



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

UTILIZAÇÃO DE SEMIPILHA COBRE SULFATO DE COBRE PARA  
MAPEAMENTO DE POTENCIAIS ELETROQUÍMICOS EM PILARES

RYAN CAVALCANTE AZEVEDO

João Pessoa - PB

Junho de 2017

RYAN CAVALCANTE AZEVEDO

**UTILIZAÇÃO DE SEMIPILHA COBRE SULFATO DE COBRE PARA  
MAPEAMENTO DE POTENCIAIS ELETROQUÍMICOS EM PILARES**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à  
Universidade Federal da Paraíba como  
exigência para obtenção do título de Bacharel  
em Engenharia Civil.

Orientador: Professor: Paulo Germano  
Toscano Moura.

JOÃO PESSOA  
2017.

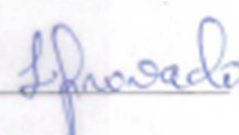
## FOLHA DE APROVAÇÃO

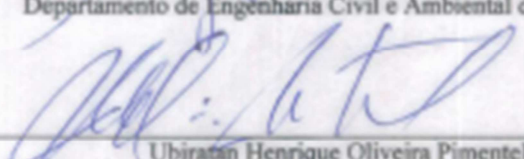
RYAN CAVALCANTE AZEVEDO

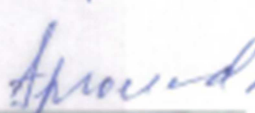
### UTILIZAÇÃO DA SEMIPILHA COBRE SULFATO DE COBRE PARA MAPEAMENTO DE POTENCIAIS ELETROQUÍMICOS EM PILARES

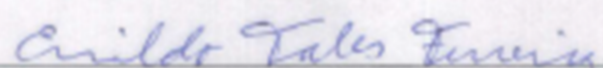
Trabalho de Conclusão de Curso em 02/06/2017 perante a seguinte Comissão Julgadora:

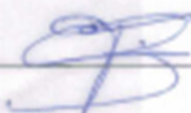
  
Paulo Germano Toscano Moura  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

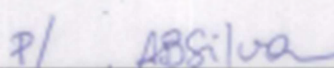
  
Aprovado

  
Ubiratan Henrique Oliveira Pimentel  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

  
Aprovado

  
Enildo Tales Ferreira  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB



  
Prof. Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga  
Matrícula Siape: 1668619  
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

Prof.ª Andrea Brasiliano  
Vice - Coordenadora COGEC  
Siape 1549557

A994u Azevedo, Ryan Cavalcante

Utilização de semipilha cobre sulfato de cobre para mapeamento de potenciais eletroquímicos em pilares./ Ryan Cavalcante Azevedo. – João Pessoa, 2017.

49f. il.:

Orientador: Professor: Paulo Germano Toscano Moura.

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Civil) Campus I - UFPB / Universidade Federal da Paraíba.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha mãe, Célia Maria, que batalhou a vida inteira para que nunca faltasse nada para eu e meus irmãos, que suportou as minhas falhas e desfeitas. Por toda a compreensão e paciência que só uma mãe pode ter.

Ao meu pai, Antônio Diógenes, que sempre disse o que eu precisava ouvir. Apesar de todos os meus atrasos, sempre teve orgulho de mim e acreditou na minha capacidade.

Aos meus dois irmãos, Renan e Renata, que sempre serão grandes companheiros e amigos, e sempre estão disponíveis na necessidade e na alegria.

Ao professor Paulo Germano, por ter se disponibilizado na orientação deste trabalho e na escolha do tema. Também ao professor Belarmino Lira, que durante boa parte do curso me auxiliou em diversos projetos e a todos os professores do curso de engenharia civil da UFPB.

Aos meus grandes amigos, José Victor, que vivenciou a minha infância e adolescência; e meu amigo e companheiro de curso, Caio Fonseca, que esteve presente nos melhores e piores momentos dos últimos anos de estudos.

À minha namorada, Jéssica Nascimento, por compartilhar as minhas preocupações e ansiedades.

## RESUMO

As estruturas de concreto, de alguma forma, estão sendo afetadas pela racionalização estrutural imposta pelo avanço tecnológico, pois suas sessões são cada vez mais otimizadas, e qualquer erro de concepção ou execução pode acarretar em uma grande perda de sua vida útil. Desta forma, o estudo da patologia é essencial para minimizar os riscos de acidentes e prejuízos financeiros. O presente trabalho tem como finalidade, a utilização de semipilha de cobre sulfato de cobre para mapeamento de potenciais eletroquímicos em pilares. Com este mapeamento, é possível prever possíveis patologias relacionadas à corrosão de armaduras cobertas em estruturas de concreto armado sem a necessidade da análise visual, ou seja, sem grandes impactos na estrutura e consequentemente, sem grande impacto financeiro. Para isso, foi escolhido um pilar do restaurante universitário da UFPB e detalhado cada passo necessário para a realização do procedimento. Também foi utilizado um pilar do CCEN com forte evidência de corrosão, mas com um revestimento isolante, a fim de demonstrar o efeito de tais revestimentos na leitura da semipilha. Foi realizada uma pesquisa bibliográfica para o entendimento de como ocorre a corrosão nas armaduras cobertas de concreto, definindo conceitos de pilhas, contaminação por cloretos, carbonatação e corrosão. Na análise final do mapeamento foi constatado que o pilar do restaurante universitário não possuía nenhuma evidência de corrosão, devido ao fato de ser relativamente novo, e possuir um cobrimento de concreto significativo e que a utilização da semipilha cobre sulfato de cobre foi ideal para uma análise rápida e barata. No pilar do CCEN, foi constatado que a existência de um revestimento a base de epóxi isolou a armadura do pilar, barrando o avanço da corrosão e alterando significativamente a leitura da semipilha. A utilização da semipilha em pilares é uma solução barata para a análise de corrosão, com a desvantagem de que é necessária a retirada de qualquer revestimento presente no pilar para que a leitura seja precisa.

Palavras Chaves: Construção civil, patologia, corrosão, pilhas, semipilhas, linhas equipotenciais, potencial eletroquímico.

## **ABSTRACT**

Concrete structures are, in some way, severely affected by the structural rationalization imposed by civil engineering as their sections are increasingly optimized, and any design or execution errors can lead to a major loss of their life time. In this way, the study of the pathology is essential to minimize the risks of accidents and financial losses. The present work has the purpose of using copper copper sulfate half-cell for the mapping of electrochemical potentials in pillars. With this mapping, it is possible to predict possible pathologies related to the corrosion of steel in reinforced concrete pillars without the need of visual analysis, that is, without major impacts on the structure and consequently, without great financial impact. For this, a pillar of the university restaurant (UFPB) was chosen and detailed each step necessary for the accomplishment of the procedure. A pillar of the CCEN with strong evidence of corrosion, but with an epoxy coating, was also used to demonstrate the effect of such coatings on the half-cell reading. A bibliographical research was carried out to understand how corrosion occurs in reinforced concrete reinforcement, defining concepts of cells, chloride contamination, carbonation and corrosion. In the final analysis of the mapping, it was verified that the pillar of the university restaurant had no evidence of Corrosion due to the fact that it is relatively new and has a significant concrete coating and the use of the copper copper sulfate half-cell was ideal for a quick and cheap analysis. In the pillar of the CCEN, it was found that the existence of an epoxy coating isolated the pillar reinforcement, barring the advance of the corrosion and significantly altering the half-cell reading. The use of half-cell in pillars is an inexpensive solution for corrosion analysis, with the disadvantage of the removal of any coating present on the pillar for accurate reading.

**Keywords:** Civil engineering, pathology, corrosion, cells, half-cells, equipotential lines, electrochemical potentials.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 Estrutura da dupla camada elétrica .....                                          | 4  |
| Figura 2 Semipilha .....                                                                   | 5  |
| Figura 3 Esquema de obtenção do potencial de eletrodo padrão do zinco.....                 | 8  |
| Figura 4 Valores de potenciais padrões de oxi-redução para 25 °C e 1 ATM.....              | 9  |
| Figura 5 Pilha galvânica. ....                                                             | 11 |
| Figura 6 Pilha de ação local devido a impurezas em uma chapa de Zinco. ....                | 12 |
| Figura 7 Exemplo de pilha eletrolítica. ....                                               | 14 |
| Figura 8 Representação da polarização de dois metais (Zn e Cu).....                        | 15 |
| Figura 9 Diagrama de polarização de uma pilha de zinco e cobre. ....                       | 16 |
| Figura 10 Potencial versus corrente exemplificando o controle anódico da corrosão .....    | 16 |
| Figura 11 Potencial versus corrente exemplificando o controle catódico da corrosão .....   | 17 |
| Figura 12 Curva de polarização por concentração. ....                                      | 18 |
| Figura 13 Curvas representativas de velocidade de corrosão.....                            | 21 |
| Figura 14 Distribuição do tamanho de poros na pasta endurecida do cimento. ....            | 22 |
| Figura 15 Esquema do processo de difusão de cloretos. ....                                 | 24 |
| Figura 16 Contaminação de cloretos ao longo do revestimento. ....                          | 25 |
| Figura 17 Avanço do processo de carbonatação. ....                                         | 28 |
| Figura 18 Influência da umidade de equilíbrio .....                                        | 30 |
| Figura 19 Volumes relativos do ferro e de alguns produtos de corrosão. ....                | 31 |
| Figura 20 Visão seccional da semipilha cobre sulfato de cobre(ESC). ....                   | 33 |
| Figura 21 Semipilha portátil, modelo 3A e Voltímetro modelo CPV-4 da Tinker-Rasor.. ....   | 34 |
| Figura 22 Preenchimento da semipilha com água destilada.....                               | 35 |
| Figura 23 Estabelecimento de pontos de coleta do ddp. (Pilar 2) .....                      | 36 |
| Figura 24 Abertura no revestimento do concreto (Pilar 1). ....                             | 36 |
| Figura 25 Armadura exposta para ligação no voltímetro (Pilar 1). ....                      | 37 |
| Figura 26 Limpeza do aço para retirada de camada passivadora (Pilar 2). ....               | 37 |
| Figura 27 Uso da semipilha no pilar 1.....                                                 | 38 |
| Figura 28 Pilar estudado do CCEN (pilar 2). ....                                           | 39 |
| Figura 29 Pilar estudado da estrutura lateral ao RU (Pilar 1).....                         | 39 |
| Figura 30 Cálculo da distância l para determinado potencial Vn.....                        | 41 |
| Figura 31 Posições e valores de potenciais(ESC) dos pontos nas duas faces do pilar um..... | 44 |
| Figura 32 Linhas equipotenciais eletroquímicos(ESC) do pilar um.....                       | 45 |
| Figura 33 Mapa gráfico dos potenciais eletroquímicos(ESC) do pilar um. ....                | 46 |

## SUMÁRIO

|            |                                                              |           |
|------------|--------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                      | <b>1</b>  |
| <b>2</b>   | <b>JUSTIFICATIVA.....</b>                                    | <b>2</b>  |
| <b>3</b>   | <b>OBJETIVOS.....</b>                                        | <b>2</b>  |
| <b>3.1</b> | <b>Objetivo Geral.....</b>                                   | <b>2</b>  |
| <b>3.2</b> | <b>Objetivos Específicos .....</b>                           | <b>3</b>  |
| <b>4</b>   | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>                           | <b>3</b>  |
| <b>4.1</b> | <b>Corrosão eletroquímica.....</b>                           | <b>3</b>  |
| 4.1.1      | Eletrodo .....                                               | 3         |
| 4.1.2      | Potencial de eletrodo .....                                  | 4         |
| 4.1.3      | Eletrodo de referencia .....                                 | 9         |
| 4.1.4      | Pilha eletroquímica.....                                     | 10        |
| 4.1.5      | Polarização do eletrodo .....                                | 14        |
| 4.1.6      | Taxa de corrosão .....                                       | 20        |
| <b>4.2</b> | <b>Corrosão de armaduras em concreto.....</b>                | <b>22</b> |
| 4.2.1      | Contaminação por íons Cloretos ( $Cl^-$ ).....               | 22        |
| 4.2.2      | Carbonatação.....                                            | 26        |
| 4.2.3      | Propagação da corrosão.....                                  | 28        |
| 4.2.4      | Produtos da corrosão: .....                                  | 30        |
| 4.2.5      | Micropilha e macropilha .....                                | 31        |
| <b>5</b>   | <b>METODOLOGIA .....</b>                                     | <b>31</b> |
| <b>5.1</b> | <b>Semipilha de cobre sulfato de cobre.....</b>              | <b>32</b> |
| <b>5.2</b> | <b>Preparação e uso da semipilha .....</b>                   | <b>35</b> |
| <b>5.3</b> | <b>Local de realização das medições com a semipilha.....</b> | <b>38</b> |
| <b>5.4</b> | <b>Procedimento para o mapeamento de potenciais.....</b>     | <b>40</b> |
| 5.4.1      | Interpolação.....                                            | 41        |
| <b>6</b>   | <b>RESULTADOS.....</b>                                       | <b>43</b> |
| <b>7</b>   | <b>CONCLUSÃO .....</b>                                       | <b>47</b> |
| <b>8</b>   | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                      | <b>48</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A engenharia civil vem, há tempos, percorrendo um trajeto de evolução contínua, com materiais cada vez mais resistentes e métodos construtivos mais eficientes, porém, esta área ainda possui grandes limitações.

O avanço tecnológico acelerado trouxe consigo, mesmo que implicitamente, à aceitação de certos riscos. Desta forma, também acarreta no aparecimento de falhas construtivas, pois muitos defeitos construtivos só se apresentam após a estrutura ter sido finalizada, muitas vezes no decorrer de grandes períodos após a sua finalização. O estudo dos erros originados dos riscos tomados, naturalmente, acarreta no desenvolvimento, mas também gera uma preocupação e um interesse na antecipação e estudo das origens desses equívocos construtivos.

A falta de conhecimento de tecnologias disponíveis não é sempre o principal fator em estruturas com desempenho insatisfatório. A boa prática construtiva tem contribuído para a construção de obras eficazes e duradouras. A imperícia e irresponsabilidade nos processos construtivos no Brasil são agravantes para o surgimento de patologias em todas as etapas de construção, seja na má concepção de projetos, ignorando fatores importantes para determinada finalidades, ou na má execução, com materiais e métodos construtivos que aparentemente são efetivos e econômicos, mas que tornam a estrutura ineficiente precocemente.

As estruturas antigas eram superdimensionadas, possuíam grandes sessões e as cargas que resistiam eram bem menores que suas capacidades, proporcionando uma maior longevidade e segurança. Já as estruturas atuais são cada vez mais otimizadas, com sessões cada vez menores e materiais mais especializados. Desta forma, erros cometidos em qualquer das fases do planejamento a execução, redundam em sérios problemas para as estruturas atuais. Na prática construtiva das obras antigas erros dessa natureza eram bem menos significantes, pois as estruturas possuíam uma capacidade maior de contornar tais desvios. As estruturas atuais necessitam de uma atenção maior, pois são otimizadas desde a fase de projeto, e qualquer mudança decorrente de má interpretações ou irresponsabilidade na execução podem ter graves consequências sobre a vida útil da edificação.

Com esta problemática, a durabilidade das estruturas deve ser fator principal na concepção e execução de qualquer projeto da engenharia civil, e para isto, é necessário o conhecimento das patologias das construções, que de acordo com Helene (1988) “Patologia pode ser entendida como a parte da engenharia que estuda os sintomas, o mecanismo, as causas e as origens dos defeitos das construções civis”.

O estudo integrado de novos materiais sob os pontos de vista da compatibilidade físico-químicos merece atenção especial no planejamento da obra. A primeira preocupação deve ser com a estabilidade da estrutura, levando em conta não só a sua fase inicial, mas todos os impactos que seus componentes possam vir a sofrer no decorrer do tempo. Um desses materiais são os aços utilizados na confecção de concreto armado.

## **2 JUSTIFICATIVA**

À problemática da corrosão de armaduras no concreto armado é comum na engenharia civil, e muitas vezes, as razões do processo não são fáceis de perceber. Casos de elementos estruturais construídos de forma semelhante podem obter diferentes resultados. De acordo com Helene (1986), “A justificativa mais cômoda, em geral, é atribuir o fato a falta de cobrimento adequado de concreto, tomando-se como referência as recomendações de normas regulamentos oficiais.” Entre outras, às recomendações da norma NBR 6118( ABNT, 2014) são para casos gerais, e não devem ser tomadas como únicas.

Mesmo com o cobrimento indicado pelas regulamentações, o aço não está isento da possibilidade de oxidação, podendo haver a corrosão da armadura coberta pelo concreto. De acordo com Cánovas (1988), “A corrosão dos aços no concreto armado tem dois inconvenientes importantes: Produzir desagregações no concreto e diminuir a seção resistente das barras”. É importante a identificação prévia de um potencial risco de corrosão, pois os valores econômicos necessários para o tratamento do problema podem ser bastante reduzidos.

A corrosão em armaduras cobertas pode ocorrer sob o aspecto químico e eletroquímico. De acordo com Cánovas (1988), “A corrosão eletroquímica costuma ser a principal causa de deterioração nas armaduras do concreto armado e protendido.” O processo de corrosão eletroquímica do aço em concretos armados pode ocorrer mesmo com o aço coberto de uma espessura conforme ditado pelas regulamentações.

De acordo com Associação Americana de testes e Materiais (ASTM C 876-91,1999), É possível identificar a existência de corrosão em determinada armadura coberta, observando a existência de diferenças entre os potenciais eletroquímicos de pontos distintos de uma estrutura, sem que haja a necessidade de remoção do cobrimento. Para isso, é necessária a utilização de um eletrodo de referência externo, denominado de semipilha.

## **3 OBJETIVOS**

### **3.1 Objetivo Geral**

Utilização da semipilha Cobre Sulfato de Cobre, para avaliação de potenciais eletroquímicos de corrosão em estruturas de concreto armado.

Com o auxílio da semipilha de eletrodo cobre sulfato de cobre, é possível fazer um mapeamento do possível nível de corrosão de aços cobertos nas estruturas de concreto armado. O objetivo principal desse trabalho é avaliar através dessa técnica, possibilidades de existir corrosão nos pontos sondados. Para isso, foi solicitado A Prefeitura do Campus 1 da

Universidade Federal da Paraíba, a permissão de usar as estruturas do restaurante universitário como laboratório, para a implementação desses estudos.

### **3.2 Objetivos Específicos**

- Apresentar as vantagens da utilização de semipilhas para identificação de áreas possivelmente afetada pela corrosão nas armaduras.
- Mapeamento gráfico da corrosão em pilares;
- Evidenciar possíveis causas da corrosão em aços cobertos;

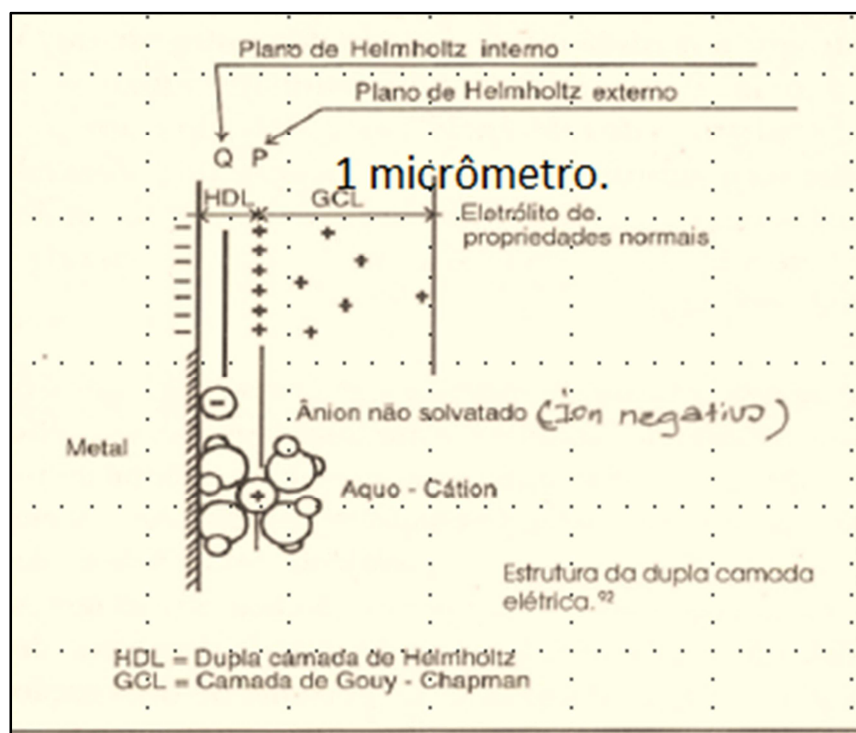
## **4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **4.1 Corrosão eletroquímica**

#### **4.1.1 Eletrodo**

Eletrodo é definido quando, ao mergulhar um metal numa solução aquosa, observa-se uma situação de equilíbrio ou estado estacionário, caracterizado pela formação da dupla camada elétrica (CASCUDO, 1997).

Figura 1 - Estrutura da dupla camada elétrica



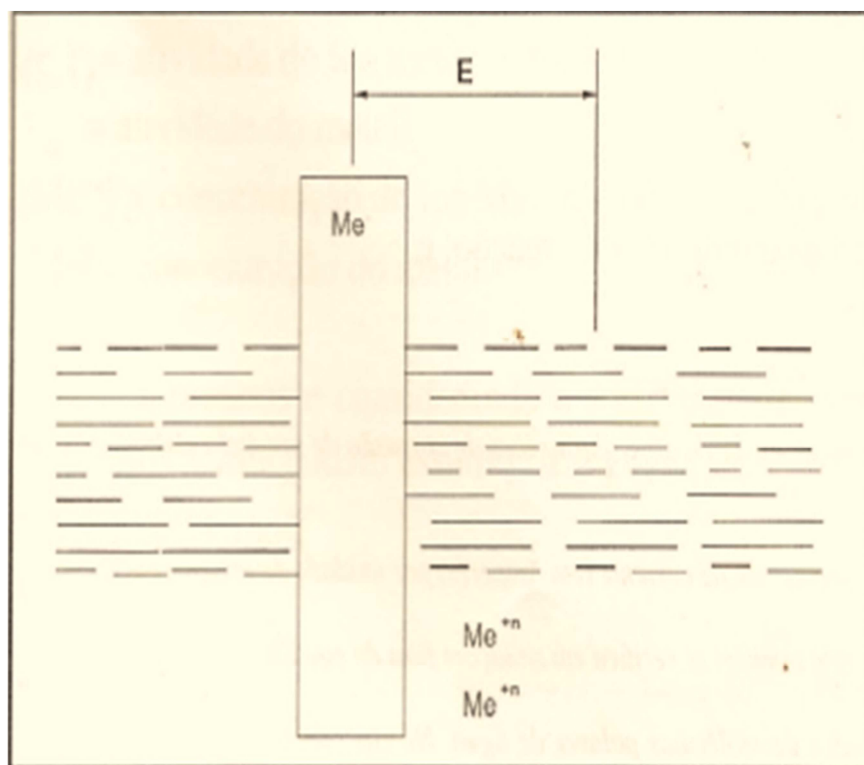
Fonte: Cascudo, 1997, pg 21.

A dupla camada elétrica está esquematizada na figura 1, que de acordo com cascudo (1997), é a mais aceita como representação. Nela observamos que o metal, ao ser introduzido a um meio aquoso, ele gera a camada HDL (Dupla camada de helmholtz) que se assemelha a um capacitor elétrico, com duas camadas paralelas de cargas opostas, e gera a camada GCL (Camada de Gouy – Chapman), camada difusa na qual os íons se espalham por uma distância de aproximadamente um micrômetro.

#### 4.1.2 Potencial de eletrodo

Como observamos na alínea 4.2.5, eletrodo é todo metal que forma dupla camada elétrica, semelhante a um capacitor. E assim como um capacitor, é gerada uma distribuição de cargas elétricas, formando uma diferença de potencial (ddp) entre o a solução e o metal, que é conhecida como potencial de eletrodo – E (Figura 2), que de acordo com cascudo (1997), “Sua magnitude é dependente do sistema (eletrodo/eletrólito) em consideração.”

Figura 2 - Semipilha (metal em meio aquoso contendo íons do próprio metal) mostrando o potencial do eletrodo – E



Fonte: Cascudo (1997, pg 21).

[...] A medida direta de um ddp entre um dado metal e uma solução qualquer, é inviável na prática. Sendo assim, introduzir-se-á o conceito de “eletrodo de referência”; este eletrodo é um instrumento que se destina auxiliar na determinação ou quantificação do potencial do eletrodo. Tendo sido feitas estas considerações, pode-se definir o potencial de eletrodo como sendo qualquer potencial de um dado sistema, medido em relação a um determinado eletrodo de referência.(CASCUDO, 1997)

Para que seja analisada a diferença de potencial de um dado eletrodo, é necessária a existência de um eletrodo de referência (que será tratado na alínea 4.2.7), pois para que ocorra oxirredução (formação de pilha) de tal forma que possamos medir na prática seus resultados, é necessário que existam o eletrodo que irá reduzir, e um que oxidará. Caso um dos dois não exista, não haverá uma reação calculável. Portanto, potencial de eletrodo pode ser definido como qualquer potencial gerado a partir de uma oxidação ou redução medido a partir de um eletrodo de referência.

Quando o eletrodo está em equilíbrio, ocorrem simultaneamente e com mesma intensidade uma dissolução anódica (átomos do metal desprendendo, ionizando e hidratando)

e uma deposição catódica (cátions aderindo ao metal), gerando a dupla camada elétrica. Desta forma a concentração de Aquo-íons (Íons acompanhados de moléculas polares de água) mantém-se constante no equilíbrio, obedecendo à equação 4.1 (CASCUDO, 1997).



Onde: Me= Metal

Z=Número de elétrons envolvidos na reação

e= elétron

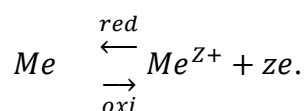
No balanço final, não ocorrerá nem redução nem corrosão no metal em equilíbrio, e o mesmo terá um potencial de eletrodo que reflete uma situação estacionária, que não gera corrosão. Este potencial é denominado Potencial de equilíbrio (Ee) (CASCUDO, 1997).

Para obter valores de potenciais, podemos utilizar a Equação de Nernst (4.2) que afirma que o potencial é função das concentrações dos reagentes e produtos da reação eletroquímica, demonstrado na equação 4.1. Em outras palavras, o potencial é função da pureza do metal e da concentração de íon no meio aquoso:

Equação de Nernst

$$E = E^o + \frac{RT}{zF} \cdot \ln \frac{[Me^{Z+}]}{[Me]} \quad (4.2)$$

Para,



Onde:

E= Potencial do eletrodo em equilíbrio (V);

$E^o$ = Potencial do eletrodo de equilíbrio padrão (V);

R=Constante universal dos gases (J/k.mol);

T=Temperatura absoluta(K);

$Me^{Z+}$ =Concentração do íon  $Me^{Z+}$  na solução, em molaridade;

$Me$ =concentração do metal.

Z=Número de elétrons envolvidos no processo eletroquímico; e

F=Constante de faraday (C).

Levando em consideração o metal puro e a solução diluída, e os seguintes valores adotados:

$$R=8,314 \text{ J/k.mol}$$

$$F=96494 \text{ C}$$

$$Me=1$$

$$T=25^{\circ}\text{C}(298,15 \text{ K})$$

E convertendo o logaritmo neperiano para logaritmo na base 10, teremos a equação (4.3) de Nernst será:

$$E = E^o + \frac{0,0592}{z} \cdot \log[Me^{z+}] \quad (4.3)$$

A equação de Nernst então possibilita o cálculo de qualquer potencial de equilíbrio (em condições não padronizadas), desde que sejam conhecidos os potenciais de eletrodo padrão ( $E^o$ ). (CASCUDO, 1997)

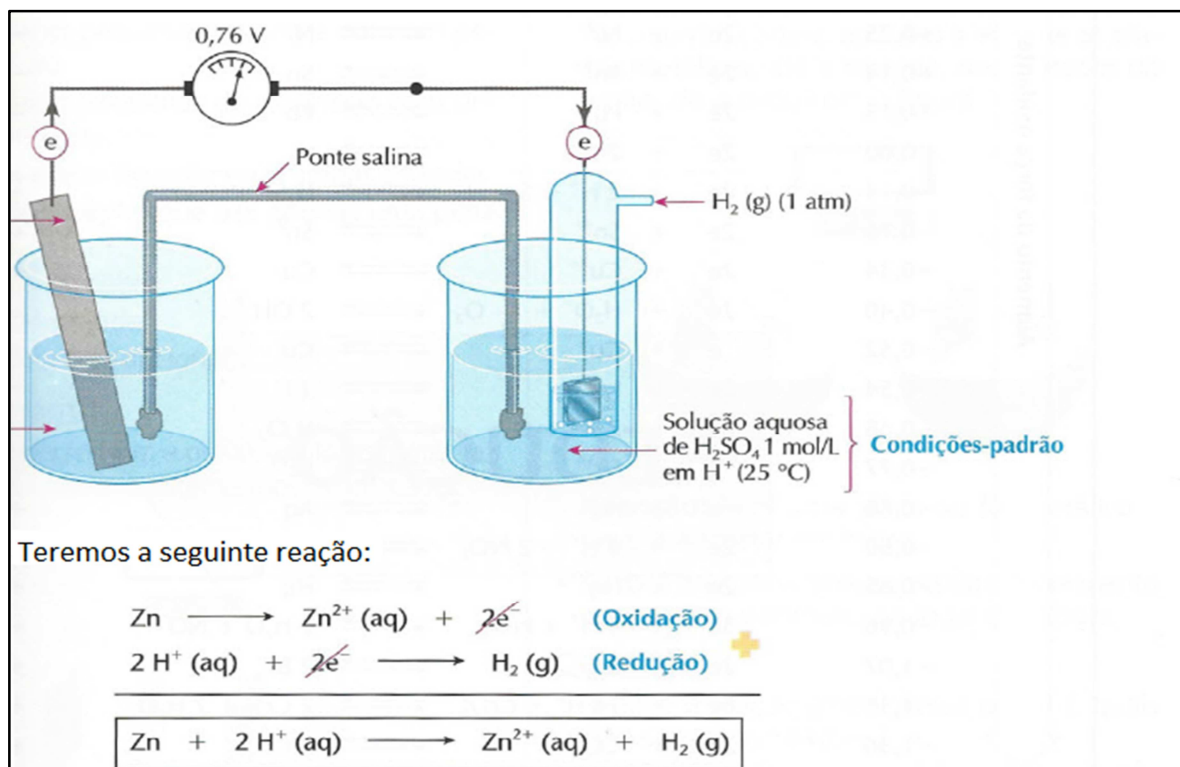
Os potenciais de eletrodos padrões serão tabelados mediante série eletroquímica (Figura 4), e são obtidos sob condições padronizadas, utilizando como referência a semipilha  $2H^+/H_2$ ,

[...] constituída por uma lâmina inerte de platina platinizada, que está submersa em uma solução ácida padrão (ácido clorídrico 1,2 M, para a qual a atividade do íon  $H^+$  é unitária,  $a_H^+=1$ ), mantida a  $25^{\circ}\text{C}$ , através da qual, se borbulha hidrogênio purificado a 1 atm de pressão (nestas condições tem-se o equilíbrio da reação  $2H^+ + 2e \leftrightarrow H_2 (g)$ ). (CASCUDO, 1997)

O potencial da semipilha  $2H^+/H_2$  é arbitrado como centro da escala de potenciais, e seu valor foi arbitrado o valor zero, sendo conhecido como *eletrodo de referência padrão de hidrogênio*. A partir deste, todos os outros potenciais padrões de eletrodos podem ser obtidos ao ligar ele ao eletrodo normal de hidrogênio, formando uma pilha, onde o metal é colocado em uma solução de seus íons, de atividade um (1M). (CASCUDO, 1997)

A figura 3 representa o esquema da obtenção do potencial padrão de zinco. Onde é ligado a semipilha de zinco ( $Zn/Zn^{2+}$ ) à semipilha do hidrogênio ( $2H^+/H_2$ ).

Figura 3 - Esquema de obtenção do potencial de eletrodo padrão do zinco.



Fonte: Moura (2016, slide 142).

Em suma, potencial de eletrodo é qualquer diferença de potencial entre o metal e uma determinada solução, através da dupla camada elétrica. Quando o sistema está em equilíbrio, podemos chama-lo de potencial de equilíbrio e quando existe uma padronização das condições para obtenção do potencial de equilíbrio, é denominado potencial de eletrodo padrão.

Na figura 4, temos a série eletroquímica com os valores de potencial padrão de oxirredução para 25°C e 1 atm.

Figura 4 - Valores de potenciais padrões de oxirredução para 25 °C e 1 ATM

| Potencial de oxidação em volts (V) | POTENCIAIS-PADRÃO DE ELETRODO                                   |  |  | Potencial de redução (E°) em volts (V) |
|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--|--|----------------------------------------|
| +3,04                              | $e^- + Li^+ \rightleftharpoons Li$                              |  |  | -3,04                                  |
| +2,92                              | $e^- + K^+ \rightleftharpoons K$                                |  |  | -2,92                                  |
| +2,90                              | $2e^- + Ba^{2+} \rightleftharpoons Ba$                          |  |  | -2,90                                  |
| +2,87                              | $2e^- + Ca^{2+} \rightleftharpoons Ca$                          |  |  | -2,87                                  |
| +2,71                              | $e^- + Na^+ \rightleftharpoons Na$                              |  |  | -2,71                                  |
| +2,36                              | $2e^- + Mg^{2+} \rightleftharpoons Mg$                          |  |  | -2,36                                  |
| +1,66                              | $3e^- + Al^{3+} \rightleftharpoons Al$                          |  |  | -1,66                                  |
| +1,18                              | $2e^- + Mn^{2+} \rightleftharpoons Mn$                          |  |  | -1,18                                  |
| +0,76                              | $2e^- + Zn^{2+} \rightleftharpoons Zn$                          |  |  | -0,76                                  |
| +0,74                              | $3e^- + Cr^{3+} \rightleftharpoons Cr$                          |  |  | -0,74                                  |
| +0,48                              | $2e^- + S \rightleftharpoons S^{2-}$                            |  |  | -0,48                                  |
| +0,44                              | $2e^- + Fe^{2+} \rightleftharpoons Fe$                          |  |  | -0,44                                  |
| +0,41                              | $e^- + Cr^{3+} \rightleftharpoons Cr^{2+}$                      |  |  | -0,41                                  |
| +0,28                              | $2e^- + Co^{2+} \rightleftharpoons Co$                          |  |  | -0,28                                  |
| +0,25                              | $2e^- + Ni^{2+} \rightleftharpoons Ni$                          |  |  | -0,25                                  |
| +0,14                              | $2e^- + Sn^{2+} \rightleftharpoons Sn$                          |  |  | -0,14                                  |
| +0,13                              | $2e^- + Pb^{2+} \rightleftharpoons Pb$                          |  |  | -0,13                                  |
| 0,00                               | $2e^- + 2H^+ \rightleftharpoons H_2$                            |  |  | 0,00                                   |
| -0,14                              | $2e^- + 2H^+ + S \rightleftharpoons H_2S$                       |  |  | +0,14                                  |
| -0,15                              | $2e^- + Sn^{4+} \rightleftharpoons Sn^{2+}$                     |  |  | +0,15                                  |
| -0,34                              | $2e^- + Cu^{2+} \rightleftharpoons Cu$                          |  |  | +0,34                                  |
| -0,40                              | $2e^- + H_3O^+ + \frac{1}{2} O_2 \rightleftharpoons 2OH^-$      |  |  | +0,40                                  |
| -0,52                              | $e^- + Cu^+ \rightleftharpoons Cu$                              |  |  | +0,52                                  |
| -0,54                              | $2e^- + I_2 \rightleftharpoons 2I^-$                            |  |  | +0,54                                  |
| -0,68                              | $2e^- + 2H^+ + O_2 \rightleftharpoons H_2O_2$                   |  |  | +0,68                                  |
| -0,77                              | $e^- + Fe^{3+} \rightleftharpoons Fe^{2+}$                      |  |  | +0,77                                  |
| -0,80                              | $e^- + Ag^+ \rightleftharpoons Ag$                              |  |  | +0,80                                  |
| -0,80                              | $2e^- + 4H^+ + 2NO_3^- \rightleftharpoons 2H_2O + 2NO_2$        |  |  | +0,80                                  |
| -0,85                              | $2e^- + Hg^{2+} \rightleftharpoons Hg$                          |  |  | +0,85                                  |
| -0,96                              | $3e^- + 4H^+ + NO_3^- \rightleftharpoons 2H_2O + NO$            |  |  | +0,96                                  |
| -1,07                              | $2e^- + Br_2 \rightleftharpoons 2Br^-$                          |  |  | +1,07                                  |
| -1,33                              | $6e^- + 14H^+ + CrO_4^{2-} \rightleftharpoons 2Cr^{3+} + 7H_2O$ |  |  | +1,33                                  |
| -1,36                              | $2e^- + Cl_2 \rightleftharpoons 2Cl^-$                          |  |  | +1,36                                  |
| -1,50                              | $3e^- + Au^{3+} \rightleftharpoons Au$                          |  |  | +1,50                                  |
| -1,51                              | $5e^- + 8H^+ + MnO_4^- \rightleftharpoons Mn^{2+} + 4H_2O$      |  |  | +1,51                                  |
| -1,78                              | $2e^- + 2H^+ + H_2O_2 \rightleftharpoons 2H_2O$                 |  |  | +1,78                                  |
| -2,87                              | $2e^- + F_2 \rightleftharpoons 2F^-$                            |  |  | +2,87                                  |

Fonte: Feltre (2005, pg 432).

#### 4.1.3 Eletrodo de referencia

No item 4.1.2, foi visto que o cálculo do valor absoluto de uma ddp de um eletrodo isolado é inviável, pois segundo Cascudo (1997), “qualquer que seja o sistema adotado, este implicará na imersão dentro da solução de um terminal metálico que irá dar origem a outro eletrodo”. Este novo sistema gerará uma nova ddp e interface, consequentemente não teremos mais um eletrodo, mas uma célula eletroquímica. Teremos então uma ddp relativa, com relação a um eletrodo de referência.

Como visto na alínea anterior, foi utilizado como padrão o eletrodo de hidrogênio inicialmente, mas, por razões práticas, hoje, raramente é utilizado. São utilizados então outros eletrodos de referência. Neste trabalho, será utilizado o eletrodo de cobre sulfato de cobre (ESC).

Eletrodo de cobre sulfato de cobre (ESC): Consiste de uma haste de cobre imersa numa solução saturada de sulfato de cobre ( $\text{CuSO}_4$ ). Seu potencial (potencial de redução) com relação ao eletrodo padrão de hidrogênio é igual a +0,316 V a 25°C.(CASCUDO, 1997)

A reação de equilíbrio do eletrodo de cobre sulfato de cobre é:



Sempre que for descrever a medida de um potencial de eletrodo, deve-se indicar a qual o eletrodo foi usado como referência, expressando o valor seguido da sigla do eletrodo referenciado. Exemplo: -150 mV (ESC) (CASCUDO, 1997).

#### 4.1.4 Pilha eletroquímica

Uma pilha eletroquímica é formada por:

Ânodo: Componente que sofre a corrosão. É por onde a corrente elétrica entra no eletrólito.

Cátodo: É quem sofre redução provocada pelos elétrons saídos do eletrodo.

Eletrólito: Condutor que contém Íons. Leva a corrente do ânodo para o cátodo.

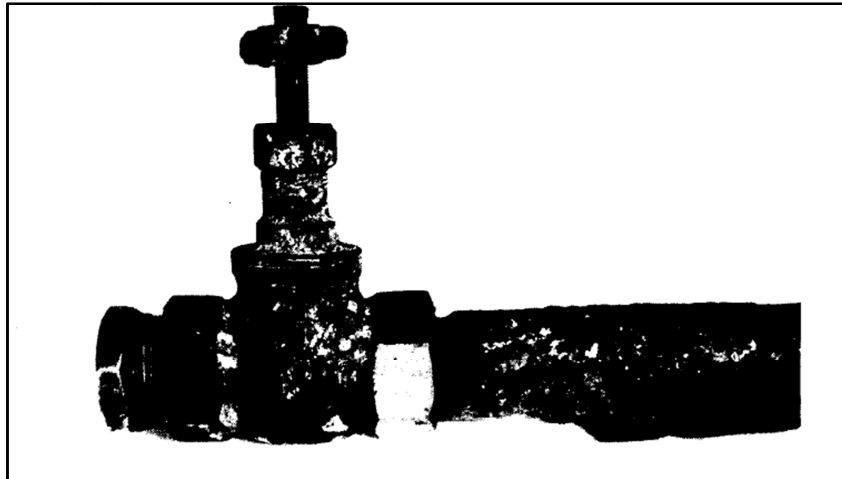
Circuito metálico: Ligação metálica entre cátodo e ânodo. É onde passam os elétrons do ânodo para o cátodo.

Qualquer um destes elementos que for retirado elimina a pilha e diminui a possibilidade de ocorrer a corrosão. O sentido correto dos elétrons é do ânodo para o cátodo, porém, convencionou-se que a corrente elétrica é do cátodo para o ânodo (POLITO, 2006, pg 40).

#### 4.1.4.1 Pilha de eletrodos metálicos diferentes

Ocorre Quando dois metais, ou ligas diferentes estão imersos em contato com o mesmo eletrólito. Também pode ser chamada de Pilha galvânica. (GENTIL, 1996)

Figura 5 - Pilha galvânica.



Fonte: Gentil (1996, pg 29).

Neste exemplo, o ferro e o latão (Liga de cobre e zinco) se encontram em contato, envolvidos do mesmo eletrólito. O ferro possui potencial de redução menor que o latão, perdendo elétrons com maior facilidade e consequentemente age como ânodo.

#### 4.1.4.2 Pilha ativa-passiva

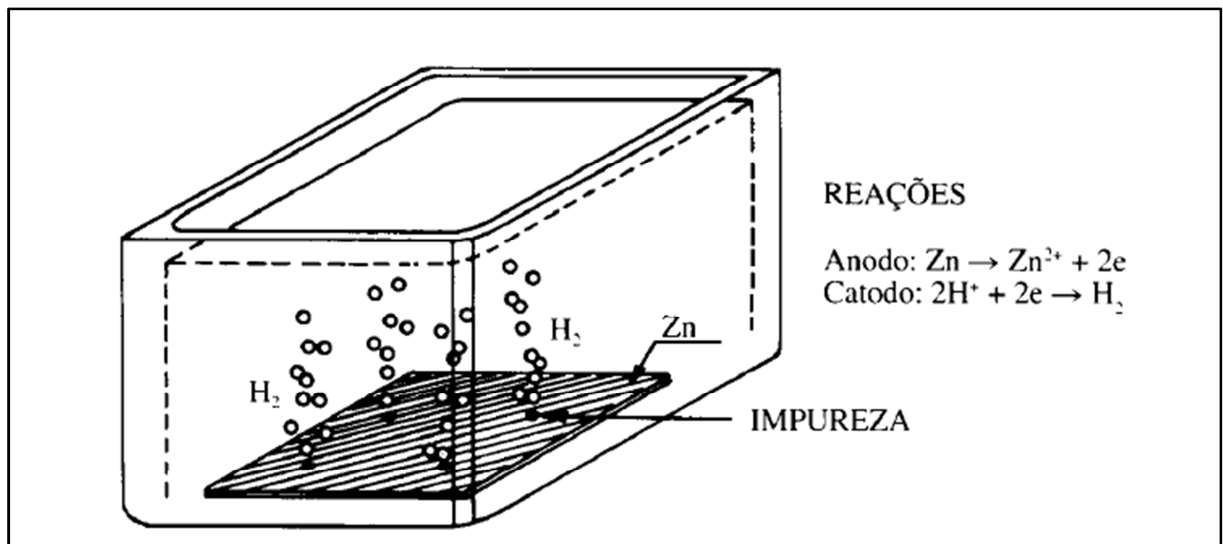
Alguns metais tendem a criar uma película fina e aderente de óxidos e outros componentes insolúveis em sua superfície. Essa camada gera uma passivação do metal, fazendo com que ele se comporte como áreas catódicas, protegendo o mesmo da oxidação. (Gentil, 1996)

A pilha ativa-Passiva se dá quando por ataques de Íons cloretos, que penetram através de poros e falhas na rede cristalina da película passivadora. Com a degradação da película, a área atingida do metal fica suscetível à corrosão, novamente se comportando como uma área anódica. A corrosão se dá por pites. (Gentil, 1996)

#### 4.1.4.3 Pilha de ação local

Ocorrem devido pequenas áreas catódicas e anódicas presentes no metal. Pode acontecer devido a impurezas do metal, Onde a diferença de potencial em pequenas áreas na presença de um eletrólito acarreta na formação de várias pequenas pilhas. (Gentil, 1996)

Figura 6 - Pilha de ação local em uma chapa de Zinco.



Fonte: Gentil (1996, pg 32).

#### 4.1.4.4 Pilha de concentração iônica

Pilhas compostas de materiais metálicos de mesma natureza mas com concentrações iônicas diferentes. (Gentil, 1996)

Utilizando a equação de Nernst (4.3) para o mesmo metal em concentrações diferentes, teremos dois resultados distintos, pois a equação está diretamente ligada ao valor da concentração do seu Íon. A diferença de potencial entre os dois é dada pela equação 4.5

$$E1 = E^o + \frac{0,0592}{z} \cdot \log[Me^{z+1}]$$

$$E2 = E^o + \frac{0,0592}{z} \cdot \log[Me^{z+2}]$$

$$E1 - E2 = \frac{0,0592}{z} \cdot \log\left[\frac{Me^{z+1}}{Me^{z+2}}\right]$$

$$E_{pilha} = \frac{0,0592}{z} \cdot \log\left[\frac{Me^{z+1}}{Me^{z+2}}\right] \quad (4.5)$$

Esta diferença de potencial gerará uma pilha de concentração. Também podemos observar que o eletrodo que estiver com menor concentração (mais diluído) de Íons será o ânodo. (Gentil, 1996)

#### 4.1.4.5 *Pilha de aeração diferencial*

Ocorre quando um mesmo metal ou liga metálica se encontram em regiões com diferentes concentrações de gases dissolvidos. Também é conhecida como oxigenação diferencial e seu potencial é dado pela fórmula 4.6. (Gentil, 1996)

$$E_{pilha} = \frac{0,0592}{z} \cdot \log\left[\frac{Po2(1)}{Po2(2)}\right] \quad (4.6)$$

Onde: Po2= pressão parcial do gás.

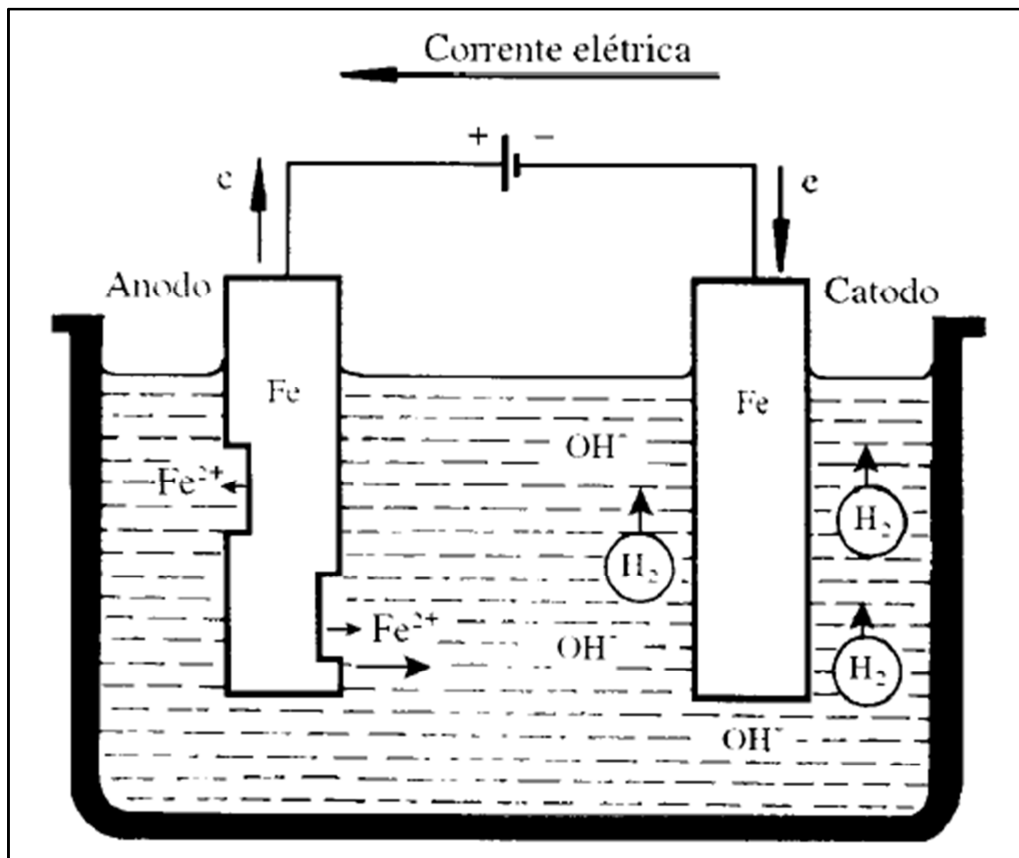
#### 4.1.4.6 *Pilha de temperaturas diferentes*

Ocorre quando um mesmo metal é exposto a diferentes temperaturas, também chamada de pilha termo galvânica. A identificação de cátodo e ânodo pode ser diferente dependendo do tipo de metal e condições, pois o aumento de temperatura aumenta a velocidade de reações, porém, também pode diminuir a quantidade de gases dissolvidos ou eliminar camadas de passivação (Gentil, 1996)

#### 4.1.4.7 *Pilha eletrolítica*

Pilha proveniente de uma diferencia de potencial gerado por uma força externa. Os eletrodos não possuem obrigatoriamente a mesma natureza química. Nela uma corrente elétrica gera uma diferença de potencial entre dois metais de mesma natureza

Figura 7 - Exemplo de pilha eletrolítica.



Fonte: Gentil (1996, pg 36)

#### 4.1.5 Polarização do eletrodo

Todo metal, nas condições de equilíbrio, possui um potencial calculado pela equação de Nernst. Caso um processo qualquer altere esse potencial, este eletrodo sofrerá Polarização.

Todo metal imerso em uma solução contendo seus próprios Íons, na ausência de reações que interfiram, possui um potencial  $E$  dado pela equação de Nernst. Se uma corrente circular por esse eletrodo, o potencial variará, e o novo valor de potencial  $E'$  dependerá da corrente aplicada. A diferença entre os dois potenciais é conhecida como sobrepotencial. (GENTIL, 1996, pg 103)

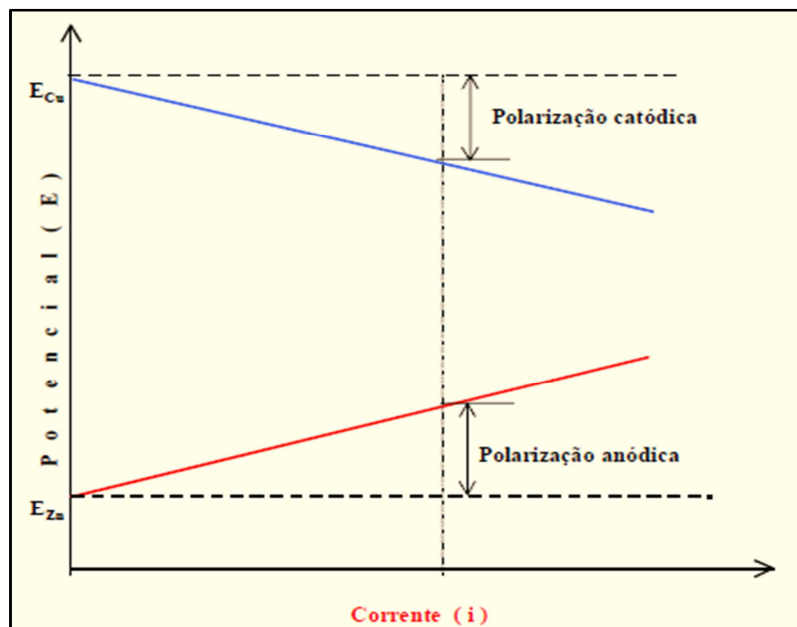
A medida da polarização é dada pela sobretensão ou sobrepotencial ( $\eta$ ), e pode ser encontrada pela diferença entre do potencial oriundo da polarização  $E$  e o potencial de equilíbrio  $E_e$ , dada pela equação 4.5 (Cascudo, 1997).

$$\eta = E - E_e \quad (4.5)$$

A partir do sinal da sobretensão, podemos caracterizar se ocorre uma polarização anódica ou catódica. Sendo sinal negativo para polarização catódica e positivo para anódica.

Quando uma amostra metálica está em processo de corrosão eletroquímica, ela assume um potencial onde a taxa de oxidação no ânodo é igual à taxa de redução do cátodo, onde todos os elétrons liberados nas reações anódicas de oxidação são consumidos pelas reações catódicas de redução, caracterizando uma pilha eletroquímica de corrosão. (Cascudo, 1997). Segundo Cascudo (1997), esse potencial está em “equilíbrio” dinâmico com o meio (embora a corrosão se processe indefinitivamente) e é conhecido por potencial de corrosão ( $E_{\text{corr}}$ ).

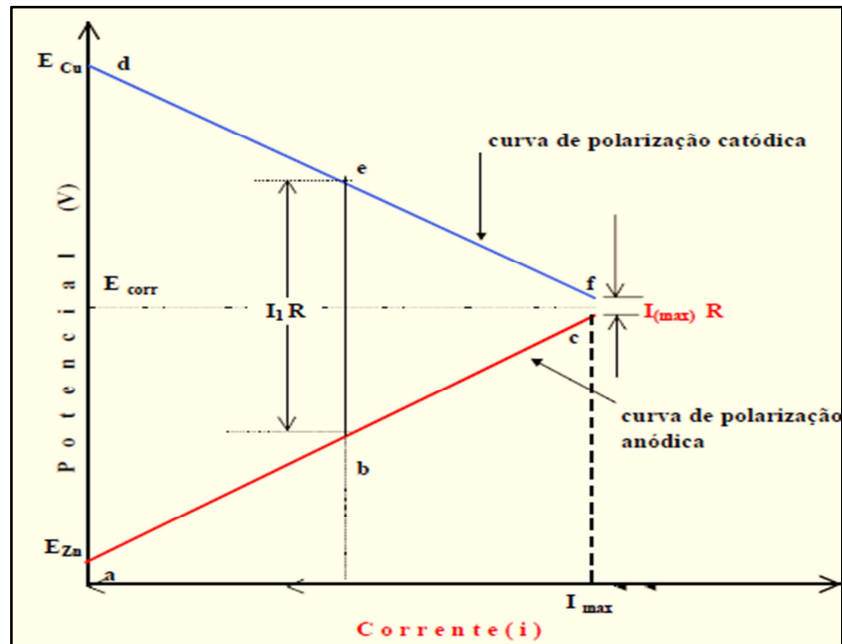
Figura 8 - Representação da polarização de dois metais (Zn e Cu) pela passagem da corrente  $I$ .



Fonte: Moura (2016, slide 141).

Um exemplo de polarização é dado pela figura 5, onde vemos uma pilha composta por Cobre e Zinco. Quando os eletrodos são ligados, a corrente flui, fazendo com que o zinco torne-se mais catódico e o Cobre mais anódico, com a diferença dos dois sempre diminuindo.

Figura 9 - Diagrama de polarização de uma pilha de zinco e cobre.

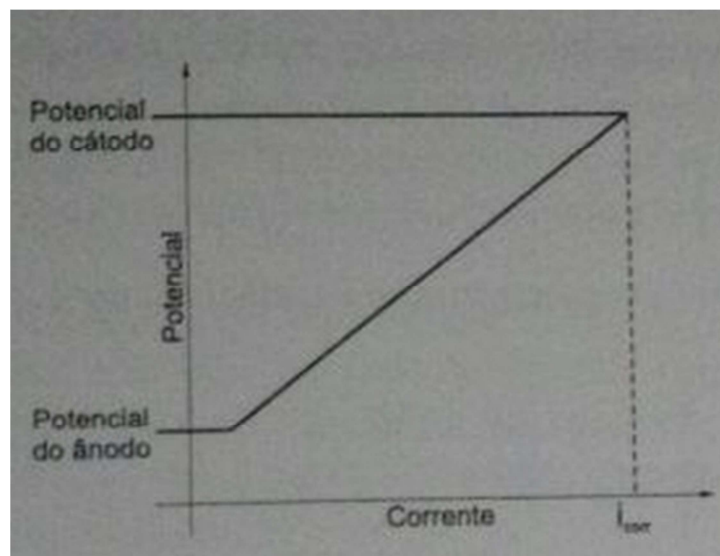


Fonte: MOURA (2016, slide 142).

Na figura 6, vemos que os potenciais do cobre e zinco convergem para um potencial de corrosão, onde as reações catódicas se igualam as reações anódicas.

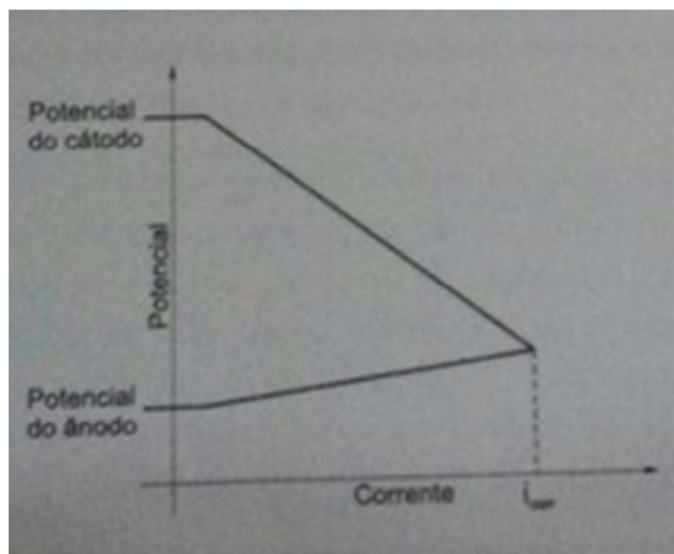
A partir da velocidade das reações no cátodo e ânodo, podemos identificar se a reação é ditada catodicamente ou anodicamente, como se observa nas figuras 7 e 8.

Figura 10 - Potencial versus corrente exemplificando o controle anódico da corrosão.



Fonte: CASCUDO (1997, pg. 31).

Figura 11 - Potencial versus corrente exemplificando o controle catódico da corrosão.



Fonte: CASCUDO (1997, pg. 31).

Podemos classificar a polarização em três categorias: Polarização por concentração ( $\eta_c$ ), Polarização por ativação ( $\eta_a$ ) e polarização de resistência ( $\eta_r$ ).

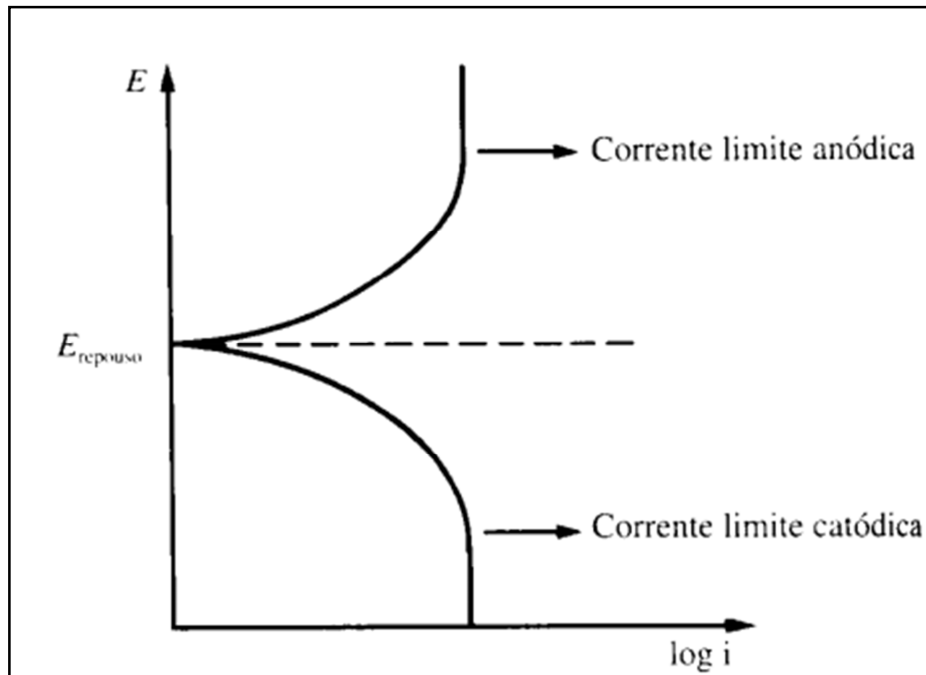
#### 4.1.5.1 Polarização por concentração

A polarização por concentração se dá quando existe uma variação da concentração da espécie eletroquímica ativa, produzida ou consumida face à passagem de corrente elétrica. (CASCUDO, 1997).

De modo geral, o afastamento do estado de repouso gera uma corrente que, por sua vez, exige maior transporte de massa na interface do metal. Esse processo é limitado, e rapidamente chega-se à condição onde não será mais possível aumentar a chegada ou saída de íons na interface metal-solução. Nesse caso, o potencial continuará aumentando sem haver, entretanto, acréscimo na corrente. (GENTIL, 1996, pag. 106)

A capacidade de o sistema prender ou desprender íons ditará o potencial limite do sistema, onde a corrente elétrica não mais aumentará, desta forma, para dado potencial de um metal, a velocidade do processo de oxirredução será determinada pela velocidade que os íons se difundem, migram ou são transportados por outros meios, visando homogeneizar a solução. (Gentil, 1996). Na figura 12, é representado o comportamento de uma curva de polarização por concentração.

Figura 12 - Curva de polarização por concentração.



Fonte: GENTIL (1996, pg. 106).

Quando em um fenômeno de corrosão eletroquímica, se verifica essencialmente que a polarização por concentração diminui com a agitação do eletrólito, diz-se que o sistema é controlado por difusão da espécie eletroquímica. (Cascudo, 1997).

Utilizando a equação de Nernst, podemos estabelecer a sobretensão pela diferença de potencial da concentração de íons no potencial de equilíbrio ( $Mei_e^{z+}$ ) e na concentração de Íons ( $Mei_k^{z+}$ ) quando se estabelecer um novo equilíbrio com determinada corrente  $i_k$  dada pela equação 4.6. (Cascudo, 1996)

$$Ei_k - Ei_e = \frac{0,0592}{z} \cdot \log\left[\frac{Mei_k^{z+}}{Mei_e^{z+}}\right] \quad (4.6)$$

#### 4.1.5.2 Polarização por ativação

É relacionada com a energia de ativação necessária para que as reações de eletrodo ocorram a uma dada velocidade e é o resultado imediato da barreira de energia na interface (eletrólito). É associada à etapa lenta de transferência de carga eletroquímica. (Cascudo, 1997).

Segundo Gentil (1996), “Nos casos de corrosão, é utilizada uma analogia as equações de Butler-Volmer, verificada empiricamente por Tafel.”. A lei de Tafel é dada pela equação 4.7.

$$\eta = a + b \log i \quad (4.7)$$

Onde a e b são constantes de Tafel e i a densidade de corrente média.

O aumento da velocidade da corrosão pode ser feito através da retirada do hidrogênio ou adição de um agente químico que agirá como despolarizante. (Fortes, 1995).

#### 4.1.5.3 Polarização de resistência

Ocorre na presença de uma queda ôhmica (produto IR), também é chamada de polarização ôhmica. Pode ocorrer quando há a formação de películas ou precipitados sobre a superfície metálica, impedindo parcialmente a passagem de corrente. (Cascudo, 1997).

A polarização de resistência, portanto, dá-se pela “queda” de potencial devido ao produto IR, sendo este produto basicamente influenciado pela resistência de precipitados sobre a superfície do metal e/ou pela resistência elétrica do eletrólito (R). (CASCUDO, 1997).

Segundo Gentil (1996), a resistividade elétrica do eletrólito, pode ser determinada quantitativamente pela medida da condutividade (k) da solução, levando-se em conta a geometria da célula eletroquímica, pela equação 4.8 e 4.9.

$$\eta_{\Omega} = RI \quad (4.8)$$

$$R = \frac{1}{k} C \quad (4.9)$$

Onde, R é a resistência do eletrólito, k é a condutividade do eletrólito e C é a constante da célula em função de sua geometria.

De acordo com Dutra e Nunes (2011), Este fenômeno é muito importante para a proteção catódica do metal, pois as películas produzidas por certos metais diminuem o fluxo de elétrons para a interface onde se dão as reações com o meio, diminuindo a velocidade de corrosão.

#### 4.1.6 Taxa de corrosão

A taxa de corrosão ou velocidade de corrosão pode ser dada como média e instantânea, sendo ambas de grande interesse no estudo do processo corrosivo. (Gentil, 1996).

A taxa média de corrosão pode ser calculada baseada na perda de massa que determinado metal sofreu no decorrer de um tempo. As medidas utilizadas e conversões são dispostas no quadro 1.

Quadro 1 - Fatores de conversão da velocidade de corrosão

| MULTIPLIQUE                                     | POR        | PARA OBTER                            |
|-------------------------------------------------|------------|---------------------------------------|
| Miligramas por decímetro quadrado por dia (mdd) | 0,00144/d  | polegadas por ano (ipy)               |
|                                                 | 1,44/d     | milésimos de polegada por ano (mpy)   |
|                                                 | 0,00000269 | gramas por polegada quadrada por hora |
|                                                 | 36,5       | gramas por metro quadrado por ano     |
|                                                 | 0,03652/d  | milímetros por ano (mmpy)             |
| Polegadas por ano (ipy)                         | 25,4       | milímetros por ano (mmpy)             |
| Gramas por metro quadrado por dia               | 0,36525/d  | milímetros por ano (mmpy)             |

Fonte: CASCUDO (1997, pg. 35).

De acordo com Gentil (1996), o conjunto de medidas de velocidade ao longo do tempo gera o gráfico (Figura 13) a seguir, onde as curvas são caracterizadas por:

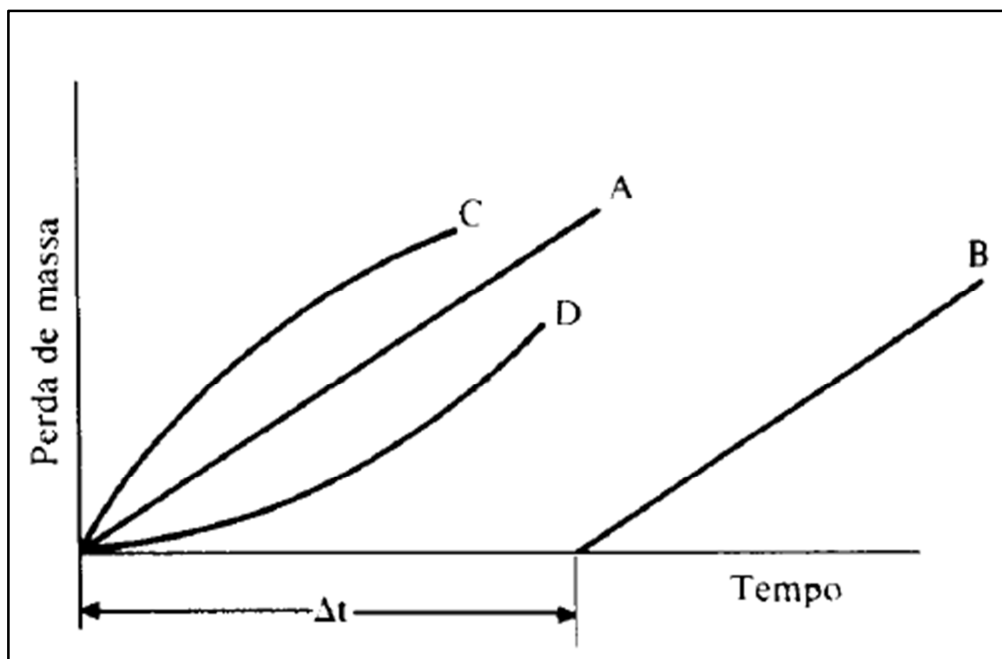
Curva A – Velocidade de corrosão eletroquímica. Ocorre quando a superfície metálica não varia, o produto da corrosão é inerte e a concentração do agente corrosivo é constante.

Curva B – Idêntica à anterior, porem, só que há um período de indução relacionado ao tempo gasto para atravessar a película protetora.

Curva C – Velocidade inversamente proporcional à quantidade do produto de corrosão produzido. Caracteriza produto de corrosão insolúvel e aderente à superfície metálica.

Curva D – Velocidade com crescimento rápido. Caracteriza produtos de corrosão solúveis. A área anódica é crescente.

Figura 13 - Curvas representativas de velocidade de corrosão.



Fonte: gentil (1996, pg. 102)

Já a velocidade de corrosão instantânea, ou seja, a velocidade em um determinado tempo  $t$  utiliza-se equação 4.10 (gentil, 1996).

$$m = \frac{Kit}{F} \quad (4.10)$$

Onde:

$m$ = Massa do metal que se dissolve

$i$ = Corrente de corrosão

$t$ = Tempo

$F$ = Faraday

$K$ = Equivalente eletroquímico do metal

## 4.2 Corrosão de armaduras em concreto

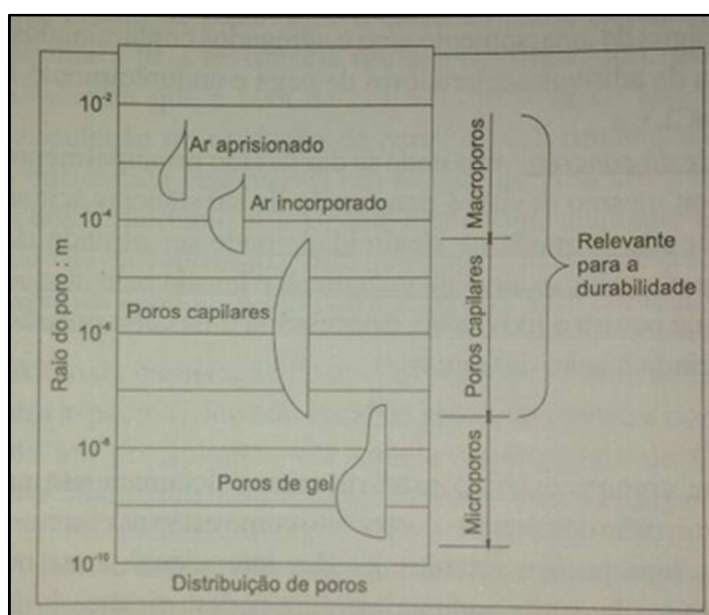
### 4.2.1 Contaminação por íons Cloretos ( $Cl^+$ )

De acordo com cascudo (1997), “nenhum outro contaminante está tão extensivamente documentado na literatura como causador de corrosão dos metais no concreto como estão os cloretos.” Sendo muitas vezes intencionalmente aplicado em massas e agregados, como também são comuns em áreas onde existem maresia e névoa marítima.

O transporte não apenas dos cloretos, mas de outras substâncias dissolvidas, de líquidos em geral e de gases no interior do concreto, é decisivamente influenciado pela estrutura porosa da pasta de cimento endurecida. Neste sentido, a interconexão dos poros, que determina a porosidade aberta e a distribuição do tamanho dos poros, constituem-se fatores de suma importância. (CASCUDO, 1996, PAG 42)

Na figura 14, temos a ilustração dos tipos de poros na pasta endurecida de cimento, sendo os mais significantes os de ar aprisionado, ar incorporado e poros capilares.

Figura 14 - Distribuição do tamanho de poros na pasta endurecida do cimento.



Fonte: CASCUDO (1996, pg. 42).

#### 4.2.1.1 *Mecanismo de transporte de cloretos.*

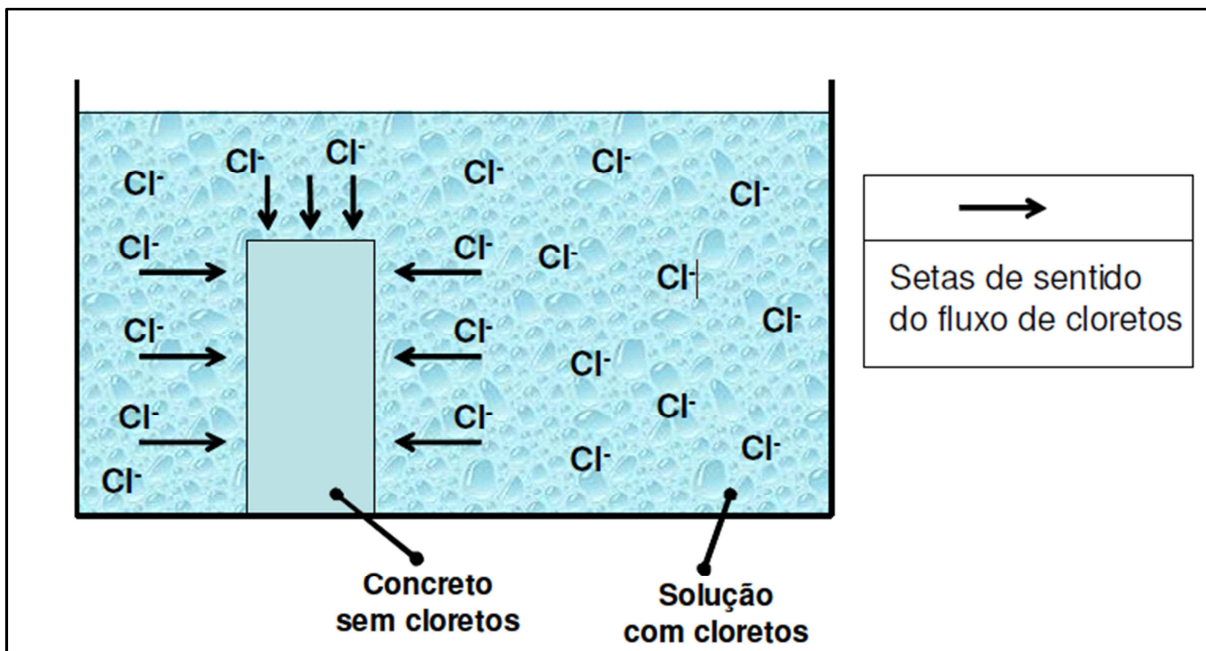
Os mecanismos de transportes que geram movimento e concentração iônica dos cloretos são: Absorção capilar, difusão iônica, permeabilidade, pressão e migração iônica. (Cascudo, 1996). De acordo com Kropp, 1995 (Citado por Medeiros, 2008), em condições não saturadas, a absorção capilar, geralmente, é o principal mecanismo de transporte, ou seja, o dominante.

A absorção de soluções ricas em íons geralmente representa o primeiro passo para a contaminação do concreto. Este fato é causado por tensões capilares imediatamente após o contato do líquido com a superfície do concreto. (POLITO, 2006, pag. 78)

Vemos então que a absorção capilar é dependente da porosidade aberta (Poros capilares), permitindo o transporte de substâncias para o interior do concreto. Geralmente é o primeiro passo para contaminação por impregnação externa de peças de concreto. De acordo com Cascudo (1996), as características do líquido afetam diretamente a absorção. Líquidos com viscosidade muito alta terão dificuldade de penetrar em pequenos poros, e líquidos com tensões superficiais muito altas penetrarão mais profundamente.

A difusão iônica ocorre devido a diferenças de gradientes de concentrações entre dois meios aquosos, podendo ser interior ou exterior ao concreto. Os íons se movem do meio de maior concentração para o menor. Cimentos Portland com relação a/c de 0,4 a 0,6 oferecem valores de coeficiente de difusão de  $0,1 \text{ cm}^2/\text{s}$  a  $0,00000001 \text{ cm}^2/\text{s}$ . (Bolina, 2008). A figura 15 retrata o esquema do processo de difusão de cloretos.

Figura 15 - Esquema do processo de difusão de cloretos.



Fonte: MEDEIROS (2008, pg. 11).

A permeabilidade é um dos principais indicadores da qualidade de um concreto e é descrita como a facilidade com que uma substância atravessa o concreto. Será tão maior quanto maior for o diâmetro dos capilares e sua intercomunicação. A permeabilidade está relacionada com o fator água/cimento. Quanto menor for este fator, menos permeável será o concreto (POLITO, 2006).

A permeabilidade está Diretamente ligada ao transporte iônico via penetração de substâncias líquidas, como já foi dito na absorção capilar, e quanto maior for os diâmetros dos poros capilares e a comunicação entre eles, maior será o impacto do processo. A relação de tamanho de poros e comunicações é fortemente influenciada pelo fator água/cimento do concreto. Quanto menor for, menor será a sua permeabilidade, pois mesmo diâmetros pequenos favorecendo a absorção capilar, uma pasta compacta diminui as comunicações, dificultando a invasão de líquidos. (Cascudo, 1997)

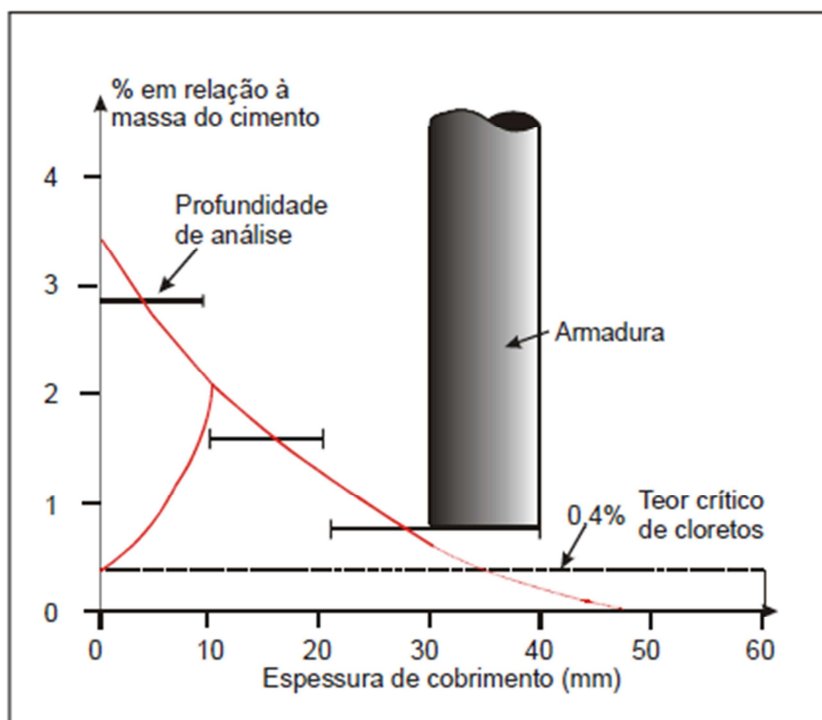
Por fim, temos a migração iônica, que ocorre na presença de campos elétricos derivados da corrente gerada no processo eletroquímico, ou campos elétricos de origem externa. Segundo Andrade (2005), A resistividade elétrica é a única forma de o concreto conduzir eletricidade, portanto, é necessário o seu conhecimento para analisar a migração iônica.

Em suma, pode-se afirmar que na grande maioria dos casos, os mecanismos de transporte dos cloretos presentes no concreto são absorção capilar e a difusão iônica. A absorção se dá numa camada superficial do concreto, geralmente onde ocorre a molhagem e secagem do cobrimento pela ação das intempéries; mais para o interior do concreto onde a presença do eletrólito é mais constante, tem-se basicamente a difusão (CASCUDO, 1997)

Vemos então que os principais mecanismos de transporte da contaminação por cloretos se dão por difusão e absorção.

A profundidade do cobrimento do concreto está diretamente ligada ao nível de contaminação por cloretos quando a contaminação se dá por impregnação de contaminantes do meio externo, representado na figura 16. Cascudo (1997) afirma que a concentração na superfície do concreto tende a ser pequena, devido à ação de águas pluviais,

Figura 16 - Contaminação de cloretos ao longo do cobrimento em um concreto contaminado por impregnação externa de soluções ricas em cloretos.



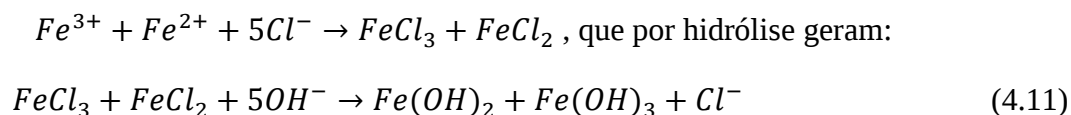
Fonte: CASCUDO (1997, pg. 45)

Segundo o ACI Comitê 222, 1991 (citado por Cabral, 2000), Existem três teorias que tentam explicar o efeito da contaminação por cloretos sobre a corrosão do aço coberto no concreto, sendo eles a teoria do filme óxido, teoria da adsorção e teoria do complexo transitório.

A teoria do filme óxido afirma que os íons cloretos conseguem com mais facilidade penetrar na camada de passivação do aço que outros agentes agressivos, por meio de poros e defeitos do filme óxido passivante. Desta forma, consegue dispersar coloidalmente este filme, facilitando a penetração de outros íons.

A teoria da adsorção afirma que os íons cloretos são adsorvidos na superfície do metal em competição com o oxigênio e íons hidroxila. Os íons de cloro promovem a hidratação do metal, facilitando a dissolução do mesmo em íons.

A teoria do complexo transitório afirma que os íons cloretos competem com os ânions hidroxila pelos íons ferrosos, produzidos pela corrosão, para a formação de compostos de corrosão solúveis, denominados complexos transitórios, que se difundem a partir das áreas anódicas e consequentemente destroem a camada de passivação do aço, permitindo a continuação do processo corrosivo de acordo com a equação simplificada 4.11.(Cabral, 2000)



Os íons cloretos quebram a passivação do aço, sendo o responsável pelo surgimento de pites (Zonas onde a película de passivação foi quebrada com pH reduzido, tornando-se uma área anódica). Eles aumentam substancialmente a condutividade elétrica do eletrólito, acelerando o processo de corrosão. É evidente a ação extremamente deletéria destes, sendo um dos principais influenciadores da corrosão no aço coberto por concreto.

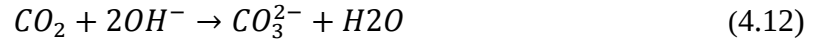
#### 4.2.2 Carbonatação

A carbonatação ocorre quando o  $CO_2$  presente na atmosfera, na presença de umidade, reage com os produtos do cimento (principalmente o  $Ca(OH)_2$ ) gerando produtos de alcalinidade menor que os compostos iniciais no concreto, desencadeando o fenômeno conhecido como “frente de carbonatação” (Barbosa; Bardella; Camarini, 2005).

Este processo é lento, e atenua-se com o tempo, devido à hidratação crescente do concreto e a presença dos próprios produtos da carbonatação ( $CaCO_3$ ), que comaltam os poros superficiais, dificultando a entrada de novas moléculas de  $CO_2$ .

O fenômeno de carbonatação pode ser descrito como um processo químico que resulta na diminuição do PH do concreto, aumentando a intensidade da corrosão do aço coberto (Cunha; Helene, 2001).

Bolina (2008), representa as reações do processo de carbonatação conforme as equações 4.12 a 4.18 a seguir.



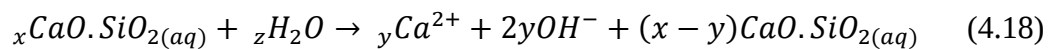
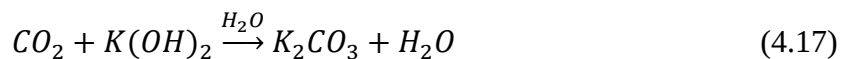
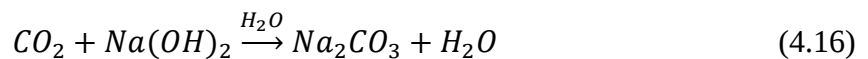
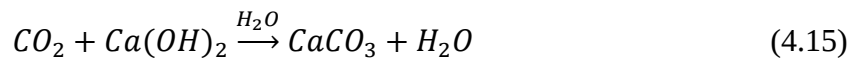
Dissolução do  $CO_2$  na solução do poro.



Dissolução do  $Ca(OH)_2$ .



Formação do carbonato de cálcio.



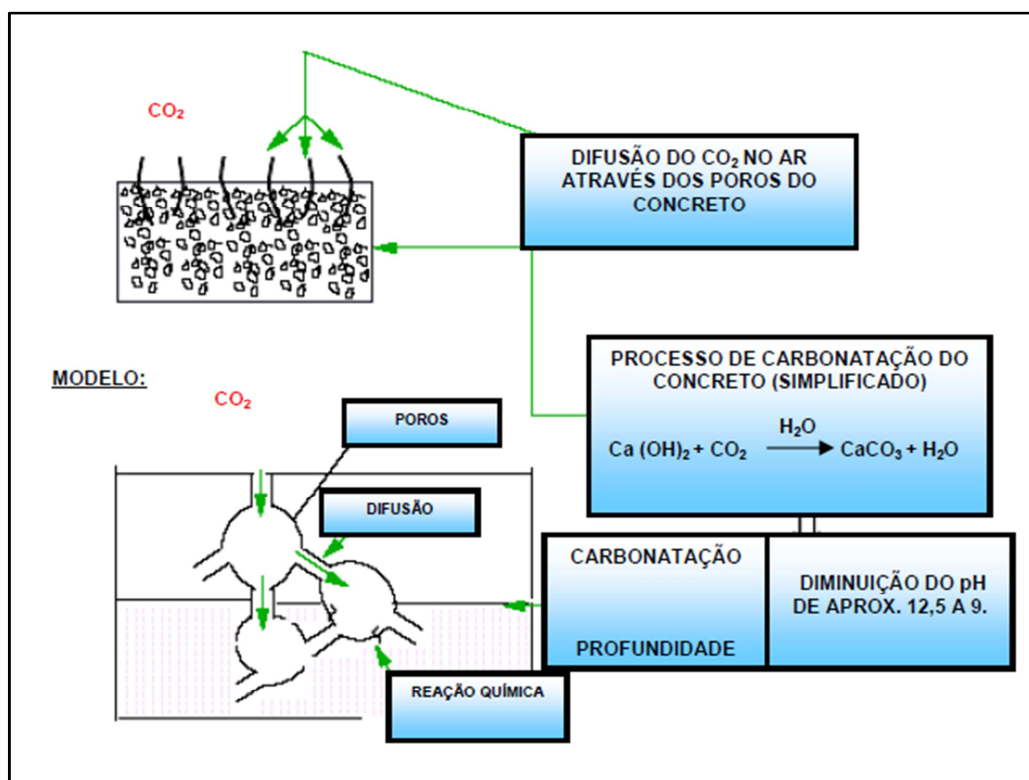
Descalcificação do C-S-H

Uma característica do processo de carbonatação é a existência de uma “frente” de avanço do processo, que separa duas zonas com pH muito diferentes; uma com pH menor que 9 (carbonatada) e outra com pH maior que 12 (não carbonatada). Ela é comumente conhecida como frente de carbonatação e deve ser mensurada com relação à espessura do concreto de cobrimento da armadura. (CASCUDO, 1997, pag. 51).

Portanto, os fatores que irão influenciar a frente de avanço da carbonatação estão intimamente ligados às propriedades do concreto.

Para entendermos melhor a carbonatação, podemos ver exemplificado na figura 18, o processo simplificado, onde o  $CO_2$ , por meio dos poros, se difundem no concreto, reagindo com o hidróxido de cálcio ( $Ca(OH)_2$ ), formando o carbonato de cálcio, conseqüentemente diminuindo o pH do sistema, causando uma aceleração da corrosão.

Figura 17 - Avanço do processo de carbonatação.



Fonte: BOLINA (2008, pg. 35).

#### 4.2.3 Propagação da corrosão

Após o concreto ser contaminado por íons cloretos, a frente de carbonatação for iniciada, e a camada de passivação do aço for comprometida, inicia-se o processo de propagação da corrosão, contanto que estejam presentes o eletrólito, a diferença de potencial e oxigênio. Agentes agressivos também podem ser responsáveis pelo aumento da condutividade elétrica do concreto, agravando ainda mais a situação (POLITO, 2006).

##### 4.2.3.1 Eletrólito

Como descrito no item 4.1.4, o eletrólito é essencial para a formação de uma pilha, consequentemente, para que ocorra a oxidação do aço coberto. A fase líquida encontrada nos poros do concreto, saturada principalmente de hidróxido de cálcio  $\text{Ca(OH)}_2$  e outros íons agressivos originários do meio externo, terá esta função, transportando os elétrons da zona anódica para a catódica. De acordo com Andrade e Alonso (1990) (Citado por Cascudo, 1997), o teor de umidade no concreto é o principal fator controlador da taxa de corrosão no

aço coberto, pois ele fixa a taxa de oxigênio ao redor da armadura e define a condutividade elétrica do concreto.

#### 4.2.3.2 *Diferença de potencial*

A diferença de potencial (ddp) é essencial para a formação de uma pilha eletroquímica, pois, como vimos anteriormente, o cátodo e o ânodo serão determinados a partir da diferença de potencial entre os dois. Vários são os fatores que geram essa diferença, muito deles já discutidos anteriormente. Mesmo não sendo o fator principal que definirá a intensidade da corrosão. A sua presença em pontos distintos da armadura no concreto é o primeiro indicador que está ocorrendo o processo.

#### 4.2.3.3 *Oxigênio*

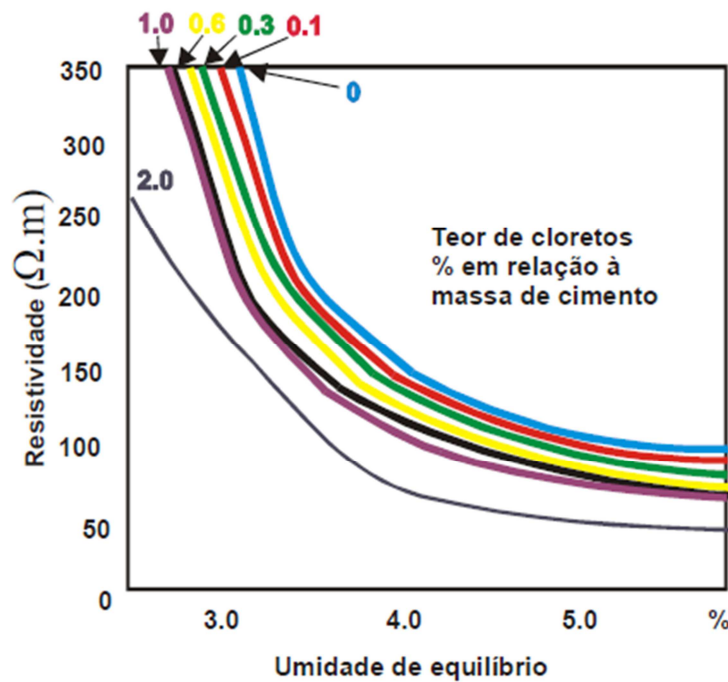
O oxigênio é necessário para que ocorra a reação catódica mais usual na corrosão, onde o oxigênio se reduz, consumindo os elétrons provenientes da zona anódica, e gerando os radicais  $OH^-$  que por sua vez, irão reagir com os íons de ferro, gerando os produtos da corrosão (ferrugem).

A disponibilidade do oxigênio é fator limitando na intensidade da corrosão, sendo este diretamente ligado ao fator de umidade do concreto. O oxigênio precisa estar dissolvido em uma solução para que possa ser consumido, mas ele em seu estado dissolvido tem maior dificuldade de invadir os poros do concreto, diferentemente do seu estado gasoso. Dessa forma, concretos saturados, mesmo na presença de cloretos, terá uma taxa de corrosão reduzida (CASCUDO, 1997).

#### 4.2.3.4 *Agentes agressivos*

Os principais agentes agressivos do concreto são os íons cloreto ( $Cl^-$ ), íons de sulfato ( $S_2^-$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), Nitritos ( $NO_3^-$ ), gás sulfídrico ( $H_2S$ ), cátion amônio ( $NH_4^+$ ), e óxidos de enxofre ( $SO_2$  e  $SO_3$ ), ou qualquer outro material que se deposite na superfície ou penetre no concreto (HELENE, 1986). Estes contribuem sensivelmente para aumentar a corrosão no aço coberto, pois aumentam a condutividade elétrica do eletrólito, que por sua vez, está diretamente ligado ao nível de umidade. Cascudo (1997) representou a influência da umidade em relação a diferentes teores de cloretos na figura 18.

Figura 18 - Influência da umidade de equilíbrio e do teor de cloretos na resistividade do concreto.



Fonte: CASCUDO (1997, pg. 56).

#### 4.2.4 Produtos da corrosão:

Após os elementos básicos revisados, segue o desenvolvimento simplificado da corrosão pelas equações 4.19 a 4.21:

Nas regiões anódicas, ocorre a oxidação do ferro:



O oxigênio se reduz na região catódica (não corroídas):

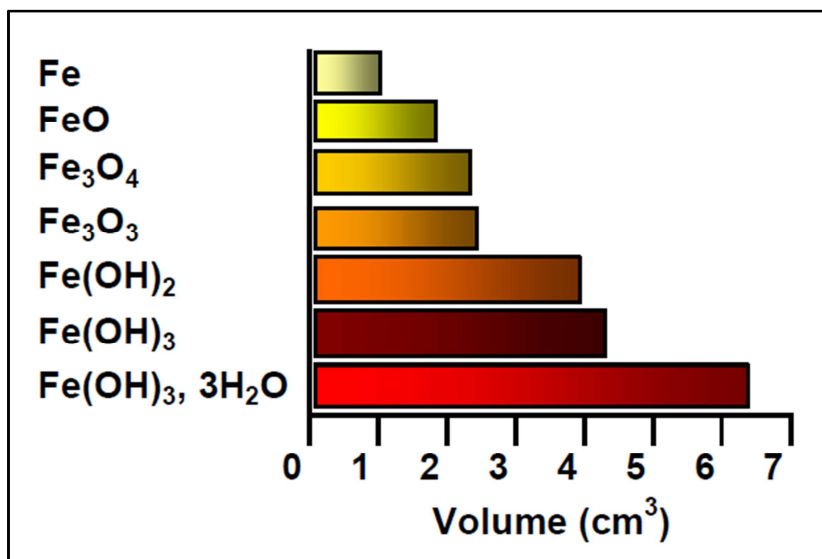


Os íons ( $Fe^{2+}$ ) migram para a região catódica e os íons hidroxila ( $OH^-$ ) para a região anódica. Ao se encontrarem em uma região intermediária (podendo-se formar perto do cátodo, devido a maior mobilidade dos íons hidroxila), é formado o hidróxido ferroso:



O hidróxido ferroso, por sua vez, pode reagir com outros compostos, gerando outras substâncias, que estão listadas por volumes relativos na figura 19.

Figura 19 - Volumes relativos do ferro e de alguns produtos de corrosão.



Fonte: CASCUDO (1997, pg. 60).

Vale salientar, que dependendo da concentração de cloretos no concreto, outras substâncias como a goetita ( $\alpha\text{FeOOH}$ ), a lepidrocrocita ( $\gamma - (8\text{FeOOH}, \text{FeOCl})$ ) e a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) também são formados no processo de corrosão (CASCUDO, 1997).

#### 4.2.5 Micropilha e macropilha

Para melhor compreensão dos mecanismos da corrosão, é necessário conceituar o que é micropilha e macropilha.

As macropilhas são pilhas onde as áreas anódicas e catódicas se encontrem afastadas uma das outras e deve-se a naturezas e ambientes diferenciados no mesmo concreto como temperatura e aeração. Já as micropilhas possuem essas áreas relativamente próximas e se dão principalmente pela ação dos cloretos e baixo pH e tem ocorrência em regiões de baixa heterogeneidade do concreto (CASCUDO, 1997).

## 5 METODOLOGIA

Este trabalho consistirá em quatro etapas:

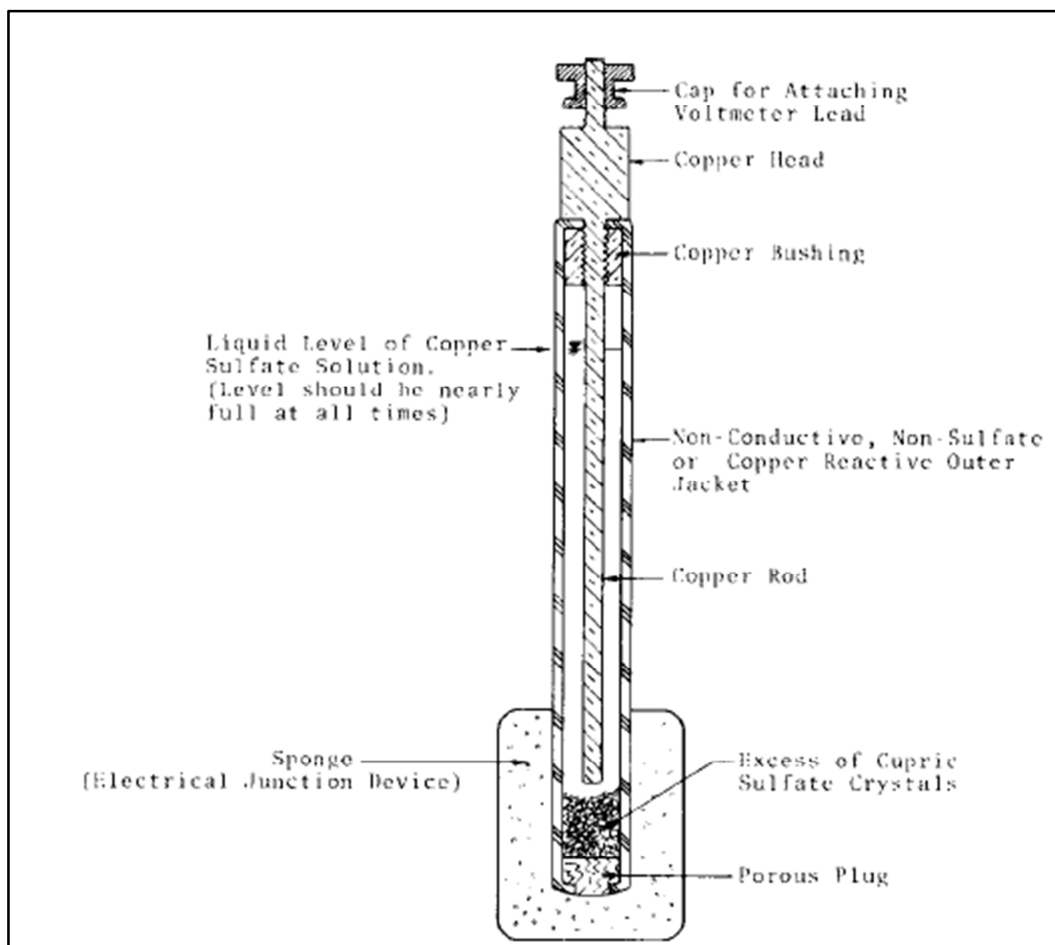
- A primeira etapa consiste em uma revisão bibliográfica, descritas no item 4 desta monografia, tendo como objetivo, embasar o levantamento e ensaios que serão realizados nas etapas 2, 3 e 4.

- A segunda etapa será a coleta de dados utilizando a semipilha cobre sulfato de cobre (ESC) nos locais definidos no item 5.3. Nesta etapa ocorrerá toda a coleta de dados, que servirá de apoio para a etapa três. Todos os procedimentos realizados serão de acordo com a norma ASTM C 876-91 e a preparação da semipilha serão de acordo com o manual do equipamento.
- Na terceira etapa ocorrerá a análise dos resultados obtidos, utilizando os softwares EXCEL para confecção de tabelas e o AUTOCAD para desenhar as linhas equipotenciais e o mapeamento de potenciais.
- Na quarta etapa será feita a conclusão com base nos dados obtidos e na revisão bibliográfica, apontando novos estudos necessários para uma melhor precisão e entendimento dos resultados.

### **5.1 Semipilha de cobre sulfato de cobre**

Como descrito no item 4.1.3, a semipilha cobre sulfato de cobre é utilizada como eletrodo de referência para determinação de ddp. Neste trabalho, seu uso servirá para determinação de linhas equipotenciais em aços cobertos, com o propósito de identificar possíveis casos de oxidação. Na figura 20 é detalhado este equipamento.

Figura 20 - Visão seccional da semipilha cobre sulfato de cobre (ESC).



Fonte: ASTM (1999, pag. 2).

Os componentes da semipilha são, respectivamente de cima para baixo, de acordo com a figura 20: Conector para prender o cabo do voltímetro, a cabeça da placa de cobre, rolha de cobre, líquido com solução de sulfato de cobre, capa envoltória não condutora nem reativa a cobre, barra interna de cobre, esponja, excesso de cristais de sulfato de cobre que decaem e plug poroso.

Para este trabalho, será utilizado a semipilha portátil de modelo 3A da Tinker-Rasor, Voltímetro CPV-4, também da Tinker-Rasor. Para dar uma melhor condutividade ao equipamento, será utilizado esponja de cozinha umedecida e o líquido utilizado para preencher o interior da semipilha, será água destilada fornecida pelo laboratório de alimentos do departamento de ciência e tecnologia da UFPB. A figura 21 mostra o conjunto utilizado.

Figura 21 - Semipilha portátil, modelo 3A e Voltímetro modelo CPV-4 da Tinker-Rasor. Também estão presentes os conectores e buchas necessárias para o levantamento de dados.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A norma ASTM C 876-91(1999) atenta para algumas limitações do método:

- Medidas de potencial determina uma atividade de corrosão, não necessariamente determinando a localização.
- A interpretação dos resultados da semipilha onde o concreto está saturado com água, onde a frente de carbonatação chegou ao metal ou existe a contaminação por cloretos, devem ser examinadas por um engenheiro experiente, e teste de carbonatação e contaminação por cloretos devem ser realizados para melhor identificação de corrosão.
- A magnitude da ddp não reflete necessariamente a velocidade da corrosão, mas reflete a sua presença ou ausência.

Mesmo não havendo a certeza da corrosão, testes em laboratórios identificaram probabilidades de corrosão para as seguintes situações: (ASTM C 876-91,1999)

- Potenciais mais positivos que -0,2 V ESC, tem 90% de não está ocorrendo oxidação na área medida no momento do teste.
- Se o potencial estiver entre -0,2V ESC e -0,35 ESC, a corrosão no metal é incerta.
- Potenciais mais negativos que -0,35 ESC possuem 90% de chance de está ocorrendo o processo de corrosão nesta área no momento da medição.

Esses valores não podem ser aplicados a superfícies que possuem frente de carbonatação até o metal coberto, contaminação por cloretos ou possuem alta taxa de variação de concentrações de oxigênio.

Todos os procedimentos adotados e materiais utilizados estão de acordo com a norma ASTM C 876-91(1999).

## 5.2 Preparação e uso da semipilha

A semipilha utilizada não vem com o sulfeto de cobre saturado em líquido, portanto, antes de sua utilização é necessário preencher o eletrodo com água (de preferência saturada), como é mostrado na figura 22. Após, é conectado um cabo entre o eletrodo e o polo positivo do voltímetro, e o cabo que estrará em contato com a armadura no polo negativo.

Figura 22 - Preenchimento da semipilha com água destilada

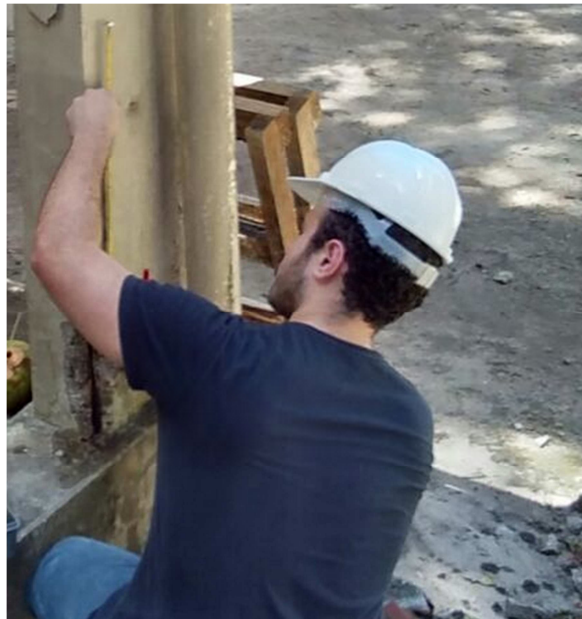


Fonte: Elaborada pelo Autor

A semipilha deve ser utilizada no mínimo após 10 minutos de preparada, para que o líquido fique saturado adequadamente.

Foi adotada uma distância de 50 cm entre cada ponto vertical e 40 cm entre os pontos horizontais de coleta de ddp nos pilares. No Pilar 1 foram usados 10 pontos para cada face do pilar, e no pilar 2, 8 pontos para cada face. Depois de identificado os pontos, é necessário abrir uma pequena abertura no concreto para expor a armadura, mostrado nas figuras 23 a 26. Depois de exposta, se limpa e lixa o aço para retirar a proteção natural (camada passivadora).

Figura 23 - Estabelecimento de pontos de coleta do ddp. (Pilar 2)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 24 - Abertura no cobrimento do concreto para ligação da armadura com o voltímetro (Pilar 1).



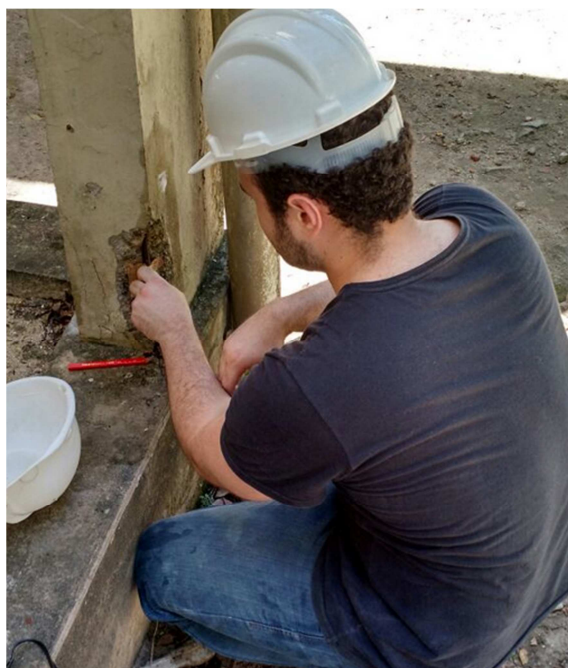
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 25 - Armadura exposta para ligação no voltímetro (Pilar 1).



Fonte: Elaborada pelo Autor

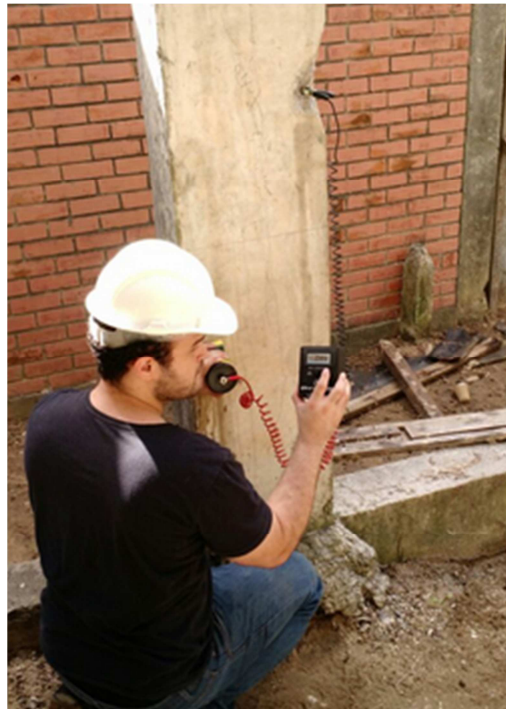
Figura 26 - Limpeza do aço para retirada de camada passivadora (Pilar 2).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Deve-se conectar o polo positivo, por meio do cabo conector do voltímetro, na armadura coberta. Para isso, é necessária a abertura de um pequeno espaço, até que o conector consiga segurar firmemente a armadura. Após é colocado o eletrodo (conectado ao polo negativo) e a esponja umedecida (com água e detergente) sobre os pontos pré-determinados, em contato direto com o concreto, demonstrado na figura 26. Para cada ponto, é analisado se a saturação do concreto está ideal, observando a variação de tensão conforme o tempo e adequando a taxa de umidade se for necessário, como previsto na norma ASTM C 876-91 (1999). Anotar os valores de ddp para cada ponto

Figura 27 - Uso da semipilha no pilar 1.



Fonte: Elaborada pelo autor.

### 5.3 Local de realização das medições com a semipilha.

Com autorização da prefeitura do campus I da UFPB, para realizações dos ensaios nas estruturas do restaurante universitário, foi feita à avaliação de um pilar desta edificação (Pilar 1). Segue as fotos das estruturas a serem analisadas. Também foi analisado um pilar no CCEN (Pilar 2). Nas figuras 28 e 29 são apresentados os pilares que serão analisados.

Figura 28 - Pilar estudado do CCEN (pilar 2).



Fonte:Elaborada pelo Autor

Figura 29 - Pilar estudado da estrutura lateral ao RU (Pilar 1).



Fonte: Elaborada pelo Autor

O pilar 1 foi construído recentemente, e não possuía revestimento algum. Desta forma, foi facilitada a coleta de dados, já que não foi necessária a retirada do mesmo, evitando maiores danos às edificações da UFPB. É importante notar que o cobrimento do aço era de

quatro cm, assim previne ainda mais o início da corrosão, pois dificulta a invasão de agentes agressivos. Por esses motivos, é esperado que não fosse constatado sinais de oxidação no mesmo.

A coleta de dados no pilar dois tem como objetivo o entendimento dos efeitos do revestimento à base de epóxi sobre a coleta de dados. Ele já encontrava sinais de corrosão e de reparos prévios. É esperado que os dados coletados deste pilar não correspondessem com a situação de suas armaduras, pois a mesma se encontra isolada.

#### 5.4 Procedimento para o mapeamento de potenciais

No quadro 2 e 3 estão os valores obtidos em campo, que serão utilizados para o desenho de linhas equipotenciais e mapeamento gráfico. Vale salientar que apenas os valores coletados no pilar 1 serão usados no mapeamento, pois os valores obtidos no pilar 2 não são confiáveis, como descrito no item 5.3.

Quadro - 2 valores de ddp obtidos para o Pilar 1.

**MAPEAMENTO DE POTENCIAIS EM mV(ESC)**

**TABELA DE POTENCIAIS DE SEMI-PILHA PARA  
DEMONSTRAÇÃO DA POSSIBILIDADE DE CORROSÃO**

**PILAR 1 - LADO A**

**PILAR 1 - LADO B**

| Posição | x1   | x2   |
|---------|------|------|
| y1      | -13  | -32  |
| y2      | -5   | -3   |
| y3      | -20  | -34  |
| y4      | -46  | -36  |
| y5      | -116 | -112 |
| y6      | ,    |      |

| Posição | x1  | x2  |
|---------|-----|-----|
| y1      | 19  | 23  |
| y2      | 18  | 50  |
| y3      | 26  | 25  |
| y4      | 21  | 27  |
| y5      | -17 | -45 |
| y6      |     |     |

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Quadro - 3 valores de ddp obtidos para o Pilar 2.

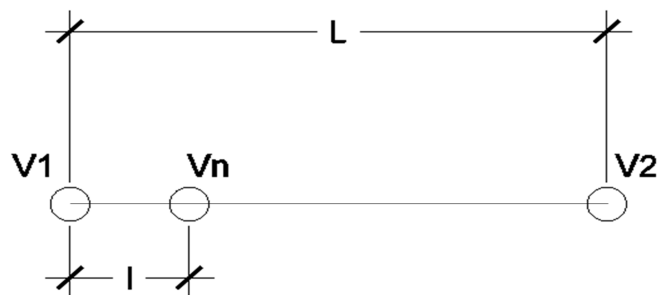
| MAPEAMENTO DE POTENCIAIS EM mV(ESC)                                               |      |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------|-----|
| TABELA DE POTENCIAIS DE SEMI-PILHA PARA DEMONSTRAÇÃO DA POSSIBILIDADE DE CORROSÃO |      |     |
| PILAR 2 - LADO A                                                                  |      |     |
| Posição                                                                           | x1   | x2  |
| y1                                                                                | 30   | 85  |
| y2                                                                                | -12  | -7  |
| y3                                                                                | -94  | -72 |
| y4                                                                                | -62  | -88 |
| y5                                                                                |      |     |
| y6                                                                                |      |     |
| PILAR 2 - LADO B                                                                  |      |     |
| Posição                                                                           | x1   | x2  |
| y1                                                                                | -58  | -70 |
| y2                                                                                | -25  | -23 |
| y3                                                                                | -111 | -68 |
| y4                                                                                | -71  | -84 |
| y5                                                                                |      |     |
| y6                                                                                |      |     |

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 5.4.1 Interpolação

Após a coleta de dados, será definido o intervalo de contorno a ser utilizado. A norma ASTM C 876-91 (1999) sugere que o valor máximo seja de 0,1V. Como é previsto que não ocorra muita variação nos potenciais, foi escolhido o intervalo de 0,02 V (20mV).

Porém os valores obtidos não se encontram exatos, sendo necessária a interpolação de valores para encontrar os pontos de mesma potencial de valores referentes ao intervalo de contorno adotado. O cálculo será realizado de acordo com a figura 30 e a fórmula 5.1.

Figura 30 - Cálculo da distância  $l$  para determinado potencial  $V_n$ .

Fonte: Elaborado pelo autor.

$$l = \frac{(V_n - V_1) * L}{(V_2 - V_1)} \quad (5.1)$$

Onde:

$V_n$  = potencial eletroquímico (ESC) requerido pelo contorno.

$V_1$  = Potencial eletroquímico (ESC) do ponto inicial da reta.

$V_2$  = Potencial eletroquímico (ESC) do ponto final da reta.

$L$  = Comprimento total da reta

$l$  = Comprimento entre o ponto inicial e o ponto requerido.

Para facilitar o entendimento, temos que:

$$(V_n - V_1) = \Delta V(n) \quad (5.2)$$

$$(V_2 - V_1) = \Delta V(t) \quad (5.3)$$

Juntando as equações 5.2, 5.3 e 5.1, temos:

$$l = \frac{\Delta V(n) * L}{\Delta V(t)} \quad (5.4)$$

As interpolações realizadas são representadas nos quadros 4 e 5.

Quadro 4 - interpolações para a face A do pilar um.

| QUADRO DE INTERPOLAÇÕES - PILAR 1 - FACE A |      |              |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                  |                  |
|--------------------------------------------|------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|
| RETA                                       | Lt   | $\Delta V_t$ | $\Delta V(-20)$ | $\Delta L(-20)$ | $\Delta V(-40)$ | $\Delta L(-40)$ | $\Delta V(-60)$ | $\Delta L(-60)$ | $\Delta V(-80)$ | $\Delta L(-80)$ | $\Delta V(-100)$ | $\Delta L(-100)$ |
| 11 -> 21                                   | 0,40 | -19,00       | -7,00           | 0,15            | -               | -               | -               | -               | -               | -               | -                | -                |
| 11 -> 12                                   | 0,50 | 8,00         | -               | -               | -               | -               | -               | -               | -               | -               | -                | -                |
| 11 -> 22                                   | 0,64 | 10,00        | -               | -               | -               | -               | -               | -               | -               | -               | -                | -                |
| 21 -> 22                                   | 0,5  | 29           | 12              | 0,21            | -               | -               | -               | -               | -               | -               | -                | -                |
| 21 -> 12                                   | 0,64 | 27           | 12              | 0,28            | -               | -               | -               | -               | -               | -               | -                | -                |
| 12 -> 22                                   | 0,4  | 2            | -               | -               | -               | -               | -               | -               | -               | -               | -                | -                |
| 12 -> 13                                   | 0,5  | -15          | -15             | 0,50            | -               | -               | -               | -               | -               | -               | -                | -                |
| 12 -> 23                                   | 0,64 | -29          | -15             | 0,33            | -               | -               | -               | -               | -               | -               | -                | -                |
| 22 -> 13                                   | 0,64 | -17          | -17             | 0,64            | -               | -               | -               | -               | -               | -               | -                | -                |
| 22 -> 23                                   | 0,5  | -31          | -17             | 0,27            | -               | -               | -               | -               | -               | -               | -                | -                |
| 13 -> 23                                   | 0,4  | -14          | -               | -               | -               | -               | -               | -               | -               | -               | -                | -                |
| 13 -> 14                                   | 0,5  | -26          | -               | -               | -20             | 0,38            | -               | -               | -               | -               | -                | -                |
| 13 -> 24                                   | 0,64 | -16          | -               | -               | -               | -               | -               | -               | -               | -               | -                | -                |
| 23 -> 14                                   | 0,64 | -12          | -               | -               | -               | -               | -               | -               | -               | -               | -                | -                |
| 23 -> 24                                   | 0,5  | -2           | -               | -               | -               | -               | -               | -               | -               | -               | -                | -                |
| 14 -> 24                                   | 0,4  | 10           | -               | -               | 6               | 0,24            | -               | -               | -               | -               | -                | -                |
| 14 -> 15                                   | 0,5  | -70          | -               | -               | -               | -               | -14             | 0,10            | -34             | 0,24            | -54              | 0,39             |
| 14 -> 25                                   | 0,64 | -66          | -               | -               | -               | -               | -14             | 0,14            | -34             | 0,33            | -54              | 0,52             |
| 24 -> 15                                   | 0,64 | -80          | -               | -               | -4              | 0,03            | -24             | 0,19            | -44             | 0,35            | -64              | 0,51             |
| 24 -> 25                                   | 0,5  | -76          | -               | -               | -4              | 0,03            | -24             | 0,16            | -44             | 0,29            | -64              | 0,42             |

Fonte: Elaborada pelo Autor

Quadro 5 - Interpolações para a face B do pilar um.

| QUADRO DE INTERPOLAÇÕES - PILAR 1 - FACE B |       |                  |                |                |                |                |               |               |                 |                 |                 |                 |
|--------------------------------------------|-------|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| RETA                                       | Lt(m) | $\Delta V_t(mV)$ | $\Delta V(40)$ | $\Delta L(40)$ | $\Delta V(20)$ | $\Delta L(20)$ | $\Delta V(0)$ | $\Delta L(0)$ | $\Delta V(-20)$ | $\Delta L(-20)$ | $\Delta V(-40)$ | $\Delta L(-40)$ |
| 11 -> 21                                   | 0,40  | 4                | -              | -              | 1              | 0,10           | -             | -             | -               | -               | -               | -               |
| 11 -> 12                                   | 0,50  | -1               | -              | -              | -              | -              | -             | -             | -               | -               | -               | -               |
| 11 -> 22                                   | 0,64  | 31               | 21             | 0,43           | 1              | 0,02           | -             | -             | -               | -               | -               | -               |
| 21 -> 22                                   | 0,5   | 27               | 17             | 0,31           | -              | -              | -             | -             | -               | -               | -               | -               |
| 21 -> 12                                   | 0,64  | -5               | -              | -              | -3             | 0,38           | -             | -             | -               | -               | -               | -               |
| 12 -> 22                                   | 0,4   | 32               | 22             | 0,28           | 2              | 0,03           | -             | -             | -               | -               | -               | -               |
| 12 -> 13                                   | 0,5   | 8                | -              | -              | 2              | 0,13           | -             | -             | -               | -               | -               | -               |
| 12 -> 23                                   | 0,64  | 7                | -              | -              | 2              | 0,18           | -             | -             | -               | -               | -               | -               |
| 22 -> 13                                   | 0,64  | -24              | -10            | 0,27           | -              | -              | -             | -             | -               | -               | -               | -               |
| 22 -> 23                                   | 0,5   | -25              | -10            | 0,20           | -              | -              | -             | -             | -               | -               | -               | -               |
| 13 -> 23                                   | 0,4   | -1               | -              | -              | -              | -              | -             | -             | -               | -               | -               | -               |
| 13 -> 14                                   | 0,5   | -5               | -              | -              | -              | -              | -             | -             | -               | -               | -               | -               |
| 13 -> 24                                   | 0,64  | 1                | -              | -              | -              | -              | -             | -             | -               | -               | -               | -               |
| 23 -> 14                                   | 0,64  | -4               | -              | -              | -              | -              | -             | -             | -               | -               | -               | -               |
| 23 -> 24                                   | 0,5   | 2                | -              | -              | -              | -              | -             | -             | -               | -               | -               | -               |
| 14 -> 24                                   | 0,4   | 6                | -              | -              | -              | -              | -             | -             | -               | -               | -               | -               |
| 14 -> 15                                   | 0,5   | -38              | -              | -              | -1             | 0,01           | -21           | 0,28          | -               | -               | -               | -               |
| 14 -> 25                                   | 0,64  | -66              | -              | -              | -1             | 0,01           | -21           | 0,20          | -41             | 0,40            | -61             | 0,59            |
| 24 -> 15                                   | 0,64  | -44              | -              | -              | -7             | 0,10           | -27           | 0,39          | -               | -               | -               | -               |
| 24 -> 25                                   | 0,5   | -72              | -              | -              | -7             | 0,05           | -27           | 0,19          | -47             | 0,33            | -67             | 0,47            |
| 15 -> 25                                   | 0,4   | -28              | -              | -              | -              | -              | -             | -             | -3              | 0,04            | -23             | 0,33            |

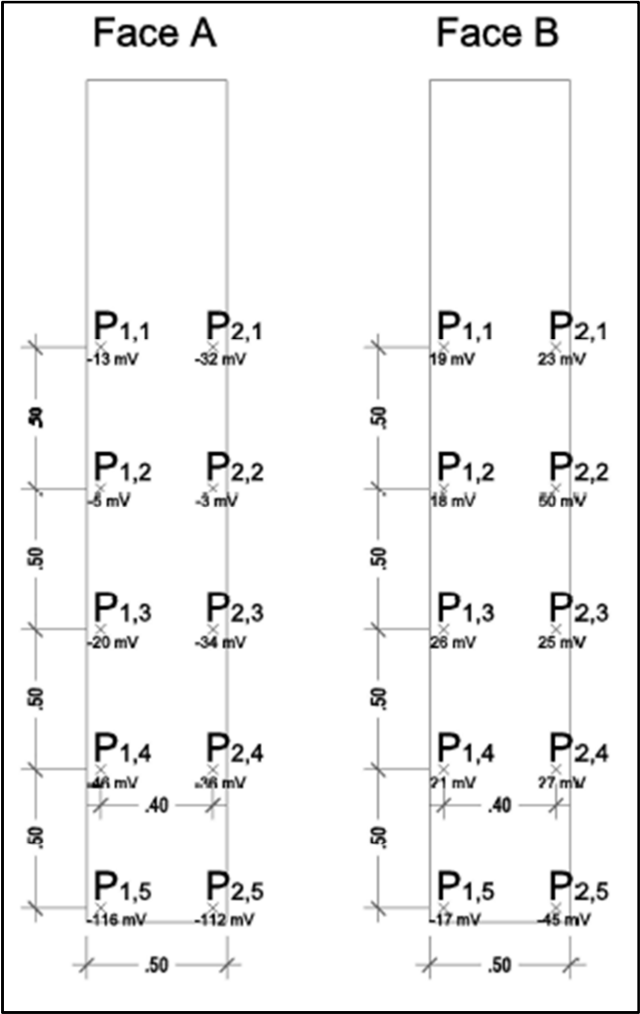
Fonte: Elaborado pelo autor.

## 6 RESULTADOS

Com todos os pontos conhecidos, foi desenhado os contornos equipotenciais com o auxílio do AutoCAD. Assim como o mapeamento gráfico.

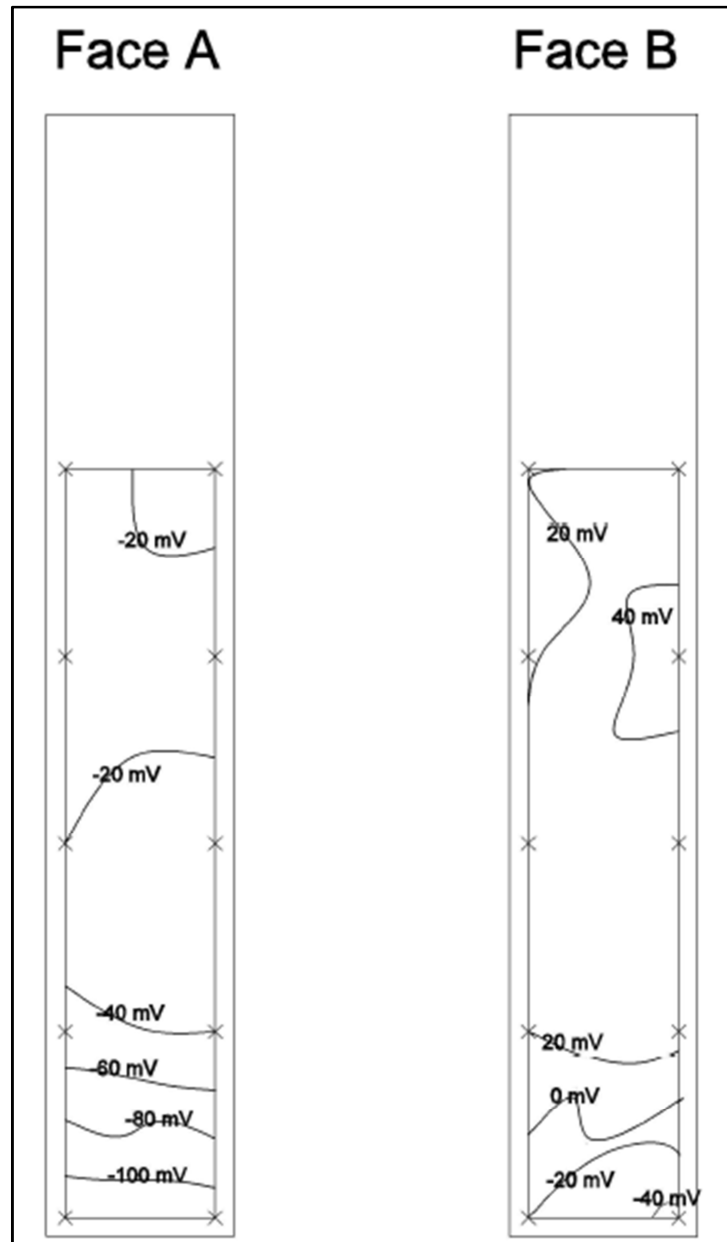
Os resultados finais estão representados pelas figuras 31, 32 e 33.

Figura 31 - Posições e valores de potenciais (ESC) dos pontos nas duas faces do pilar um.



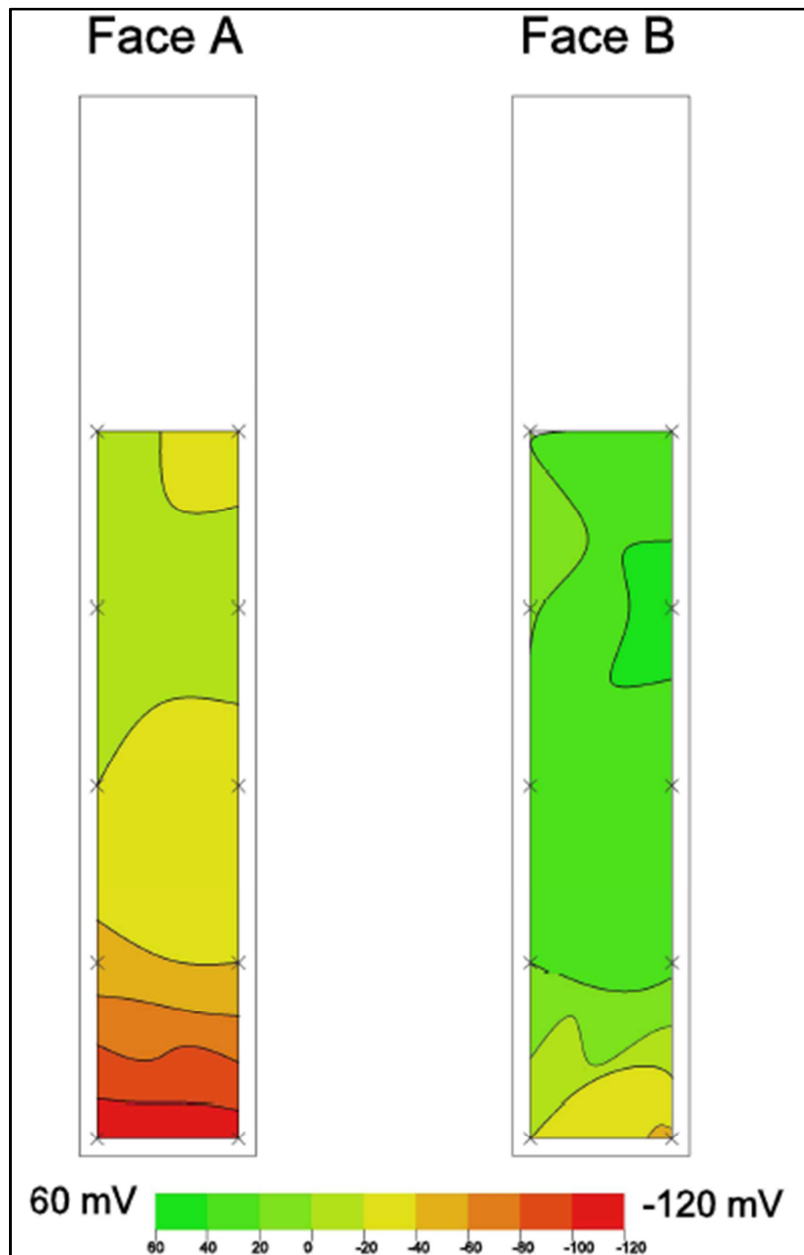
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 32 - Linhas equipotenciais eletroquímicas (ESC) do pilar um.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 33 - Mapa gráfico dos potenciais eletroquímicos (ESC) do pilar um.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Como foi previsto, não foi constatado nenhum sinal de corrosão no pilar analisado. Pois nenhum potencial eletroquímico (ESC) foi menor que a faixa de -200 mV. Porém é analisada a diminuição do mesmo nas duas bases.

## 7 CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos, foi visto que é possível o mapeamento de potenciais eletroquímicos em pilares com a semipilha de cobre sulfato de cobre de forma prática, rápida e barata, com a desvantagem de que, caso o concreto possua revestimento, o mesmo deve ser retirado nos pontos de coleta de dados, pois interfere diretamente na condutividade elétrica do concreto, induzindo falsos resultados, como ocorridos no pilar 2, localizado no CCEN da UFPB.

O pilar 2 obteve resultados não condizentes com sua situação, já que o mesmo possuía corrosão aparente, porém, a camada de revestimento a base de epóxi aplicada no concreto pode ter isolado eletricamente as barras de aço, induzindo que os resultados da semipilha indicassem que não havia corrosão.

De acordo com os resultados da semipilha cobre sulfato de cobre, o menor potencial eletroquímico obtido no pilar um foi de -116 mV, que de acordo com a norma ASTM C 876-91,1999, tem 90% de chance de não ter corrosão, já que é maior que -0,2V.

Mesmo o pilar 1 não possuindo corrosão, é possível perceber uma tendência na face B do pilar por torna-se uma área catódica em relação à face A, já que os potenciais eletroquímicos na face A são predominantemente menores. Isto pode ocorrer devido à maior exposição da face A ao ciclo de molhagem, que facilita a absorção de oxigênio em sua forma dissolvida, fator imprescindível ao início de corrosão em armaduras cobertas com a formação de pilhas de aeração diferencial.

Também é notado que a base do pilar nas duas faces tende a áreas anódicas, pois são locais de maior umidade e menor ventilação. Provavelmente o início da corrosão ocorra na formação de uma macropilha entre a zona anódica (Base do pilar) e a catódica (Restante do pilar), Já que estes locais possuem os valores de ddp mais negativos em ambas as faces. Assim como no caso das faces A e B, esta corrosão se dará devido ao surgimento de uma pilha de aeração diferencial.

O concreto não apresenta sinais claros de heterogeneidade, o que dificultará o surgimento de pilhas por concentrações iônicas diferentes.

O surgimento de micropilhas é menos provável, pois a armadura da estrutura possui um cobrimento considerável, que retarda a frente de carbonatação e contaminação por cloretos.

Para um maior entendimento de possíveis ataques de agentes agressivos e a formação de pilhas de ação local e ativo-passiva, é necessário um estudo das características do concreto, como resistividade, porosidade, níveis de contaminação por cloretos, carbonatação e polarização.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 876-91: Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete**. West Conshohocken: Ihs, 1999.

ANDRADE, Paulo Afonso. **Os caminhos do comprometimento**, Revista recuperar nº 63, Rio de Janeiro, Ed. Thomastec, 2005

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 238 p

BARBOSA, D.C.; BARDELLA, P.S.; CAMARINI, G. **Avaliação da Carbonatação natural em concretos produzidos com e sem sílica ativa submetidos a diferentes procedimentos de cura**. Anais do 47º Congresso Brasileiro de Concreto. 2005. p. 15.

BOLINA, Cecília de Castro. **Inibidores de Corrosão: Avaliação do desempenho frente à corrosão do aço induzida por carbonatação e cloretos**. 2008. 157 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Ufg, Goiânia, 2008.

CABRAL, Antônio Eduardo Bezerra. **Avaliação da eficiência de sistemas de reparo no combate à iniciação e a propagação da corrosão do aço induzida por cloretos**. 2000. 165 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Ufrs, Porto Alegre, 2000.

CÁNOVAS, Manuel Fernández. **Patologia e terapia do concreto armado**. São Paulo: Pini, 1988. 521 p.

CASCUDO, Oswaldo. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: Inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo: Pini, 1997. 237 p.

CUNHA, A.C.Q.; HELENE, P.R.L. **Despassivação das armaduras de concreto por ação da carbonatação**. BT/PCC/283. São Paulo, 2001.

DUTRA, Aldo Cordeiro; NUNES, Laerce de Paula. **Proteção catódica: Técnica de combate à corrosão**. 5. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. 343 p.

FELTRE, Ricardo. **Fundamentos de Química: vol. único**. 4ª.ed. São Paulo: Moderna, 2005. 700 p

FORTES, Lyttelton Rebelo. **Corrosão na armadura do concreto armado e sua avaliação pela técnica do potencial de eletrodo**, dissertação de mestrado UFCE. Fortaleza, 1995. 228p.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 3. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 1996. 345 p.

HELENE, Paulo R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: Pini, 1986. 47 p.

HELENE, Paulo R. L. **Manual prático para reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1988. 119 p.

MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íons cloretos**. 2008. 218 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Usp, São Paulo, 2008.

MOURA, Paulo Germano Toscano. **Patologia das construções**. João Pessoa: Ufpb, 2016. 220 slides, color.

POLITO, Giulliano. **Corrosão em estruturas de concreto armado**: Causas, Mecanismos, prevenção e recuperação. 2006. 188 f. TCC (Graduação) - Curso de Avaliação e Perícia, UFMG, Belo Horizonte, 2006.

SOUZA, Vicente Custódio Moreira de; RIPPER, Thomas. **Patologia, Recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998. 255 p.

TINKER-RASOR. **Product instructions**: Portable reference electrodes. Disponível em: <[http://tinker-rasor.com/wp-content/uploads/2014/06/COPPER-SULFATE\\_HALF\\_CELLS.pdf](http://tinker-rasor.com/wp-content/uploads/2014/06/COPPER-SULFATE_HALF_CELLS.pdf)>. Acesso em: 09 abr. 2017.