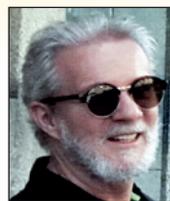


Corrosion potential: influence of moisture, water-cement ratio, chloride content and concrete cover

Potencial de corrosão: influência da umidade, relação água/cimento, teor de cloretos e cobrimento



M. H. F. MEDEIROS^a
medeiros.ufpr@gmail.com

F. C. ROCHA^a
francielle.rocha@cimentoitambe.com.br

R. A. MEDEIROS-JUNIOR^a
ronaldodemedeirosjr@yahoo.com.br

P. HELENE^b
paulo.helene@concretophd.com.br

Abstract

The corrosion potential technique is used as an electrochemical method to support the monitoring of reinforcement corrosion in reinforced concrete structures. The corrosion potential ranges and its correlation with corrosion's likelihood (recommended by ASTM C 876:2015) are usually employed as an evaluation criterion of the results. The thermodynamic state of corrosion in the structure or specimen (laboratory) can be established if these criteria are well used. However, the method is influenced by numerous factors related to the concrete, environment and the procedures adopted at the time of the test. In order to provide useful information to technical and scientific community for the correct use of this type of non-destructive evaluation technique, the aim of this article is to evaluate some of the possible factors of influence on the corrosion potential measures, such as concrete moisture content, water-cement ratio, thickness of the concrete cover and degree of chloride contamination. The results indicate that moisture and the degree of chloride contamination tend to make more electronegative corrosion potential. Furthermore, the influence of concrete cover is different for concrete contaminated (1% of chloride by weigh of cement) and not contaminated by chlorides: the influence of the cover thickness in the concrete contaminated with chlorides was reverse because the greater the cover thickness, the least electronegative corrosion potential value; on the other hand, in the concrete without contamination by chlorides, the effect of the cover thickness in corrosion potential readings was irrelevant. All these statements were proven with 95% statistical significance.

Keywords: corrosion potential, concrete moisture content, water-cement ratio, chloride, concrete cover.

Resumo

O método de medida de potencial de corrosão é utilizado como uma ferramenta eletroquímica de auxílio ao monitoramento da corrosão das armaduras de estruturas de concreto armado. Como critério de avaliação dos resultados, é comum que sejam adotados os intervalos de potencial de corrosão e sua correlação com a probabilidade de corrosão, preconizadas pela ASTM C 876:2015. Com este critério é possível estabelecer um panorama da situação termodinâmica de corrosão na estrutura ou no corpo de prova em laboratório. Porém, o método é influenciado por inúmeros fatores relacionados ao concreto, ao ambiente e aos procedimentos adotados no momento da realização das leituras. Visando fornecer informações para orientar o meio técnico e científico ao uso correto deste tipo de método de avaliação não destrutiva, o objetivo deste trabalho é avaliar alguns dos possíveis fatores de influência nas medidas de potencial de corrosão, tais como: teor de umidade do concreto, relação água/cimento, espessura do cobrimento das armaduras e grau de contaminação por cloretos. Os resultados indicaram que a umidade e o grau de contaminação do concreto por íons cloretos tenderam a tornar o potencial de corrosão mais eletronegativo. Além disso, foi verificado que a influência do cobrimento é diferente para o caso de concreto contaminado (1% de cloretos em relação à massa de cimento) e não contaminado com cloretos: a influência da espessura de cobrimento, no caso do concreto contaminado com cloretos, foi inversamente proporcional, ou seja, quanto maior a espessura de cobrimento, menos eletronegativo foi o valor do potencial de corrosão; por outro lado, nos casos de concretos moldados sem a contaminação por cloretos, o efeito da espessura de cobrimento nas leituras de potencial de corrosão foi irrelevante. Todas estas afirmações foram comprovadas com 95% de significância estatística.

Palavras-chave: potencial de corrosão, teor de umidade do concreto, relação água-cimento, cloretos, cobrimento.

^a Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil;

^b Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

1. Introdução

A corrosão das armaduras é um dos mecanismos possíveis de degradação que diminui a capacidade resistente das estruturas de concreto armado. A velocidade da deterioração, nestes casos, é variável de acordo com diversos fatores intrínsecos à execução e utilização das estruturas.

A presença de microfissuras servem de acesso prioritário quanto à entrada de agentes agressivos no interior das estruturas. Uma vez com acesso direto às armaduras, os agentes agressivos iniciam o processo de corrosão nas armaduras em ação conjunta com o eletrólito (água) e o oxigênio – fenômeno da micro e da macro pilha de corrosão.

Os fatores que interferem no processo de corrosão são: ambiente de exposição, condições da estrutura, cobrimento eficiente ou deficiente, penetração de agentes agressivos ao interior do concreto e até mesmo os materiais empregados na concretagem.

De acordo com Andrade & Alonso [1] e Assouli *et al.* [2], o potencial de corrosão de circuito aberto e a resistividade elétrica são as técnicas mais comuns para avaliação da corrosão de armaduras, embora sejam técnicas meramente qualitativas e que avaliam a termodinâmica do processo, não fornecendo dados sobre a cinética do fenômeno. Embora esta afirmação seja de mais de 10 anos atrás, o método de potencial de corrosão continua sendo uma das ferramentas eletroquímicas mais comuns para o auxílio na inspeção, monitoramento e diagnóstico da corrosão das armaduras de estruturas de concreto armado [3], sendo citado como método de monitoramento em trabalhos de inspeção em campo como registrado nos estudos a seguir: Andrade & Alonso [1]; Liam

et al. [4]; Helene [5]; Broomfield *et al.* [6]; Elsener *et al.* [7]; Feliu *et al.* [8]; Helene *et al.* [9]; Poupard *et al.* [10]; Castro-Borges & Ordaz [11]; Medeiros *et al.* [12]; Castro-Borges *et al.* [13]; Medeiros *et al.* [14,15].

Este método também tem sido usado para avaliar a eficiência de sistemas de reparo, medir a capacidade de repassivação das armaduras no concreto armado submetido a extração de cloretos, além de testar a eficiência da realcalinização e de inibidores de corrosão [16]. Além disso, McCarter e Vennesland [17] aplicaram o potencial de circuito aberto como princípio de elaboração de um sensor de corrosão para estruturas de concreto armado.

Dentro da contextualização da importância e representatividade deste método nos trabalhos de inspeção e diagnóstico de estruturas de concreto armado, o objetivo deste trabalho é avaliar a influência de alguns fatores nas medidas de potencial de corrosão a fim de fornecer informações para orientar o meio técnico e científico que faz uso deste tipo de técnica de avaliação não destrutiva. Os fatores avaliados neste trabalho são: teor de umidade, relação água/cimento, espessura do cobrimento e grau de contaminação por cloretos.

2. Potencial de corrosão

A medida do potencial de corrosão é utilizada para classificar a probabilidade de corrosão de armaduras do aço carbono imersas em concreto, segundo a ASTM C 876:2015 [18], sendo possível sua aplicação para o monitoramento de estruturas de concreto armado ao longo do tempo [5]. Esta ferramenta é um meio rápido e de baixo custo para a identificação de zonas de aço despas-

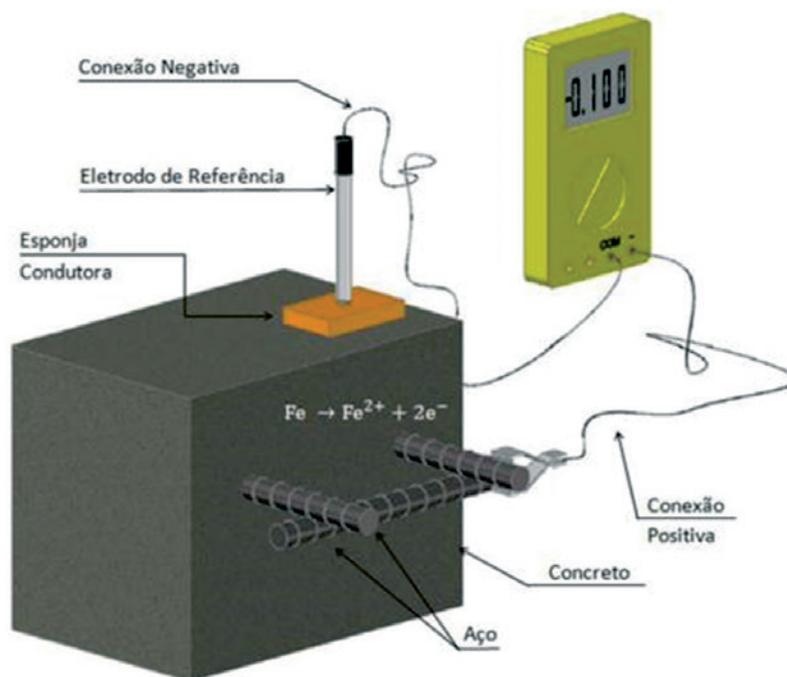


Figura 1

Configuração do circuito para determinação do potencial de corrosão (ASTM C 876:2009 [18] adaptado por ROCHA (21))

sivadas que necessitam de análise ou reparos [14]. Reforçando a aplicabilidade do ensaio, o estudo de Pradhan e Bhattacharjee [19] corrobora com a informação que o potencial de corrosão é uma medida eficaz para constatar a iniciação da corrosão das armaduras em estruturas de concreto expostas a ambientes contaminados por cloretos.

O potencial de corrosão das armaduras é um potencial misto, resultante da combinação da cinética de dois processos: (1) a oxidação do metal, e (2) a redução do oxigênio dissolvido [20]. O método consiste em medir a diferença de potencial elétrico entre o aço da peça em análise e um eletrodo de referência, sendo que o último é capaz de manter seu potencial elétrico estável. A Figura 1 mostra a configuração da aparelhagem necessária, onde é ilustrado o eletrodo de referência apoiado imediatamente sobre a superfície do concreto que cobre a armadura, o voltímetro de alta impedância e a conexão elétrica com a barra de aço (imprescindível para a realização das leituras).

De acordo com Song e Saraswarthy [22], a solução aquosa contida na rede de poros do concreto atua como um eletrólito e, dessa forma, o aço desenvolve um potencial elétrico que pode variar de um local para outro das peças estruturais em função das descontinuidades que possam ser geradas na estrutura de concreto armado como: carbonatação, contaminação por cloretos, variações na porosidade e na umidade, entre outros. Assouli *et al.* [2] também corroboram sobre o efeito destas fontes de descontinuidade nas leituras do potencial de corrosão de armaduras no concreto.

O equipamento utilizado na medição do potencial de corrosão consiste em um voltímetro (capaz de registrar as medidas de diferença de potencial), um eletrodo de referência e uma esponja de alta condutividade. Como eletrodo de referência é comum usar um eletrodo de cobre/sulfato de cobre. Esse eletrodo é composto por um tubo plástico ou de vidro, cujo no interior há uma haste de cobre imersa em uma solução aquosa saturada de sulfato de cobre. Para garantir a saturação da solução aquosa é interessante usar sempre uma quantidade de sulfato de cobre suficiente para causar o acúmulo deste composto no fundo da solução. A extremidade de contato do eletrodo é formada por uma ponta porosa para proporcionar a continuidade elétrica do eletrodo de referência com o eletrodo de trabalho (sistema aço/concreto). Darby *et al.* [23] mostraram em seu guia técnico de testes e monitoramento da durabilidade de estruturas de concreto que o voltímetro pode ser substituído por um voltímetro digital, desde que ele apresente impedância de no mínimo 20 M Ω .

O critério de avaliação de resultados definidos pela ASTM C 876:2015 [18] está apresentado na Tabela 1. Estes valores preconizados pela normativa citada não devem ser tomados como

absolutos, sendo aceitos apenas como faixas de referência. Se bem utilizado, e combinando os resultados com determinações de teor de cloretos, resistividade elétrica do concreto e profundidade de carbonatação, por exemplo, é possível estabelecer um panorama da situação da corrosão na estrutura de concreto armado ou no corpo de prova em laboratório através de um mapeamento da peça inspecionada, indicando áreas com diferentes probabilidades de corrosão. De acordo com Romano *et al.* [20], a maioria dos estudos que tratam do monitoramento sistemático de estruturas de concreto armado não utilizam apenas uma única técnica de inspeção, e sim a combinação de vários métodos de avaliação, contribuindo para obter informações mais confiáveis a respeito da situação da corrosão das armaduras. Gonzalez *et al.* [24] argumentam que o potencial de corrosão deve ser interpretado em conjunto com a resistividade elétrica do concreto e com a velocidade de corrosão do aço. Além disso, o eletrodo de referência pode ser movido sobre a superfície do concreto para se desenvolver um mapa de potencial que mostra os possíveis locais de corrosão ativa na estrutura [25,26]. O trabalho de Pour-Ghaz *et al.* [27], com o título “Quantitative Interpretation of Half-Cell Potential Measurements in Concrete Structures”, segue esta mesma linha de raciocínio e apresenta uma proposta de avaliação quantitativa do potencial de corrosão em conjunto com a resistividade elétrica, a espessura do revestimento e a temperatura.

3. Programa experimental

Para o experimento desta pesquisa foram determinadas as seguintes variáveis independentes:

- **Espessura de revestimento da armadura (2 níveis: 1 cm e 3 cm);**
Motivo: O critério foi simular revestimentos passíveis de existirem em condições de obras reais. A espessura de revestimento de 1 cm foi escolhida para simular obras que não atendem ao revestimento mínimo estabelecido em projetos de engenharia, mas que fazem parte da realidade de muitas construções em operação. Por outro lado, a espessura de revestimento de 3 cm foi escolhido para simular pilares e vigas em atmosfera marinha em ambiente interno e protegido (classe de agressividade II da NBR 6118:2014 [28]).
- **Grau de contaminação do concreto (2 níveis: sem cloretos adicionado ao concreto e 1% de Cl⁻ em relação a massa de cimento no momento do amassamento do concreto);**
Motivo: Thomas [29] desenvolveu um experimento em que evidenciou que 0,70% de cloretos totais, em relação à massa de cimento, é um limite crítico para a despassivação do aço carbono dentro do concreto armado. Nygaard e Geiker [30] também

Tabela 1

Faixas de potencial de corrosão e sua correlação com a probabilidade de corrosão, segundo ASTM C 876: 2009 (18)

Eletrodo de cobre/Sulfato de cobre	Probabilidade de corrosão
Mais negativo que - 350 mV	Superior a 90%
Mais positivo que - 200 mV	Inferior a 10%
De -200 a - 350 mV	Incerta

Tabela 2

Resumo das proporções de materiais dos concretos

m	Cimento	Areia	Brita	a/c	Slump (mm)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Resistência à compressão (MPa)	Massa específica do concreto (kg/m ³)
3	1	1,08	1,92	0,43	105	540	50	2390
4	1	1,60	2,40	0,50	90	421	41	2315
5	1	2,12	2,88	0,59	95	346	30	2280

evidenciaram o teor crítico para despassivação das armaduras em condições de contaminação por cloretos como sendo entre 0,52 e 0,75% de cloretos totais em relação à massa de cimento. Ambos os estudos foram realizados com cimentos semelhantes ao empregado neste experimento. Baseado nestas informações e objetivando intencionalmente produzir um concreto com grau de contaminação por cloretos que cause a despassivação das armaduras, optou-se por adicionar 1,0% de cloretos em relação à massa de cimento na mistura do concreto em estado fresco.

■ **Teor de umidade do concreto (variável em função do estado de umidade do concreto);**

Motivo: Este é um parâmetro que variou em função das condições ambientais em que os corpos de prova foram submetidos. O foco desta etapa foi fazer a umidade interna do concreto variar em condições controladas justamente para investigar este fator de interferência nas leituras de potencial de corrosão.

■ **Relação água/cimento do concreto (3 níveis: 0,43; 0,50 e 0,59), para uma mesma consistência (100±10 mm).**

Motivo: Para manter a coerência de simular uma edificação na classe de agressividade II da NBR 6118:2014 [28], optou-se por usar neste experimento concretos com relação água/cimento abaixo de 0,60. As relações água/cimento indicadas neste item são reflexos da aplicação do método de dosagem do IBRACON [31], com o cuidado de não ultrapassar a relação água/cimento limite já citada.

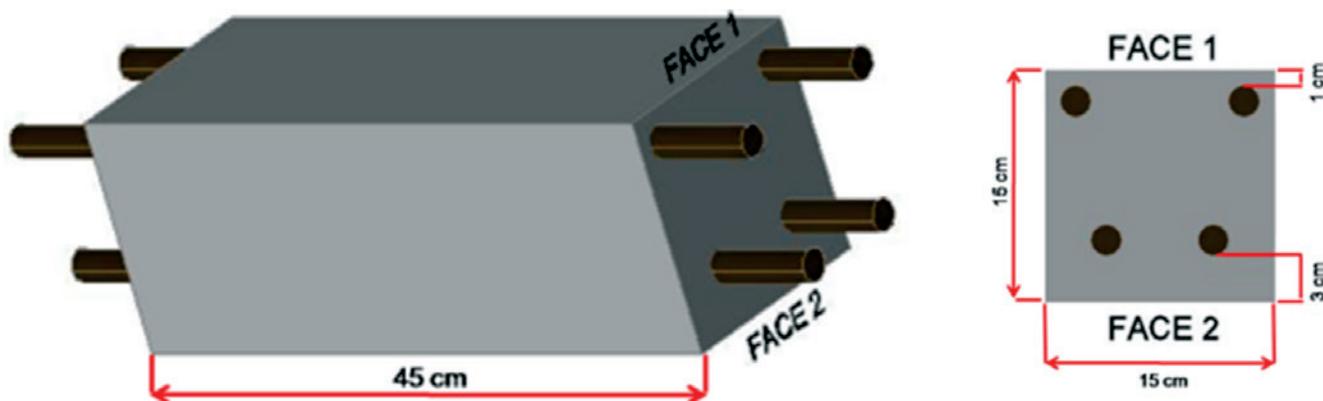
3.1 Corpos de prova

No experimento desenvolvido, foram produzidos 12 corpos de prova de concreto armado prismáticos, de dimensões 15 x 15 x 45 cm, simulando um trecho de uma viga armada. Os traços (relação cimento:agregados) em massa 1:3, 1:4 e 1:5 foram empregados. Ressalta-se que esta faixa de variação compreende os concretos convencionais em termos de resistência à compressão, ou seja, com grande empregabilidade desses traços em obras de modo geral. Em cada data de moldagem foram moldados dois corpos de prova prismáticos. Na Tabela 2 são apresentados os traços de concreto definidos para a moldagem dos corpos de prova, as quais foram realizadas utilizando o método de dosagem IBRACON [31].

Em cada corpo de prova foram distribuídas quatro barras de aço, as quais foram posicionadas com espessura de cobertura igual a 1 cm e 3 cm nas Faces 1 e 2, respectivamente, conforme apresentado na representação esquemática da Figura 2. É importante destacar que as quatro barras ficaram com 10 cm para fora do elemento de concreto em cada extremidade dos corpos de prova, servindo, portanto, como área de contato do equipamento de potencial de corrosão.

Dois corpos de prova para concreto com cloretos e mais dois sem cloretos foram produzidos para cada um dos três traços de concreto, somando-se doze prismas de concreto.

Os corpos de prova prismáticos permaneceram em câmara úmida (95% de U.R. e 23 ± 2°C de temperatura) até o 70º dia. Este

**Figura 2**

Representação esquemática dos corpos de prova prismáticos

tempo de cura prolongado foi escolhido para simular estruturas reais que venham a sofrer a necessidade de ensaios de campo, ou seja, concreto com grau de hidratação avançado ao longo dos anos de vida útil.

Ao final do período de cura citado, todos os corpos de prova foram transferidos para um laboratório com condição de ambiente controlada em 23 ± 2 °C e umidade relativa do ar entre 65 e 75%. O motivo para esta mudança de ambiente é sustentada em que neste momento, os corpos de prova entram em regime de secagem, e este trabalho apresenta como um dos seus objetivos estudar a influência do teor de umidade nas leituras de potencial de corrosão. Desse modo, este procedimento possibilitou realizar medições em diferentes condições de umidade interna do concreto.

3.2 Materiais

Os materiais utilizados para a produção dos corpos de prova foram:

- Cimento CP II-F-32, com 6% a 10% de filer calcário (caracterizado na Tabela 3);
- Agregado graúdo, com módulo de finura igual a 6,94 e dimensões entre 9,5 e 25,0 mm;
- Areia natural como agregado miúdo, com módulo de finura igual a 2,23;
- Barras de aço carbono, tipo CA50, com 10 mm de diâmetro e 65 cm de comprimento, as quais passaram por processo de limpeza semelhante ao utilizado por Medeiros [32];
- Água de amassamento proveniente da Companhia Paranaense Saneapar;
- NaCl incorporado na água de amassamento dos corpos de prova, com esta contaminação controlada.

Todos os materiais utilizados para a dosagem dos concretos deste experimento foram obtidos pela doação de uma usina de produção de concreto localizada em Curitiba. Desse modo, eles são materiais efetivamente empregados na composição de concretos utilizados em obras reais e, por isso, foram escolhidos para este experimento. Além disso, o aço CA 50, na forma de barras de 10 mm de diâmetros, foi escolhido também por ser uma opção de uso frequente na armação de estruturas existentes.

Tabela 3

Características físicas, mecânicas e químicas do cimento CP II F – 32

Análise química								
CaO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	CaO livre (%)	Perda ao fogo (%)	Resíduo insolúvel (%)
59,64	18,35	4,07	2,54	5,19	3,07	1,20	5,35	1,47

Características físicas e mecânicas									
Expansão quente (mm)	Início pega (h)	Fim pega (h)	Consistência normal (%)	Blaine (cm ² /g)	# 200 (%)	# 325 (%)	3 dias* (MPa)	7 dias* (MPa)	28 dias* (MPa)
0,83	03:31	04:10	25,5	3.338	3,87	17,76	25,1	32,0	40,4

* Resistência à compressão simples

3.3 Procedimentos de ensaio

As leituras do potencial de corrosão foram realizadas com a utilização de um voltímetro de alta impedância de entrada (>20 M Ω), conectado a um eletrodo de referência de cobre/sulfato de cobre e à armadura dos corpos de prova. Para melhorar a condutividade elétrica entre o eletrodo de referência e o concreto, uma esponja umedecida com água foi posicionada na superfície de contato entre ambos no momento das leituras.

O cronograma de leituras foi estabelecido segundo as condições de cura do concreto, bem como a evolução das mesmas ao longo do tempo. As leituras foram realizadas em 3 fases:

- Fase 1: aos 70 dias, acondicionados em câmara úmida desde a moldagem;
Motivo: simular uma estrutura em operação por anos, com hidratação do cimento em estágio avançado. São estas estruturas que geralmente são objeto de medição do potencial de corrosão, pois estão em processo de degradação ao longo dos anos.
- Fase 2: aos 98 dias, mantidos em ambiente de laboratório (temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa entre 65 e 75%) desde o 71º dia;
Motivo: Estudar a influência do grau de saturação do concreto nas leituras de potencial de corrosão, uma vez que todos os corpos de prova saíram da condição de saturação (Estágio 1) e passaram para um ambiente que causa a secagem do concreto.
- Fase 3: após 1 ano da moldagem, os corpos de prova foram submetidos a imersão em água durante dois dias e nova série de leituras foram realizadas nos corpos de prova.
Motivo: Investigar o potencial de corrosão após um ano das peças de concreto armado em operação.

As leituras consistem na diferença de potencial (ddp) entre as partes envolvidas no ensaio (eletrolito instável - sistema aço/concreto - e outro estável - eletrodo de referência).

O planejamento dos ensaios compreendeu a realização das leituras nas 2 faces dos corpos de prova, com as diferentes espessuras de revestimento, somando um total de 12 pontos (6 pontos em cada face) previamente determinados e distantes simetricamente entre si. Dessa forma, cada exemplar de mesmo traço e nível de

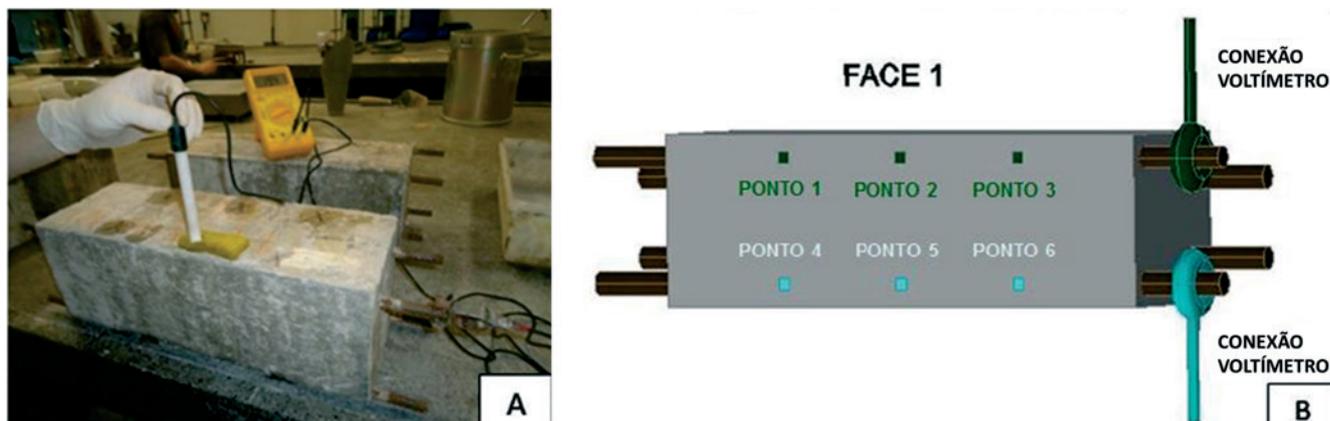


Figura 3

(A) Execução do ensaio para determinação do potencial de corrosão com voltímetro de alta impedância; (B) Posicionamento dos pontos de leituras com o voltímetro

contaminação proporcionou 6 leituras referentes às 2 barras de mesmo cobrimento. O resultado foi um total de 12 leituras, considerando os 2 exemplares para cada traço, cada espessura de cobrimento e cada nível de contaminação por cloretos. A Figura 3 mostra um esquema dos pontos de leitura em uma face do corpo de prova.

Para viabilizar a determinação do teor de umidade dos corpos de prova, aos 70 e 98 dias, foi necessário obter as massas dos corpos de prova no momento da realização das leituras do potencial de corrosão. A massa dos corpos de prova no estado seco foi obtida com a secagem dos mesmos em estufa a 60 °C até constância de massa, logo ao final da Fase 2 e nos mesmos corpos de prova usados em todo o monitoramento. O teor de umidade foi obtido como um percentual da massa dos corpos de prova em estado seco.

Todos os resultados deste experimento foram analisados através do método estatístico de análise de variância (ANOVA).

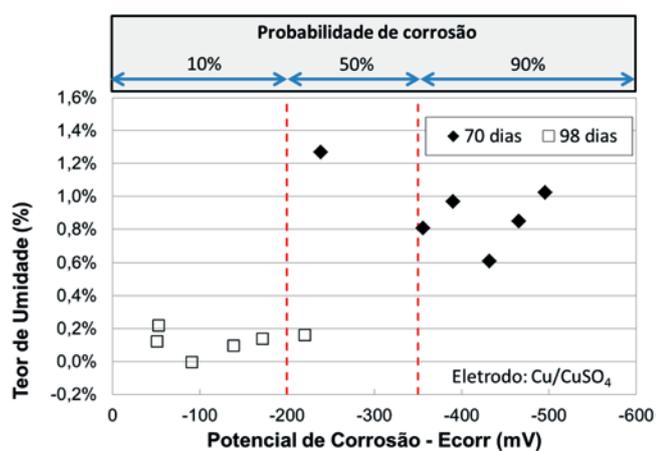


Figura 4

Correlação entre o potencial de corrosão e o teor de umidade

4. Resultados e discussões

4.1 A influência do teor de umidade

O efeito do teor de umidade no interior dos corpos de prova, de maneira geral, foi analisado em dois momentos: aos 70 dias (Fase 1) e aos 98 dias (Fase 2). Estas datas foram escolhidas por serem extremos de duas condições adversas de monitoramento, em primeiro momento com umidade relativa do ar acima dos 95% e em segundo momento em ambiente laboratorial, com temperatura média de 23°C e umidade relativa entre 65 e 75%. Os resultados são apresentados na Figura 4.

Vale salientar que os dados de potencial de corrosão para a Fase 3 (idade entre 425 e 450 dias) não foram usados nesta avaliação, porque as idades das amostras são demasiadamente diferentes entre si, podendo comprometer a comparação dos dados.

Pode-se observar que o potencial de corrosão se apresenta mais negativo para maiores teores de umidade, assim como também evidenciado por Elsener *et al.* [7] e Leelalerkiet *et al.* [33]; ou seja, os potenciais de corrosão aos 70 dias medidos nos corpos de prova que se encontravam em ambiente úmido (saturado) são mais negativos que os potenciais de corrosão aos 98 dias (secagem em ambiente de laboratório entre 71 e 98 dias), quando os corpos de prova encontravam-se com menor teor de umidade.

A interação entre o teor de umidade e o potencial de corrosão é significativa e este fato foi evidenciado através da análise de variância ANOVA (Tabela 4), onde o valor de F calculado é maior do que o F crítico tabelado para 95% de significância. Este comportamento é coerente com a recomendação de Helene [5] e Poursaeed e Hansson [34] de saturar previamente as peças de concreto armado (pelo menos uma hora antes) para iniciar as leituras de potencial de corrosão. Segundo Medeiros *et al.* [15], esta prática é adotada em trabalhos de inspeção de estruturas de concreto armado para colocar a condição de leitura de potencial de corrosão na pior condição possível. A tendência de o valor de potencial de corrosão ficar mais negativo a medida que o concreto fica mais úmido é fundamentado na elevação da condutividade elétrica do concreto, que facilita o

Tabela 4

Tratamento estatístico – ANOVA para a interação entre o teor de umidade e o potencial de corrosão (95% de significância)

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F _{calculado}	F _{crítico}	Fator
Níveis de umidade	433107,512	1	433107,512	31,370	4,301	Significativo
Dentro dos grupos	303740,667	22	13806,394	-	-	-
Total	736848,179	23	-	-	-	-

contato elétrico entre o eletrodo de referência e a barra de aço, que é o foco da medição do estado de corrosão. Gonzalez *et al.* [24] também discutem a importância da umidade nas leituras de potencial de corrosão. Segundo esses autores, o mesmo aço embebido em concreto carbonatado ou contaminado por cloretos pode indicar probabilidade de corrosão ativa ou passiva seguindo a classificação da ASTM standard C-876/2015 [18], dependendo do grau de umidade do concreto no momento do trabalho de inspeção.

Vale destacar que a partir deste ponto, as interpretações serão colocadas fundamentadas na técnica de análise de variância (ANOVA), porém as tabelas similares a Tabela 4 não serão apresentadas para não deixar o trabalho extenso.

4.2 A influência da relação água/cimento

Na sequência se apresentam análises para as três fases do experimento, verificando a influência da relação água/cimento sobre o potencial de corrosão.

4.2.1 Fase 1

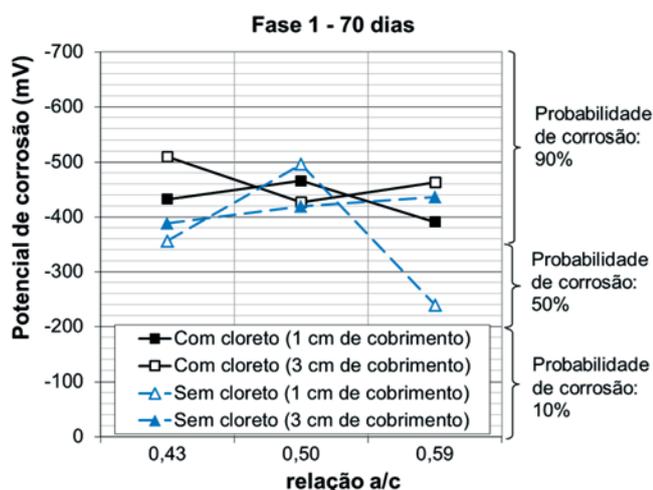
Na fase 1 os corpos de prova permaneceram em condição de cura

em câmara úmida. A Figura 5 não indica uma tendência clara da influência da relação água/cimento nas leituras de potencial de corrosão. Porém, usando ANOVA com 95% de significância, o efeito da relação água/cimento é considerado significativo.

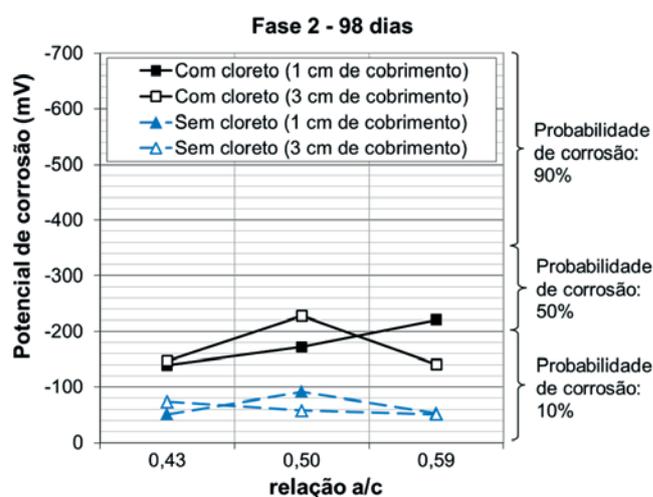
Nota-se que para todos os casos, inclusive para os traços sem cloreto, os valores de potencial de corrosão estão muito negativos nesta fase, indicando que existe alguma atividade do processo de corrosão na superfície das barras. Isso se deve a formação da película passivadora das armaduras dentro do concreto altamente alcalino, conforme também observado em outros estudos. Araújo [35] constatou que a formação da película passivadora para as relações água/cimento iguais a 0,40 e 0,70 ocorreu após 130 dias, identificada pelos potenciais de corrosão maiores do que -200 mV e dos valores de velocidade de corrosão menores do que 0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Sabe-se que esta película é formada por óxidos de ferro e, estando ela em formação, é normal a ocorrência de valores de potencial de corrosão mais negativos do que -350 mV, indicando processo de corrosão ativo.

4.2.2 Fase 2

Após a retirada dos corpos de prova da condição de cura em câmara úmida, os mesmos foram transferidos ao ambiente

**Figura 5**

Influência da relação água/cimento sobre o potencial de corrosão com diferentes traços – Fase 1

**Figura 6**

Influência da relação água/cimento sobre o potencial de corrosão com diferentes traços – Fase 2

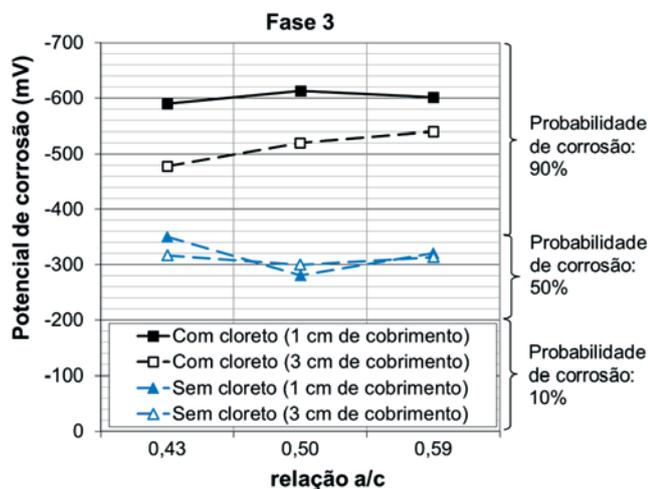


Figura 7
Influência da relação água/cimento sobre o potencial de corrosão com diferentes traços – Fase 3

laboratorial, com a temperatura média de 23°C e umidade relativa entre 65 e 75%. Os corpos de prova ficaram nesta condição por 28 dias, período designado como Fase 2. Pela Figura 6, em comparação com a Figura 5 (Fase 1), nota-se que os potenciais alcançaram valores menos negativos, principalmente em se tratando dos corpos de prova sem contaminação por cloretos. Isso pode ser explicado pela diminuição da umidade no interior do concreto frente à nova condição de monitoramento, retardando o processo de corrosão no interior das estruturas. Observou-se ainda que, em praticamente todos os casos, as médias do potencial de corrosão ficaram localizadas na zona de probabilidade de corrosão de 10%. Quanto à influência da relação água/cimento, permanece nesta fase a falta de tendência clara sobre as leituras de potencial de corrosão, conforme apresentado na Figura 6. Entretanto, com o método estatístico de análise de variância, considerando 95% de

significância, mais uma vez foi constatado que existe influência significativa da relação água/cimento.

4.2.3 Fase 3

A Fase 3 de leituras compreendeu 3 ciclos de imersão e secagem durante 21 dias consecutivos. Os gráficos foram obtidos segundo dados de 16 dias de ciclagem, considerada a data representativa do período em que os corpos de prova foram retirados da condição de imersão para a última semana de leituras. A Figura 7 mostra o resultado das leituras de potencial de corrosão no 16º dia do período de ciclagem, ou seja, logo após a saída do último período de imersão do ciclo.

Com relação às faixas de probabilidade de corrosão, nota-se que os níveis de potencial de corrosão para os traços com ou sem cloretos são bem definidos, com maior probabilidade de corrosão (90%) nos concretos contaminados e zona de incerteza para os concretos não contaminados por cloretos.

Quanto à relação água/cimento, verifica-se mais clara influência sobre as leituras de potencial de corrosão do traço com cloretos, o que pode ser comprovado com o método estatístico de análise de variância, usando 95% de significância. Já para o traço sem cloreto, a análise de variância indicou que a relação água/cimento não exerceu influência direta sobre os resultados. Desse modo, fica evidente que a influência da relação água/cimento se torna importante por apresentar uma tendência clara de influência quando o concreto armado está contaminado por cloretos e com umidade interna suficiente para favorecer o processo de corrosão. Verifica-se que quanto maior a relação água/cimento do concreto contaminado por cloretos, mais eletronegativos são os valores do potencial de corrosão. Este resultado é explicado pelo fato que a rede de poros formada no concreto com maior relação água/cimento tende a proporcionar maior entrada de água, que reduz a resistividade elétrica do sistema e tende a tornar os valores de potencial de corrosão mais eletronegativo, no caso dos concretos com armadura despassivada por cloretos.

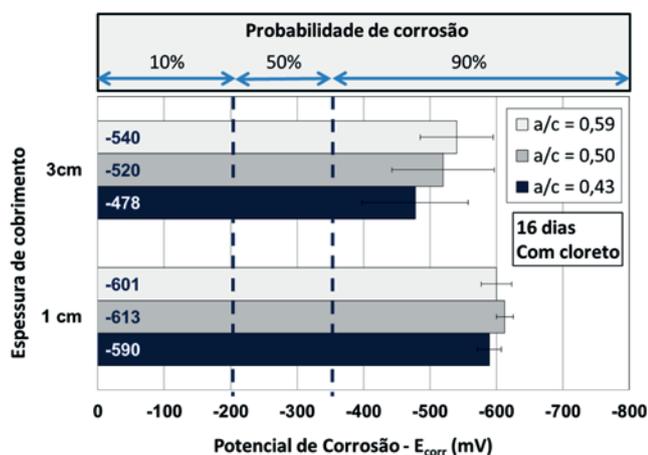


Figura 8
Influência do cobrimento sobre o potencial de corrosão com a/c= 0,43; 0,50 e 0,59 – com cloreto

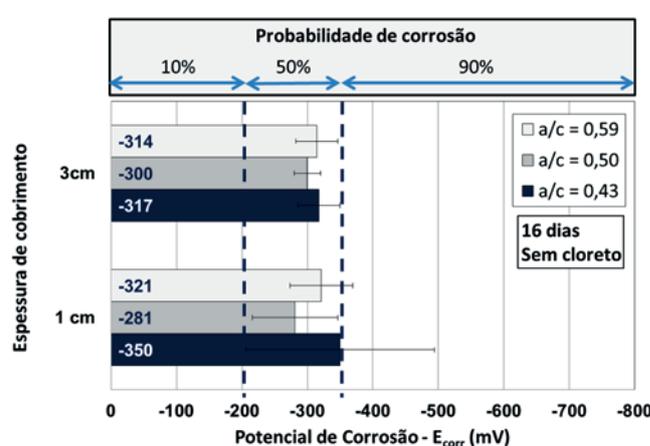


Figure 9
Influência do cobrimento sobre o potencial de corrosão com a/c=0,43; 0,50 e 0,59 – sem cloreto

4.3 A influência da espessura do cobrimento

A Figura 8 mostra o resultado das leituras de potencial de corrosão no 16º dia do período de ciclagem (Fase 3) para o caso de concreto contaminado por cloretos. Observa-se que os valores de desvio padrão para o cobrimento igual a 3 cm foram maiores se comparados com os do cobrimento igual a 1 cm. Isso pode ser explicado, pois quanto maior a espessura de cobrimento, pior as condições de contato elétrico entre o eletrodo de trabalho (barra de aço) e o eletrodo de referência. Pela análise de variância para o caso de contaminação por cloretos é possível afirmar que a espessura de cobrimento influencia diretamente as leituras de potencial de corrosão, segundo intervalo de confiança igual a 95%.

A Figura 9 apresenta os dados relativos aos concretos não contaminados com cloretos. Neste caso o efeito da espessura de cobrimento não é relevante, como confirmado pela análise de variância aplicada com 95% de nível de significância. Coca *et al.* [36] realizaram um experimento semelhante em que foi investigada a influência da variação da espessura de cobrimento da armadura (1,5; 2,0 e 3,0 cm foram testados) nas leituras de potencial de corrosão para concretos com a relação a/c de 0,45 e de 0,60. Neste estudo, os concretos não estavam contaminados por cloretos, nem carbonatados, e também foi constatado que a espessura de cobrimento não tem influência significativa nas leituras de potencial de corrosão.

Comparando as Figuras 8 e 9, nota-se que a influência do cobrimento nas leituras de potencial de corrosão é diferente para o concreto contaminado por cloretos e para o concreto não contaminado. Desse modo, a espessura do cobrimento é um fator de influência importante no primeiro caso e no segundo caso não tem importância nos resultados.

As faixas de probabilidade de corrosão também são quesitos a serem levados em consideração. Nota-se que os níveis de potencial de corrosão para os dois teores de contaminação são bem definidos, com maior probabilidade de corrosão (90%) nos concretos

contaminados com 1% de cloretos em relação à massa de cimento (Figura 8), e classificação como zona de incerteza no caso de concretos não contaminados por cloretos (Figura 9).

4.4 A influência do grau de contaminação por cloretos

Apesar de a comparação das Figuras 8 e 9 já permitir entender o efeito da contaminação do concreto por cloretos no potencial de corrosão, as Figuras 10 e 11 também evidenciam este fato separando por valores de espessura de cobrimento das armaduras, 1 cm e 3 cm, respectivamente.

Nota-se claramente uma diferença entre os resultados, ou seja, uma tendência de valores de potencial de corrosão mais negativos nos casos em que o concreto está contaminado com 1% de cloretos em relação à massa de cimento. Isto pode ser afirmado com 95% de significância tanto para o cobrimento de 1 cm como para o de 3 cm. Este comportamento é explicado pela tendência de elevação da condutividade elétrica proveniente dos íons cloretos no concreto, assim como a atividade de corrosão proporcionada pela presença destes íons, rompendo a película passivadora e instalando o processo de corrosão das armaduras.

González *et al.* [24] também obtiveram dados indicativos que a contaminação por cloretos tende a tornar as leituras de potencial de corrosão mais eletronegativas, corroborando os resultados obtidos na presente pesquisa.

5. Conclusões

Este estudo produziu informações que contribuem para fundamentar os trabalhos de inspeção de estruturas de concreto armado empregando a técnica de potencial de corrosão.

Influência do grau de umidade do concreto: com os dados obtidos neste experimento é possível afirmar com 95% de significância que existe influência do teor de umidade sobre o potencial de corrosão e que maiores teores de umidade tendem a resultar em

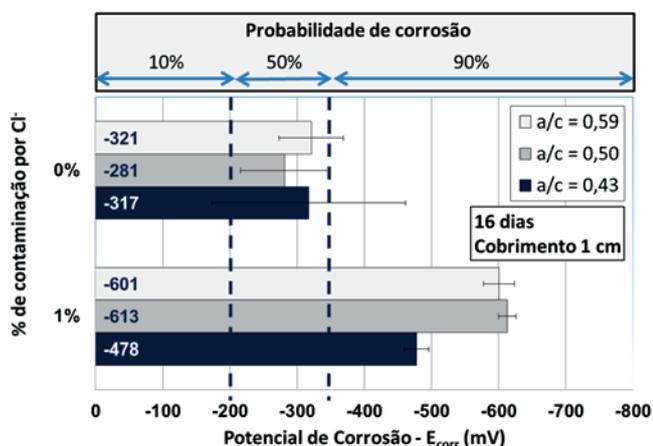


Figura 10
Influência da contaminação por cloretos sobre o potencial de corrosão com a/c=0,43; 0,50 e 0,59 – cobrimento = 1 cm

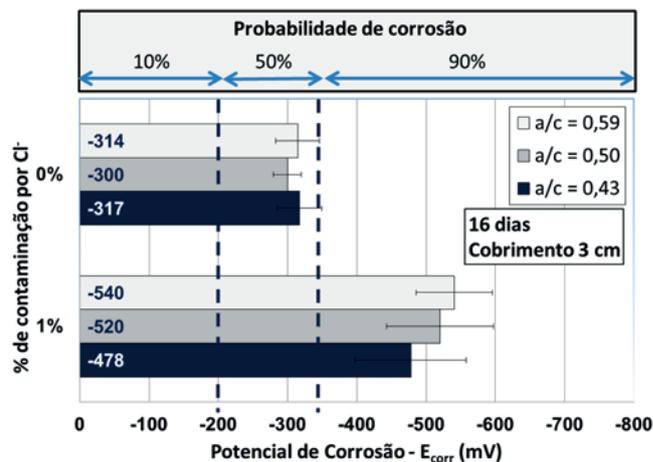


Figura 11
Influência da contaminação por cloretos sobre o potencial de corrosão com a/c=0,43; 0,50 e 0,59 – cobrimento = 3 cm

valores de potencial de corrosão mais eletronegativos devido ao aumento da condutividade elétrica do sistema.

Influência da relação água/cimento: foi possível constatar a influência da relação água/cimento, com a única exceção do traço de concreto sem cloretos na Fase 3, quando os corpos de prova foram expostos ao processo de ciclagem. Porém, vale salientar que não foi possível definir uma tendência clara da influência da relação água/cimento nos dados de potencial de corrosão.

Influência da espessura do cobrimento: foi verificado que a influência do cobrimento é diferente para o caso de concreto contaminado (1% de cloretos em relação à massa de cimento) e não contaminado com cloretos. Com os dados obtidos e pela análise de variância aplicada, nos casos de concretos contaminados por cloretos, é possível afirmar que o cobrimento apresenta influência nas leituras de potencial de corrosão, segundo o intervalo de 95% de confiança. A influência da espessura de cobrimento no caso do concreto contaminado com cloretos é inversa, ou seja, quanto maior o cobrimento, menor o valor do potencial de corrosão. Já nos casos de concretos moldados sem a contaminação por cloretos, o efeito do cobrimento é irrelevante com 95% de significância.

Influência do grau de contaminação por cloretos: com 95% de significância, pode-se afirmar que a contaminação por cloretos influencia os valores de potencial de corrosão. O enquadramento das faixas de probabilidade de corrosão dos dois teores de contaminação deste estudo (0% e 1% de cloretos em relação à massa de cimento) é bem definido, com os concretos não contaminados classificados na zona de incerteza e os concretos contaminados situados na zona de 90% de probabilidade de corrosão. Desse modo, pode-se dizer que a presença de cloretos reduzem os valores de potencial de corrosão.

Quanto aos aspectos práticos de aplicação do método de potencial de corrosão em avaliação de obras de concreto armado, nota-se grande sensibilidade das leituras quanto às idades analisadas na primeira fase do experimento (período de cura úmida por 70 dias). Isso ocorreu devido à formação da camada de óxido de ferro que compõe a película passivadora. Desta maneira, podem-se relacionar erroneamente os potenciais de corrosão da fase de formação da película passivadora, em uma estrutura com poucos meses de construção, com possíveis zonas de corrosão ativa.

É importante registrar que estas constatações são limitadas ao experimento realizado e materiais empregados nesta pesquisa. A generalização das conclusões só é possível com mais estudos envolvendo outros tipos de cimento, a presença de aditivos e de adições minerais, assim como outras variações na dosagem do concreto. Porém, este trabalho contribui mostrando a importância do controle do acesso da umidade ao concreto armado, da espessura de cobrimento das armaduras e da influência do grau de contaminação no resultado do potencial de corrosão de armaduras em estruturas de concreto.

6. Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação Araucária pela concessão de bolsas e pelo financiamento dos equipamentos que deram suporte a esta pesquisa.

7. Referências bibliográficas

- [1] ANDRADE, C.; ALONSO, C. On-site measurements of corrosion rate of reinforcements. *Construction and Building Materials*, v.15, n.2-3, 2001, p.141-145.
- [2] ASSOULI, B.; BALLIVY, G.; RIVARD, P. Influence of environmental parameters on application of standard ASTM C876-91: half cell potential measurements. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, v.43, n.1, 2008, p. 93-96.
- [3] MEDEIROS-JUNIOR, R.A.; LIMA, M.G. Electrical resistivity of unsaturated concrete using different types of cement. *Construction and Building Materials*, v.107, 2016, p.11-16.
- [4] LIAM, K.C.; ROY, S.K.; WOOD, D.O.N. Chloride ingress measurements and corrosion potential mapping study of a 24-year-old reinforced concrete jetty structure in a tropical marine environment. *Magazine of Concrete Research*, v.44, n.160, 1992, p.205-215.
- [5] HELENE, P. R. L. Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. 231f. Tese (Livre docência) – University of São Paulo (USP), São Paulo, 1993.
- [6] BROOMFIELD, J.P.; DAVIES, K.; HLADKY, K. The use of permanent corrosion monitoring in new and existing reinforced concrete structures. *Cement and Concrete Composites*, v.24, n.1, 2002, p.27-34.
- [7] ELSENER, B.; ANDRADE, C.; GULIKERS, J.; POLDER, R.; RAUPACH, M. Half-cell potential measurements – Potential mapping on reinforced concrete structures. *Materials and Structures*, v.36, 2003, p. 461-471.
- [8] FELIU, S.; GONZÁLEZ, J.A.; MIRANDA, J.M.; FELIU, V. Possibilities and problems of in situ techniques for measuring steel corrosion rates in large reinforced concrete structures. *Corrosion Science*, v.47, n.1, 2005, p.217-238.
- [9] HELENE, P.; PEREIRA, F.; CASTRO, P. Performance of a 40-Year-Old Concrete Bridge with Embedded, Prestressed Galvanized Strands. *Materials Performance*, v.43, n.10, 2006, p.42-45.
- [10] POUPARD, O.; L'HOSTIS, V.; CATINAUD, S.; PETRE-LAZAR, I. Corrosion damage diagnosis of a reinforced concrete beam after 40 years natural exposure in marine environment. *Cement and Concrete Composites*, v.36, n.3, 2006, p.504-520.
- [11] CASTRO-BORGES, P.; ORDAZ, J.M. Corrosion Performance of Concrete Columns after Localized Repairs in a Tropical Coastal Environment. *Corrosion*, v.65, n.2, 2009, p. 118-125.
- [12] MEDEIROS, M.H.F.; GIORDANO, D.E.; PEREIRA, E.; VIGNOLIO, A.; GALEANO, R.; HELENE, P. Inspeção no palácio de la luz - Montevideo: uma visão de durabilidade. *Revista Alconpat*, v.2, 2012, p.94-109.
- [13] CASTRO-BORGES, P.; TORRES-ACOSTA, A.; BALANCANZAPATA, M.; LOPEZ-GONZALEZ, A. Análisis de daños por la interacción de cargas ambientales y estructurales en una subestructura marina. *Revista de la Construcción*, v.11, n.3, 2012, p. 88-98.
- [14] MEDEIROS, M.H.F.; KNUUTILA, M.; PEREIRA, E.; HELENE, P. Inspection of buildings in Rio de Janeiro-Brazil: Proving the greater tendency of corrosion at the base of

- reinforced concrete columns using potential corrosion technique. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, v.2, 2013, p.102-112.
- [15] MEDEIROS, M.H.F.; GOBBI, A.; RÉUS, G.C.; HELENE, P. Reinforced concrete in marine environment: Effect of wetting and drying cycles, height and positioning in relation to the sea shore. *Construction & Building Materials*, v.44, 2013, p.452-457.
- [16] ELSENER, B. Half-cell potential mapping to assess repair work on RC structures. *Construction and Building Materials*, v.15, 2001, p.133-139.
- [17] McCARTER, W. J.; VENNESLAND, Ø. Sensor systems for use in reinforced concrete structures. *Construction and Building Materials*, v.18, 2004, p.351-358.
- [18] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C-876: Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. Philadelphia, 2015.
- [19] PRADHAN, B.; BHATTACHARJEE, B. half-cell potential as an indicator of chloride-induced rebar corrosion initiation in RC. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 21, n. 10, 2009, p. 543-552.
- [20] ROMANO, P.; BRITO, P.S.D.; RODRIGUES, L. Monitoring of the degradation of concrete structures in environments containing chloride ions. *Construction & Building Materials*, v.47, 2013, p.827-832.
- [21] ROCHA, F. C. Leituras de potencial de corrosão em estruturas de concreto armado: influência da relação água/cimento, da temperatura, da contaminação por cloretos, da espessura de cobertura e do teor de umidade do concreto. Dissertation (Master in Civil Construction) – Federal University of Paraná (UFPR), 2012.
- [22] SONG, H.; SARASWARHY, V. Corrosion monitoring of reinforced concrete structures – A review. *International Journal of Electrochemical Science*, v.2, 2007, p.1-28.
- [23] DARBY, J.; CAPELING, G.; GEORGE, C.; DILL, M.; HAMERSLEY, G. Testing and monitoring the durability of concrete structures. Draft – Concrete bridge development group – Technical guide n.2, 1999, Londres.
- [24] GONZÁLEZ, J.A.; MIRANDA, J.M.; FELIU, S. Considerations on reproducibility of potential and corrosion rate measurements in reinforced concrete. *Corrosion Science*, v. 46, 2004, p.2467-2485.
- [25] PARTHIBAN, T.; RAVI, R.; PARTHIBAN, G.T. Potential monitoring system for corrosion of steel in concrete. *Advances in Engineering Software*, v.37, 2006, p.375-381.
- [26] MEDEIROS, M.H.F.; BALBINOT, G.B.; HELENE, P. Inspeção em prédios no Rio de Janeiro: corrosão em pilares. *Concreto & Construção*, v.57, n.38, 2010, p.58-66.
- [27] POUR-GHAZ, M.; ISGOR, O.; GHODS, P. Quantitative interpretation of half-cell potential measurements in concrete structures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v.21, n.9, 2009, p. 467-475.
- [28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- [29] THOMAS, M.D.A. Chloride thresholds in marine concrete. *Cement and Concrete Research*, v.26, n.4, 1996, p. 513-519.
- [30] NYGAARD, P.V.; GEIKER, M.R. A method for measuring the chloride threshold level required to initiate reinforcement corrosion in concrete. *Materials and Structures*, v.38, 2005, p. 489-494.
- [31] TUTIKIAN, B.; HELENE, P. Dosagem dos Concretos de Cimento Portland. In: *Concreto: Ciência e Tecnologia*, ISAIÁ, G. C. (Ed.), IBRACON, São Paulo, 2011, p. 415-452.
- [32] MEDEIROS, M. H. F. Estruturas de concreto armado com corrosão de armaduras causada por carbonatação: estudo comparativo de argamassas de reparo quanto à proteção do aço. 2008. 193f. Dissertation (Master in Civil and Urban Engineering) – University of São Paulo (USP), São Paulo, 2002.
- [33] LEELALERKIET, V.; KYUNG, J.; OHTSU, M.; YOKOTA, M. Analysis of half-cell potential measurement for corrosion of reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, v. 18, 2004, p. 155–162.
- [34] POURSAEE, A.; HANSSON, C.M. Potential pitfalls in assessing chloride-induced corrosion of steel in concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 39, 2009, p. 391–400.
- [35] ARAÚJO, A. Estudo para o estabelecimento de metodologia de avaliação de vernizes na proteção ao concreto armado contra a penetração de agentes agressivos. 2004. 195f. Dissertation (Master in Civil Engineering) - Institute of Technological Research of the State of São Paulo (IPT), São Paulo, 2004.
- [36] COCA, F.J.O.; ALMERAYA-CALDERÓN; CARMONA, V.M.O.; BORUNDA, A.; TIBURCIO, C.G.; VILLAFÁÑE, A.M.; TORRES, A. Influence of environmental and electrochemical factors in the durability of concrete. *Portugaliae Electrochimica Acta*, v. 22, 2004, p. 321-334.