

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ANA CAROLINA RACHADEL  
GIORGIA QUIRINO ZANINI  
GIOVANA HACKENBERG

**CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO DA REALCALINIZAÇÃO EM  
CONCRETO POR MEIO DE MÉTODO ELETROQUÍMICO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA  
2016

ANA CAROLINA RACHADEL  
GIORGIA QUIRINO ZANINI  
GIOVANA HACKENBERG

**CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO DA REALCALINIZAÇÃO EM  
CONCRETO POR MEIO DE MÉTODO ELETROQUÍMICO**

Trabalho de Conclusão do Curso de graduação apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil –DACOC- da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Wellington Mazer

Co-orientadora: Profa. Dr. Janine Nicolosi Corrêa

CURITIBA  
2016

## FOLHA DE APROVAÇÃO

### CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO DA REALCALINIZAÇÃO EM CONCRETO POR MEIO DE MÉTODO ELETROQUÍMICO

Por

ANA CAROLINA RACHADEL  
GIORGIA QUIRINO ZANINI  
GIOVANA HACKENBERG

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 22 de novembro de 2016, pela seguinte banca de avaliação:

---

Prof. Orientador – Wellington Mazer, Dr.  
UTFPR

---

Profa. Co-orientadora – Janine Nicolosi Corrêa, Dra.  
UTFPR

---

Prof. Adauto José Miranda de Lima, Dr.  
UTFPR

---

Prof. Marcelo Queiroz Varisco, MSc.  
UTFPR

Dedicamos este trabalho aos inúmeros mestres que passaram por nossas vidas e tiveram a generosidade de compartilhar seu conhecimento.

Dedicamos também a Universidade Tecnológica Federal do Paraná que nos deu todo o suporte para a realização desta pesquisa.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos, primeiramente, aos nossos pais que nos guiaram, cuidaram, estimularam e deram forças para que conseguíssemos atingir mais uma conquista em nossas vidas. Vocês aliviam o peso de nossas obrigações, são exemplos a serem seguidos.

Ao nosso orientador, Prof<sup>o</sup>. Dr. Wellington Mazer, e à co-orientadora, Prof<sup>a</sup>. Dra. Janine Nicolosi Corrêa, pelo suporte, incentivo e ideias que ajudaram na obtenção dos resultados apresentados neste trabalho.

Aos amigos que estiveram sempre ao nosso lado. Aos que encontramos todos os dias durante esses anos de graduação e aos que nos fazem sentir queridas mesmo de longe. Vocês são nossos portos seguros, para onde vamos quando precisamos de ajuda ou, simplesmente, para nos sentirmos mais alegres.

Agradecemos àqueles que de alguma forma ajudaram durante o andamento deste trabalho. Ao Prof<sup>o</sup>. Ms. Marcelo Queiroz Varisco pelos conhecimentos e aos amigos Guilherme Ono Sens, pelos conhecimentos e ajuda com os componentes eletrônicos presente neste trabalho, e Lucas Plattner Fernandez pela ajuda na confecção do concreto.

Por fim, agradecemos umas às outras. Vivemos um ano de pesquisas que nos aproximou mais ainda. Terminamos este trabalho com a certeza de que temos uma amizade que pode enfrentar vários obstáculos sem se abalar. Cada uma exerceu papel fundamental na obtenção de nossos resultados. Somos eternamente gratas por podermos concluir essa etapa juntas.

Uma coisa em que realmente acreditamos sempre acontece; e acreditar numa coisa faz com que ela aconteça. E penso que nenhuma coisa acontecerá a não ser que acreditemos inteira e profundamente nela (Frank Lloyd Wright, 1867 – 1959).

## RESUMO

RACHADEL, A.C.; ZANINI, G. Q.; HACKENBERG, G. Contribuição para o estudo da realcalinização em concreto por meio de método eletroquímico. 2016. 69 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia Civil – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Uma das manifestações patológicas mais recorrentes em estruturas de concreto armado é a corrosão, apresentando elevados custos de reparo. O processo de carbonatação, que promove a alteração do pH do concreto de básico para neutro por meio de reações químicas que consomem as substâncias alcalinas presentes na pasta de cimento, é um dos causadores dessa patologia. Sendo o pH alcalino do concreto o responsável pela inércia química do aço e formação da camada passivadora, a redução dos seus valores torna a armadura vulnerável e conseqüentemente aumenta a velocidade de corrosão das armaduras. Técnicas que visam reestabelecer o pH básico do concreto são essenciais para garantir a durabilidade da estrutura. A substituição do concreto afetado é eficaz para esse fim, no entanto, com a atual preocupação com o meio ambiente, técnicas não destrutivas, como a realcalinização química (RAQ) e a realcalinização eletroquímica (RAE), tornam-se alternativas mais vantajosas. Neste trabalho, aplicou-se o método de RAE em vigas carbonatadas, utilizando dois metais diferentes como ânodo: titânio e alumínio e o método de RAQ. O método de RAE apresentou maior redução nas medidas de profundidade de carbonatação em comparação ao método de RAQ. Por meio de análise qualitativa, foi possível observar melhores resultados provindos da utilização do método com malha metálica de titânio. No fim deste trabalho, são apresentadas diversas sugestões para trabalhos futuros, com base nas pesquisas realizadas e experiência de montar uma célula de realcalinização eletroquímica.

**Palavras-chave:** Realcalinização eletroquímica (RAE). Carbonatação. Corrosão. Patologia. Durabilidade.

## ABSTRACT

RACHADEL, A.C.; ZANINI, G.Q.; HACKENBERG, G. Contribution to the study of realkalisation of concrete by mean of electrochemical method. 2016. 69 pages. Completion of course work Bachelor of Civil Engineering – Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2016.

One of the most recurrent pathological manifestations in reinforced concrete structures is corrosion, which has elevated repair costs. Resulting in a concrete pH change from alkaline to neutral, carbonation is one of the causes of the presented pathology. The process happens through chemical reactions consuming alkaline substances in the cement paste. Since an alkaline concrete pH promotes chemical inertia in steel and the formation of a passive layer, a decrease in its levels jeopardizes the reinforcements, subsequently increasing corrosion speeds. Therefore, techniques that aim re-establishing a basic pH in concrete are essential to ensure the durability of concrete structures. Replacing affected concrete is effective for this purpose, however, when envisioning environmental issues, non-destructive techniques, such as chemical realkalisation and electrochemical realkalisation, become more profitable alternatives. In this research, an electrochemical realkalisation method was applied to carbonated beams, using chemical realkalisation along with two different metals as anodes: titanium and aluminum. Compared to chemical realkalisation, the electrochemical method used displayed greater reduction in carbonation depth measurements. It was possible to determine quantitatively that the titanium metallic mesh presented the best results. Nonetheless, at the end of this paper, several suggestions for future studies are presented based on the achieved results and the experience in assembling an electrochemical realkalisation cell.

**Key-words:** Electrochemical realkalisation (ERA). Carbonation. Corrosion. Pathology. Durability.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Gráfico desempenho versus tempo.....	18
Figura 2 – Conceitos de durabilidade e desempenho .....	20
Figura 3 – Diagrama de equilíbrio potencial-pH - domínios onde a água tem caráter ácido ou alcalino e oxidante ou redutor (T=25°C) .....	28
Figura 4 – Diagrama de equilíbrio potencial - pH do sistema ferro/água (T=25°C; concentração de equilíbrio das espécies dissolvidas =10 <sup>-6</sup> molar) .....	29
Figura 5 – Esquema representativo do processo de carbonatação .....	31
Figura 6 – Carbonatação do concreto em função da umidade .....	33
Figura 7 – Profundidade de carbonatação em função do tempo e da relação a/c ....	34
Figura 8 – Influência da relação a/c na profundidade de carbonatação, ao fim de um a dois anos .....	35
Figura 9 – Influência do período de cura inicial sobre a profundidade de carbonatação após 16 anos; .....	36
Figura 10 – Esquema de formação dos produtos de corrosão .....	38
Figura 11 – Montagem da célula de realcalinização .....	40
Figura 12 – Representação esquemática da realcalinização eletroquímica .....	41
Figura 13 – Resultados dos testes de Fenolftaleína e Timolftaleína .....	43
Figura 14 – Perspectiva das vigas do ensaio .....	44
Figura 15 – Fonte de corrente contínua .....	45
Figura 16 – Feltro .....	45
Figura 17 – Solução de carbonato de sódio .....	46
Figura 18 – Malha de titânio .....	46
Figura 19 – Malha de alumínio .....	47
Figura 20 – Malhas de titânio e alumínio, respectivamente, nas medidas de 20x50 cm .....	47
Figura 21 – Cabo flex condutor .....	48
Figura 22 – Corte na estrutura para medição da carbonatação .....	49
Figura 23 – Esquema ilustrativo da célula de realcalinização eletroquímica .....	50
Figura 24 – Malha metálica entre dois pedaços de feltro .....	51
Figura 25 – Corte inicial antes da aplicação do método – viga carbonatada.....	52
Figura 26 – Profundidade de carbonatação antes da aplicação do método (20mm)	53
Figura 27 – Equipamento em funcionamento.....	54
Figura 28 – RAQ, RAE (titânio) e RAE (alumínio), em sequência .....	55
Figura 29 – Realcalinização química.....	56
Figura 30 – Realcalinização eletroquímica (titânio).....	56
Figura 31 – Realcalinização eletroquímica (alumínio).....	57
Figura 32 – RAQ após um dia .....	58
Figura 33 – RAE com Titânio após um dia .....	58
Figura 34 – RAE com Alumínio após um dia.....	59

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classes de agressividade ambiental .....	21
Quadro 2 – Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto .....	22
Quadro 3 – Principais compostos do cimento Portland .....	23
Quadro 4 – Série de potenciais de eletrodo padrão .....	25
Quadro 5 – Série galvânica .....	26
Quadro 6 – Efeitos da realcalinização nos valores de pH .....	41

## LISTA DE SIGLAS

A	Ampere
ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
a/c	Relação de proporção entre água e cimento
atm	Atmosfera
°C	Graus Celsius
C <sub>2</sub> S	Silicato dicálcico ou bicálcico (belita)
C <sub>3</sub> A	Aluminato tricálcico
C <sub>3</sub> S	Silicato tricálcico (alita)
C <sub>3</sub> S <sub>2</sub> H <sub>3</sub>	Silicato de cálcio hidratado
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado (forma simplificada)
C <sub>4</sub> AF	Ferroaluminato tetracálcico
CA	Concreto armado
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de Cálcio
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de Cálcio
cm	Centímetro
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CP	Concreto protendido
Fe(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido ferroso
Fe(OH) <sub>3</sub>	Hidróxido férrico
g	Gramas
H <sup>+</sup>	Cátion hidrogênio
H <sub>2</sub> O	Água
I	Corrente
KOH	Hidróxido de potássio
M	Molar
M	Metro
μA	MicroAmpere
mm	Milímetro
mA	MiliAmpere
N	Normalidade
NaOH	Hidróxido de sódio
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Carbonato de sódio
NBR	Norma brasileira
Pa	Pascal
pH	Potencial hidrogeniônico
RAE	Realcalinização eletroquímica
RAQ	Realcalinização química
R	Resistividade
s	Segundo
U	Tensão elétrica
V	Volt

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	Objetivo Geral	13
1.1.2	Objetivos Específicos	13
1.2	JUSTIFICATIVA	13
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>16</b>
2.1	MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS DAS ESTRUTURAS	16
2.1.1	Desempenho	17
2.1.2	Vida Útil e Durabilidade	19
2.2	QUÍMICA DO CIMENTO	22
2.3	CORROSÃO DOS METAIS	23
2.3.1	Passivação do Metal	27
2.3.2	Diagrama de Pourbaix	27
2.4	PROCESSOS QUÍMICOS DE DETERIORAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO	30
2.4.1	Carbonatação	30
2.4.2	Corrosão das Armaduras	37
2.5	REALCALINIZAÇÃO ELETROQUÍMICA (RAE)	39
2.5.1	Princípios e Características	39
2.5.2	Eficiência	41
2.5.3	Efeitos Colaterais	43
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>44</b>
3.1	MATERIAIS	44
3.1.1	Peça Estrutural	44
3.1.2	Componentes da Célula de Realcalinização	45
3.2	MÉTODOS	48
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSÕES</b>	<b>52</b>
4.1	CONTRIBUIÇÕES PARA O ESTUDO DO TEMA	59
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>61</b>
5.1	CONCLUSÕES	61
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	63
	REFERÊNCIAS	64
	ANEXO A - TABELA DE RESISTIVIDADE DOS MATERIAIS CONDUTORES, SEMI-CONDUTORES E ISOLANTES	68

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto armado é o material mais utilizado em construções no mundo, por ser um material versátil, econômico e durável (BAROGHEL-BOUNY, CAPRA e LAURENS, 2014), podendo resistir a ambientes de grande agressividade quando bem executados e mantidos. Apesar de um número significativo de estruturas existentes apresentar boa performance ao longo do tempo, grande parte delas está continuamente sujeita à ação de agentes externos causadores de manifestações patológicas (BOHNI, 2005).

A corrosão prematura da armadura contida na estrutura de concreto armado, causada principalmente pela ação de cloretos ou pela carbonatação do concreto, merece atenção especial devido à frequência em que ocorre e por ser a causa da maioria das falhas em estruturas de concreto armado. A corrosão prematura também acontece quando a proteção física do aço é insuficiente, podendo estar ligada a outros fatores como baixa espessura de cobrimento da armadura, porosidade do concreto, dentre outros (HELENE, 1986; BOHNI 2005).

Em ambientes urbanos distantes de zonas marítimas, onde as liberações de gases provenientes dos processos de combustão são intensificadas e a presença de cloretos tem menor importância, a carbonatação pode ser considerada a principal responsável pelo fenômeno de corrosão (RIBEIRO, 2009).

O processo de carbonatação ocorre quando o dióxido de carbono penetra na estrutura e consome o hidróxido de cálcio por meio de reações químicas, formando carbonato de cálcio. Este agente faz com que o pH básico do concreto sofra redução, provocando a despassivação do aço e levando-o a um rápido processo de corrosão com perda significativa da seção da armadura (CÁNOVAS, 1988; BOHNI 2005; RIBEIRO, 2009; BAROGHEL-BOUNY, CAPRA e LAURENS, 2014).

A diminuição do pH, resultado da carbonatação, pode ser revertida por meio de métodos como o de realcalinização química (RAQ) e realcalinização eletroquímica (RAE) (RIBEIRO, 2009).

Diferente da realcalinização química (RAQ), cuja reversão do processo de carbonatação ocorre lentamente por absorção e difusão de soluções alcalinas, a RAE utiliza a aplicação de um campo elétrico entre a armadura catódica e um ânodo externo, fazendo com que os íons negativos migrem mais rapidamente para o

exterior da peça e os positivos, da solução alcalina, para o interior, reestabelecendo o pH básico do concreto (BANFILL, 1994).

Segundo Miranda et al. (2005), métodos de reabilitação eletroquímica, como o RAE, se mostram eficientes em retardar a corrosão do aço quando usados de maneira preventiva, isto é, antes dos efeitos da carbonatação atingirem a armadura, já que esses métodos não reverterem a corrosão.

Considerando a eficiência que o RAE tem apresentado (REDAELLI e BERTOLINI, 2011; RIBEIRO, 2009; LOURENÇO, 2007) e observando o caráter não destrutivo e de aplicação temporária, considera-se a possibilidade de substituir o metal mais utilizado como ânodo, o titânio, por outro metal de menor custo e maior disponibilidade no mercado.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

O principal objetivo deste trabalho é contribuir para o estudo da realcalinização de concretos por meio do método eletroquímico.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Este trabalho tem como objetivos específicos:

- Comparar a realcalinização eletroquímica com a realcalinização química, para garantir a funcionalidade da célula de RAE, e;
- Utilizar como ânodo dois metais: o titânio, que é o tradicionalmente usado, e o alumínio, um possível substituto mais barato e mais disponível no mercado, avaliando sua eficiência.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Segundo Helene e Andrade (2007), os Estados Unidos e o Canadá, que são países desenvolvidos, consideram o investimento no estudo do concreto muito importante, tanto para garantir a qualidade de vida da população como para a

competitividade da indústria em termos de conhecimento. Países como eles sabem que é importante esse investimento no concreto e suas estruturas, já que eles ainda têm muito a desenvolver-se.

A corrosão das armaduras é uma das mais significativas causas de deterioração de estruturas de concreto armado, sendo causadora de inúmeras outras patologias, e tem recebido crescente atenção nos últimos 30 anos devido a sua grande frequência e por possuir altos custos de recuperação (BAROGHELBOUNY, CAPRAS e LAURENS, 2014).

Entre os métodos de reparo da estrutura de concreto carbonatado, estão os métodos tradicional, químico e eletroquímico. O tradicional consiste na quebra da estrutura, retirando o concreto comprometido e substituindo-o por um novo (MONTEIRO, 2002). Atualmente deve-se levar a questão da sustentabilidade em consideração já que não é correto realizar a demolição de uma construção com pouca idade (CAPMAS, 2014). O método químico consiste na difusão e absorção de uma solução alcalina por capilaridade e forças hidráulicas, sem a necessidade de um campo elétrico e um fluxo de corrente (ARAÚJO, 2009). Já o método eletroquímico consiste em aplicar uma corrente elétrica entre a armadura (cátodo) no interior do concreto e uma malha metálica externa (ânodo) imersa em um eletrólito. Nesta técnica, o ânodo mais comumente utilizado é o titânio, devido à sua alta resistência à corrosão e, conseqüentemente, maior vida útil (MONTEIRO, 2002).

Os fatores mais importantes a serem considerados quando da seleção do ânodo mais apropriado para um determinado tipo de estrutura são: a facilidade de instalação, a durabilidade, os efeitos da instalação do ânodo na estrutura, o custo e a estética. A combinação de diferentes ânodos pode também ser utilizada na mesma estrutura ou elemento de modo a obter-se a solução mais econômica e eficaz (LOURENÇO, 2007).

Apesar da aplicação do método que utiliza o titânio ter apresentado resultados satisfatórios em estudos (REDAELLI e BERTOLINI, 2011; RIBEIRO, 2009; LOURENÇO, 2007), reestabelecendo o pH básico do concreto em torno das armaduras, a utilização deste metal como ânodo torna o processo caro. Além do alto custo, a disponibilidade e variedade de dimensões do metal no mercado são escassas.

A pesquisa a ser apresentada neste trabalho de conclusão de curso, tem a intenção de verificar a eficiência do uso do alumínio no processo de realcalinização

eletroquímica, sendo este um metal com menor custo e maior disponibilidade no mercado comparado ao titânio. Também se tem a intenção de comparar os resultados obtidos com os métodos de realcalinização química e eletroquímica.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS DAS ESTRUTURAS

Desde a origem das civilizações, o ser humano vem criando construções que se adaptem às suas necessidades de moradia, transporte e trabalho, e com isso desenvolvendo cálculos e implementando novas tecnologias à materiais e técnicas. (SOUZA e RIPPER, 1998). Com a revolução industrial, surgiram novas técnicas e materiais, como o ferro fundido, o aço e, mais tarde, o concreto (ISAIA, 2005).

Conforme as cidades iam crescendo e a densidade populacional aumentava, surgiu a necessidade de se expandir horizontalmente, demandando obras de infraestrutura como pontes e viadutos, e crescer verticalmente, com edifícios de múltiplos pavimentos. A preocupação com o concreto era praticamente só em atender aos esforços mecânicos (ISAIA, 2005). As limitações do desenvolvimento científico, o uso de materiais fora das especificações, o envelhecimento natural, as falhas involuntárias e imperícias levam desde ao desempenho insatisfatório até a deterioração precoce das construções (SOUZA e RIPPER, 1998).

Surge então a necessidade do estudo das manifestações patológicas baseado no princípio de que é necessário um conhecimento aprofundado sobre como a edificação foi projetada, construída, utilizada, bem como sobre as condições ambientais, materiais e estruturais que podem ter afetado a edificação para que reparos e manutenções realizadas sejam eficientes (MACDONALD, 2003).

Na virada da década de 60 para 70, no ramo da engenharia das estruturas, casos de insucesso e necessidade de reforço estrutural pouco tempo após o término das construções fizeram com que fosse necessário buscar novos critérios a seguir, que iam além do atendimento à capacidade de resistência de suas peças, com o intuito de alcançar o sucesso no desempenho das estruturas de concreto armado (SOUZA e RIPPER, 1998). A maior parte das patologias encontradas em estruturas de concreto armado são resultado da baixa qualidade dos materiais, ao emprego incorreto a que se destina e à exposição ambiental à qual não resiste (CÁNOVAS, 1988).

### 2.1.1 Desempenho

Entende-se por desempenho da estrutura o comportamento da mesma ao longo de sua vida útil como resultado do trabalho executado durante as fases de projeto, construção e utilização (SOUZA e RIPPER, 1998; CÁNOVAS, 1988).

Fatores como cálculo, detalhamento, escolha dos métodos construtivos, seleção e controle de qualidade dos materiais, controle tecnológico e rotinas de manutenção devem ser tratados com a mesma importância, pois podem, sozinhos ou em conjunto, ser determinantes para o fracasso da construção, fazendo com que seu desempenho caia abaixo dos níveis mínimos de satisfação e reduzindo sua vida útil (SOUZA e RIPPER, 1998).

Para o concreto como material de construção, o desempenho está ligado ao nível de instabilidade física e química em função de suas características e componentes, além do nível de agressividade do ambiente no qual ele está inserido. A ineficiente interação entre a estrutura e o ambiente, em função do material utilizado, condições de exposição e do agente agressor, influenciam nas formas e velocidade de sua deterioração (SOUZA e RIPPER, 1998). Desempenho é o resultado do equilíbrio entre o produto e o meio (MITIDIARI FILHO, 2007).

Na Figura 1 pode se observar um gráfico que mostra como é o desempenho de edificações em relação ao tempo de acordo com três fenômenos relacionados ao desempenho de uma estrutura.

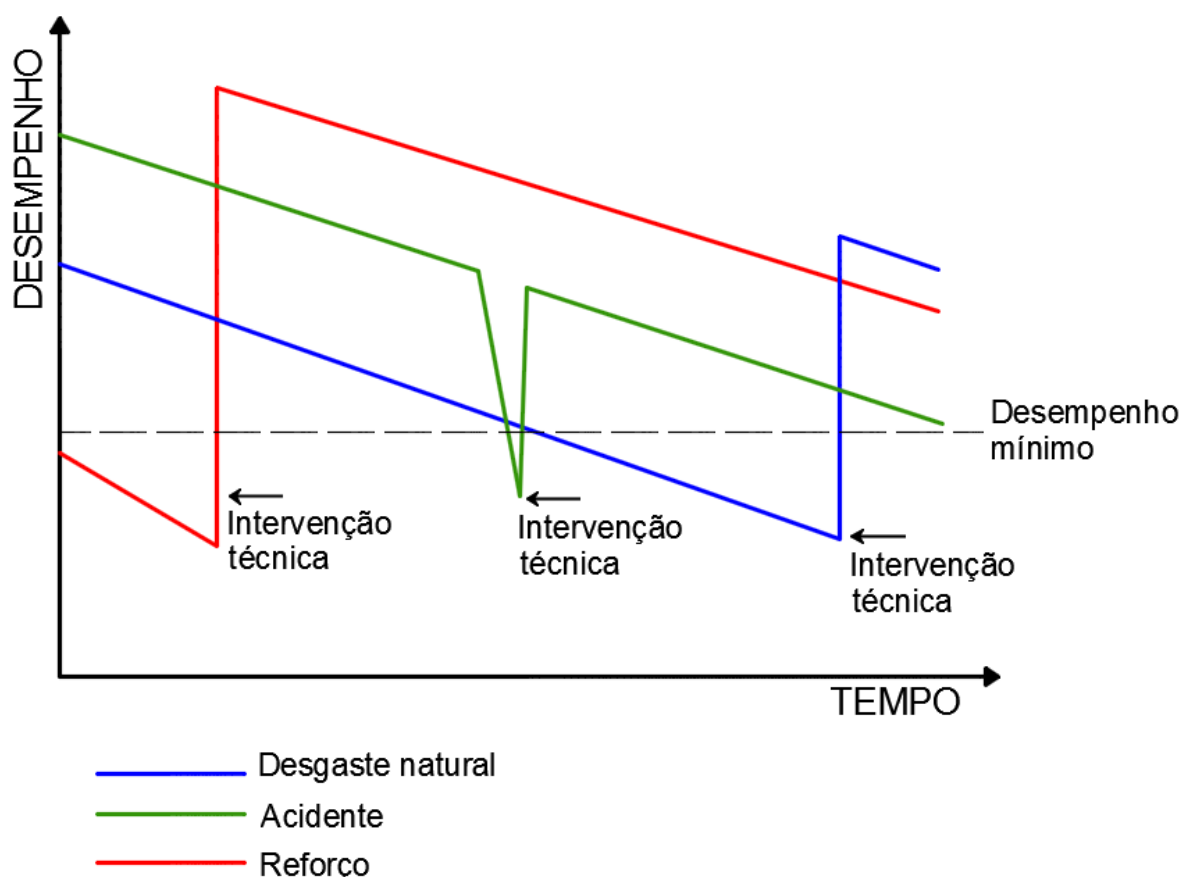


Figura 1 – Gráfico desempenho *versus* tempo  
 Fonte: Adaptado de Souza e Ripper (1998).

O fenômeno natural de desgaste da estrutura que, após uma intervenção, se recupera e volta a operar acima do limite mínimo de desempenho exigido para sua utilização; o fenômeno relacionado a um problema súbito ou um acidente, que leva a necessidade de uma intervenção para que volte a apresentar comportamento satisfatório; e o fenômeno relacionado a erros originários em projeto, execução, ou uso para fins inadequados ao projetado o que resulta na necessidade de reforço estrutural (SOUZA e RIPPER, 1998). A constante manutenção da estrutura contribui para a sua conservação e deve começar com o início da construção (CÁNOVAS, 1988).

Algumas estruturas iniciam suas vidas úteis já apresentando desempenhos insatisfatórios devido a falhas de projeto e execução, enquanto outras mantém um bom desempenho até o final de suas vidas úteis de projeto (SOUZA e RIPPER, 1998).

Pode-se estimar o desempenho potencial de uma estrutura por meio de ensaios em laboratório ou em protótipos, modelos matemáticos, julgamento técnico

de especialistas e também com inspeções em protótipos ou no próprio edifício construído e em uso (MITIDIERI FILHO, 2007).

### 2.1.2 Vida Útil e Durabilidade

Por vida útil de um material entende-se o período durante o qual as suas propriedades permanecem acima dos limites mínimos especificados. Saber qual é a vida útil de um material é fundamental para a confecção de programas de manutenção adequados. Os materiais e métodos construtivos escolhidos, a concepção estrutural, a classe de agressividade ambiental na qual a estrutura está inserida, sua execução e a realização das manutenções estão ligados, direta ou indiretamente, ao desempenho, durabilidade e conformidade da construção (SOUZA e RIPPER, 1998).

O conjunto de decisões tomadas, procedimentos realizados e materiais utilizados garantem, ou não, à estrutura um desempenho satisfatório ao longo de sua vida útil, sendo que o usuário se torna essencial para garantir a vida útil da edificação uma vez que se torna responsável pela sua manutenção preventiva e corretiva (SOUZA e RIPPER, 1998). As construções que apresentam patologias, normalmente são devido à erros de concepção ou de execução. O concreto apresenta boa durabilidade e geralmente não necessita de proteção ou manutenção específica, só a inspeção visual periódica (CAPMAS, 2014).

Por durabilidade entende-se ser o parâmetro que relaciona a aplicação das características de deterioração do material e do sistema estrutural a uma construção e suas resposta a agressividade do ambiente (SOUZA e RIPPER, 1998). Uma construção deve atender as exigências do usuário ao longo do tempo, inclusive em termos estéticos, resistindo às agressões químicas, físicas e mecânicas, como por exemplo as ações de carga, vento, frio, chuva e variações de temperatura. (ROUGEAU e GUIRAUD, 2014). Para uso habitacional, as exigências do usuário para o edifício são condições de segurança, saúde, conforto, satisfação e preocupações econômicas, esta, diretamente ligada à durabilidade (MITIDIERI FILHO, 2007). Sabendo qual a durabilidade esperada, é possível decidir as características do concreto de acordo com as solicitações às quais a estrutura será submetida, adaptando suas propriedades (ROUGEAU e GUIRAUD, 2014).

Na Figura 2 é possível observar um diagrama que correlaciona os conceitos de durabilidade; as fases de: projeto, escolha de materiais, execução e cura do concreto; a influência da água e o desempenho final da estrutura.

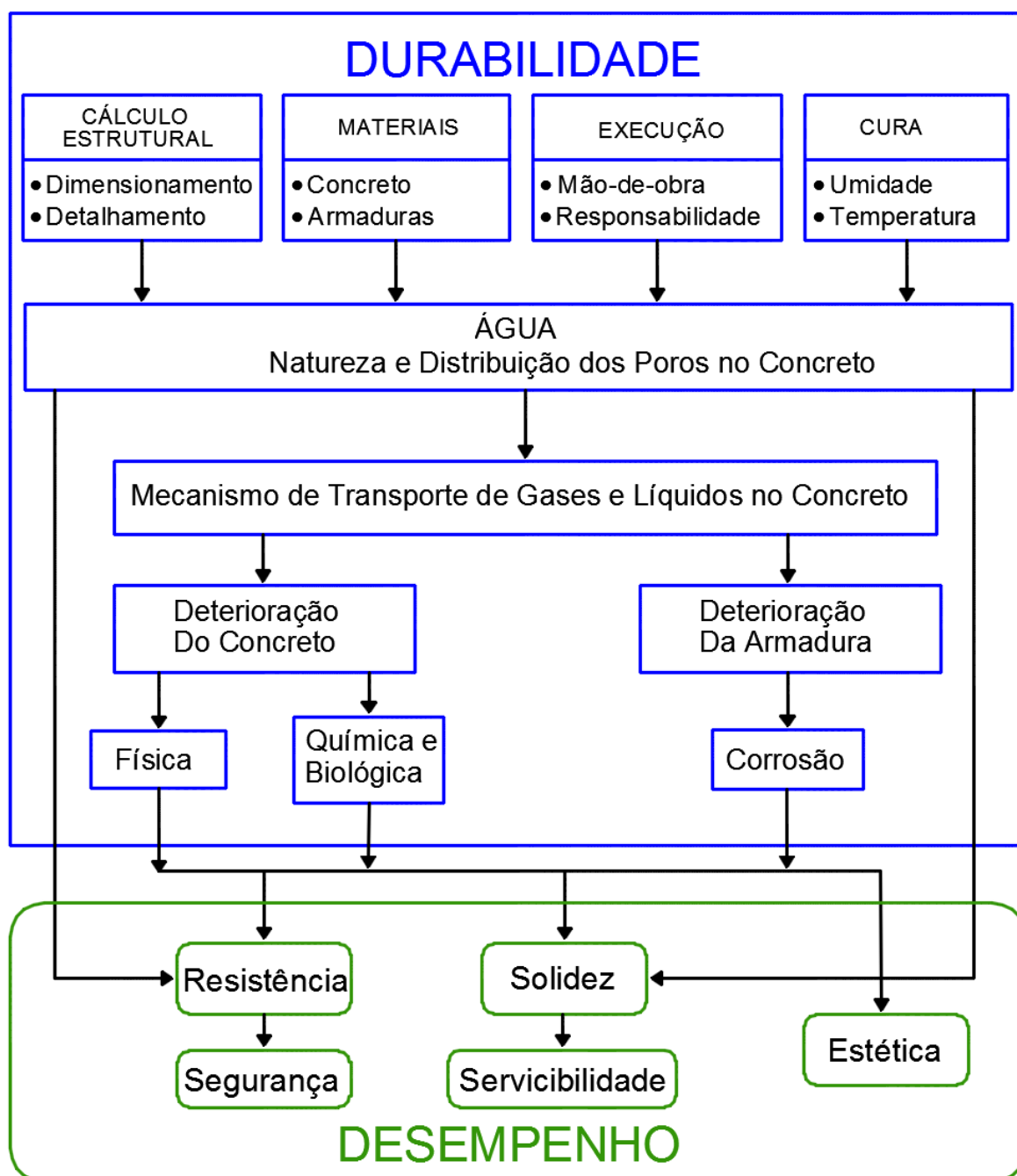


Figura 2 – Conceitos de durabilidade e desempenho  
Fonte: Adaptado de Souza e Ripper (1998).

Do diagrama, infere-se que a durabilidade do concreto está diretamente relacionada a água. A relação água/cimento utilizada em sua composição influencia

sua compacidade, porosidade, resistência, densidade, capilaridade e fissuração – todas propriedades indicadoras de um material durável ou não. Essas propriedades do concreto devem ser projetadas para que fatores como temperatura, umidade, chuva, vento, salinidade e agressividade química ou biológica interfiram o mínimo possível na qualidade da estrutura (SOUZA e RIPPER, 1998).

A NBR 6118 (ABNT, 2014) que trata dos procedimentos para o projeto de estruturas de concreto armado, considera o meio na qual está inserido o concreto para determinar parâmetros que garantam a durabilidade da estrutura. A norma classifica os meios aos quais pode estar exposto o concreto, conforme o Quadro 1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana	Pequeno
III	Forte	Marinha	Grande
		Industrial	
IV	Muito forte	Industrial	Elevado
		Respingos de maré	

Quadro 1 – Classes de agressividade ambiental  
Fonte: Associação... (2014).

De acordo com a classe do ambiente à qual o concreto é submetido: I, II, III ou IV, a NBR 6118 (ABNT, 2014) indica o fator água/cimento adequado, conforme apresentado no Quadro 2 (ASSOCIAÇÃO..., 2014).

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$

NOTAS  
CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.  
CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Quadro 2 – Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto  
Fonte: Associação... (2014).

Quanto maior a agressividade, menor a quantidade de água recomendada. A agressividade ambiental também influencia em outros parâmetros, como, por exemplo, o cobrimento nominal da armadura (ASSOCIAÇÃO..., 2014).

Segundo Possan e Demoliner (2013), a vida útil de uma edificação normalmente é expressa em anos, sendo estabelecida conforme as normas e códigos. De acordo com a norma de desempenho NBR 15575 (ABNT, 2013), a vida útil de projeto para edifícios e outras estruturas comuns deve ser de 50 anos (ASSOCIAÇÃO..., 2013).

## 2.2 QUÍMICA DO CIMENTO

O cimento na sua forma em pó é basicamente formado por uma combinação de calcário, sílica, alumina, e óxido de ferro, que se misturam e sofrem reações a altas temperaturas (NEVILLE, 2013). Como resultados podem ser citados quatro compostos principais, o silicato tricálcico ( $C_3S$ ), o silicato dicálcico ( $C_2S$ ), o aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) e o ferroaluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ), que são comumente abreviados conforme apresentado no Quadro 3 (NEVILLE, 2013; NONAT, 2014)

Nome do composto	Composição em óxidos	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

Quadro 3 – Principais compostos do cimento Portland

Fonte: Neville (2013).

Dentre esses compostos, o  $\text{C}_3\text{S}$  e o  $\text{C}_2\text{S}$  são os mais importantes, já que são os principais responsáveis pela resistência da pasta de cimento hidratada. Mais de 90% do cimento é formado pelos compostos principais, sendo com estes que ocorrem as reações as mais importantes (NEVILLE, 2013).

O conjunto de reações provocadas após a mistura de cimento com água é chamada de hidratação, responsável pela principal característica do concreto: formar um sólido (NONAT, 2014). Na reação química do cimento com a água, os silicatos e aluminatos se hidratam, formando compostos hidratados que resultam em uma massa sólida e resistente conforme aumenta o grau de hidratação. O  $\text{C}_3\text{S}$  e o  $\text{C}_2\text{S}$ , quando hidratados formam o composto microcristalino silicato de cálcio hidratado ( $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$  ou C-S-H na forma simplificada) e liberam cal na forma cristalina: o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) (NEVILLE, 2013). A presença dos compostos hidróxido de cálcio, sulfatos, álcalis, e outros, tornam o concreto um meio alcalino, com pH acima de 12 nas primeiras idades, podendo chegar a 13 em idades mais avançadas (CÁNOVAS, 1988). O C-S-H é muito pouco solúvel em condições normais do concreto, no entanto, quando o pH diminui para abaixo de 10, esse composto se dissolve (NONAT, 2014).

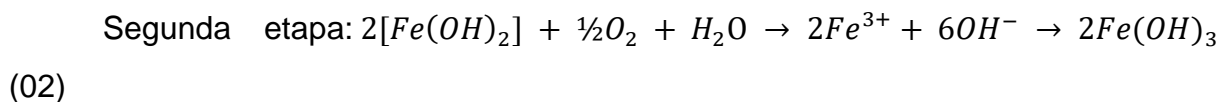
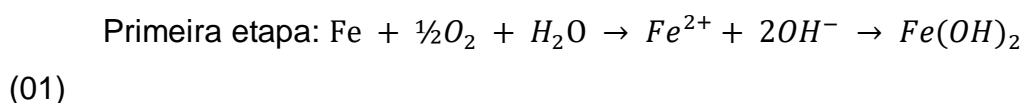
### 2.3 CORROSÃO DOS METAIS

Quando a corrosão do metal resulta em produtos solúveis no meio, não compactos ou não aderentes ao metal, esse produto torna-se inutilizável, resultando na diminuição da seção inicial do metal. Quando o produto da corrosão forma uma camada compacta, uniforme e aderente, pode decrescer a velocidade das reações e aumentar a resistência à corrosão (PANOSSIAN, 1993).





A corrosão é um processo eletroquímico, ou seja, um processo químico em que ocorre a transferência de elétrons de um componente para outro, ocorrendo normalmente na superfície do material, área em que há o contato entre os materiais. A característica de perder ou ceder elétrons é chamada de oxidação ou reação anódica, sendo o local onde ocorre a reação chamado de ânodo. Os elétrons de cada átomo são transferidos para outro componente, tornando-se parte dele, numa reação que é chamada de reação de redução (CALLISTER, 2002; PANOSSIAN, 1993). A principal causa de deterioração nas armaduras de concreto armado e protendido é a corrosão eletroquímica (CÁNOVAS, 1988)

Uma reação eletroquímica só está completa quando houver uma reação de oxidação e uma reação de redução, sendo a soma das duas o seu resultado. Por exemplo, a ferrugem resultante do contato do ferro com a água. Numa primeira etapa o ferro é oxidado em  $Fe^{2+}$  e reduzido em hidróxido ferroso ( $Fe(OH)_2$ ) e em uma segunda etapa oxidado em  $Fe^{3+}$  e reduzido em hidróxido férrico ( $Fe(OH)_3$ ), como mostrado nas as equações 01 e 02 (CALLISTER, 2002; FIGUEIREDO, 2007).



A oxidação e redução dos metais não acontecem com a mesma facilidade para todos os metais. Um par galvânico é um sistema onde dois metais em solução são ligados eletricamente. A oxidação de um metal pode se dar às custas da redução do outro. O ferro, por exemplo, é o ânodo e se oxida quando conectado ao cobre, mas se torna o cátodo e se reduz quando conectado ao zinco. Se conectado um voltímetro a esses circuitos é possível medir uma voltagem, ou potencial elétrico. O par galvânico ferro-cobre apresenta um potencial de 0,780V e o ferro-zinco um potencial de 0,323V. Como os valores variam com os diferentes pares metálicos, há um eletrodo padrão para poder caracterizar cada metal. Esse eletrodo padrão é feito de platina (que não oxida e nem sofre redução) em uma solução de 1M de íons  $H^+$ , pressão de 1atm e temperatura de 25°C. O potencial medido de cada metal ligado a esse eletrodo é o valor de referência para caracterizar a facilidade de oxidação ou

redução e comparar um metal a outro. Esses valores são apresentados no Quadro 4 (CALLISTER, 2002).

	<i>Reação do Eletrodo</i>	<i>Potencial de Eletrodo Padrão, V<sup>o</sup> (V)</i>
 <i>Progressivamente mais Inerte (Catódico)</i>  <i>Progressivamente mais Ativo (Anódico)</i>  	$\text{Au}^{+3} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Au}$	+1,420
	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	+1,229
	$\text{Pt}^2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Pt}$	~+1.2
	$\text{Ag}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag}$	+0,800
	$\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$	+0,771
	$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4(\text{OH}^-)$	+0,401
	$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$	+0,340
	$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$	0,000
	$\text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Pb}$	-0,126
	$\text{Sn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Sn}$	-0,136
	$\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ni}$	-0,250
	$\text{Co}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Co}$	-0,277
	$\text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cd}$	-0,403
	$\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}$	-0,440
	$\text{Cr}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Cr}$	-0,744
	$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Zn}$	-0,763
$\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Al}$	-1,662	
$\text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mg}$	-2,363	
$\text{Na}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Na}$	-2,714	
$\text{K}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{K}$	-2,924	

Quadro 4 – Série de potenciais de eletrodo padrão  
Fonte: Callister (2002).

A série galvânica, representada no Quadro 5, é outra forma de representar a reatividade dos metais. Sua sequência representa a direção das reações. Os metais de cima são mais catódicos e não reativos que os de baixo, que têm uma maior facilidade de corrosão.

<b>SERIE GALVÂNICA</b>	
	Platina
	Ouro
	Grafita
	Titânio
	Prata
	Aço Inoxidável 316 (passivo)
	Aço Inoxidável 304 (passivo)
	Inconel 80Ni-13Cr-7Fe (passivo)
	Níquel (passivo)
	Monel 70Ni-30Cu
<b>PROGRESSIVAMENTE MAIS INERTE (CATÓDICO)</b>	Ligas de Cobre-Níquel
	Bronze (ligas Cu-Sn)
	Cobre
	Latões (ligas Cu-Zn)
	Inconel (ativo)
	Níquel (ativo)
	Estanho
	Chumbo
<b>PROGRESSIVAMENTE MENOS INERTE (ANÓDICO)</b>	Aço Inoxidável 316 (ativo)
	Aço Inoxidável 304 (ativo)
	Ferro fundido
	Ferro e aço
	Ligas de alumínio
	Cadmio
	Alumínio comercialmente puro
	Zinco
	Magnésio e ligas de magnésio

Quadro 5 – Série galvânica  
Fonte: Callister (2002).

Neste Quadro 5 é possível observar que o titânio, metal normalmente utilizado para a realcalinização eletroquímica, é mais inerte que o ferro.

### 2.3.1 Passivação do Metal

Existem casos de interação metal-meio em que o íon metálico formado na reação de oxidação, reage com o meio e forma produtos insolúveis, normalmente óxidos, que aderem à superfície do metal como uma fina película compacta. Quando isso ocorre, diz-se que o metal está passivado. Essa película age como uma barreira entre o metal e o meio, diminuindo a velocidade de corrosão, da ordem de  $10^4$  a  $10^6$  vezes (PANOSSIAN, 1993). Quando já iniciada a incrustação, os íons do metal devem atravessar a película até a interface incrustação-gás ou os íons de oxigênio devem chegar até a superfície do metal para que a camada de óxido aumente. Portanto, a camada de óxido age como uma película protetora contra a própria oxidação adicional. Os metais perdem sua reatividade química, tornando-se praticamente inertes (CALLISTER, 2002).

Como exemplo de metais que sofrem facilmente a passivação com o meio natural estão: o aço inoxidável, o titânio, o níquel e o alumínio. Outros metais, como o aço carbono que apresentam altas velocidades de corrosão em meios naturais, são passivados em meios alcalinos e ácido nítrico concentrado (PANOSSIAN, 1993).

Esse fenômeno conhecido como passivação protege os metais da corrosão, até que a natureza do ambiente se modifique e o metal volte ao seu estado ativo (CALLISTER, 2002). A carbonatação, altera o meio, reduzindo o pH do concreto, destruindo a camada passivante e tornando o aço ativo (BAROGHEL-BOUNE, CUSSIGH e ROUGEAU, 2014).

### 2.3.2 Diagrama de Pourbaix

Os diagramas de Pourbaix são construídos a partir de conceitos da termodinâmica das reações eletroquímicas. São diagramas de potencial de equilíbrio-pH, que representam as condições de equilíbrio de reações químicas e

eletroquímicas que possam acontecer em um determinado metal/meio (PANOSSIAN, 1993).

O pH de um sistema é definido pela concentração do cátion hidrogênio  $[H^+]$ , conforme a equação 03. Meios onde o pH é 7, há o equilíbrio de concentrações de  $H^+$  e  $OH^-$ , tornando o meio neutro. Quando a concentração de  $H^+$  é maior que a de  $OH^-$  obtêm-se valores menores que 7, representando um meio ácido. Concentrações de  $H^+$  menores que  $OH^-$ , apresentam valores maiores que 7, caracterizando um meio alcalino (PANOSSIAN, 1993).

$$pH = -\log[H^+] \quad (03)$$

Na Figura 3 é representado um diagrama de Pourbaix simples, o da água. A linha vertical onde  $pH=7$ , divide o diagrama em dois domínios, um ácido e um alcalino. As retas a e b separam os meios conforme a facilidade de redução ou oxidação. No domínio acima da reta b ocorre a decomposição da água por oxidação. No meio entre as retas a e b, ocorre estabilidade termodinâmica da água. Abaixo da reta a, há no meio a decomposição da água por redução e liberação de hidrogênio (PANOSSIAN, 1993).

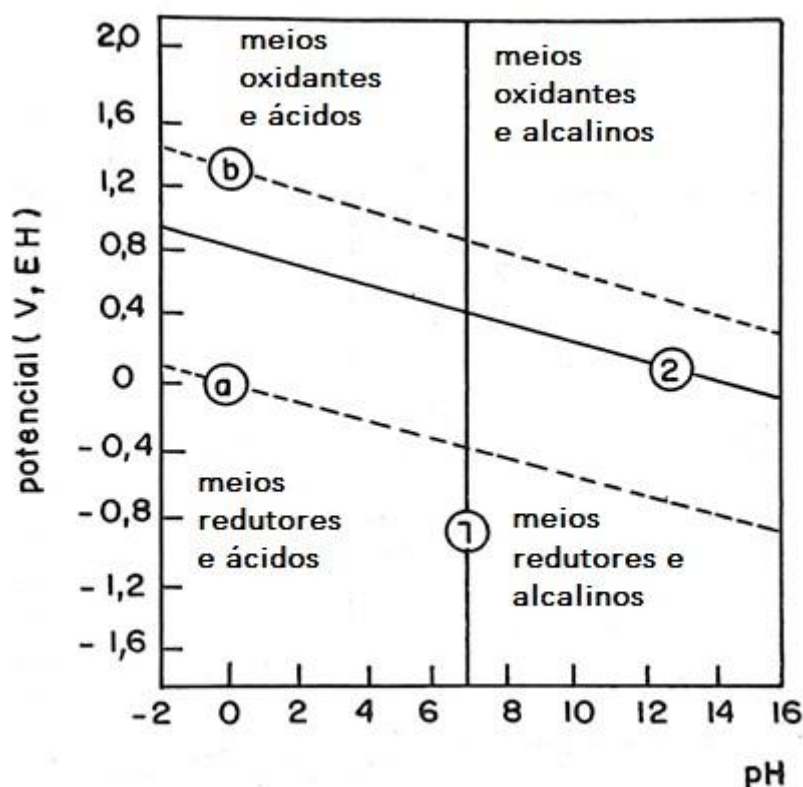


Figura 3 – Diagrama de equilíbrio potencial-pH - domínios onde a água tem caráter ácido ou alcalino e oxidante ou redutor ( $T=25^{\circ}C$ )  
Fonte: Panossian (1993).

Os diagramas de Pourbaix dos metais seguem os mesmos princípios, mostrando ainda outras curvas que delimitam os domínios de formação de certos íons e óxidos. Na Figura 4 é apresentado o diagrama de Pourbaix do sistema ferro/água (PANOSSIAN, 1993).

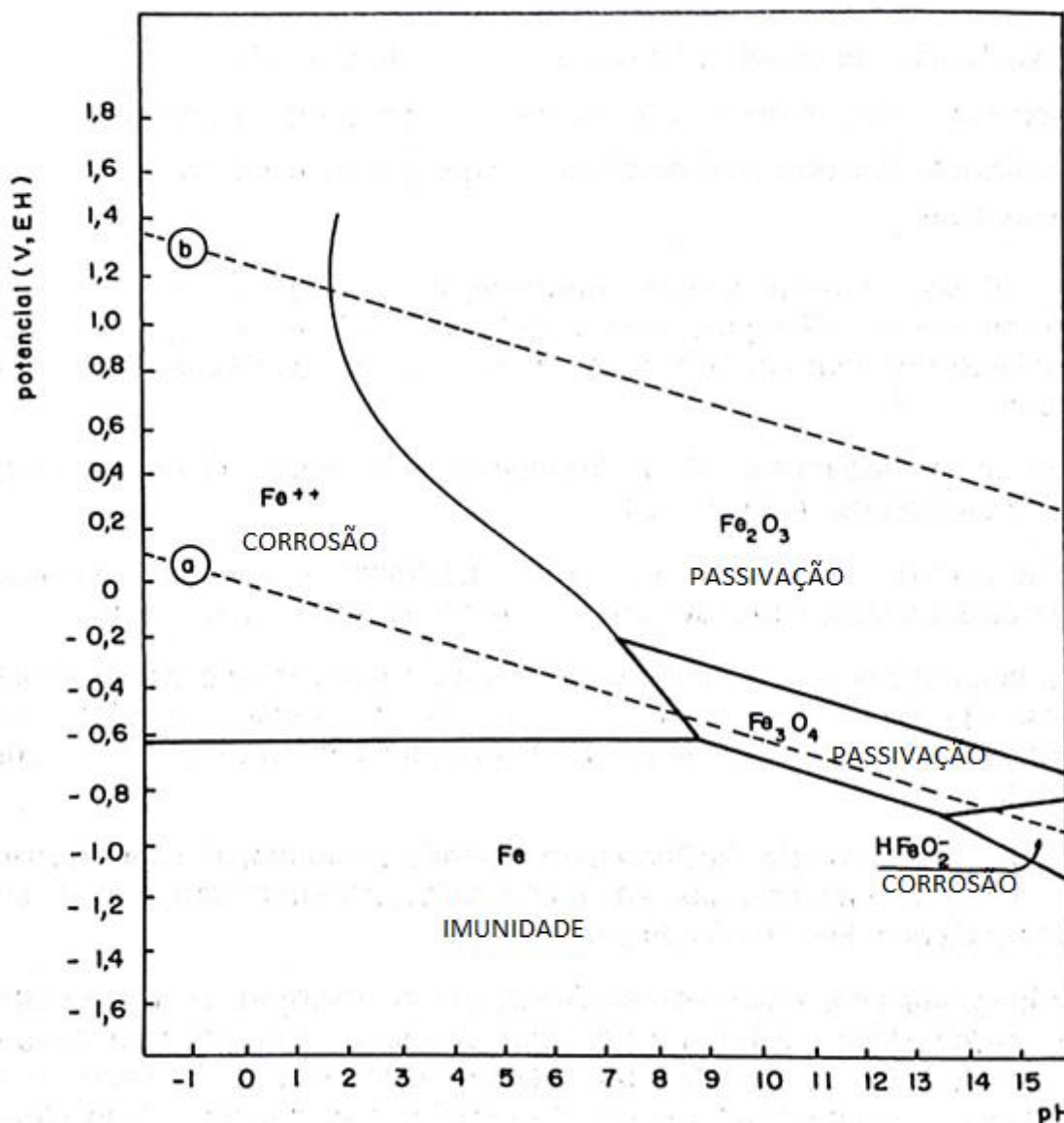


Figura 4 – Diagrama de equilíbrio potencial - pH do sistema ferro/água ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ; concentração de equilíbrio das espécies dissolvidas  $=10^{-6}$  molar)  
Fonte: Panossian (1993).

A região de baixos potenciais (Fe) o metal está imune a corrosão, a região mais ácida e com potenciais mais altos ( $\text{Fe}^{++}$ ) há facilidade de corrosão, assim como a região com formação de  $\text{HFeO}_2^-$ . Nas regiões com potenciais e pH mais altos ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ocorre a passivação do metal que o protege da corrosão.

## 2.4 PROCESSOS QUÍMICOS DE DETERIORAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

As reações físico-químicas do concreto ocorrem durante toda a sua existência, cada vez mais lentamente, contribuindo para a sua durabilidade. No entanto, sob influência do meio externo, como, por exemplo, ar atmosférico, água, soluções salinas e ácidos, esse equilíbrio químico pode ser perturbado. O concreto, que é altamente básico, ao entrar em contato com agentes agressivos pode sofrer reações que resultam na degradação do material (ESCADEILLAS e HORNAIN, 2014).

### 2.4.1 Carbonatação

A reação de carbonatação ocorre quando há interação entre o dióxido de carbono presente no meio e os hidróxidos de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), potássio (KOH) e sódio (NaOH) presentes no concreto, resultando principalmente na formação do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) (RIBEIRO, 2009). Outros produtos hidratados da pasta de cimento também podem ser decompostos, formando sílica, alumina e óxido de ferro hidratados. Em concretos executados somente com o cimento Portland, só a reação com o  $\text{Ca(OH)}_2$  é relevante (NEVILLE, 2015).

A água está sempre presente nas reações de degradação, é o veículo comum dos agentes agressivos, capaz de dissolver compostos gasosos e sólidos. Por mais que o concreto tenha uma certa quantidade de água, é sempre importante a água externa, seja líquida ou presente no ar atmosférico. A umidade do ambiente influencia diretamente na agressividade dos gases (ESCADEILLAS e HORNAIN, 2014).

A difusão do  $\text{CO}_2$  nas estruturas de concreto ocorre progressivamente a partir da parte externa exposta ao ar. A difusão e, conseqüentemente, a carbonatação tornam-se mais lentos se a estrutura estiver saturada, pois a água em excesso se comporta como uma barreira à penetração do  $\text{CO}_2$ . Por outro lado, caso o  $\text{CO}_2$  não encontre água suficiente, ele permanece na forma gasosa e não há carbonatação. A maior velocidade de carbonatação ocorre em umidades entre 50% e 70% (NEVILLE, 2015). A carbonatação inicial pode apresentar uma variação linear, porém, conforme avança, a hidratação do cimento desacelera a

carbonatação, já que reduz a permeabilidade do concreto, dificultando a penetração do gás carbônico (SILVA, 1995). Em condições de umidade uniforme, a profundidade de carbonatação  $D$  (mm) pode ser representada pela equação 04, onde  $K$  é o coeficiente de carbonatação expresso em mm/ano<sup>0,5</sup> e  $t$  é o tempo de exposição (anos) (NEVILLE, 2015).

$$D = K\sqrt{t} \quad (04)$$

Concretos de baixa resistência apresentam valores de  $K$  entre 3 ou 4.

Na Figura 5 abaixo é ilustrado o processo de carbonatação.

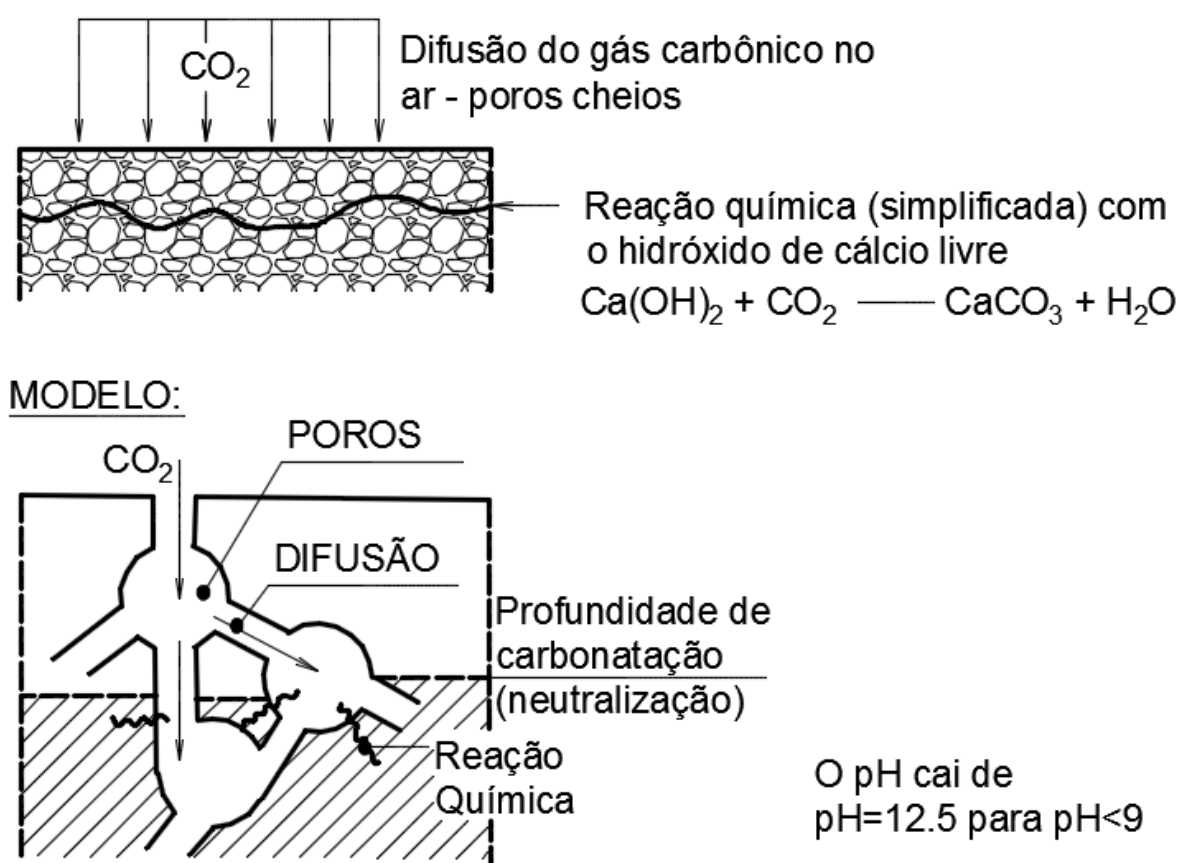


Figura 5 – Esquema representativo do processo de carbonatação  
 Fonte: Adaptado de Bakker (1988) apud Ribeiro (2009).

O gás carbônico, ao entrar no concreto através da difusão, sofre reações químicas com o hidróxido de cálcio, reduzindo o pH do concreto.

A carbonatação, caso ficasse restrita a uma espessura menor que a camada de cobertura da armadura, traria até benefícios ao concreto, aumentando suas resistências químicas e mecânicas (SOUZA e RIPPER, 1998). A carbonatação



influencia a resistência à compressão do concreto, aumentando-a (SILVA, 1995). A carbonatação em si não prejudica o concreto, mas seus efeitos como a retração por carbonatação e a diminuição do pH, trazem sérias consequências (NEVILLE, 2015).

A retração por carbonatação é observada na superfície do concreto durante a secagem. O dióxido de carbono se fixa na pasta de cimento hidratada, aumentando temporariamente sua massa e a massa do concreto. Este tipo de retração é possivelmente resultado da dissolução de cristais de  $\text{Ca(OH)}_2$ , enquanto o concreto sofre tensões de compressão proveniente da retração por secagem, e da disposição de  $\text{CaCO}_3$  em espaços livres de tensões. Caso a carbonatação continue até o estágio de desidratação do C-S-H, também é produzida retração por carbonatação (NEVILLE, 2015).

O concreto apresenta normalmente um pH de 12,6 a 13,5. No concreto armado, esse pH alcalino é responsável pela criação da camada passivadora. Quando sujeito à carbonatação, o pH apresenta redução de valores próximos de 9, se tornando menos básico, chegando até 8,3 se todo o  $\text{Ca(OH)}_2$  sofrer reação. Quando a frente de carbonatação encontra a camada passivadora, a mesma reage com os óxidos que protegem a armadura, consumindo-os, facilitando assim a ocorrência da corrosão caso outros dois elementos necessários estejam presentes, a água e o gás oxigênio (NEVILLE, 2015).

Para medir a profundidade de carbonatação, é comum utilizar, entre outros, o indicador fenolftaleína. Quando a solução é aspergida sobre uma superfície recém quebrada de concreto a mesma adquire uma coloração vermelha carmim, caso encontre o pH próximo a 12, e coloração rosada quando o pH está entre 8 e 9. Com pH abaixo dessa faixa, o concreto não sofre alteração de cor. Quanto maior a profundidade de concreto sem alteração, mais próximo da armadura a frente de carbonatação se encontra e maiores as chances de a armadura sofrer corrosão (BROOMFIELD, 2003; ISAIA, 2005).

É sempre necessário saber qual a espessura do cobrimento. Sem essa informação para comparar com a espessura carbonatada não se pode avaliar a gravidade do caso e se armadura já foi despassivada ou até mesmo corroída (ISAIA, 2005).

#### 2.4.1.1 Velocidade de carbonatação e carbonatação acelerada

Segundo Neville (2015) o ar no qual estão inseridas as estruturas de concreto possuem naturalmente na sua composição o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Ambientes rurais apresentam cerca de 0,03% do ar composto por esse gás, ambientes não ventilados podem apresentar teores com mais de 0,1% e em ambientes urbanos a média é de 0,3%, podendo chegar até 1%. Quanto maior for o teor de  $\text{CO}_2$  no ambiente, mais rapidamente ocorre o processo de carbonatação.

A velocidade de carbonatação varia conforme a facilidade que o gás carbônico encontra de penetrar no concreto (PAULETTI et al., 2006). A velocidade do processo de carbonatação é influenciada por fatores como: umidade relativa, tempo, relação a/c, tipo de cimento, permeabilidade do concreto, cura, e difusão do  $\text{CO}_2$  (SILVA, 1995). Estruturas com fissuras podem ter sua frente de carbonatação avançada localmente, já que a passagem do  $\text{CO}_2$  é facilitada (NEVILLE, 2015). Quando o concreto apresenta fissuras maiores que 0,4mm, a penetração da carbonatação se acelera, seguindo essas aberturas em direção às barras de armadura e causando a corrosão (SOUZA e RIPPER, 1998).

Na Figura 6 é representado o grau de carbonatação de acordo com a umidade relativa do ar.

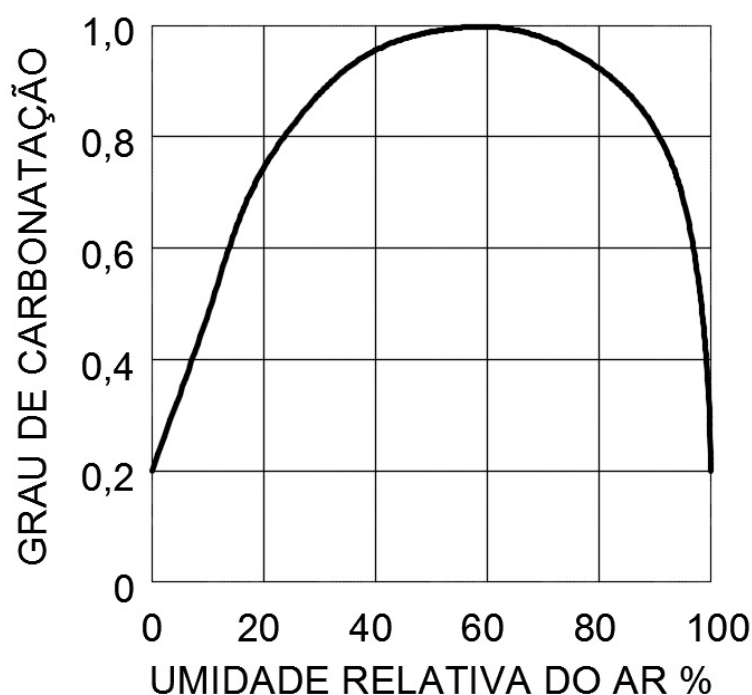


Figura 6 – Carbonatação do concreto em função da umidade  
Fonte: Cánovas (1988).

A carbonatação máxima ocorre quando o concreto está submetido à uma umidade de 60%. Quando o ambiente está seco ou saturado, o grau de carbonatação é apenas 20% do máximo (SILVA, 1995).

A relação  $a/c$  é diretamente proporcional à velocidade de carbonatação, já que concretos porosos não resistem bem à carbonatação, comparado à concretos menos porosos (RIBEIRO, 2009). Segundo Neville (2015), concretos com o fator água cimento de 0,60 alcançarão em 15 anos, 15 mm de carbonatação em média. Em uma relação água/cimento mais baixa, como 0,45, esses 15mm serão alcançados em 100 anos. Pesquisas c

Nas Figuras 7 e 8, é representado o resultado de uma pesquisa citada por Silva (1995), sobre a influência da relação  $a/c$ .

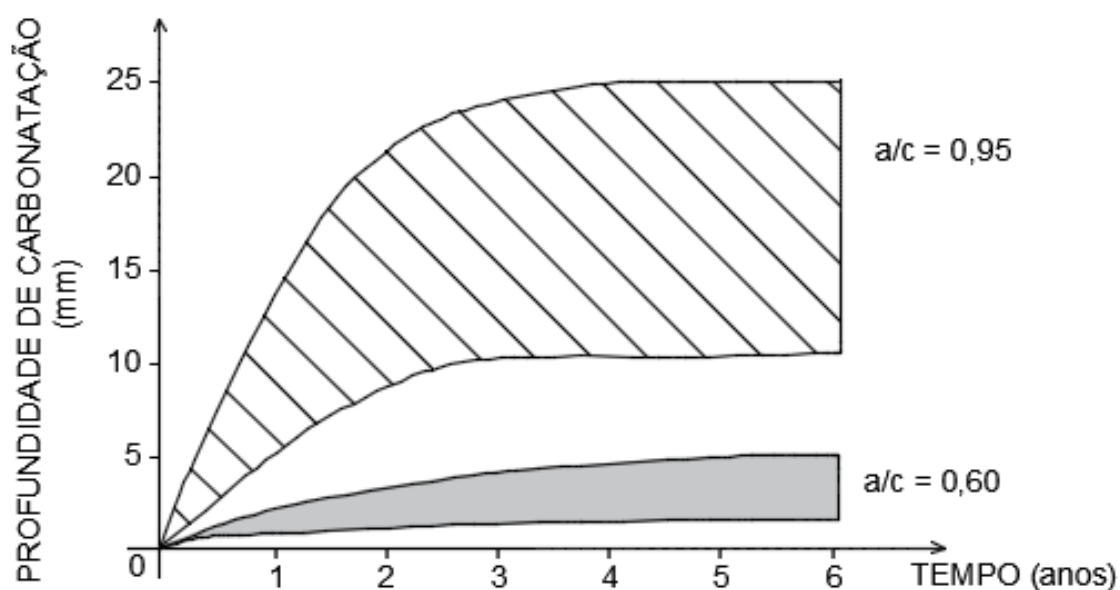


Figura 7 – Profundidade de carbonatação em função do tempo e da relação  $a/c$   
Fonte: Silva (1995).

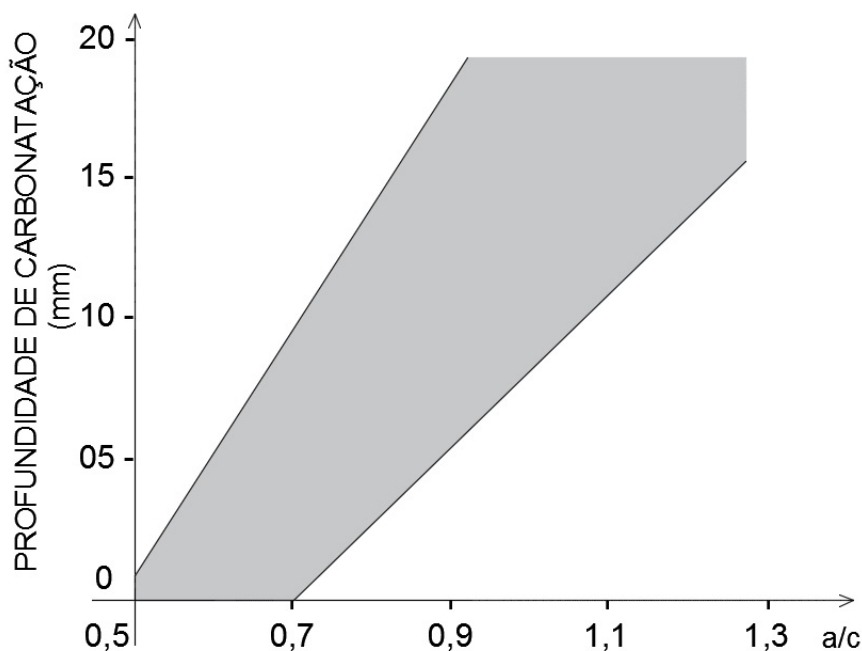


Figura 8 – Influência da relação a/c na profundidade de carbonatação, ao fim de um a dois anos  
Fonte: Silva (1995).

Quanto maior a relação a/c, maior é a permeabilidade, aumentando a difusão, o que resulta numa maior profundidade e taxa de carbonatação. O fator a/c influencia diretamente na resistência à compressão, portanto, quanto maior o a/c, menor a resistência e maior a velocidade de carbonatação.

Quanto mais fino o cimento, melhor sua resistência à carbonatação. O cimento Portland comum (CPI-S) resiste bem à carbonatação comparado ao cimento resistente aos sulfatos (que resiste 50% menos) e ao cimento Portland de alto-forno (CPIII) (que resiste 200% menos). A demora no início da cura e o tempo também facilitam a difusão do CO<sub>2</sub>. Uma cura mais longa e bem realizada resulta em um concreto com melhor resistência à carbonatação (SILVA, 1995), como mostrado na Figura 9.

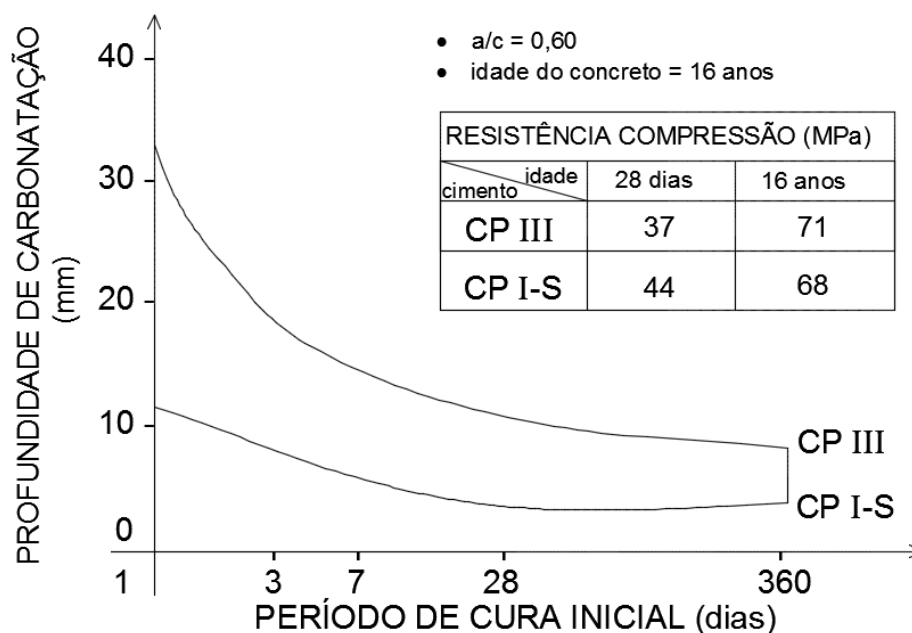


Figura 9 – Influência do período de cura inicial sobre a profundidade de carbonatação após 16 anos; Fonte: Silva (1995).

Quanto maior o tempo de cura do concreto, menor a profundidade de carbonatação, porém, uma cura por mais de 28 dias é desnecessária, apresentando uma melhora pouco significativa.

Dependendo das características do concreto podem-se levar até 20 anos para determinar a velocidade de carbonatação. Com o objetivo de facilitar o estudo e obtenção de resultados, muitas pesquisas são realizadas expondo o concreto à taxas de  $CO_2$  mais altas que a atmosférica (PAULETTI, POSSAN e DAL MOLIN, 2006).

Pauletti (2004) concluiu com seus estudos que ao submeter o concreto à uma câmara de carbonatação com 6% de  $CO_2$ , a profundidade de carbonatação é, em média, 116% maior do que comparado à uma câmara saturada da  $CO_2$ . Resultado surpreendente, já que o esperado era que, em um ambiente saturado de  $CO_2$  a carbonatação ocorresse mais rapidamente.

O trabalho de Ho e Lewis (1987), citado por PAULETTI, POSSAN e DAL MOLIN (2006) sugere que a profundidade de carbonatação que seria alcançada em um ano no ambiente natural, para um concreto com cura de 7 dias, temperatura de  $23^\circ C$  e umidade relativa de 50%, seria alcançada em 1 semana com a carbonatação acelerada com teor de 4% de  $CO_2$ .

Lucena (2016), após construir uma câmara de carbonatação acelerada, realizou testes em corpos de prova cilíndricos padrão (10x20cm), executados com cimento CP V ARI e fator a/c de 0,5. Os corpos de prova foram submetidos a uma taxa de 6% de CO<sub>2</sub> e as medições foram feitas aos 7, 14, 28, 42 e 56 dias e apresentaram resultados de 0mm, 1,62mm, 2,65mm, 3,35mm e 3,72mm respectivamente.

Pauletti (2004) após a cura dos corpos de prova, realizou o sazonalamento, etapa realizada por muitos pesquisadores da área, com o objetivo de equilibrar a umidade interna. O tipo de sazonalamento, exposto no laboratório ou em câmara controla, por exemplo, também tem influência nos resultados da carbonatação.

Muitos pesquisadores preferem utilizar corpos de prova de argamassa ao invés de concreto para que o agregado graúdo não interfira na medição da profundidade de carbonatação (PAULETTI, POSSAN e DAL MOLIN, 2006).

#### 2.4.2 Corrosão das Armaduras

O aço carbono é o metal mais utilizado para a construção de estruturas, graças as suas satisfatórias propriedades mecânicas. Na maioria das suas aplicações, o aço é utilizado com proteção, já que possui baixa resistência à corrosão (PANOSSIAN, 1993). Barras de aço envoltas pelo concreto sofrem a corrosão devido à destruição da película passivante. A camada passivadora pode ser destruída por grandes esforços, que geram uma tensão fraturante; pela presença de hidrogênio atômico, que torna o aço mais frágil ao ponto de fraturar; e por pites, que se apresentam de duas formas, uma localizada tendo como responsáveis íons agressivos, especialmente cloretos, e outra generalizada, resultado da redução do pH do concreto pela ação do CO<sub>2</sub> do ar atmosférico: a carbonatação (SOUZA e RIPPER, 1998). A destruição da película passivante não implica necessariamente em corrosão caso a estrutura esteja seca. Para que as reações ocorram, é necessária a presença de umidade, eletrólitos e oxigênio na superfície da barra (CÁNOVAS, 1988).

A Corrosão da armadura do concreto é ilustrada na Figura 10.

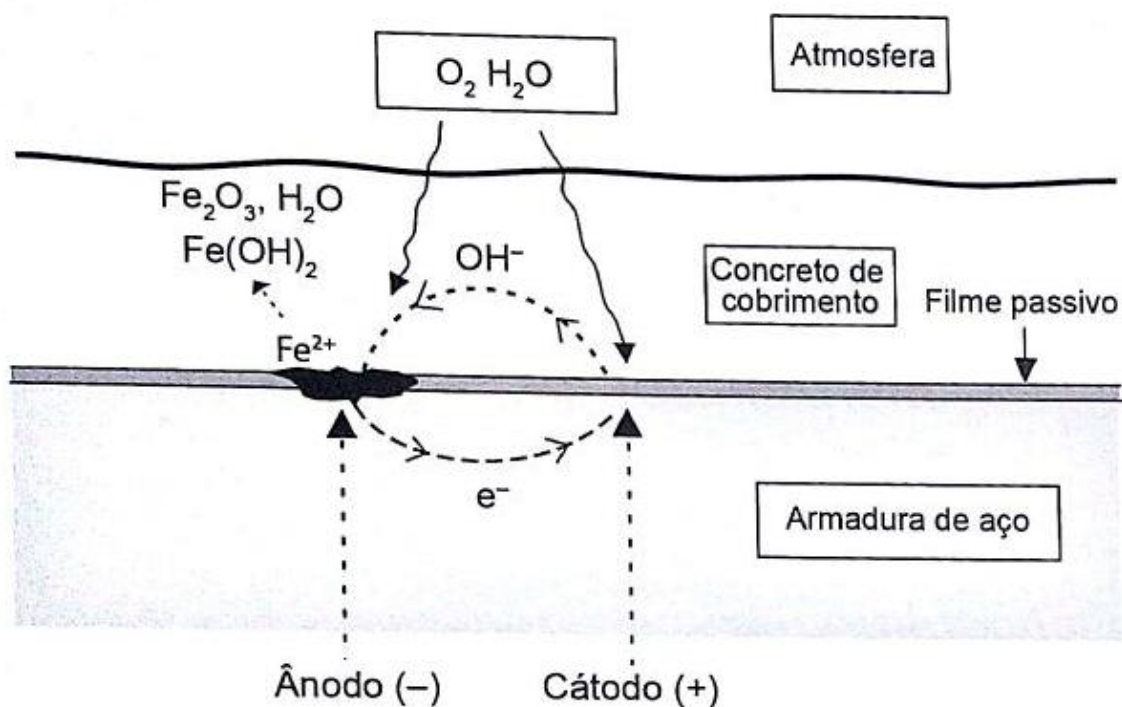


Figura 10 – Esquema de formação dos produtos de corrosão  
 Fonte: BAROGHEL-BOUNY, CAPRA e LAURENS, 2014

É possível observar a entrada de água e oxigênio através do concreto de cobrimento, que resultam em reações eletroquímicas, causando a corrosão da armadura de aço onde o filme passivo está comprometido.

O cobrimento tem papel fundamental para prevenir a corrosão das armaduras, tanto por sua ação física, como para proporcionar um meio mais adequado à armadura. Outros fatores de produção como mistura, transporte, lançamento, adensamento e cura, também afetam a proteção da armadura, sendo responsáveis por diversas características do concreto endurecido resultante (ISAIA, 2005).

Nas estruturas de concreto armado, a corrosão apresenta dois inconvenientes principais: diminui a seção das barras de aço e provoca a desagregação do concreto (CÁNOVAS, 1988). A corrosão é um processo que avança da periferia das armaduras para seu interior, com isso causa a diminuição da área de aço e conseqüentemente diminuição da capacidade de resistência. Junto com esse processo surgem outros problemas, como a perda de aderência, desagregação e fissuração. A perda de aderência diminui a resposta às solicitações submetidas. A desagregação do concreto ocorre pelo fato de que quando o aço oxida pode ter seu volume aumentado em dez vezes, essa expansão resulta em

pressões suficientes para fraturar o concreto. O agravamento da desagregação do concreto leva a fissuração do concreto, que acompanham o comprimento da armadura (SOUZA e RIPPER, 1998).

## 2.5 REALCALINIZAÇÃO ELETROQUÍMICA (RAE)

### 2.5.1 Princípios e Características

A realcalinização eletroquímica é uma técnica que visa reduzir a probabilidade de corrosão das armaduras em concretos carbonatados. Com essa técnica, a alcalinidade do concreto ao redor da armadura é restaurada e um ambiente favorável à repassivação do aço é recriado. Utiliza-se a aplicação de uma corrente contínua entre o exterior e a armadura interna para que íons básicos de uma solução alcalina possam penetrar na estrutura (BERTOLINI et al., 2008).

Para Mietz (1995), a realcalinização eletroquímica é de particular interesse para a reabilitação de fachadas de concreto que não podem ser modificadas, estruturas onde é preferível a não adição de peso ou que o sobre peso é impossível e em estruturas de pequena seção, por se tratar de um método não destrutivo e temporário.

Segundo Banfill (1994), uma malha de aço ou titânio inerte funcionando como ânodo é presa à superfície do concreto a ser tratado e coberto por um eletrólito. O ânodo externo é conectado à armadura interna em alguns pontos por meio de uma fonte retificadora para gerar conexões elétricas e torná-la um cátodo. A armadura é então recoberta para evitar curto circuitos. Abaixo, na Figura 11 é ilustrada a montagem da célula de realcalinização.



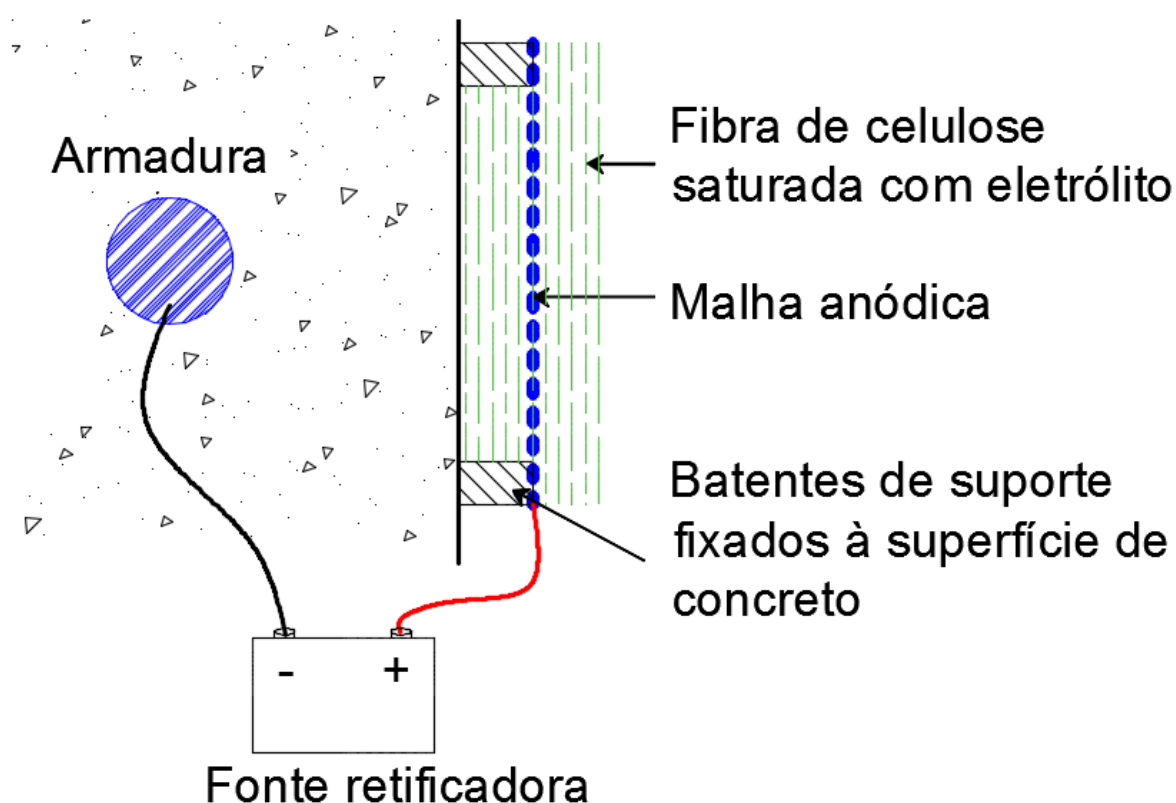


Figura 11 – Montagem da célula de realcalinização  
Fonte: Adaptado de Banfill (1994).

O pH ao redor da armadura aumenta devido à produção de íons hidroxila que são gerados ao redor do cátodo, enquanto a solução alcalina penetra na superfície do concreto e previne que o pH do concreto chegue, futuramente, a níveis que propiciem a corrosão da armadura (MIETZ, 1995).

De acordo com Mietz (1995), durante o tratamento da estrutura com RAE ocorrem cinco processos que são descritos abaixo e representados na Figura 12:

- Absorção por capilaridade da solução alcalina;
- Difusão dos compostos alcalinos por diferenças de concentração;
- Migração de íons através do campo elétrico criado, sendo que os íons negativos ( $\text{OH}^-$ ) se movem em direção ao ânodo (malha externa) e os positivos (ex.:  $\text{Na}^+$ ) em direção ao cátodo (armadura);
- Eletrolise nos eletrodos onde íons  $\text{OH}^-$  são gerados ao redor do cátodo e por reação do oxigênio e oxidação ocorre no ânodo, e;
- O eletrólito pelo qual o concreto está rodeado se move em direção ao cátodo (armadura) por ação do campo elétrico, processo chamado de eletro osmose.

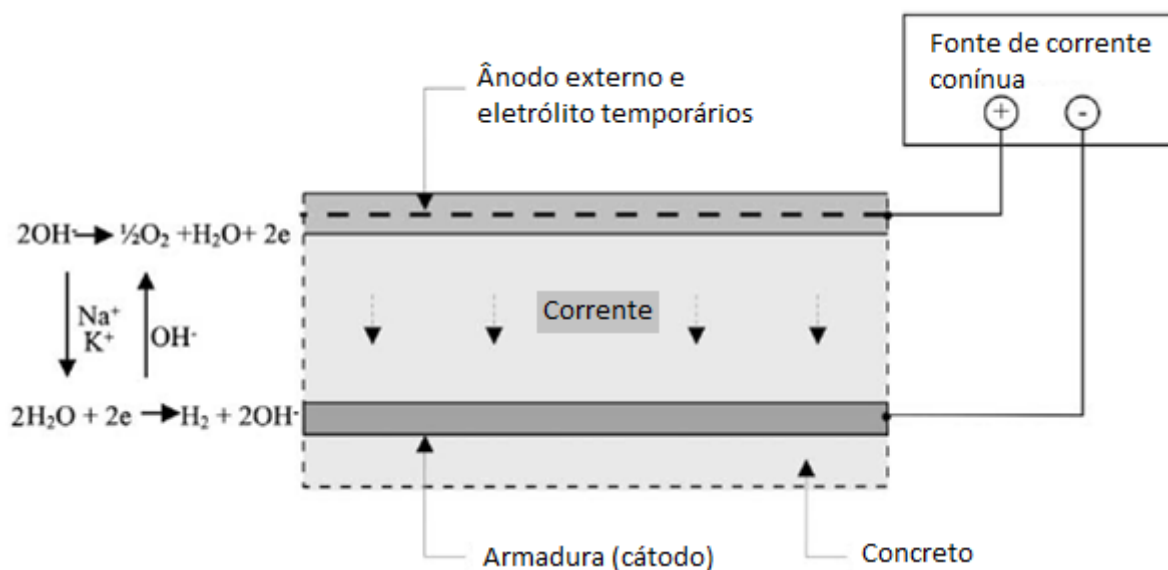


Figura 12 – Representação esquemática da realcalinização eletroquímica  
Fonte: Adaptado de Bertolini et al. (2004).

Segundo Banfill (1994), correntes de até  $1 \text{ A/m}^2$  são aplicadas de três a sete dias utilizando carbonato de sódio como eletrólito. Já para Mietz (1995) o tratamento de realcalinização dura de 3 a 14 dias, com correntes que variam de  $0,8$  a  $2 \text{ A/m}^2$ .

### 2.5.2 Eficiência

As consequências requeridas do tratamento são: a elevação do pH do concreto em torno da armadura e a criação de um ambiente favorável ao reaparecimento da camada passivadora do aço (BANFILL, 1994).

Yeih e Chang (2005) estudaram os efeitos da realcalinização no valor do pH do concreto quando variados os períodos de tempo de aplicação do método e da densidade de corrente utilizada, como mostrado no Quadro 6 abaixo.

CONCRETO	Densidade de corrente		
	0,8 (A/m <sup>2</sup> )	1,2 (A/m <sup>2</sup> )	2,0 (A/m <sup>2</sup> )
Realcalinização 7 dias	10,82	10,95	11,35
Realcalinização 14 dias	10,96	11,16	11,49
Realcalinização 21 dias	11,23	11,44	11,61
Referência	12,58		
Carbonatado	9,56		

Quadro 6 – Efeitos da realcalinização nos valores de pH  
Fonte: Adaptado e corrigido de Yeih e Chang (2005).

É possível observar nos resultados obtidos pelos autores que o processo de realcalinização elevou o pH das peças para valores acima de 11, mas não alcançou o valor original de 12,58. Os mesmos sugerem que o valor alvo de reestabelecimento do pH pelo processo de realcalinização seja de 11.

Bertolini et al. (2008) restauraram colunas da torre do sino da Igreja de Santo Antônio Abade em Valmadrera, Itália, utilizando o método da realcalinização eletroquímica. Foram utilizadas duas malhas metálicas: uma de titânio ativado e outra de aço galvanizado. Como resultado do tratamento, todos os pontos da estrutura em que a alcalinidade foi medida com solução de fenolftaleína apresentaram pH básico, demonstrando a eficácia do processo. Apesar da eficácia do tratamento, foi concluído que a realcalinização do concreto pela solução alcalina ocorreu apenas em sua superfície, devido à baixa permeabilidade do concreto, enquanto a reação catódica ocorrida na armadura produziu maior espessura de concreto realcalinado. Neste caso, o sucesso da restauração se deu à produção da camada alcalina em torno da armadura.

González et al. (2008) concluíram que a maior parte da recuperação do pH da superfície de concreto carbonatados ocorre durante os 5 primeiros dias de aplicação do método de RAE, mas que outros 13 dias de aplicação são necessários para se alcançar uma completa realcalinização da peça de concreto. Utilizando carbonatos de Sódio e Potássio, também concluiu que o tipo de eletrólito utilizado não tem influência sobre a reabilitação do pH, mas que o tipo de cimento utilizado e nível de alcalinidade inicial do concreto influenciam na eficácia do método.

Tong et al. (2012) utilizaram malha de liga de alumínio como ânodo de sacrifício no método de realcalinização. O método foi aplicado às peças por um período de 33 dias, após o qual as malhas metálicas utilizadas tinham sido quase totalmente consumidas pelas reações químicas. Foram feitos testes com fenolftaleína e timolftaleína após a execução do método e passados 6 meses e 1 ano, como mostrado na Figura 13.

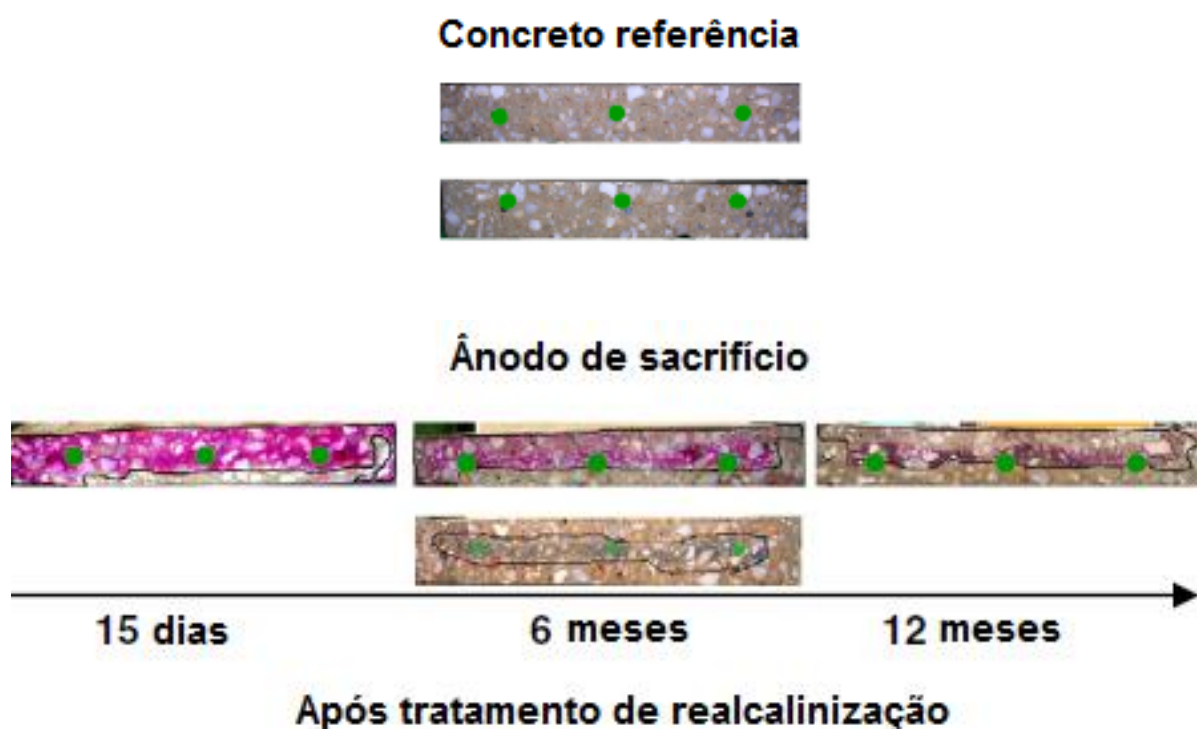


Figura 13 – Resultados dos testes de Fenolftaleína e Timolftaleína  
 Fonte: Adaptado de Tong et al. (2012)

A eficiência do método de RAE foi demonstrada através do aumento do pH do concreto ao redor das armaduras, juntamente com o aumento das concentrações de substâncias alcalinas no concreto. Concluíram que houve uma redução na velocidade de corrosão das armaduras presentes nos concretos carbonatados até 12 meses após os testes (TONG et al. 2012).

### 2.5.3 Efeitos Colaterais

Objeto de estudo em vários países, os efeitos colaterais da aplicação da realcalinização eletroquímica ainda são incertos. Pode-se citar a preocupação de pesquisadores com relação a redução da aderência entre concreto e armadura, aumento da possibilidade de ocorrência de reações álcali-agregado devido ao aumento das concentrações de sódio e potássio e mudanças na microestrutura do concreto que podem resultar em modificações nas propriedades mecânicas e em sua durabilidade (BANFILL, 1994).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAIS

##### 3.1.1 Peça Estrutural

Para a realização dos estudos propostos por este trabalho foram utilizadas duas vigas previamente ensaiadas à flexão simples, com dimensões de 15x25x220cm, idade de aproximadamente 3 anos e cobertura de armadura de 3cm, como pode ser visto na Figura 14.

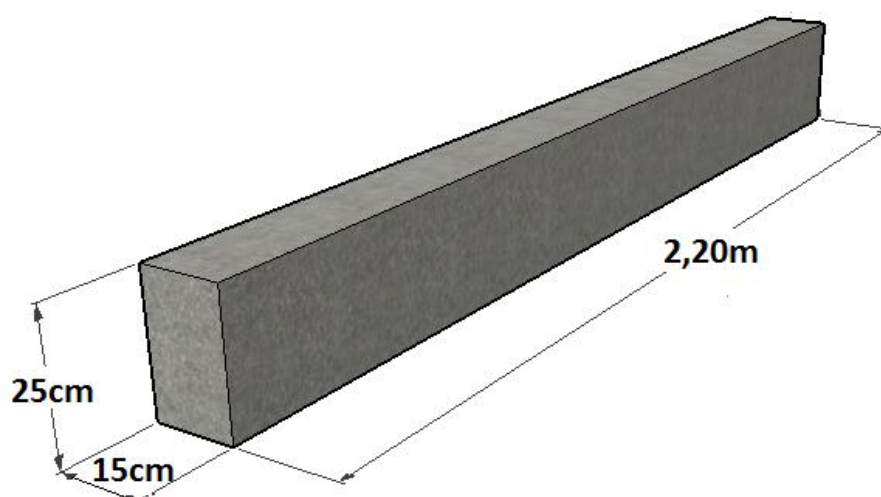


Figura 14 – Perspectiva das vigas do ensaio  
Fonte: Acervo dos autores

As vigas foram moldadas no Laboratório de Estruturas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ecoville, como parte de um estudo de Iniciação Científica. Para sua concretagem, utilizou-se concreto usinado de  $f_{ck}=25\text{MPa}$  e auxílio de vibrador de imersão. Dados estimados de resistência a compressão são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resistência à compressão estimada por esclerometria

<b>Tempo após a concretagem</b>	<b>Resistência estimada a compressão (MPa)</b>
28 dias	17,0
63 dias	25,1
2 anos	37,0

### 3.1.2 Componentes da Célula de Realcalinização

Para a montagem da célula de realcalinização utilizou-se uma fonte de corrente contínua de um canal da marca Minipa modelo DC-MPS 3005 com capacidade de 5 A, disponível em loja de componentes eletrônicos. A Figura 15 é uma foto da fonte utilizada.



Figura 15 – Fonte de corrente contínua  
Fonte: Acervo dos autores (2016).

Para manter a saturação em torno da área da peça de concreto a ser realcalinizada, utilizou-se feltro com espessura de 1 mm (Figura 16) embebido em solução de carbonato de sódio com concentração de 0,1 N (Figura 17).



Figura 16 – Feltro  
Fonte: Acervo dos autores (2016).



Figura 17 – Solução de carbonato de sódio  
Fonte: Acervo dos autores (2016).

Como malha anódica, foram utilizadas malhas dos metais Titânio (Figura 18) e Alumínio (Figura 19), ambas com tamanho de 20x50cm (Figura 20).



Figura 18 – Malha de titânio  
Fonte: Acervo dos autores (2016).



Figura 19 – Malha de alumínio  
Fonte: Acervo dos autores (2016).



Figura 20 – Malhas de titânio e alumínio, respectivamente, nas medidas de 20x50 cm  
Fonte: Acervo dos autores (2016).



Como condutor de eletricidade entre a armadura catódica e a malha anódica, foi utilizado cabo-flex para ponta de prova com capacidade de 450/750V com espessura de  $1 \times 1,0 \text{ mm}^2$  (Figura 21).



Figura 21 – Cabo flex condutor  
Fonte: Acervo dos autores (2016).

### 3.2 MÉTODOS

Primeiramente, utilizou-se uma serra circular para o corte e retirada de parte do concreto das vigas até a profundidade de aproximadamente 2,5 cm, conforme a Figura 22, sendo esta a profundidade limite de alcance do equipamento. Após a retirada do concreto e limpeza da superfície a ser ensaiada, aspergiu-se solução de 1% de fenolftaleína no local para verificação da profundidade de carbonatação das peças anteriormente à aplicação do método de realcalinização eletroquímica. Utilizou-se um paquímetro para medir a profundidade de carbonatação, indicada pela falta de coloração avermelhada provocada pela solução.

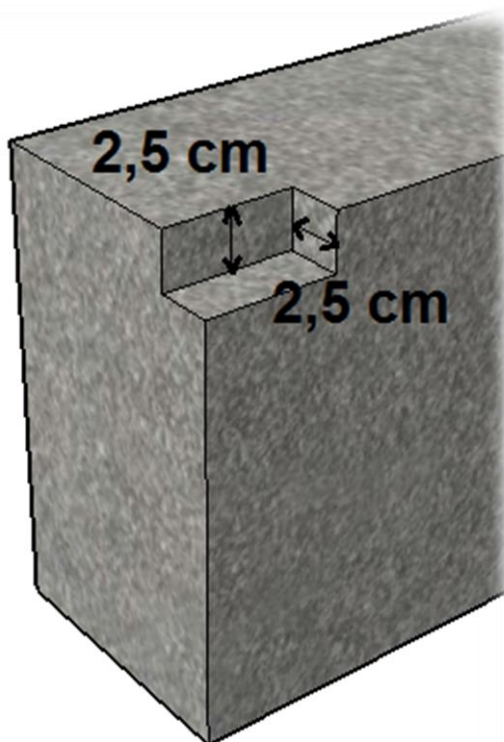


Figura 22 – Corte na estrutura para medição da carbonatação  
Fonte: Acervo dos autores (2016).

Para calcular a corrente necessária a ser aplicada pela fonte de corrente contínua na célula de realcalinização eletroquímica, utilizou-se o valor de  $0,8 \text{ A/m}^2$  citado na literatura. Sendo a área de concreto a receber o tratamento igual à soma das áreas das malhas de titânio e alumínio ( $20 \times 50 \text{ cm}$  cada), chegou-se ao valor de  $0,16 \text{ A}$  de corrente a ser aplicada.

Após a verificação da profundidade de carbonatação das peças e o cálculo da corrente, procedeu-se com a montagem da célula de realcalinização eletroquímica segundo esquema ilustrado na Figura 23 a seguir.

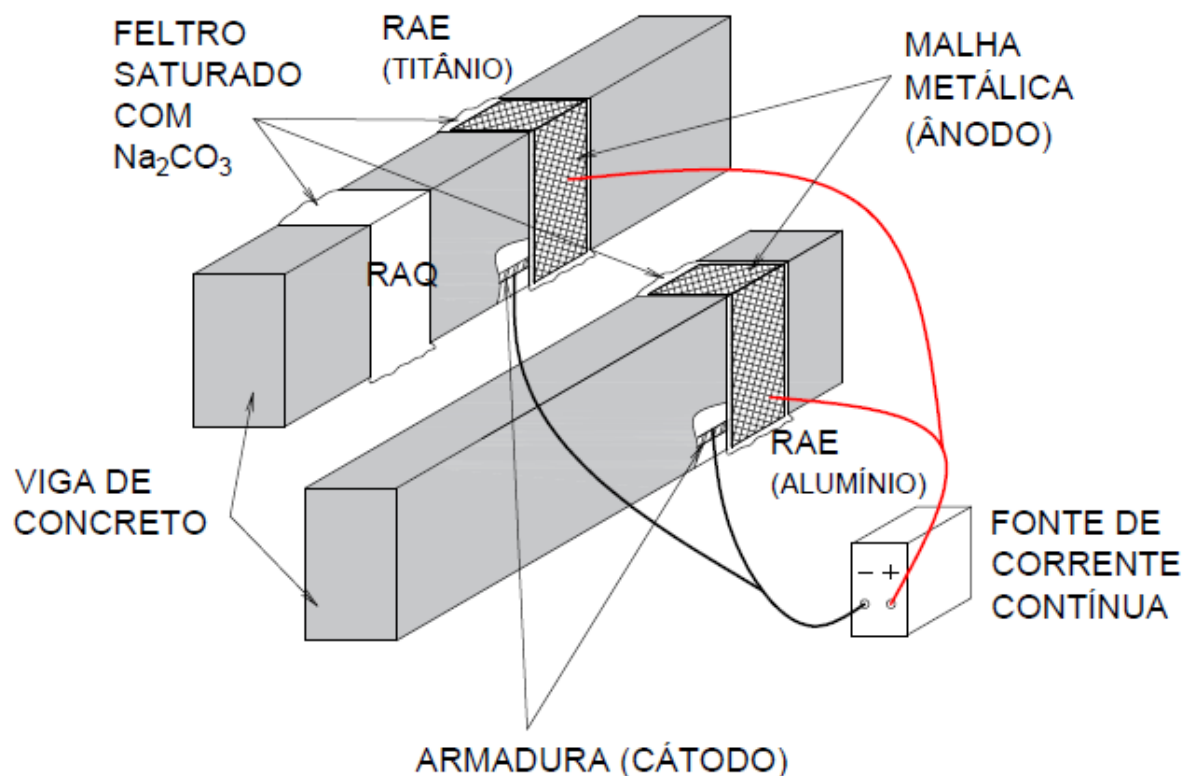


Figura 23 – Esquema ilustrativo da célula de realcalinização eletroquímica  
 Fonte: Acervo dos autores (2016).

Como ilustrado na Figura 15, duas vigas foram utilizadas para a aplicação do método, sendo que na viga localizada na parte superior utilizou-se o metal titânio como ânodo do sistema e na viga localizada na parte inferior utilizou-se o metal alumínio como ânodo do sistema.

Tendo as vigas sido ensaiadas à flexão simples, a armadura inferior apresentava-se exposta devido ao rompimento, sendo este o local escolhido para a conexão dos condutores.

Foram utilizados pedaço de 20x50 cm de malha metálica envolvendo o concreto, colocado entre dois pedaços de feltro (Figura 24) de tamanho aproximado ao da malha metálica. Procedimento realizado com ambas as malhas em ambas as vigas.



Figura 24 – Malha metálica entre dois pedaços de feltro  
Fonte: Acervo dos autores (2016).

As duas células de realcalinização eletroquímica foram conectadas em paralelo à fonte por meio de cabos condutores de coloração vermelha, polo positivo conectado ao ânodo, e preta, polo negativo conectado ao cátodo.

Na viga superior também foi ensaiada a realcalinização química, na qual um trecho da viga foi envolvido com feltro e umidificado com a solução de carbonato de sódio, sem a presença de corrente.

Diariamente os feltros e as peças de concreto utilizadas foram saturados com a solução de carbonato de sódio e água, respectivamente, buscando manter as melhores condições para a condução da corrente e funcionamento da pilha formada pela conexão de dois metais, um funcionando como cátodo e outro como ânodo.

A fonte se manteve ligada por 5 dias, sendo o experimento interrompido por falta de solução alcalina.

Após o desligamento da fonte, desmontou-se o sistema e utilizou-se novamente a serra circular para corte e retirada do concreto no local onde foi aplicado o método. No dia seguinte à retirada do sistema de realcalinização repetiu-se o procedimento para medida de profundidade de carbonatação por meio da aspersão de solução de 1% de fenolftaleína sobre o local.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A fim de se obter dados que pudessem mostrar a eficácia do método de realcalinização eletroquímica, foram realizadas medidas de profundidade de carbonatação previamente à aplicação do método (Tabela 2) e após 5 dias de aplicação dos métodos de RAQ e RAE com titânio e alumínio.

Tabela 2 – Medida de profundidade de carbonatação referência (mm)

<b>Concreto Referência</b>	
	10
	13
	10
	20
Média	13

Nas Figuras 25 e 26 é possível observar que ocorreu carbonatação do concreto ao longo dos 3 anos de existência das peças. A frente de carbonatação aparenta ser uniforme, o que é esperado, visto que a peça se encontra em local com pouca variação de concentração de gás carbônico.



Figura 25 – Corte inicial antes da aplicação do método – viga carbonatada  
Fonte: Acervo dos autores (2016).



Figura 26 – Profundidade de carbonatação antes da aplicação do método (20mm)  
Fonte: Acervo dos autores (2016).

Durante a montagem da célula de realcalinização eletroquímica pôde-se observar que, devido à alta resistividade do concreto em umidade ambiente, a fonte de corrente contínua não seria capaz de entregar a quantidade de corrente necessária ao experimento devido a sua limitação de tensão elétrica (U) de 30V.

Para que a corrente elétrica aplicada pela fonte fosse de 0,16A, foi preciso reduzir a resistividade do sistema por meio do aumento de umidade do concreto. A relação inversamente proporcional entre corrente (I) e resistividade (R) é expressa pela Lei de Ohm que pode ser observada na equação 5 abaixo.

$$I = \frac{U}{R} \quad A \quad (05)$$

Após o aumento de umidade da peça de concreto, o valor de corrente elétrica circulando pelo sistema subiu de 0,02A para 0,16A. Também devido à limitação de tensão elétrica da fonte foi necessário ligar os dois sistemas (alumínio e titânio) em paralelo, fazendo com que o sistema de menor resistência elétrica recebesse a maior quantidade de corrente. De acordo com os valores apresentados no anexo A, sendo o titânio o metal de maior resistividade (~0,4ohm.mm<sup>2</sup>/m), é possível que o sistema composto pela malha de alumínio (~0,29ohm.mm<sup>2</sup>/m) tenha recebido a maior densidade de corrente elétrica.

Acredita-se que com a saturação do concreto seja possível conectar os dois sistemas, alumínio e titânio, em série, fazendo com que a mesma densidade de corrente seja entregue à ambos.

É possível observar na Figura 27 o sistema já montado. A viga superior está recebendo a aplicação do método de RAE com titânio (direita) e RAQ (esquerda), enquanto a viga inferior recebe o método de RAE com alumínio.



Figura 27 – Equipamento em funcionamento  
Fonte: Acervo dos autores (2016).

Devido a quantidade de solução de carbonato de sódio adquirida para o experimento, o sistema permaneceu ligado por 5 dias.

Após a aplicação do método, aspergiu-se novamente solução de fenolftaleína sobre a peça para a verificação da alcalinidade do concreto recuperado, como mostrado na Figura 28.



Figura 28 – RAQ, RAE (titânio) e RAE (alumínio), em sequência  
Fonte: Acervo dos autores (2016).

Nota-se que, após a aplicação do método, as superfícies tratadas apresentaram coloração rosada antes inexistente. Dentre as três superfícies aspergidas com a solução indicadora de pH, a superfície onde o sistema de RAE com titânio foi aplicado apresentou coloração mais intensa, seguida do sistema de RAE com alumínio e por último de RAQ.

Nas Figuras 29, 30 e 31 é possível observar, de menor distância, a diferença de coloração, que após a realcalinização se encontrava rosada, entre as superfícies que receberam os diferentes tratamentos.





Figura 29 – Realcalinização química



Figura 30 – Realcalinização eletroquímica (titânio)

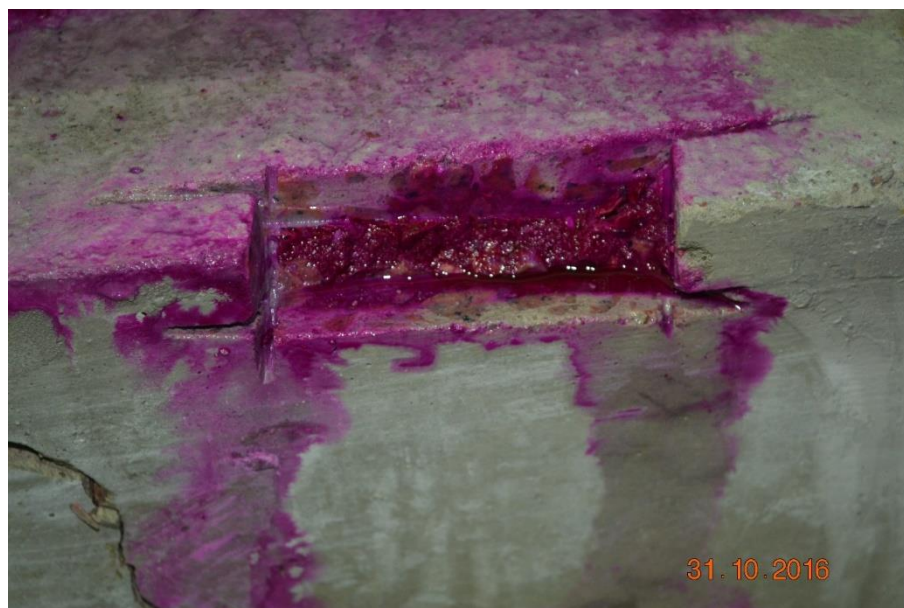


Figura 31 – Realcalinização eletroquímica (alumínio)

As medidas de profundidade de carbonatação dos três sistemas realizadas com o auxílio de um paquímetro são apresentadas na Tabela 3, juntamente com as medidas de referência já apresentadas.

Tabela 3 – Medida de profundidade de carbonatação (mm)

	<b>Concreto Referência</b>	<b>RAQ</b>	<b>RAE Alumínio</b>	<b>RAE Titânio</b>
	10	14	15	8
	13	10	13	10
	10	6		
	20			
<b>Média</b>	<b>13 ± 3</b>	<b>10 ± 3</b>	<b>14 ± 1</b>	<b>9 ± 1</b>

Devido às diferentes localizações nas vigas das quais as medidas de profundidade de carbonatação foram coletadas e por não ser possível observar diferenças estatísticas entre as amostras obtidas, não é possível fazer uma comparação segura entre os dados. Apesar de assumir-se que a frente de carbonatação é homogênea, diferenças de porosidade e composição local do concreto impedem uma análise quantitativa dos resultados, sendo a análise qualitativa mais confiável.

Passado um dia da retirada da corrente, repetiu-se o procedimento para verificação da alcalinidade do concreto com a aspersão da solução indicadora de pH, como mostram as Figuras 32, 33 e 34.



Figura 32 – RAQ após um dia

Como pode-se observar na Figura 23, a coloração da face superior encontra-se em um tom de rosa, mais intenso que antes da realcalinização. Este fenômeno indica o início do processo de realcalinização.



Figura 33 – RAE com Titânio após um dia



Figura 34 – RAE com Alumínio após um dia

Foi possível verificar que a alcalinidade antes presente no concreto havia diminuído, podendo indicar que o pouco tempo de aplicação do método (5 dias), apesar de ter sido eficaz na penetração de parte da solução básica no concreto, não foi suficiente para que os compostos alcalinos se fixassem à peça.

Apesar da profundidade de carbonatação não ter diminuído no método de realcalinização eletroquímica utilizando a malha de alumínio, pode-se verificar que a coloração após a aplicação de solução de 1% de fenolftaleína ficou mais intensa, concluindo haver aumento do pH.

#### 4.1 CONTRIBUIÇÕES PARA O ESTUDO DO TEMA

Sugestões para realização de ensaios utilizando o método de realcalinização eletroquímica:

- Utilizar peças de concreto poroso quando necessário induzir a carbonatação para aumentar velocidade da frente de carbonatação;
- Remover a camada superficial do concreto pode ajudar a penetração dos  $\text{CO}_2$  e da solução alcalina;
- Caso seja necessário a carbonatação acelerada, fazer o sazonalamento do concreto, o mais próximo possível de uma umidade de 60%;
- A câmara de carbonatação com 6% de  $\text{CO}_2$ , apresentou melhores resultados em pesquisas do que a uma taxa de 100%;

- Saturar a peça de concreto armado com água, assim reduzindo a resistividade do sistema e facilitando a passagem de corrente entregue pela fonte;
- Utilizar corrente elétrica próxima de  $0,8A/m^2$ , para que o sistema seja eficaz sem danificar o concreto;
- Quando conectados dois sistemas à uma fonte, ligações em paralelo aumentam a corrente entregue pela fonte, mas os valores de corrente serão diferentes para cada sistema devido à diferença nos valores de resistividade dos mesmos;
- Manter o feltro sempre saturado com solução alcalina. Sugere-se envolver o sistema com material impermeável para evitar que o eletrólito evapore;
- Quando realizados ensaios em laboratório, moldar corpos de prova de pequenas dimensões com armadura exposta que possam de preferência serem submersos na solução alcalina;
- A solução alcalina de carbonato de sódio é a solução mais utilizada na realcalinização de concreto;
- Medir a profundidade de carbonatação em mesma área antes e após a aplicação do método;
- Fazer a limpeza do pó e resíduos de concreto após o corte da estrutura, antes de aspergir a solução de fenolftaleína;
- Além da fenolftaleína, pode ser utilizada uma solução de timolftaleína;
- Para uma análise quantitativa, realizar o maior número de medições de profundidade de carbonatação possível;
- Aumentar o tempo de aplicação do método para melhores resultados.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 CONCLUSÕES

A partir da realização deste estudo, foi possível obter informações sobre o funcionamento do método de realcalinização eletroquímica e a eficácia do metal alumínio em comparação ao titânio quando utilizado como ânodo do sistema.

Dada a alta resistividade do concreto, utilizando uma fonte de corrente correspondente à utilizada no estudo, concluiu-se que é preciso que a peça a ser realcalinizada esteja saturada com água para que seja possível a aplicação da corrente necessária ao experimento.

Aplicando-se o método de RAE por 5 dias, utilizando densidade de corrente de  $0,8A/m^2$ , foi possível concluir, por meio de dados qualitativos, que é possível utilizar o alumínio como ânodo do sistema, tornando o método economicamente viável.

Quando comparada a eficácia dos três sistemas, o sistema utilizando titânio aparentemente foi o que atingiu melhores resultados. Tal resultado condiz com o relatado em literatura. Os resultados obtidos com a aplicação do método de RAQ também estão de acordo com a literatura, visto que os processos de absorção e difusão ocorrem mais lentamente.

Apesar dos bons resultados apresentados pelo experimento coletados após o desmonte da célula de realcalinização eletroquímica, os mesmos não se mantiveram. É possível que a solução alcalina não tenha se fixado ao concreto e com o passar do tempo tenha evaporado.

As medidas de profundidade de carbonatação não foram conclusivas. Isso se deve ao pequeno número de medições realizadas e às diferentes localizações nas vigas de onde elas foram coletadas.

Uma amostragem maior do que a alcançada nesse trabalho é importante, dando veracidade aos resultados encontrados, possibilitando descartar dados fora da média.

Para um melhor estudo comparativo o ideal seria moldar corpos de prova com características bem definidas e conhecidas, submetendo-o a uma carbonatação acelerada, para então comparar dois materiais diante da RAE. A etapa do sazonalamento, não realizada neste trabalho, é importante para proporcionar ao

concreto uma umidade conhecida, e de preferência próxima aos 60%, antes de passar pelo processo de carbonatação.

Um dos limitantes deste trabalho foi a falta de solução alcalina, que teve sua demanda maior que o imaginado. Em estudos de laboratório, se as dimensões permitirem, pode-se deixar o concreto submerso na solução. Essa alternativa não seria possível neste trabalho, que teve como objeto de estudo uma viga em proporções reais. Na prática, uma manta ou plástico impermeável envolvendo o fletro pode ser indicado, para que não necessite de tanta solução, já que ela acaba evaporando e demandando uma reposição constante.

Ficou claro nesse estudo que é importante a saturação do concreto com água, para que a corrente elétrica consiga atravessar o concreto. Um estudo prévio do pH da água é um cuidado que pode ser feito para garantir que a água não interfira nos resultados.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A carbonatação acelerada é indispensável quando se tem corpos de prova recentes, e, para facilitar, aconselha-se a moldagem de corpos de prova com um fator  $a/c$  não muito baixo, uma resistência à compressão não muito alta, de preferência o cimento comum, sem adições e a cura não precisa ser tão longa. Tudo isso aumenta a porosidade do concreto facilitando a penetração do  $\text{CO}_2$  e diminuindo o tempo necessário para a carbonatação dos corpos de prova. Um esmirilhamento da superfície pode ser também interessante, a superfície do concreto tende a conter mais pasta de cimento, sendo menos porosa que o concreto logo abaixo.

Essas características do concreto, como fator  $a/c$ , resistência à compressão, tipo de cimento, tempo de cura, remoção da superfície e umidade podem ser variadas para a RAE, como objetos de estudo.

É interessante a moldagem de corpos de prova de pequenas dimensões, possibilitando uma maior amostragem e um facilidade na etapa de carbonatação acelerada e posterior realcalinização, já que o tamanho da câmara de carbonatação e a densidade de carga máxima da fonte podem ser fatores limitantes da pesquisa. Além disso, corpos de prova menores possibilitam a imersão do concreto em solução alcalina, o que garante que a solução esteja presente 100% do tempo, podendo este sistema ser isolado com tampa, por exemplo, impedindo a evaporação da solução.

O estudo comparativo entre as malhas de titânio e alumínio, além de outros metais como o aço, por exemplo, deve ser continuado, já que neste trabalho não foi possível concluir a eficiência do metal alternativo ao titânio, que no caso foi o alumínio. Outros metais podem ser estudados, como, por exemplo, o latão e o aço, visando um substituto ao titânio, barateando o processo.

Variar a solução alcalina também pode ser tema de uma pesquisa, assim como a concentração do elemento e quantidade necessária de solução até a conclusão do processo.



## REFERÊNCIAS

ARAÚJO, F. W. C. de. **Estudo da repassivação da armadura em concretos carbonatados através da técnica de realcalinização química**. 2009. 217 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2014.

BANFILL, P. F. G. **Features of the mechanism of electrolytic re-alkalisation and desalination treatments for reinforced concrete**. Heriot-Watt University: Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete, 1994.

BAROGHEL-BOUNY, V; CAPRA, B; LAURENS, S. A durabilidade das armaduras e do concreto de cobertura in: Ed. OLLIVER, J. P.; VICHOT. Ed. Tradução CASCUDO, O; CARASEK, H. **A Durabilidade do concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. 1.ed. São Paulo: IBRACON, 2014. Cap. 9.

BAROGHEL-BOUNY, V; CUSSIGH, F; ROUGEAU, P. Durabilidade dos concretos a partir da abordagem do desempenho in: Ed. OLLIVER, J. P.; VICHOT. Ed. Tradução CASCUDO, O; CARASEK, H. **A Durabilidade do concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. 1.ed. São Paulo: IBRACON, 2014. Cap. 8.

BERTOLINI, L.; CARSANA M.; RADAELLI E. Conservation of historical reinforced concrete structures damaged by carbonation induced corrosion by means of electrochemical realkalisation. **Journal of Cultural Heritage**. n. 9, PP. 376-385, 2008.

BOHNI, H. **Corrosion in concrete reinforced structures**. Inglaterra: Woodhead Publishing Limited, 2005.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CAPMAS, A. Prólogo: Concreto e desenvolvimento sustentável in: Ed. OLLIVER, J. P.; VICHOT. Ed. Tradução CASCUDO, O; CARASEK, H. **A Durabilidade do concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. 1.ed. São Paulo: IBRACON, 2014. Cap. 1.

CÁNOVAS, M. F. **Patologia e terapia do concreto armado**. São Paulo: Pini, 1988.

EDUFER. **Tabela de resistividade dos materiais condutores, semi-condutores e isolantes**. Disponível em <http://www.edufer.com.br/tabela-de-resistividade-dos-materiais-condutores-semicondutores-e-isolantes/>>. Acesso em 11 de Novembro de 2016

ESCADEILLAS, G; HORNAIN, H. A durabilidade do concreto frente a ambientes quimicamente agressivos in: Ed. OLLIVER, J. P.; VICHOT. Ed. Tradução CASCUDO, O; CARASEK, H. **A Durabilidade do concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. 1.ed. São Paulo: IBRACON, 2014. Cap.11.

FIGUEIREDO, E. P. Corrosão e degradação dos materiais in: Ed. ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais** São Paulo: IBRACON, 2007. Cap. 13.

GONZÁLEZ, F.; FAJARDO, G.; ARLIGUIE, G.; JUÁREZ, C.A.; ESCADEILLAS, G. Electrochemical realkalisation of carbonated concrete: an alternative approach to prevention of reinforcing steel corrosion. **International Journal of Electrochemical Science**. N. 6, PP 6332-6349, 2011.

HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: Pini, 1986.

HELENE, P.; ANDRADE, T. Concreto de Cimento Portland in: Ed. ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**, v2. São Paulo: IBRACON, 2007. Cap. 27.

HO, D. W. S.; LEWIS, R. L. Carbonation of concrete ant its prediction. **Cement and Concrete Research**. Vol 17 Issue 6. p.1003-1004, 1987.

ISAIA, G. C. **Concreto: Ensino, pesquisa e realizações**, v1. São Paulo: IBRACON, 2005.

ISAIA, G. C. **Concreto: Ensino, pesquisa e realizações**, v2. São Paulo: IBRACON, 2005.

LOURENÇO, Z. Proteção catódica de estruturas de betão armado. **Revista Corrosão e Proteção de Materiais**, Vol. 26 N.º 3, p. 79-85, 2007.

LUCENA, C. M. **Avaliação da eficiência de uma câmara de carbonatação acelerada projetada e montada em laboratório**. 2016. 154 f. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

MIRANDA, J.M.; GONZÁLEZ, J. A.; COBO, A.; OTERO, E. Several questions about electrochemical rehabilitation methods for reinforced concrete structures. **Corrosion Science**. n. 48, PP. 2172-2188, 2005.

MACDONALD, S. **Concrete Building Pathology**. Oxford: Blackwell Science, 2003.

MIETZ, I. J. Electrochemical realkalisation for rehabilitation of reinforced concrete structures. **Materials and Corrosion**. n. 46, PP. 527-533, 1995.

MITIDIERI FILHO, C. V. Qualidade e desempenho na construção civil in: Ed. ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**, v1. São Paulo: IBRACON, 2007. Cap.23.

MONTEIRO, E. C. B. **Avaliação do método de extração eletroquímica de cloretos para reabilitação de estruturas de concreto com problemas de corrosão de armaduras**. 2002. 229 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre, RS: Bookman, 2015.

NEVILLE, A. M. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre, RS: Bookman, 2013.

NONAT, A. A hidratação dos cimentos in: Ed. OLLIVER, J. P.; VICHOT. Ed. Tradução CASCUDO, O; CARASEK, H. **A Durabilidade do concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. 1.ed. São Paulo: IBRACON, 2014. Cap.2.

PANOSSIAN, Z. **Corrosão e proteção contra corrosão em equipamentos e estruturas metálicas v.1**. 1. Ed. São Paulo: IPT, 1993.

PANOSSIAN, Z. **Corrosão e proteção contra corrosão em equipamentos e estruturas metálicas v.2**. 1. Ed. São Paulo: IPT, 1993.

PAULETTI, C. **Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação**. 2004. 176 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

PAULETTI, C; POSSAN, E; DAL MOLIN, D. C. C. Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil. **Ambiente Construído**. V.7, n.4, 2006. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

POSSAN, E.; DEMOLINER, C. A. **Desempenho, durabilidade e vida útil das edificações: Abordagem geral**. Revista Técnico Científica, CREA-PR. n.1, 2013

REDAELLI, E.; BERTOLINI, L. Electrochemical repair techniques in carbonated concrete. Part I: electrochemical realkalisation. **J Appl Electrochem**. n. 41, PP. 817-827, 2011.

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

ROUGEAU, P.; GUIRAUD, P. A durabilidade no contexto normativo europeu in: Ed. OLLIVER, J. P.; VICHOT. Ed. Tradução CASCUDO, O; CARASEK, H. **A Durabilidade do concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. 1.ed. São Paulo: IBRACON, 2014. Cap.7.

SILVA, P. F. A. **DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO APARENTE EM ATMOSFERA URBANA**. 1.ed. São Paulo, SP: Pini, 1995.

SOUZA, V. C. M. de; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. 1. ed. São Paulo, SP: Pini, 1998.

STELLA, A.C. **Análise do desempenho de vigas de concreto armado reforçadas com fibra de carbono**. 2016. 114 f. Trabalho de conclusão de curso. (Bacharelado em Engenharia Civil) – Departamento acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

TONG, Y.; BOUTEILLER, V.; MARIE-VICTOIRE, E.; JOIRET, S. Efficiency investigations of electrochemical realkalisation treatment applied to carbonated reinforced concrete – Part 1: Sacrificial anode process. **Cement and Concrete Research**. N. 42, PP. 84-94, 2012.

YEIH, W.; CHANG, J. J. A study on the efficiency of electrochemical realkalisation of carbonated concrete. **Construction and Building Materials**. n. 19, PP. 516-524, 2005.

**ANEXO A - TABELA DE RESISTIVIDADE DOS MATERIAIS CONDUTORES,  
SEMI-CONDUTORES E ISOLANTES**

<b>Material (metais, ligas metálicas, semicondutores e isolantes):</b>	<b>Símbolo químico:</b>	<b>Número atômico:</b>	<b>Peso específico em grama por cm<sup>3</sup>:</b>	<b>Ponto de fusão em °C:</b>	<b>Resistividade em ohms x mm<sup>2</sup> / m a 20°C:</b>
Alumínio (99,9%)	Al	13	2,58	657	0,0284
Alumínio temperado	–	–	2,703	658	0,0288
Alumínio	–	–	2,699	660	0,0278
Antimônio	Sb	51	6,691	631	0,417
Arsênio	As	33	5,727	817	0,3
Bismuto	Bi	83	9,78	271	1,3
Berílio	Be	4	1,848	1287	0,04
Borracha	–	–	–	–	1017
Boro	B	5	2,46	2076	1,8 x 10 <sup>18</sup>
Bromo	Br	35	3,12	-7,2	1024
Bronze-Alumínio (Cu 90% – Al 10%)	–	–	7,6	1050	0,1259
Cádmio	Cd	48	8,65	321	0,07
Cálcio	Ca	20	1,55	842	0,034
Carbono	C	6	2,267	3527	3000
Chumbo	Pb	82	11,3	327	0,2114
Cobalto	Co	27	8,9	1495	0,06
Cobre eletrolítico	Cu	29	9,05	1080	0,0167
Cobre recozido normal	–	–	8,89	1085	0,0173
Constantan (Cu 60% – Ni 40%)	–	–	8,4	1240	0,5
Cromo	Cr	24	7,14	1907	0,127
Ebonite	–	–	–	–	1013
Enxofre	S	16	1,96	115	1021
Estanho	Sn	50	7,3	231	0,1195
Ferro puro comercial	Fe	26	7,85	1538	0,097
Ferro fundido	–	–	7,874	1500	0,92
Ferro-níquel	–	–	8,1	1500	0,8126
Fósforo	P	15	1,823	44,2	0,1
Gálio	Ga	31	5,904	29,8	0,14
Germânio	Ge	32	5,323	938	46 x 10 <sup>4</sup>
Índio	In	49	7,31	156	0,08
Iodo	I	53	4,94	114	1,3 x 10 <sup>21</sup>
Írídio	Ir	77	22,65	2466	0,047
Latão (Cu 60% – Zn 40%)	–	–	–	–	0,0818
Lítio	Li	3	0,535	180	0,094

<b>Material (metais, ligas metálicas, semicondutores e isolantes):</b>	<b>Símbolo químico:</b>	<b>Número atômico:</b>	<b>Peso específico em grama por cm<sup>3</sup>:</b>	<b>Ponto de fusão em °C:</b>	<b>Resistividade em ohms x mm<sup>2</sup> / m a 20°C:</b>
Maillechort (Cu 60% – Ni 15% – Zn 25%)	–	–	8,6	1500	0,0534
Magnésio	Mg	12	1,738	650	0,044
Manganês	Mn	25	7,47	1246	1,6
Manganina (Cu 84% – Mn 12% – Ni 4%)	–	–	8,3	–	0,42
Mercúrio	Hg	80	13,55	-38,3	0,9567
Mica	–	–	–	–	1015
Molibdênio	Mo	42	10,28	2623	0,05
Nióbio	Nb	41	8,57	2477	0,15
Níquel	Ni	28	8,7	1452	0,078
Níquel-Cromo (Cu 60% – Cr 12% – Fe 28%)	–	–	–	–	1,37
Niquelina (Cu 62% – Ni 18% – Zn 20%)	–	–	–	–	0,332
Niquelina (Cu 55% – Ni 25% – Zn 20%)	–	–	–	–	0,4527
Ósmio	Os	76	22,5	3033	0,0949
Ouro	Au	79	19,3	1064	0,022
Parafina	–	–	–	–	1023
PET	–	–	–	–	1026
Platina	Pt	78	21,5	1768	0,1184
Polônio	Po	84	9,196	254	0,43
Porcelana	–	–	–	–	1015
Potássio	K	19	0,856	63,4	0,07
Prata	Ag	47	10,49	962	0,0158
Quartzo (fundido)	–	–	–	–	7,5 x 10 <sup>23</sup>
Selênio	Se	34	4,819	221	0,12
Silício	Si	14	2,33	1414	64 x 10 <sup>7</sup>
Sódio	Na	11	0,968	97,8	0,047
Tálio	Tl	81	11,85	303	0,15
Tântalo	Ta	73	16,65	3017	0,3361
Teflon	–	–	–	–	10 <sup>28</sup> a 10 <sup>30</sup>
Telúrio	Te	52	6,24	449	1010
Titânio	Ti	22	4,507	1668	0,4
Tungstênio	W	74	19,25	3422	0,071
Vanádio	V	23	6,11	1910	0,2
Vidro	–	–	–	–	10 <sup>16</sup> a 10 <sup>20</sup>
Zinco	Zn	30	2,33	67,6	0,765
Zircônio	Zr	40	1,85	84,4	0,612