração da corrosão	47
Figura 4.5 - Potencial de corrosão ESC para 90 dias de aceleração da corrosão	48
Figura 4.6 - Densidade de corrente de corrosão para 7 dias de aceleração da corrosão.	49
Figura 4.7 - Densidade de corrente de corrosão para 28 dias de aceleração da corrosão.....	49
Figura 4.8 - Densidade de corrente de corrosão para 40 dias de aceleração da corrosão.....	49
Figura 4.9 - Densidade de corrente de corrosão para 70 dias de aceleração da corrosão.....	50
Figura 4.10 - Densidade de corrente de corrosão para 90 dias de aceleração da corrosão.	50
Figura 4.11 - Perda de massa acumulada, ao longo do tempo, das células com 7 dias de aceleração da corrosão.....	51
Figura 4.12 - Perda de massa acumulada, ao longo do tempo, das células com 28 dias de aceleração da corrosão.	51
Figura 4.13 - Perda de massa acumulada, ao longo do tempo, das células com 40 dias de aceleração da corrosão.....	52
Figura 4.14 - Perda de massa acumulada, ao longo do tempo, das células com 70 dias de aceleração da corrosão.....	52
Figura 4.15 - Perda de massa acumulada, ao longo do tempo, das células com 90 dias de aceleração da corrosão.....	52
Figura 4.16 - Perda de massa acumulada durante a aceleração da corrosão para os diferentes períodos.....	53
Figura 4.17 - Perda de massa diária após a realcalinização.....	54

Figura 4.18 - Potencial de corrosão ESC para 7 dias de aceleração da corrosão	55
Figura 4.19 - Potencial de corrosão ESC para 14 dias de aceleração da corrosão	556
Figura 4.20 - Potencial de corrosão ESC para 28 dias de aceleração da corrosão	56
Figura 4.21 - Potencial de corrosão ESC para 56 dias de aceleração da corrosão	56
Figura 4.22 - Potencial de corrosão ESC para 90 dias de aceleração da corrosão	567
Figura 4.23 - Densidade de corrente de corrosão para 7 dias de aceleração da corrosão	
.....	58
Figura 4.25 - Densidade de corrente de corrosão para 28 dias de aceleração da corrosão	
.....	58
Figura 4.26 - Densidade de corrente de corrosão para 56 dias de aceleração da corrosão	
.....	59
Figura 4.27 - Densidade de corrente de corrosão para 90 dias de aceleração da corrosão	
.....	5958
Figura 4.28 - Perda de massa acumulada, ao longo do tempo, das células com 7 dias de aceleração da corrosão.....	60
Figura 4.29 - Perda de massa acumulada, ao longo do tempo, das células com 14 dias de aceleração da corrosão.....	60
Figura 4.30 - Perda de massa acumulada, ao longo do tempo, das células com 28 dias de aceleração da corrosão.....	60
Figura 4.31 - Perda de massa acumulada, ao longo do tempo, das células com 56 dias de aceleração da corrosão.....	60
Figura 4.32 - Perda de massa acumulada, ao longo do tempo, das células com 90 dias de aceleração da corrosão.....	60
Figura 4.33 - Perda de massa acumulada durante a aceleração da corrosão para os diferentes períodos de ensaio.....	61
Figura 4.34 - Perda de massa diária após o tratamento de realcalinização	623
Figura 4.35 – Taxa de corrosão antes e depois do tratamento para células em solução de hidróxido de cálcio.	63
Figura 4.36 - Taxa de corrosão antes e depois do tratamento para células em solução com hidróxido de cálcio, potássio e sódio.....	64
Figura 4.37 - Comportamento da taxa de corrosão antes e depois do tratamento para os tipos de soluções.....	65
Figura 4.38 - Taxa de corrosão após a realcalinização para diferentes perdas de massa durante a corrosão acelerada.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Probabilidade de corrosão a partir do E_{corr} (Fonte: ASTM, 2009).....	29
Tabela 2.2 - Critérios de avaliação do grau de corrosão (Fonte: CIGNA <i>et al.</i> , 2003)..	31
Tabela 2.4 - Composição química e pH de soluções alcalinas utilizadas por diferentes pesquisadores para simular a solução contida nos poros do concreto.....	37
Tabela 3.1- Caracterização das barras empregadas (Fonte: Fabricante GERDAU, S.A)	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/agl: Relação água aglomerante

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM: American Society for Testing and Materials

Ca(OH)₂: Hidróxido de cálcio

C₃A: Aluminato tricálcico

CaCO₃: Carbonato de cálcio

CO₂: Dióxido de carbono

E_{corr}: Potencial de corrosão

ECC: Eletrodo de Calomelano Saturado

ESC: Eletrodo de Cobre-Sulfato de Cobre

ECP: Eletrodo de prata-cloreto de prata

GMAT: Grupo de Pesquisa em Materiais e Resíduos da Construção

IFPB: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba

i_{corr}: Densidade instantânea de corrosão

I_{corr}: Intensidade de corrente de corrosão

KOH: Hidróxido de potássio

NaOH: Hidróxido de sódio

pH: Potencial de hidrogênio

RILEM: International Union of Laboratories and Experts in Construction, Materials, Systems and Structures

RAE: Realcalinização eletroquímica

RAQ: Realcalinização química

Rp: Resistência de polarização

1 INTRODUÇÃO

Embora tenha sido desenvolvida uma infinidade de materiais de construção, o concreto ainda representa um dos materiais com função estrutural mais consumidos no mundo, apresentando características que possibilitam a sua utilização nas mais distintas estruturas. No entanto, apesar do uso em larga escala, é crescente o questionamento em relação à durabilidade das estruturas em concreto armado. Um dos principais motivos desse questionamento está relacionado à frequentes casos de estruturas deterioradas pela ação da corrosão das armaduras.

Nessas estruturas de concreto armado, o aço é envolvido pelo concreto. Este conferindo, à armadura, uma espécie de proteção química e física contra o ataque de agentes externos que podem vir a danificar o aço, e, conseqüentemente, a estrutura como um todo. Caso o concreto apresente uma elevada porosidade ou ocorra fissuração, estará, por sua vez, mais suscetível à penetração de agentes agressivos que podem desencadear uma das principais manifestações patológicas identificadas nesses elementos que é a corrosão. Contudo, a corrosão de armaduras também está intimamente ligada ao ambiente onde a estrutura está inserida e ao veículo de transporte do agente agressivo.

Estruturas expostas a ambientes com presença de dióxido de carbono (CO_2), cloretos, águas subterrâneas contaminadas, substâncias ácidas, efluentes industriais, entre outros, estão passíveis à corrosão de armadura (MEHTA e MONTEIRO, 2008; THOMAZ, 2003).

Como forma de prevenir e/ou reabilitar estruturas acometidas pela corrosão de armaduras, de forma não destrutiva, ou seja, sem necessidade de quebra da estrutura antiga de concreto, são comumente empregados três mecanismos visando restabelecer a alcalinidade do concreto, são eles: a difusão e absorção de solução alcalina por ação capilar e de forças hidráulicas (realcalinização química); a produção de íons hidroxila através de reação de eletrólise da água na região das armaduras; e o transporte de uma solução alcalina para o interior dos poros capilares de concreto através de um fluxo eletro-osmótico, que promove o transporte de um líquido através dos poros capilares com a aplicação de um campo elétrico (RILEM, 1994; EGGERS e OLIVEIRA, 1997). As duas últimas representam fenômenos envolvidos na realcalinização eletroquímica.

Todas têm como objetivo principal restabelecer a alcalinidade original do concreto, desta forma interrompendo ou diminuindo o processo de corrosão existente

(MOREIRA, 2006; BANFILL, 1994; ODDEN, 1994). O que difere um tratamento do outro são os mecanismos de transporte das soluções alcalinas para o interior do concreto.

1.1 JUSTIFICATIVA

Embora pesquisadores como Tong *et al.* (2011), tenham estudado a eficiência do método de realcalinização eletroquímica, não foi possível visualizar em sua pesquisa, a capacidade de repassivação das armaduras, apenas uma redução abrupta na taxa de corrosão. Já Bastidas *et al.* (2008) e Miranda *et al.* (2006), questionam a eficiência do tratamento, mesmo Yein e Chang (2005), demonstrando em seu trabalho, que os valores de potencial de corrosão foram restabelecidos, o que é um indicativo que a película de passivação foi reconstituída.

De forma geral, as pesquisas relacionadas ao tema de realcalinização de concretos carbonatados apresentam apenas os fenômenos envolvidos e os mecanismos de ação. Necessitando-se, contudo, de pesquisas que abordem o comportamento do concreto e do aço após a aplicação do tratamento, além de estudos que avaliem a sua eficácia quanto a repassivação da armadura.

Sendo assim, o presente trabalho busca analisar o comportamento e a eficiência do método de tratamento de realcalinização química em relação à repassivação das armaduras com diferentes graus de corrosão.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Estudar a eficiência do tratamento de realcalinização química, através de soluções simulando a fase líquida do concreto carbonatadas, na repassivação de armaduras com diferentes graus de corrosão.

1.2.2 Objetivos Específicos

Como desdobramentos do objetivo geral, os objetivos específicos englobam os seguintes itens:

- Avaliar a eficiência do processo de realcalinização química em soluções simulando a fase líquida de materiais cimentícios;

- Avaliar a perda de massa eletroquímica, em função do tempo de exposição da armadura à carbonatação e aceleração da corrosão;
- Analisar a relação do grau de corrosão da armadura com parâmetros eletroquímicos (E_{corr} , i_{corr});
- Verificar em que condições é possível alcançar a repassivação das armaduras.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho estrutura-se em cinco capítulos, sendo o primeiro deles destinado à introdução e justificativa, que apresentam a problemática abordada, e a relevância do seu estudo, seguida pelos objetivos a serem atingidos.

O segundo capítulo é referente à fundamentação teórica, que apresenta os fenômenos que englobam a corrosão do aço no concreto, as técnicas eletroquímicas de monitoramento da corrosão e as técnicas de realcalinização.

As variáveis envolvidas na pesquisa, a caracterização dos materiais utilizados, o planejamento e a metodologia dos ensaios realizados encontram-se detalhadas no terceiro capítulo, intitulado de Programa experimental.

No penúltimo capítulo, encontram-se a apresentação, análise e discussão dos resultados obtidos do programa experimental.

Por fim, o quinto capítulo destina-se à exposição das conclusões e sugestões para realização de atividades futuras.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CORROSÃO DE ARMADURAS NO CONCRETO

Segundo Gentil (2003), a corrosão caracteriza-se como a deterioração de um material, normalmente metálico, pela ação química ou eletroquímica do meio ambiente onde está inserido, atrelada ou não a esforços mecânicos. Na construção civil, esse fenômeno é aplicado para descrever a deterioração do aço imerso no concreto, que, com o tempo, leva à perda da aderência aço/concreto e à redução da seção transversal da armadura, chegando, muitas vezes, ao colapso da estrutura.

Para Mehta e Monteiro (1994), a transformação do aço metálico em produtos de corrosão, é seguida por um aumento de até 600% do volume original do metal, atribuindo-se a isto a principal causa de expansão e fissuração do concreto. E ainda, pode trazer riscos à integridade dos usuários, principalmente, quando é rápida e progressiva e não há uma devida intervenção (CABRAL, 2000).

No interior do concreto, esse fenômeno caracteriza-se como um processo eletroquímico, onde há reações químicas responsáveis pelo transporte de cargas elétricas. Para constituir uma pilha de corrosão, são essenciais a presença de um eletrólito, podendo ser a própria umidade do concreto, a presença de oxigênio, e uma diferença de potencial (Figura 2.1).

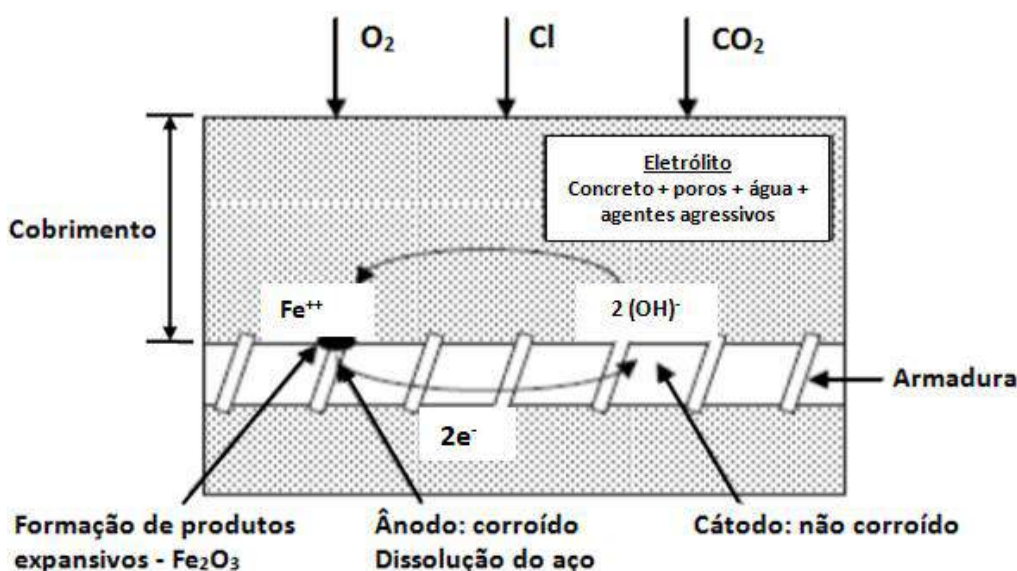
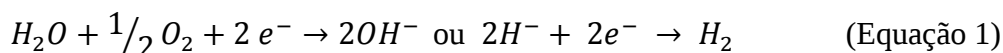


Figura 2.1- Formação de pilha de corrosão no concreto (Fonte: Andrade, 2001).

Presente as condições essenciais para desencadear o processo de corrosão, a superfície da armadura opera como eletrodo capaz de promover reações anódicas e

catódicas, de modo que são produzidos íons ferro e elétrons na reação anódica, onde os íons migram para a solução eletrolítica, o que representa uma reação de oxidação, enquanto os elétrons restantes, por meio da corrente elétrica que se conduz pela armadura, seguem para região catódica, onde são consumidos pelo oxigênio dissolvido na solução, representando uma reação de redução (CASCUDO, 1997). A seguir, estão representadas as reações que ocorrem no cátodo (Equação 1) e no ânodo (Equação 2), respectivamente.



Em meios aerados de pH neutros e básicos (pH maior que 7) a primeira reação a surgir é a catódica (Equação 1), enquanto que para meios desaerado e de pH abaixo de 7, surge a reação anódica (MONTEIRO, 2002), (Equação 2). Dessas reações anódicas são formados produtos volumosos capazes de gerar tensões internas no concreto, acarretando uma posterior fissuração.

Como um dos fatores preponderantes para a instalação e desenvolvimento da corrosão, tem-se a sua despassivação, ou seja, a quebra da película de proteção da armadura. Uma vez livre dessa proteção, a corrosão pode se manifestar.

2.2 DESPASSIVAÇÃO DAS ARMADURAS NO CONCRETO

Em condições normais, as armaduras estão protegidas no interior do concreto por uma película protetora de caráter passivo, originada a partir de reações de oxidação iniciais e preservada pela alta alcalinidade do concreto (HELENE, 1993). Essa película é formada devido ao ambiente altamente alcalino onde o aço está inserido, (pH >12,5), e é resultante de uma rápida e extensa reação eletroquímica onde, na presença de oxigênio, ocorre a formação de um filme de óxidos fino e aderente ao aço, constituindo uma camada protetora na superfície do metal (POURBAIX, 1987 *apud* MEIRA, 2004).

No entanto, esse estado de passividade pode ser perdido, principalmente, devido ao ataque de cloretos ou pela carbonatação. Esta última reduz o pH do concreto e quando essa redução chega nas imediações das armaduras ocorre o desenvolvimento da corrosão (MEIRA, 2004; HELENE, 1993).

Segundo González *et al.* (1996), os principais agentes causadores da despassivação das armaduras são: o dióxido de carbono (CO_2), que penetra pelos poros do concreto e reage com os seus constituintes alcalinos, formando carbonatos, resultando na redução da alcalinidade ($\text{pH} < 9$) da região; os íons cloretos, que são sinônimo de grande preocupação em regiões de ambiente marinho, são capazes de penetrar o concreto e, em concentrações importantes, despassivar a armadura, mesmo o concreto apresentando alcalinidade extremamente elevada (não carbonatado). Todos estes agentes causam a desestabilização da película de passivação, o que implica na perda da capacidade de proteção da armadura e o consequente início do processo de corrosão.

Na Figura 2.2, está representado o diagrama de equilíbrio termodinâmico, desenvolvido por Pourbaix (1987), que relaciona o pH e o potencial do ferro no sistema $\text{Fe} \cdot \text{H}_2\text{O}$ a 25°C , podendo ser extrapolado para o aço. Nesse diagrama, é possível inferir o comportamento termodinâmico do ferro no interior do concreto, ou seja, o estado em que o aço encontra-se em relação a corrosão (imunidade, passivação ou corrosão). Sendo assim, fornece informações de cunho qualitativo, não sendo, portanto, capaz de identificar dados referentes a cinética do processo de corrosão, ou seja, da velocidade das reações de corrosão.

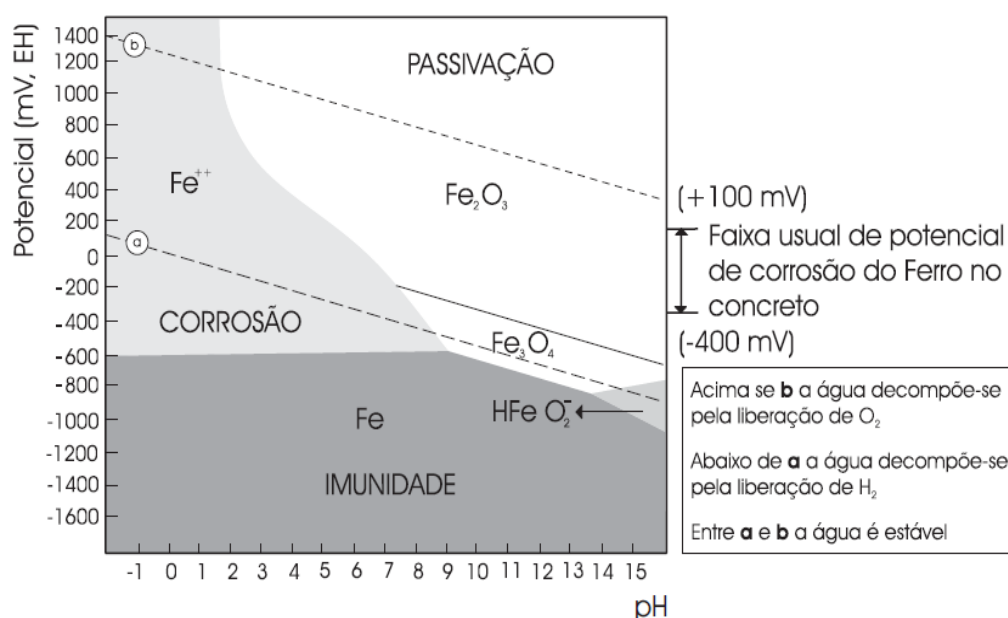


Figura 2.2 - Diagrama de Pourbaix para o sistema $\text{Fe} \cdot \text{H}_2\text{O}$ a 25°C (Fonte: CASCUDO, 1997).

No diagrama, existem três zonas nas quais o metal apresenta condições distintas de atividade. Na região de imunidade, a corrosão é termodinamicamente desfavorável.

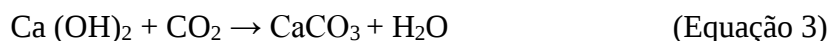
Independente dos valores de pH, para potenciais muito negativos (inferiores a - 600 mV ENH (eletrodo normal de hidrogênio)) o metal não sofrerá corrosão (VAGHETTI, 2005).

Na zona de passivação, ocorre a formação e manutenção da camada delgada de óxidos, capaz de proteger a armadura. Nessa zona a corrosão não é nula, porém, apresenta valores desprezíveis, que são limitados pela resistência ôhmica do filme de passivação (CASCUDO, 1997).

Na região de corrosão, são apresentadas as condições ideais para o desenvolvimento do fenômeno corrosivo.

2.3 INDUÇÃO DA CORROSÃO POR CARBONATAÇÃO

A carbonatação dos materiais cimentícios é consequência da interação entre o dióxido de carbono (CO_2), presente na atmosfera, e principalmente o hidróxido de cálcio que, assim como outros hidróxidos alcalinos resulta das reações de hidratação do cimento. Dessa interação é constituído o carbonato de cálcio (CaCO_3) (BROOMFIELD, 1997). Segundo Cascudo (1997), o processo de carbonatação ocorre inicialmente de forma mais rápida e atenua-se com o tempo. Todo processo demanda várias etapas envolvendo diversas reações secundárias, que podem ser simplificadas pela seguinte Equação (3):



Como consequência da carbonatação, tem-se a redução da alcalinidade do concreto, que originalmente possui valores de pH superiores a 12,5 e passa a apresentar valores inferiores a 8,5 depois das reações de neutralização (MEHTA e MONTEIRO, 2008). A Figura 2.3, a seguir, ilustra, de forma simplificada, o processo de carbonatação.

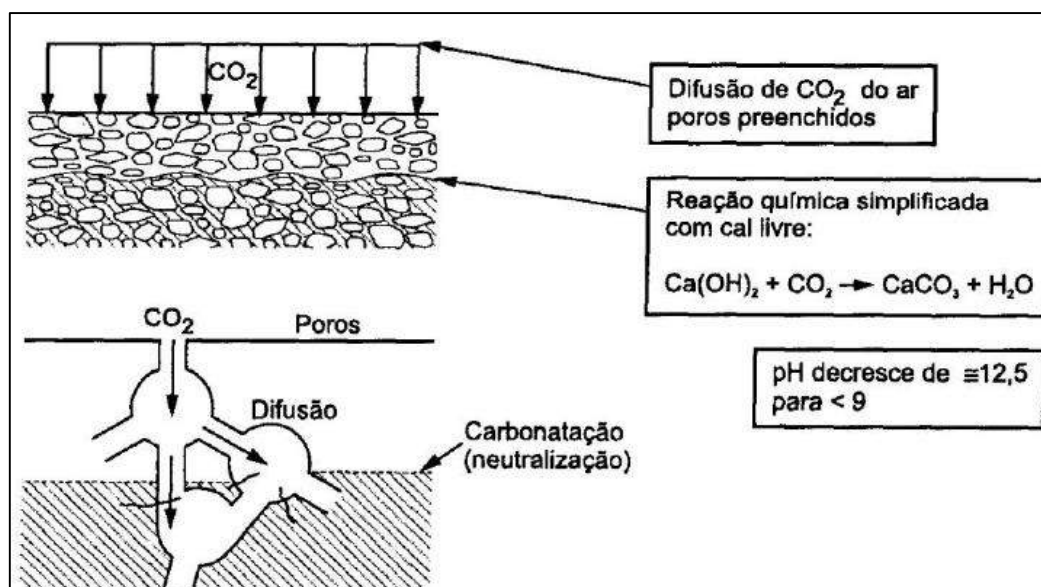


Figura 2.3 - Representação do fenômeno de carbonatação (Fonte: BAKKER, 1988).

Uma das particularidades da carbonatação é a presença de uma frente de avanço capaz de separar o concreto em duas regiões diferentes, com valores de pH distintos: uma com valores em torno de 8 ou inferiores e outra superior a este limite. Como a carbonatação ocorre da superfície para o interior do concreto, essa frente de avanço pode chegar até as armaduras e desestabilizar a película de passivação (ANDRADE, 1982).

Uma vez rompida a película de proteção das armaduras, atrelada a baixa alcalinidade do concreto e na presença de oxigênio e umidade, tem-se, portanto, as condições ideais para o início do processo de corrosão. Segundo Possan (2010), a corrosão devido ao fenômeno de carbonatação é considerada a principal forma de degradação das estruturas de concreto armado, o que conseqüentemente, reduz o tempo de vida útil da estrutura.

2.3.1 Fatores que influenciam na carbonatação

São muitos os fatores que influenciam na carbonatação dos materiais cimentícios, podendo estar relacionados ao ambiente, às condições de ensaio ou às características do concreto. A seguir são apresentados alguns desses fatores.

2.3.1.1 Teor de umidade

A configuração da rede porosa do concreto, também influencia na velocidade de avanço da carbonatação, pois se os poros estiverem totalmente secos o CO_2 irá

permanecer na forma de gás e não reagirá com o cimento hidratado, o que por sua vez, impedirá a ocorrência da carbonatação (VIEIRA, 2003) (Figura 2.4.a). Porém, se os poros estiverem saturados, a carbonatação será insignificante, tendo em vista a baixa difusividade de CO_2 na água (Figura 2.4.b). Segundo Cascudo (1997), o que representa efetivamente uma situação deletéria para a armadura é um concreto com rede porosa parcialmente preenchida com água, uma vez que a carbonatação atingirá profundidades maiores em função do transporte de CO_2 no interior do material e o desenvolvimento das reações de carbonatação avançará em função da presença de água (Figura 2.4.c).

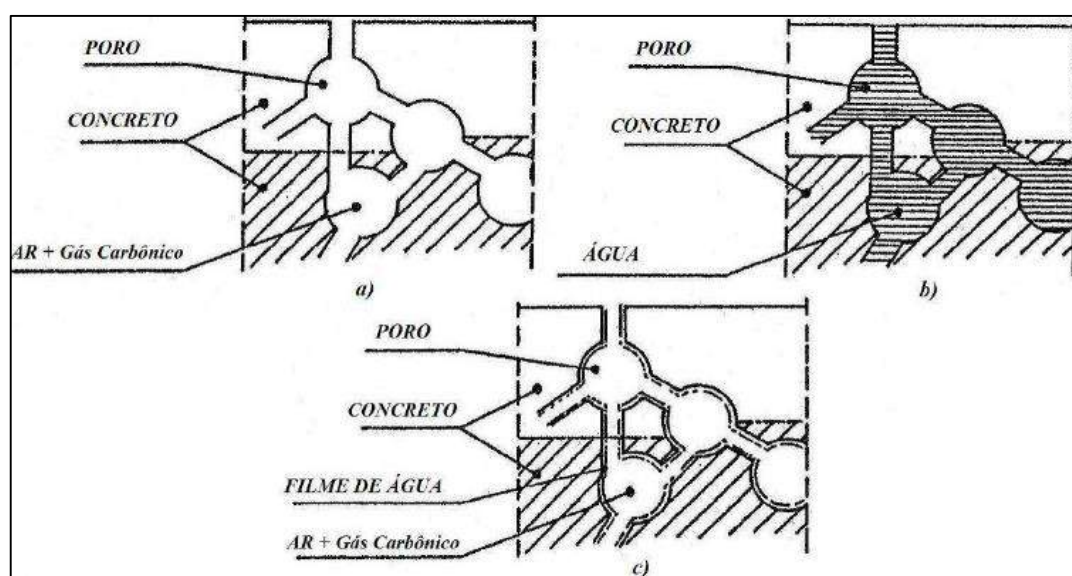


Figura 2.4 - Representação esquemática da difusão de CO_2 em distintas condições de poros
(Fonte: BAKKER, 1988).

Algumas faixas de umidade consideradas ótimas são defendidas por diversos pesquisadores para o desenvolvimento das reações da carbonatação. Para Andrade (1992), essa faixa deve estar entre 50% e 80%, pois valores abaixo desse limite não apresentam umidade suficiente para desenvolvimento das reações, enquanto valores de umidade superiores a 80%, segundo o autor, são tão elevados que retardam o avanço das reações.

2.3.1.2 Relação água/cimento

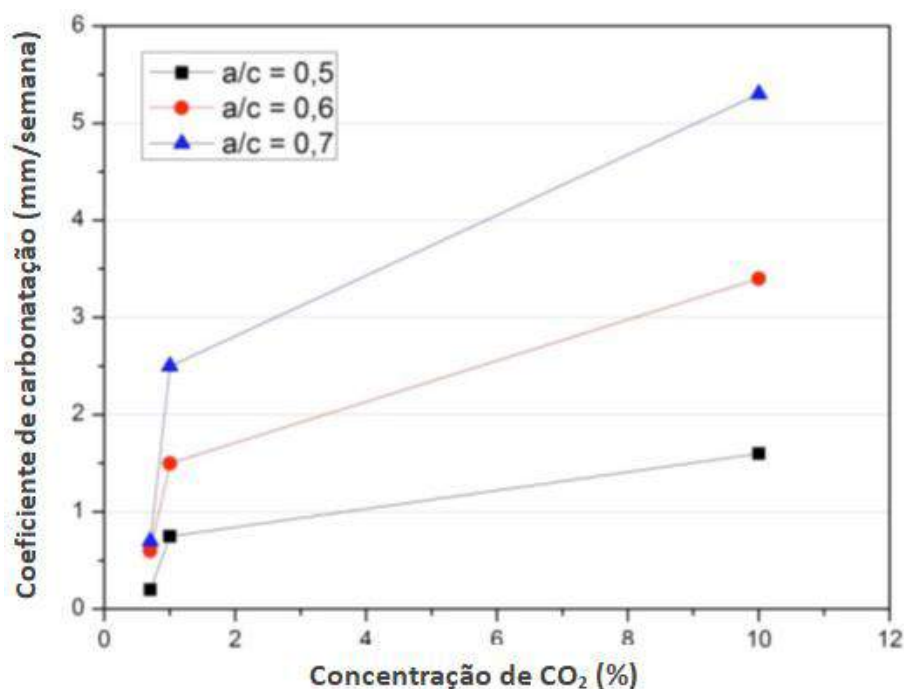
A relação água/cimento influencia diretamente a microestrutura da rede porosa do concreto. Com isso, um aumento na relação a/c resulta em concretos mais porosos. Concretos com essa característica estão mais suscetíveis à penetração de agentes

agressivos, como o CO_2 . Sendo assim, com o aumento da porosidade a velocidade de carbonatação será mais rápida.

Em pastas de cimento, um aumento na relação a/c de 0,4 para 0,8 o volume de poros cresce aproximadamente cinco vezes (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

2.3.1.3 Concentração de CO_2

Em ambientes normais, a concentração de CO_2 apresenta valores em torno de 0,03 a 0,1% (NEVILLE *et al.*, 1993; TAM *et al.*, 2005; THIERY *et al.*, 2007). Na Figura 2.5, está ilustrada a velocidade de avanço da frente de carbonatação, que aumenta em função da concentração de CO_2 do ambiente.



2.5 - Influência da concentração de CO_2 no ambiente no coeficiente de carbonatação (Fonte: UOMOTO E TAKADA, 1993 *apud* POSSAN, 2004)

A concentração de CO_2 é significativamente alterada quando comparada em ambientes fechados e abertos. Como consequência da falta de renovação do ar, as taxas de carbonatação tendem a ser mais elevadas em ambientes fechados.

Segundo Carmona (2005), sendo o processo de carbonatação regido pela difusão do CO_2 da atmosfera para o interior do concreto, quanto mais elevada for a concentração externa maior será a velocidade de carbonatação. Contudo, esse crescimento não segue uma relação linear.

2.4 TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS PARA AVALIAÇÃO DA CORROSÃO

2.4.1 Monitoramento do potencial de corrosão

De acordo com Stratfull (1957), citado por Cascudo (1997), a técnica do potencial foi descrita inicialmente em publicações que datam de 1957, nos Estados Unidos, para monitorar a corrosão do aço no concreto que atacavam os tabuleiros de pontes. A partir de então, passou a ser utilizada tanto nos Estados Unidos quanto em alguns países da Europa, sendo instrumento auxiliar no monitoramento das estruturas de concreto em geral.

O potencial de corrosão representa o grau de facilidade de transferência de carga elétrica entre o aço e a solução contida nos poros do concreto, mediante uma diferença de potencial (HANSSON,1984).

A técnica de potencial de corrosão ou potencial eletroquímico, como também é chamada, consiste em medir a diferença de potencial entre a armadura do concreto e um eletrodo externo, eletrodo de referência, que devem ser conectados a um voltímetro de alta impedância (DEVALAPURA *et al*, 1994). Os eletrodos de referência mais utilizados são:

- Calomelano saturado (ECS): constituído de mercúrio, coberto por uma pasta de cloreto de mercúrio (Hg_2Cl_2) e imerso normalmente em uma solução de cloreto de potássio (KCl), sendo necessária em vários casos a utilização de uma ponte salina;
- Cobre/sulfato de cobre (ESC): consiste em uma barra de cobre envolto numa solução saturada de sulfato de cobre (CuSO_4). Bastante utilizado para leituras de potencial de estruturas envolta por materiais porosos, como oleodutos, aquedutos e concreto.
- Prata/cloreto de prata (ECP): constituída de uma haste de prata envolto em cloreto de prata (AgCl), sendo dispensável a utilização de ponte salina se houver cloretos livres. É bastante utilizado para tamanhos reduzidos;

A norma americana ASTM C 876 (2009), apresenta uma correlação entre intervalos de diferença de potencial, em relação a um eletrodo de cobre/sulfato de cobre (ESC), e a probabilidade de ocorrência de corrosão, Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Probabilidade de corrosão a partir do E_{corr} (Fonte: ASTM, 2009)

Potencial de corrosão (mV-ESC)	Probabilidade de corrosão (%)
Mais positivo que -200	< 10
De -200 a -350	Incerteza em relação à corrosão
Mais negativo que -350	> 90

A técnica é bastante empregada por apresentar vantagens como: não ser destrutiva, ser de simples e rápida aplicação, além de não necessitar de equipamentos de custo elevado e sofisticados (FIGUEIREDO, 1994). No entanto, os dados gerados indicam apenas o estado da armadura, se passivada ou despassivada, ou seja, dados qualitativos. Sendo assim, essa técnica deve ser empregada como complemento a outras que forneçam dados quantitativos, como é o caso da resistência de polarização (ANDRADE, 1992).

2.4.2 Resistência de polarização

O método de Resistência de Polarização (R_p) foi originalmente desenvolvido por Stern e colaboradores, entre os anos de 1957 e 1959. No entanto, somente nos anos 70, Andrade e González introduziram o método para determinar a velocidade de corrosão de armaduras em argamassas e concretos (RODRÍGUEZ *et al*, 1994; CASCUDO, 1997). Desde então, vem sendo bastante empregada por tratar-se de um método de rápida aplicação, e não destrutivo.

A resistência de polarização (R_p) representa a inércia que um sistema possui em desenvolver um processo eletroquímico de corrosão, isto é, um processo de transferência de carga elétrica no metal mediante uma polarização imposta (CASCUDO, 1997).

Considerando o significado de polarização como a aplicação de uma diferença de potencial (ΔE) em torno do potencial de corrosão. Na presente técnica, esta polarização é geralmente de 10 a 20 mV, registrando-se a variação da corrente (ΔI). Estes métodos são denominados de métodos potencioestáticos ou potenciodinâmicos. O caminho inverso, ou seja, variar a corrente e registrar a variação do potencial também é utilizado, sendo denominado de método galvanostático. O valor de R_p será, por definição, o quociente entre as variações de potencial e corrente.

Calculado o valor da resistência de polarização, é possível obter os valores da corrente de corrosão (I_{corr}) pela equação simplificada de Stern-Geary, Equação 4:

$$I_{corr} = \frac{\beta_a \times \beta_c}{2,3 (\beta_a + \beta_c)} \times \frac{\Delta I}{\Delta E} \quad (\text{Equação 4})$$

Como:

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I} \quad (\text{Equação 5})$$

De forma simplificada:

$$B = \frac{\beta_a \times \beta_c}{2,3 (\beta_a + \beta_c)} \quad (\text{Equação 6})$$

Então:

$$I_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde,

β_a e β_c = constantes de Tafel anódica e catódica, respectivamente.

ΔI = variação da corrente

ΔE = diferença de potencial aplicada

B = constante de Stern-Geary

I_{corr} = corrente de corrosão

R_p = resistência de polarização

A partir das constantes de Tafel é possível obter o valor de B, que varia para o caso de corrosão das armaduras de 13 mV a 52 mV. Em função do mecanismo de corrosão envolvido e das características do eletrólito, as constantes de Tafel podem ser de difícil determinação. A comprovação da constante B pode ser explicada por meio de determinações gravimétricas. Para armaduras inseridas no concreto ou em condição ativa, adota-se um valor de 26 para a constante B (ANDRADE e ALONSO, 2004). Enquanto que, armaduras em estado passivo, utiliza-se B igual a 52 (FELIU *et al.*, 2005).

A perda volumétrica de metal por unidade de área e unidade de tempo representa a velocidade ou taxa de corrosão. Dividindo-se o valor da corrente de corrosão pela área de exposição, obtendo-se a velocidade de corrosão por unidade de área, expressa normalmente em $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (Equação 8).

$$i_{corr} = \frac{I_{corr}}{A} \quad (\text{Equação 8})$$

Onde,

i_{corr} = densidade instantânea de corrosão, $\mu\text{A}/\text{cm}^2$;

A = área de exposição a corrosão, (cm^2).

A partir do cálculo da densidade de corrente de corrosão, é possível avaliar o grau de importância da corrosão, seguindo critérios estabelecidos por Cigna *et al.* (2003), representados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Critérios de avaliação do grau de corrosão (Fonte: CIGNA *et al.*, 2003)

Velocidade de corrosão i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Nível de corrosão
< 0,1	Insignificante
0,1 - 0,5	Baixo
0,5 - 1,0	Moderado
$i_{corr} > 1$	Elevado

2.5 TÉCNICAS DE REALCALINIZAÇÃO

De acordo com Cascudo (1997), o fenômeno da carbonatação ocorre de forma lenta, da parte externa para o interior do concreto. Diante disso, existem técnicas que visam interromper esse processo, a realcalinização é uma delas.

Esse método consiste na reposição dos álcalis no interior do concreto, junto às armaduras, objetivando devolver ao concreto seu pH elevado, em torno de 13,5. Quando isso acontece, a tendência à corrosão das armaduras ou o processo que já se encontra instalado são interrompidos. Assim, a realcalinização tanto pode ser utilizada como processo preventivo como corretivo (MOREIRA, 2006).

São dois, os principais mecanismos capazes de restabelecer o pH alcalino do meio que rodeia a armadura: a realcalinização passiva ou química e a realcalinização eletroquímica.

2.5.1 Realcalinização passiva ou realcalinização química

A realcalinização passiva consiste na aplicação de um revestimento cimentício úmido rico em álcalis sobre a estrutura de concreto armado e, devido a grande diferença

de concentração de álcalis entre o revestimento e o interior do concreto, faz com que esses migrem por difusão para o interior do concreto (HELENE, 2008). Na Figura 2.6, tem-se representado o princípio dessa técnica.

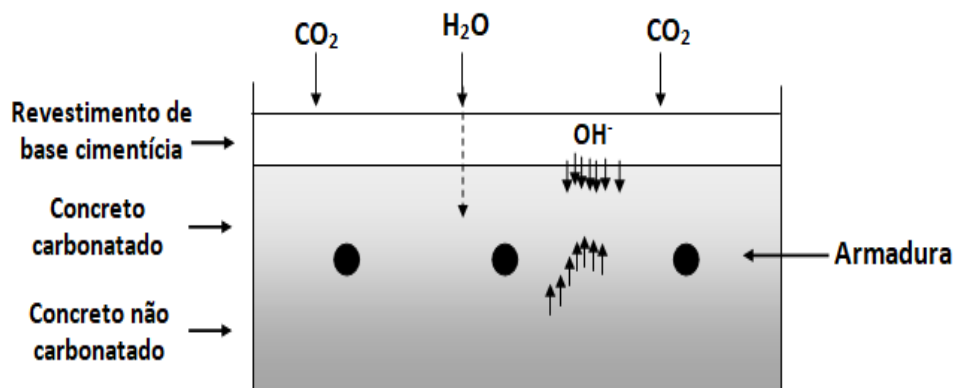


Figura 2.6 - Princípio da Realcalinização passiva (Fonte: MATILLA E PENTTI, 1996)

No entanto, a técnica de realcalinização passiva apresenta algumas desvantagens, quando comparada a outros métodos de realcalinização, pois trata-se de uma técnica que requer um período longo de tempo para ser concluído, cerca de dois anos, além disso, sua eficácia é garantida apenas para profundidades de até 2 cm (GROCHOSKI e HELENE, 2008).

Uma outra maneira de aplicar a realcalinização passiva ou química consiste no emprego de soluções alcalinas sobre a superfície do concreto, visando restabelecer sua alcalinidade através de mecanismos de transporte, como absorção capilar e difusão de soluções alcalinas (ARAÚJO, 2004).

A aplicação do método de realcalinização química mostra-se mais simples quando comparado a realcalinização eletroquímica que necessita de corrente elétrica. O tratamento ocorre por meio da penetração dos álcalis, através das forças hidráulicas, contidas nos poros capilares do concreto. Produtos contidos na água destes poros, por sua vez, reagirão com os íons presentes nos álcalis introduzidos, constituindo novos produtos que serão os responsáveis pelo aumento do pH da região tratada. Esse processo ocorre, da superfície para o interior do concreto até atingir as armaduras, (Figura 2.7).

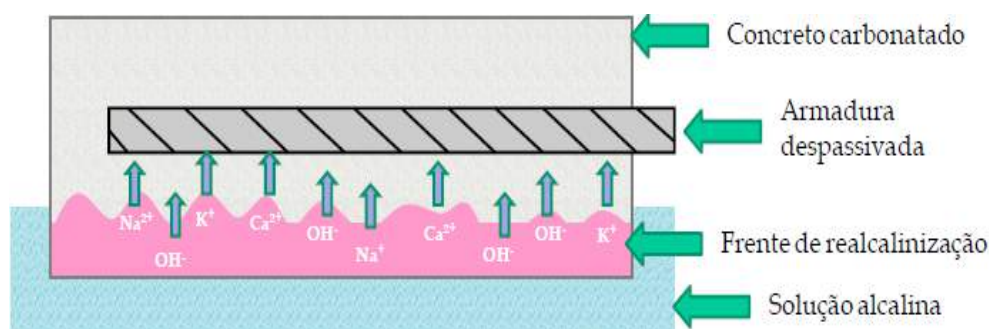


Figura 2.7 - Arranjo empregado para técnica de realcalinização química (Fonte: ARAÚJO, 2009 adaptada de ARAÚJO, 2004).

2.5.2 Realcalinização Eletroquímica

A técnica de recuperação de estruturas de concreto armado por realcalinização eletroquímica foi desenvolvida na Europa nos anos 80. Tem como objetivo principal restabelecer a alcalinidade original do concreto perdida com o processo de carbonatação. Sendo necessária, para isto, a aplicação de um campo elétrico entre a armadura da estrutura e um ânodo externo, na presença de uma solução alcalina (BANFILL, 1994; ODDEN, 1994) (Figura 2.8).

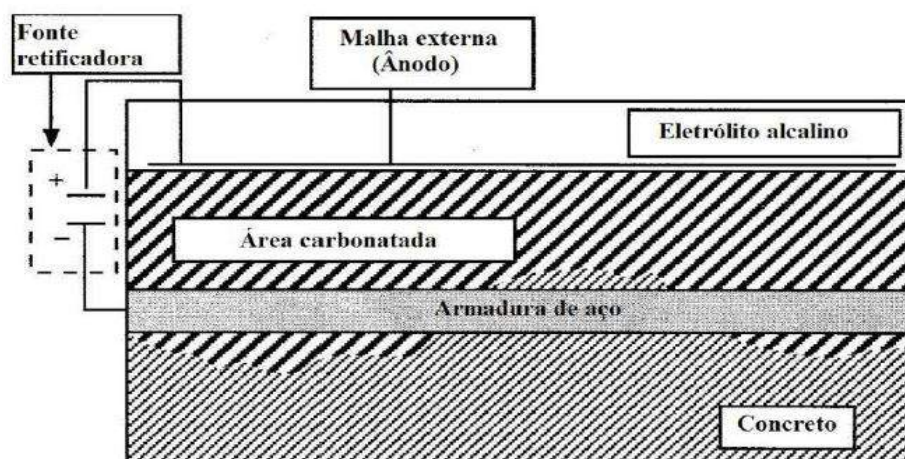


Figura 2.8 - Representação esquemática da técnica de realcalinização eletroquímica (Fonte: MIETZ, 1998).

Normalmente, é adotado, como ânodo, uma malha de titânio e como eletrólito uma solução de carbonato de sódio (Na_2CO_3) a 1 molar, que através do fluxo eletro-osmótico é transportada para o interior do concreto carbonatado. Essa solução, quando no concreto, é capaz de manter um pH em torno de 11, desta forma possibilitando a formação e manutenção da película de proteção nas armaduras.

A realcalinização eletroquímica é de rápida aplicação, podendo variar a sua necessidade de operação em função da profundidade de carbonatação, da qualidade e espessura do concreto de cobrimento, da disposição das armaduras e da distribuição da corrente (CABRAL, 2000). O tratamento cessa após o restabelecimento da alcalinidade do concreto de cobrimento, sem a fragmentação estrutural do concreto antigo, como ocorre na execução dos reparos localizados, e sem o emprego permanente de corrente elétrica, como é requerido na proteção catódica. Para Mietz (1998) este é o método mais eficaz para a restauração da película passivadora, perdida com a carbonatação do concreto.

O tratamento por realcalinização eletroquímica de estruturas reais pode ocorrer através da impregnação de uma pasta, constituída da mistura de uma solução alcalina com fibras de celulose. Outra maneira é introduzindo-se em tanques a malha externa e a solução alcalina (MIETZ, 1998). Como técnica alternativa, tem-se o uso de mantas de feltro que são embebidas de solução alcalina e em seguida projetadas sobre as superfícies a serem tratadas, necessitando serem molhadas para absorção do eletrólito pelo concreto (SILVA, 2007).

Este tratamento possibilita a interrupção do problema da carbonatação do concreto armado ainda na fase de iniciação, minimizando os custos de intervenção e prolongando a vida útil da estrutura (SILVA, 1996). Sua eficácia está intimamente ligada à extensão de área tratada. Uma vez que, segundo Gonçalves *et al.* (2003) quanto menor a zona tratada, mais eficiente será o controle do sistema e a constatação da ausência de fugas de corrente. Desta forma, áreas maiores que 100 m² não são recomendadas. Além do mais, se em uma mesma estrutura existem partes que necessitam de diferentes densidades de corrente, que variam normalmente de 0,8 a 2,0 A/m², e possuem diferenças significativas de resistividade, as regiões devem ser tratadas separadamente.

Para avaliação da eficiência do tratamento, a metodologia geralmente utilizada é a aspersão de indicadores químicos (fenolftaleína ou a timolftaleína) de pH para verificação da alcalinidade do concreto que sofreu a realcalinização. Pela coloração do concreto onde foi aspergido o indicador químico é possível determinar a profundidade da frente de realcalinização. Como nenhum destes dois métodos indicam eficiência quanto a repassivação das armaduras, é necessário o uso de outros mecanismos para determinação da eficácia do tratamento. Sendo assim, para avaliação da repassivação das armaduras, técnicas de resistência de polarização e potencial de corrosão podem ser empregadas (ELSENER, 2001). Em laboratório, alguns estudos realizados empregaram

as técnicas de curvas de polarização (GONZALEZ *et al.* 2000; MIRANDA *et al.*, 2003) e de impedância eletroquímica (ARAÚJO, 2009).

2.5.3 Possíveis efeitos colaterais do tratamento por realcalinização eletroquímica

Os possíveis efeitos colaterais da realcalinização eletroquímica envolvem a reação álcali-agregado, a redução da aderência entre a armadura e o concreto, a fragilização da armadura, a perda de aderência de revestimentos aplicados e a alteração de propriedades físicas e mecânicas do concreto (BANFILL, 1997).

Com exceção da reação álcali-agregado, todos os resultados tidos como negativos podem ser evitados ou conservados em um nível aceitável pela aplicação de baixas densidades de corrente e baixos valores para a densidade de carga passante total (MIETZ, 1998).

2.5.3.1 Reação álcali-agregado (RAA)

Como o processo de realcalinização conduz a incorporação de álcalis no concreto, esse método é capaz de favorecer a reação álcali-agregado, uma vez que estejam presentes no concreto agregados potencialmente reativos. Estes configuram o foco do problema e, juntamente com a umidade e alcalinidade são capazes de tornar o concreto suscetível à reação.

Para Miller (1998) o que configura um risco da aplicação da técnica de realcalinização é a possível migração de álcalis da área realcalinizada para área onde não foi carbonatada, com condições ideais para ocorrência da reação álcali-agregado.

Constatada a existência de agregados potencialmente reativos e a possibilidade de RAA, o tratamento por realcalinização deve ser evitado, pois pode haver uma maximização da reação.

2.5.3.2 Perda da aderência de revestimentos aplicados sobre o substrato realcalinizado eletroquimicamente

Após a aplicação do tratamento de realcalinização, é necessário o emprego de algum mecanismo capaz de evitar a recarbonatação da estrutura tratada. Sendo assim, costuma-se realizar pinturas nestas regiões. No entanto, tem-se observado após a

aplicação desta proteção, a presença de fissuras, bolores e, sobretudo, a formação de eflorescência (acúmulo de sais) na superfície dos concretos.

Tais problemas podem resultar da fraca aderência da película de tinta devido a superfície do concreto ser altamente alcalina, pelo aumento da pressão de vapor no interior do concreto e em virtude do acúmulo de água provocado pelo sal no interior da estrutura, desta forma modificando o equilíbrio entre o concreto e sistema de pintura.

O emprego de outro eletrólito capaz de desempenhar a mesma função de repassivação das armaduras, mas que diferentemente do carbonato de sódio (Na_2CO_3) não, provocasse o acúmulo de sais na superfície da estrutura tratada, seria a solução para esta perda de aderência (FOSROC, sd).

2.5.3.3 Alteração das propriedades do concreto carbonatado

Devido à incorporação de nova substância no concreto é possível que, com o tratamento, ocorram alterações em suas propriedades. Em estudos realizados por Al-Kadhimi *et al* (1996), apud Mietz (1997) observou-se que, nos poros do concreto, por exemplo, ocorre o acúmulo dos produtos (de eletrólito) desse tratamento, como resultado. Os poros tornam-se menores e menos interconectados. E por esse motivo, tem-se a redução da absorção de água, absorção capilar e absorção superficial do concreto tratado.

Banfill (1997) constatou em pesquisa, um aumento expressivo da resistência à flexão, à compressão e de módulo de elasticidade dinâmico de espécimes carbonatadas e realcalinizados, em relação ao concreto de referência.

2.5.4 Avaliação da eficiência da realcalinização

Alguns estudos têm sido realizados buscando avaliar a eficiência da realcalinização e o comportamento da estrutura após o tratamento. Tong *et al.* (2012) estudou a eficiência de um tratamento de realcalinização usando ânodos de sacrifícios aplicados em um concreto degradado pela carbonatação, sendo a eficiência demonstrada a partir do aumento do pH da estrutura, uma ligeira diminuição na atividade de corrosão da barra de aço e a matriz cimentícia permaneceu praticamente inalterada.

Entretanto, Miranda *et al.* (2006) questionam os tratamentos de realcalinização, em relação a eficiência quanto a repassivação das armaduras. Em pesquisa desenvolvida por Yein & Chang (2005), após a reconstrução da película passivadora sobre o vergalhão de aço a taxa de corrosão instantaneamente diminui drasticamente.

2.6 ESTUDO DA CORROSÃO DE ARMADURAS EM SOLUÇÕES

Nos estudos em laboratório, com o objetivo de simplificar o manejo experimental, uma vez que o fenômeno de corrosão no interior do concreto é um processo complexo, que envolve muitas variáveis, como por exemplo, o tempo de cura do concreto, relação água/cimento, entre outras, muitos autores simulam apenas a fase líquida do concreto, ou seja, trabalham com a barra de aço envolvida por uma solução atuando como a fase líquida contida nos poros do concreto.

Esse tipo de configuração é usado pelos pesquisadores desde os anos 60 (KAESCHKE, 1959). Na Tabela 2.3, são ilustradas algumas das soluções empregadas por pesquisadores, para simular a fase líquida dos poros do concreto.

Tabela 2.3 - Composição química e pH de soluções alcalinas utilizadas por diferentes pesquisadores para simular a solução contida nos poros do concreto.

Composição química	Concentração	pH	Referência
Hidróxido de sódio (NaOH)	0,1 M	12,8	Moreno <i>et al.</i> (2004), Hueta <i>et al.</i> (2005)
Hidróxido de cálcio (Ca(OH) ₂)	Saturado	~ 12,5	Hueta <i>et al.</i> (2005), Jiang <i>et al.</i> (2012), Dong <i>et al.</i> (2011), Miranda <i>et al.</i> (2003), entre outros.
Carbonato de cálcio (CaCO ₃)	0,1 M	8,3	Hueta <i>et al.</i> (2005)
Hidróxido de potássio (KOH)	2,5 M	13,0	Mietz (1998)
	150 g/l	13,0	Araújo (2004) e Sá (2006)
NaOH + Ca(OH) ₂	0,3 M + saturado	13,42	Moragues <i>et al.</i> (1986), Pina <i>et al.</i> (2014)
KOH + Ca(OH) ₂	0,3 M + saturado	13,35	Moragues <i>et al.</i> (1986)
NaOH + KOH + Ca(OH) ₂	0,01 M + 0,05 M + saturado	12,7	Resende <i>et al.</i> (2017)
	0,01 M + 0,05 M + saturado	12,66	Bolina <i>et al.</i> (2013)
	1 M	13,12	Jiang <i>et al.</i> (2014)
	8,33 g/l + 23,3 g/l + 2g/l	13,6	Li e Sagués (1999)
	8 g/l + 22,4 g/l + saturado	13,3	Ghods <i>et al.</i> (2009)
NaOH + KOH + Ca(OH) ₂ + NaHCO ₃	1 M + 1 M + 1 M + 0,02 M	12,71	Jiang <i>et al.</i> (2014)
NaOH + KOH + Ca(OH) ₂ + CaSO ₄ + H ₂ O	0,1 M + 0,3 M + 0,03 M + 0,002 M	13,1	Zhang <i>et al.</i> (2015)

São diversas as composições e tipos de soluções empregadas na literatura, cada uma buscando representar, na visão dos autores, de forma mais realista as condições da fase líquida do concreto. No entanto, elementos químicos como o hidróxido de cálcio, o hidróxido de potássio e hidróxido de sódio estão sempre presentes, por representarem os principais produtos das reações de hidratação do cimento, conferindo ao concreto um ambiente altamente alcalino (CASCUDO, 1997; MEHTA e MONTEIRO, 2008). Outro aspecto a ser comentado é que, os pHs apresentados pelas soluções identificadas na Tabela 2.3 correspondem a uma faixa de pH usualmente conferida pelos cimentos comercialmente encontrados.

Esse tipo de procedimento não só pode reproduzir o ambiente químico do concreto, como também reduzir o período de ensaio em laboratório. Essa foi a opção empregada no presente estudo.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para atingir resultados acerca da capacidade de repassivação das armaduras com diferentes graus de corrosão, foram cumpridas algumas etapas: confecção das células de ensaio, carbonatação acelerada, realcalinização e monitoramento eletroquímico. Todas estas etapas são descritas neste capítulo.

3.1 VARIÁVEIS DE ESTUDO

3.1.1 Variáveis independentes

Entende-se por variável independente aquela que exerce influência sobre outra variável, interferindo nos resultados desta. Foram definidas como variáveis independentes para este trabalho:

- Período de aceleração da corrosão - Foram definidos períodos distintos para exposição das células a carbonatação acelerada: um, sete, quatorze, vinte e oito, quarenta, cinquenta e seis, setenta e noventa dias.
- Alcalinidade da solução - Para simular a fase líquida do concreto, foram utilizadas dois tipos de solução: uma solução de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e uma outra composta a partir da combinação do hidróxido de cálcio, hidróxido de potássio (KOH) e hidróxido de sódio (NaOH).

3.1.2 Variáveis dependentes

Considerando que as variáveis dependentes são influenciadas ou determinadas pelas independentes descritas anteriormente, tem-se como variável dependente para este trabalho:

- Estado de atividade das armaduras: passiva ou ativa.

3.1.3 Variáveis intervenientes

Definidas como as variáveis que estão entre as independentes e as dependentes, estabelecendo uma relação, são representadas neste trabalho por:

- Potencial de corrosão (E_{corr});
- Densidade instantânea de corrente de corrosão (i_{corr})

3.2 CONFECÇÃO DAS CÉLULAS DE ENSAIO

3.2.1 Preparação das armaduras

Foram utilizadas armaduras do tipo barra nervurada (aço CA 50), de diâmetro igual a 6,3 mm, proveniente da Gerdau Aço-norte S.A. As características físicas e mecânicas das barras foram disponibilizadas pela empresa, podendo ser visualizadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1- Caracterização das barras empregadas (Fonte: Fabricante GERDAU, S.A)

Características Analisadas		Aço CA - 50
Composição Química (%)	Fe	98,483
	Ca	0,481
	P	0,017
	S	0,015
	Si	0,223
	Mg	0,76
	Outros	0,021
Resistência Característica ao Escoamento - f_y (MPa)		500
Limite de resistência (MPa)		≈540
Módulo de Elasticidade (GPa)		298,7

Antes do emprego destas barras, com o objetivo de eliminar qualquer indício de corrosão presente na superfície destes materiais e delimitar a região de estudo, alguns procedimentos foram realizados, conforme se descreve a seguir.

Inicialmente, as barras foram cortadas em segmentos de 100 mm, as quais, foram chanfradas nas extremidades, com esmeril, e limpas mecanicamente com escova de cerdas de aço. Em seguida, foram submetidas a uma limpeza química, tendo como referência a norma americana ASTM G1 (2011), conforme descrito a seguir. Com o auxílio de um banho ultrassônico, as barras permaneceram imersas em uma solução, de ácido clorídrico e água deionizada na proporção de 1:1, com 3,5 g/l de hexametilenotetramina, durante 15 minutos. Após esse período, foram enxaguadas em água corrente com o auxílio de uma escova de cerdas de plástico, retirando todos os

resíduos ainda presentes, para, então, serem mergulhadas em acetona, por dois minutos, e secas com ar quente.

Após todo processo de limpeza, as barras foram pintadas com resina epóxi, deixando apenas um comprimento de 30 mm de exposição. Uma vez endurecida à resina, as barras passaram novamente pelo processo de limpeza química, descrito anteriormente.

Para finalizar a preparação, foram realizadas conexões na parte superior das armaduras, utilizando-se fios de cobre, desta forma possibilitando, posteriormente, a leitura das medidas eletroquímicas (Figura 3.1).

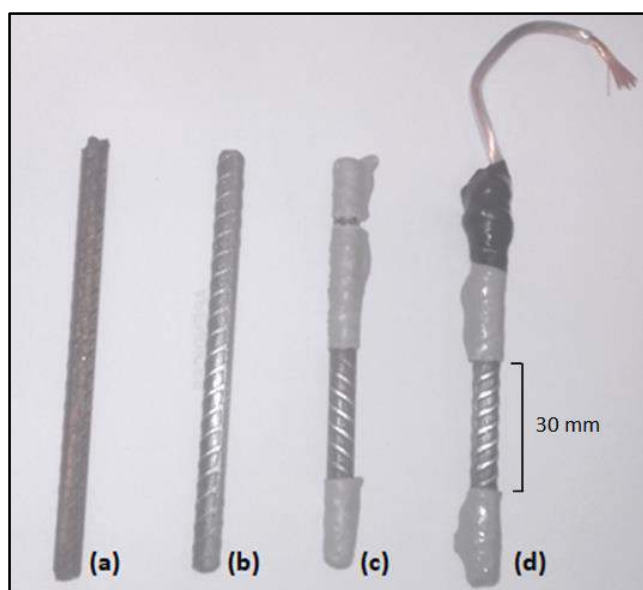


Figura 3.1 - Sequência de preparação das armaduras - (a) barra cortada, (b) barra chanfrada e limpa por escovação mecânica, (c) barra limpa quimicamente e com resina epóxi, (d) barra com conexões e pronta para medidas eletroquímicas (Fonte: Autor, 2018).

3.2.2 Confecção das células de ensaio

Para cada condição de aceleração da corrosão, foram elaboradas seis células, divididas em dois grupos distintos, segundo o tipo de solução empregada.

As células seguiram o arranjo apresentado na Figura 3.2, onde o eletrodo de trabalho corresponde à armadura descrita na seção 3.2.1. e o contra-eletrodo empregado foi uma haste de carbono/grafite. Compendo ainda o arranjo, foram utilizadas, em cada uma das células 370 ml de solução alcalina, sendo um grupo composto por solução saturada de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) que contém pH entorno de 12,5 (MORENO *et al.*, 2004), e um outro grupo com solução alcalina composta a partir da combinação de

hidróxido de cálcio, hidróxido de potássio (KOH) e hidróxido de sódio (NaOH), na proporção de 2g, 10,5g e 3,7g, respectivamente, para um litro de água destilada, conferindo um ambiente altamente alcalino ($\text{pH} \approx 13,5$).

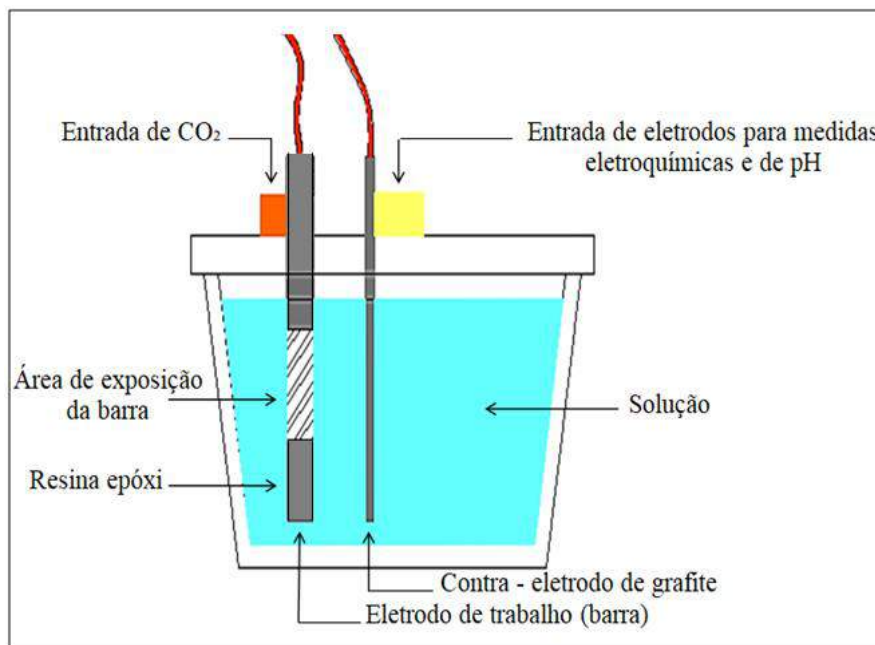


Figura 3.2 - Configuração das células (Fonte: Autor, 2018).

Ambas as soluções simulam a fase aquosa dos poros do concreto. A escolha por estas soluções deu-se por representarem a fase líquida dos produtos à base de cimento, e por responderem pela elevada alcalinidade do concreto (CASCUDO, 1997; MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Uma vez confeccionadas, as células foram conservadas hermeticamente fechadas em ambiente de laboratório ($\text{UR} \approx 65 \pm 10\%$ e $T \approx 25 \pm 5^\circ\text{C}$) e constantemente monitoradas através de medidas eletroquímicas das barras e de medidas de pH das soluções.

3.3 CARBONATAÇÃO E ACELERAÇÃO DA CORROSÃO

Antes das etapas de carbonatação e aceleração da corrosão, as armaduras foram mantidas imersas nas soluções ($(\text{Ca}(\text{OH})_2 / (\text{Ca}(\text{OH})_2, (\text{KOH}) \text{ e } (\text{NaOH}))$) por um período de aproximadamente vinte dias, até a constatação da estabilização dos parâmetros eletroquímicos e confirmação do estado de passivação das armaduras.

Após este procedimento, realizou-se a carbonatação das soluções. Para tal, foi introduzido, no interior das células, um gás composto por 95% de gás nitrogênio (N_2) e

5% de gás carbônico (CO_2). Essa ação resultou na redução do pH das soluções para valores em torno de 8.

Após a identificação da despassivação e início do processo de corrosão nas armaduras, foram estabelecidos períodos distintos para permanência das células em solução carbonatada (período de aceleração da corrosão). Onde, para as células com solução de hidróxido de cálcio (solução 01), foram estabelecidos períodos de aceleração da corrosão de 7, 28, 40, 70 e 90 dias. Já para as células com solução 02 (mistura de $(\text{Ca}(\text{OH})_2, (\text{KOH})$ e (NaOH)) a permanência foi de 7, 14, 28, 56 e 90 dias.

3.4 MONITORAMENTO DE pH

O potencial de hidrogênio (pH) é usualmente empregado para avaliar o grau de alcalinidade de uma substância aquosa. Na presente pesquisa, foi utilizado um pHmetro de bancada para monitoramento do pH das células durante o processo de carbonatação, aceleração da corrosão e período de realcalinização (Figura 3.3). As medidas foram realizadas semanalmente.



Figura 3.3 - Monitoramento de pH (Fonte: Autor, 2018)

3.5 TRATAMENTO POR REALCALINIZAÇÃO

O tratamento por realcalinização foi efetuado pela substituição da solução carbonatada por uma solução alcalina com as mesmas características da solução inicialmente empregada. Isso aconteceu após o cumprimento dos períodos de aceleração

da corrosão. Após esse tratamento, as células permaneceram sob monitoramento eletroquímico por aproximadamente 200 dias.

3.6 MONITORAMENTO ELETROQUÍMICO

Para realização das medidas eletroquímicas foi utilizado um eletrodo de referência de cobre/sulfato de cobre (ESC), um contra-eletrodo de carbono/grafite e o eletrodo de trabalho (armadura em estudo). Todas as medidas foram realizadas com as células dentro de uma gaiola de Faraday, para impedir qualquer interferência do meio externo. Completando o sistema, foi empregado um potenciostato de bancada, modelo GILL ACM Instruments, como pode ser visto na Figura 3.4.

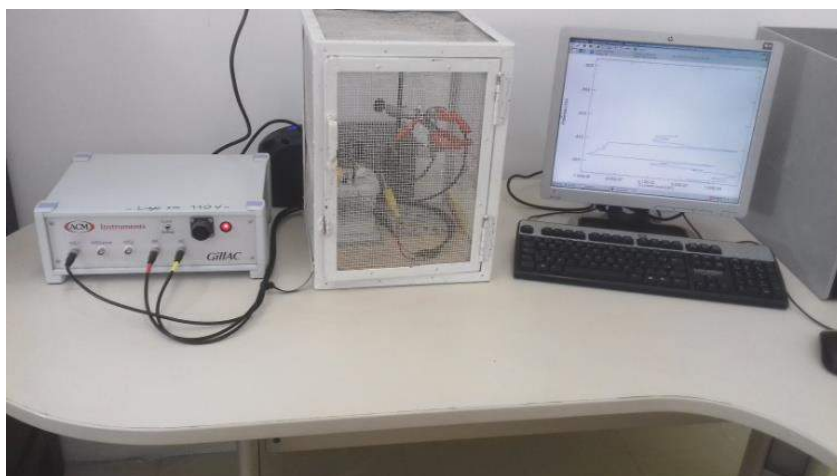


Figura 3.4 - Monitoramento eletroquímico das células (Fonte: Autor, 2018).

As técnicas de monitoramento eletroquímico da corrosão utilizadas nesse estudo foram: medida de potencial de corrosão em circuito aberto, que identifica, de forma qualitativa, o estado de atividade da armadura, e a técnica eletroquímica de resistência de polarização (R_p). A técnica de resistência de polarização (R_p) tem sido amplamente empregada na literatura, com o objetivo de detecção da despassivação das armaduras (ANGST e VENNESLAND, 2008) e alia uma resposta eficiente em relação à identificação da instalação do processo de corrosão com a rapidez das medidas.

Essas medidas foram realizadas durante o período de estabilização inicial, onde ocorreu a formação da capa passiva, após a carbonatação do meio, ao longo do período de aceleração da corrosão e após o tratamento de realcalinização. Como critérios para identificação da despassivação das barras de aço adotaram-se potenciais mais

eletronegativos que -350 mV (ESC) e densidade de corrente de corrosão superior a $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (ANDRADE e GONZÁLEZ, 1981). Ambos observados de modo simultâneo e confirmados através de duas medidas consecutivas de cada um desses parâmetros.

3.7 FLUXOGRAMA DE ATIVIDADES

A Figura 3.5 apresenta, de forma resumida, as atividades desenvolvidas no presente trabalho.

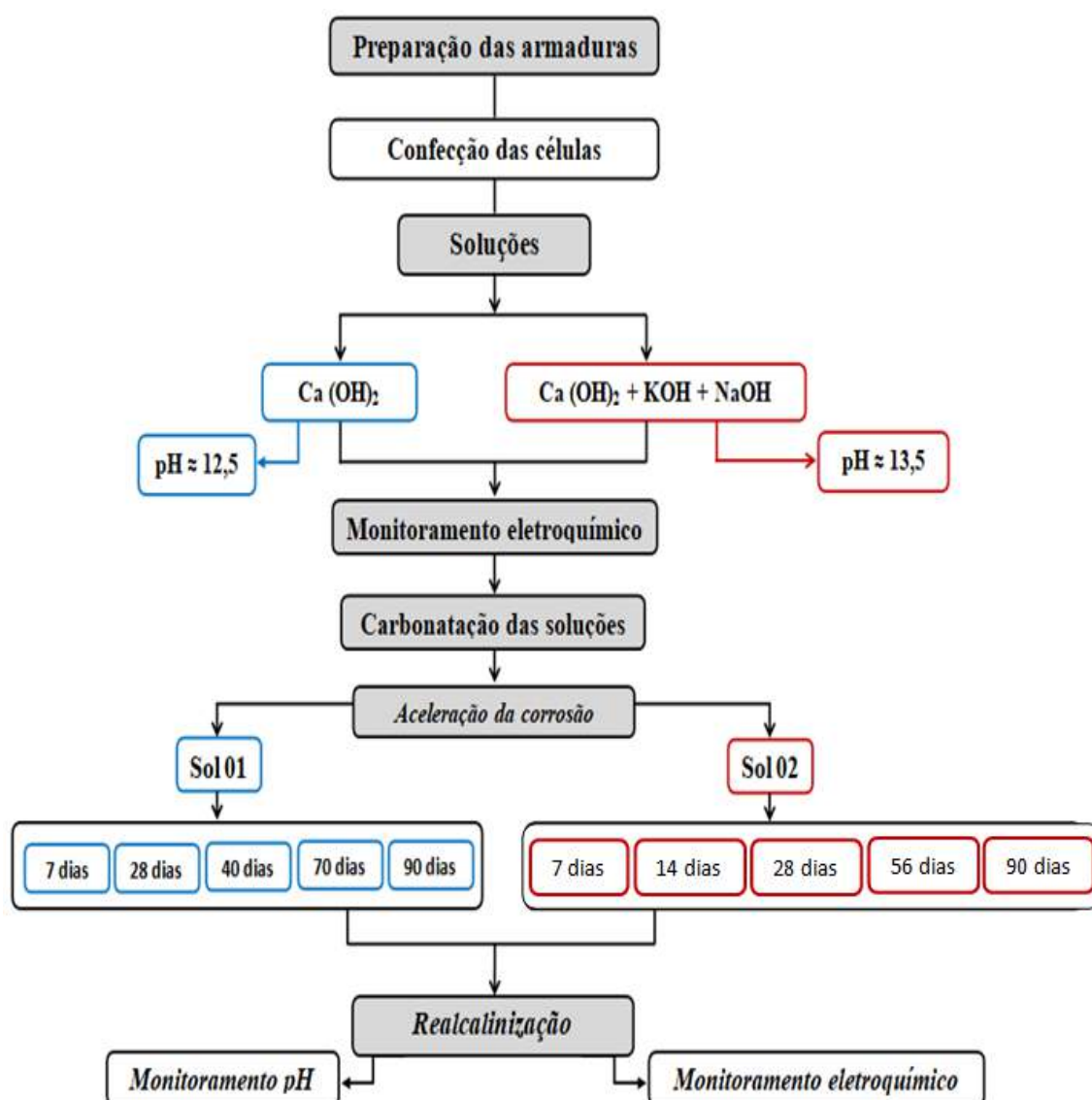


Figura 3.5- Esquema gráfico das atividades (Fonte: Autor, 2018).

4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são expostos, analisados e discutidos os resultados do monitoramento eletroquímico realizado durante todo o desenvolvimento da pesquisa. Primeiramente são apresentados os resultados das células com hidróxido de cálcio e em seguida os resultados referentes às células em solução composta pelos hidróxidos de cálcio, potássio e sódio.

Para uma melhor interpretação dos resultados, empregam-se faixas de probabilidade de corrosão recomendadas pela norma ASTM C 876 (2009), para o eletrodo de referência de cobre-sulfato de cobre (ESC). Para as medidas de densidade de corrente de corrosão, a classificação empregada foi a proposta por Cigna *et al.* (2003).

4.1 Células com solução de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2)

4.1.1 Potencial de corrosão (E_{corr})

As Figuras 4.1 a 4.5 apresentam o comportamento do potencial de corrosão e o pH médio das células em solução de hidróxido de cálcio, para condição de aceleração da corrosão aos 7, 28, 40, 70 e 90 dias.

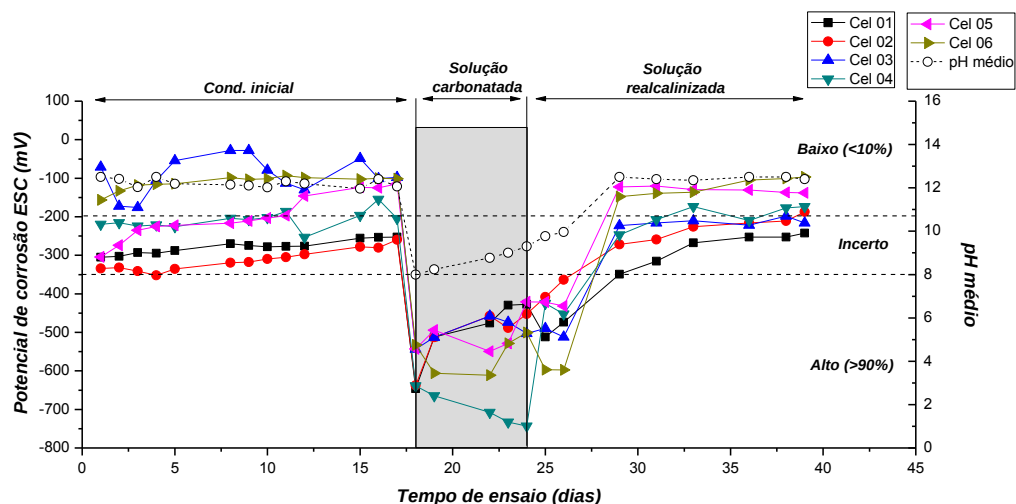


Figura 4.1 - Potencial de corrosão ESC para 7 dias de aceleração da corrosão

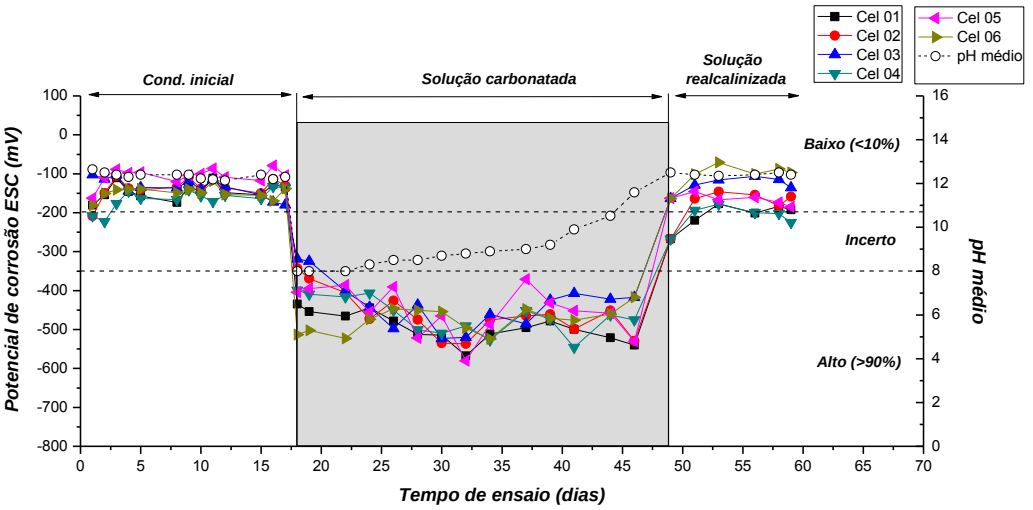


Figura 4.2 - Potencial de corrosão ESC para 28 dias de aceleração da corrosão

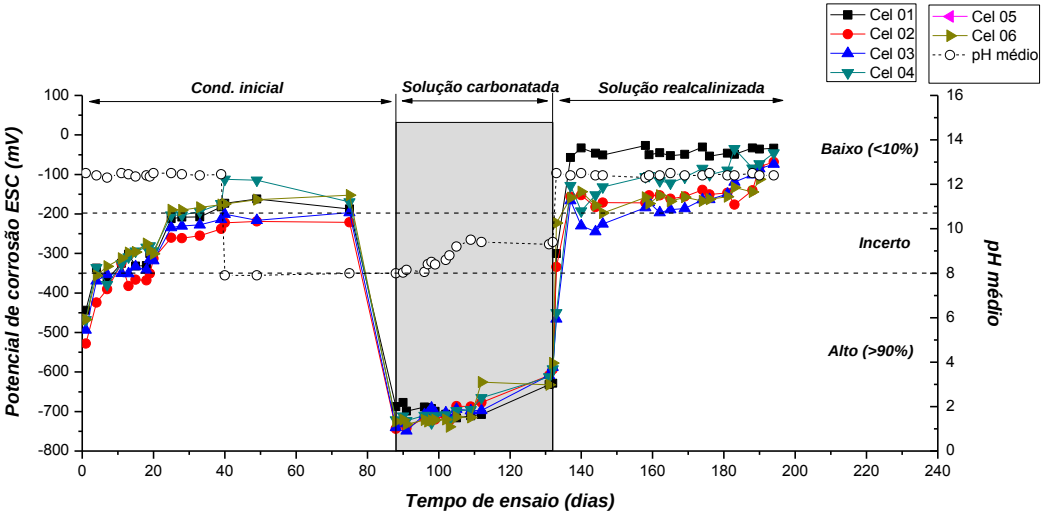


Figura 4.3 - Potencial de corrosão ESC para 40 dias de aceleração da corrosão

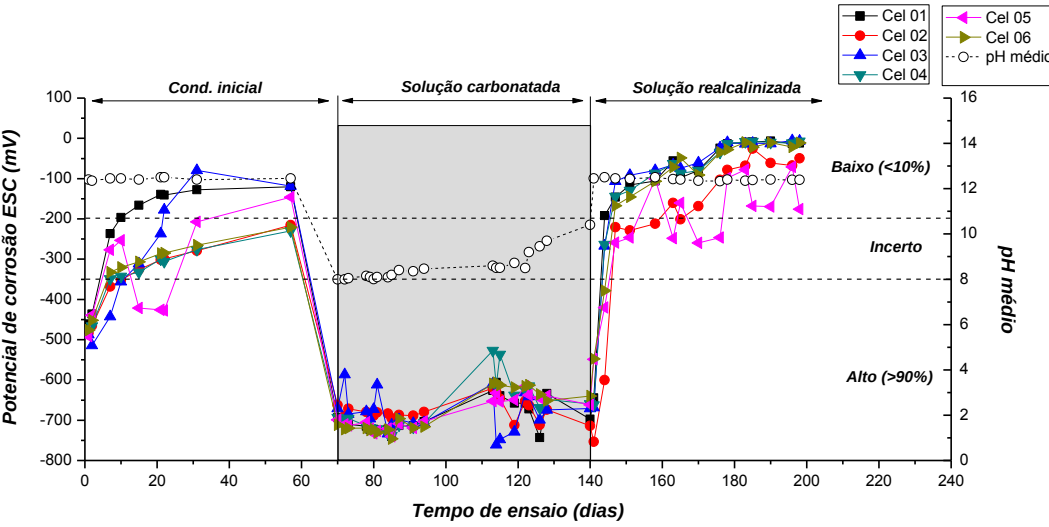
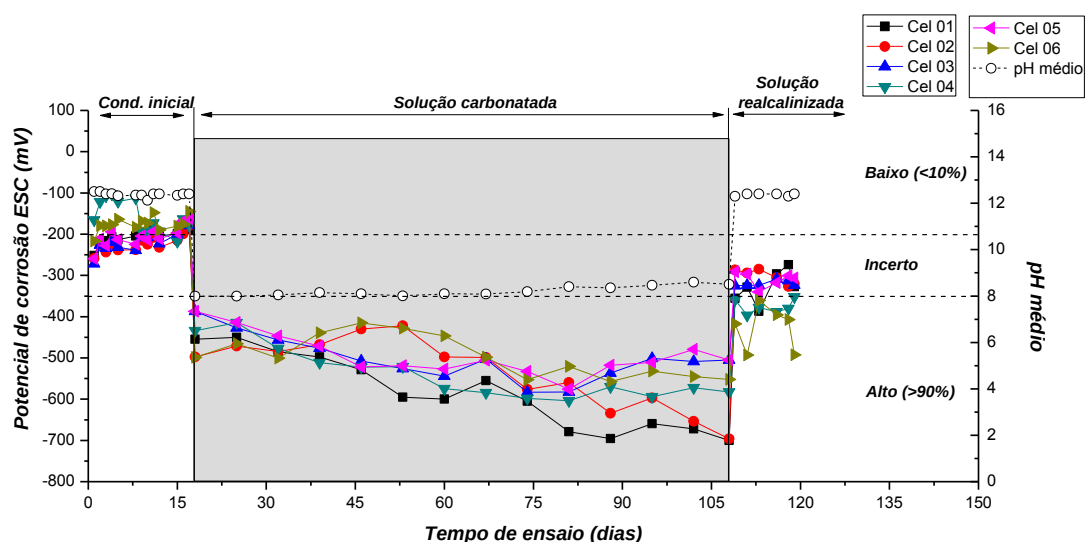


Figura 4.4 - Potencial de corrosão ESC para 70 dias de aceleração da corrosão



4.5 - Potencial de corrosão ESC para 90 dias de aceleração da corrosão

Ao observar os resultados, percebe-se o comportamento diferenciado do potencial de corrosão - ESC durante as três fases de estudo: condição inicial, solução carbonatada e solução realcalinizada.

Na primeira fase de estudo, as leituras iniciais de potencial de corrosão demonstram um risco incerto de corrosão e com o passar do tempo às leituras tendem a indicar um baixo risco, segundo os critérios de corrosão da ASTM C 876 (2009).

Na segunda etapa da pesquisa, uma vez carbonatada a solução, os valores de pH foram reduzidos para valores próximo a 8 em todas as condições de aceleração da corrosão. Esta fase mostra que as leituras de potencial de corrosão - ESC tendem a apresentar uma considerável redução nos valores, indicando uma alta probabilidade de corrosão. Este comportamento é o esperado, uma vez que, para valores de pH abaixo de 9, a película de passivação tende a perder sua estabilidade.

Com aplicação do tratamento de realcalinização, terceira fase do estudo, o pH médio das soluções voltam a patamares de 12,5, enquanto os valores de potenciais de corrosão retornam a condições próximas das iniciais, exceto nas células com 90 dias de aceleração da corrosão.

4.1.2 Densidade de corrente de corrosão (i_{corr})

As Figuras de 4.6 a 4.10 apresentam os resultados eletroquímicos do parâmetro densidade de corrente de corrosão ($\mu A/cm^2$) das células em solução de hidróxido de cálcio.

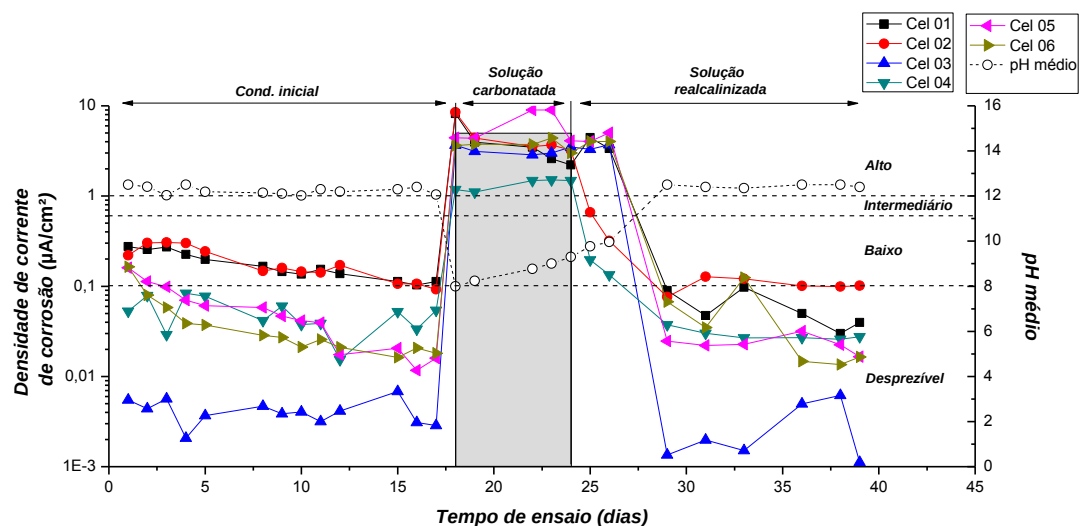


Figura 4.6 - Densidade de corrente de corrosão para 7 dias de aceleração da corrosão

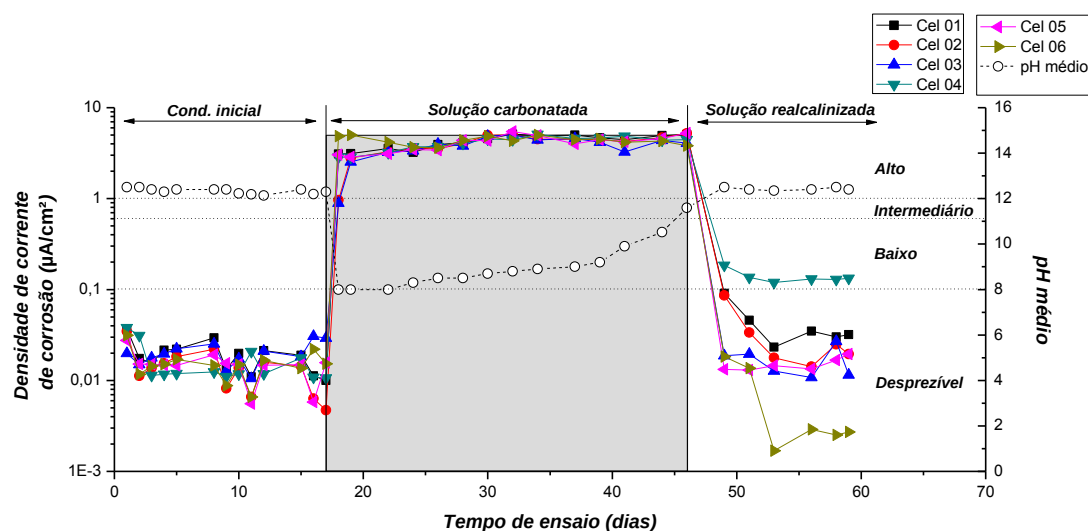


Figura 4.7 - Densidade de corrente de corrosão para 28 dias de aceleração da corrosão

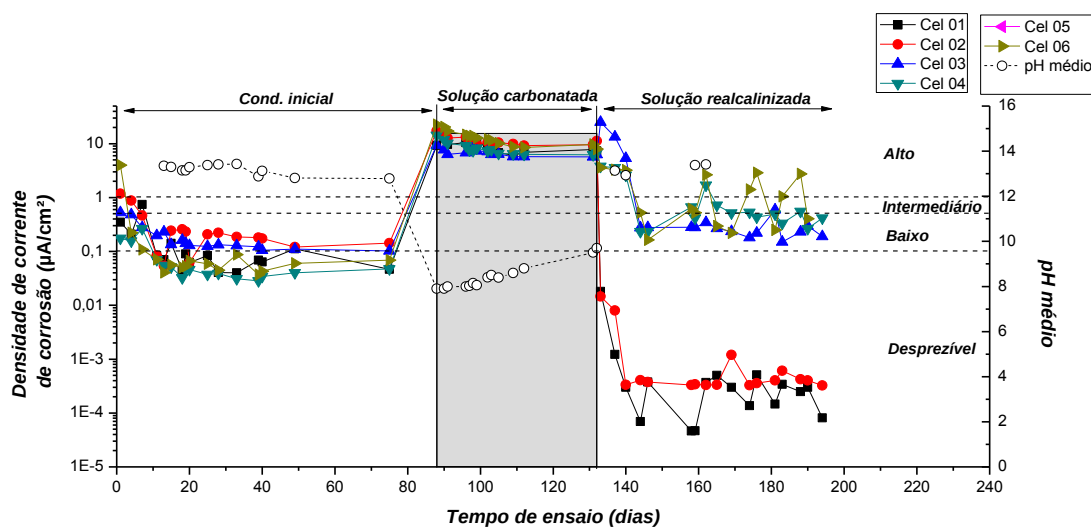


Figura 4.8 - Densidade de corrente de corrosão para 40 dias de aceleração da corrosão

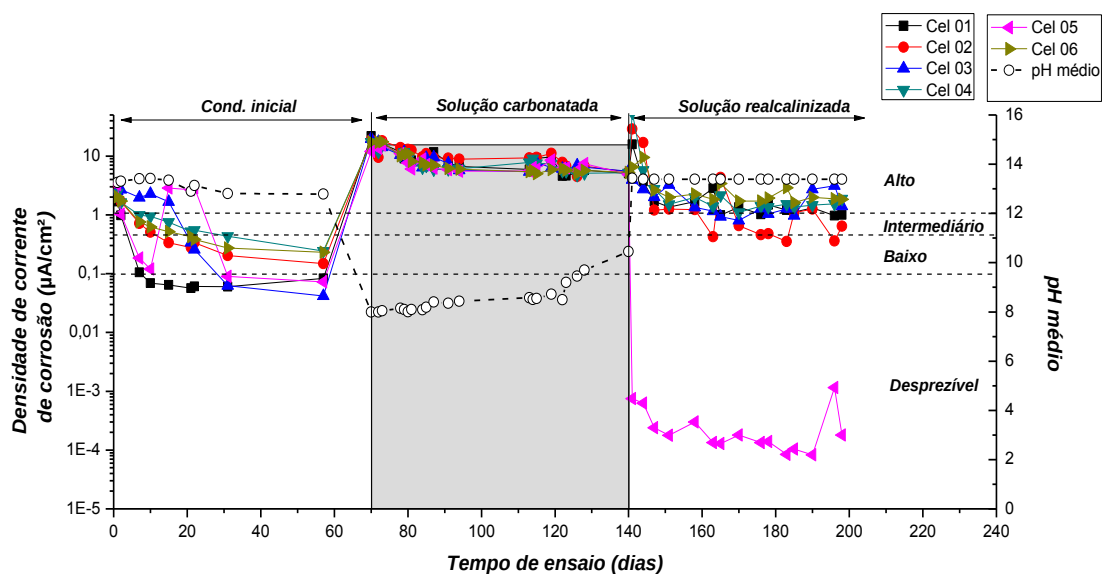


Figura 4.9 - Densidade de corrente de corrosão para 70 dias de aceleração da corrosão

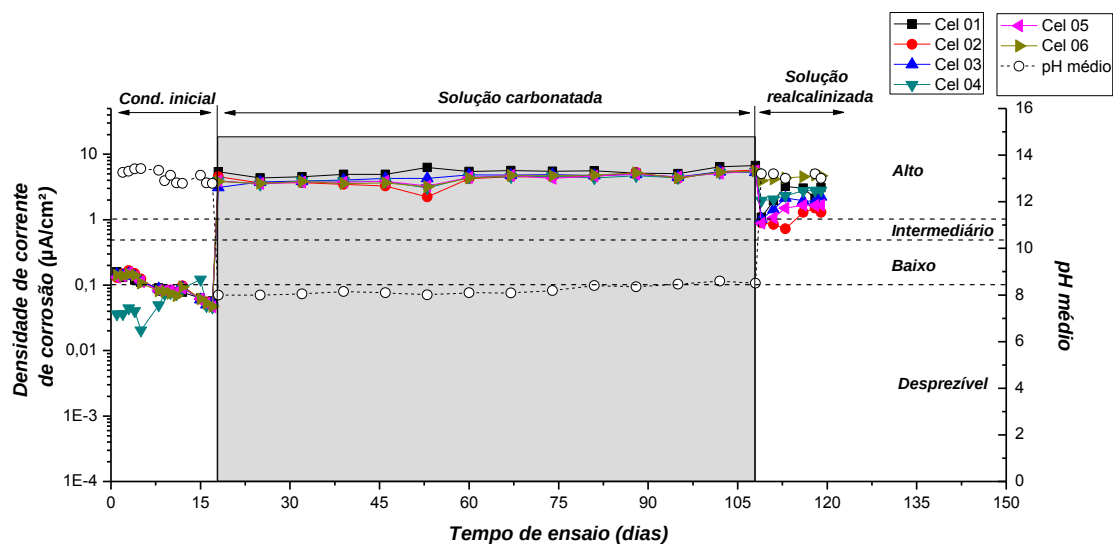


Figura 4.10 - Densidade de corrente de corrosão para 90 dias de aceleração da corrosão.

Pode-se observar que a densidade de corrente de corrosão, durante o período de condicionamento inicial, em geral, mostra risco de corrosão baixo ou desprezível. No período de carbonatação da solução os valores dessa densidade indicam alto risco de corrosão para todas as células. Após a realcalinização das soluções houve uma tendência de redução nos valores de densidade de corrente, indicando a repassivação das armaduras. Porém, observa-se que quanto maior o período de aceleração da corrosão, menor a quantidade de barras repassivadas. Esse comportamento pode ser justificado por uma crescente alteração na superfície do aço que dificulta a sua repassivação.

4.1.3 Perda de massa acumulada

O cálculo da perda de massa eletroquímica se deu através da Equação 10, que determina a perda de massa através da densidade de corrente de corrosão.

$$w = 0,4 \times i_{corr} \times A \times \Delta t \quad (\text{Equação 10})$$

Onde w é a perda de massa gravimétrica, em miligramas; i_{corr} é a densidade de corrente de corrosão em $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, A é a área de exposição, em decímetros quadrados, e Δt é o tempo de exposição, em dias.

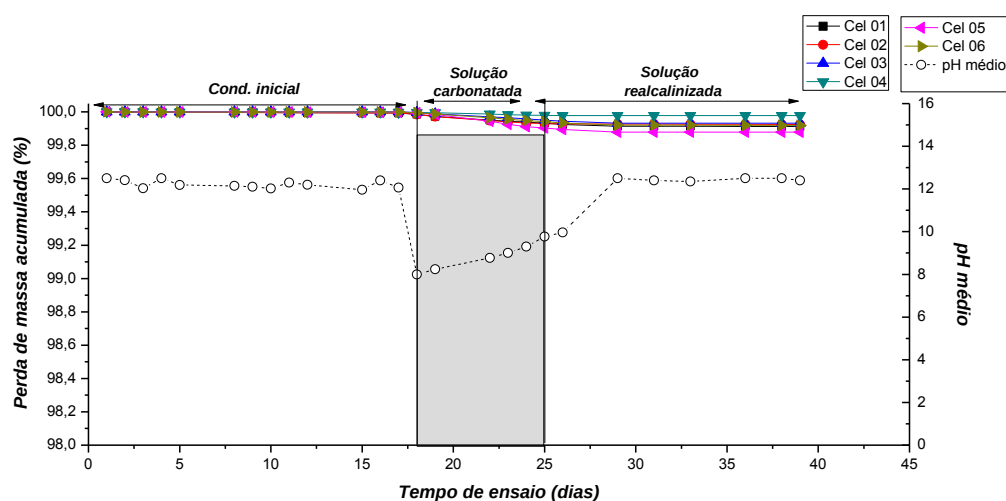


Figura 4.11 - Perda de massa acumulada, ao longo do tempo, dos corpos de prova com 7 dias de aceleração da corrosão.

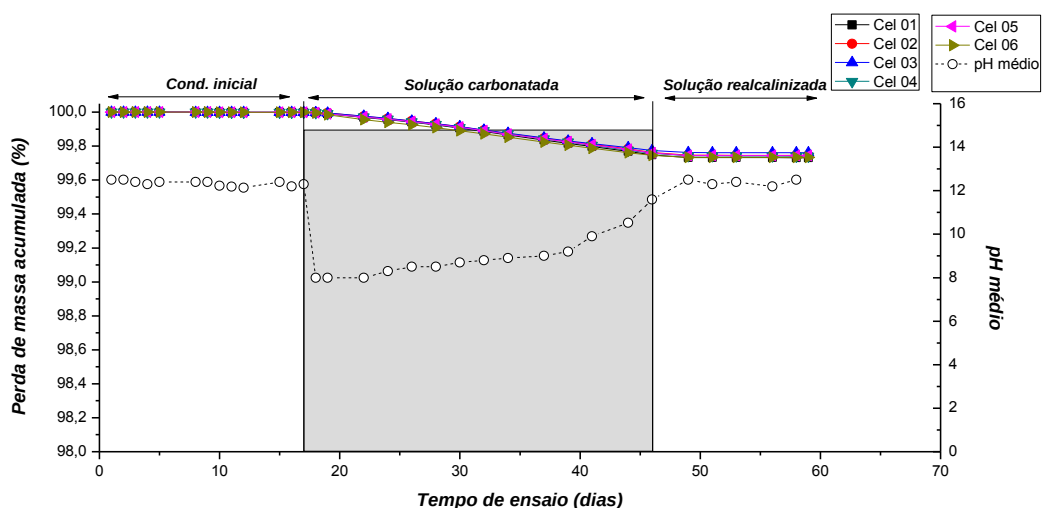


Figura 4.12 - Perda de massa acumulada, ao longo do tempo, dos corpos de prova com 28 dias de aceleração da corrosão.

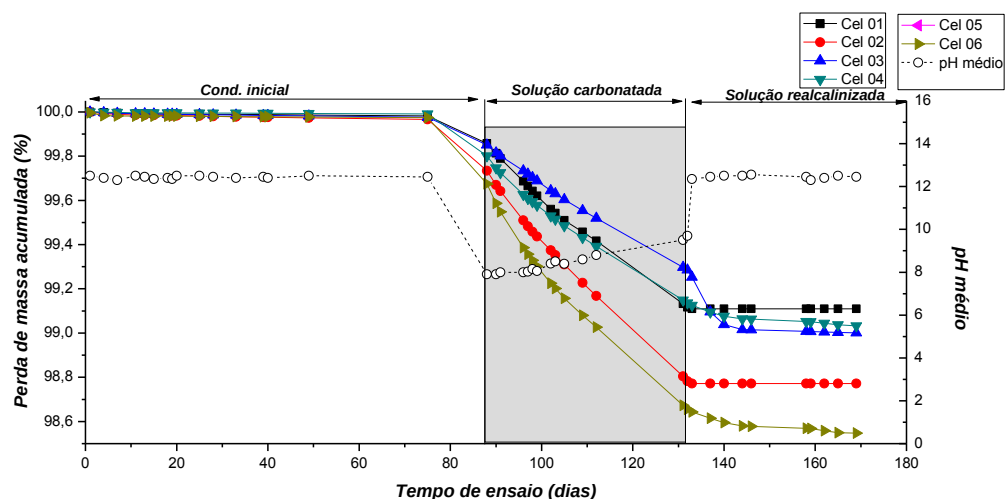


Figura 4.13 - Perda de massa acumulada, ao longo do tempo, dos corpos de prova com 40 dias de aceleração da corrosão.

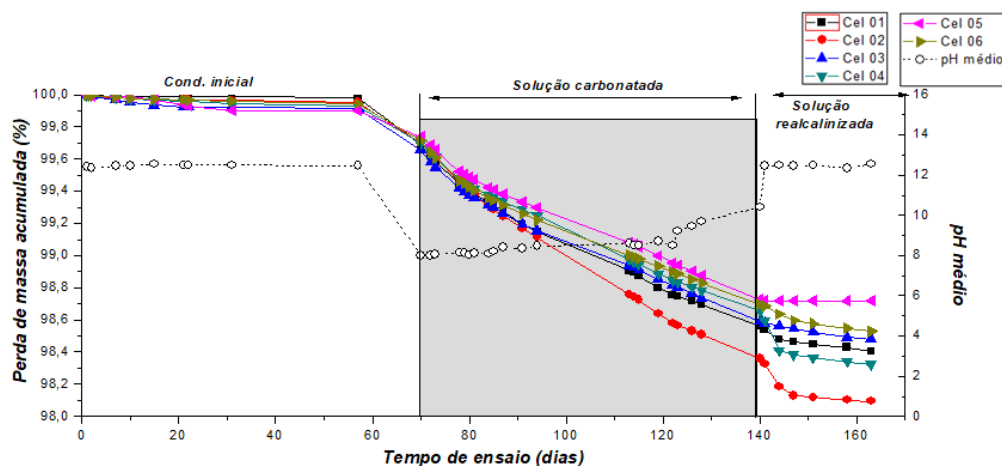


Figura 4.14 - Perda de massa acumulada, ao longo do tempo, dos corpos de prova com 70 dias de aceleração da corrosão.

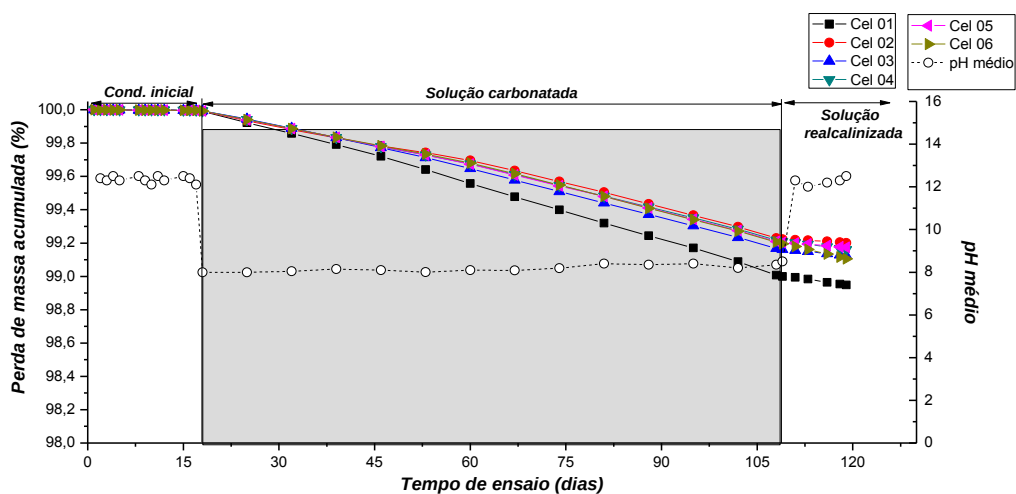


Figura 4.15 - Perda de massa acumulada, ao longo do tempo, dos corpos de prova com 90 dias de aceleração da corrosão.

A partir das figuras percebe-se que a perda de massa aumenta consideravelmente para as barras dentro do período de carbonatação, em cada idade estudada, e permanece aproximadamente constante nos demais tempos de ensaio. Vale ressaltar que, após a aplicação do tratamento, a perda de massa gravimétrica sofre uma considerável redução, freando a formação dos produtos de corrosão e estabilizando a perda.

Analizando as células com período de condicionamento inicial semelhante, percebe-se uma tendência de maior perda de massa para maiores períodos de corrosão acelerada.

As barras que foram submetidas a um período de condicionamento inicial maior, sofreram uma perda de massa mais acentuada no período de aceleração da corrosão. Desta forma, a célula com 70 dias de exposição à carbonatação apresentou a maior perda de massa.

A Figura 4.16 ilustra o comportamento da perda de massa acumulada apenas durante o período de aceleração da corrosão. Fica evidente que o período de condicionamento inicial maior, influenciou em maiores perdas de massa nas células submetidas à aceleração da corrosão por 40 e 70 dias.

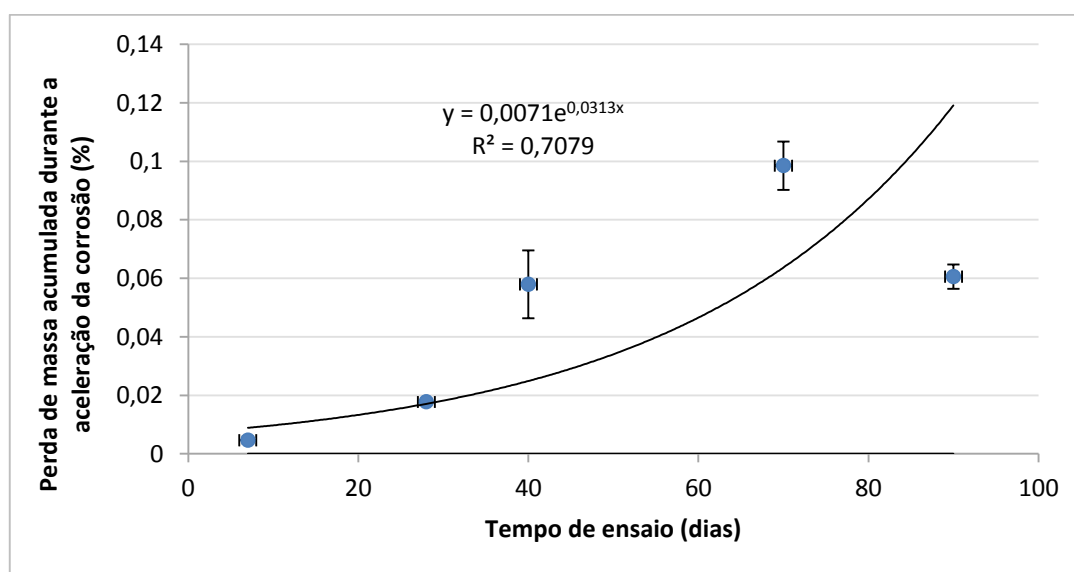


Figura 4.16 - Perda de massa acumulada durante a aceleração da corrosão para os diferentes períodos

A Figura 4.17 ilustra o comportamento da perda de massa após o tratamento de realcalinização para os diferentes períodos de aceleração da corrosão. Conforme pode ser visualizado, quanto maior o período de aceleração, maior será a perda de massa diária após o tratamento.

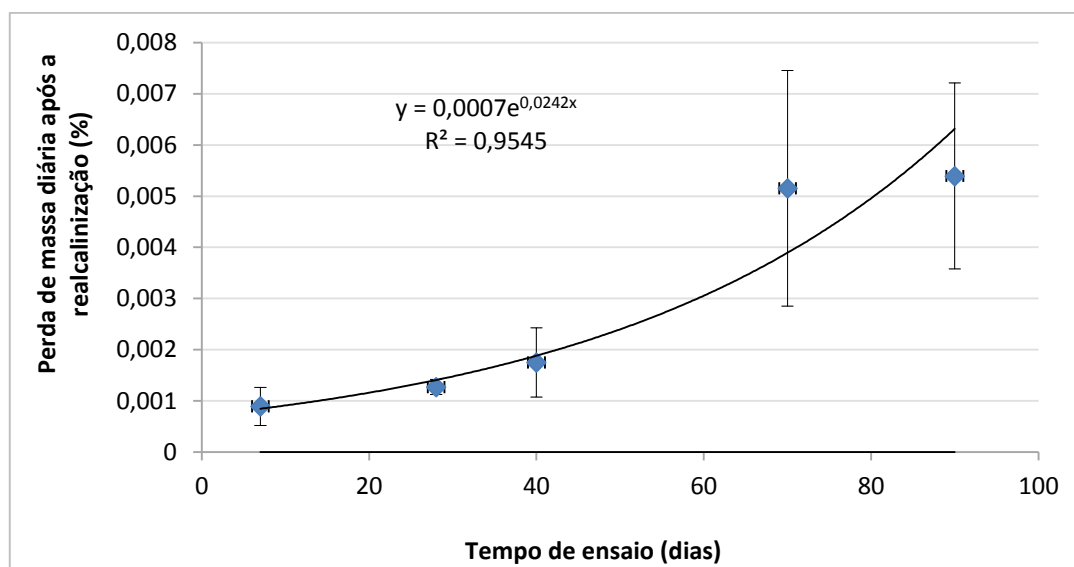


Figura 4.17 - Perda de massa diária após a realcalinização.

4.2 Células com solução combinada de $(\text{Ca}(\text{OH})_2, (\text{KOH})$ e (NaOH))

4.2.1 Potencial de corrosão (E_{corr})

As Figuras 4.18 a 4.22 apresentam os resultados do potencial de corrosão *versus* tempo de ensaio para as células com a solução da mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de potássio e hidróxido de sódio, para as condições de aceleração da corrosão de 7, 14, 28, 56 e 90 dias.

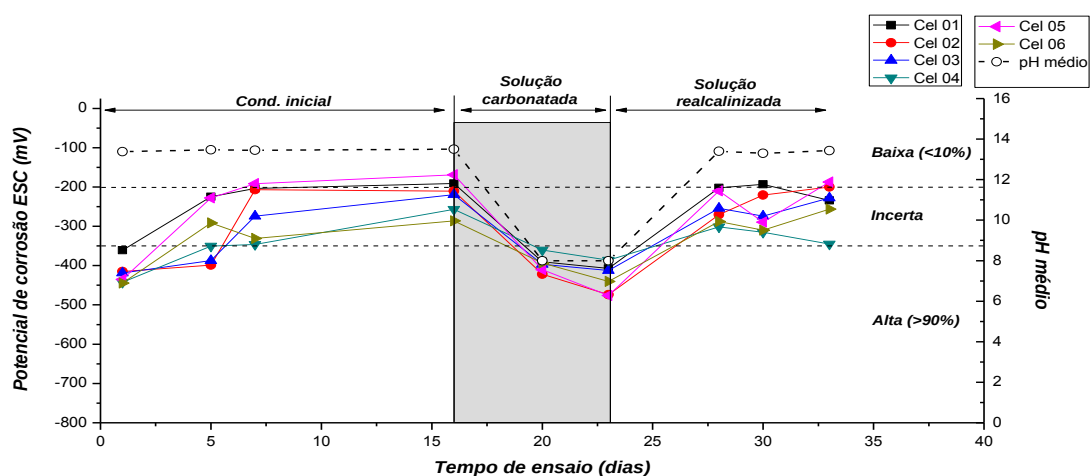
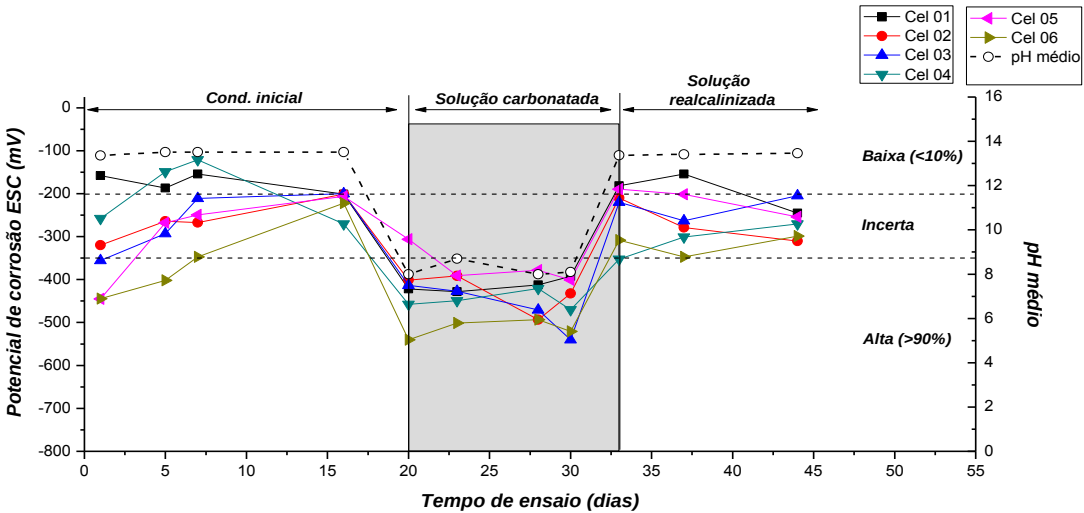


Figura 4.18 - Potencial de corrosão ESC para 7 dias de aceleração da corrosão



4.19 - Potencial de corrosão ESC para 14 dias de aceleração da corrosão

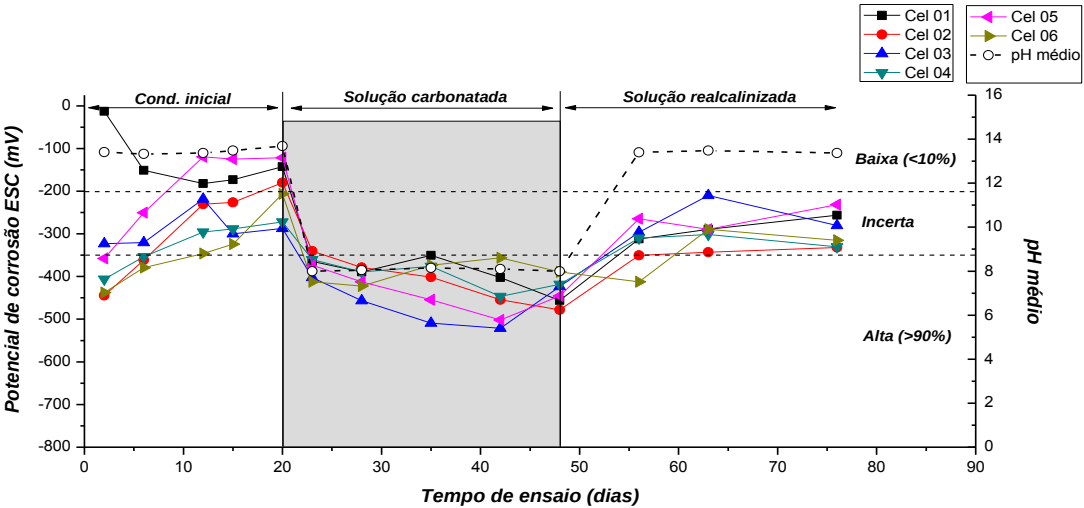


Figura 4.20 - Potencial de corrosão ESC para 28 dias de aceleração da corrosão

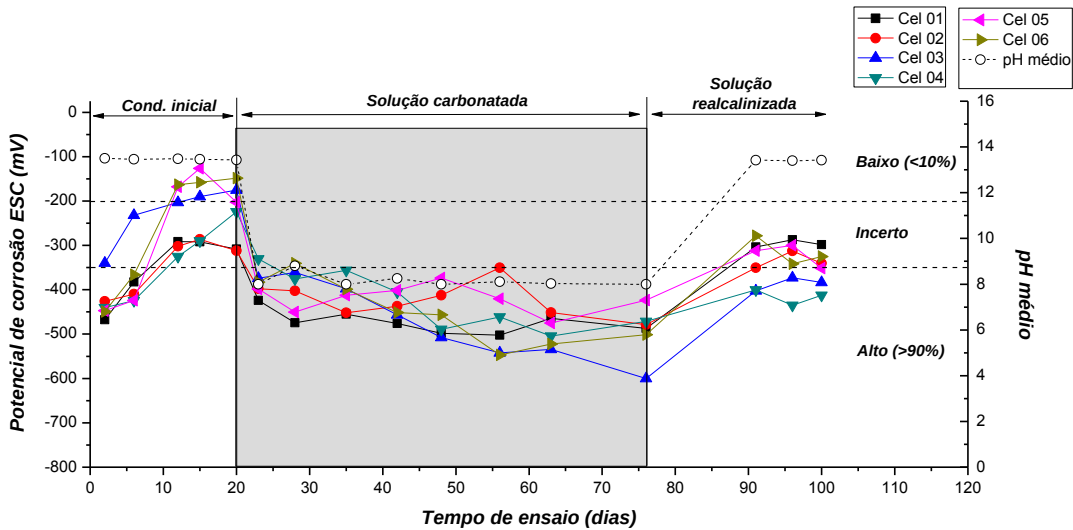


Figura 4.21 - Potencial de corrosão ESC para 56 dias de aceleração da corrosão

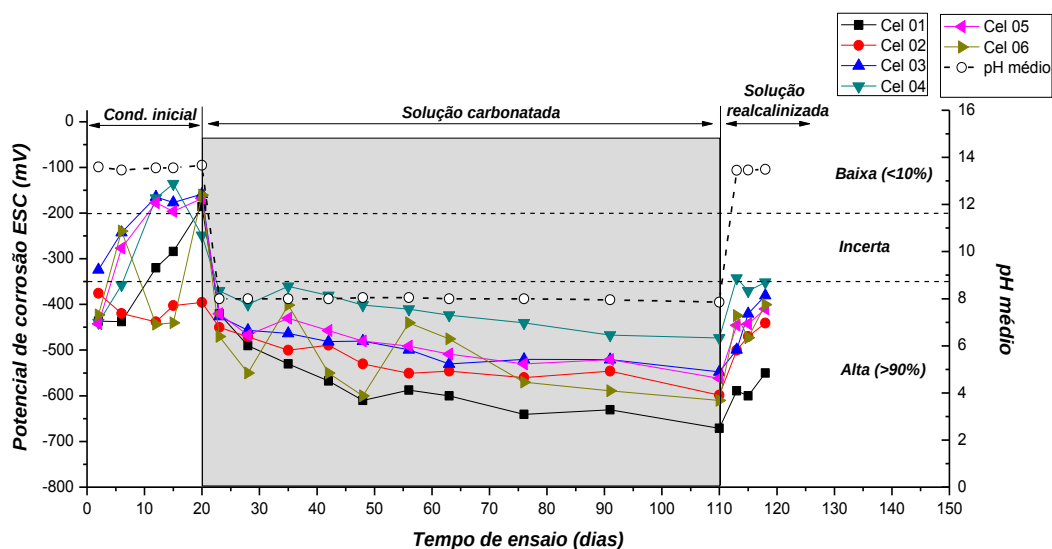


Figura 4.22 - Potencial de corrosão ESC para 90 dias de aceleração da corrosão

Nota-se que o comportamento eletroquímico das células com solução da mistura de hidróxido de cálcio, sódio e potássio, para as três fases do ensaio, é semelhante ao apresentado pelas células com solução de hidróxido de cálcio. Nas primeiras leituras, o potencial de corrosão apresenta, em geral, incerteza quanto a probabilidade de corrosão. Uma vez carbonatadas, o potencial tende a apresentar uma mudança brusca, caindo para patamares considerados pela literatura de alta probabilidade de corrosão. No entanto, após a realcalinização, os valores de potencial de corrosão das armaduras retornaram para patamares semelhantes as condições iniciais, exceto para as soluções com períodos de aceleração da corrosão de 56 e 90 dias, indicando que houveram alterações na superfície do aço que não puderam ser plenamente revertidas.

4.2.2 Densidade de corrente de corrosão (i_{corr})

As Figuras 4.23 a 4.27 ilustram o comportamento da densidade de corrente de corrosão ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) para os diferentes períodos de aceleração da corrosão.

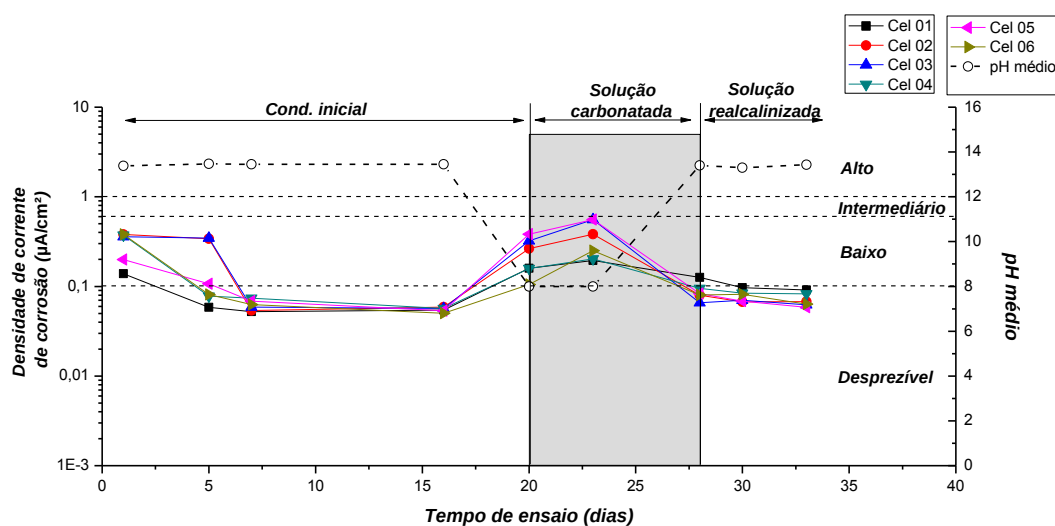


Figura 4.23 - Densidade de corrente de corrosão para 7 dias de aceleração da corrosão

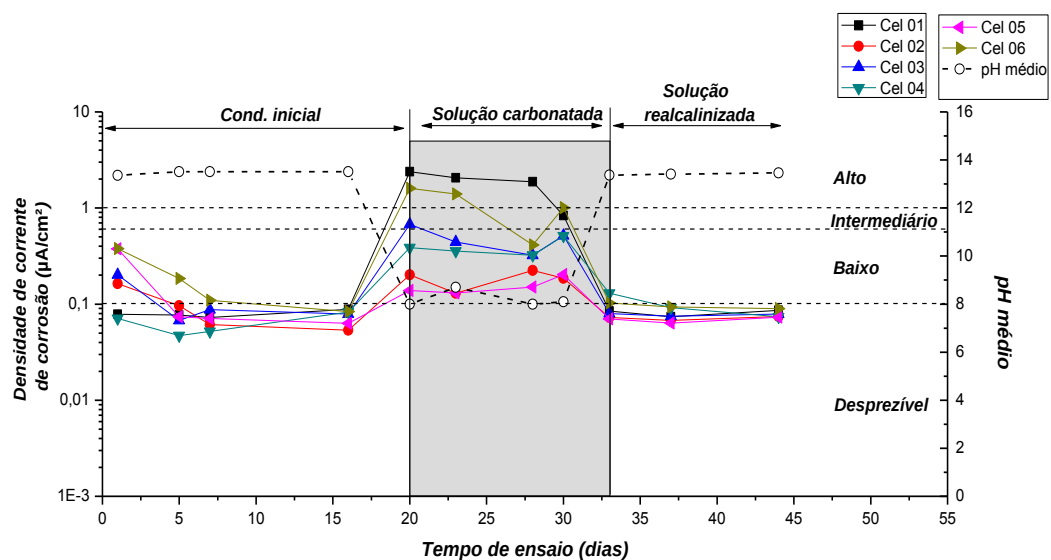


Figura 4.24 - Densidade de corrente de corrosão para 14 dias de aceleração da corrosão

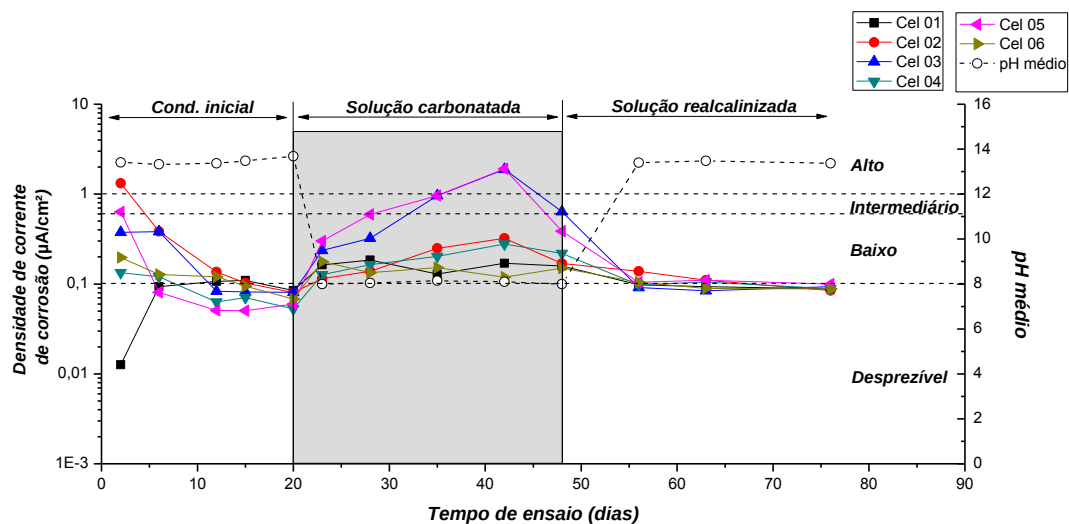


Figura 4.25 - Densidade de corrente de corrosão para 28 dias de aceleração da corrosão

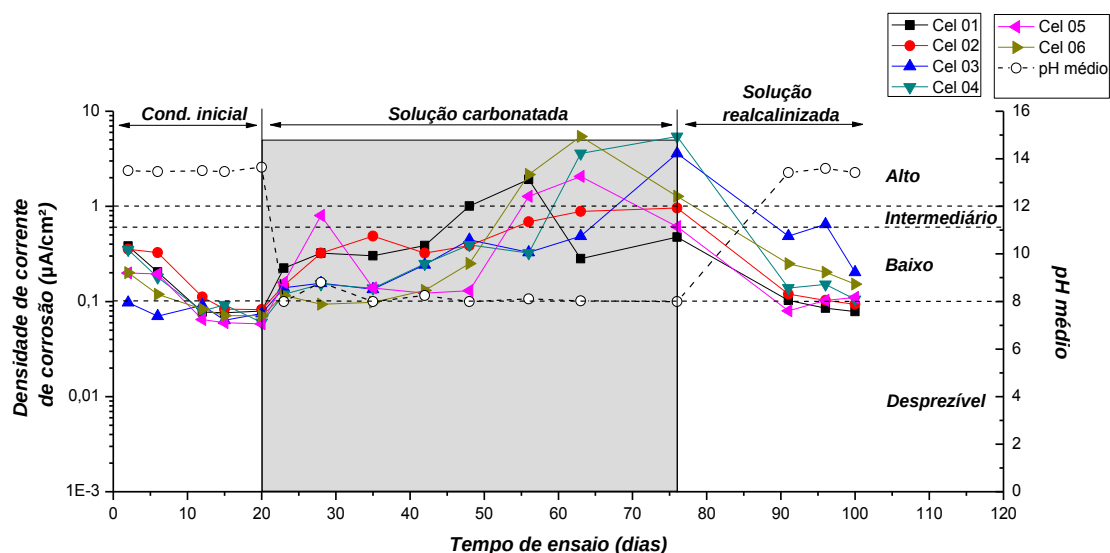


Figura 4.26 - Densidade de corrente de corrosão para 56 dias de aceleração da corrosão

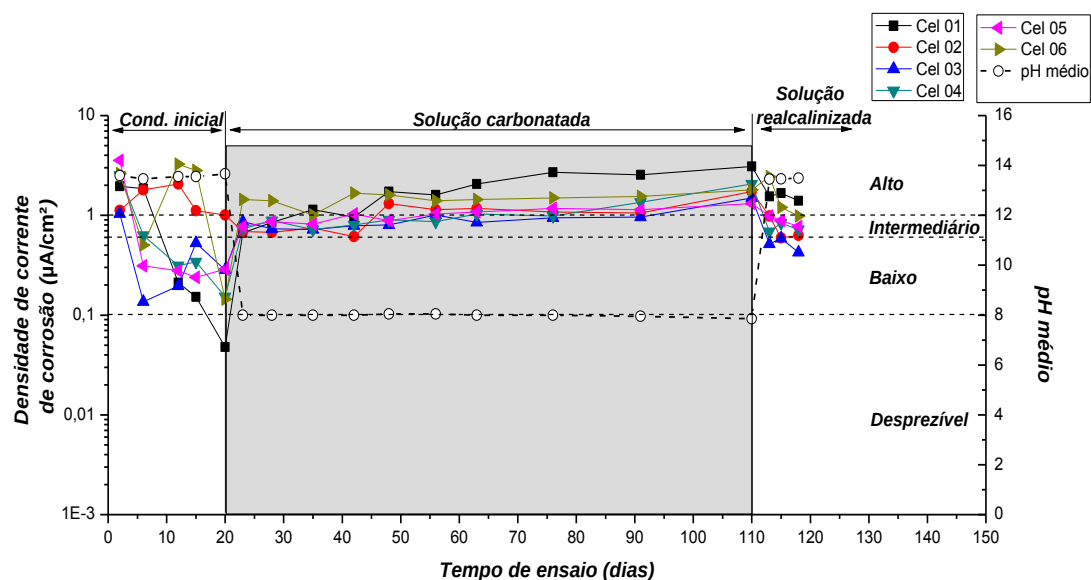


Figura 4.27 - Densidade de corrente de corrosão para 90 dias de aceleração da corrosão

Observa-se que as primeiras leituras de densidade de corrente de corrosão mostram um baixo grau de corrosão. À medida que o tempo passa esses valores reduzem até um patamar que considera desprezível a taxa de corrosão. Uma vez carbonatadas as soluções, os valores da densidade de corrente de corrosão aumentam destacando a instauração do processo corrosivo. Com a aplicação do tratamento, os valores da densidade de corrente de corrosão tendem a diminuir para todas as condições de aceleração da corrosão.

Após a realcalinização, as células submetidas à carbonatação por 7, 14 e 28 dias, apresentaram risco de corrosão baixo ou desprezível. Nas células com 56 dias em solução

carbonatada, este risco foi, em sua maioria, baixo. As células submetidas à corrosão acelerada por 90 dias, mesmo após o tratamento de realcalinização, apresentaram risco de corrosão alto ou intermediário, o que converge com o comportamento do potencial de corrosão.

4.2.3 Perda de massa acumulada

As Figuras 4.28 a 4.32 ilustram o comportamento da perda de massa acumulada durante o tempo de ensaio para todas as condições de aceleração da corrosão.

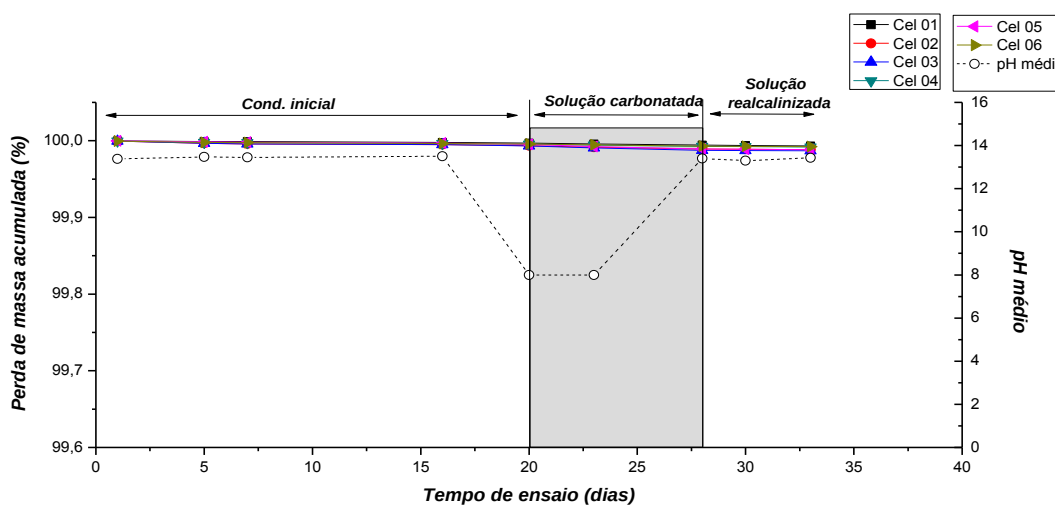


Figura 4.28 - Perda de massa acumulada, ao longo do tempo, das células com 7 dias de aceleração da corrosão.

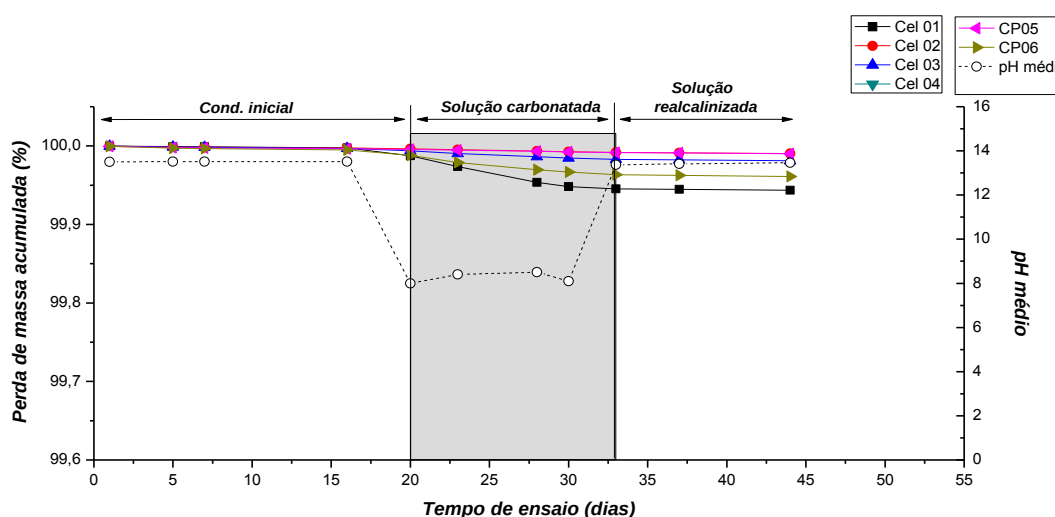


Figura 4.29 - Perda de massa acumulada, ao longo do tempo, das células com 14 dias de aceleração da corrosão.

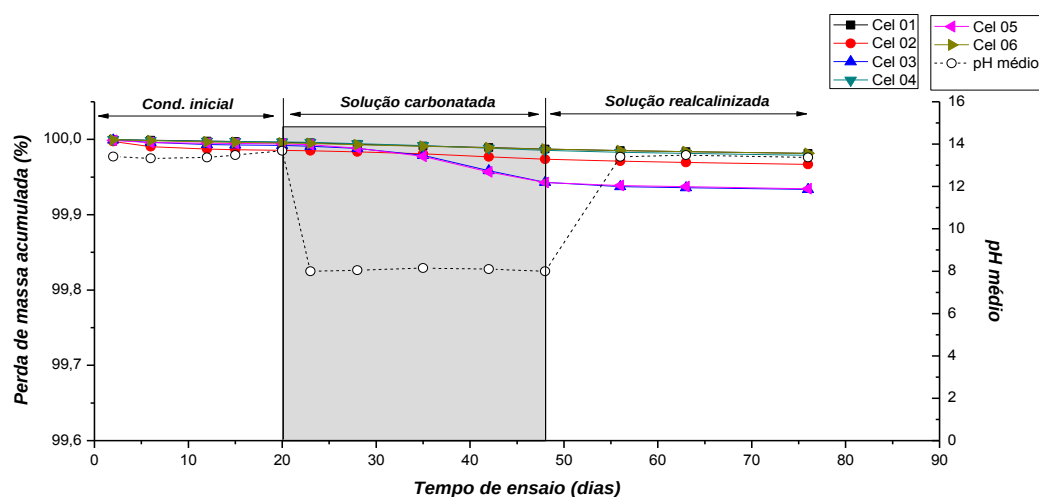


Figura 4.30 - Perda de massa acumulada, ao longo do tempo, das células com 28 dias de aceleração da corrosão.

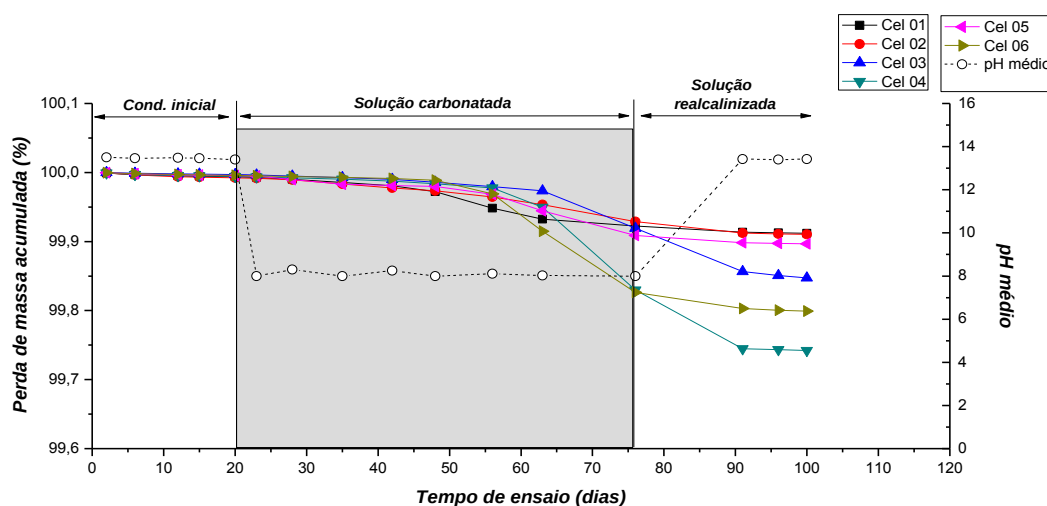


Figura 4.31 - Perda de massa acumulada, ao longo do tempo, dos corpos de prova com 56 dias de aceleração da corrosão.

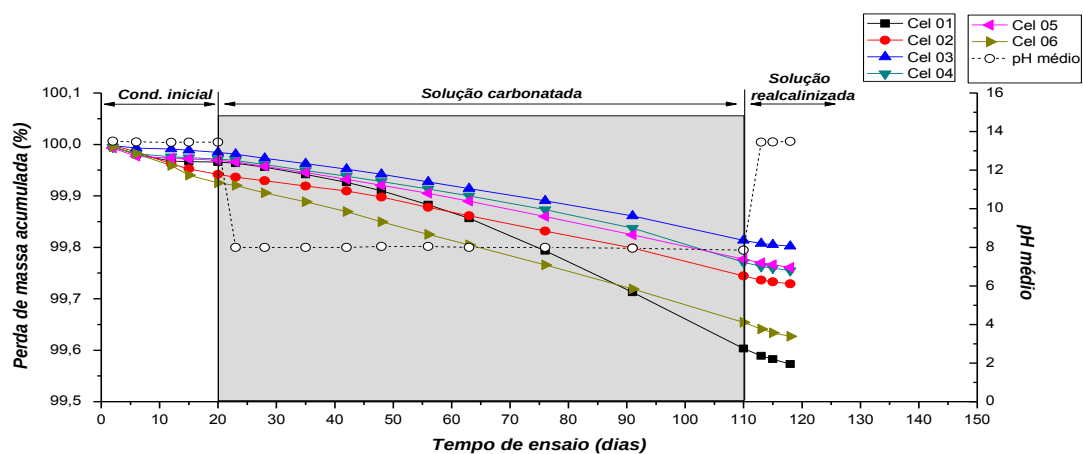


Figura 4.32 - Perda de massa acumulada, ao longo do tempo, das células com 90 dias de aceleração da corrosão.

Percebe-se que o comportamento da perda de massa, para as barras nesta solução, assemelha-se ao das barras em solução de hidróxido de cálcio. Ou seja, há um aumento da perda de massa durante o período de aceleração da corrosão, e após a aplicação do tratamento, uma redução.

O tempo de condicionamento inicial foi em torno de vinte dias pra todas as células. Nesta situação, as maiores perdas de massa ocorreram nas barras que sofreram maiores períodos de corrosão acelerada. A Figura 4.33 ilustra esta situação.

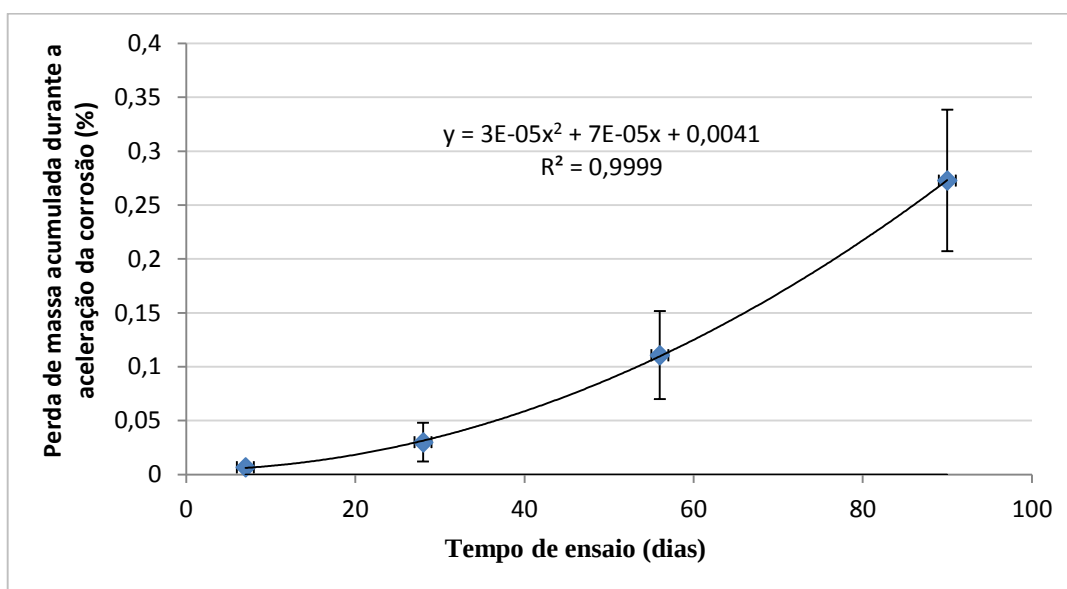


Figura 4.33 - Perda de massa acumulada durante a aceleração da corrosão para os diferentes períodos de ensaio.

Após o tratamento de realcalinização há uma redução da velocidade de corrosão, e conseqüentemente, da perda de massa das barras. Conforme ilustra a Figura 4.34, a perda de massa diária após a realcalinização apresentou comportamento semelhante às das células contendo apenas solução de hidróxido de cálcio. Ou seja, quanto maior o período de aceleração da corrosão, maior é a perda de massa diária após o tratamento de realcalinização.

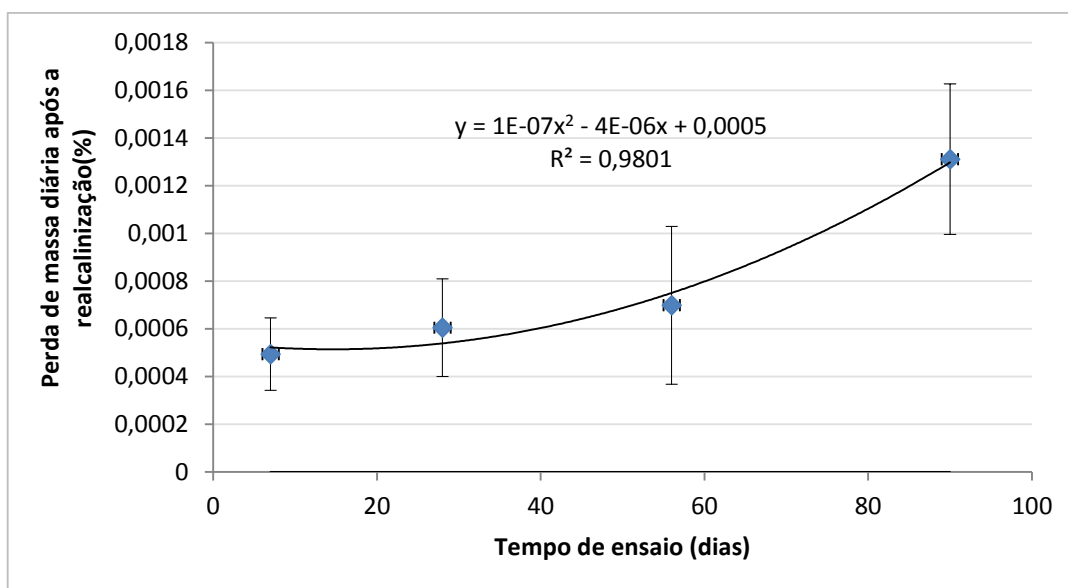


Figura 4.34 - Perda de massa diária após o tratamento de realcalinização

4.3 Taxa de corrosão

A taxa de corrosão é um indicativo da velocidade com que se processa a corrosão. Com a finalidade de verificar a eficiência do método de realcalinização, foram plotados os gráficos ilustrados nas Figura 4.35 e 4.36 que esboçam o comportamento da taxa de corrosão nas barras submetidas à aceleração da corrosão, antes e depois do tratamento, para os dois tipos de solução empregada.

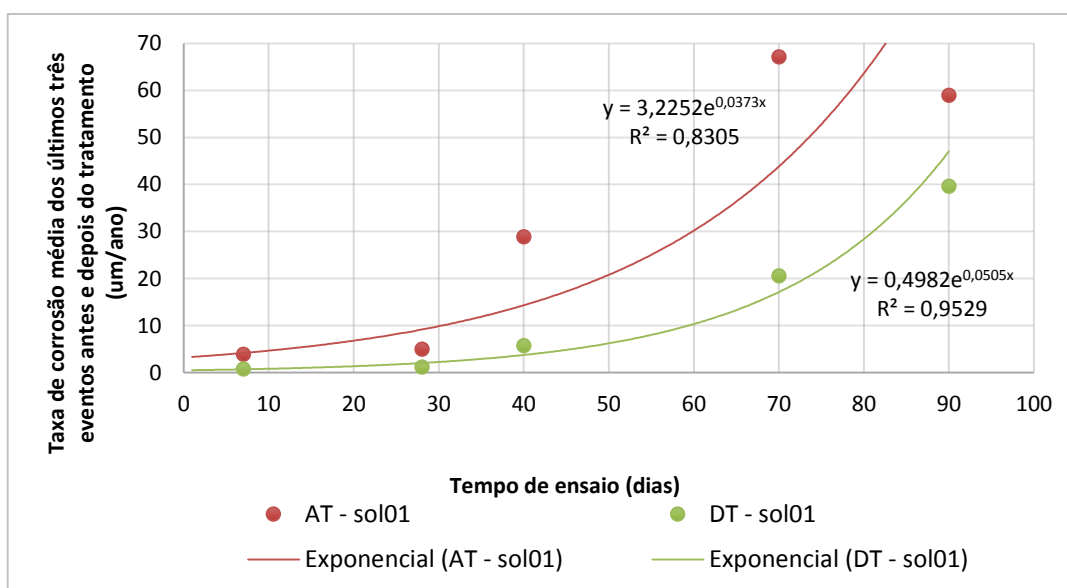


Figura 4.35 – Taxa de corrosão antes e depois do tratamento para células em solução de hidróxido de cálcio.

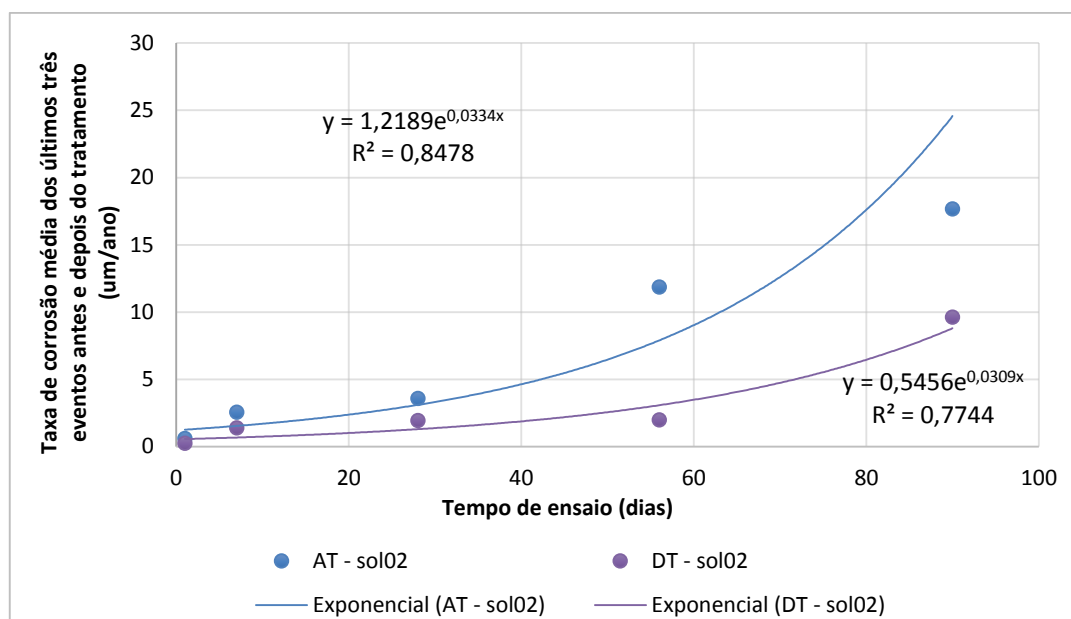


Figura 4.36 - Taxa de corrosão antes e depois do tratamento para células em solução com hidróxido de cálcio, potássio e sódio.

Utilizando como referência os valores propostos por Andrade e Alonso (2001) para indicar o grau de corrosão de acordo com o valor da taxa de corrosão, considera-se que no intervalo de 5 a 10 $\mu\text{m}/\text{ano}$ o grau de corrosão é intermediário, e acima de 10 $\mu\text{m}/\text{ano}$, alto.

A partir dessas figuras, percebe-se que a medida em que as armaduras permanecem em solução carbonatada a taxa de corrosão aumenta consideravelmente a uma taxa exponencial e, após o tratamento, essa mesma taxa de corrosão reduz para todas as idades. Porém, taxas de corrosão superiores 5 $\mu\text{m}/\text{ano}$ foram apresentadas, mesmo após o tratamento, representam ainda grau de corrosão moderado.

A partir do ajuste de uma função exponencial, pode-se inferir resultados sobre o estado da barra para as mesmas condições estudadas neste trabalho. Para as barras submetidas à solução 1, de hidróxido de cálcio, pode-se deduzir que o processo de realcalinização pode restabelecer a condição de nível de corrosão baixo ou desprezível (< 5 $\mu\text{m}/\text{ano}$) para até 46 dias de exposição em solução carbonatada. Para este período de aceleração da corrosão, o tratamento conseguiu reduzir a taxa de corrosão em 71,65%.

Já nas barras submetidas à solução 2, composta por hidróxido de cálcio, potássio e sódio, o tratamento pode restabelecer o nível baixo ou desprezível para até 72 dias de aceleração da corrosão, reduzindo a taxa de corrosão em 61,62%.

A Figura 4.37 ilustra o comportamento da taxa de corrosão antes e depois do tratamento para os tipos de soluções utilizadas nesta pesquisa. Percebe-se que as células da solução 1, apresentam maiores valores de taxa de corrosão quando comparadas as células da solução 2. Este comportamento pode ser explicado devido à influência do pH das soluções, que na solução 1 é em torno de 12,5 e 13,5 para a solução 2. Portanto, o meio mais alcalino favorece ao menor risco de corrosão.

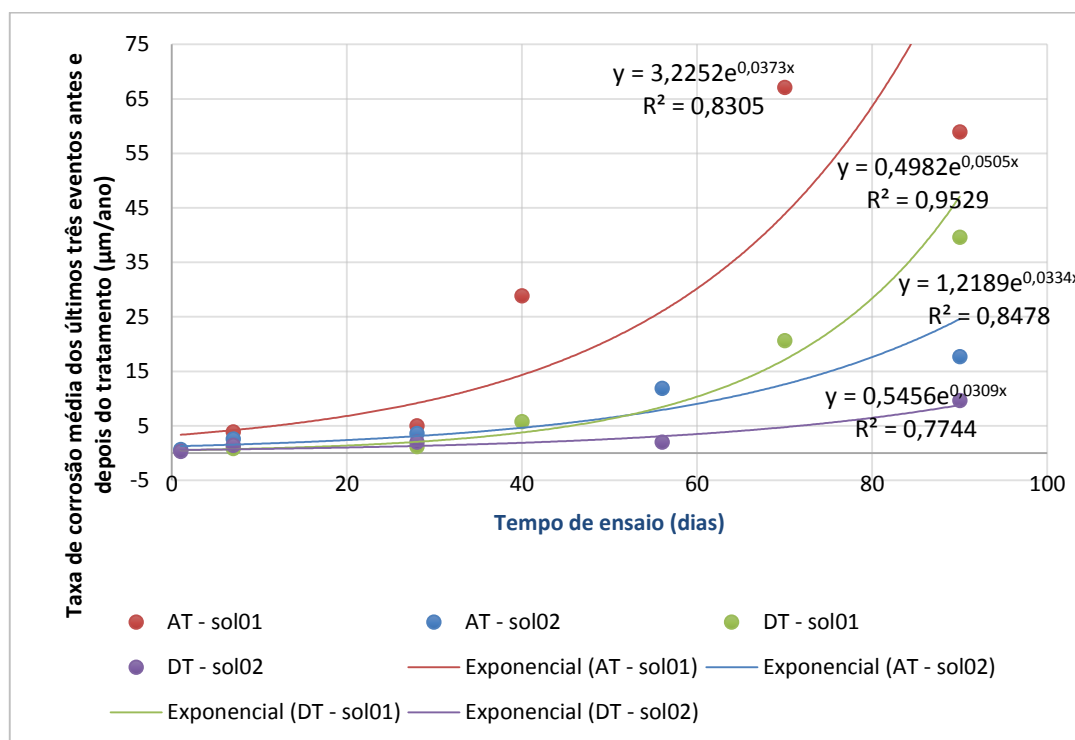


Figura 4.37 - Comportamento da taxa de corrosão antes e depois do tratamento para os tipos de soluções.

Na prática, quando uma armadura está sofrendo corrosão, a sua perda de massa é um dado que pode ser obtido. Por sua vez, o pH do concreto antes do processo de carbonatação dificilmente é conhecido. Com o objetivo de visualizar como o tratamento de realcalinização pode funcionar na prática, foi plotado um gráfico que relaciona a perda de massa acumulada durante o processo de corrosão acelerada com a taxa de corrosão após o tratamento de realcalinização, utilizando os valores obtidos para ambas as soluções. Este gráfico está ilustrado na Figura 4.38.

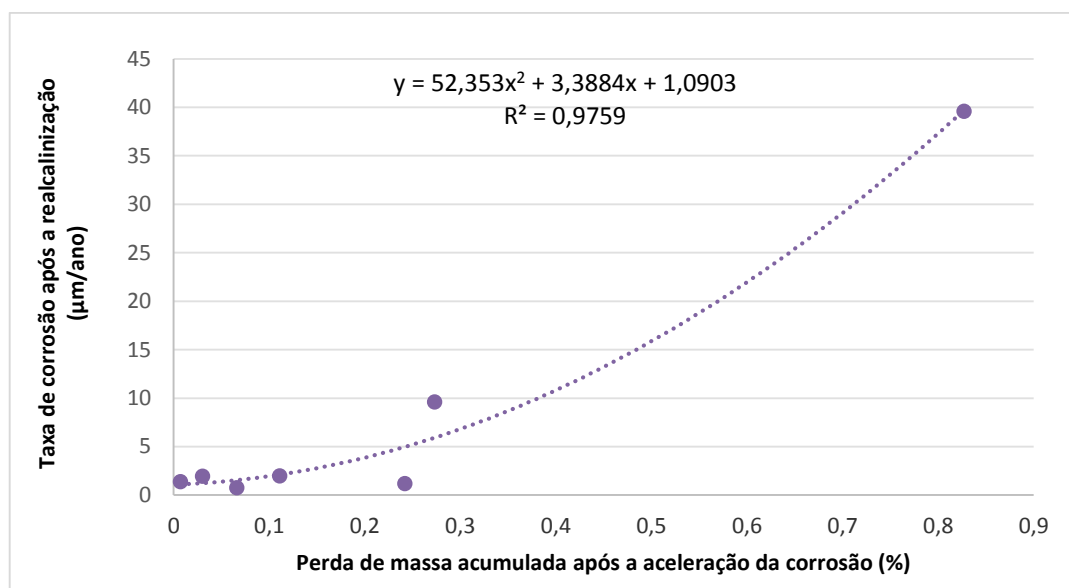


Figura 4.38 - Taxa de corrosão após a realcalinização para diferentes perdas de massa durante a corrosão acelerada.

Pode-se inferir que para valores de perda de massa acumulada superiores à 0,25% o tratamento de realcalinização não consegue reduzir as taxas de corrosão para níveis que representem baixo grau de corrosão. Nestes casos, a realcalinização pode servir como paliativo, reduzindo a velocidade de corrosão.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 CONCLUSÕES

A partir das condições de ensaio adotadas neste trabalho e dos resultados obtidos, percebe-se um comportamento diferenciado durante as três fases de estudo em relação ao potencial de corrosão, densidade de corrente de corrosão e taxa de corrosão. Na condição inicial, primeira fase de estudo, observou-se que as primeiras leituras demonstram um risco incerto de corrosão e com o passar do tempo elas indicam um baixo risco de corrosão.

Na fase da solução carbonatada, os valores encontrados de pH foram reduzidos em cerca de 40% para todas as idades estudadas. Esta fase mostra que as leituras de potencial de corrosão tendem a apresentar uma considerável redução nos valores, indicando uma alta probabilidade de corrosão.

Na fase da solução realcalinizada, onde os valores iniciais de pH foram restabelecidos, os potenciais de corrosão mostram uma retomada desse parâmetro eletroquímico às condições iniciais. Porém, para as células com maiores períodos de aceleração da corrosão, o tratamento de realcalinização não restabeleceu os potenciais de corrosão e densidade de corrente iniciais.

Foi observado pelo monitoramento eletroquímico, que a eficiência do método de realcalinização depende do grau de corrosão em que se encontram as armaduras. Os resultados mostraram que o tratamento conseguiu reduzir a taxa de corrosão em todas as células, porém, o nível de corrosão baixo ou desprezível só foi apresentado nas células com até 46 dias de exposição em solução carbonatada, no caso da solução 1, composta apenas de hidróxido de cálcio. Já nas barras submetidas à solução 2, composta por hidróxido de cálcio, potássio e sódio, o tratamento pode restabelecer o nível baixo ou desprezível para até 72 dias de aceleração da corrosão.

A perda de massa é diretamente proporcional ao grau de corrosão em que se encontra a armadura, e é uma informação que, na prática é mais simples de ser obtida. Este trabalho conclui que armaduras com perdas de massa acumulada superiores a 0,25%, mesmo após o tratamento, não voltam as condições na qual a literatura reconhece como estado de passividade. Dessa forma, o tratamento mostra-se eficiente até certo grau de corrosão. Entretanto, mesmo nos casos em que a condição de repassivação não é alcançada, observou-se uma eficaz redução do processo de corrosão.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar a eficiência da realcalinização eletroquímica no concreto armado, submetido à carbonatação.
- Avaliar os compostos formados no cobrimento e ao redor da armadura antes e após o tratamento de realcalinização química e/ou eletroquímica.
- Avaliar as diferenças de comportamento entre os métodos de realcalinização química e eletroquímica aplicadas no tratamento de concretos carbonatados.
- Verificar a eficiência do tratamento em estruturas de concreto armado que sofreram carbonatação natural.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM G-1 (2011). **Standard practice for preparing, cleaning and evaluating corrosion test specimens.** Anual Book of ASTM Standards. Philadelphia.

_____. ASTM C-876. **Standard test for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete** . Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia/ EUA, 1999.

ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M.; SARRIA, J.; ALONSO, C. **Evolution of pore solution chemistry, electro-osmosis and rebar corrosion rate induced by realkalisation.** Materials and Structures, v. 32, p. 427-436. 1999.

ANDRADE, J.J.O. **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: Iniciação por cloretos.** Tese de doutorado. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001, 249 p.

ARAUJO, F. W. C. **Contribuição da técnica de realcalinização do concreto carbonatado através da absorção / difusão de soluções alcalinas.** 2004. 147 f. Dissertacao (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiania.

ARAUJO, F. W. C. & HELENE, P. **Realcalinização eletroquímica: técnica preventiva ou de reabilitação?** In Revista Concreto, 2007. P. 37- 41.

ARAUJO, F. W. C. **Estudo da repassivação da armadura em concretos carbonatados através da técnica de realcalinização química.** 2009. 212 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – CPGECC, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

BAKKER, R. F. M. Initiation period. In: SCHIESSL , P. (Ed.) **Corrosion of steel in concrete.** New York: RILEM / Chapman and Hall, p. 22-55, 1988.

BANFILL, P. F. G. **Features of the mechanism of re-alkalisation and desalination treatments for reinforced concrete.** In: International Conference on Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete. **Proceedings ...** University of Sheffield, 1994. p. 1489 – 1498.

BANFILL, P. F. G.; **Re-alkalisation of carbonated concrete - Effect on concrete properties.** Construction and Building Materials, v. 11, n. 4, p. 255-258, 1997.

BROOMFIELD, J. P. **Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation and repair.** London and New York: E & FN Spon, 1997. 240p.

CABRAL, A. E. B. **Avaliação dos sistemas de reparo utilizados em estruturas atacadas por cloretos através da resistência de polarização.** Porto Alegre, 2000. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção técnicas eletroquímicas**. São Paulo: Pini; Goiânia, GO: Editora UFG, 1997.

CASTELLOTE, M., ALONSO, C., ANDRADE, C. **Determination of the OH content in the aqueous phase of hardened cementitious materials by an empirical leaching method**. *Materiales de Construcción*, v. 52, p. 39 – 56. 2002.

CIGNA, R. *et al.* **Corrosion of steel in reinforced concrete structures**. COST Action 521 - Final Report. European Community: Luxembourg, 2003.

DONG, H. Z.; SHI, W.; GUO, P X. **Initiation and repassivation of pitting corrosion of carbon steel in carbonated concrete pore solution**. *Corrosion Science*, v. 53, p.1322 -1330, 2011.

EGGERS, M.; OLIVEIRA, P. S. F. de. **Novas técnicas eletroquímicas de recuperação de estruturas de concreto: realcalinização e dessalinização (extração de cloretos)**. In: IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções (CONPAT 97). Anais, Vol. 2, p. 215-222, 1997.

ELSENER, B. **Half-cell potential mapping to assess repair work on RC structures**. *Construction and Building Materials*, v. 15, n. 2-3, p. 133 – 139, mar - apr. 2001. 25.

FELIU, S.; GONZÁLEZ, J. A.; FELIU, V. Possibilities and problems of in situ techniques for measuring steel corrosion rates in large reinforced concrete structures. *Corrosion Science*, v. 47, p. 217 –238, 2005.

FIGUEIREDO, E. J. P. **Efeitos da carbonatação e de cloretos no concreto**. In: ISAIA, G.C. (Ed) *Concreto - Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2005.

FOSROC. **Compatibility of coatings applied over realkalised and desalinated concrete**. Fosroc International Limited, sd. 12 p.

GENTIL, V. **Corrosão**. 4ªed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2003. 341p.

GONÇALVES, A.; ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M. **Procedimientos de reparación de armaduras. In: Manual de rehabilitación de estructuras de homigón: reparación, refuerzo e protección**. CYTED-XV-F.2003, Cap.7, p. 338-376.

GONZÁLEZ, J. A. Et al. Some questions on the corrosion of steel in concrete – Part I: When, how and how much steel corrodes. **Materials and Structures**, v. 29, p. 40-46, 1996

GONZALEZ, J. A.; COBO, A., GONZAALAZ, M. N.; OTERO, E. **On the effectiveness of realkalisation as a rehabilitation method for corroded reinforced concrete structures**. *Materials and Corrosion*. v. 02, p. 51 - 97, 2000.

GROCHOSKI, M.; HELENE, P. **Sistemas de reparo para estruturas de concreto com corrosão de armaduras**. *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP*, São Paulo, p. 21, 2008.

HANSSON, C.M. Comments on electrochemical measurements of the rate of corrosion of steel in concrete. **Cement and Concrete Research**, v.14, n.4, p. 574-584, Jul. 1984.

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

HELENE, P. R. L. **Corrosão das armaduras para concreto armado**. São Paulo, IPT, PINI, 1986.

HUETA, B.; L'HOSTISA, V.; MISERQUEC, F.; IDRISIB, H. **Electrochemical behavior of mild steel in concrete: Influence of pH and carbonate content of concrete pore solution** (2005). *Electrochimica Acta*. v. 51 (1), p. 172–180.

KAESCHE, H. **The detection of corrosion danger to steel reinforcement due to admixtures in concrete** (1959). *Zem.-Kalk-Gips*, v. 12, p. 289–305.

LI, L.; SAGUÉS, A. A. **Effect of chloride concentration on the pitting and repassivation potentials of reinforcing steel in alkaline solutions** (1999). *Corrosion/99*. Paper 567.

MEIRA, G. R. **Agressividade por cloretos em zona de atmosfera marinha frente ao problema da corrosão em estruturas de concreto armado**. 2004. 369 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. Tradutora Cristina Borba. São Paulo: Ibracon, 2008, 121– 123 p, 156 p, 161–170 p.

MIETZ, J. **Electrochemical rehabilitation methods for reinforced concrete structures**. European Federation of Corrosion Publications, n. 24, 1998.

MIRANDA, J. M.; GONZALEZ, J. A.; OTERO, E.; COBO, A. **Consideraciones sobre la repassivacion-rehabilitacion de las estructuras corroidas de concreto armado**. In. VII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción – IX Congreso de Control de Calidad em la Construcción – CONPAT, Merida, Mexico, 2003. CD-ROM.

MIRANDA, J.M.; GONZÁLEZ, J.A.; COBO A.; OTERO, E. **Several questions about electrochemical rehabilitation methods for reinforced concrete structures** (2006). *Corrosion Science*, v. 48 (8), p. 2172-2188.

MIETZ, J. **Electrochemical rehabilitation methods for reinforced concrete structures** (1998). European Federation of Corrosion Publications, n. 24.

MONTEIRO, E.C.B. **Avaliação do método de extração eletroquímica de cloretos para reabilitação de estruturas de concreto com problemas de corrosão de armaduras.** Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MORAGUES, A.; MACIAS, A.; ANDRADE, C. **Equilibria of the chemical composition of the concrete pore solution.** Part 1: comparative study of synthetic and extracted solutions. *Cement and Concrete Research*, v. 17, pp. 173-182, 1987.

MOREIRA, C. **Realcalinização de estruturas de concreto carbonatados com a utilização de gel saturado de solução alcalina.** (2006). Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiânia, Goiânia, 2006.

NEVILLE, A.M; BROOKS, J.J. - **Concrete technology.** Logman Group UK Ltd, 1993)

ODDEN, L. **The repassivating effect of electro-chemical realkalisation and chloride extraction.** In: International Conference on Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete. Proceedings... University of Sheffield, 1994. p. 1473 - 1488.

PAGE, C.L.; YU, S.W. **Potencial effects of electrochemical desalination of concrete on alkali-silica reaction.** *Magazine of Concrete Research*, v. 47. n°. 170, march, 1995, p.23-32.

PETER, M. A.; MUNTEAN, A.; MEIER, S. A.; BOHM, M. **Competition of several carbonation reactions in concrete.** A parametric study. *Cement and Concrete Research*, v. 38, p. 1385 - 1393, 2008.

POSSAN, E. **Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado.** 2004. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

RILEM, D.R. **Draft recommendation for repair strategies for concrete structures damaged by reinforcement corrosion.** *Materials and Structures*, 1994, Vol. 27, N°171, 415-436.

SILVA, J. M. M. F. **Métodos eletroquímicos para prevenção da deterioração e reparação de estruturas de betão armado: proteção catódica, dessalinização e realcalinização.** 2007. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

THOMAZ, Ercio. **Trincas em Edifícios: Causas, Prevenção e Recuperação.** 1º edição. São Paulo: Pini, 2003.

TONG, Y. Y.; BOUTEILLER, V.; MARIE-VICTORIE, E.; JOIRET. **Efficiency investigations of electrochemical realkalisation treatment applied to carbonated reinforced concrete – Part 1: Sacrificial anode Process** (2012). *Cement and Concrete Research*. v. 42, p. 84-94.

VAGHETTI, M. A. O. **Estudo da corrosão do aço, induzida por carbonatação, em concreto com adições minerais**. 2005. 23 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

VIEIRA, F. M. P. **Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras em concretos com adição de sílica ativa**. Porto Alegre, 2003.

YEIH, W.; CHANG, J. J. **A study on the efficiency of electrochemical realkalisation of carbonated concrete**, Construction and Building Materials, v. 19, n. 7, p. 516 – 524, set. 2005.

ZHANG, Y.; POURSAEE, A. **Study of the semi-conductive behavior of the passive film on carbon steel in simulated concrete pore solution under stress**. Anti-Corrosion Methods and Materials, v. 62, n. 6, p. 363 - 370, mar. 2015.