

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL -  
PPGECC

FRANCIELLE CRISTINE DA ROCHA

**LEITURAS DE POTENCIAL DE CORROSÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO  
ARMADO: INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO, DA TEMPERATURA,  
DA CONTAMINAÇÃO POR CLORETOS, DA ESPESSURA DE COBRIMENTO E  
DO TEOR DE UMIDADE DO CONCRETO**

**CURITIBA  
2012**

FRANCIELLE CRISTINE DA ROCHA

**LEITURAS DE POTENCIAL DE CORROSÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO  
ARMADO: INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO, DA TEMPERATURA,  
DA CONTAMINAÇÃO POR CLORETOS, DA ESPESSURA DE COBRIMENTO E  
DO TEOR DE UMIDADE DO CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Área de concentração em Materiais e Estruturas, Departamento de Construção Civil, Setor de tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção de título de “Mestre em Engenharia de Construção Civil”

Orientador:  
Prof. Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros.

**CURITIBA  
2012**

Rocha, Francielle Cristine da

Leituras de potencial de corrosão em estruturas de concreto armado: influência da relação água/cimento, da temperatura, da contaminação por cloretos, da espessura de cobrimento e do teor de umidade do concreto / Francielle Cristine da Rocha – Curitiba, 2012.

102 f. : il., tab.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil.

Orientador: Marcelo Henrique Farias de Medeiros

1. Concreto armado. 2. Aço - Corrosão. 3. Água - absorção. I. Medeiros, Marcelo Henrique Farias de. II. Título.

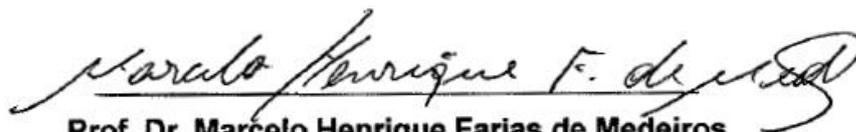
CDD 620.136

## TERMO DE APROVAÇÃO

FRANCIELLE CRISTINE DA ROCHA

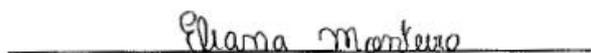
### LEITURAS DE POTENCIAL DE CORROSÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO: INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO, DA TEMPERATURA, DA CONTAMINAÇÃO POR CLORETOS, DA ESPESSURA DE COBRIMENTO E DO TEOR DE UMIDADE DO CONCRETO

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:



**Prof. Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros**

**Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná  
(Orientador)**



**Profa. Dra. Eliana Cristina Barreto Monteiro**

**Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco  
(Examinadora)**



**Profa. Dra. Marlene do Rocio de Mello Maron da Costa**

**Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná  
(Examinadora)**

Curitiba, 12 de junho de 2012.

**À Deus.**

**À minha mãe Rocio, Vó Maria e Vô Avelino  
(*in memoriam*).**

**Ao meu noivo Marcelo.**

**Por todo o amor, por quem sou e por tudo  
que alcancei.**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por mais esta vitória em minha vida. Graças a ele eu encontrava conforto no silêncio para persistir nos meus objetivos.

À minha mãe e vó: nunca consegui expressar espontaneamente o quanto eu amo vocês, mas saibam que eu sou muito agradecida por tudo que fizeram por mim até agora! Vô queria muito que estivesse aqui fisicamente para receber seu conforto nos momentos que mais precisei... Tenho certeza que está comemorando mais esta etapa em minha vida onde estiver!

Ao meu noivo Marcelo, pelos conselhos e incentivo a todo o momento! Te amo muito!

Aos meus tios, primos e padrinhos, meu muito obrigado pelo apoio.

Aos meus amigos da Universidade, em especial à Alessandra, Eduardo e Gustavo: mais do que amigos, eu tenho companheiros para todas as horas! Graças a vocês estou aqui agora. Essa vitória é de vocês também! MUITÍSSIMO obrigada por tudo mesmo!

Às minhas amigas desde a graduação: Beatriz, Bruna, Dayanna, Débora, Fabiola, Élide e Karoline... Saibam que de alguma forma (mesmo à distância), vocês me deram forças para persistir nos meus objetivos!

Às minhas amigas Graci e Camilla: obrigada pelo apoio e por me ouvir nos momentos difíceis!

Ao pessoal do Lactec, onde o sonho de ingressar no mestrado começou: Professor Chamecki, Alkimin e Betina: sou eternamente agradecida pelo apoio, ensinamentos e crescimento (pessoal e profissional) que eu tive no LAME.

Aos meninos do laboratório "PESADOS": Eduardo, Eustáquio, Jeferson, Marcio e Marcel, obrigado pelo apoio recebido, principalmente nos momentos em que não poderia estar diretamente na UFPR para acompanhar todos os ensaios!

Aos meus colegas de trabalho, que sempre me incentivaram e torceram em mais esta etapa na minha vida. Obrigada pelo apoio e confiança conquistados em pouco tempo.

À equipe de professores do PPGECC, pela confiança no meu trabalho e conceder-me mais esta chance para terminar minha dissertação!

À Professora Juliana Casali, pela colaboração nos ensaios de absorção.

Ao Guilherme Calixto, Mauro e Aline, que me ajudaram desde o início dos ensaios.

À todas as pessoas que, embora não tenham sido mencionadas, contribuíram grandemente para a realização deste trabalho.

Por fim, quero agradecer as duas pessoas que fizeram o projeto de mestrado acontecer em tão pouco tempo: Professor Marcelo Medeiros e Tomás Lima. Não tenho palavras para expressar o quanto sou agradecida, por terem “abraçado” esta causa e se dedicarem tanto para que o a dissertação ficasse pronta! Os méritos são todos seus!

“Seja a mudança que você quer ver no mundo.”

Dalai Lama

## RESUMO

A técnica de potencial de corrosão, desde sua primeira descrição em laboratórios americanos pela equipe de Stratfull em 1957, é utilizada como um método eletroquímico de auxílio ao monitoramento da corrosão das armaduras de estruturas de concreto armado. Com os resultados obtidos durante a aplicação do método, é comum que se faça o mapeamento de valores através de isolinhas de potencial de corrosão, de modo a identificar regiões com armadura comprometida e como se distribui o processo de despassivação do aço na região em estudo. Porém, o método sofre a influência de inúmeros fatores ligados ao concreto, ao ambiente e aos procedimentos adotados no momento da efetuação das leituras. Este é o foco deste trabalho, estudar alguns dos possíveis fatores de influência nas medidas de potencial de corrosão a fim de fornecer informações para orientar o meio técnico e científico que façam uso deste tipo de técnica de avaliação não destrutiva. Os parâmetros avaliados são a relação água/cimento do concreto, a temperatura do sistema concreto/armadura, a espessura de cobrimento, o estado de contaminação por cloretos e teor de umidade do concreto. Os dados foram avaliados utilizando a ferramenta estatística denominada análise de variância (ANOVA) e pode-se dizer que a espessura do cobrimento e a relação água/cimento não apresentaram influência significativa nos resultados do monitoramento realizado. Por outro lado, a temperatura, o teor de umidade do concreto e o grau de contaminação apresentaram influência relevante nos resultados.

**Palavras chave:** potencial de corrosão, concreto armado, ensaio não destrutivo, inspeção, durabilidade.

## ABSTRACT

The technique potential corrosion, since its first description in American laboratories by Stratfull team in 1957, is used as an electrochemical method that helps the monitoring of corrosion in reinforcement of concrete structures. With the results obtained during the application of the method, it is common to do the mapping of values through isolines of potential corrosion, in order to identify regions with damaged bars and how the depassivation process in concrete bars distributes in the study area. However, the method is influenced by many factors related to concrete, the environment and the procedures adopted during the measuring time. This is the focus of this work, to study some of the possible factors that influence on the potential corrosion measurements in order to provide information to guide scientific and technical areas to make use of this technique for nondestructive testing. The evaluated parameters are the water / cement ratio of concrete, the temperature of the concrete system/bars, the concrete cover, the state of chloride contamination and humidity of concrete. Data were evaluated using the statistical tool called analysis of variance (ANOVA) and can be said that the concrete cover and the water / cement ratio does not have significant effect on the results of monitoring performed. Moreover, temperature, humidity of concrete and the degree of contamination presented important influence on the results.

**Keywords:** Corrosion potential, reinforced concrete, nondestructive testing, inspection, durability.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. INTERAÇÃO ENTRE O CONCRETO E OS AGENTES AGRESSIVOS (NEPOMUCENO, 1992 APUD MONTEIRO, 2002). .....	17
FIGURA 2. EFEITO DO CONTEÚDO DO C <sub>3</sub> A DO CIMENTO, NO TEMPO DE INICIAÇÃO DA CORROSÃO DA ARMADURA DO CONCRETO (RASHEEDUZZAFAR ET AL., 1990). .....	20
FIGURA 3. ELETRODO DE REFERÊNCIA DE COBRE/SULFATO DE COBRE, CSE (HELENE, 1993). .....	24
FIGURA 4. CONFIGURAÇÃO DO CIRCUITO PARA DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO (ASTM C 876:2009). .....	25
FIGURA 5. INFLUÊNCIA DO COBRIMENTO DAS ARMADURAS NAS LEITURAS DE POTENCIAL DE CORROSÃO (ELSENER E BOHNI, 1990 APUD HELENE, 1993). .....	27
FIGURA 6. LIMITES DE REFERÊNCIA PARA TRABALHOS DE MANUTENÇÃO EM PONTES (WALLBANK, 1989 APUD HELENE, 1993). .....	31
FIGURA 7. EXEMPLO DE MAPA DE POTENCIAL DE CORROSÃO REPRESENTANDO AS LINHAS DE ISOPOTENCIAIS. ....	34
FIGURA 8. FLUXOGRAMA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL. ....	37
FIGURA 9. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS. ....	39
FIGURA 10. COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO. ....	42
FIGURA 11. COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO GRAUÍDO – BRITA 9,5/25. ....	42
FIGURA 12. PROCEDIMENTOS DE LIMPEZA DAS ARMADURAS: (A) IMERSÃO EM ACETONA; (B) IMERSÃO EM SOLUÇÃO DE HCL, ÁGUA E HEXAMETILENOTETRAMINA; (C) LAVAGEM EM ÁGUA; (D) SECAGEM DAS ARMADURAS COM PAPEL TOALHA. ....	43
FIGURA 13. ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NOS CORPOS DE PROVA. ....	46
FIGURA 14. (A) ESQUEMA DO ENSAIO DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL; (B) EXECUÇÃO DO ENSAIO NA PRENSA DE RUPTURA. ....	46
FIGURA 15. (A) EXECUÇÃO DO ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO COM MULTÍMETRO DE ALTA IMPEDÂNCIA; (B) POSICIONAMENTO DOS PONTOS DE LEITURAS E MULTÍMETRO. ....	48
FIGURA 16. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS ENSAIOS REALIZADOS EM CADA ETAPA DO MONITORAMENTO E AS VARIÁVEIS DE RESPOSTA ANALISADAS. ....	49
FIGURA 17. ENSAIO DE ANÁLISE DE POTENCIAL DE CORROSÃO SOB SEGUNDO GRADIENTE DE TEMPERATURA. ....	50
FIGURA 18. ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR SUCÇÃO CAPILAR DE ACORDO COM A NBR 9779:1995. ....	52
FIGURA 19. FIXAÇÃO DO CACHIMBO NA FACE DE ARMADURA EXPOSTA. ....	53
FIGURA 20. TRAÇOS 1:3 (A/C=0,43), 1:4 (0,50) E 1:5 (0,59): (A) MÉDIAS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO; (B) TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL. ....	55
FIGURA 21. CORRELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DOS CORPOS DE PROVA SEM CONTAMINAÇÃO POR CLORETOS. ....	56
FIGURA 22. EVOLUÇÃO DOS POTENCIAIS DE CORROSÃO AO LONGO DO PERÍODO MONITORADO NO PRIMEIRO ANO (FASES 1 E 2 – ELETRODO CU/CUSO <sub>4</sub> ) - TRAÇO 1:3 (A/C=0,43). ....	58
FIGURA 23. EVOLUÇÃO DOS POTENCIAIS DE CORROSÃO AO LONGO DO PERÍODO MONITORADO NO PRIMEIRO ANO (FASES 1 E 2 – ELETRODO CU/CUSO <sub>4</sub> ) - TRAÇO 1:4 (A/C=0,50). ....	59

FIGURA 24.	EVOLUÇÃO DOS POTENCIAIS DE CORROSÃO AO LONGO DO PERÍODO MONITORADO NO PRIMEIRO ANO (FASES 1 E 2 – ELETRODO CU/CUSO <sub>4</sub> ) - TRAÇO 1:5 (A/C=0,59).	59
FIGURA 25.	EVOLUÇÃO DOS POTENCIAIS DE CORROSÃO AO LONGO DO PERÍODO MONITORADO APÓS O PRIMEIRO ANO (FASE 3 – ELETRODO CU/CUSO <sub>4</sub> ) - TRAÇO 1:3 (A/C= 0,43).	60
FIGURA 26.	EVOLUÇÃO DOS POTENCIAIS DE CORROSÃO AO LONGO DO PERÍODO MONITORADO APÓS O PRIMEIRO ANO (FASE 3 – ELETRODO CU/CUSO <sub>4</sub> ) - TRAÇO 1:4.	61
FIGURA 27.	EVOLUÇÃO DOS POTENCIAIS DE CORROSÃO AO LONGO DO PERÍODO MONITORADO APÓS O PRIMEIRO ANO (FASE 3 – ELETRODO CU/CUSO <sub>4</sub> ) - TRAÇO 1:5.	61
FIGURA 28.	INFLUÊNCIA DO COBRIMENTO SOBRE O POTENCIAL DE CORROSÃO COM A/C=0,43; 0,50 E 0,59 - COM CLORETO.	63
FIGURA 29.	INFLUÊNCIA DO COBRIMENTO SOBRE O POTENCIAL DE CORROSÃO COM A/C=0,43; 0,50 E 0,59 - SEM CLORETO.	64
FIGURA 30.	INFLUÊNCIA DO TEOR DE CONTAMINAÇÃO SOBRE O POTENCIAL DE CORROSÃO COM A/C=0,43; 0,50 E 0,59 – COBRIMENTO 1 CM.	65
FIGURA 31.	INFLUÊNCIA DO TEOR DE CONTAMINAÇÃO SOBRE O POTENCIAL DE CORROSÃO COM A/C=0,43; 0,50 E 0,59 – COBRIMENTO 3 CM.	66
FIGURA 32.	INFLUÊNCIA DO COBRIMENTO SOBRE O POTENCIAL DE CORROSÃO COM A/C=0,43; 0,50 E 0,59 - COM CLORETO.	68
FIGURA 33.	INFLUÊNCIA DO COBRIMENTO SOBRE O POTENCIAL DE CORROSÃO COM A/C=0,43; 0,50 E 0,59 - SEM CLORETO.	69
FIGURA 34.	INFLUÊNCIA DO TEOR DE CONTAMINAÇÃO SOBRE O POTENCIAL DE CORROSÃO COM A/C=0,43; 0,50 E 0,59 – COBRIMENTO 1 CM.	70
FIGURA 35.	INFLUÊNCIA DO TEOR DE CONTAMINAÇÃO SOBRE O POTENCIAL DE CORROSÃO COM A/C=0,43; 0,50 E 0,59 – COBRIMENTO 3 CM.	71
FIGURA 36.	INFLUÊNCIA DO COBRIMENTO SOBRE O POTENCIAL DE CORROSÃO COM A/C=0,43; 0,50 E 0,59 - COM CLORETO.	73
FIGURA 37.	INFLUÊNCIA DO COBRIMENTO SOBRE O POTENCIAL DE CORROSÃO COM A/C=0,43; 0,50 E 0,59 - SEM CLORETO.	74
FIGURA 38.	INFLUÊNCIA DO TEOR DE CONTAMINAÇÃO SOBRE O POTENCIAL DE CORROSÃO – COBRIMENTO 1 CM.	76
FIGURA 39.	INFLUÊNCIA DO TEOR DE CONTAMINAÇÃO SOBRE O POTENCIAL DE CORROSÃO – COBRIMENTO 3 CM.	77
FIGURA 40.	REPRESENTAÇÃO DAS DATAS DE ANÁLISE E O TEOR DE UMIDADE.	78
FIGURA 41.	CORRELAÇÃO ENTRE O POTENCIAL DE CORROSÃO E O TEOR DE UMIDADE.	78
FIGURA 42.	CORRELAÇÃO ENTRE O POTENCIAL DE CORROSÃO E O TEOR DE UMIDADE PARA O TRAÇO 1:3 (A/C=0,43) – COBRIMENTO 1 CM: PERÍODO DE 56 A 98 DIAS.	80
FIGURA 43.	CORRELAÇÃO ENTRE O POTENCIAL DE CORROSÃO E O TEOR DE UMIDADE PARA O TRAÇO 1:3 (A/C=0,43) – COBRIMENTO 3 CM: PERÍODO DE 56 A 98 DIAS.	80
FIGURA 44.	CORRELAÇÃO ENTRE O POTENCIAL DE CORROSÃO E O TEOR DE UMIDADE PARA O TRAÇO 1:4 (A/C=0,50) – COBRIMENTO 1 CM: PERÍODO DE 56 A 98 DIAS.	81
FIGURA 45.	CORRELAÇÃO ENTRE O POTENCIAL DE CORROSÃO E O TEOR DE UMIDADE PARA O TRAÇO 1:4 (A/C=0,50) – COBRIMENTO 3 CM: PERÍODO DE 56 A 98 DIAS.	81
FIGURA 46.	CORRELAÇÃO ENTRE O POTENCIAL DE CORROSÃO E O TEOR DE UMIDADE PARA O TRAÇO 1:5 (A/C=0,59) – COBRIMENTO 1 CM: PERÍODO DE 56 A 98 DIAS.	82
FIGURA 47.	CORRELAÇÃO ENTRE O POTENCIAL DE CORROSÃO E O TEOR DE UMIDADE PARA O TRAÇO 1:5 (A/C=0,59) – COBRIMENTO 3 CM: PERÍODO DE 56 A 98 DIAS.	82
FIGURA 48.	INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS LEITURAS DE POTENCIAL DE CORROSÃO EM CONCRETO 1:3 E RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO DE 0,43.	84

FIGURA 49. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS LEITURAS DE POTENCIAL DE CORROSÃO EM CONCRETO 1:3 E RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO DE 0,59. ....	85
FIGURA 50. COMPORTAMENTO DA ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE (%) PARA OS CONCRETOS COM TRAÇOS 1:3 (A/C=0,43), 1:4 (A/C=0,50) E 1:5 (A/C=0,59). ....	86
FIGURA 51. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE NOS CORPOS DE PROVA MOLDADOS COM RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO=0,43. ....	87
FIGURA 52. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE NOS CORPOS DE PROVA MOLDADOS COM RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO=0,50. ....	88
FIGURA 53. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE NOS CORPOS DE PROVA MOLDADOS COM RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO=0,59. ....	88
FIGURA 54. ABSORÇÃO POR IMERSÃO (%) PARA OS CONCRETOS COM TRAÇOS 1:3 (A/C=0,43), 1:4 (A/C=0,50) E 1:5 (A/C=0,59). ....	89
FIGURA 55. TAXA MÉDIA DE ABSORÇÃO PELO MÉTODO DO CACHIMBO PARA OS CONCRETOS COM TRAÇOS 1:3 (A/C=0,43), 1:4 (A/C=0,50) E 1:5 (A/C=0,59). ....	90

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1. EVOLUÇÃO DOS CUSTOS DE INTERVENÇÃO RELATIVA NAS CONSTRUÇÕES (SITTER APUD HELENE E FIGUEIREDO, 2005).....	5
TABELA 2. EVOLUÇÃO DAS FAIXAS DE POTENCIAL DE CORROSÃO E SUA CORRELAÇÃO COM A PROBABILIDADE DE CORROSÃO, SEGUNDO VAN DAVEER (1975) APUD CASCUDO (2005).....	30
TABELA 3. FAIXAS DE POTENCIAL DE CORROSÃO E SUA CORRELAÇÃO COM A PROBABILIDADE DE CORROSÃO, SEGUNDO ASTM C 876:2009.....	30
TABELA 4. NOMENCLATURA DOS CORPOS DE PROVA CONFECCIONADOS DE ACORDO COM AS VARIÁVEIS DE ANÁLISE.....	39
TABELA 5. NOMENCLATURA DOS CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS PARA DETERMINAÇÃO DAS RESISTÊNCIAS.....	40
TABELA 6. COMPOSIÇÃO QUÍMICA E PROPRIEDADES FÍSICAS DO CIMENTO CP II-F-32 (DADOS FORNECIDOS PELO FABRICANTE – RELATÓRIO DE ENSAIOS DO MÊS DE DEZEMBRO/2010).....	41
TABELA 7. RESUMO DAS DOSAGENS REALZADAS PARA CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	45
TABELA 8. CICLOS DE UMEDECIMENTO E SECAGEM.....	49
TABELA 9. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO COBRIMENTO PARA OS TRAÇOS 1:3 (A/C=0,43); 1:4 (A/C=0,50) E 1:5 (A/C=0,59) - COM CLORETO (95% DE SIGNIFICÂNCIA).....	63
TABELA 10. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO COBRIMENTO PARA OS TRAÇOS 1:3 (A/C=0,43); 1:4 (A/C=0,50) E 1:5 (A/C=0,59) – SEM CLORETO (95% DE SIGNIFICÂNCIA).....	64
TABELA 11. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO TEOR DE CONTAMINAÇÃO PARA OS TRAÇOS 1:3 (A/C=0,43); 1:4 (A/C=0,50) E 1:5 (A/C=0,59) – COBRIMENTO 1 CM (95% DE SIGNIFICÂNCIA).....	65
TABELA 12. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO TEOR DE CONTAMINAÇÃO PARA OS TRAÇOS 1:3 (A/C=0,43); 1:4 (A/C=0,50) E 1:5 (A/C=0,59) – COBRIMENTO 3 CM (95% DE SIGNIFICÂNCIA).....	66
TABELA 13. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO COBRIMENTO PARA OS TRAÇOS 1:3 (A/C=0,43); 1:4 (A/C=0,50) E 1:5 (A/C=0,59) - COM CLORETO (95% DE SIGNIFICÂNCIA).....	68
TABELA 14. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO COBRIMENTO PARA OS TRAÇOS 1:3 (A/C=0,43); 1:4 (A/C=0,50) E 1:5 (A/C=0,59) - SEM CLORETO (95% DE SIGNIFICÂNCIA).....	69
TABELA 15. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO TEOR DE CONTAMINAÇÃO PARA OS TRAÇOS 1:3 (A/C=0,43); 1:4 (A/C=0,50) E 1:5 (A/C=0,59) – COBRIMENTO 1 CM (95% DE SIGNIFICÂNCIA).....	70
TABELA 16. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO TEOR DE CONTAMINAÇÃO PARA OS TRAÇOS 1:3 (A/C=0,43); 1:4 (A/C=0,50) E 1:5 (A/C=0,59) – COBRIMENTO 3 CM (95% DE SIGNIFICÂNCIA).....	71
TABELA 17. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO COBRIMENTO PARA OS TRAÇOS 1:3 (A/C=0,43); 1:4 (A/C=0,50) E 1:5 (A/C=0,59) - COM CLORETO (90% DE SIGNIFICÂNCIA).....	74
TABELA 18. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO COBRIMENTO PARA OS TRAÇOS 1:3 (A/C=0,43); 1:4 (A/C=0,50) E 1:5 (A/C=0,59) - SEM CLORETO (95% DE SIGNIFICÂNCIA).....	75
TABELA 19. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO TEOR DE CONTAMINAÇÃO PARA OS TRAÇOS 1:3, 1:4 E 1:5 – COBRIMENTO 1 CM (95% DE SIGNIFICÂNCIA).....	76
TABELA 20. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO TEOR DE CONTAMINAÇÃO PARA OS TRAÇOS 1:3, 1:4 E 1:5 – COBRIMENTO 3 CM.....	77
TABELA 21. TRATAMENTO ESTATÍSTICO – TABELA ANOVA PARA A INTERAÇÃO ENTRE O TEOR DE UMIDADE E O POTENCIAL DE CORROSÃO (95% DE SIGNIFICÂNCIA).....	79

TABELA 22. TRATAMENTO ESTATÍSTICO – TABELA ANOVA PARA A INTERAÇÃO ENTRE O TEOR DE UMIDADE E O POTENCIAL DE CORROSÃO - TRAÇO 1:3 (A/C = 0,43): 95% DE SIGNIFICANCIA.....	83
TABELA 23. TRATAMENTO ESTATÍSTICO – TABELA ANOVA PARA A INTERAÇÃO ENTRE O TEOR DE UMIDADE E O POTENCIAL DE CORROSÃO - TRAÇO 1:4 (A/C = 0,50): 95% DE SIGNIFICANCIA.....	83
TABELA 24. TRATAMENTO ESTATÍSTICO – TABELA ANOVA PARA A INTERAÇÃO ENTRE O TEOR DE UMIDADE E O POTENCIAL DE CORROSÃO - TRAÇO 1:5 (A/C = 0,59): 95% DE SIGNIFICANCIA.....	83
TABELA 25. TRATAMENTO ESTATÍSTICO – TABELA ANOVA PARA ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE (90% DE SIGNIFICANCIA). ....	86
TABELA 26. TRATAMENTO ESTATÍSTICO – TABELA ANOVA PARA ABSORÇÃO POR IMERSÃO (95% DE SIGNIFICANCIA). ....	90
TABELA 27. TRATAMENTO ESTATÍSTICO – TABELA ANOVA PARA ABSORÇÃO PELO MÉTODO DO CACHIMBO (95% DE SIGNIFICANCIA). ....	91
TABELA 28. CLASSIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS VARIÁVES INDEPENDENTES NAS LEITURAS DE POTENCIAL DE CORROSÃO PARA A FASE 1 (PERÍODO DE CURA DE 70 DIAS).....	93
TABELA 29. CLASSIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS VARIÁVES INDEPENDENTES NAS LEITURAS DE POTENCIAL DE CORROSÃO PARA A FASE 2 (PERÍODO DE SECAGEM EM LABORATÓRIO ENTRE 70 E 98 DIAS). ....	94
TABELA 30. CLASSIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS VARIÁVES INDEPENDENTES NAS LEITURAS DE POTENCIAL DE CORROSÃO PARA A FASE 3 (PERÍODO DE CICLAGEM DE IMERSÃO E SECAGEM).....	94

## **LISTA DE SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Society for Testing and Materials

EN – Norma Europeia

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

NBR – Norma Brasileira

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $a/c$  – Relação Água/Cimento;  
 Com  $Cl^-$  - Corpo de prova com adição de íons cloreto;  
 Sem  $Cl^-$  - Corpo de prova sem adição de íons cloreto;  
 $C_3A$  – Aluminato Tricálcico;  
 $C_4AF$  – Ferro Aluminato Tetracálcico  
 $C_3S$  – Silicato Tricálcico;  
 $C_2S$  – Silicato Dicálcico;  
 $ddp$  – Diferença de Potencial;  
 $D_T$  = difusividade efetiva à temperatura T;  
 $D_{T_0}$  = difusividade efetiva à temperatura  $T_0$ ;  
 $E_{corr}$  – Potencial de Corrosão;  
 $F$  – Teste Estatístico F  
 $F_{critico}$  – Teste Estatístico F – tabelado;  
 $gl$  – Graus de liberdade;  
 $i_{corr}$  – Intensidade de Corrente em ampere (A);  
 $k$  = constante da reação;  
 $mV$  – Milivolt;  
 $M\Omega$  – Mega Ohm;  
 $MPa$  – Mega Pascal;  
 $MQ$  – Média Quadrada;  
 $R^2$  - Coeficiente de Correlação  
 Sem  $Cl^-$  - Corpo de prova sem adição de íons cloreto ( $Cl^-$ );  
 $SQ$  – Soma Quadrada  
 $T, T_0$  = temperaturas em K.  
 $t$  – tempo;  
 valor-P – Teste Estatístico P  
 $V$  – Volt;

$\sigma$  – Tensão Superficial;

$\eta$  – Viscosidade.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO TEMA .....	1
1.2 PROBLEMA DE PESQUISA .....	5
1.3 HIPÓTESE DE PESQUISA .....	6
1.4 OBJETIVO .....	7
1.5 CONTEÚDO DO TRABALHO .....	7
<b>2 CORROSÃO DAS ARMADURAS .....</b>	<b>9</b>
2.1 FUNDAMENTOS DA CORROSÃO DO AÇO .....	9
2.2 FATORES QUE INFLUENCIAM O PROCESSO DE CORROSÃO DE ARMADURAS .....	12
2.2.1 Influência do Cobrimento das Armaduras e Camada de Passivação .....	12
2.2.2 Teor de umidade .....	14
2.2.3 Íons cloreto .....	15
2.2.4 Porosidade da estrutura de concreto .....	17
2.2.5 Influência da relação água/cimento .....	18
2.2.6 Influência da composição do cimento .....	19
2.2.7 Influência da elevação de temperatura do concreto .....	21
<b>3 POTENCIAL DE CORROSÃO .....</b>	<b>23</b>
3.1 EQUIPAMENTOS E MÉTODO DE ENSAIO .....	23
3.2 FATORES QUE INFLUENCIAM NAS MEDIDAS DE POTENCIAL DE CORROSÃO .....	26
3.3 MÉTODO DE AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO .....	29
<b>4 PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>35</b>
4.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA .....	35
4.1.1 Variáveis independentes .....	35
4.1.2 Variáveis dependentes .....	36
4.1.3 Variáveis intervenientes .....	36
4.1.4 Corpos de prova .....	37
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS .....	40
4.2.1 Aglomerante hidráulico .....	40
4.2.2 Agregados .....	41
4.2.3 Armaduras de aço carbono e limpeza .....	43
4.2.4 Água .....	43
4.2.5 Concretos estudados .....	44
4.3 ENSAIOS REALIZADOS .....	45
4.3.1 Ensaio de resistência à compressão simples e tração por compressão diametral ....	45
4.3.2 Potencial de Corrosão .....	47
4.3.3 Absorção de água por sucção capilar .....	50
4.3.4 Absorção de água por imersão .....	52
4.3.5 Absorção pelo ensaio do cachimbo .....	52
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>55</b>
5.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E TRAÇÃO NA COMPRESSÃO DIAMETRAL 55	
5.2 POTENCIAL DE CORROSÃO .....	56
5.2.1 Primeira e segunda fases .....	57
5.2.2 Terceira fase .....	60

5.2.3	Correlação entre resultados de potencial e outros parâmetros do estudo.....	62
5.2.3.1	FASE 1: .....	62
5.2.3.2	FASE 2: .....	67
5.2.3.3	FASE 3: .....	72
5.2.3.4	A influência do teor de umidade .....	78
5.2.3.5	A influência da temperatura .....	84
5.3	ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS CONCRETOS EMPREGADOS .....	85
5.3.1	Por sucção capilar .....	85
5.3.2	Absorção de água por imersão.....	88
5.3.3	Absorção pelo método do cachimbo .....	90
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>91</b>
6.1	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....	95
<b>7</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>96</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO TEMA

A deterioração das estruturas é um problema congênito e é decorrente de vários fatores, como o meio em que está inserida, materiais, mão-de-obra empregada, dentre outros. De modo geral, a percepção visual das manifestações patológicas ocorre após as mudanças na estrutura interna dos materiais (no caso, o concreto), sinalizando a ocorrência de alguma anomalia na estrutura. Neste caso, as ferramentas para detecção por meio de inspeções estruturais são objeto de inúmeros estudos, no qual o presente trabalho está concentrado.

Têm-se hoje, no Brasil, um pleno aquecimento do setor da construção civil aliado à tecnologia de ponta disponível para manutenção da durabilidade, aumento da produtividade, dentre outros aspectos relevantes à execução e manutenção das estruturas. Neste âmbito, as práticas e ferramentas empregadas devem ser regidas pelas normas técnicas da ABNT, órgão este que deve preconizar as condições favoráveis à garantia da durabilidade nas estruturas e ao emprego de materiais de qualidade para maior confiabilidade. Estas uma vez baseadas nas melhores práticas e na literatura, procuram empregar de forma balanceada as ferramentas disponíveis em prol da construção de estruturas confiáveis e mais duráveis.

Por outro lado, a falta de disseminação da cultura de inspeções e manutenções preventivas acabam por gerar, em longo prazo, graves problemas estruturais e até mesmo sinistros que interrompem inúmeras vidas. Marcelli (2007), em casos relatados quanto aos sinistros devido à deterioração do aço, afirma que o fenômeno da corrosão tem sido uma das principais causas de sinistros na Construção Civil, acarretando enormes prejuízos financeiros e infelizmente várias vítimas. Para evitar este tipo de problema, ainda sob o ponto de vista do autor, deve-

se dar atenção especial às etapas que compõem a obra, começando pela elaboração correta do projeto e terminando por uma construção primorosa.

Dentre as preocupações atuais presentes na maioria das estruturas, cita-se a corrosão das armaduras, mecanismo de degradação que diminui a capacidade resistente das estruturas em concreto armado. A velocidade da deterioração, nestes casos, é variável de acordo com diversos fatores intrínsecos à execução e utilização das estruturas, como anteriormente mencionados e que serão explicitados na presente pesquisa.

Ademais, a presença de microfissuras e demais danos visíveis associados ao ambiente inserido servem de acesso prioritário quanto à entrada de agentes agressivos no interior das estruturas. Uma vez com acesso direto às armaduras, os agentes agressivos atuam diretamente na despassivação das mesmas, iniciando o processo de corrosão nas armaduras em ação conjunta com o eletrólito (água) e o oxigênio – fenômeno da micro pilha. Pode-se citar a ocorrência desse fenômeno em marquises de concreto armado, onde inúmeras estruturas desabaram causando danos de ordem econômica e social. No levantamento sobre os fatores que levam ao desabamento de marquises, Medeiros e Grochoski (2007) afirmam que a ocorrência de molhagem e secagem é comum nestas estruturas, favorecendo a formação de um microclima que ocasiona o desenvolvimento do processo de corrosão de armaduras de aço de forma acelerada.

Dessa forma, as manifestações perceptíveis após o desencadeamento do processo destrutivo das estruturas, como deslocamentos e aumento considerável do volume das armaduras devido à corrosão, são indícios e motivação para que a comunidade envolvida no meio construtivo possa atentar-se às questões de manutenção e reabilitação das estruturas.

Projetadas para resistir majoritariamente a esforços de tração, as armaduras uma vez despassivadas e danificadas (mudança na estrutura interna das armaduras) geram tensões de tração radial fazendo com que o concreto seja

solicitado às sobrecargas. Como consequência disso, o deslocamento do concreto é a manifestação comumente apresentada nas estruturas de concreto armado. Uma medida preventiva largamente empregada, neste caso, diz respeito ao uso de adições na dosagem do concreto, estudadas desde a fase de projeto e que auxiliam no retardamento do desencadeamento do processo corrosivo.

Cabe salientar que, como medida prioritária na detecção das manifestações, uma primeira avaliação quanto ao contexto da estrutura é prevista para análise dos fatores que interferem no processo corrosivo. São eles: ambiente de exposição, condições da estrutura, cobrimento eficiente ou deficiente, penetração de agentes agressivos ao interior do concreto e até mesmo a análise dos materiais empregados na concretagem. Em primeiro momento, este “check-list” auxilia no mapeamento da estrutura, dando um primeiro parecer acerca da previsão de manifestações passíveis de ocorrência. Podemos citar a entrada de agentes agressivos oriundos do ambiente no concreto, por exemplo, onde favorece a probabilidade de contaminação da estrutura e consequente despassivação da armadura. Com base nesta primeira avaliação, é possível planejar ensaios mais detalhados de modo a determinar fatores de influência mais específicos não detectados na avaliação anterior.

Para os serviços de inspeção de obras de concreto armado, são necessárias pesquisas sobre métodos práticos, confiáveis e de baixo custo, baseados em ensaios não destrutivos. A influência do investimento necessário para a execução das análises é fator determinante para a difusão dos métodos no meio técnico. A dificuldade na implantação de campanhas de inspeção nas estruturas ainda acaba por ser uma barreira pouco a pouco vencida pelos consultores e empresas de inspeção nos dias de hoje.

Diante do exposto, a presente pesquisa explora a análise do comportamento de corpos de prova de concreto armado submetidos aos teores de umidade distintos e incorporação de agentes agressivos, como o caso do cloreto.

Seu monitoramento por meio de leituras de potencial de corrosão ao longo do tempo indica a evolução do processo corrosivo sob condições de cobertura variados, exemplificando situações de cobertura ineficiente e de cobertura de acordo com o estabelecido para a classe de agressividade ambiental II (conforme a ABNT NBR 6118:2007). A influência das variáveis citadas nas leituras de potencial de corrosão é o foco desta pesquisa porque é uma técnica de inspeção e monitoramento de estruturas de concreto armado, com vistas ao processo de corrosão de armaduras, que se enquadra entre as de baixo custo, em comparação às outras técnicas destinadas a este fim. O fato de ser uma técnica mais barata é um fator de incentivo a esta pesquisa porque isso a configura como um método de mais fácil implementação frente a técnicas cujos equipamentos exigem investimentos da ordem de R\$ 70.000,00, muito mais difícil de serem adquiridos por uma empresa de inspeção e diagnóstico de estruturas de concreto armado.

## 1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

As manifestações patológicas presentes nas estruturas de concreto armado dão indícios da ineficiência ou falha dos fatores envolvidos no processo construtivo, que aliados às condições climáticas, aplicação de cargas dinâmicas excessivas e não previstas pelo projeto, vida útil das mesmas, falta de inspeção periódica e manutenção, acabam por acelerar o processo de deterioração nas estruturas.

Decorrentes da ausência de política ou ineficácia de procedimentos de manutenção e reparo, as sobreposições dos efeitos deletérios implicam em custos de ordem exponencial, como demonstrado na Tabela 1 (SITTER<sup>1</sup> *apud* HELENE e FIGUEIREDO, 2005).

TABELA 1. EVOLUÇÃO DOS CUSTOS DE INTERVENÇÃO RELATIVA NAS CONSTRUÇÕES (SITTER APUD HELENE E FIGUEIREDO, 2005).

<b>Tipo de Serviço</b>	<b>Unidades Monetárias</b>
Boa execução	1
Manutenção Preventiva	5
Reparo e Manutenção	25
Restauração e Reforço	125

Embora a política de intervenção ainda seja um assunto pouco empregado, tal panorama leva a questionamentos que motivam o desenvolvimento da presente pesquisa, convergindo para a análise da evolução do potencial de corrosão frente a fatores ambientais, como temperatura e umidade relativa do ar. São eles: Quais fatores ambientais interferem diretamente na evolução da corrosão das estruturas? Quais os fatores (dentre os estudados) potencializam a velocidade da corrosão nas armaduras? Qual a influência dos diferentes traços e contaminação da água por cloretos a se analisar no momento da dosagem? Qual a eficiência do método não destrutivo para determinação de Potencial de Corrosão nas estruturas moldadas?

<sup>1</sup> SITTER, W. R. **Costs for service life optimization the “Law of Fives”**. Comitê Euro International du Beton – CEB. Boletim Técnico. Copenhagen, Denmark, n. 152, p. 131-134, 1983.

Qual a eficiência do revestimento preconizado de acordo com os níveis de agressividade?

Tais problemas vão nortear a análise dos fatores ambientais nos corpos de prova frente ao fenômeno da corrosão nas armaduras.

### 1.3 HIPÓTESE DE PESQUISA

Em linhas gerais, tem-se a correlação do potencial de corrosão nas armaduras com a probabilidade do surgimento e da ocorrência da corrosão nas mesmas. O ensaio não destrutivo envolve aparelhagem de simples manuseio (multímetro de alta impedância acoplado a um eletrodo de referência de cobre/sulfato de cobre), mas exige experiência do operador quanto à interpretação dos resultados. A norma ASTM C-876 (2009) estabelece faixas de variação do potencial determinadas de maneira semi direta nas estruturas.

Em se tratando da análise de resposta do ensaio, Monteiro (2002) cita que o registro do potencial de corrosão em armaduras de concreto é uma técnica limitada, pois fornece apenas informações termodinâmicas do processo de corrosão. Porém, quando da experiência em monitoramento com a técnica referenciada, sabe-se que várias circunstâncias impostas pela contextualização do meio inserido interferem nos resultados de potencial de corrosão. Observou-se também que as leituras se comportam de forma semelhante sob determinadas condições, impostas principalmente pelas variações de temperatura, diferentes espessuras de revestimento do concreto, contaminação por cloretos, relação água/cimento e teor de umidade do concreto.

Baseado nas observações dos pesquisadores, o presente trabalho propõe a análise em conjunto de todas as condições citadas anteriormente, avaliando o grau de influência de cada uma das variáveis no comportamento geral observado.

Para complementação da análise, procurou-se monitorar o comportamento dos corpos de prova durante um período de 17 meses de idade, verificando as interferências visíveis da idade de monitoramento dos mesmos.

#### 1.4 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo principal a análise de alguns possíveis fatores de influência nas leituras de potencial de corrosão. Este objetivo geral pode ser dividido em objetivos específicos, como segue:

- Objetivo Específico 1: Verificação da influência do teor de umidade do concreto e temperatura nas leituras de potencial de corrosão;
- Objetivo Específico 2: Estudar a influência da relação a/c do concreto nas leituras de potencial de corrosão;
- Objetivo Específico 3: Verificação da influência do cobrimento das armaduras nas leituras de potencial de corrosão;
- Objetivo Específico 4: Analisar a influência das leituras de potencial de corrosão no concreto contaminado por cloretos (1% de cloretos em relação a massa de cimento) e do concreto sem contaminação por cloretos.

#### 1.5 CONTEÚDO DO TRABALHO

O presente estudo aborda a análise das variáveis passíveis de influenciar nas leituras de potencial de corrosão em armaduras de concreto armado. Para isso, uma revisão bibliográfica (Capítulos 2 e 3) foi realizada de modo a buscar respostas sobre possíveis comportamentos anômalos quando da corrosão em armaduras e manifestações patológicas oriundas da corrosão em concreto. Dessa forma, a fundamentação da corrosão nas armaduras de concreto armado é abordada com detalhamento no capítulo 2, enquanto que a técnica de potencial de corrosão é

contemplada no capítulo 3. A seguir, apresenta-se o programa experimental da pesquisa, elaborado de acordo com as variáveis de estudo e número de corpos de prova empregados no monitoramento. A caracterização dos materiais empregados também se encontra em tal capítulo, haja vista a necessidade de se conhecer e interpretar corretamente o emprego dos materiais.

Convém ressaltar que, durante o programa experimental, os ensaios empregados para a complementação de demais ensaios obrigatórios na pesquisa também foram realizados (como o caso do ensaio para determinação da resistência à compressão e determinação do teor de umidade Nos corpos de prova de concreto), demonstrando a sensibilidade do ensaio perante as condições climáticas adversas.

O capítulo 5 (resultados e discussões) apresenta a análise dos dados bem como o levantamento das discussões acerca da interpretação dos resultados.

Por fim, segue o capítulo de conclusão do trabalho, com resultados e comentários sobre os ensaios resumidamente. Também se contemplou o item de sugestão para trabalhos futuros, passível de ser desenvolvido por outros pesquisadores da área correlata.

## 2 CORROSÃO DAS ARMADURAS

### 2.1 FUNDAMENTOS DA CORROSÃO DO AÇO

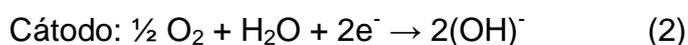
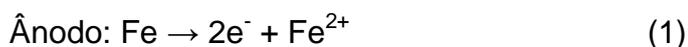
Objeto de estudo recorrente do elevado número de estruturas com presença de corrosão nas armaduras, tal fenômeno ganhou destaque pela relevância levantada por Helene, em 1993. Em seu estudo, a corrosão foi conceituada como a interação destrutiva entre um material como meio ambiente, como resultado de reações deletérias de natureza química ou eletroquímica, associadas ou não a ações físicas ou mecânicas de degradação.

Sob condições normais, ou seja, sem a inserção dos fatores que iniciam o processo de corrosão, o comitê 222 da American Concrete Institute (1990) considera que a armadura no interior do concreto encontra-se protegida química e fisicamente. A fase aquosa contida nos poros fornece a proteção química, pois possui alta alcalinidade, favorecendo a formação de uma camada de óxidos de ferro estáveis, compacta e aderente sobre a superfície do aço, chamada camada de passivação. A proteção física se deve ao cobrimento das armaduras, o qual impede a penetração de agentes agressivos desencadeadores da corrosão.

O fenômeno da corrosão passa a ocorrer quando o processo de reação químico ou eletroquímico caracteriza uma interação destrutiva entre um metal e o meio circundante. Segundo Marcelli (2007), a corrosão pode ser acelerada pela presença de agentes agressivos externos, internos, incorporados ao concreto ou gerados pelo meio ambiente. Em termos práticos, o fenômeno eletroquímico pode ocorrer devido à redução significativa no pH do concreto ( $\text{pH} < 11,5$ ). Tal redução deve-se à diminuição dos níveis de hidróxido de cálcio e íons sódio e potássio, dentre outros elementos que mantêm a alcalinidade do concreto.

O processo de corrosão ocorre pela formação de células de íons que podem se formar na vizinhança da armadura devido às diferenças na concentração de íons dissolvidos, como álcalis e cloretos (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Como resultado, algumas partes do metal (quando apenas um tipo de metal está presente), tornam-se anódicas e outras catódicas, gerando fluxo de íons. As alterações químicas fundamentais que ocorrem nestas áreas seguem as seguintes reações (MEHTA e MONTEIRO, 2008):



O aumento da velocidade do ataque ao metal pode ocorrer em meio aquoso aerado, retirando-se o hidrogênio por um processo químico, ocasionando a liberação de oxigênio que age como despolarizante, de acordo com a reação (LIRA E SILVA, 2008):



Em termos práticos, isso explica a influência do meio aquoso aerado, conferindo maior velocidade de corrosão quando em ambiente propício à despolarização.

Para haver reação anódica envolvendo a ionização do ferro metálico, é necessário um fluxo de elétrons no sentido do cátodo, que é mantido por meio do consumo de elétrons na região catódica. Dessa maneira, para o processo catódico, a presença tanto do ar como da água na superfície do cátodo é absolutamente necessária, associando o processo corrosivo do aço com o comportamento do fenômeno de uma pilha, baseado em três elementos básicos: eletrólito, diferença de potencial e oxigênio (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Cabe salientar que à medida que o potencial do eletrodo do aço aumenta, ocorrem variações bruscas na intensidade de corrente indicando o processo corrosivo.

Dessa forma, para que o processo se instale é necessária a presença de um eletrólito, como por exemplo, a água, uma DDP (diferença de potencial elétrico), além de oxigênio e em alguns casos agentes agressivos encontrados no meio (SOUZA; RIPPER, 1998 e HELENE, 1993). A função do eletrólito fica reservada à intervenção da água no sistema e pela formação de certos produtos durante a hidratação do cimento (dentre eles, a formação de  $\text{Ca(OH)}_2$ ).

A diferença de potencial pode ocorrer pela potencialização da influência de vários fatores, dentre eles, a interferência da umidade do ambiente inserido e da aeração do concreto devido às concentrações salinas ou por tensões no aço ou no concreto. Por isso, deve-se levar em consideração a umidade relativa do ar e incidência de chuvas, uma vez que são responsáveis pela quantidade de água no interior do concreto e implica diretamente na velocidade de corrosão do aço. Cabe salientar que a variação de potencial pode ser observada também em casos de baixos níveis de umidade no concreto, porém, em menor intervalo de valores.

O oxigênio é oferecido pela atmosfera e suas concentrações no interior do concreto são variáveis de acordo com o processo de adensamento do concreto no estado fresco e formação de capilares no interior da estrutura, permitindo a percolação do mesmo, assim como de outros agentes envolvidos no processo de corrosão.

Em se tratando dos efeitos colaterais acarretados pelo processo, Mehta e Monteiro (2008) destacam o deslocamento do concreto, provocado pela transformação do ferro metálico em produto da corrosão (ferrugem), que é acompanhada por um aumento de volume que, dependendo do composto formado, pode ser da ordem de 600% em relação ao metal original.

## 2.2 FATORES QUE INFLUENCIAM O PROCESSO DE CORROSÃO DE ARMADURAS

O desenvolvimento da corrosão nas armaduras está diretamente relacionado aos fatores físicos impostos na estrutura, como morfologia, e aspectos relacionados à execução das estruturas e materiais empregados. A ação conjunta destes aspectos descreve de forma dinâmica a interação entre os mesmos influenciando na intensidade do processo corrosivo.

Dentre os evidenciados na literatura, citam-se a seguir os fatores mais evidentes de acordo com o contexto que a estrutura de concreto armado está inserida. Além das variáveis de estudo (relação água/cimento, umidade, temperatura, espessura de cobrimento e taxa de contaminação por cloretos), são considerados também outros parâmetros de influência.

### 2.2.1 Influência do Cobrimento das Armaduras e Camada de Passivação

A preocupação com o cobrimento das armaduras é de vital importância para garantia da vida útil do concreto, uma vez que ele é a única camada entre as armaduras e o meio circundante. Quando corretamente executado, o concreto protege a armadura sobre dois aspectos: o físico e o químico. Quanto ao primeiro, a proteção é devida à barreira física proporcionada pelo cobrimento sobre a armadura, cuja eficiência depende da qualidade e magnitude da espessura de cobrimento do concreto (FORTES E ANDRADE, 1995). Quimicamente, a alcalinidade do concreto deriva das reações de hidratação dos silicatos de cálcio ( $C_3S$  e  $C_2S$ ) que liberam certa porcentagem de  $Ca(OH)_2$ . Essa base forte dissolve-se em água e preenche os poros e capilares do concreto, conferindo-lhe um caráter alcalino. Em casos de aplicação em ambientes agressivos, é comum a utilização de inibidores de corrosão, que se justifica pela diminuição da proteção frente às condições de exposição. Neste ambiente ocorre a formação da película passivadora formada por óxidos que possuem um componente principal:  $\gamma - Fe_2O_3$ . Esta camada é mantida e, em muitos

casos, recuperada pela própria reserva alcalina do concreto, cuja natureza porosa permite reter água com pH acima de 12 (FREIRE, 2005).

Tal decisão demonstra a preocupação com as estruturas de modo a agir preventivamente, uma vez que o emprego de inibidores de corrosão aliado à espessura de cobrimento conferem à estrutura maior tempo de integridade estrutural sem o fenômeno da corrosão.

Uma vez que a camada passivante seja rompida, a iniciação do processo corrosivo ocorre por dois mecanismos, por ação eletroquímica de íons cloretos na presença de oxigênio; e/ou por redução da alcalinidade devido à lixiviação das substâncias alcalinas pela ação da água ou devido à neutralização parcial por reação com dióxido de carbono (FREIRE, 2005).

Sabe-se que a relação entre o cobrimento das barras e a intensidade de corrosão descrita na literatura, expresso por meio da perda de massa por unidade de área, é inversa. Aumentando-se o cobrimento, temos um aumento da barreira de passagem de gases, vapor d'água e líquidos. Mas um cobrimento grande, por outro lado, implica em espessura considerável de concreto sem armadura e, conseqüentemente, podem aparecer fissuras de retração ou fissuras devidas à flexão, na região abaixo da aplicação das cargas (NEVILLE, 1997). Cabe salientar que a situação de retração ou fissuras de acordo com o cobrimento está contemplada na norma ABNT NBR 6118:2007, com espessuras avaliadas previamente que permitem a execução de peças sem a presença deste tipo de manifestação patológica.

Chatterji (2004) cita que, mediante ciclos de imersão e secagem, a corrosão pode iniciar pela formação de micro e/ou macro fissuras em algum lugar, enquanto que em outros ocorre redução do diâmetro dos poros. Essa redução acaba por ser benéfica à estrutura, uma vez que os íons cloreto em forma cristalina ou até mesmo com dimensão maior do que os poros são barrados pela proteção de concreto.

Por outro lado, em um estudo mais detalhado, Schießl e Raupach (1997) afirmam que a taxa de corrosão é mais influenciada pelas condições do concreto entre as fissuras, uma vez que foi possível detectar regiões anódicas na zona da fissura, e nas demais, regiões catódicas.

Confrontando os dois estudos anteriormente citados, tem-se a particularidade de cada estudo influenciando diretamente na análise micro estrutural. De forma prática, as condições do concreto entre as micro e macro fissuras são mais relevantes uma vez que sua condição determina a propagação de cloretos no interior da estrutura como um todo.

### 2.2.2 Teor de umidade

Fortes e Andrade (1995) relatam que não há corrosão em concretos secos (pela ausência de eletrólito) e tampouco em concreto totalmente saturado, por não haver suficiente acesso de oxigênio. Na condição de saturação só haverá dissolução do aço da armadura, se houver intensidade de corrente suficiente para realizar a eletrólise da água, gerando, assim, oxigênio extra. No caso de concreto totalmente seco, só haverá oxigênio sem a presença de água e a corrosão também não se desenvolve. Contudo, na grande parte das condições reais sempre existe água no concreto e, geralmente, em quantidade suficiente para atuar como eletrólito, sobretudo quando este está em presença de climas úmidos.

Cabe salientar que o teor de umidade do concreto está relacionado com a sua durabilidade, pois a presença simultânea do ar e da água, na superfície do cátodo, é importante para que o processo de corrosão ocorra (FREIRE, 2005). Dessa forma, a velocidade de corrosão está diretamente relacionada à umidade instalada no interior da estrutura, que por sua vez, é dependente da umidade do ambiente inserido.

Nesse âmbito, Dotto (2006) relata o estudo desenvolvido por González *et al.* (1995)<sup>2</sup>, que obtiveram corrente ( $i_{corr}$ ) da ordem de  $1,0 \mu A/cm^2$  quando em processo de secagem ao ar, enquanto que a corrente em condição imersa foi de  $7,0 \mu A/cm^2$ . Assim, o período de ciclagem analisado pelo autor mostrou a influência direta do teor de umidade sobre as leituras de velocidade de corrosão.

Papadakis *et al.* (1991) estudaram a influência do teor de umidade, relação água/cimento, cobrimento e condições de cura no processo de difusão de oxigênio. Os autores estabeleceram uma relação entre o coeficiente de difusão efetivo do oxigênio ( $D_{ef}(O_2)$ ), em  $m^2.s^{-1}$ ), a porosidade da pasta de cimento ( $\epsilon$ ) e a umidade relativa do ar (U. R., em %), por meio de dados experimentais. A análise da regressão demonstrou que o movimento das moléculas do oxigênio na pasta de cimento, depende da porosidade capilar da mesma e da umidade relativa do ar, supondo-se que haja equilíbrio higrotérmico entre o teor de umidade dos poros e o meio, isto é:

$$D_{ef}(O_2) = 1,92 \times 10^{-6} (\epsilon)^{1,8} (1-U.R./100)^{2,2} \quad (5)$$

Wang e Ueda (2011) apresentam estudos sobre modelagem computacional que descreve o comportamento do concreto à permeabilidade, onde apontam a boa concordância com os resultados experimentais, produzindo um desvio da curva de absorção acumulativa a partir da inclusão de agregados secos que reduzem a velocidade de transporte de água no interior das estruturas.

### 2.2.3 Íons cloreto

A película passiva é a defesa e garantia de que a armadura não sofrerá corrosão, mas ela pode ser destruída pela presença de agentes agressivos, principalmente de íons cloretos, que podem vir tanto do meio externo como estar

---

<sup>2</sup> GONZÁLEZ, J. A.; ANDRADE, C.; ALONSO, C.; FELIU, S. **Comparison of rates of general corrosion and maximum pitting penetration on concrete embedded steel reinforcement.** Cement and Concrete Research, v.25, n.2, 1995, p.257-264.

presentes no interior do concreto, oriundos da água de amassamento, agregados ou de aditivos à base de  $\text{CaCl}_2$  (Cloreto de cálcio) (FORTES E ANDRADE, 1995).

Os íons cloreto têm o poder de destruir, de forma localizada, a película passivante sobre a armadura, provocando a corrosão por pite (em pontos localizados). Estes pontos, ou pequenas crateras, formam o anodo da pilha de corrosão e, devido à sua progressão em profundidade, podem provocar a ruptura da barra de aço. O restante da superfície metálica torna-se o cátodo e como se sabe, a relação área anódica/área catódica, sendo muito pequena, poderá dar motivo a uma rápida propagação da corrosão (HELENE, 1993).

Hansson (1993) cita que mesmo que o teor de cloretos no interior do concreto seja o suficiente para quebrar a película passivadora, a taxa de corrosão é limitada a níveis insignificantes se houver falta de oxigênio ou uma alta resistividade elétrica.

O autor também relata em seu estudo que a difusão de oxigênio é influenciada pela presença de cloretos na pasta, uma vez que os produtos da reação, como cloroaluminatos, se solidificam na rede de poros diminuindo dessa forma a porosidade do concreto.

Desse modo, mesmo que o concreto não seja afetado pelos cloretos, estes podem atingir a armadura de aço, oriundos do exterior, através da rede de poros. Têm-se casos mais comuns deste tipo quando a estrutura está inserida em ambiente de alta agressividade ambiental, como o caso de atmosfera marinha. Na tentativa de determinar o limite de íons cloreto permissível em estruturas de concreto, normas tentam se basear em estudos realizados no nível crítico de cloretos adicionados em massa total de cimento.

No Brasil, a NBR 12655:2006 estabelece teores máximos totais de íons cloreto no concreto, por massa de cimento, de: 0,15% para o concreto armado, exposto a contaminação por íons cloreto em serviço; 0,40% para o concreto armado, situado em local seco ou protegido da umidade, quando em serviço.

#### 2.2.4 Porosidade da estrutura de concreto

Sabe-se que os mecanismos de transporte de agentes agressivos, de forma geral, estão diretamente relacionados à porosidade da estrutura, dentre outros aspectos. Na grande maioria dos casos, os mecanismos de transporte dos íons cloreto presentes no concreto são a absorção capilar e a difusão iônica. A absorção dá-se 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 (MONTEIRO, 2002). A Figura 1 exemplifica a interação entre o concreto e a entrada de agentes agressivos.

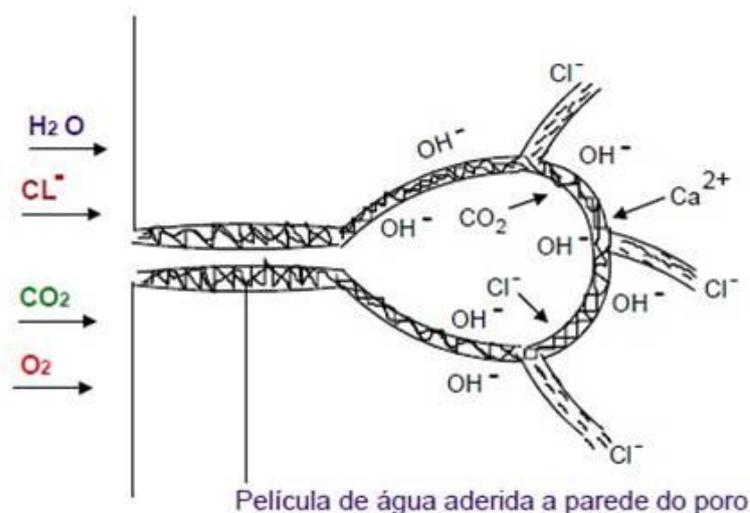


FIGURA 1. INTERAÇÃO ENTRE O CONCRETO E OS AGENTES AGRESSIVOS (NEPOMUCENO, 1992<sup>3</sup> APUD MONTEIRO, 2002).

A porosidade é uma característica do concreto, definida pela presença de vazios da pasta de cimento hidratada, que tem importante influência em suas propriedades, principalmente em sua durabilidade (SILVA, 2010).

<sup>3</sup> NEPOMUCENO, A. A. **Comportamiento de morteros de reparacion frente a la carbonatación y la penetration de cloruros em estructuras de hormigon armado dañadas por corrosion de armaduras. Estudio mediante la resistència de polarizacion.** 1992. 371p. Tese (Doutorado) – Universidad Politecnica de Madrid, Instituto de Ciencias de la Construction “Eduardo Torroja” – CSIC. Madrid.

Sabe-se que a permeabilidade do concreto está diretamente relacionada à ocorrência de penetração de substâncias que possam induzir a corrosão. Em níveis baixos, a permeabilidade também aumenta a resistividade elétrica do concreto que impede o fluxo de correntes elétricas entre áreas anódicas e catódicas que causam a corrosão eletroquímica. Por causa destes atributos protetores inerentes, a corrosão do aço não ocorre na maioria dos elementos ou estruturas de concreto. Porém, ela pode ocorrer se o concreto não é de qualidade adequada, se a estrutura não foi projetada corretamente para o ambiente de serviço ou se o ambiente não era como esperado, variando durante a vida útil do concreto (FREIRE, 2005).

Outra forma de absorção refere-se à absorvidade (absorção por sucção capilar), depende do teor de água inicial do material e é visivelmente maior quando o material está seco e igual a zero quando saturada. Sua relação com a temperatura é expressa pela raiz quadrada da tensão superficial ( $\sigma$ ) dividida pela viscosidade  $\eta$  ( $(\sigma/\eta)^{1/2}$ ) (WILSON *et al.*, 1999).

No entanto, estudos apontam que a descrição do fenômeno é incompleta por não considerar fatores de correção para variações de temperatura do ambiente. Estudos apontam que o fenômeno se comporta dessa forma apenas para temperatura de 20 °C. Embora não seja grande, os referidos autores mostraram que o incremento é, em média, 1% de absorvidade por cada aumento de temperatura de 1 °C.

#### 2.2.5 Influência da relação água/cimento

A influência da relação água/cimento na penetração de cloretos vem sendo estudada há mais de 30 (trinta) anos, como relatado no estudo de Gjorv e Vannesland (1979). Eles descrevem o comportamento da espessura de cobrimento atuando de maneira conjunta com a relação água/cimento para a proteção das armaduras em estruturas de concreto expostas ao ataque durante 2 (dois) anos. O acréscimo de penetração de cloretos foi observado quando a relação água/cimento passou de 0,40 para 0,60, aumentando a porosidade do concreto de 9,7% para

12,5%, respectivamente. Dessa forma, acredita-se que a penetração de cloretos foi facilitada pela baixa espessura de cobrimento (valores próximos a 10 mm) e ação da porosidade devido ao aumento da relação água/cimento.

Estudos de Al-Tayyib *et al.*(1990) constataram que o tempo necessário para o aço passar para um estado de corrosão ativa, estando o concreto imerso em solução de 5% de NaCl, foi inversamente proporcional à relação água/cimento. Assim, para as relações a/c de 0,40, 0,50 e 0,70, o período de iniciação do processo de corrosão foi de 77, 70 e 14 dias, respectivamente. Do mesmo modo, tal comportamento foi constatado nos estudos de Cascudo (1991). Para idênticos períodos de exposição e nível de contaminação (1% e 4% CaCl<sub>2</sub> em relação a massa de cimento), as barras embutidas no concreto com relação a/c=0,40 estavam mais íntegras do que aquelas embutidas no concreto com relação a/c=0,70. Pereira (2011), estudando a capacidade de proteção quanto à corrosão de armaduras dos cimentos CII-Z-32, CIII-40 e CIV-32, também constatou que os corpos de prova com relação água/cimento de 0,40 demoravam mais para iniciar a corrosão do que no caso dos corpos de prova com relação água/cimento de 0,70. Oliveira (2011) estudando a proteção de superfície em compósitos cimentícios e Almeida (2012) estudando adições minerais, também chegaram a mesma constatação.

#### 2.2.6 Influência da composição do cimento

Rasheeduzzafar *et al.* (1993) e Dotto (2006), estudando a solução dos poros de uma pasta (a/c=0,60), curada a 20 °C e contaminada ainda na mistura com 1,2% de NaCl, por massa de cimento, concluíram que o cimento com teor de 14% de C<sub>3</sub>A foi 2,5 vezes mais efetivo na capacidade de fixar íons cloreto do que o cimento com 2,43% de C<sub>3</sub>A. Porém, o aumento da temperatura de cura para 70 °C ocasionou o decréscimo na capacidade do cimento com 14% de C<sub>3</sub>A de fixar íons cloreto, que passou a ser somente 1,2 vezes mais efetivo.

Em estudos anteriores, Monteiro (2002) referencia outros autores, como Goto; Roy (1981)<sup>4</sup> e Calleja, (1986)<sup>5</sup> e afirmam que a difusão dos íons cloreto dentro da pasta de cimento é mais influenciada pela composição do cimento e menos pela relação água/cimento. Em 2002, Monteiro destacou a atuação da composição química resultante da hidratação das partículas do cimento no ataque por cloretos, principalmente quanto à proporção dos compostos  $C_3A$  e  $C_4AF$ , que se combinam com íons cloreto para formar cloroaluminatos. O teor ideal é relatado por Mehta e Monteiro (2008), que determinou a porcentagem mínima de 8% de  $C_3A$  para a fixação dos íons cloreto de um cimento. Rasheeduzzafar *et al.* (1990) demonstram em seus estudos, que o teor de  $C_3A$  do cimento tem influência direta na evolução da corrosão das armaduras, como indica a Figura 2. Pela interpretação dos dados do referido autor, pode-se concluir que o teor de  $C_3A$  é diretamente proporcional a quantidade de tempo para que ocorra o início da corrosão nas armaduras, ou seja, quanto menor a taxa de  $C_3A$  menor a capacidade de proteção do cimento com relação à corrosão ocasionada por cloretos.

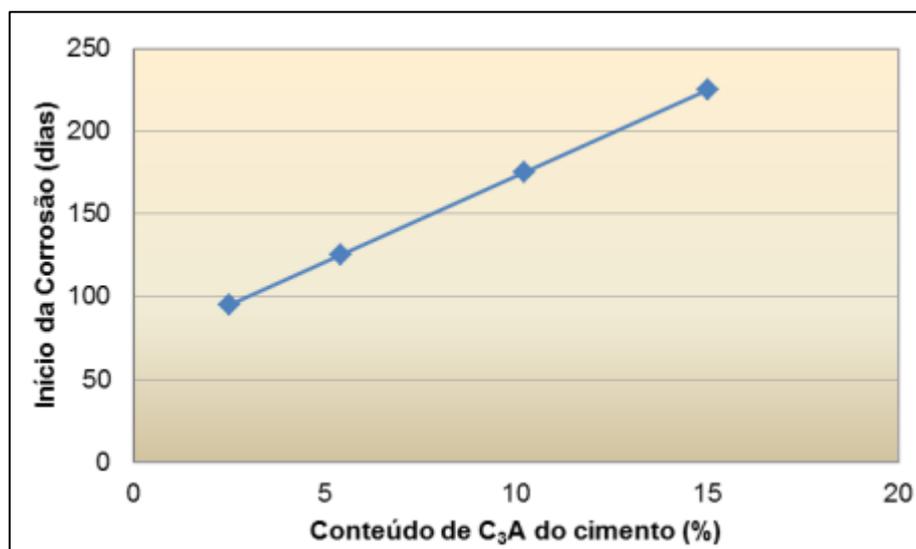


FIGURA 2. EFEITO DO CONTEÚDO DO  $C_3A$  DO CIMENTO, NO TEMPO DE INICIAÇÃO DA CORROSÃO DA ARMADURA DO CONCRETO (RASHEEDUZZAFAR ET AL., 1990).

<sup>4</sup> GOTO, S.; ROY, D. M. **Diffusion of Ions Through Hardened Cement Pastes**. Cement and Concrete Research. 1991. Vol.11. p.751-757

<sup>5</sup> CALLEJA, J. **Future trends in the research of the structure, properties and behavior of blended cements**. In: Congresso Internacional de Química do cimento, Rio de Janeiro, 1986. Anais. Rio de Janeiro: UFRJ, 1986, v.1. p.233-248.

Cabe salientar que o teor dos compostos com a hidratação do cimento influencia diretamente em propriedades do concreto, principalmente no estado endurecido. A evolução da resistência se destaca entre a mais importante propriedade do concreto neste caso, uma vez que é diretamente afetada pela porcentagem dos compostos  $C_3S$  e  $C_2S$ , além de aspectos de execução e emprego dos materiais in loco.

### 2.2.7 Influência da elevação de temperatura do concreto

A temperatura apresenta um importante papel no comportamento estrutural influenciando as deformações instantâneas, a formação de fissuras e conseqüentemente, o processo de corrosão nas armaduras. A elevação da temperatura pode influenciar diretamente na penetração de cloretos no concreto em várias idades da estrutura: desde a fase de cura, com a formação de C-S-H gerando uma estrutura mais densa; após a etapa de hidratação, com a facilidade de penetração dos íons cloreto por permeabilidade, sucção capilar ou difusão devido à redução da viscosidade dos fluidos (ARAÚJO e SILVA FILHO, 2009).

Silva (2003) cita que a energia de ativação, parâmetro associado à relação água/cimento do concreto, é utilizado na determinação da influência da temperatura no processo de difusão, expressa pela Lei de Arrhenius (Equação 6). Em seu estudo, observou-se que o aumento da temperatura gerou uma redução da vida útil da estrutura devido a uma grande velocidade de difusão de íons cloreto.

$$D_T = D_0 \times e^{-k\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (6)$$

Onde:

$D_T$  = difusividade efetiva à temperatura T;

$D_{T_0}$  = difusividade efetiva à temperatura  $T_0$ ;

$k$  = constante da reação;

$T, T_0$  = temperaturas em K.

Outro parâmetro a se considerar refere-se ao gradiente térmico em diferentes regiões do país, influenciando na velocidade de penetração e propagação da corrosão no interior das estruturas. A experiência de Cascudo (1997) indica que um aumento de 10°C na temperatura pode dobrar a velocidade das reações e da mobilidade iônica. Tal fato explica a elevação do número de estruturas de concreto deterioradas em regiões litorâneas quentes do que em temperadas.

### 3 POTENCIAL DE CORROSÃO

A técnica de potencial de corrosão, desde sua primeira descrição em laboratórios americanos pela equipe de Stratfull é utilizada como um método eletroquímico de auxílio ao monitoramento de corrosão das armaduras de estruturas de concreto armado (CASCUDO, 2005). Com os resultados obtidos durante a aplicação do método, é comum que se faça o mapeamento de valores através de isolinhas de potencial de corrosão, de modo a identificar regiões com armadura comprometida e como se distribui o processo de despassivação do aço na região em estudo.

#### 3.1 EQUIPAMENTOS E MÉTODO DE ENSAIO

Para a realização das medidas de potencial de corrosão é comum usar um eletrodo de cobre/sulfato de cobre, que é um tubo plástico ou de vidro em que seu interior é formado por 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). A Figura 3 mostra um esquema de um eletrodo de referência de cobre/sulfato de cobre.

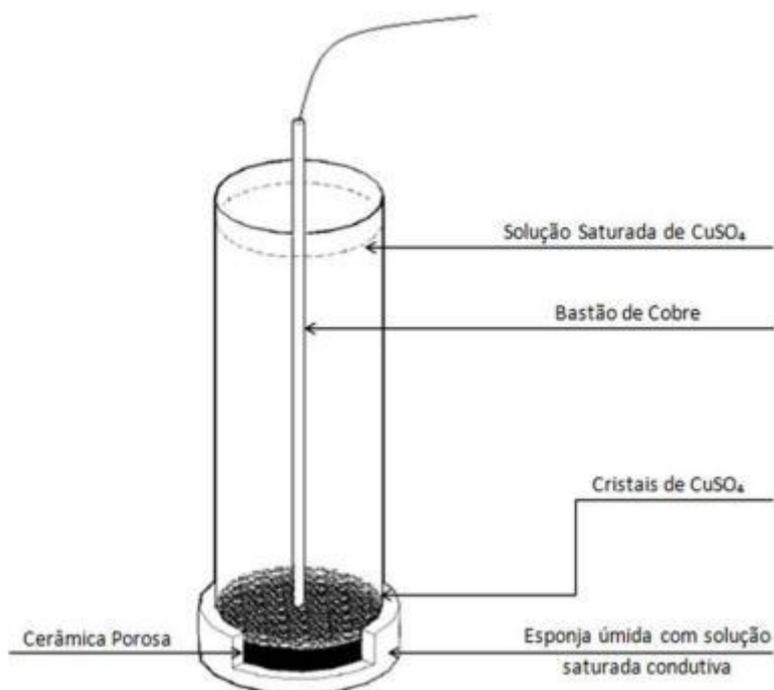


FIGURA 3. ELETRODO DE REFERÊNCIA DE COBRE/SULFATO DE COBRE, CSE (HELENE, 1993).

O método consiste em medir a diferença de potencial elétrico entre o aço da peça de concreto armado em análise e um eletrodo de referência, capaz de manter seu potencial elétrico estável. A Figura 4 mostra a configuração da aparelhagem necessária ilustrando o eletrodo de referência sendo apoiado imediatamente sobre a superfície de 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 Cascudo (1991), ao conectar o eletrodo de referência e o eletrodo de trabalho (barra de aço do concreto) surge um fluxo de elétrons da armadura em direção ao eletrodo de referência, mais nobre e com potencial mais positivo, passando pelo voltímetro de alta impedância e indicando a intensidade da diferença de potencial de eletrodo entre as semi pilhas (eletrodo de referência e eletrodo de trabalho). Para o fechamento do circuito é necessário uma interface condutiva entre o eletrodo de referência e o eletrodo de trabalho e isso é feito usando uma esponja saturada colocada no contato elétrico entre o eletrodo de referência e a superfície do concreto.

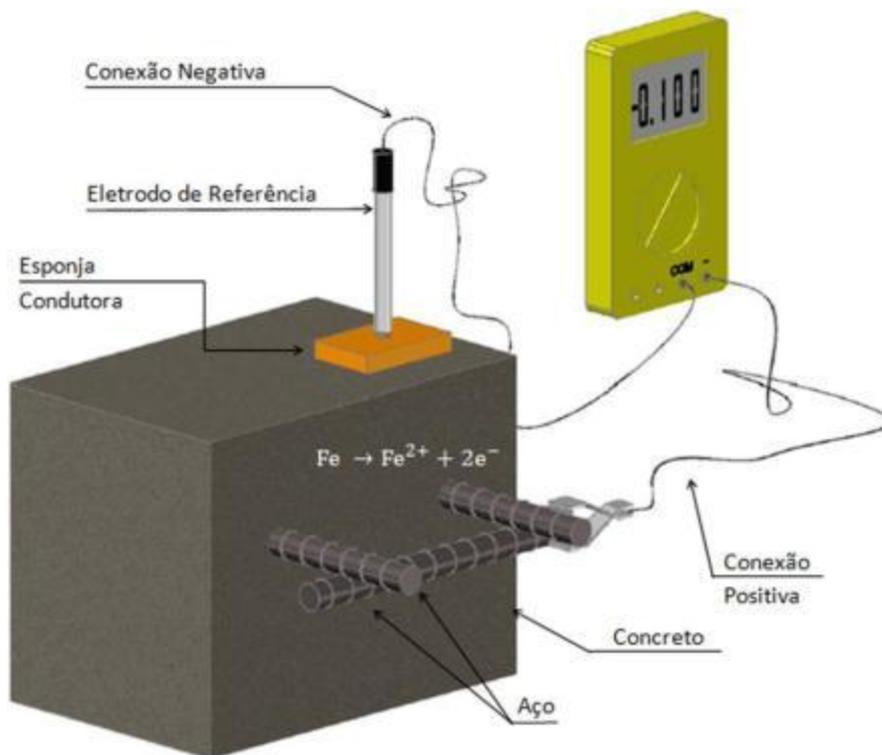


FIGURA 4. CONFIGURAÇÃO DO CIRCUITO PARA DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO (ASTM C 876:2009).

O objetivo do método não é quantificar a corrosão do aço, uma vez que a taxa de corrosão não é determinada com o procedimento. Segundo Medeiros, Balbinot e Helene (2010), o potencial de corrosão identifica os locais da peça em estudo onde as condições termodinâmicas são favoráveis ao início do processo de corrosão, ainda que a armadura não apresente sinais na superfície de concreto que o envolve.

Segundo Darby *et al.* (1999), as vantagens do método de potencial de corrosão são principalmente: baixo custo e uso difundido no meio técnico, possibilidade de criação de mapas de isopotenciais que facilitam o processo de identificação de regiões que estão sob processo de corrosão e a natureza não destrutiva da técnica (considerando que os pequenos furos nas peças em análise não comprometem seu comportamento estrutural). Entretanto, os pesquisadores apontam algumas desvantagens, tais como não é possível medir o nível de corrosão, a interpretação dos riscos de corrosão se baseia em métodos experimentais, as medições são influenciadas por diversos fatores, os métodos de

reparo não podem se basear somente nas determinações de potencial de corrosão e é difícil de determinar se o valor da medição se estabilizou.

### 3.2 FATORES QUE INFLUENCIAM NAS MEDIDAS DE POTENCIAL DE CORROSÃO

Os fatores que podem influenciar nas medidas de potencial segundo Browne *et al.* (1983), Elsener e Bohni (1990), Cascudo (1997) e Helene (1993) são:

- Camadas superficiais de concreto de alta resistividade iônica, tais como Elevada compacidade do concreto e espessura de revestimento – tornam o potencial menos negativo. A Figura 5 mostra uma imagem que ilustra o efeito da espessura do revestimento nas leituras de potencial de corrosão;

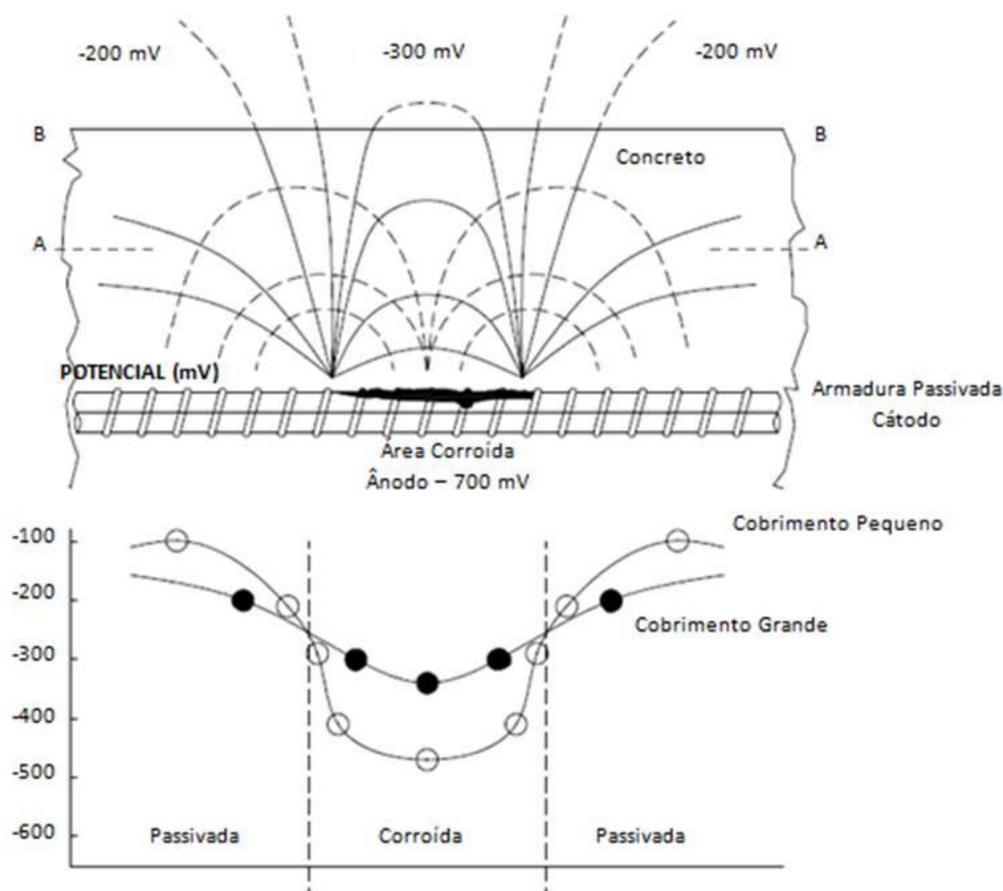


FIGURA 5. INFLUÊNCIA DO COBRIMENTO DAS ARMADURAS NAS LEITURAS DE POTENCIAL DE CORROSÃO (ELSENER E BOHNI, 1990<sup>6</sup> APUD HELENE, 1993).

- Baixa aeração devido a saturação – o baixo acesso de oxigênio provocado pela saturação completa do concreto pode gerar potenciais mais negativos, apesar de o  $O_2$  ser um agente imprescindível para que ocorra corrosão. Isso significa que o ensaio de potencial de corrosão em caso de saturação pode levar a interpretações equivocadas;
- Frente de carbonatação – eleva a resistividade elétrica da camada de concreto carbonatada e torna o potencial de corrosão menos negativo;
- Frente de penetração de cloretos – uma pequena frente de cloretos

<sup>6</sup> ELSENER, B.; BOHNI, H. **Potential mapping and corrosion of steel in concrete**. In: Neal S. Berke; Victor Chaker; David Whiting. Corrosion rates of steel in concrete. Philadelphia. ASTM. 1990. P. 143-156.

em camadas superficiais melhora o movimento iônico na solução dos poros do concreto, o que altera valores de potencial para níveis mais negativos;

- Teor elevado de umidade do concreto – a umidade é o eletrólito do processo eletroquímico. Por isso, só haverá corrosão quando houver um nível mínimo de umidade. Quanto maior o nível de umidade até a saturação dos poros, maior a mobilidade dos íons que participam do processo eletroquímico, o que altera valores de potencial de corrosão para níveis mais negativos. Não se pode esquecer que o concreto armado totalmente saturado inviabiliza o acesso de oxigênio fazendo com que o processo de corrosão ocorra com baixa velocidade e isso precisa ser levado em consideração em casos de aplicação da técnica;
- Micro fissuras – a corrosão localizada pode ser facilitada pela existência de micro fissuras no concreto, que também são capazes de diminuir a resistividade iônica, alterando valores de potencial de corrosão para níveis mais negativos.
- Temperatura – variações de temperatura podem afetar as leituras e o método deve ser usado entre 0 e 49° C, de acordo com a norma ASTM C 876:2009. Esta norma especifica que caso uma leitura seja feita fora da faixa de  $22,2 \pm 5,5^{\circ} \text{C}$ , deve-se efetuar uma correção de temperatura. De acordo com Helene (1993) o fator de correção é de  $0,0009 \text{ V}^{\circ} \text{C}$ , que deve ser subtraído ou acrescido em função da temperatura ser inferior ou superior a faixa previamente citada.

Quando existe uma camada de proteção sobre o concreto, como epóxi, poliuretano, acrílico, entre outros, o contato elétrico entre o eletrodo de referência e a superfície de concreto fica prejudicada e a técnica não deve ser empregado, a

menos que a proteção seja retirada, ainda que pontualmente, para a realização das medidas (GU e BEAUDOIN, 1998).

### 3.3 MÉTODO DE AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO

Por ser uma medida indireta da propensão à corrosão do aço, em 1975, o pesquisador Van Daveer relacionou de forma empírica faixas de valores de potencial de corrosão com intervalos de probabilidade de corrosão, sempre levando em consideração o eletrodo de referência utilizado no processo (CASCUDO, 2005) (ver Tabela 2). A partir deste estudo, a ASTM C 876:2009 desenvolveu os critérios de avaliação de resultados mostrados na Tabela 3.

TABELA 2. EVOLUÇÃO DAS FAIXAS DE POTENCIAL DE CORROSÃO E SUA CORRELAÇÃO COM A PROBABILIDADE DE CORROSÃO, SEGUNDO VAN DAVEER (1975)<sup>7</sup> APUD CASCU DO (2005).

Tipo do Eletrodo				Probabilidade de Corrosão
Cobre/Sulfato de Cobre (mV)	Prata/Cloreto de Prata (mV)	Hidrogênio (mV)	Calomelano saturado (mV)	
> -200	> -106	> +116	> -126	Baixa (até 10% de risco de corrosão)
-200 até -350	-200 até -256	+116 até -34	-126 até -276	Intermediária
-350 até -500	-256 até -406	-34 até -184	-276 até -426	Alta (até 90% de risco de corrosão)
< -500	< -406	< -184	< -426	Corrosão Severa

TABELA 3. FAIXAS DE POTENCIAL DE CORROSÃO E SUA CORRELAÇÃO COM A PROBABILIDADE DE CORROSÃO, SEGUNDO ASTM C 876:2009.

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

O potencial de corrosão pode ser também relacionado com o teor de cloretos medido no concreto ao redor das armaduras, conforme Figura 6, proposta pelo Departamento de Transporte da Inglaterra para os trabalhos de manutenção de pontes (HELENE, 1993).

<sup>7</sup> VANDAVEER, J. R. **Techniques for Evaluating Reinforced Concrete Bridge Decks**. Journal of American Concrete Institute, Proceedings. v. 72, n.12, December 1975, p. 697-704.

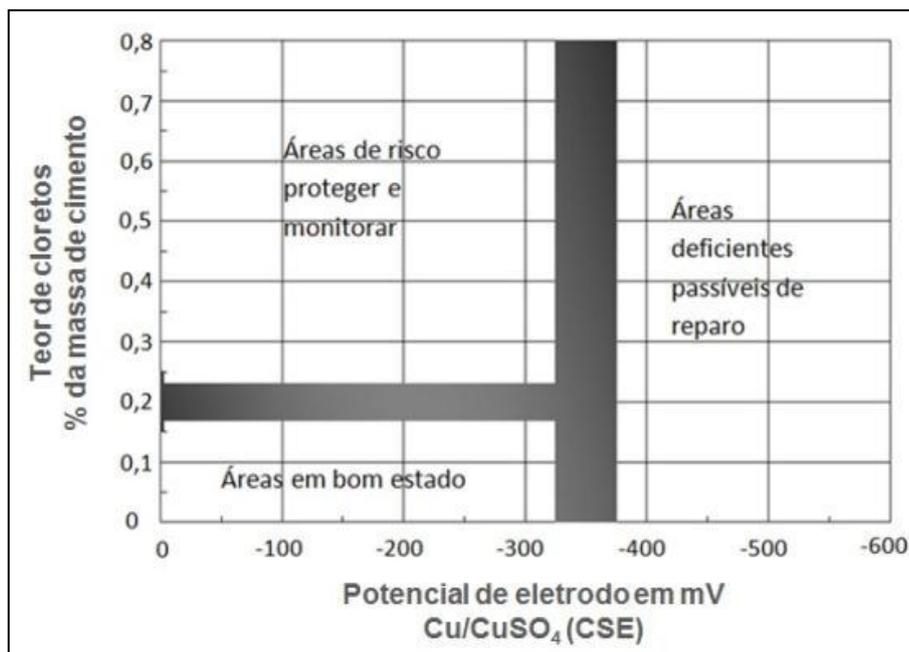


FIGURA 6. LIMITES DE REFERÊNCIA PARA TRABALHOS DE MANUTENÇÃO EM PONTES (WALLBANK, 1989<sup>8</sup> APUD HELENE, 1993).

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. Baseado na norma ASTM C 876:2009, Cascudo (2005) define requisitos mínimos dos componentes do equipamento de medição de potencial de corrosão. Segundo o autor, o voltímetro deve ser de alta impedância de entrada, ou seja, deve ter resistência elétrica maior ou igual a 10 MΩ, quando operado a uma escala cheia de 100 mV; o eletrodo deve ter potencial elétrico estável e ponta porosa; a esponja serve como um meio condutor e deve estar saturada durante todo o processo (é comum que em casos de alta resistividade da camada superficial do concreto a saturação da esponja seja feita com uma solução de água com detergente, de modo a melhorar a condutibilidade da interface entre o concreto e o eletrodo). Helene (1993) recomenda que a solução com detergente deve ter proporcionamento em torno de 4 a 10 cm<sup>3</sup>/dm<sup>3</sup>.

<sup>8</sup> WALLBANK, E. J. **The Performance of Concrete in Bridges. A survey of 200 Highway Bridges.** London, Her Majesty's Stationery Office – HMSO. April 1989.

Cascudo (2005) explica que caso o valor da resistência elétrica do voltímetro seja menor que 10 M $\Omega$ , a técnica pode ser perturbativa às armaduras do concreto armado. Isso significa que altera as condições normais da barra, transformando o ensaio de potencial de corrosão em uma técnica destrutiva. Segundo Broomfield (1997), para que os resultados de potencial elétrico sejam padronizados (sempre negativos), convencionou-se conectar o eletrodo de referência no polo negativo do voltímetro. Em seu guia técnico de testes e monitoramento da durabilidade de estruturas de concreto, Darby *et al.* (1999) mostram que o voltímetro poderá ser substituído por um multímetro digital, desde que ele apresente impedância de no mínimo 20 M $\Omega$ , diferente dos 10 M $\Omega$  citados por Cascudo (2005).

A execução do ensaio em estruturas se baseia nos seguintes passos descritos por Broomfield (1997):

- Escolher a área de medições;
- Com o auxílio de um detector de metais de alta precisão determinar a posição das armaduras;
- Fazer uma conexão elétrica com as armaduras tanto as expostas (quando estas estiverem inseridas no concreto) quanto usando armaduras já expostas;
- Verificar se a barra de aço é eletricamente contínua com o uso de um medidor de resistividade. Em nossas pesquisas, verificou-se que o medidor pode ser um multímetro com escala de voltagem contínua de 200 mV. O método consiste em medir a ddp entre dois pontos das barras de aço de um elemento de concreto armado usando um voltímetro. A obtenção de valores iguais ou muito próximos à zero denota continuidade das barras. Caso contrário, o conjunto de barras está interrompido eletricamente;
- Marcar uma grade com aberturas que geralmente tem dimensões

entre 0,2 e 0,5 m<sup>2</sup>, mas que podem ser menores, maiores ou retangulares, dependendo do espaçamento entre barras, da geometria dos elementos ensaiados e da experiência do pesquisador. A grade deve coincidir com o posicionamento das barras.

- Checar e calibrar o voltímetro e o eletrodo de referência;
- Se necessário, saturar toda a área ensaiada com a finalidade de se assegurar um bom contato elétrico. A saturação pode se dar através de água de torneira ou soluções de sabão;
- Obter e registrar os resultados das leituras. Para medições manuais, é de boa prática a medição do potencial de corrosão em dois pontos imediatamente adjacentes para checar se seus resultados se encontram na mesma ordem de valores de mV;
- Examinar anomalias, checar nas áreas de leituras mais negativas sinais e causas de corrosão.

É comum e recomendável que, a partir dos dados obtidos durante este processo, crie-se o mapeamento do potencial de corrosão na área examinada, ou seja, criar as faixas de isopotenciais. As áreas de valores mais negativos de potencial de corrosão podem ser demarcadas com giz de cera, giz colorido ou algum tipo de pintura, para que sejam examinadas quanto ao nível de corrosão ao qual estão submetidas. Desta forma, o trabalho de reparo de estruturas pode ser fundamentado. A Figura 7 mostra um exemplo de mapa de potencial de corrosão, em que as áreas hachuradas representam as regiões onde há mais de 90% de chances de que esteja ocorrendo corrosão das armaduras, segundo um eletrodo de cobre/sulfato de cobre.

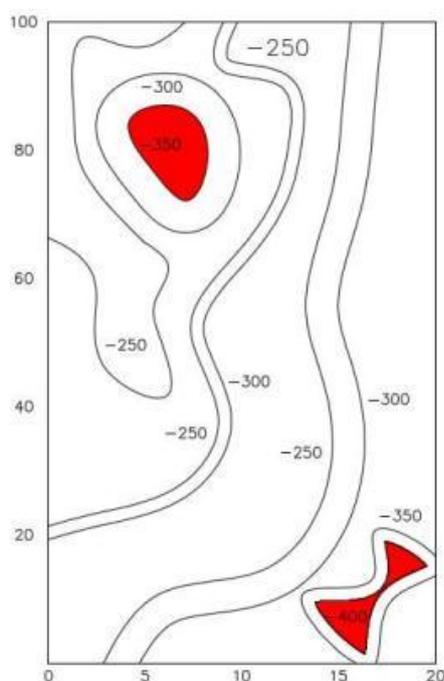


FIGURA 7. EXEMPLO DE MAPA DE POTENCIAL DE CORROSÃO REPRESENTANDO AS LINHAS DE ISOPOTENCIAIS.

A técnica de potencial de corrosão não deve ser usada de forma isolada e sim associada com outras técnicas, tais como: resistividade elétrica, velocidade de corrosão, profundidade de carbonatação e teor de cloretos.

Com relação ao julgamento dos resultados de potencial de corrosão, os valores preconizados pela ASTM C 876:2009 (Tabela 3) não devem ser tomados como absolutos, sendo aceitáveis apenas como faixas de referência. Estes valores foram estabelecidos em estudo do pesquisador Stratfull efetuados na década de 70 em tabuleiros de pontes que apresentavam corrosão típica de sais de degelo. Este fato não desmerece o método, ao contrário, se bem utilizado e combinando-se os resultados com outras determinações de teor de cloretos, resistividade elétrica do concreto e profundidade de carbonatação, por exemplo, é perfeitamente possível estabelecer um quadro claro da situação de corrosão na estrutura ou corpo de prova em laboratório. Este método é normalmente utilizado para registrar uma dada situação em termos de probabilidade de corrosão permitindo também acompanhar a evolução no tempo, ou seja, fazer um monitoramento da estrutura ou corpo de prova em estudo (HELENE, 1993).

## 4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 4.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA

A presente pesquisa compreendeu etapas que foram contempladas no planejamento do experimento, envolvendo desde o projeto para confecção dos corpos de prova, bem como a realização dos ensaios e sua posterior análise, baseados no levantamento das variáveis que se pretende analisar. As variáveis foram divididas em 2 grupos (variáveis dependentes e independentes), de acordo com a natureza da variável, como descrito nos itens a seguir.

#### 4.1.1 Variáveis independentes

As variáveis independentes colocadas neste trabalho representam os pontos julgados importantes de serem pesquisados como fatores de influência no potencial de corrosão de armaduras embutidas em peças de concreto armado. A seguir estão indicados quais foram estas variáveis:

- Espessura de cobrimento da armadura (2 níveis: 1 cm e 3 cm);
- Grau de contaminação do concreto (2 níveis: sem cloretos adicionado ao concreto e 1% de Cl<sup>-</sup> em relação a massa de cimento no momento do amassamento do concreto);
- Grau de umidade do concreto (variável em função do estado de umidade do concreto);
- Temperatura de saturação do concreto (5 níveis: 20, 30, 40, 50 e 60°C);
- Relação água/cimento do concreto (3 níveis: 0,43; 0,50 e 0,59), para mesma consistência (100±10 mm).

#### 4.1.2 Variáveis dependentes

As variáveis dependentes são as variáveis de leitura, ou seja, são os parâmetros utilizados como variável de resposta. As variáveis estudadas neste estudo estão representadas a seguir:

- Potencial de corrosão das armaduras (variável dependente principal);
- Absorção de água por imersão;
- Absorção de água por sucção capilar;
- Absorção pelo método do cachimbo;
- Resistência à compressão dos concretos;
- Resistência à tração por compressão diametral dos concretos.

Cabe mencionar que os corpos de prova usados para as medidas de absorção por imersão, absorção por sucção capilar e absorção pelo método do cachimbo, assim como o monitoramento de potencial de corrosão são de concreto armado com formato prismático (15x15x45cm). Complementarmente a estes ensaios, a determinação da resistência à tração e à compressão foram realizados em corpos de prova cilíndricos 10x20 cm, conforme as normas ABNT NBR 7222:2010 e ABNT NBR 5739:2007, respectivamente.

#### 4.1.3 Variáveis intervenientes

Variável interveniente é aquela que não é exatamente objeto de estudo, mas que muda em função de algumas variáveis independentes. As variáveis intervenientes deste trabalho são o consumo de cimento e a densidade no estado fresco.

Estando apresentadas as variáveis deste estudo, apresenta-se a Figura 8 que mostra um fluxograma com uma visão geral do Programa Experimental.

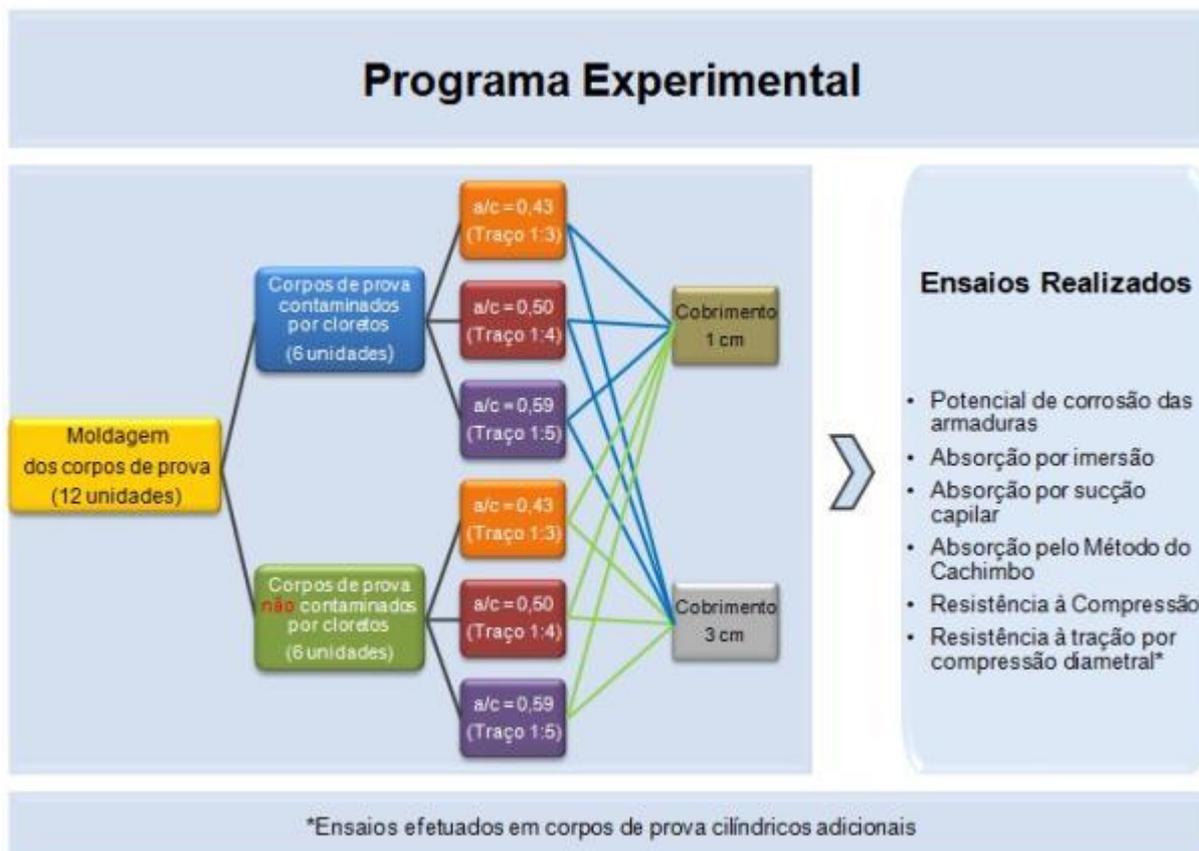


FIGURA 8. FLUXOGRAMA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL.

#### 4.1.4 Corpos de prova

Foram confeccionados no total 12 corpos de prova de concreto armado prismáticos, de dimensões 15x15x45cm, simulando trecho de uma viga armada. As dimensões foram assim estabelecidas pela representatividade das dimensões em relação a um caso real, além de se obter dimensões possíveis de serem transportadas e ensaiadas de acordo com as dimensões de recipientes e espaço físico no Laboratório de Durabilidade do Concreto da Universidade Federal do Paraná (Lab. DURACON).

Os traços em massa 1:3, 1:4 e 1:5 foram empregados porque 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 confeccionados dois corpos de prova prismáticos e, para as datas de moldagem com concreto sem contaminação, foram

moldados também corpos de prova cilíndricos 10x20 cm (para a determinação da resistência à compressão e tração por compressão diametral).

Com o intuito de analisar a influência da espessura de cobrimento, os corpos de prova foram confeccionados com dois níveis de espessura de cobrimento: 1 cm e 3 cm, respectivamente. Optou-se por adotar estes dois níveis de espessura de cobrimento para avaliar a influência de casos extremos, sendo o primeiro relacionado aos problemas de cobrimento insuficiente ao estabelecido pela norma ABNT NBR 6118:2007 e o último ao valor estabelecido por norma em casos de classe de agressividade ambiental II (moderada em macro clima de região marinha, ambiente interno ou externo com umidade relativa do ar  $\leq 65\%$ , com risco pequeno de deterioração da estrutura). Porém, vale salientar que a NBR 6118:1980 especifica um cobrimento mínimo para estruturas de concreto aparente ao ar livre de 2,5 cm, ou seja, o cobrimento adotado de 3 cm atende a esta condição. Considerando que a técnica de potencial de corrosão é destinada a inspeção de estruturas de concreto armado em uso e que muitas delas foram projetadas usando a NBR 6118:1980 (estruturas construídas entre 1980 e 2003), o cobrimento de 3 cm é realmente simulador de situações reais.

Em cada corpo de prova foram posicionadas quatro barras de aço CA50 de 10 mm de diâmetro. Para fins de padronização, as faces referentes aos diferentes cobrimentos foram denominadas de “Face 1” para o cobrimento de 1 cm e “Face 2”, para o cobrimento de 3 cm. A Figura 9 mostra a representação esquemática dos corpos de prova confeccionados.

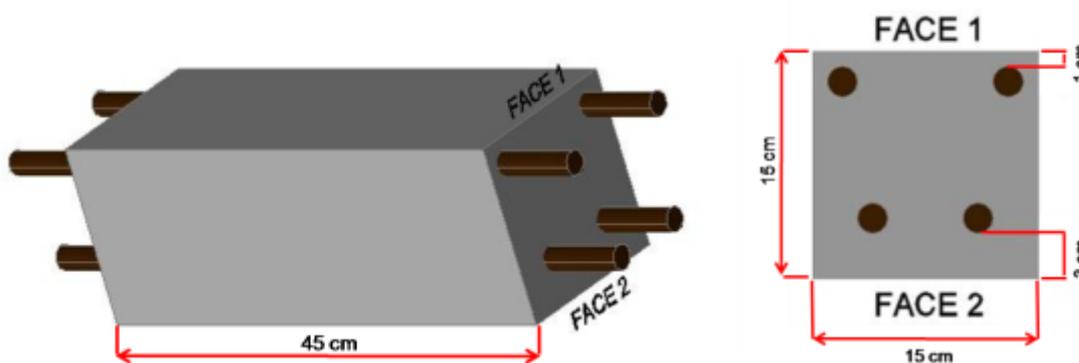


FIGURA 9. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS.

Para melhor visualização, a Tabela 4 demonstra as diferenciações dos corpos de prova bem como sua nomenclatura a ser empregada no presente estudo. Vale salientar que cada corpo de prova tem duas barras com um mesmo revestimento. Ou seja, se são 2 corpos de prova para cada série de ensaio, pode-se dizer que existem 4 barras de leitura para cada caso estudado.

TABELA 4. NOMENCLATURA DOS CORPOS DE PROVA CONFECCIONADOS DE ACORDO COM AS VARIÁVEIS DE ANÁLISE.

Nomenclatura	Traço (Em volume)	Quantidade de corpos de prova	
		Com Íons Cloreto	Sem Íons Cloreto
1:3 Com Cl <sup>-</sup>	1:3	2	2
1:3 Sem Cl <sup>-</sup>			
1:4 Com Cl <sup>-</sup>	1:4	2	2
1:4 Sem Cl <sup>-</sup>			
1:5 Com Cl <sup>-</sup>	1:5	2	2
1:5 Sem Cl <sup>-</sup>			

Para a determinação da resistência à compressão e à tração por compressão diametral foram moldados corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm. A Tabela 5 mostra as quantidades de corpos de prova moldados para os ensaios mecânicos.

TABELA 5. NOMENCLATURA DOS CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS PARA DETERMINAÇÃO DAS RESISTÊNCIAS.

Nomenclatura	Traço (Em volume)	Quantidade de corpos de prova	
		Resistência à Compressão	Resistência à tração por compressão diametral
1:3 Sem Cl <sup>-</sup>	1:3	6	6
1:4 Sem Cl <sup>-</sup>	1:4	6	6
1:5 Sem Cl <sup>-</sup>	1:5	6	6

A cura dos corpos de prova cilíndricos foi de 112 dias em câmara úmida, data em que os mesmos foram submetidos a ensaios de ruptura. A data referida deve-se à compatibilização dos ensaios para estudo paralelo, cujos valores de resistência eram os principais dados analisados no estudo.

Já no caso dos corpos de prova prismáticos para o monitoramento do potencial de corrosão, em primeiro momento, os mesmos permaneceram em câmara úmida (95% de U.R. e  $23 \pm 2$  °C de temperatura) até o 70° dia, sendo transferidos para um laboratório em condições ambiente.

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

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

### 4.2.1 Aglomerante hidráulico

Com o intuito de se avaliar a evolução de cloretos com a mínima interferência de adições minerais, optou-se por empregar o cimento CP II-F-32 devido à menor taxa de adição mineral (6 a 10% de fíler calcário). À medida que a taxa de adição é menor, a combinação do aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) com os íons cloreto é favorecida, diminuindo interferências quanto ao fator de adição do cimento

no processo corrosivo. A composição química e as propriedades físicas do cimento CP II-F-32, fabricado pela Cia. de Cimento Itambé, estão representadas na Tabela 6.

TABELA 6. COMPOSIÇÃO QUÍMICA E PROPRIEDADES FÍSICAS DO CIMENTO CP II-F-32 (DADOS FORNECIDOS PELO FABRICANTE – RELATÓRIO DE ENSAIOS DO MÊS DE DEZEMBRO/2010).

(a) Composição Química										
Cimento	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Perda Fogo (%)	CaO livre (%)	Resid. Insol. (%)	Equiv. Alcal. (%)
CP II-F-32	18,35	4,07	2,54	59,64	5,19	3,07	5,35	1,20	1,47	0,63

(b) Propriedades Físicas										
Exp. Quente (mm)	Tempo de Pega		Cons. Normal (%)	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	# 200 (%)	# 325 (%)	Resistência à Compressão (MPa)			
	Início (hh:min)	Fim (hh:mm)					1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
0,83	03:31	04:10	25,5	3.338	3,87	17,76	11,1	25,1	32,0	40,4

#### 4.2.2 Agregados

A composição granulométrica dos agregados empregados segue a caracterização conforme a Figura 10 e Figura 11. Observa-se que grande parte da granulometria da areia natural situa-se em zona ótima (dimensão máxima de 4,8 mm), enquanto que os agregados graúdos empregados encontram-se na faixa de dimensões entre 9,5 e 25,0 mm, sem falhas na composição granulométrica, proporcionando melhor empacotamento dos grãos. O módulo de finura dos agregados graúdos e miúdos foram 2,23 e 6,94, respectivamente.

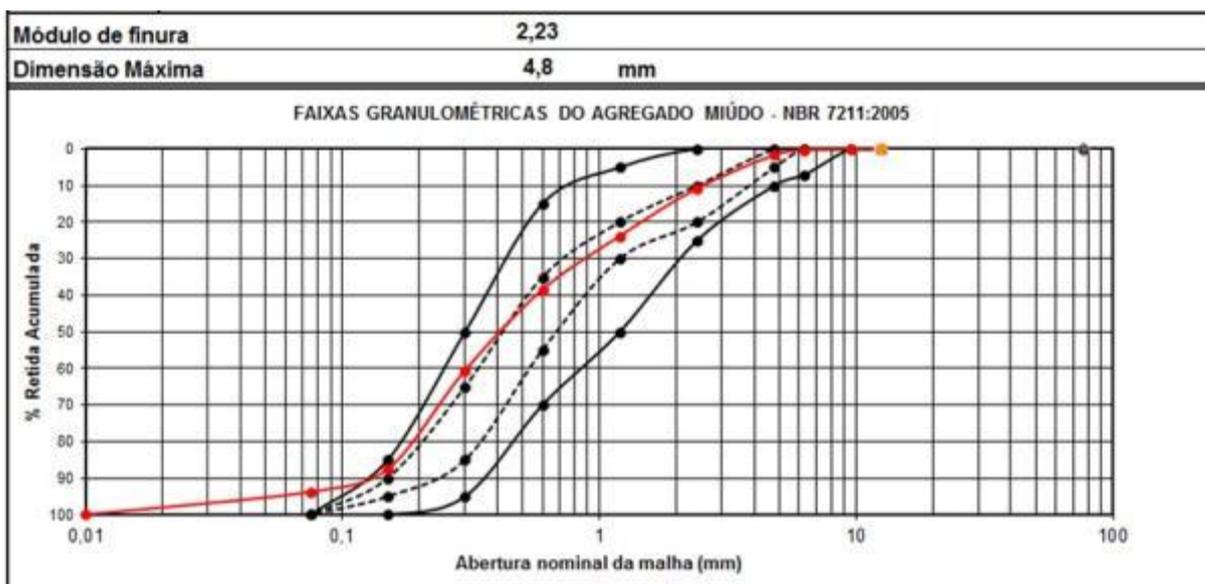


FIGURA 10. COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO.

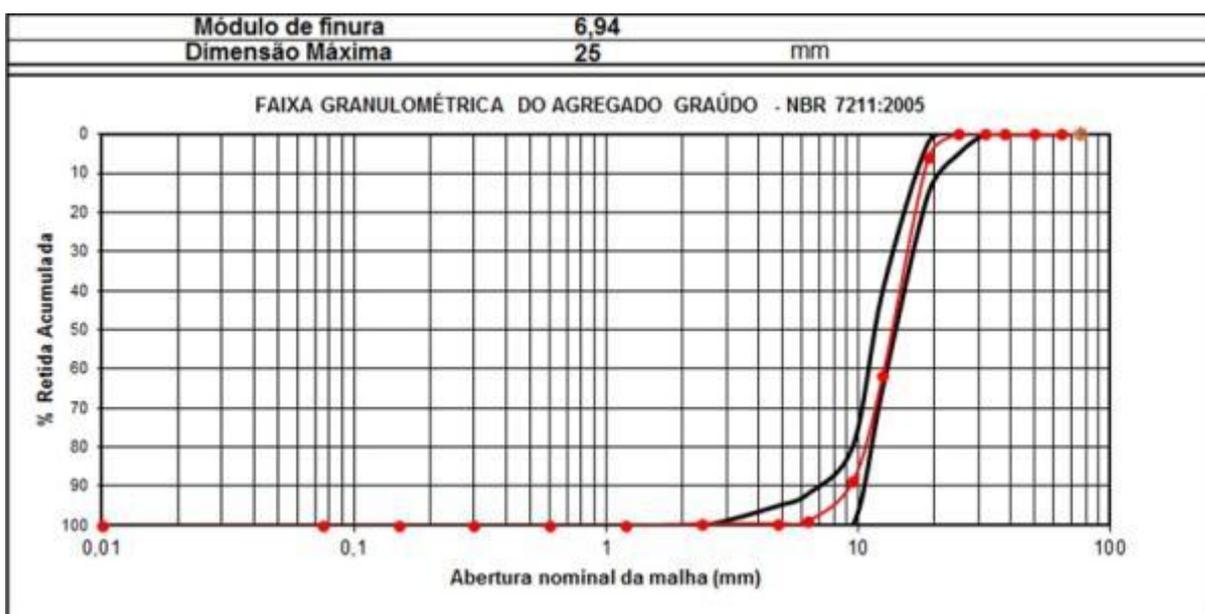


FIGURA 11. COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO GRAÚDO – BRITA 9,5/25.

#### 4.2.3 Armaduras de aço carbono e limpeza

Conforme descrito anteriormente, as barras de aço empregadas nos corpos de prova são do tipo CA50, com 10 mm de diâmetro e 65 cm de comprimento.

Para a diminuição da variabilidade na análise, as barras de aço passaram por um processo de limpeza semelhante ao usado por Medeiros (2002), baseado na ASTM G1:1990:

- Imersão em acetona industrial durante 3 minutos, para a retirada das contaminações superficiais (Figura 12-A);
- Imersão em solução contendo ácido clorídrico e água (na proporção de 1:1) acrescida de um inibidor de corrosão (hexametilenotetramina). O tempo total de imersão foi de 10 minutos (Figura 12-B);
- Etapa de eliminação de resíduos de gordura e de eliminação do produto de corrosão pela lavagem em água (Figura 12-C);
- Secagem com papel toalha (Figura 12-D).

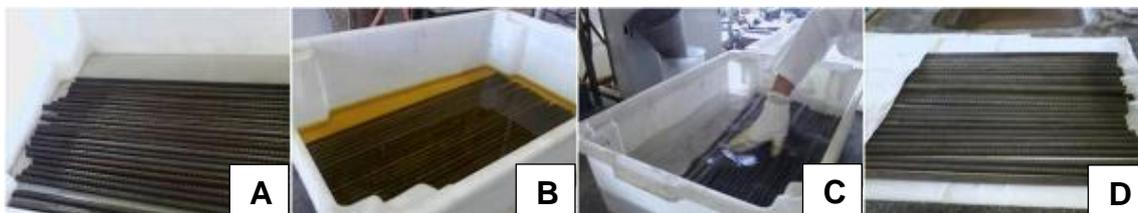


FIGURA 12. PROCEDIMENTOS DE LIMPEZA DAS ARMADURAS: (A) IMERSÃO EM ACETONA; (B) IMERSÃO EM SOLUÇÃO DE HCL, ÁGUA E HEXAMETILENOTETRAMINA; (C) LAVAGEM EM ÁGUA; (D) SECAGEM DAS ARMADURAS COM PAPEL TOALHA.

#### 4.2.4 Água

Foi empregada a água de amassamento proveniente da Companhia Paranaense Sanepar, cujo controle de qualidade do mesmo é rigorosamente avaliado pela mesma.

Quanto à inserção de NaCl incorporado na água de amassamento dos corpos de prova contaminados, foi adicionado durante a dosagem dos concretos em

proporções calculadas segundo uma porcentagem significativa de íons  $\text{Cl}^-$  na massa (1% de  $\text{Cl}^-$  em relação a massa de cimento). Este é considerado um alto grau de contaminação, uma vez que o teor crítico para despassivação das armaduras mais aceito mundialmente é de 0,4%, segundo a norma EN 206 – part 1: Betão: Especificação, desempenho, produção e conformidade, 2007. Para garantir o teor de 1% de cloretos em relação a massa de cimento, levou-se em consideração a massa molecular dos componentes Na e Cl (23 g e 35 g, respectivamente) para o cálculo da massa de NaCl a ser adicionada na betoneira.

#### 4.2.5 Concretos estudados

O adensamento dos corpos de prova cilíndricos e dos prismáticos foi realizado com a mesa vibratória em 2 camadas de mesma altura.

A avaliação da resistência à compressão compreendeu apenas os concretos sem adição de solução de cloreto. Os corpos de prova moldados para esta finalidade eram cilíndricos de dimensões 10x20cm.

A dosagem do concreto foi conduzida de acordo com o método de dosagem mais consagrado no Brasil e detalhado por Helene e Terzian (1992). Desse modo, a dosagem se baseou no teor ótimo de argamassa seca e uma faixa de abatimento de  $100 \pm 20$  mm para se chegar ao proporcionamento desejado e elaboração do diagrama de dosagem. O teor de argamassa obtido (teor ótimo + 2 % de folga) foi igual a 52 %. Cabe salientar que não foi incorporado aditivo nem adição na dosagem das misturas para evitar a introdução de materiais extra que possam gerar interferências indesejadas e incompreendidas nas leituras de potencial de corrosão, foco deste estudo. As proporções finais para cada relação água/cimento podem ser visualizadas na Tabela 7.

TABELA 7. RESUMO DAS DOSAGENS REALZADAS PARA CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.

m	cimento: areia: brita:				Slump (mm)	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Massa Específica do concreto (kg/m <sup>3</sup> )
	a/c						
3	1	1,08	1,92	0,43	105	540	2390
4	1	1,60	2,40	0,50	90	421	2315
5	1	2,12	2,88	0,59	95	346	2280

### 4.3 ENSAIOS REALIZADOS

#### 4.3.1 Ensaio de resistência à compressão simples e tração por compressão diametral

Os ensaios de resistência à compressão simples e de tração por compressão diametral foram realizados segundo as normas ABNT NBR 5739:2007 e ABNT NBR 7222:2010, respectivamente. Os corpos de prova cilíndricos moldados para esta finalidade tinham dimensões de 10 x 20 cm (Figura 13. ensaio para determinação da resistência à compressão nos corpos de prova. Figura 13) e optou-se pela ruptura a 112 dias de idade, devido ao cronograma do estudo, acompanhando o fim do período de leituras da 2ª fase. Durante todo o período de cura, os mesmos permaneceram em câmara úmida com temperatura e umidade controladas de acordo com os limites especificados pelas referidas normas ( $23 \pm 2$  °C e umidade relativa do ar superior a 95 %). Previamente à execução do ensaio de resistência à compressão, o capeamento das faces dos corpos de prova foi realizado de forma a manter a planicidade das faces em contato com a prensa de ruptura, conforme preconizado pela norma ABNT NBR 5738:2003 (Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova). A velocidade de carregamento adotada dentro dos limites especificados foi de 0,4 MPa/s.



FIGURA 13. ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NOS CORPOS DE PROVA.

Quanto ao ensaio de tração por compressão diametral, os corpos de prova cilíndricos foram inseridos entre os pratos da prensa apoiados entre duas tiras de chapa dura de madeira, com especificação conforme a norma ABNT NBR 10024:1987, com comprimento igual ao da geratriz do corpo de prova (Figura 14). A carga para ruptura foi aplicada continuamente, sem choque, com crescimento constante da tensão de tração, a uma velocidade de  $(0,05 \pm 0,02)$  MPa/s, até a ruptura do corpo de prova.

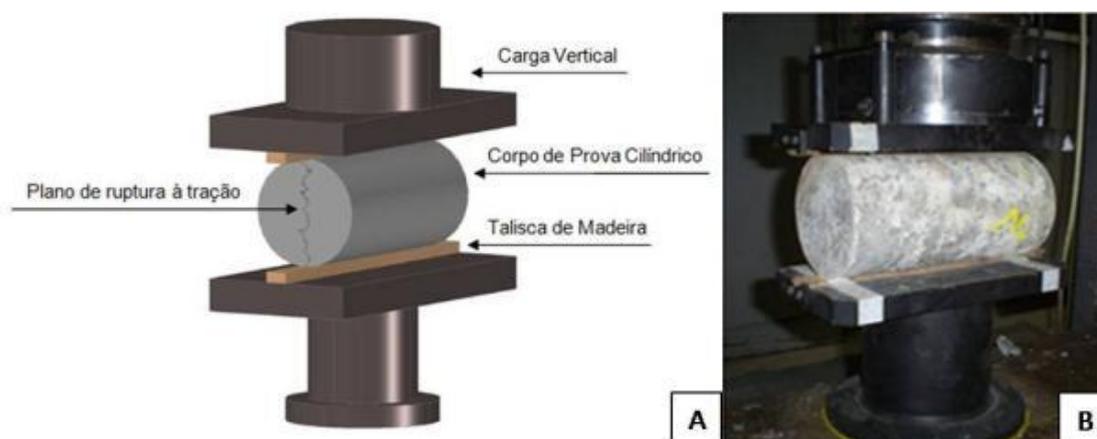


FIGURA 14. (A) ESQUEMA DO ENSAIO DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL; (B) EXECUÇÃO DO ENSAIO NA PRENSA DE RUPTURA.

Cabe salientar que foram ensaiados 6 corpos de prova para cada ensaio, adotando-se a média dos mesmos para posterior análise e correlação.

#### 4.3.2 Potencial de Corrosão

O método empregado para a avaliação do potencial de corrosão compreende o uso de um voltímetro de alta impedância de entrada ( $> 20 \text{ M}\Omega$ ) e resolução em nível de milivolt, conectado a um eletrodo de referência de cobre/sulfato de cobre e à armadura que se deseja avaliar. Para melhorar a condutividade elétrica entre o eletrodo de referência e o concreto, uma esponja umedecida com água foi posicionada, no momento das leituras, na superfície de contato entre ambos.

As leituras consistem na diferença de potencial (ddp) entre as partes envolvidas no ensaio (eletrólito instável - sistema aço/concreto - e outro estável - eletrodo de referência) e se baseiam no princípio de uma pilha eletroquímica constituída pelas duas partes mencionadas anteriormente. Dessa forma, o planejamento dos ensaios compreendeu a realização das leituras em 2 faces (face 1 e face 2, conforme a Figura 15) contendo um total de 12 pontos (6 pontos em cada face) previamente determinados e distantes simetricamente um dos outros. Dessa forma, cada exemplar de mesmo traço e nível de contaminação proporcionou 6 leituras referentes às 2 barras de mesmo cobrimento. O resultado disso é 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 15 mostra um esquema dos pontos de leitura em uma face do corpo de prova.

É importante salientar também que nenhuma das faces de leitura é a face de rasadura dos corpos de prova.

O método segue o procedimento estabelecido pela ASTM 876:2009 e faz necessário um contato elétrico do voltímetro com a armadura a qual se deseja efetivar a leitura de potencial de corrosão (ver Figura 15). Desse modo, em todas as leituras, um pólo do voltímetro foi ligado ao eletrodo de referência de cobre/sulfato de cobre e o outro a armadura investigada. O eletrodo de referência entra em

contato com a superfície do concreto de modo que a armadura a qual se deseja investigar esteja logo abaixo do contato entre o eletrodo e a superfície do concreto.

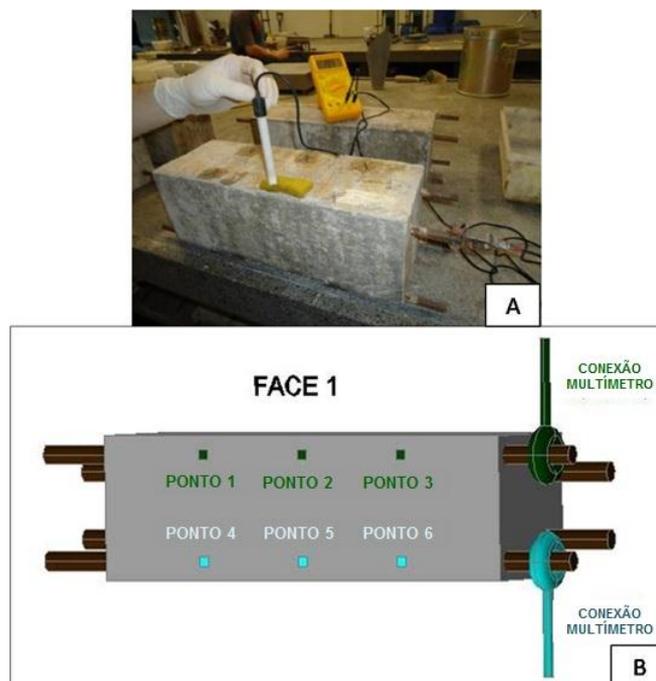


FIGURA 15. (A) EXECUÇÃO DO ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO COM MULTÍMETRO DE ALTA IMPEDÂNCIA; (B) POSICIONAMENTO DOS PONTOS DE LEITURAS E MULTÍMETRO.

As leituras de potencial obtidas são negativas e associa-se à probabilidade de corrosão de acordo com as faixas previamente estabelecidas pela norma ASTM C 876:2009, representado na Tabela 3.

O cronograma de leituras foi estabelecido segundo as condições de cura do concreto bem como a evolução das mesmas ao longo do tempo. Inicialmente, optou-se por realizar as leituras segundo a idade dos corpos de prova, para 56, 62, 63, 69 e 70 dias acondicionados em câmara úmida, enquanto que para os 77, 91, 98, 105 e 112 dias mantidos em condições ambiente de laboratório. Estas datas são relativas à data de moldagem dos corpos de prova, proporcionando dessa forma uma comparação entre potenciais com idades semelhantes.

A terceira etapa de ensaios foi realizada após 1 ano a partir das últimas leituras da primeira etapa e optou-se por realizar as leituras por tempo de ciclagem

(ciclo de imersão e secagem em água de torneira), para que todos os corpos de prova pudessem ser analisados nas mesmas datas de ciclo.

A periodicidade semanal das condições de imersão e secagem consistiu em indução de saturação durante 2 dias (sábado e domingo) e as leituras em condições ambiente de laboratório foram realizadas de segunda a sexta-feira (5 dias, conforme a Tabela 8). Foram realizados 3 ciclos, no total.

TABELA 8. CICLOS DE UMEDECIMENTO E SECAGEM.

Semi-ciclo	Condição	Duração
Umedecimento	Imerso em água de torneira	2 dias
Secagem	Ambiente de laboratório	5 dias

A Figura 16 representa o planejamento de acordo com os ensaios realizados em cada período e as variáveis de resposta a serem analisadas.



FIGURA 16. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS ENSAIOS REALIZADOS EM CADA ETAPA DO MONITORAMENTO E AS VARIÁVEIS DE RESPOSTA ANALISADAS.

Um detalhe relevante neste ensaio diz respeito à determinação do teor de umidade dos corpos de prova. Para viabilizar isso, foi necessário obter as massas dos corpos de prova em condição seca para o cálculo posterior dos teores de umidade, referente a cada data de início e fim das leituras de potencial de corrosão da semana considerada.

Para a obtenção da massa dos corpos de prova prismáticos no estado seco a ser considerada nos cálculos de absorção, os corpos de prova foram submetidos à secagem durante 96h em estufa a 60 °C, para obtenção da massa seca.

O ensaio para determinação do Potencial de Corrosão segundo gradiente de temperatura consistiu na imersão dos corpos de prova em recipiente com água de torneira, sendo em seguida submetido ao aquecimento contínuo, até atingir a temperatura de 60 °C. As leituras de potencial de corrosão foram processadas entre 20 e 60 °C, com registros a cada 10 °C. Este ensaio foi realizado apenas para os traços extremos, ou seja, para relação água/cimento igual a 0,43 e 0,59 (Figura 17).



FIGURA 17. ENSAIO DE ANÁLISE DE POTENCIAL DE CORROSÃO SOB SEGUNDO GRADIENTE DE TEMPERATURA.

#### 4.3.3 Absorção de água por sucção capilar

O ensaio de absorção de água por sucção capilar foi realizado de acordo com a norma NBR 9779:1995. A medida da absorção é indireta e determinada a partir da diferença entre a massa do corpo de prova após secagem em estufa e estabilização a temperatura de  $23 \pm 2$  °C e a sua massa em diversos horários a

partir do início do ensaio já determinados em norma. Esta diferença dividida pela área da seção transversal do corpo de prova resulta na capacidade de absorção por capilaridade em g/cm<sup>2</sup>.

Como determinado pela NBR 9779:1995, utilizou-se neste experimento um recipiente capaz de manter um nível de água constante ao longo de todo o ensaio. Ele é dotado de um sistema de entrada de água no topo da parede do reservatório e outro de sifão acoplado ao fundo do reservatório. O papel do sifão é regular a vazão de saída de acordo com a vazão de entrada, de modo que haja um equilíbrio entre estes dois valores (Figura 18). É importante ressaltar que o nível de água no reservatório deve estar na faixa de  $5 \pm 1$  mm a partir do topo de apoios onde os corpos de prova são posicionados.

As massas dos corpos de prova prismáticos (15,0 x 15,0 x 45,0 cm) foram determinadas nos seguintes tempos de ensaio: a cada 10 minutos até a primeira hora, 3, 6, 24, 48 e 72 horas. A superfície do concreto ensaiado foi seca com pano absorvente antes de cada pesagem. As pesagens da primeira hora não são normatizadas, mas optou-se por introduzir mais leituras para descrever mais detalhadamente o processo de absorção.

Devido ao tamanho do recipiente para ensaio (120,0 x 51,5 x 17,5 cm), foram ensaiados apenas 3 corpos de prova por vez, sempre levando em conta a separação dos corpos de prova segundo o teor de contaminação.

Embora a norma também estabeleça o corte do corpo de prova para que o mapeamento da entrada de água por sucção no concreto seja determinado, não foi possível realizar este mapeamento devido à continuidade dos ensaios para estudos futuros.



FIGURA 18. ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR SUCÇÃO CAPILAR DE ACORDO COM A NBR 9779:1995.

#### 4.3.4 Absorção de água por imersão

A absorção por imersão é um processo pelo qual a água é conduzida para dentro e tende a ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido poroso. Este ensaio foi realizado de acordo com a NBR 9778:2005.

O processo inicial do ensaio consistiu em determinar a massa dos corpos de prova em condição seca. Para tal, os mesmos permaneceram por um período de 72h em estufa, a uma temperatura de 60 °C. Embora a norma estabeleça o patamar de temperatura bem acima do realizado ( $105 \pm 5$  °C), optou-se por diminuir a temperatura e deixá-los resfriar a temperatura controlada no laboratório por 24 horas. Este cuidado foi aplicado de forma a evitar fissuras de retração durante o processo de secagem além de evitar alguma degradação dos compostos hidratados do concreto que possam ocorrer neste nível de temperatura.

A determinação da massa na condição saturada foi obtida após a imersão em água e mantido nesta condição durante 72 horas. Os resultados de absorção são expressos em porcentagem de massa.

#### 4.3.5 Absorção pelo ensaio do cachimbo

Empregado inicialmente para avaliar a permeabilidade em superfícies verticais (paredes), o método do cachimbo possibilita a avaliação da absorção de água sob uma pressão exercida pela coluna de água de 92 mm que corresponde à

ação estática de um vento com velocidade aproximada de 140 km/h (BOLETIM IPT 68:1995).

O processo de ensaio baseia-se no ensaio de permeabilidade de Karstens ou ensaio de pipeta Rilem, com adaptação para superfícies verticais (MEDEIROS, 2008).

Neste método, o cachimbo foi fixado sobre a superfície de análise através de um silicone acrílico para promover total aderência entre a superfície e o cachimbo, evitando que o líquido vazze. É importante salientar que a face de execução do ensaio foi padronizada, sendo a seção com armadura exposta e cobertura igual a 1 cm na sua parte superior (Figura 19).

O monitoramento de absorção adaptado foi realizado em todos os corpos de prova no mesmo dia, de modo a obter mínima interferência do gradiente térmico e condições de umidade.



FIGURA 19. FIXAÇÃO DO CACHIMBO NA FACE DE ARMADURA EXPOSTA.

As leituras referem-se ao volume de água absorvido pelo concreto, diminuindo dessa forma a coluna de água inicial da pipeta. As mesmas foram realizadas a cada minuto durante 15 minutos, mas pode-se também continuar com o ensaio até o nível de água atingir a graduação do frasco igual a 4 cm<sup>3</sup> (BOLETIM IPT 68:1995).

O ensaio tem como principal limitação as pequenas dimensões da pipeta, o qual conduz a mensuração localizada, não representando a situação de uma obra, se for o caso (HELENE e PEREIRA, 2003).

A permeabilidade de água é mensurada segundo a taxa de absorção média (entre 15 leituras, minuto a minuto) por unidade de tempo (minutos).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E TRAÇÃO NA COMPRESSÃO DIAMETRAL

A Figura 20-A e a Figura 20-B representa as médias para os ensaios de resistência à compressão simples e tração por compressão diametral, de acordo com o traço sem contaminação por cloretos. Cabe lembrar também que os ensaios foram realizados a 112 dias de idade, devido ao cronograma dos ensaios.

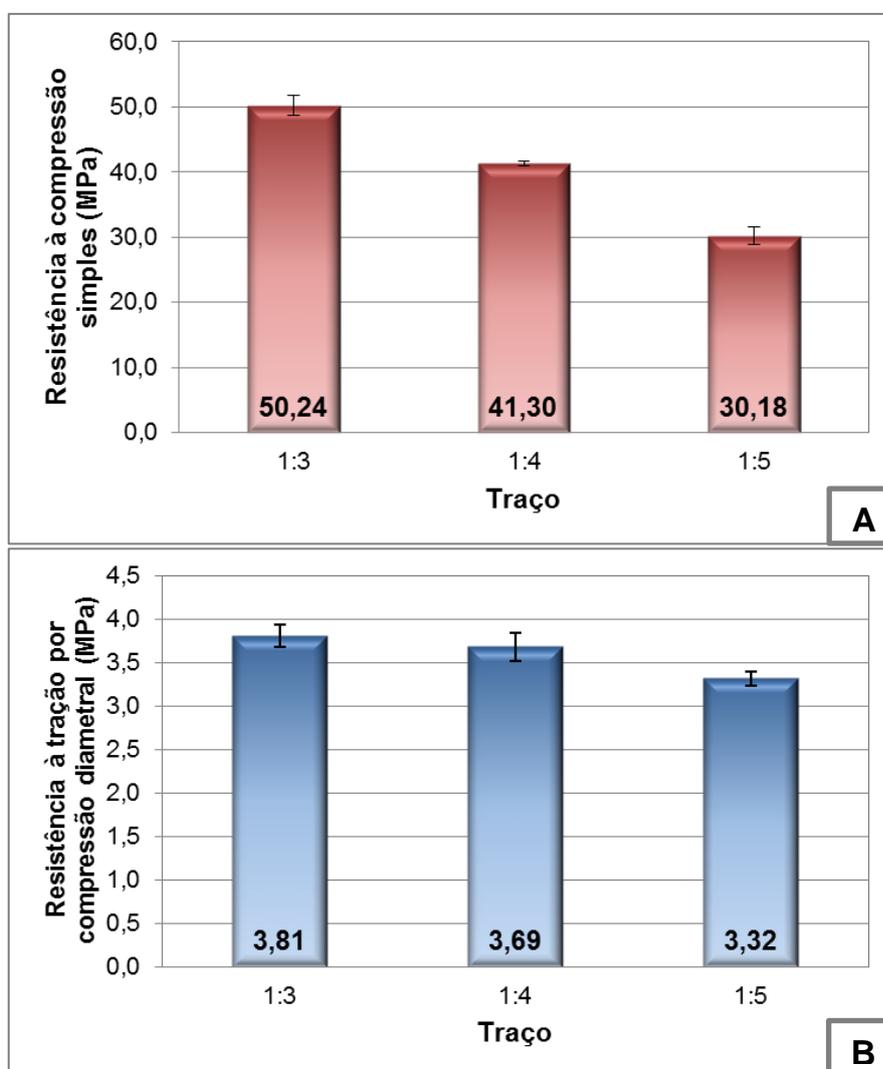


FIGURA 20. TRAÇOS 1:3 ( $A/C=0,43$ ), 1:4 ( $0,50$ ) E 1:5 ( $0,59$ ): (A) MÉDIAS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO; (B) TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.

Pelos gráficos é possível observar a interferência dos traços nos resultados de resistência mecânica, sendo maior no caso do concreto mais rico e com menor relação água/cimento (traço 1:3 – a/c = 0,49).

Correlacionando os dois ensaios, pode-se afirmar que a relação é significativa, haja vista a alta correlação apresentada com o  $R^2$  maior do que 0,95 (Figura 21).

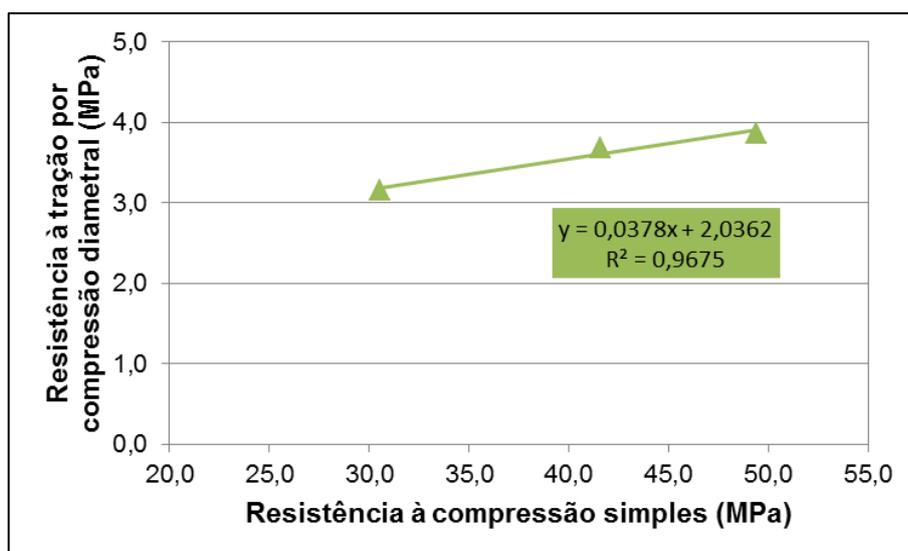


FIGURA 21. CORRELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DOS CORPOS DE PROVA SEM CONTAMINAÇÃO POR CLORETOS.

## 5.2 POTENCIAL DE CORROSÃO

As leituras de potencial de corrosão são o foco deste trabalho e neste item apresenta-se os resultados obtidos nas 3 fases do monitoramento, tais como:

- FASE 1: Período de cura por 70 dias;
- FASE 2: Secagem em ambiente de laboratório entre 70 e 98 dias;
- FASE 3: Umedecimento e secagem entre 425 e 450 dias após a moldagem.

### 5.2.1 Primeira e segunda fases

A Figura 22, Figura 23 e Figura 24 apresentam o comportamento das leituras de potencial de corrosão ao longo do período monitorado para os traços 1:3 ( $a/c=0,43$ ), 1:4 ( $a/c=0,50$ ) e 1:5 ( $a/c=0,59$ ), respectivamente. É importante salientar que os gráficos podem ser divididos em duas fases, sendo a primeira considerada até os 70 dias que corresponde ao tempo de monitoramento relativo ao período de cura, ou seja, em que os corpos de prova estavam na câmara úmida a 100% de umidade relativa e 23 °C de temperatura. Nota-se que para todos os casos, este é um período em que os valores de potencial de corrosão estão muito negativos indicando que existe alguma atividade do processo de corrosão na superfície das barras. Isto pode ser relativo ao momento de formação da película passivadora das armaduras dentro do concreto altamente alcalino, conforme também observado por Araújo (2004). Em seus estudos, a constatação da formação da película para as relações água/cimento iguais a 0,40 e 0,70 se deu após 130 dias, identificada pelos potenciais menores que -200 mV e dos valores baixos de intensidade de corrente de corrosão ( $< 0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ). Sabe-se que esta película é formada por óxidos e é possível que, estando a sua formação em desenvolvimento, ela tenha ocasionado estes valores negativos indicando processo de corrosão ativo.

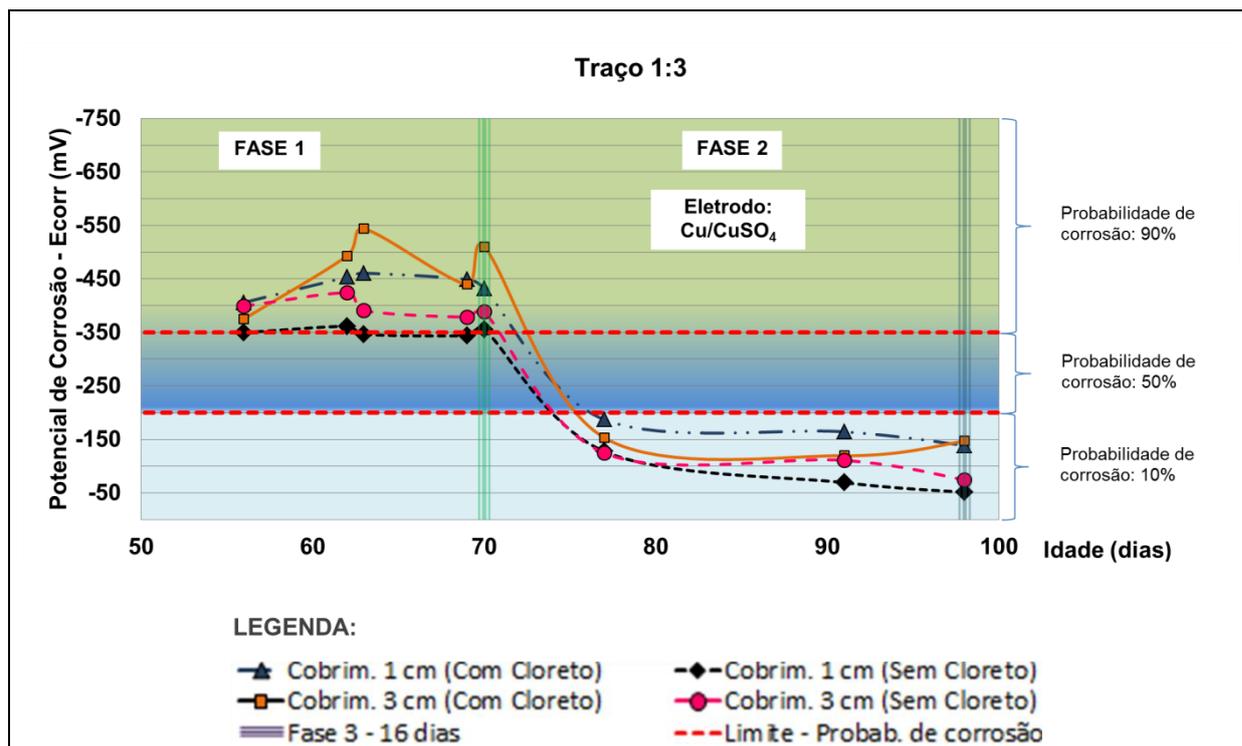


FIGURA 22. EVOLUÇÃO DOS POTENCIAIS DE CORROSÃO AO LONGO DO PERÍODO MONITORADO NO PRIMEIRO ANO (FASES 1 E 2 – ELETRODO CU/CUSO<sub>4</sub>) - TRAÇO 1:3 (A/C=0,43).

Ainda analisando a 1ª fase nota-se que não houve uma tendência clara de influência da espessura do cobrimento e do grau de contaminação do concreto por íons cloretos.

A 2ª fase consiste no monitoramento do potencial de corrosão entre o 70º dia (saída da câmara úmida) e o 98º dia. Nesta fase, os corpos de prova foram mantidos em ambiente de laboratório e, conseqüentemente, em processo de secagem ao ar. Foi verificado na Figura 22, Figura 23 e Figura 24 uma clara tendência de redução dos valores de potencial de corrosão ao longo do período de secagem. Em praticamente todos os casos, as leituras se tornaram maiores do que - 200 mV, enquadrando com limite para baixa probabilidade de corrosão.

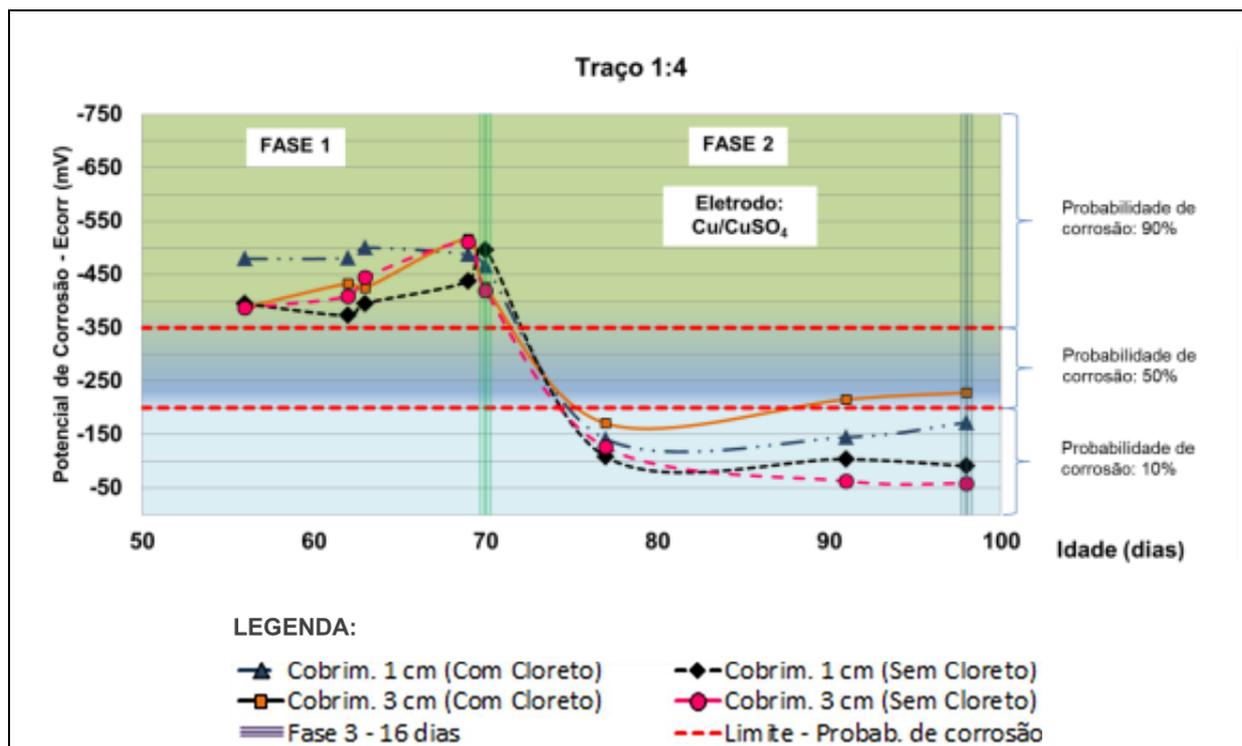


FIGURA 23. EVOLUÇÃO DOS POTENCIAIS DE CORROSÃO AO LONGO DO PERÍODO MONITORADO NO PRIMEIRO ANO (FASES 1 E 2 - ELETRODO CU/CUSO<sub>4</sub>) - TRAÇO 1:4 (A/C=0,50).

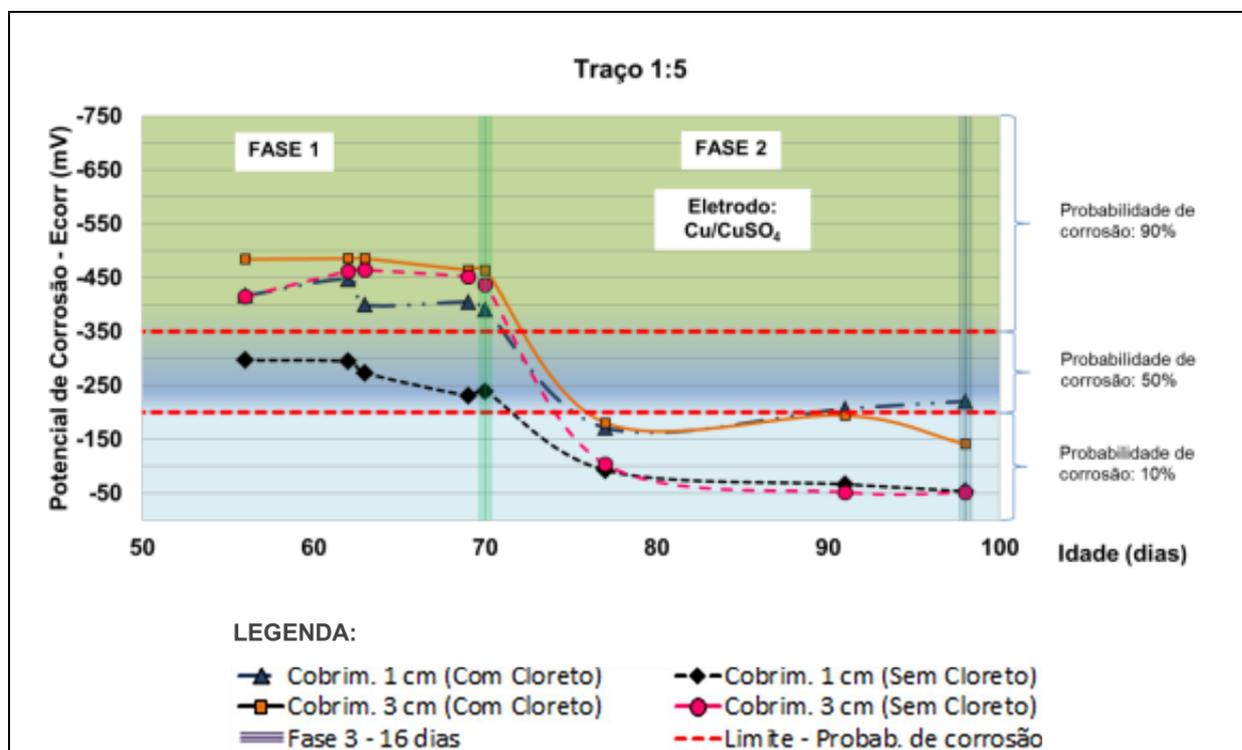


FIGURA 24. EVOLUÇÃO DOS POTENCIAIS DE CORROSÃO AO LONGO DO PERÍODO MONITORADO NO PRIMEIRO ANO (FASES 1 E 2 - ELETRODO CU/CUSO<sub>4</sub>) - TRAÇO 1:5 (A/C=0,59).



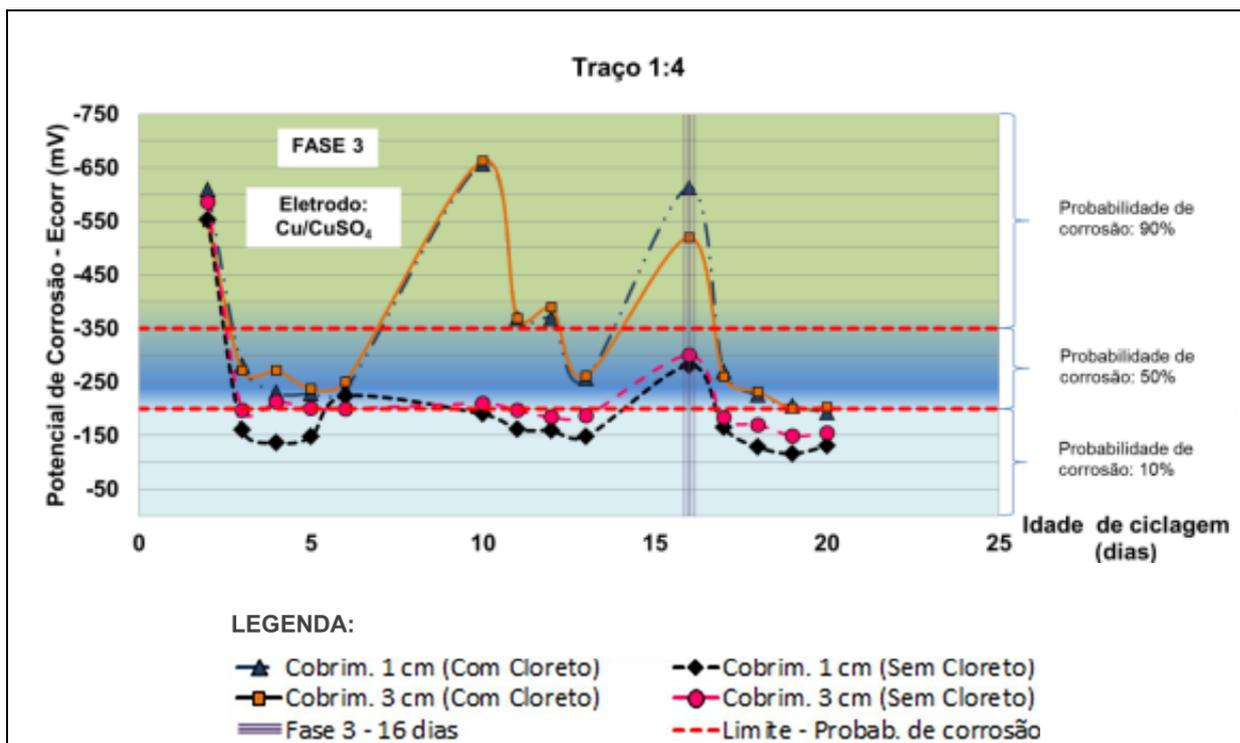


FIGURA 26. EVOLUÇÃO DOS POTENCIAIS DE CORROSÃO AO LONGO DO PERÍODO MONITORADO APÓS O PRIMEIRO ANO (FASE 3 – ELETRODO CU/CUSO<sub>4</sub>) - TRAÇO 1:4.

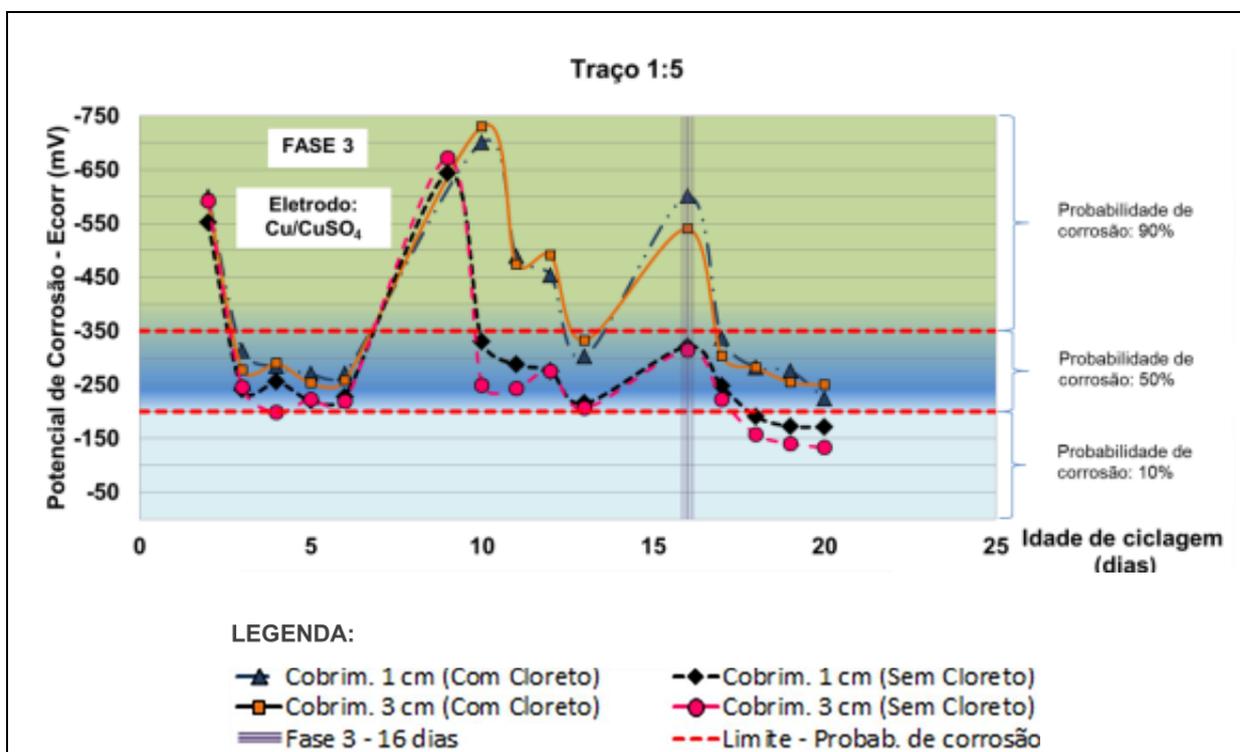


FIGURA 27. EVOLUÇÃO DOS POTENCIAIS DE CORROSÃO AO LONGO DO PERÍODO MONITORADO APÓS O PRIMEIRO ANO (FASE 3 – ELETRODO CU/CUSO<sub>4</sub>) - TRAÇO 1:5.

### 5.2.3 Correlação entre resultados de potencial e outros parâmetros do estudo

#### 5.2.3.1 FASE 1:

Analisando os parâmetros de estudo separadamente por fases, verifica-se que na primeira fase (corpos de prova em condição de cura em câmara úmida) o revestimento exerceu influência efetiva sobre o potencial de corrosão em alguns casos (ver Figura 28 e Figura 29), podendo-se citar os concretos com cloretos - traços 1:3, 1:5 e os concretos sem cloretos traços 1:4 e 1:5. Pela análise de variância (Tabela 9 e Tabela 10), pode-se afirmar que os revestimentos não exerceram influência direta apenas para o caso do traço 1:4 – com cloreto e 1:3 – sem cloreto, com intervalo de confiança de 95% e que a grande maioria das leituras encontra-se na zona com 90% de probabilidade de corrosão tanto para os casos com cloretos como para sem cloretos. Vale salientar também que a influência no traço 1:4 (com e sem cloretos) foi no sentido contrário da influência apresentada nos outros dois casos citados, ou seja, as leituras são menos negativas no caso de 3 cm de espessura de revestimento. Os demais traços, apesar de as médias de potencial de corrosão serem diferentes, não devem ser considerados distintos porque a sua variabilidade está indicando que as médias não são diferentes. Isso é verificado pelas barras de variação dos resultados incluídas em cada barra de resultado dos gráficos, apresentando potenciais ligeiramente mais negativos para o revestimento igual a 3 cm, com maior desvio padrão para os traços analisados. Cabe salientar que nesta primeira etapa ainda não se pode avaliar o traço que apresentou média de potencial mais negativo para os revestimentos analisados devido à faixa de aproximação de desvios padrão apresentados entre eles.

Baseado no fato de que as médias não foram sempre estatisticamente distintas e que não houve uma tendência clara de influência do revestimento, ora o aumento da espessura implicando em leituras mais baixas e ora em mais altas do

que a espessura de 1 cm, este trabalho não confirma a influência da espessura de cobertura nas leituras de potencial de corrosão na primeira fase do monitoramento.

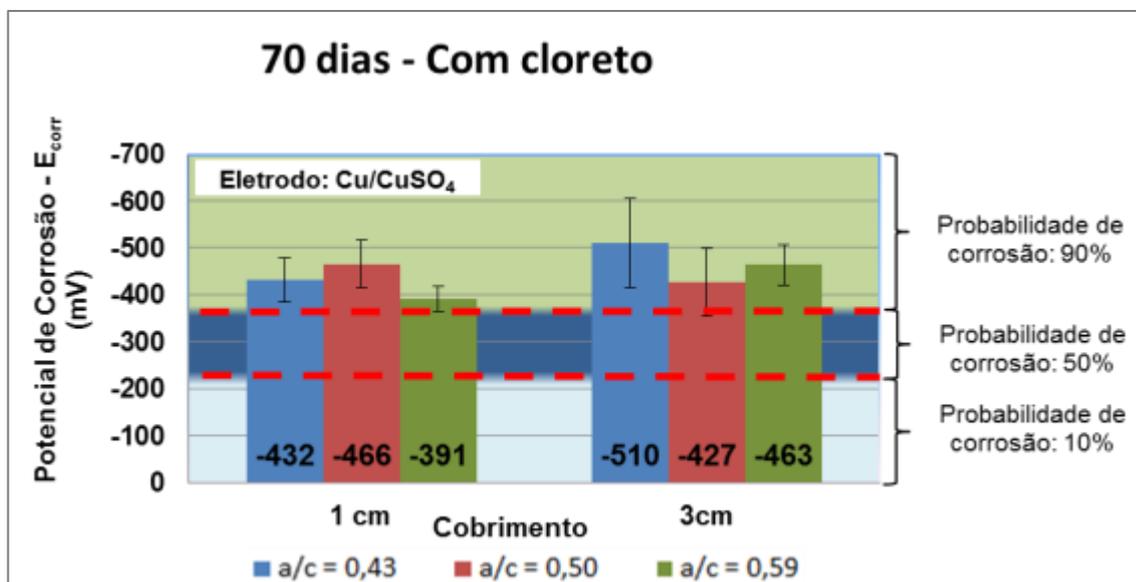


FIGURA 28. INFLUÊNCIA DO COBRIMENTO SOBRE O POTENCIAL DE CORROSÃO COM A/C=0,43; 0,50 E 0,59 - COM CLORETO.

TABELA 9. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO COBRIMENTO PARA OS TRAÇOS 1:3 (A/C=0,43); 1:4 (A/C=0,50) E 1:5 (A/C=0,59) - COM CLORETO (95% DE SIGNIFICÂNCIA).

ANOVA	Traço 1:3	70 dias	Com Cloreto			
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre cobrimentos	36582,04	1	36582,042	6,384	0,019	4,301
Dentro dos grupos	126063,92	22	5730,178			
Total	162645,96	23				

ANOVA	Traço 1:4	70 dias	Com Cloreto			
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre cobrimentos	9165,04	1	9165,042	2,319	0,142	4,301
Dentro dos grupos	86945,92	22	3952,087			
Total	96110,96	23				

ANOVA	Traço 1:5	70 dias	Com Cloreto			
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre cobrimentos	31755,375	1	31755,375	25,719	0,000	4,301
Dentro dos grupos	27163,58333	22	1234,708			
Total	58918,95833	23				

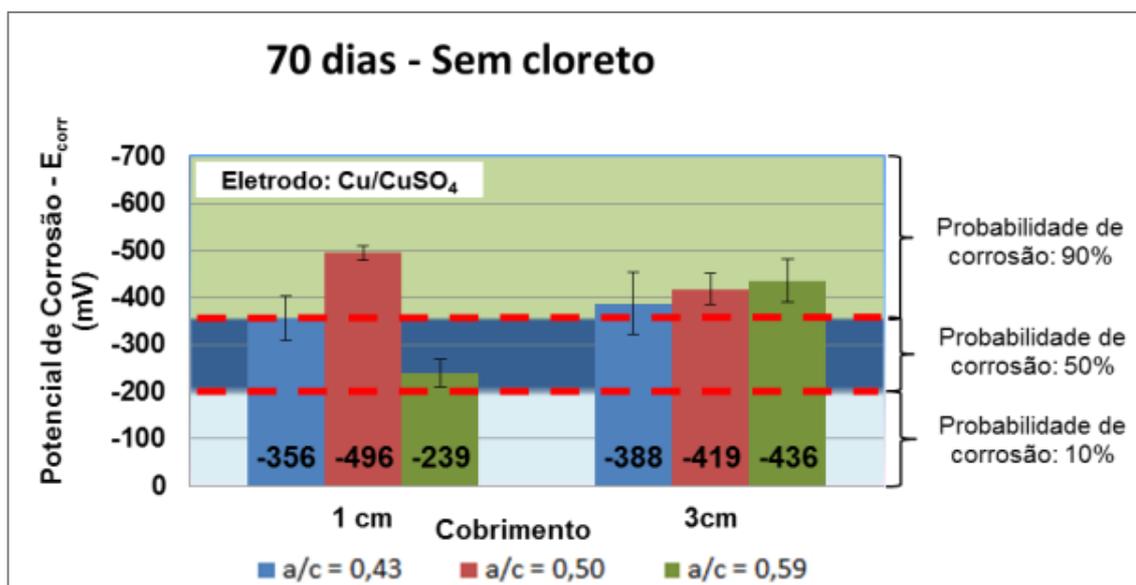


FIGURA 29. INFLUÊNCIA DO COBRIMENTO SOBRE O POTENCIAL DE CORROSÃO COM A/C=0,43; 0,50 E 0,59 - SEM CLORETO.

TABELA 10. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO COBRIMENTO PARA OS TRAÇOS 1:3 (A/C=0,43); 1:4 (A/C=0,50) E 1:5 (A/C=0,59) – SEM CLORETO (95% DE SIGNIFICÂNCIA).

ANOVA	Traço 1:3	70 dias	Sem Cloreto				
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	
Entre cobrimentos	6337,50	1	6337,500	2,325	0,142	4,301	
Dentro dos grupos	59956,50	22	2725,295				
Total	66294,00	23					

ANOVA	Traço 1:4	70 dias	Sem Cloreto				
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	
Entre cobrimentos	35805,38	1	35805,375	4,460	0,046	4,301	
Dentro dos grupos	176606,58	22	8027,572				
Total	212411,96	23					

ANOVA	Traço 1:5	70 dias	Sem Cloreto				
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	
Entre cobrimentos	234037,50	1	234037,50	155,91	0,00	4,30	
Dentro dos grupos	33023,83	22	1501,08				
Total	267061,33	23					

A Figura 30 e Figura 31 apresentam gráficos de variação de potencial de corrosão para os dois níveis de contaminação estudados e para o tempo de 70 dias para espessuras de cobrimento de 1 cm e 3 cm, respectivamente.

Não foi encontrada uma tendência clara do teor de contaminação neste

momento do monitoramento do potencial de corrosão. Isso porque, neste período de cura, a ocorrência de adição de cloretos sobre as leituras não apresentaram alto nível significância, sobretudo para o traço 1:4 (com cobertura de 1 cm) e para os traços 1:4 e 1:5 (com cobertura de 3 cm). Isso pode ser constatado na Tabela 11 e Tabela 12, que apresentam as análises de variância dos resultados quanto aos níveis de contaminação e para uma significância de 95%.

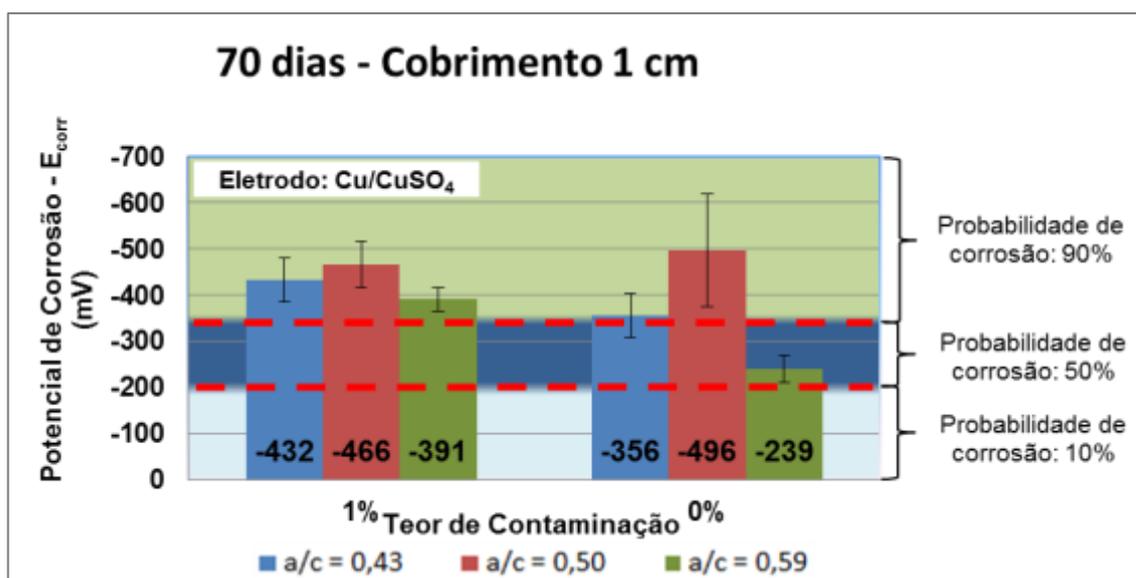


FIGURA 30. INFLUÊNCIA DO TEOR DE CONTAMINAÇÃO SOBRE O POTENCIAL DE CORROSÃO COM A/C=0,43; 0,50 E 0,59 – COBRIMENTO 1 CM.

TABELA 11. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO TEOR DE CONTAMINAÇÃO PARA OS TRAÇOS 1:3 (A/C=0,43); 1:4 (A/C=0,50) E 1:5 (A/C=0,59) – COBRIMENTO 1 CM (95% DE SIGNIFICÂNCIA).

ANOVA	Traço 1:3		Cobrimento = 1 cm		70 dias		
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	
Entre taxas de contaminação	35037,04167	1	35037,042	22,050	0,000	4,301	
Dentro dos grupos	34957,91667	22	1588,996				
Total	69994,95833	23					

ANOVA	Traço 1:4		Cobrimento = 1 cm		70 dias		
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	
Entre taxas de contaminação	5490,37	1	5490,375	0,630	0,436	4,301	
Dentro dos grupos	191642,58	22	8711,027				
Total	197132,96	23					

ANOVA	Traço 1:5		Cobrimento = 1 cm		70 dias		
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	
Entre taxas de contaminação	138168,38	1	138168,375	183,917	0,000	4,301	
Dentro dos grupos	16527,58	22	751,254				
Total	154695,96	23					

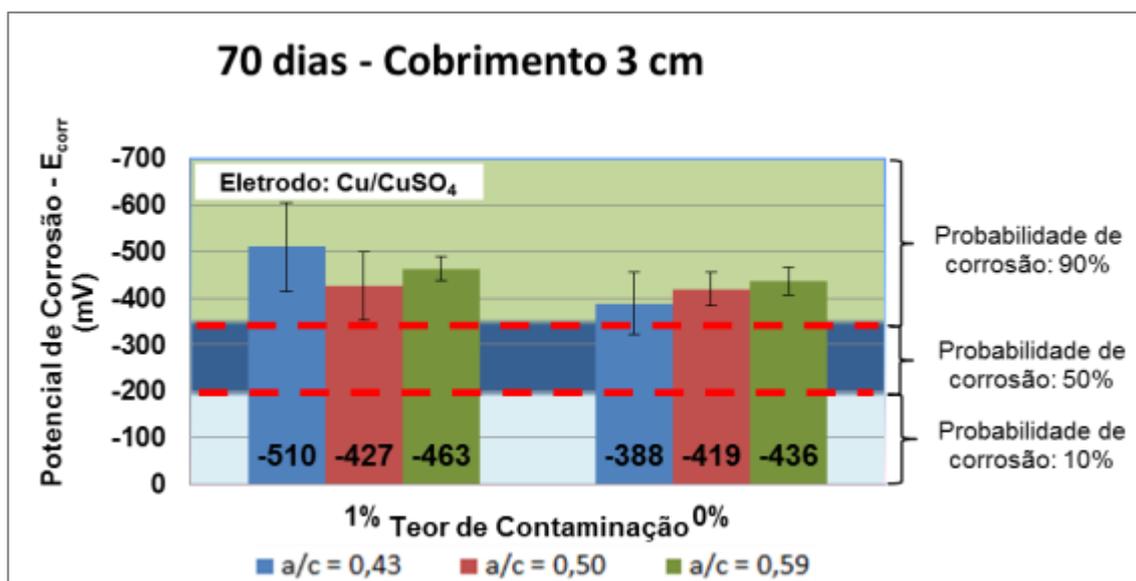


FIGURA 31. INFLUÊNCIA DO TEOR DE CONTAMINAÇÃO SOBRE O POTENCIAL DE CORROSÃO COM A/C=0,43; 0,50 E 0,59 – COBRIMENTO 3 CM.

TABELA 12. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO TEOR DE CONTAMINAÇÃO PARA OS TRAÇOS 1:3 (A/C=0,43); 1:4 (A/C=0,50) E 1:5 (A/C=0,59) – COBRIMENTO 3 CM (95% DE SIGNIFICÂNCIA).

ANOVA	Traço 1:3		Cobrimento = 3 cm		70 dias		
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	
Entre taxas de contaminação	89304,00	1	89304,000	13,006	0,002	4,301	
Dentro dos grupos	151062,50	22	6866,477				
Total	240366,50	23					

ANOVA	Traço 1:4		Cobrimento = 3 cm		70 dias		
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	
Entre taxas de contaminação	376,04	1	376,042	0,115	0,738	4,301	
Dentro dos grupos	71909,92	22	3268,633				
Total	72285,96	23					

ANOVA	Traço 1:5	Cobrimento = 3 cm	70 dias			
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre taxas de contaminação	4374,00	1	4374,000	2,204	0,152	4,301
Dentro dos grupos	43659,83	22	1984,538			
Total	48033,83	23				

### 5.2.3.2 FASE 2:

Após a retirada dos corpos de prova da condição de cura em câmara úmida, os mesmos foram transferidos ao ambiente laboratorial, com a temperatura média de 23 °C e umidade relativa acima de 65%. Os corpos de prova ficaram nesta condição por 28 dias, período designado como 2ª fase. Pela Figura 32 e Figura 33 nota-se que os potenciais alcançaram valores menos negativos do que os apresentados na Figura 30 e Figura 31, 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. Os desvios padrão para esta idade alcançaram patamares próximos entre os traços analisados, porém, observaram-se menores desvios para os concretos sem contaminação. Observou-se ainda que, em praticamente todos os casos, as concentrações das médias dos traços analisados foram situados na zona de probabilidade de corrosão de 10 % neste caso.

A análise de variância segundo a influência do cobrimento apresentou melhor correlação para os corpos de prova contaminados por cloreto, se comparados com os corpos de prova sem contaminação, ambos dentro do intervalo de confiança de 95% (ver Tabela 13 e Tabela 14). O traço 1:3 com cloreto não apresentou correlação significativa no presente estudo.

Embora os potenciais estejam em zona de probabilidade de corrosão de 10%, o teor de contaminação mediante o monitoramento nesta fase apresentou desvios padrão maiores para o caso de concreto contaminado. Porém, quanto ao

cobrimento das armaduras, ainda não foi possível afirmar a diferenciação entre os dois valores empregados, haja vista da proximidade entre as médias observadas ao longo desta segunda fase analisada e pelo fato de as barras de variação se confundirem, indicando que as médias não são necessariamente distintas.

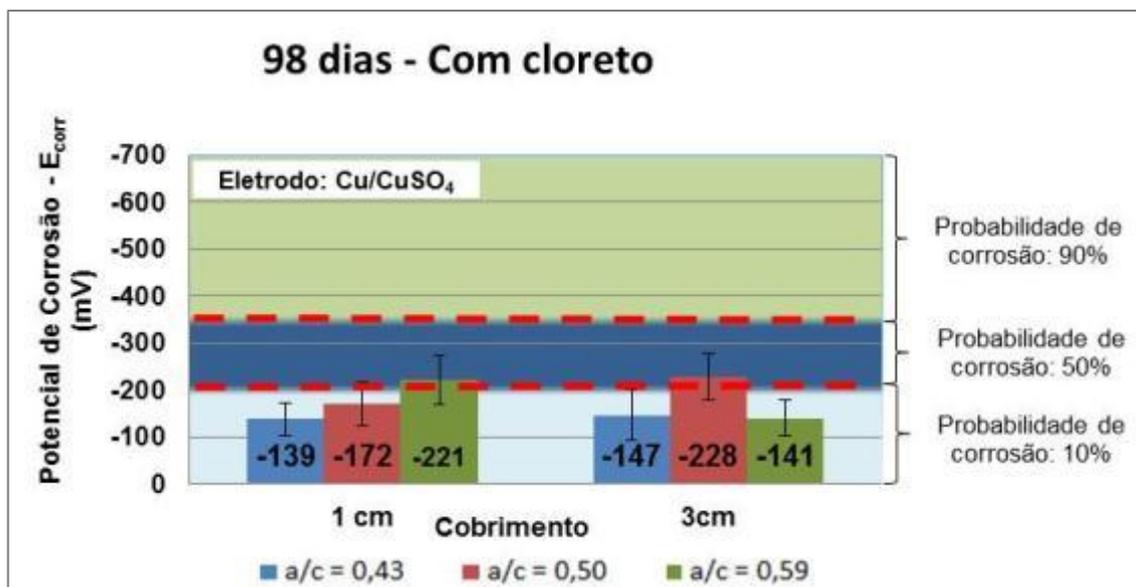


FIGURA 32. INFLUÊNCIA DO COBRIMENTO SOBRE O POTENCIAL DE CORROSÃO COM A/C=0,43; 0,50 E 0,59 - COM CLORETO.

TABELA 13. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO COBRIMENTO PARA OS TRAÇOS 1:3 (A/C=0,43); 1:4 (A/C=0,50) E 1:5 (A/C=0,59) - COM CLORETO (95% DE SIGNIFICÂNCIA).

ANOVA	Traço 1:3	98 dias	Com Cloreto			
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre cobrimentos	392,042	1	392,042	0,188	0,669	4,301
Dentro dos grupos	45802,917	22	2081,951			
Total	46194,958	23				

ANOVA	Traço 1:4	98 dias	Com Cloreto			
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre cobrimentos	6501,04	1	6501,042	10,031	0,004	4,301
Dentro dos grupos	14258,58	22	648,117			
Total	20759,63	23				

ANOVA	Traço 1:5	98 dias	Com Cloreto			
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre cobrimentos	38080,67	1	38080,667	18,137	0,000	4,301
Dentro dos grupos	46191,83	22	2099,629			
Total	84272,50	23				

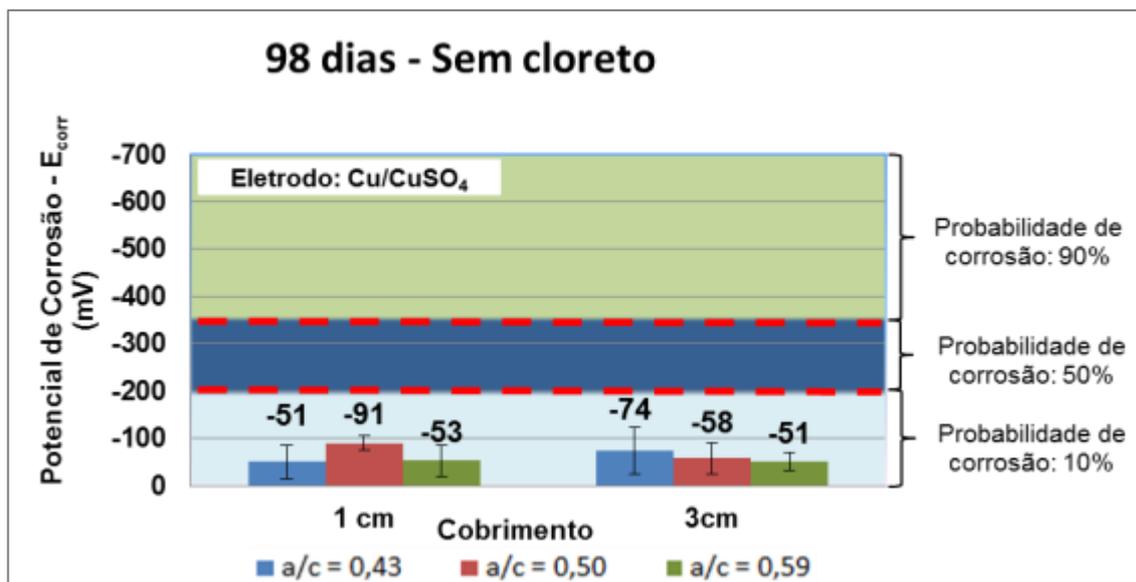


FIGURA 33. INFLUÊNCIA DO COBRIMENTO SOBRE O POTENCIAL DE CORROSÃO COM A/C=0,43; 0,50 E 0,59 - SEM CLORETO.

TABELA 14. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO COBRIMENTO PARA OS TRAÇOS 1:3 (A/C=0,43); 1:4 (A/C=0,50) E 1:5 (A/C=0,59) - SEM CLORETO (95% DE SIGNIFICÂNCIA).

ANOVA	Traço 1:3	98 dias	Sem Cloreto			
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre cobrimentos	3243,38	1	3243,375	2,182	0,154	4,301
Dentro dos grupos	32705,58	22	1486,617			
Total	35948,96	23				

ANOVA	Traço 1:4	98 dias	Sem Cloreto			
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre cobrimentos	6501,04	1	6501,042	10,031	0,004	4,301
Dentro dos grupos	14258,58	22	648,117			
Total	20759,63	23				

ANOVA	Traço 1:5	98 dias	Sem Cloreto			
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre cobrimentos	35,04	1	35,042	0,049	0,827	4,301
Dentro dos grupos	15679,92	22	712,723			
Total	15714,96	23				

A Figura 34 e Figura 35 mostram o potencial de corrosão para os concretos contaminados e não contaminados por cloretos, para 1 cm e 3 cm, respectivamente. Analisando pelas barras de variação, pode-se dizer que, com exceção do caso do concreto 1:3 com 1% de cloretos para 3 cm de revestimento, todos os casos mostraram que existe diferença entre as médias com os níveis de contaminação por

cloretos do estudo (0% e 1% de cloretos em relação à massa de cimento). Ou seja, a influência do teor de cloretos foi confirmada.

Para o caso da avaliação pela análise de variância, a influência foi confirmada para todos os casos analisados (ver Tabela 15 e Tabela 16).

Desse modo, conclui-se que na fase 2 o grau de contaminação de 1% em relação a massa de cimento provoca valores de potencial de corrosão mais negativos.

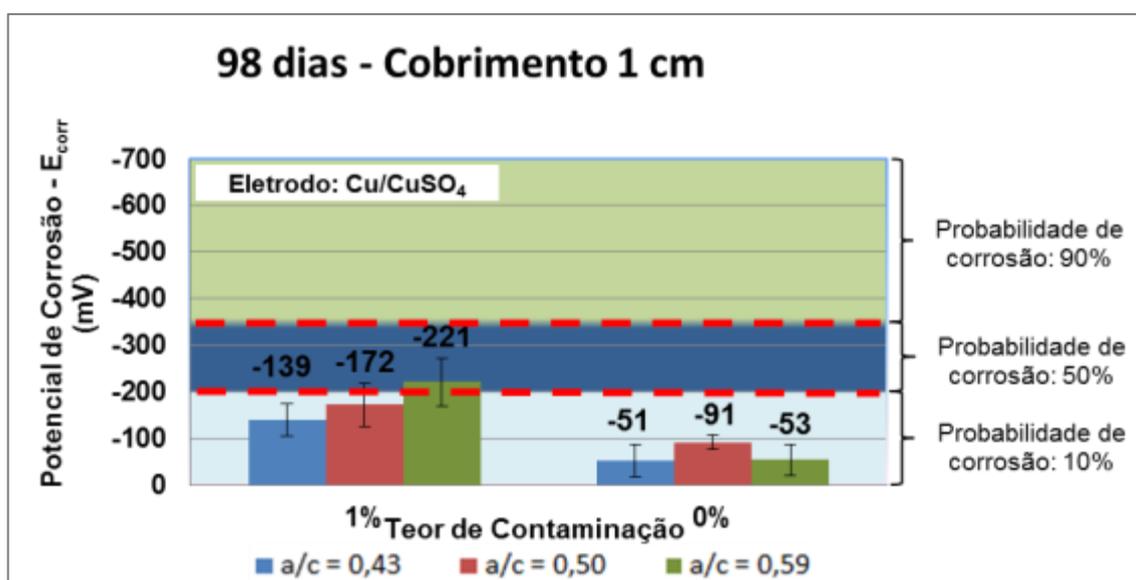


FIGURA 34. INFLUÊNCIA DO TEOR DE CONTAMINAÇÃO SOBRE O POTENCIAL DE CORROSÃO COM A/C=0,43; 0,50 E 0,59 – COBRIMENTO 1 CM.

TABELA 15. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO TEOR DE CONTAMINAÇÃO PARA OS TRAÇOS 1:3 (A/C=0,43); 1:4 (A/C=0,50) E 1:5 (A/C=0,59) – COBRIMENTO 1 CM (95% DE SIGNIFICÂNCIA).

ANOVA		Traço 1:3		Cobrimento = 1 cm		98 dias	
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	
Entre taxas de contaminação	46025,04	1	46025,042	51,826	0,000	4,301	
Dentro dos grupos	19537,58	22	888,072				
Total	65562,63	23					

ANOVA		Traço 1:4		Cobrimento = 1 cm		98 dias	
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	
Entre taxas de contaminação	39772,04	1	0,000	34,375	0,000	4,301	
Dentro dos grupos	25453,92	22	217,606				
Total	65225,96	23					

ANOVA	Traço 1:5	Cobrimento = 1 cm	98 dias			
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre taxas de contaminação	168002,67	1	168002,667	88,264	0,000	4,301
Dentro dos grupos	41875,17	22	1903,417			
Total	209877,83	23				

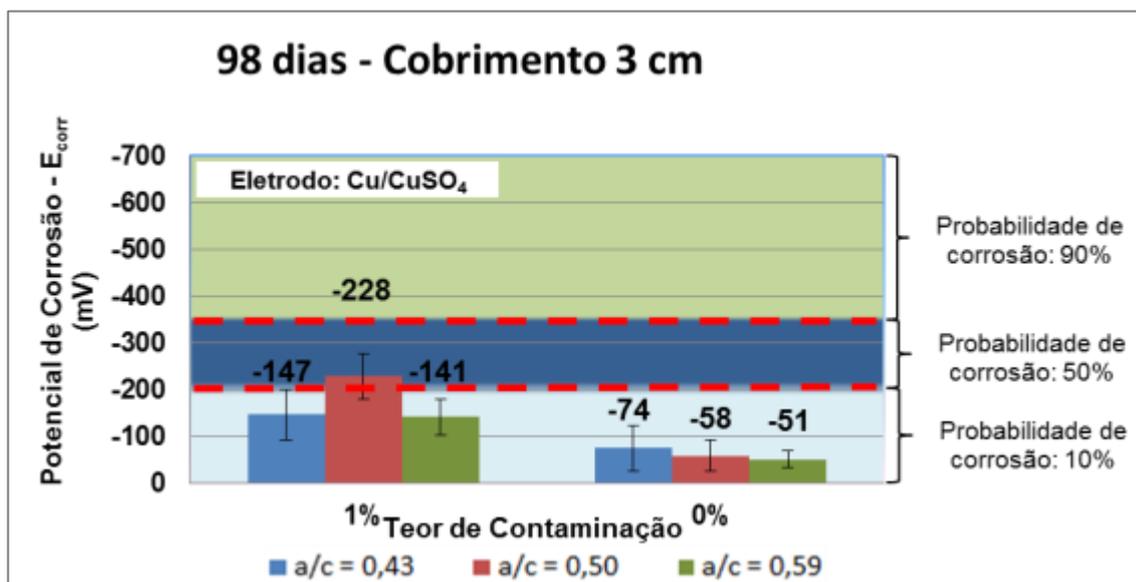


FIGURA 35. INFLUÊNCIA DO TEOR DE CONTAMINAÇÃO SOBRE O POTENCIAL DE CORROSÃO COM A/C=0,43; 0,50 E 0,59 – COBRIMENTO 3 CM.

TABELA 16. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO TEOR DE CONTAMINAÇÃO PARA OS TRAÇOS 1:3 (A/C=0,43); 1:4 (A/C=0,50) E 1:5 (A/C=0,59) – COBRIMENTO 3 CM (95% DE SIGNIFICÂNCIA).

ANOVA	Traço 1:3	Cobrimento = 3 cm	98 dias			
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre taxas de contaminação	31465,04	1	31465,042	11,739	0,002	4,301
Dentro dos grupos	58970,92	22	2680,496			
Total	90435,96	23				

ANOVA	Traço 1:4	Cobrimento = 3 cm	98 dias			
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre taxas de contaminação	174251,00	1	174251,000	99,490	0,000	4,301
Dentro dos grupos	38531,58	22	1751,436			
Total	212782,60	23				

ANOVA	Traço 1:5	Cobrimento = 3 cm	98 dias			
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre taxas de contaminação	172890,38	1	172890,375	111,260	0,000	4,301
Dentro dos grupos	34186,58	22	1553,936			
Total	207076,96	23				

De maneira geral, conclui-se que às primeiras idades, as leituras sofrem interferência direta sobre as condições de exposição dos corpos de prova, haja vista que os mesmos passam por processo de secagem superficial facilitando a entrada de oxigênio ao interior das estruturas. A diferença entre as leituras foi percebida notoriamente, visto que os potenciais na segunda fase apresentaram valores menos negativos, principalmente para a condição de não contaminação por cloreto. É importante salientar também que, durante o período monitorado, as médias entre os traços apresentaram diferença significativa no parâmetro teor de contaminação por cloretos. Por outro lado, as duas faixas de cobrimento não apresentaram diferença entre as leituras de potencial, não podendo afirmar a influência significativa quando da análise de tal parâmetro.

#### 5.2.3.3 FASE 3:

A terceira fase de leituras compreendeu 3 ciclos de imersão e secagem durante 21 dias consecutivos. A análise de variância bem como os gráficos foi obtida 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 36 mostra o resultado das leituras de potencial de corrosão no 16º dia do período de ciclagem para o caso de concreto contaminado por cloretos. Nesta fase observa-se que os desvios padrão observados para o cobrimento igual a 3 cm foram maiores se comparados com o cobrimento igual a 1 cm. Pela análise de variância para o caso de contaminação por cloreto (Tabela 17) é possível afirmar que o cobrimento incide diretamente nas leituras de potencial, segundo intervalo de confiança igual a 95%. O efeito do cobrimento não é relevante quando se trata de concretos moldados sem contaminação por cloreto, como o caso apresentado na análise de variância (Tabela 18).

As faixas de probabilidade de corrosão também são quesitos a serem levados em consideração nesta fase. Nota-se que os níveis de potencial de corrosão para os dois teores de contaminação são bem definidos, com maior probabilidade de corrosão (95%) nos concretos contaminados (Figura 36) e zona de incerteza caso de concretos não contaminados por cloretos (Figura 37), embora os desvios padrão estejam em faixa semelhante de acordo com o traço analisado, conforme evidenciados no gráfico.

No caso do concreto não contaminado por cloretos (Figura 37 e tabela 18) a espessura de revestimento não apresenta influência significativa com 95% de significância.

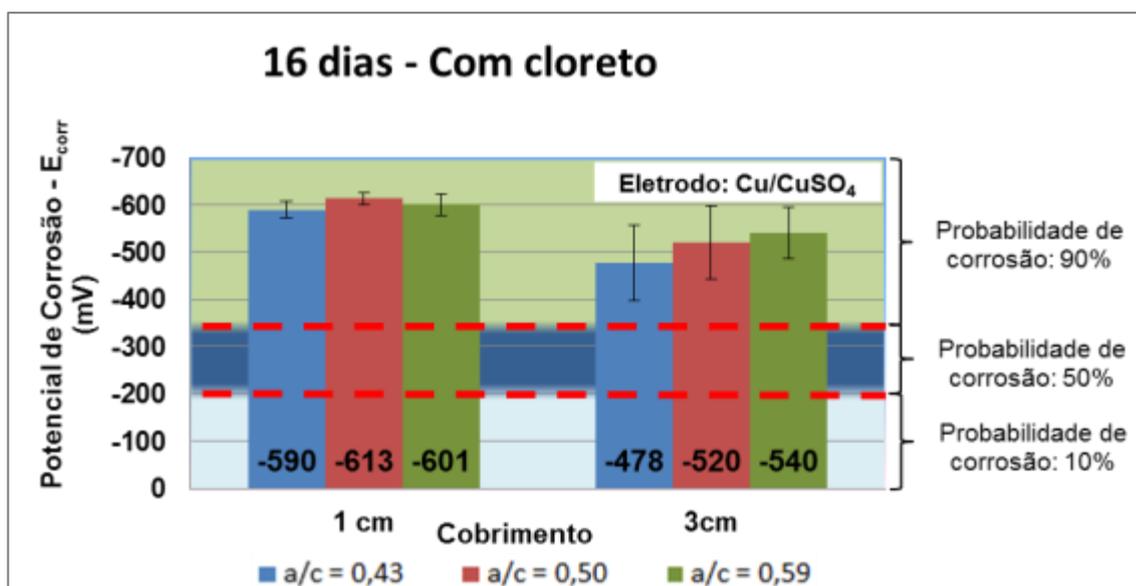


FIGURA 36. INFLUÊNCIA DO COBRIMENTO SOBRE O POTENCIAL DE CORROSÃO COM A/C=0,43; 0,50 E 0,59 - COM CLORETO.

TABELA 17. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO COBRIMENTO PARA OS TRAÇOS 1:3 (A/C=0,43); 1:4 (A/C=0,50) E 1:5 (A/C=0,59) - COM CLORETO (90% DE SIGNIFICÂNCIA).

ANOVA	Traço 1:3	16 dias	Com Cloreto				
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	
Entre cobrimentos	75040,17	1	75040,167	22,538	0,000	4,301	
Dentro dos grupos	73248,33	22	3329,470				
Total	148288,50	23					

ANOVA	Traço 1:4	16 dias	Com Cloreto				
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	
Entre cobrimentos	51894,00	1	51894,000	16,813	0,000	4,301	
Dentro dos grupos	67905,33	22	3086,606				
Total	119799,33	23					

ANOVA	Traço 1:5	16 dias	Com Cloreto				
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	
Entre cobrimentos	21840,67	1	21840,667	12,145	0,002	4,301	
Dentro dos grupos	39562,67	22	1798,303				
Total	61403,33	23					

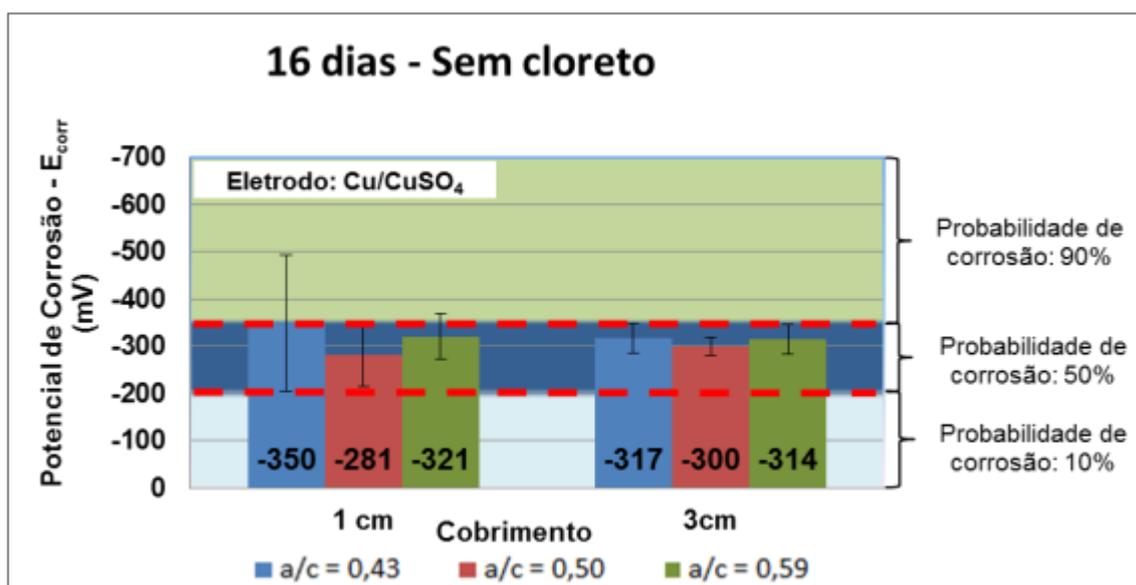


FIGURA 37. INFLUÊNCIA DO COBRIMENTO SOBRE O POTENCIAL DE CORROSÃO COM A/C=0,43; 0,50 E 0,59 - SEM CLORETO.

TABELA 18. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO COBRIMENTO PARA OS TRAÇOS 1:3 (A/C=0,43); 1:4 (A/C=0,50) E 1:5 (A/C=0,59) - SEM CLORETO (95% DE SIGNIFICÂNCIA).

<b>ANOVA</b>	<b>Traço 1:3</b>	<b>16 dias</b>	<b>Sem Cloreto</b>				
<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>	
Entre cobrimentos	6305,04	1	6305,042	0,582	0,453	4,301	
Dentro dos grupos	238160,92	22	10825,496				
<b>Total</b>	<b>244465,96</b>	<b>23</b>					

<b>ANOVA</b>	<b>Traço 1:4</b>	<b>16 dias</b>	<b>Sem Cloreto</b>				
<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>	
Entre cobrimentos	2128,17	1	2128,17	4,12	0,05	4,30	
Dentro dos grupos	11353,17	22	516,05				
<b>Total</b>	<b>13481,33</b>	<b>23</b>					

<b>ANOVA</b>	<b>Traço 1:5</b>	<b>16 dias</b>	<b>Sem Cloreto</b>				
<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>	
Entre cobrimentos	273,37	1	273,375	0,162	0,691	4,301	
Dentro dos grupos	37171,58	22	1689,617				
<b>Total</b>	<b>37444,96</b>	<b>23</b>					

A Figura 38 e Figura 39 apresentam os resultados de potencial de corrosão para o período de ciclagem comparando o efeito do grau de contaminação por cloretos para as espessuras de cobertura de 1 cm e 3 cm, respectivamente. Nota-se claramente uma forte diferenciação entre os resultados, ou seja, uma clara 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.

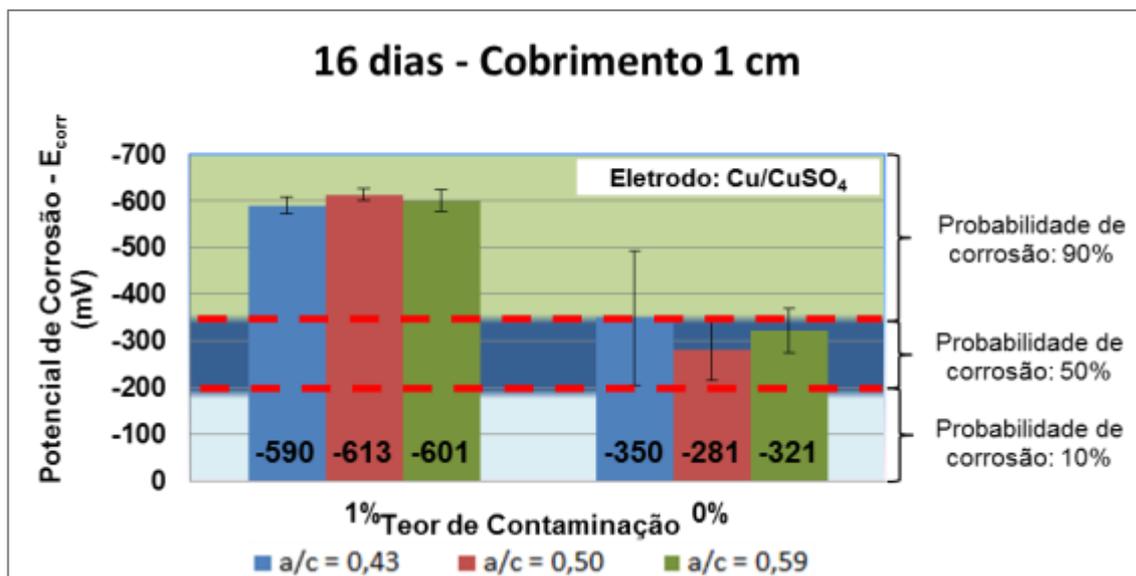


FIGURA 38. INFLUÊNCIA DO TEOR DE CONTAMINAÇÃO SOBRE O POTENCIAL DE CORROSÃO – COBRIMENTO 1 CM.

TABELA 19. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO TEOR DE CONTAMINAÇÃO PARA OS TRAÇOS 1:3, 1:4 E 1:5 – COBRIMENTO 1 CM (95% DE SIGNIFICÂNCIA).

ANOVA	Traço 1:3		Cobrimento = 3 cm		16 dias		
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	
Entre taxas de contaminação	154561,50	1	154561,500	42,042	0,000	4,301	
Dentro dos grupos	80880,33	22	3676,379				
Total	235441,83	23					

ANOVA	Traço 1:4		Cobrimento = 1 cm		16 dias		
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	
Entre taxas de contaminação	290620,00	1	290620,042	90,667	0,000	4,301	
Dentro dos grupos	70517,92	22	3205,360				
Total	361138,00	23					

ANOVA	Traço 1:5		Cobrimento = 1 cm		16 dias		
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	
Entre taxas de contaminação	468442,04	1	468442,042	324,039	0,000	4,301	
Dentro dos grupos	31803,92	22	1445,633				
Total	500245,96	23					

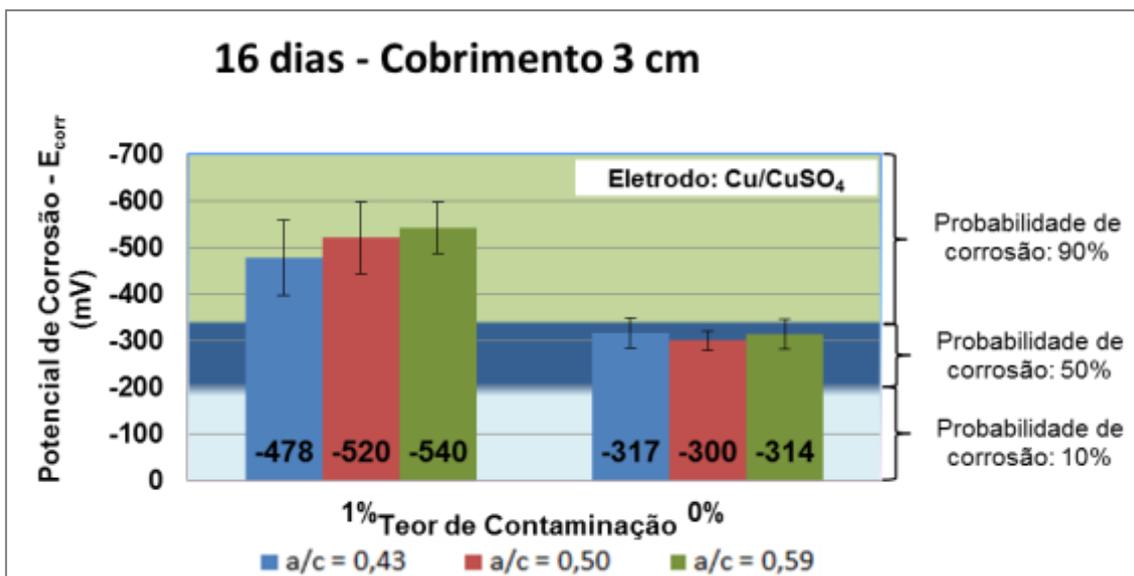


FIGURA 39. INFLUÊNCIA DO TEOR DE CONTAMINAÇÃO SOBRE O POTENCIAL DE CORROSÃO – COBRIMENTO 3 CM.

TABELA 20. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO TEOR DE CONTAMINAÇÃO PARA OS TRAÇOS 1:3, 1:4 E 1:5 – COBRIMENTO 3 CM.

ANOVA	Traço 1:3		Cobrimento = 3 cm		16 dias		
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	
Entre taxas de contaminação	154561,50	1	154561,500	42,042	0,000	4,301	
Dentro dos grupos	80880,33	22	3676,379				
Total	235441,83	23					

ANOVA	Traço 1:4		Cobrimento = 3 cm		16 dias		
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	
Entre taxas de contaminação	290620,04	1	290620,042	90,667	0,000	4,301	
Dentro dos grupos	70517,92	22	3205,360				
Total	361137,96	23					

ANOVA	Traço 1:5		Cobrimento = 3 cm		16 dias		
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	
Entre taxas de contaminação	306004,17	1	306004,167	149,834	0,000	4,301	
Dentro dos grupos	44930,33	22	2042,288				
Total	350934,50	23					

### 5.2.3.4 A influência do teor de umidade

A influência do teor de umidade no interior dos corpos de prova de maneira geral foi analisada em dois momentos: a 70 dias e a 98 dias. 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 ambiente laboratorial, com umidade relativa acima dos 50, conforme a Figura 40.

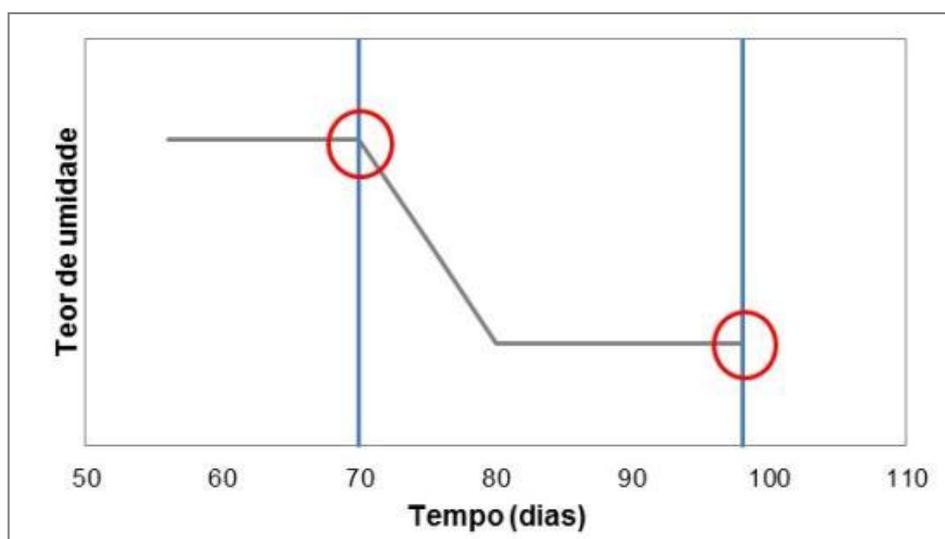


FIGURA 40. REPRESENTAÇÃO DAS DATAS DE ANÁLISE E O TEOR DE UMIDADE.

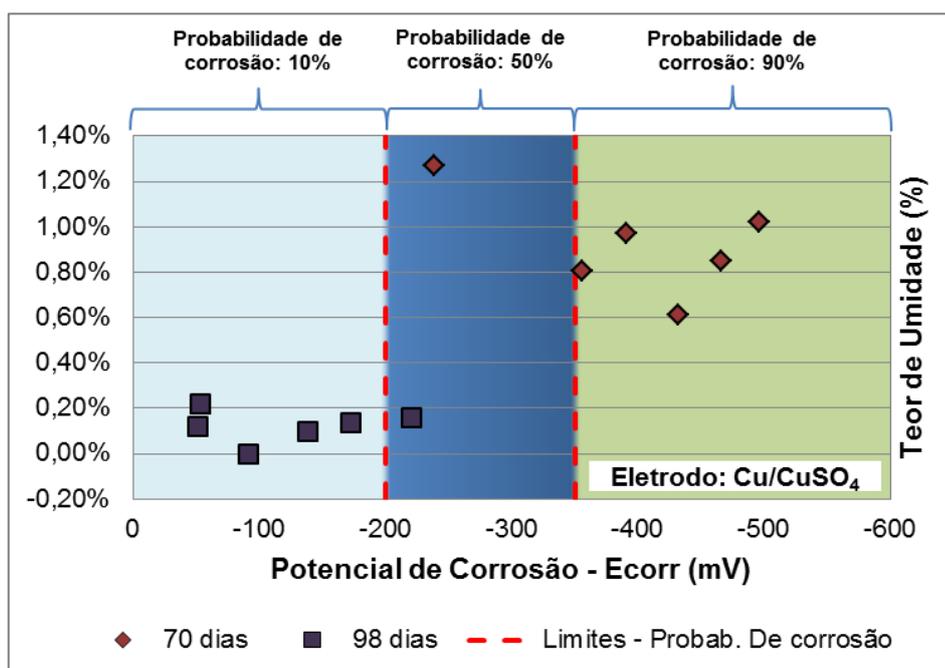


FIGURA 41. CORRELAÇÃO ENTRE O POTENCIAL DE CORROSÃO E O TEOR DE UMIDADE.

Conforme a Figura 41, pode-se observar que o potencial de corrosão se apresenta mais negativo para maiores teores de umidade. Esse comportamento ocorre aos 70 dias, quando os corpos de prova encontram-se em ambiente úmido. Analogamente à Figura 40, os potenciais de corrosão aos 98 dias apresentaram potenciais menos negativos associados ao menor teor de umidade. Pela análise de variância nestes dois casos apenas (Tabela 21), a interação entre o teor de umidade e o potencial de corrosão é significativa, dado os 95% de significância.

TABELA 21. TRATAMENTO ESTATÍSTICO – TABELA ANOVA PARA A INTERAÇÃO ENTRE O TEOR DE UMIDADE E O POTENCIAL DE CORROSÃO (95% DE SIGNIFICANCIA).

**ANOVA**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Níveis de Umidade	433107,512	1	433107,512	31,370	0,000	4,301
Dentro dos grupos	303740,667	22	13806,394			
Total	736848,179	23				

Analisando a influência do teor de umidade por relação água/cimento (0,43; 0,50 e 0,59), tem-se que o comportamento dos dados segue uma linha de tendência com coeficiente de correlação maior que 0,80 para os traços sem contaminação por cloretos (Figura 42 a Figura 47). Observa-se que em todos os casos a linha de tendência do concreto sem cloretos se posiciona acima da linha de tendência do concreto contaminado com 1% de Cl<sup>-</sup> em relação à massa de cimento. A consequência disso, é que para um mesmo teor de umidade do concreto o potencial de corrosão se estabiliza em valores mais negativos no caso do concreto contaminado por cloretos.

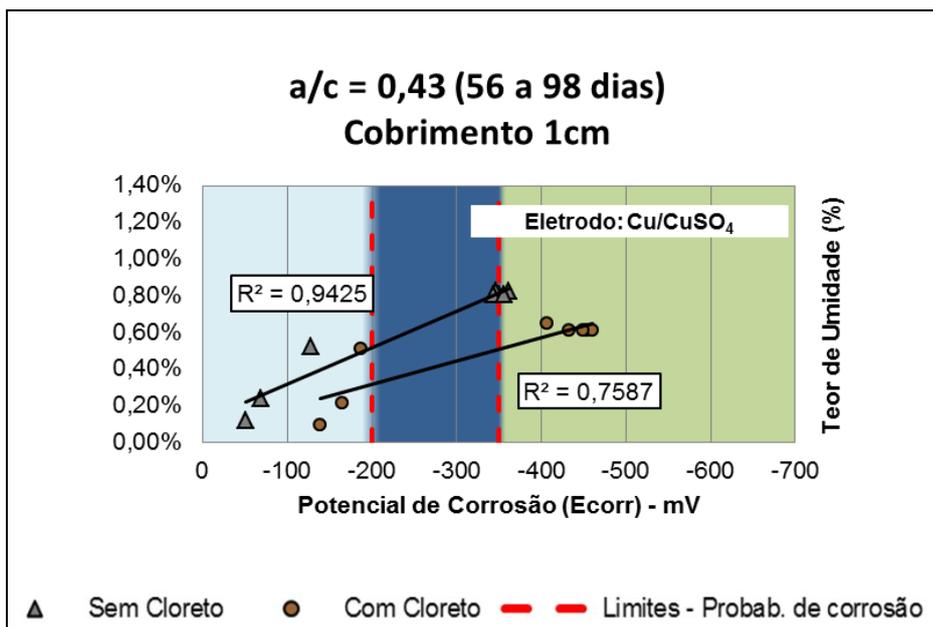


FIGURA 42. CORRELAÇÃO ENTRE O POTENCIAL DE CORROSÃO E O TEOR DE UMIDADE PARA O TRAÇO 1:3 (A/C=0,43) – COBRIMENTO 1 CM: PERÍODO DE 56 A 98 DIAS.

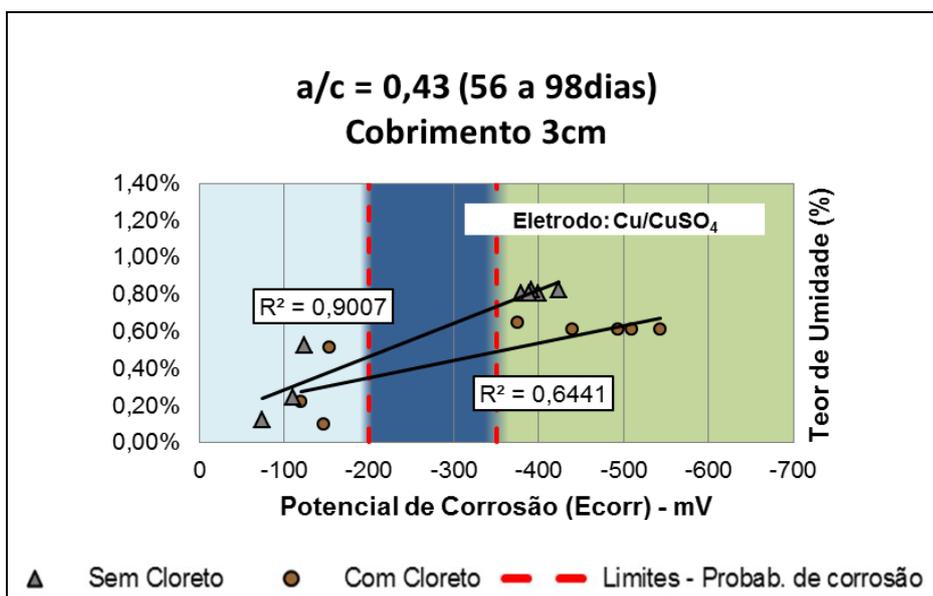


FIGURA 43. CORRELAÇÃO ENTRE O POTENCIAL DE CORROSÃO E O TEOR DE UMIDADE PARA O TRAÇO 1:3 (A/C=0,43) – COBRIMENTO 3 CM: PERÍODO DE 56 A 98 DIAS.

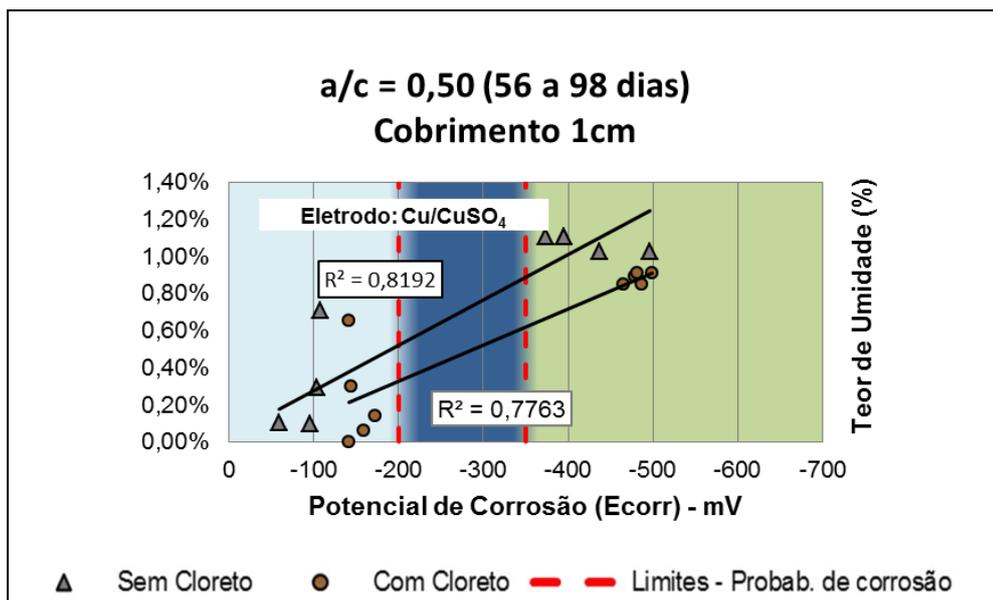


FIGURA 44. CORRELAÇÃO ENTRE O POTENCIAL DE CORROSÃO E O TEOR DE UMIDADE PARA O TRAÇO 1:4 (A/C=0,50) – COBRIMENTO 1 CM: PERÍODO DE 56 A 98 DIAS.

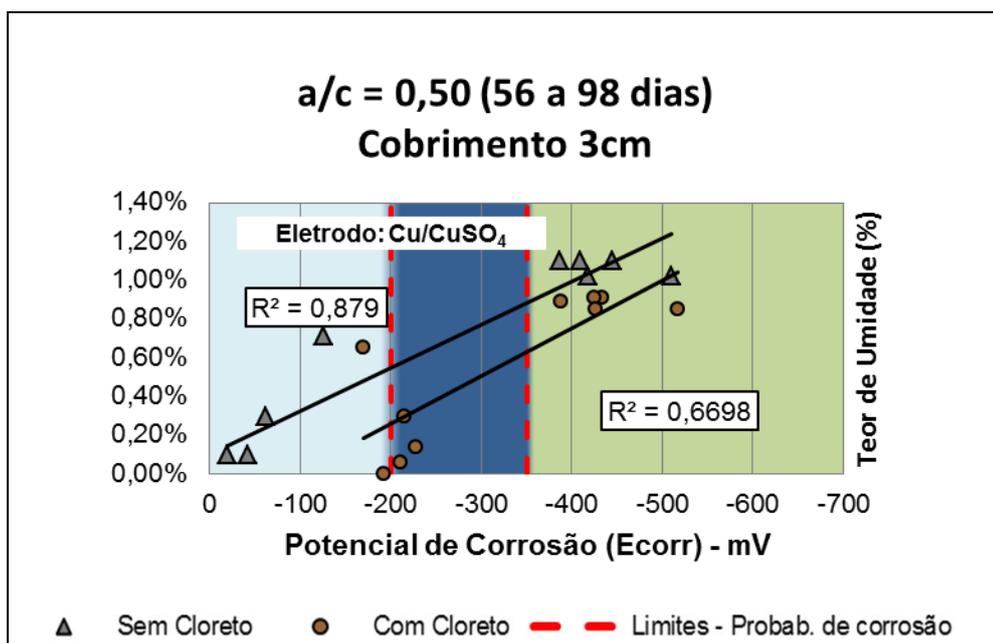


FIGURA 45. CORRELAÇÃO ENTRE O POTENCIAL DE CORROSÃO E O TEOR DE UMIDADE PARA O TRAÇO 1:4 (A/C=0,50) – COBRIMENTO 3 CM: PERÍODO DE 56 A 98 DIAS.

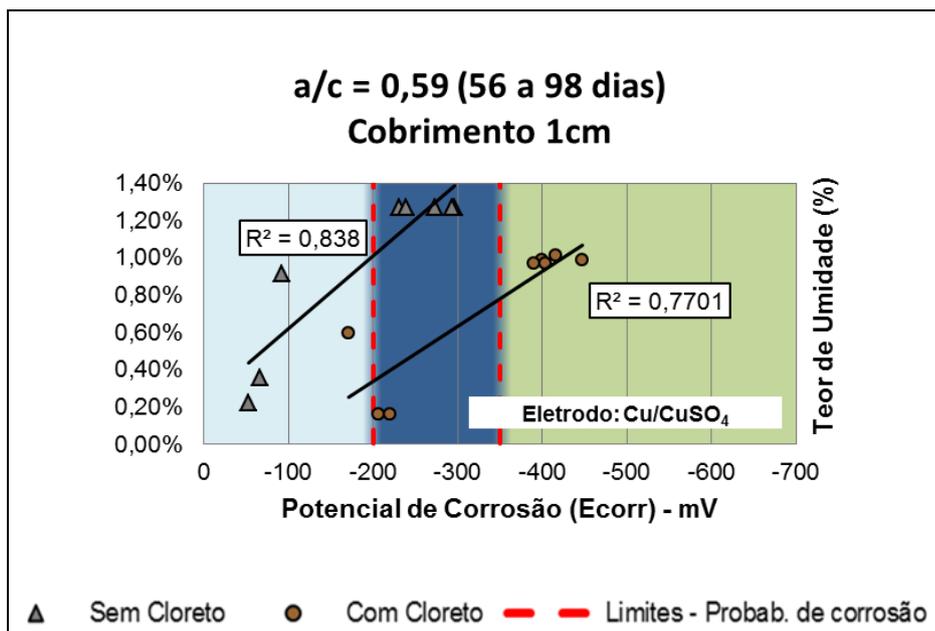


FIGURA 46. CORRELAÇÃO ENTRE O POTENCIAL DE CORROSÃO E O TEOR DE UMIDADE PARA O TRAÇO 1:5 (A/C=0,59) – COBRIMENTO 1 CM: PERÍODO DE 56 A 98 DIAS.

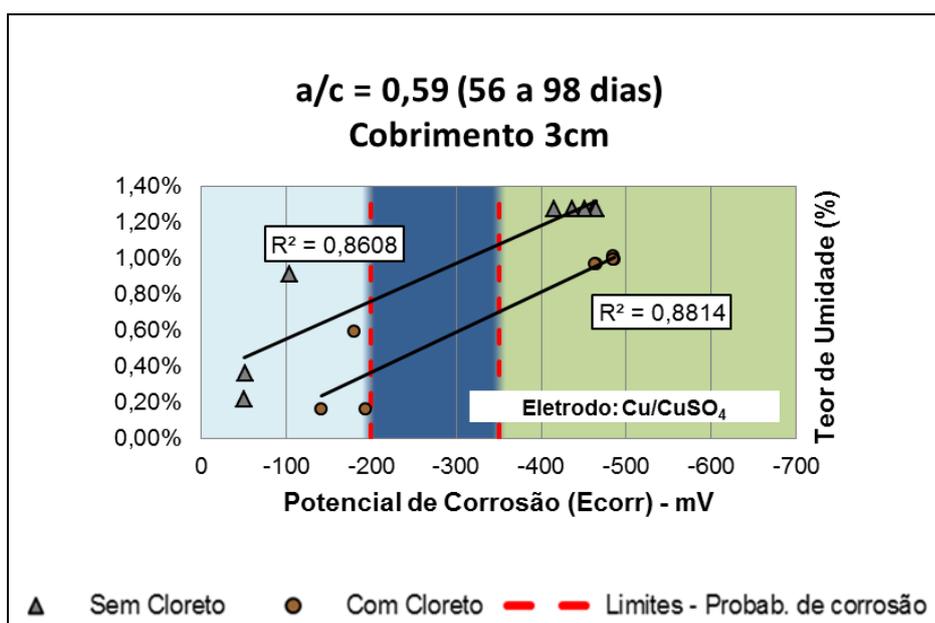


FIGURA 47. CORRELAÇÃO ENTRE O POTENCIAL DE CORROSÃO E O TEOR DE UMIDADE PARA O TRAÇO 1:5 (A/C=0,59) – COBRIMENTO 3 CM: PERÍODO DE 56 A 98 DIAS.

Pela análise de variância (Tabela 22, Tabela 23 e Tabela 24), a influência das amostras para todos os traços foi significativa, porém, não se pode afirmar a associação dos valores encontrados de teor de umidade no presente estudo com apenas uma espessura de revestimento.

TABELA 22. TRATAMENTO ESTATÍSTICO – TABELA ANOVA PARA A INTERAÇÃO ENTRE O TEOR DE UMIDADE E O POTENCIAL DE CORROSÃO - TRAÇO 1:3 (A/C = 0,43): 95% DE SIGNIFICANCIA.

**ANOVA** **Relação água/cimento = 0,43**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Amostra	304502,500	1	304502,500	52,037	0,000	4,113
Teor de Umidade	1694,336	1	1694,336	0,290	0,594	4,113
Interações	2918,403	1	2918,403	0,499	0,485	4,113
Dentro	210659,897	36	5851,664			
Total	519775,136	39				

TABELA 23. TRATAMENTO ESTATÍSTICO – TABELA ANOVA PARA A INTERAÇÃO ENTRE O TEOR DE UMIDADE E O POTENCIAL DE CORROSÃO - TRAÇO 1:4 (A/C = 0,50): 95% DE SIGNIFICANCIA.

**ANOVA** **Relação água/cimento = 0,50**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Amostra	229226,691	1	229226,691	12,575	0,001	4,027
Teor de Umidade	2333,612	1	2333,612	0,128	0,722	4,027
Interações	4351,907	1	4351,907	0,239	0,627	4,027
Dentro	947909,803	52	18229,035			
Total	1183822,012	55				

TABELA 24. TRATAMENTO ESTATÍSTICO – TABELA ANOVA PARA A INTERAÇÃO ENTRE O TEOR DE UMIDADE E O POTENCIAL DE CORROSÃO - TRAÇO 1:5 (A/C = 0,59): 95% DE SIGNIFICANCIA.

**ANOVA** **Relação água/cimento = 0,59**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Amostra	232769,795	1	232769,795	13,364	0,001	4,027
Cobrimento	2319,646	1	2319,646	0,133	0,717	4,027
Interações	820,973	1	820,973	0,047	0,829	4,027
Dentro	905737,555	52	17418,030			
Total	1141647,969	55				

Cabe salientar que embora a influência direta não ocorra, a variação do teor de umidade mediante os demais parâmetros influentes provoca sensibilidade no ensaio, como se pode observar ao longo das análises de potencial segundo teor de contaminação por cloretos e cobrimento das armaduras.

As duas condições impostas na primeira e segunda fase (ambientes com variada umidade relativa) foram as que sofreram maior sensibilidade no ensaio, sobretudo no momento em que os corpos de prova passaram pelo processo de secagem em temperatura ambiente.

### 5.2.3.5 A influência da temperatura

A Figura 48 e Figura 49 mostram o efeito da temperatura nas leituras de potencial de corrosão para os concretos 1:3 e 1:4. Uma avaliação rápida indica que quanto maior a temperatura, menos negativas são as leituras de potencial de corrosão em armaduras de aço carbono imersas no concreto. Também foi verificado que em todo o monitoramento com a variação de temperatura sempre os concretos com cloretos apresentaram menores valores de potencial de corrosão. Isso implica que para um mesmo nível de temperatura em que o concreto armado esteja inserido, o concreto contaminado por cloretos apresenta valores de potencial de corrosão mais negativos.

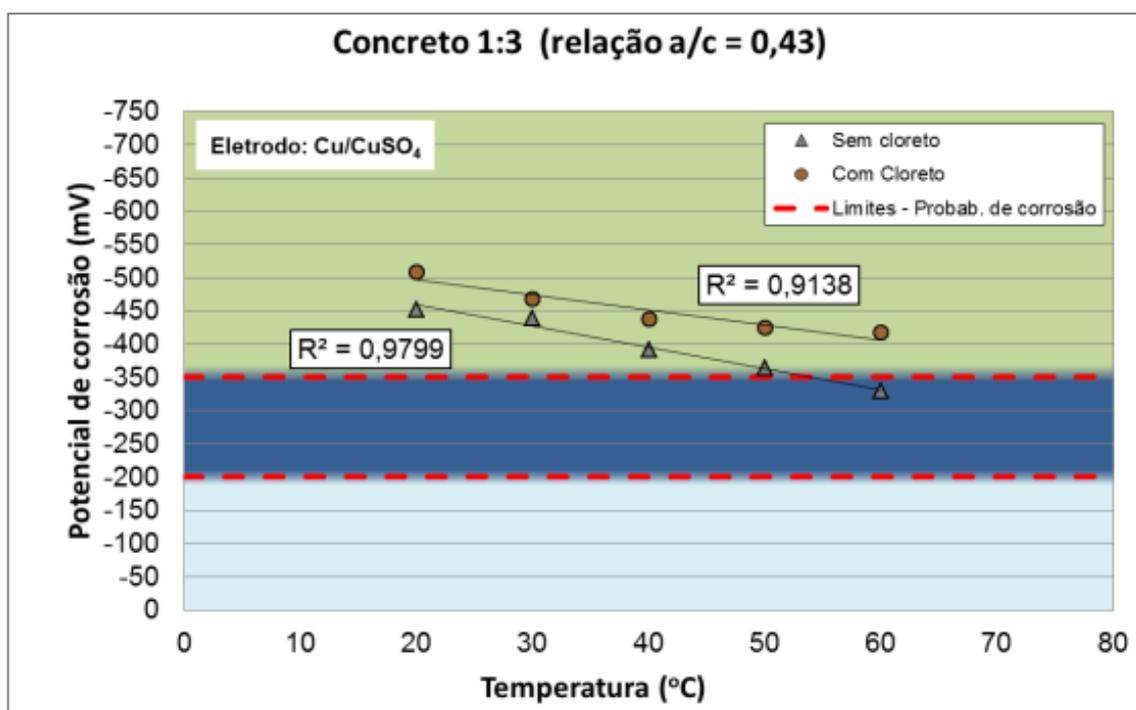


FIGURA 48. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS LEITURAS DE POTENCIAL DE CORROSÃO EM CONCRETO 1:3 E RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO DE 0,43.

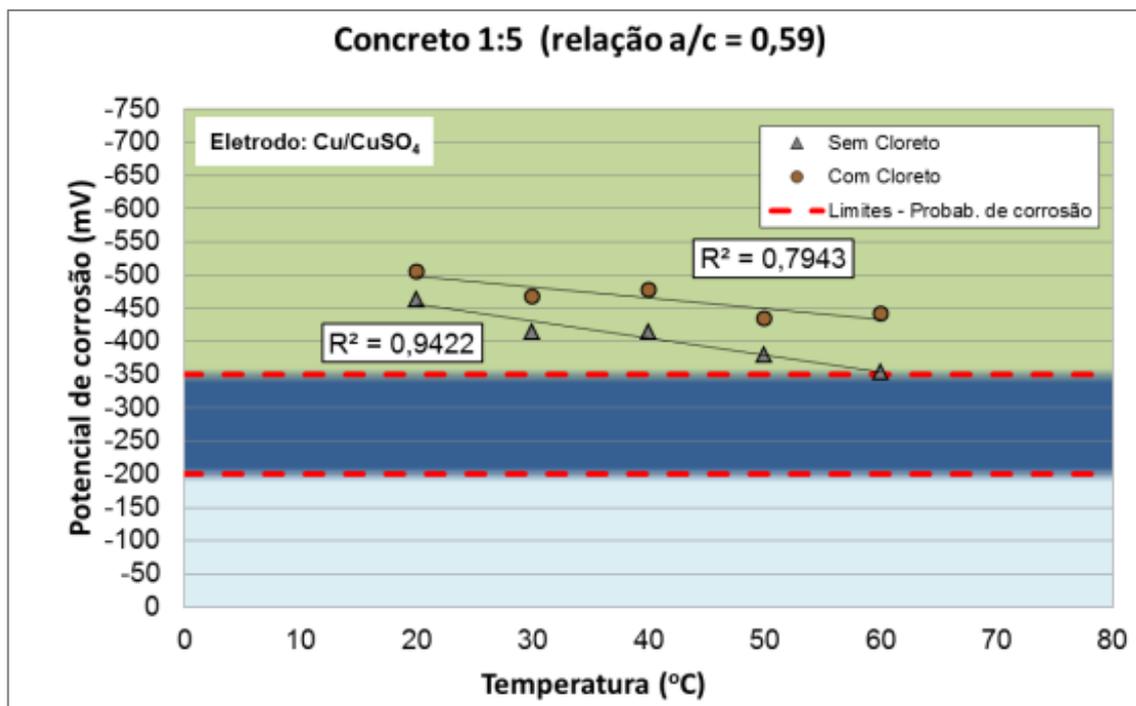


FIGURA 49. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS LEITURAS DE POTENCIAL DE CORROSÃO EM CONCRETO 1:3 E RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO DE 0,59.

### 5.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS CONCRETOS EMPREGADOS

#### 5.3.1 Por sucção capilar

A determinação da absorção de água por capilaridade foi realizada após a série de ensaios de ciclagem para as leituras de potencial de corrosão. Este ensaio foi conduzido para avaliar a influência da relação água/cimento na capacidade dos corpos de prova absorver água por sucção.

Uma informação inesperada foi que os corpos de prova confeccionados com concreto contaminado por cloretos no momento da mistura apresentaram uma menor absorção de água, como indicado na Figura 50. Esta diferença aparentemente foi mais insinuada para relações água/cimento menores (a/c de 0,43 e 0,50). A análise de variância representada na Tabela 25 indicou que o grau de contaminação apresentou influência nos resultados de absorção de água por sucção capilar com 90 % de significância.

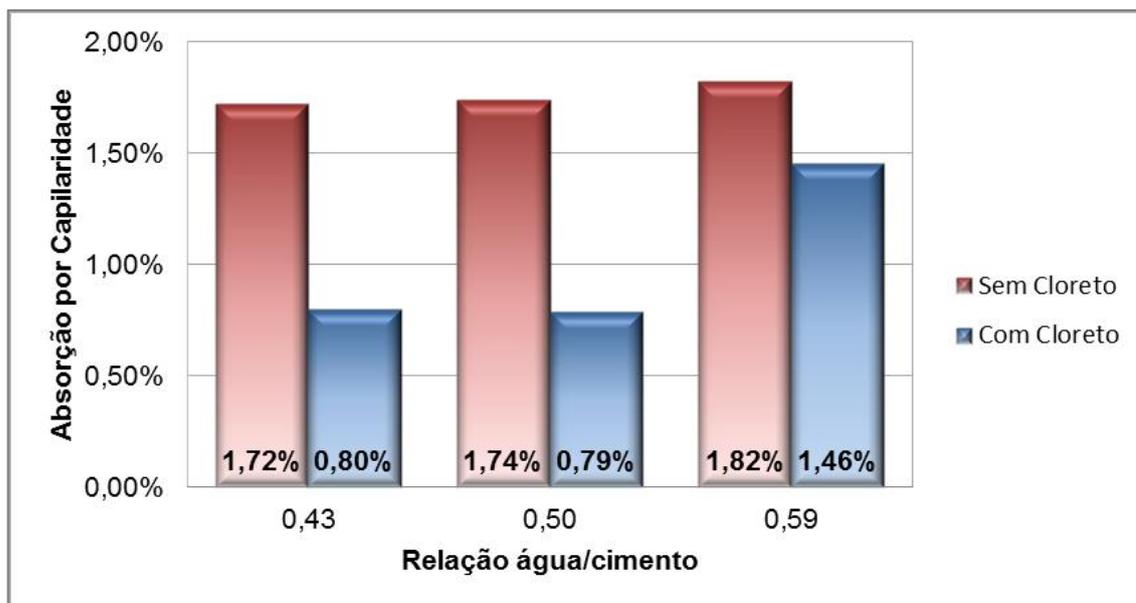


FIGURA 50. COMPORTAMENTO DA ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE (%) PARA OS CONCRETOS COM TRAÇOS 1:3 (A/C=0,43), 1:4 (A/C=0,50) E 1:5 (A/C=0,59).

TABELA 25. TRATAMENTO ESTATÍSTICO – TABELA ANOVA PARA ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE (90% DE SIGNIFICANCIA).

ANOVA	Absorção por capilaridade					
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
relação água/cimento	0,00002	2	0,000009	1,733	0,366	9,000
Contaminação	0,00008	1	0,000084	15,394	0,059	8,526
Erro	0,00001	2	0,000005			
Total	0,00011	5				

Considerando especificamente os concretos contaminados com cloretos, pode-se afirmar que a diferença entre as médias de absorção por capilaridade foi significativa apenas no caso da relação água/cimento= 0,59, com resultado quase duplicado em relação às demais relações desta série. Este aumento já era esperado, uma vez que a relação água/cimento é maior resultando em aumento da porosidade do concreto.

Dentre os concretos sem contaminação por cloretos, observa-se pouca diferença entre as relações água/cimento estudadas. De acordo com as barras de variação, pode-se considerar que as médias não são diferentes, ou seja, a elevação da relação água/cimento na faixa de 0,43 a 0,59 e para os materiais empregados

nesta pesquisa não apresentou influência nos resultados de absorção de água por capilaridade no caso dos concretos não contaminados previamente com cloretos.

Também na análise estatística de variância, não é possível afirmar que existe diferença significativa da absorção por capilaridade ocasionada pela mudança na relação água/cimento, uma vez que o teste estatístico indica que os valores de F são menores do que o  $F_{\text{crítico}}$  (Tabela 25).

A Figura 51, Figura 52 e Figura 53 mostram gráficos de variação da absorção, em  $\text{g/cm}^2$ , ao longo do tempo e para as três relações água/cimento estudadas. Estas figuras ajudam a visualizar o comportamento dos concretos (contaminados e não contaminados por cloretos) ao longo do tempo em ensaio de absorção de água por capilaridade. Em todos os casos observam-se valores superiores de absorção nos concretos sem adição de cloretos. Em todos os casos observa-se também um coeficiente de correlação maior do que 90%, que indica uma forte relação da absorção por sucção capilar com o tempo de exposição à água.

Não foi encontrada na literatura explicação para o fato de os concretos com cloretos apresentarem menor absorção de água por capilaridade e, como não era o foco desta pesquisa, este assunto não foi tratado com profundidade e não foram conduzidos mais ensaios para tentar explicar o ocorrido.

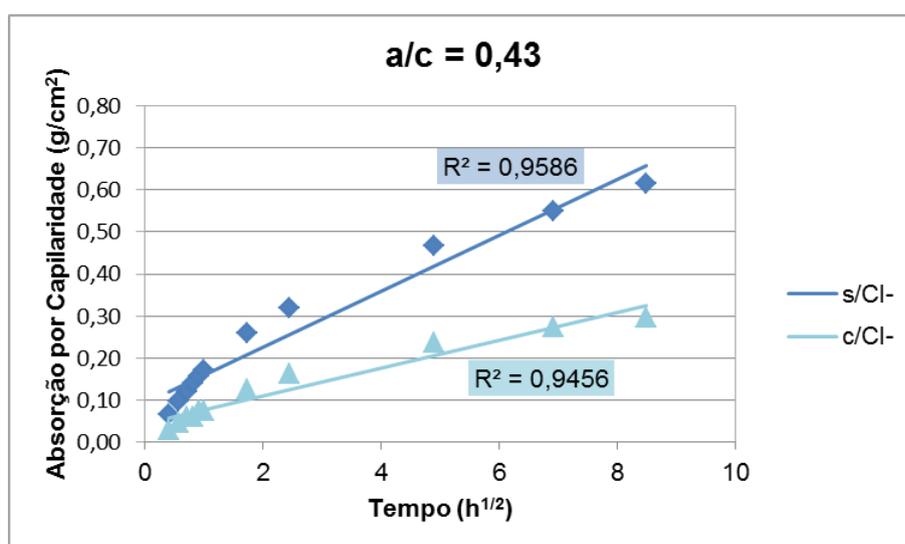


FIGURA 51. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE NOS CORPOS DE PROVA MOLDADOS COM RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO=0,43.

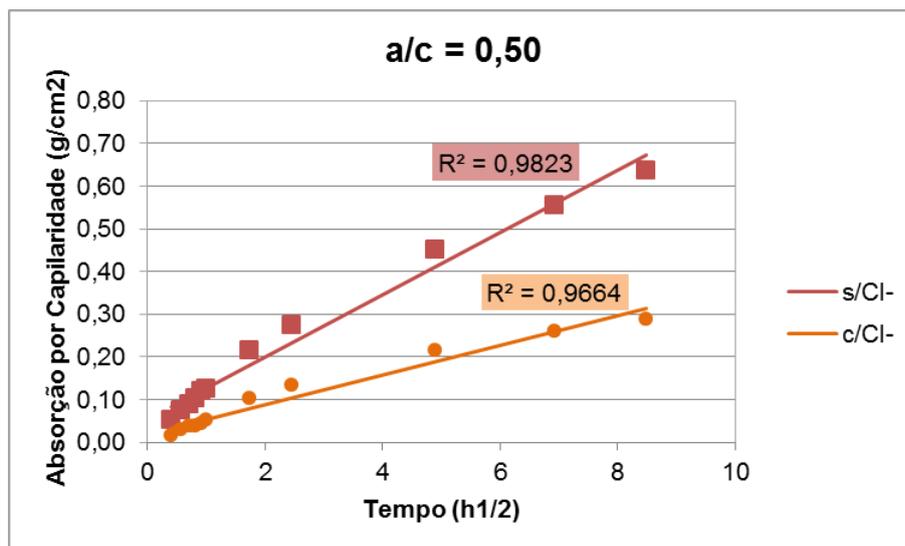


FIGURA 52. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE NOS CORPOS DE PROVA MOLDADOS COM RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO=0,50.

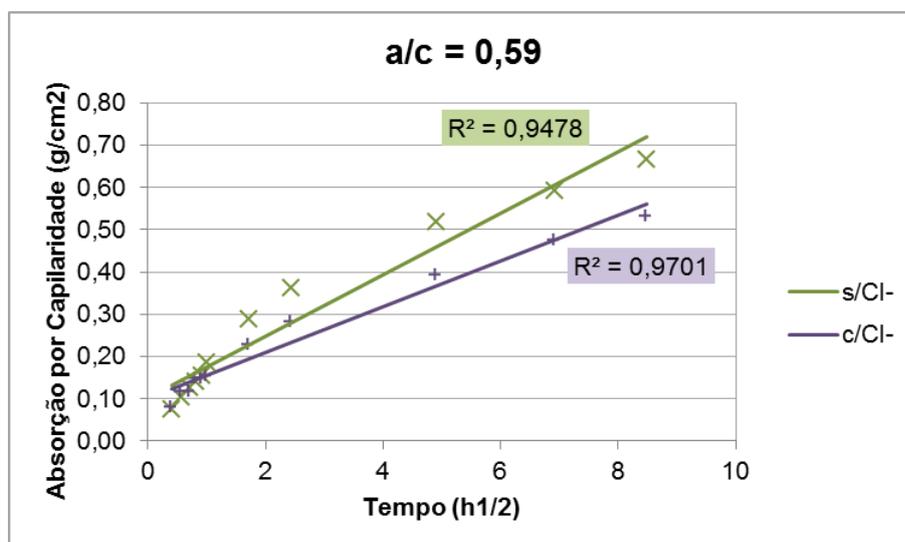


FIGURA 53. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE NOS CORPOS DE PROVA MOLDADOS COM RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO=0,59.

### 5.3.2 Absorção de água por imersão

Considerado outra modalidade de absorção, este ensaio avalia a penetração de água no concreto na condição de imersão. Neste caso, diferente da absorção por capilaridade, a água percola pelo concreto não apenas por ascensão capilar e sim por todos os poros abertos, podendo associar assim a maior

porcentagem possível de poros existentes no interior da estrutura, uma vez que todas as faces são submetidas à percolação da água.

A Figura 54 mostra a variação de resultados deste ensaio para todos os concretos estudados. Diferente dos resultados de absorção por sucção, os concretos com contaminação de cloretos não apresentaram uma clara tendência de influência de modo que as médias dos dois extremos (concreto 1:3 e concreto 1:5) não são consideradas diferentes. Apenas no caso do concreto 1:4, as médias podem ser consideradas diferentes e no caso a maior absorção por imersão ocorreu para o concreto sem contaminação, o contrário do resultado de absorção por capilaridade. Pela análise de variância (Tabela 26) não se pode afirmar a influência significativa entre os parâmetros analisados, relação água/cimento e contaminação por cloretos.

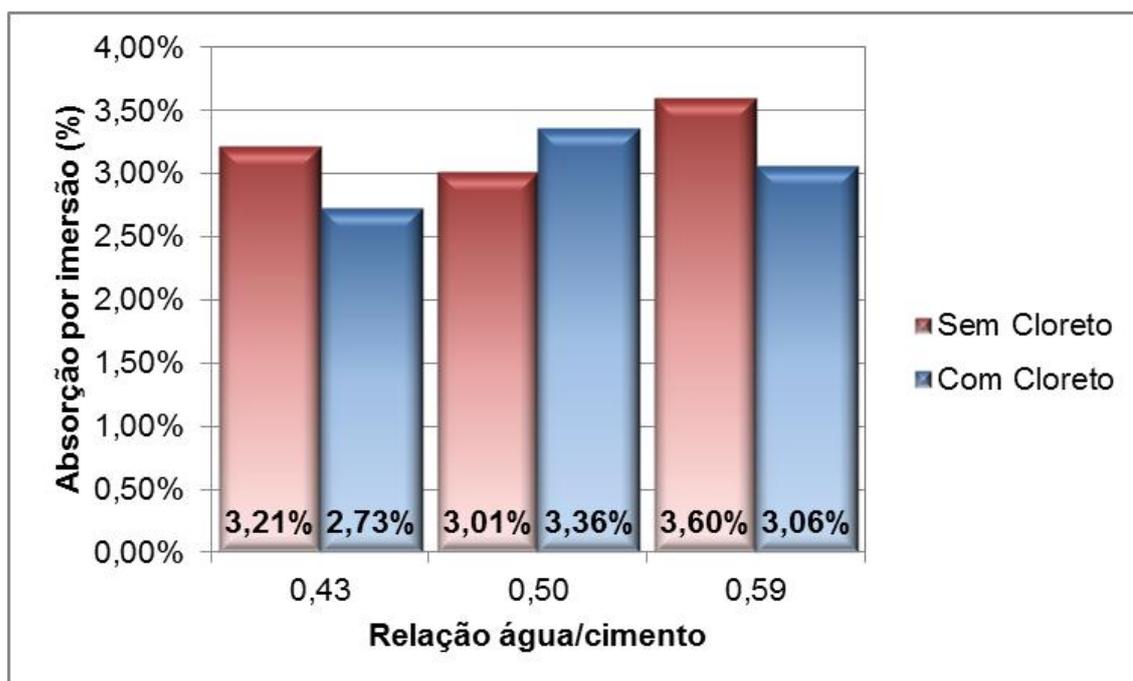


FIGURA 54. ABSORÇÃO POR IMERSÃO (%) PARA OS CONCRETOS COM TRAÇOS 1:3 (A/C=0,43), 1:4 (A/C=0,50) E 1:5 (A/C=0,59).

TABELA 26. TRATAMENTO ESTATÍSTICO – TABELA ANOVA PARA ABSORÇÃO POR IMERSÃO (95% DE SIGNIFICANCIA).

ANOVA		Absorção por imersão					
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	
Relação água/cime	0,1312	2	0,066	0,530	0,653	19,000	
Taxa de contamina	0,0748	1	0,075	0,605	0,518	18,513	
Erro	0,2474	2	0,124				
Total	0,4535	5					

### 5.3.3 Absorção pelo método do cachimbo

A Figura 55 apresenta as médias de absorção pelo método do cachimbo de acordo com a relação água/cimento. De modo geral, os corpos de prova com diferentes taxas de contaminação por cloretos demonstraram comportamento semelhante entre as relações água/cimento. No entanto, pelas barras de dispersão e análise de variância (Tabela 27), não se pode afirmar diferença significativa entre as médias segundo diferentes taxas de absorção.

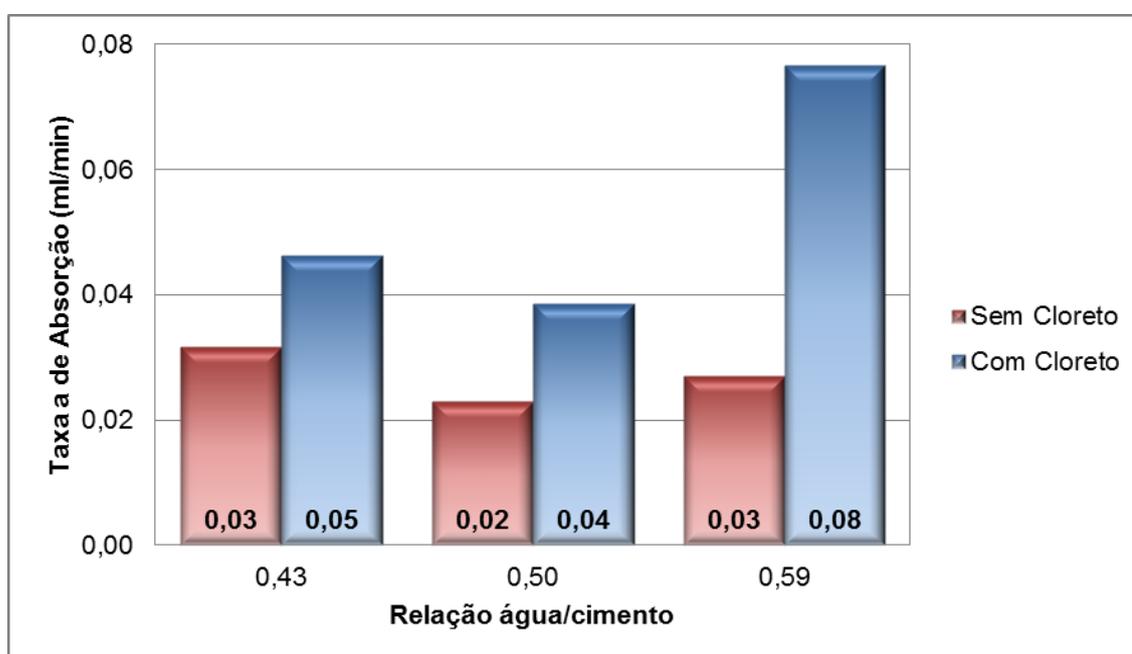


FIGURA 55. TAXA MÉDIA DE ABSORÇÃO PELO MÉTODO DO CACHIMBO PARA OS CONCRETOS COM TRAÇOS 1:3 (A/C=0,43), 1:4 (A/C=0,50) E 1:5 (A/C=0,59).

TABELA 27. TRATAMENTO ESTATÍSTICO – TABELA ANOVA PARA ABSORÇÃO PELO MÉTODO DO CACHIMBO (95% DE SIGNIFICANCIA).

ANOVA	Absorção pelo Método do Cachimbo					
	Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P
Relação água/cimento	0,0004	2	0,00022	1,129	0,470	19,000
Taxa de contaminação por cloretos	0,0011	1	0,00107	5,374	0,146	18,513
Erro	0,0004	2	0,00020			
Total	0,0019	5				

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa abordou a análise da influência de parâmetros (relação água/cimento, espessura de cobrimento, taxa de contaminação, temperatura e grau de umidade do concreto), passíveis de interferir sobre as leituras de potencial de corrosão e conseqüentemente sua relação com o processo de corrosão de armaduras. Para tal, foram estabelecidas condições adversas de exposição ao ar e a água, analisados em períodos distintos da vida útil dos corpos de prova. Dessa forma, associa-se as fases 1, 2 e 3 a períodos de vida útil referentes à 56 a 70 dias (em câmara úmida); 71 a 98 dias (em ambiente de laboratório) e períodos de ciclagem (umedecimento e secagem) após 1 ano, respectivamente.

De modo geral, pode-se dizer que no período de cura em câmara úmida (até 70 dias) foram observados potenciais de corrosão mais negativos do que -350 mV para todos os traços, independente da variação de cobrimento e taxa de contaminação por cloretos. A estas leituras, é possível associar ao possível processo de formação da película passivadora em meio altamente alcalino, exigindo do executor do ensaio conhecimento específico acerca das possíveis reações químicas que possam estar ocorrendo no interior das estruturas segundo características intrínsecas a estrutura (idade, materiais e métodos empregados).

Após este período, os corpos de prova foram submetidos ao ambiente de laboratório apenas, com temperatura (23 °C) e umidade relativa (>60%) controladas.

Nesta etapa 2, os potenciais de corrosão se apresentaram menos negativos, decorrente da também diminuição do teor de umidade no interior das estruturas.

Cabe salientar que nas etapas 1 e 2, as médias de potencial de corrosão entre relações água/cimento se apresentaram próximas uma das outras, não permitindo a distinção da influência do cobrimento e a taxa de contaminação. Quanto aos aspectos práticos de aplicação do método de potencial de corrosão em avaliação estrutural, nota-se grande sensibilidade das leituras quanto às idades analisadas neste período, podendo-se correlacionar erroneamente os potenciais de corrosão da fase de formação da película passivadora às possíveis zonas de corrosão ativa.

De maneira geral, conclui-se que às primeiras idades, as leituras sofrem influência direta sobre as condições de exposição dos corpos de prova, haja vista que as condições de saturação do concreto estão relacionadas à facilidade ou dificuldade de entrada do oxigênio no interior da estrutura.

Além das variáveis analisadas na 2ª etapa, a ruptura dos corpos de prova para determinação da resistência à compressão e tração na compressão diametral foi realizada aos 112 dias. Observa-se resistências à compressão acima de 30 MPa para todos os traços (diferentes relações água/cimento) assim como resistências à tração acima de 3 MPa. Cabe salientar que os corpos de prova ensaiados para esta finalidade foram dosados com base nos 3 traços analisados, porém, sem contaminação por cloretos.

Durante o período de ciclagem, observaram-se potenciais ligeiramente mais negativos ( $< -350$  mV) principalmente nos 2 últimos ciclos para os corpos de prova contaminados por cloretos. Os corpos de prova de referência (sem contaminação por cloretos) situaram-se na zona intermediária, preconizada pela ASTM C 876:2009 como zona de incerteza de corrosão (potenciais de corrosão entre  $-200$  e  $-350$  mV).

Ainda neste período, associou-se potenciais mais negativos em concretos contaminados com menor cobrimento analisado (1 cm), ressaltando a influência entre os cobrimentos analisados após um ano de idade. No caso do concreto não contaminado por cloretos a espessura de cobrimento não influenciou os resultados.

Quanto à influência do teor de umidade, nota-se sensibilidade do potencial devido à variação deste parâmetro. Analisadas nas etapas 1 e 2 (56 a 98 dias), o período de diminuição do teor de umidade interno das estruturas (etapa 2) foi o que apresentou mais oscilação nos potenciais.

A análise da influência da temperatura sob as leituras de potencial apresentou comportamento inverso ao esperado, uma vez que à medida que a temperatura aumenta o potencial de corrosão ficou menos negativo.

Nesta parte do trabalho pode-se verificar claramente a diferença entre leituras de potencial para o caso estudado, permitindo dessa forma verificar zonas com maior probabilidade de corrosão, expressos pelo coeficiente de correlação acima de 0,90. Avaliado segundo faixas de probabilidade de corrosão estabelecidos pela ASTM C 876:2009, de modo geral pode-se dizer que as leituras situam-se dentro da faixa de 90% de probabilidade de corrosão.

A Tabela 28, Tabela 29 e Tabela 30 apresenta o quadro-resumo quanto à influência dos parâmetros de análise e sua interferência no potencial de corrosão à medida que as variáveis se alteram gradativamente.

TABELA 28. CLASSIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES NAS LEITURAS DE POTENCIAL DE CORROSÃO PARA A FASE 1 (PERÍODO DE CURA DE 70 DIAS).

Variável independente	Nível de influência	Sentido da influência
Relação água/cimento	Não	Não se pode afirmar
Temperatura	Não se aplica*	Não se aplica*
Espessura de cobrimento	Não	Não se pode afirmar
Grau de contaminação	Sim	Potencial mais negativo
Teor de Umidade	Sim	Potencial mais negativo
*Ensaio não foi realizado neste período		

TABELA 29. CLASSIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES NAS LEITURAS DE POTENCIAL DE CORROSÃO PARA A FASE 2 (PERÍODO DE SECAGEM EM LABORATÓRIO ENTRE 70 E 98 DIAS).

Variável independente	Nível de influência	Sentido da influência
Relação água/cimento	Não	Não se pode afirmar
Temperatura	Não se aplica*	Não se aplica*
Espessura de cobrimento	Não	Não se pode afirmar
Grau de contaminação	Sim	Não se pode afirmar
Teor de Umidade	Sim	Potencial mais negativo
*Ensaio não foi realizado neste período		

TABELA 30. CLASSIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES NAS LEITURAS DE POTENCIAL DE CORROSÃO PARA A FASE 3 (PERÍODO DE CICLAGEM DE IMERSÃO E SECAGEM).

Variável independente	Nível de influência	Sentido da influência
Relação água/cimento	Não	Não se pode afirmar
Temperatura	Sim	Potencial mais positivo
Espessura de cobrimento	Sim – Concreto contaminado com cloreto	Potencial menos negativo para maiores espessuras (> 3cm)
	Não – Concreto não contaminado por cloreto	Não se pode afirmar
Grau de contaminação	Sim	Potencial mais negativo
Teor de Umidade	Não avaliado	Não se pode afirmar
<b>*Ensaio não foi realizado neste período</b>		

A interpretação da evolução quanto ao potencial de corrosão demonstrou influência dos parâmetros analisados, com exceção da relação água/cimento para as três etapas. Este resultado não era muito esperado, porém vale salientar que a técnica de potencial de corrosão tem relação com as condições termodinâmicas da corrosão de armaduras, servindo apenas para concluir se o processo de corrosão está instalado ou não. Acredita-se que a relação água/cimento tenha mais influência na cinética do processo devendo ter forte reflexo na velocidade de corrosão, que é outra grandeza de monitoramento de estruturas de concreto armado com vistas a corrosão de armaduras.

## 6.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Para complementação do presente estudo, aconselha-se a aplicação dos métodos empregados em um refinamento maior entre as variáveis, como o emprego de demais cobrimentos preconizados na ABNT NBR 6118:2007 para todas as classes de agressividade existentes.

A continuação do monitoramento à idades maiores também demonstra ser importante para a análise do ensaio, uma vez que o emprego do método não destrutivo pode ocorrer ao longo da vida útil da estrutura.

## 7 BIBLIOGRAFIA

\_\_\_\_. ACI COMMITTEE 222 - Corrosion of metals in concrete. ACI 222R-89. In: American Concrete Institute. Manual of Concrete Practice, Detroit, v.1, 1990..

\_\_\_\_. ASTM C 876-09 – Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. Disponível em: <<http://www.astm.org/Standards/C876.htm>> Acesso em: 10/12/2010.

\_\_\_\_. ASTM E1316-07b - Standard terminology for nondestructive examinations. ASTM International.

\_\_\_\_. ABNT NBR 5738:2008 - Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

\_\_\_\_. ABNT NBR 5739:2007 - Concreto – Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

\_\_\_\_. ABNT NBR 6118:2007 - Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

\_\_\_\_. ABNT NBR 7222:2011 - Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

\_\_\_\_. ABNT NBR 9778:2005 - Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

\_\_\_\_. ABNT NBR 9779:1995 - Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção da água por capilaridade – Método de ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

\_\_\_\_. ABNT NBR 10024:1987 - Chapa dura de fibra de madeira - Especificação. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ALMEIDA, S. K. Análise comparativa da capacidade de proteção de adições minerais pozolânicas quanto à corrosão de armaduras por ions cloretos. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco (UPE), Recife, 2012.

AL-TAYYIB, A. J.; KHAN, S.; ALLAM, I. M. Corrosion behavior of pre-rusted rebars after placement in concrete. Cement and Concrete Research. v.20, p.955-960, 1990.

ARAÚJO, A. Estudo para o estabelecimento de metodologia de avaliação de vernizes na proteção ao concreto armado contra a penetração de agentes agressivos. Dissertação de Mestrado – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2004.

ARAÚJO, R. A. M.; SILVA FILHO, A. F. Corrosão de armaduras por íons cloreto. Universidade Católica do Salvador (UCSAL), 2009. Disponível em: [http://info.ucsal.br/banmon/Arquivos/ART\\_260709.pdf](http://info.ucsal.br/banmon/Arquivos/ART_260709.pdf). Acesso em: 01/03/2012.

ARAÚJO, R. A. M.; SILVA FILHO, A. F. Corrosão de armaduras por íons cloreto. Universidade Católica do Salvador (UCSAL), 2009.

ASNT – American Society for Nondestructive Testing. Introduction to Nondestructive Testing: Definition of nondestructive testing. Disponível em: <<http://www.asnt.org/ndt/primer1.htm>>. Acesso em: 25/03/2010.

\_\_\_\_\_. BOLETIM IPT 68:1995 ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO: Características, propriedades e métodos de ensaio. Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). São Paulo, 1995.

Brasil Escola. Ensaio não destrutivo. Disponível em: <<http://www.monografias.brasilecola.com/quimica/ensaio-nao-estruturais.htm>>. Acesso em: 03/05/2010.

BROOMFIELD, J. P. Corrosion of steel in concrete – Understanding, investigation and repair. Londres: E & FN SPON, 1997.

BROWNE, R. D.; GEOGHEGAN, M. P.; BAKER, A. F. Corrosion of reinforcement in concrete construction. Society of chemical Industry. London, 1983.

CALÇADA, L. M. L. Estudo da eficácia do ensaio de migração em condições de fluxo não estacionário na previsão da penetração de cloretos em concreto. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2004.

CASCUDO, O. M. Contribuição ao estudo e emprego de técnicas eletroquímicas no controle da corrosão de armaduras de concreto armado. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), 1991.

CASCUDO, O. M. O controle da corrosão de armaduras de concreto. São Paulo: PINI, 1997.

CASCUDO, O. Inspeção e diagnóstico de estrutura de concreto com problemas de corrosão da armadura. In: Concreto: Ensino, pesquisa e Realizações. GC Isaia (Ed.). – São Paulo: IBRACON, 2005. 2v.

CHATTERJI, S. An explanation for the unsaturated state of water stored concrete. Cement & Concrete Composites, v. 26, n.1, 2004, p.75-79.

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 no2, 1999, Londres.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias. 2 ed. Rio de Janeiro, 2004.

DORNELLES, F. L., PINTO, R. C. A., PADARATZ, I. J. Detecção de falhas internas de concretagem através do uso do ultra-som. Anais do 47º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC2005, v. VII, p. VII.229-VII.239, 2005.

DOTTO, J. M. R. Corrosão do aço induzida por íons cloreto – uma análise crítica das técnicas eletroquímicas aplicadas ao sistema aço-concreto com ou sem pozolana. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2006.

ELSENER, B.; BOHNI, H. Potential mapping and corrosion of steel in concrete. In: Neal S. Berke; Victor Chaker; David Whiting. Corrosion rates of steel in concrete. Philadelphia. ASTM. 1990. P. 143-156.

\_\_\_\_\_. EUROPEAN STANDARD. Betão Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade. EN-206-1. Bruxelas, 2007.

FERREIRA, A. P., CASTRO, P. F. Application of NDT to Concrete Strength Estimation. The e-Journal of Nondestructive testing, 5(2), 2000.

FREIRE, K. R. R. Avaliação do desempenho de inibidores de corrosão em armaduras de concreto. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais. Universidade Federal do Paraná (UFPR), 2005.

FORTES, L. R., ANDRADE, J. C. Corrosão na Armadura do Concreto Armado: Influência dos Agentes Cloretos e da Carbonatação. Universidade Federal do Ceará, 1995. Disponível em <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAej-kAL/corrosao-na-armadura-concreto-armado>> Acesso em: 30/05/2012.

GJORV, O. E.; VANNESLAND, O. Dissusion of chloride ions from seawater into concrete. Cement and Concrete Research. Vol. 9, pp. 229-238. Estados Unidos, 1979.

GU, P.; BEAUDOIN, J. J. Obtaining effective half-cell potential measurements in reinforced concrete structures. Construction Technology Update, National Research Council of Canada, n. 18, p. 1-4, 1998.

HANSSON, C. M. Oxygen diffusion through Portland Cement Mortars. Corrosion Science, Vol. 35, Nos 5-8, p.1551-1556. Great Britain, 1993.

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

HELENE, P. R. L.; FIGUEIREDO, E. P. Manual de Reparo, Proteção e Reforço de Estruturas de Concreto. Reparo, Reforço e Proteção. Ed. Red Rehabilitar, p. 19-34. São Paulo, 2005.

HELENE, P. R. L.; PEREIRA, F. Manual de Reabilitación de Estructuras de Hormigón: Reparación, Refuerzo y Pritección. Ed. Red Rehabilitar, 741 p. São Paulo, 2003.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. R. Manual de Dosagem e Controle do Concreto. 1ª reimpressão (maio 95). PINI/SENAI, 189p. São Paulo, 1993.

HERNÁNDEZ, M. G., IZQUIERDO, M. A. G., IBÁÑEZ, A., ANAYA, J. J., ULLATE, L. G. Porosity estimation of concrete by ultrasonic NDE. *Ultrasonics*, v. 38, p. 531-533, 2000.

JUNIOR, R. A. M., LIMA, M. G., FREIXO, V. B. Estudo sobre a degradação de estruturas de concreto – Aplicação de dados reais de campo ao modelo apresentado pelo Eurcode. Anais do 7º Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas – CINPAR 2011.

LESLIE, J. R., CHEESMAN, W. J. An ultrasonic method of studying deterioration and cracking in concrete structures. *ACI J. Proc.*, 46(1), 17, 1949.

LIRA E SILVA, E. R. R. Análise da corrosão e da erosão-corrosão do aço carbono em meio com NaHCO<sub>3</sub> e CO<sub>2</sub>. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Paraná (UFPR), 2005.

MAIDANA, E. G. M. Analisis critico de los metodos de evaluación de puentes en las inspecciones rutinarias. Dissertação de Mestrado em Construção Civil. Universidade Federal do Paraná (UFPR), 2002.

MARCELLI, M. Sinistro na Construção Civil. 1ª edição. Ed. Pini, 259 p. São Paulo, 2007.

MATOS, O. C., HELENE, P. R. L. Avaliação Experimental da Corrosão de Armaduras em Concreto Utilizando a Técnica de Medida dos Potenciais de Eletrodo. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), 1992.

MEDEIROS, M. H. F. ; MONTEIRO, E. C. B. ; CARNEIRO, F. P.; BARKOKÉBAS JUNIOR, B. Utilização do Nitrito de Sódio como Inibidor de Corrosão em Estruturas de Concreto Armado Sujeitas a Ação dos Íons Cloretos. *Revista de Engenharia e Ciências Aplicadas*, Universidade do Minho, v. 1, n. 15, p. 19-28, 2002.

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. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), 2002.

MEDEIROS, M. H. F.; GALLO, G.; ANDRADE, T. Medidas preventivas para a Reação Álcali-Agregado (RAA) no concreto. *Revista Concreto e Construções*. Número 46, abril/maio/junho. São Paulo, 2007.

MEDEIROS, M. H. F.; GROCHOSKI, M. Marquises: Por que algumas caem? *Revista Concreto e Construções*. Número 46, abril/maio/junho. São Paulo, 2007.

MEDEIROS, M. H. F. Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íons cloretos. Tese de doutorado em Engenharia Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), 2008.

MEDEIROS, M.H.F.; BALBINOT, G. B.; HELENE, P. Inspeção em prédios no Rio de Janeiro: corrosão em pilares. *Concreto & Construções*. n. 57, p. 58-66, 2010.

MEHTA, P. K. Reducing the Environmental Impact of Concrete. Concrete International. October, 2001.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. Cocreto: Microestrutura, propriedades e materiais. Tradução: Helene, P. R. L. et al. São Paulo: Ibracon, 2008.

MONTEIRO, E. B. Avaliação do Método de Extração Eletroquímica de Cloretos para Reabilitação de Estruturas de Concreto com problemas de Corrosão de Armaduras. Tese de doutorado em Engenharia Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), 2002.

MOSS, R. In Service Monitoring of Structures. In: IABSE SYMPOSIUM, 1995, San Francisco. Proceedings. p. 905-910. San Francisco, 1995.

MOTTI, L., KAWABATA, R.H., GHEUR, W.S. História de pontes e viadutos em concreto: procedimentos técnicos. Monografia. Curso de Especialização em Patologia nas Obras Civis. Universidade Tuiuti do Paraná, 2007.

NEVILLE, ADAM M., Propriedades do concreto. PINI 2ª. Ed. 1997.

OLIVEIRA, M. Q. Estudo da Eficácia dos Diferentes Tipos de Materiais de Proteção Superficial Aplicados em Estruturas de Concreto. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de Pernambuco (UPE), 2011.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. Physical and Chemical Characteristics Affecting the Durability of Concrete. ACI Materials Journal, v.88, n.2, p.186-196. 1991a.

PEREIRA, E. ; MEDEIROS, M. H. F. ; ROCHA, F. C. ; TAVORA, M. V. G ; FERREIRA, A . Estimativa da resistência do concreto através de ensaios de esclerometria e Pull Off. In: Cinpar 2011 7 Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas, Fortaleza. Anais do Cinpar 2011 7 Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas, 2011.

PEREIRA, E. ; MEDEIROS, M. H. F. ; MARCONDES, C. G. N . Ensaio Pull off como ferramenta para avaliação da resistência do concreto em campo . In: 53 Congresso Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2011, 2011, Florianópolis. Anais do 53 Congresso Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2011, 2011.

PEREIRA, V. C. O. Influência do tipo de cimento em relação à corrosão de armaduras sob ação de íons cloreto. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Escola Politécnica de Pernambuco da Universidade de Pernambuco (UPE), 2011.

RASHEEDUZZAFAR; AL-SAADOUN, S. S.; AL-GAHTANI, A. S.; DAKHIL, F. H. Effect of tricalcium aluminate content of cement on corrosion of reinforcing steel in concrete. Cement and Concrete Research. Vol. 20, pp. 723-738. Estados Unidos, 1990.

RASHEEDUZZAFAR; HUSSAIN, S. E.; AL-SAADOUN, S. S. Effect of cement composition on chloride binding and corrosion of reinforcing steel in concrete. Cement and Concrete Research. Vol. 21, pp. 777-794. Estados Unidos, 1991.

RIEDER, E. S., BRUSAMARELLO, V., BIANCHI, A. L., BALBINOT, A. Investigação dos principais processos de corrosão em estações de energia elétrica do Estado do RS, Revista Matéria, v. 14, n. 3, pp. 1000 – 1014, 2009.

RIPPER, T.; SOUZA, V. C. M. Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto. 1ª edição. Editora PINI, 256p. São Paulo, 1998.

SCHICKERT, G. NDT-CE Symposium Berlin 1995: A Concluding Review. The e-Journal of Nondestructive testing, 2(4), 1997.

SCHIEßL, P. e RAUPACH, M. Laboratory studies and calculations on the influence of crack width on chloride-induced corrosion of steel in concrete. ACI Materials Journal, v.94, n.1, p.56-62, 1997.

SILVA, S. J. H. Análise de estruturas de concreto armado sujeitas à corrosão de armadura por cloretos através do método dos elementos finitos. 2003. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2003.

SILVA, E.P. Avaliação do potencial de corrosão de concretos estruturais produzidos segundo as prescrições da NBR 6118, submetido a ensaio de corrosão acelerado. Monografia. Universidade Federal do Ceará (UFCE), 2010.

SITTER, W. R. Costs for Service Life Optimization the “Law of Fives”. Comitê Euro International du Beton – CEB. Boletim Técnico. Copenhagen, Denmark, n. 152, p. 131 - 134, 1983.

SOUZA, V.C. M.; RIPPER, T. Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto. Editora PINI, 256p. São Paulo, 1998.

TAVARES, R. J. M., ASSIS, E. M. Influência de Fatores Naturais e Estruturais na Corrosão das Estruturas de Concreto Armado Através de Íons Cloreto. UCSal – Universidade Católica de Salvador, 2009. Disponível em: [http://info.ucsal.br/banmon/Arquivos/ART\\_170109.pdf](http://info.ucsal.br/banmon/Arquivos/ART_170109.pdf)> Acesso em: 30/05/2012.

TESSARI, R. Estudo da capacidade de protensão de alguns tipos de cimentos nacionais, em relação à corrosão de armaduras sob a ação de ions cloreto. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2001.

TIPE ENGENHARIA LTDA. Estudo, diagnóstico, soluções e reparos em edificações. Dicionário. Disponível em: [http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:XKZOxKt8wiMJ:www.tipeengenharia.com.br/index\\_arquivos/Page892.htm+o+que+%C3%A9+patologia+na+engenharia&cd=2&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br](http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:XKZOxKt8wiMJ:www.tipeengenharia.com.br/index_arquivos/Page892.htm+o+que+%C3%A9+patologia+na+engenharia&cd=2&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br)>. Acesso em: 02 outubro 2010.

VAN VLACK, L. H. Princípios de Ciência e Tecnologia dos Materiais. 4ª. Ed., 463 p. Rio de Janeiro, 1984.

VILASBOAS, J. M. L. Durabilidade das edificações de concreto armado em Salvador: uma contribuição para a implantação da NBR 6118:2003. Dissertação de Mestrado

Profissional em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo. Departamento de Engenharia Ambiental - DEA, Universidade Federal da Bahia (UFBA), 2004.

ZANELLO, S. Tópicos em Química Tecnológica do Concreto. Notas de aula. Curitiba: Departamento Acadêmico de Química e Biologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), 2011.

WANG, L.; UEDA, T. Mesoscale modeling of water penetration into concrete by capillary absorption. *Ocean Engineering*, v.38, p. 519-528. 2011

WIBERG, U. Material Characterization and Defect Detection in Concrete by Quantitative Ultrasonics. Doctoral thesis, Dept. Structural Engineering, Royal Inst. Tech., Stockholm, 1993.

WILSON, M. A.; CARTES, M. A.; HOFF, W. D. British Standard and RILEM water absorption tests: A critical evaluation. *Materials and Structures*, Vol. 32, Outubro de 1999, p. 571-578.

## **ANEXOS**

**ANEXO A1 DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO**

TRAÇO: :1:3 Com Cloreto  
 Relação água/cimento: 0,43  
 DATA DA MOLDAGEM: 14/12/2010

IDADE DO CP (DIAS)	DIA DE CICLAGEM	CP Nº	LEITURAS (V)																		Teor de Umidade	
			FACE 1 (Cobrimento = 1cm)									FACE 2 (Cobrimento = 3cm)									Teor de Umidade/CP	Média
			PONTO 1	PONTO 2	PONTO 3	PONTO 4	PONTO 5	PONTO 6	Sd	Sd/4 barras	MÉDIA/FACE (mV)	MÉDIA/FACE <sup>2</sup> (mV)	PONTO 1	PONTO 2	PONTO 3	PONTO 4	PONTO 5	PONTO 6	Sd	Sd/4 barras		
56	-	1	-0,434	-0,420	-0,421	-0,440	-0,435	-0,441	0,009	-0,432	-406	-0,228	-0,242	-0,203	-0,439	-0,377	-0,384	0,099	-0,312	-375	0,71%	0,65%
		2	-0,420	-0,392	-0,419	-0,349	-0,339	-0,362	0,035	-0,380	-406	-0,482	-0,509	-0,483	-0,374	-0,392	-0,388	0,060	-0,438	-375	0,59%	0,65%
62	-	1	-0,477	-0,462	-0,451	-0,543	-0,538	-0,567	0,146	-0,506	-453	-0,536	-0,516	-0,487	-0,450	-0,416	-0,415	0,051	-0,470	-493	0,63%	0,61%
		2	-0,423	-0,418	-0,414	-0,383	-0,386	-0,379	0,020	-0,401	-453	-0,515	-0,516	-0,540	-0,496	-0,516	-0,515	0,014	-0,516	-493	0,59%	0,61%
63	-	1	-0,479	-0,475	-0,473	-0,554	-0,546	-0,551	0,041	-0,513	-461	-0,522	-0,515	-0,485	-0,634	-0,597	-0,609	0,061	-0,560	-544	0,63%	0,61%
		2	-0,425	-0,432	-0,432	-0,389	-0,386	-0,385	0,024	-0,408	-461	-0,547	-0,546	-0,559	-0,495	-0,510	-0,505	0,027	-0,527	-544	0,59%	0,61%
69	-	1	-0,477	-0,453	-0,445	-0,531	-0,519	-0,523	0,147	-0,491	-449	-0,264	-0,253	-0,206	-0,484	-0,422	-0,419	0,114	-0,341	-440	0,63%	0,61%
		2	-0,426	-0,422	-0,430	-0,394	-0,392	-0,377	0,022	-0,407	-449	-0,547	-0,518	-0,529	-0,552	-0,545	-0,538	0,013	-0,538	-440	0,59%	0,61%
70	-	1	-0,449	-0,424	-0,413	-0,509	-0,498	-0,504	0,043	-0,466	-432	-0,448	-0,453	-0,403	-0,492	-0,435	-0,467	0,030	-0,450	-510	0,63%	0,61%
		2	-0,416	-0,419	-0,399	-0,394	-0,394	-0,367	0,019	-0,398	-432	-0,475	-0,472	-0,485	-0,671	-0,654	-0,668	0,103	-0,571	-510	0,59%	0,61%
77	-	1	-0,210	-0,178	-0,174	-0,136	-0,148	-0,140	0,149	-0,164	-187	-0,106	-0,102	-0,147	-0,179	-0,214	-0,259	0,062	-0,168	-153	0,51%	0,51%
		2	-0,234	-0,228	-0,186	-0,232	-0,220	-0,158	0,031	-0,210	-187	-0,170	-0,152	-0,174	-0,117	-0,106	-0,110	0,031	-0,138	-153	0,51%	0,51%
91	-	1	-0,170	-0,171	-0,213	-0,094	-0,121	-0,113	0,045	-0,147	-164	-0,090	-0,073	-0,142	-0,176	-0,208	-0,248	0,068	-0,156	-120	0,20%	0,22%
		2	-0,258	-0,251	-0,238	-0,138	-0,118	-0,085	0,076	-0,181	-164	-0,104	-0,084	-0,080	-0,110	-0,067	-0,052	0,022	-0,083	-120	0,23%	0,22%
98	-	1	-0,100	-0,097	-0,142	-0,130	-0,162	-0,155	0,147	-0,131	-139	-0,158	-0,137	-0,211	-0,176	-0,212	-0,250	0,041	-0,191	-147	0,08%	0,10%
		2	-0,182	-0,182	-0,181	-0,133	-0,116	-0,084	0,042	-0,146	-139	-0,108	-0,110	-0,110	-0,116	-0,092	-0,081	0,013	-0,103	-147	0,12%	0,10%
426	2	1	-0,619	-0,591	-0,602	-0,596	-0,583	-0,597	0,012	-0,598	-592	-0,523	-0,518	-0,526	-0,536	-0,531	-0,557	0,014	-0,532	-525	-	-
		2	-0,586	-0,588	-0,595	-0,575	-0,572	-0,596	0,010	-0,585	-592	-0,619	-0,594	-0,598	-0,440	-0,438	-0,420	0,094	-0,518	-525	-	-
427	3	1	-0,260	-0,264	-0,261	-0,240	-0,236	-0,240	0,119	-0,250	-280	-0,314	-0,305	-0,320	-0,344	-0,345	-0,368	0,024	-0,333	-341	-	-
		2	-0,310	-0,334	-0,325	-0,278	-0,304	-0,302	0,020	-0,309	-280	-0,380	-0,376	-0,396	-0,306	-0,320	-0,319	0,039	-0,350	-341	-	-
428	4	1	-0,270	-0,252	-0,256	-0,241	-0,231	-0,235	0,015	-0,248	-284	-0,303	-0,312	-0,313	-0,316	-0,327	-0,350	0,017	-0,320	-341	-	-
		2	-0,334	-0,366	-0,294	-0,294	-0,317	-0,320	0,027	-0,321	-284	-0,393	-0,386	-0,404	-0,331	-0,334	-0,319	0,037	-0,361	-341	-	-
429	5	1	-0,277	-0,268	-0,272	-0,260	-0,254	-0,263	0,124	-0,266	-298	-0,338	-0,344	-0,341	-0,357	-0,374	-0,392	0,021	-0,358	-351	-	-
		2	-0,322	-0,356	-0,354	-0,305	-0,322	-0,319	0,021	-0,330	-298	-0,362	-0,370	-0,394	-0,302	-0,327	-0,312	0,036	-0,345	-351	-	-
430	6	1	-0,263	-0,266	-0,278	-0,291	-0,282	-0,283	0,011	-0,277	-322	-0,356	-0,351	-0,351	-0,353	-0,365	-0,380	0,011	-0,359	-372	-	-
		2	-0,353	-0,398	-0,371	-0,353	-0,364	-0,356	0,017	-0,366	-322	-0,404	-0,418	-0,418	-0,359	-0,354	-0,355	0,032	-0,385	-372	-	-
434	10	1	-0,641	-0,627	-0,625	-0,618	-0,609	-0,618	0,011	-0,623	-604	-0,578	-0,576	-0,606	-0,580	-0,584	-0,616	0,017	-0,590	-607	-	-
		2	-0,583	-0,578	-0,584	-0,576	-0,587	-0,596	0,007	-0,584	-604	-0,644	-0,632	-0,640	-0,614	-0,618	-0,598	0,018	-0,624	-607	-	-
435	11	1	-0,338	-0,337	-0,353	-0,388	-0,385	-0,400	0,112	-0,367	-394	-0,447	-0,453	-0,461	-0,459	-0,462	-0,484	0,013	-0,461	-461	-	-
		2	-0,433	-0,450	-0,479	-0,383	-0,400	-0,379	0,040	-0,421	-394	-0,543	-0,547	-0,561	-0,383	-0,366	-0,364	0,099	-0,461	-461	-	-
436	12	1	-0,386	-0,380	-0,384	-0,342	-0,318	-0,324	0,031	-0,356	-431	-0,528	-0,543	-0,572	-0,523	-0,515	-0,568	0,024	-0,542	-537	-	-
		2	-0,508	-0,547	-0,562	-0,469	-0,488	-0,460	0,042	-0,506	-431	-0,572	-0,582	-0,628	-0,466	-0,484	-0,467	0,070	-0,533	-537	-	-
437	13	1	-0,381	-0,381	-0,391	-0,347	-0,352	-0,398	0,119	-0,375	-357	-0,281	-0,273	-0,285	-0,284	-0,284	-0,279	0,005	-0,281	-329	-	-
		2	-0,345	-0,355	-0,363	-0,317	-0,322	-0,329	0,019	-0,339	-357	-0,422	-0,419	-0,433	-0,325	-0,337	-0,325	0,053	-0,377	-329	-	-
440	16	1	-0,586	-0,586	-0,594	-0,598	-0,584	-0,604	0,008	-0,592	-590	-0,395	-0,394	-0,413	-0,579	-0,579	-0,616	0,106	-0,496	-478	-	-
		2	-0,567	-0,571	-0,572	-0,582	-0,599	-0,633	0,025	-0,587	-590	-0,483	-0,502	-0,512	-0,423	-0,432	-0,406	0,045	-0,460	-478	-	-
441	17	1	-0,275	-0,264	-0,277	-0,271	-0,263	-0,273	0,037	-0,271	-296	-0,286	-0,282	-0,295	-0,344	-0,356	-0,397	0,046	-0,327	-339	-	-
		2	-0,321	-0,338	-0,364	-0,291	-0,305	-0,314	0,026	-0,322	-296	-0,398	-0,404	-0,426	-0,290	-0,301	-0,286	0,065	-0,351	-339	-	-
442	18	1	-0,298	-0,264	-0,278	-0,251	-0,247	-0,252	0,020	-0,265	-292	-0,244	-0,245	-0,266	-0,314	-0,328	-0,368	0,050	-0,294	-317	-	-
		2	-0,327	-0,337	-0,351	-0,290	-0,302	-0,306	0,023	-0,319	-292	-0,394	-0,403	-0,419	-0,273	-0,283	-0,272	0,071	-0,341	-317	-	-
443	19	1	-0,267	-0,245	-0,272	-0,229	-0,227	-0,223	0,035	-0,244	-271	-0,253	-0,258	-0,278	-0,319	-0,334	-0,369	0,046	-0,302	-309	-	-
		2	-0,303	-0,322	-0,324	-0,274	-0,284	-0,285	0,021	-0,299	-271	-0,372	-0,384	-0,397	-0,253	-0,256	-0,240	0,074	-0,317	-309	-	-
444	20	1	-0,247	-0,231	-0,253	-0,212	-0,209	-0,207	0,020	-0,227	-256	-0,263	-0,262	-0,280	-0,305	-0,317	-0,352	0,035	-0,297	-312	-	-
		2	-0,274	-0,291	-0,299	-0,271	-0,288	-0,284	0,011	-0,285	-256	-0,381	-0,398	-0,407	-0,262	-0,271	-0,251	0,074	-0,328	-312	-	-



**ANEXO A3 DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO**

TRAÇO: :1:4 Com Cloreto  
 Relação água/cimento: 0,50  
 DATA DA MOLDAGEM: 15/12/2010

IDADE DO CP (DIAS)	DIA DE CICLAGEM	CP Nº	LEITURAS (V)																		Teor de Umidade				
			FACE 1 (Cobrimento = 1cm)									FACE 2 (Cobrimento = 3cm)									Teor de Umidade/CP	Média			
			PONTO 1	PONTO 2	PONTO 3	PONTO 4	PONTO 5	PONTO 6	Sd	Sd/4 barras	MÉDIA/FACE (mV)	MÉDIA/FACE <sup>2</sup> (mV)	PONTO 1	PONTO 2	PONTO 3	PONTO 4	PONTO 5	PONTO 6	Sd	Sd/4 barras			MÉDIA/FACE (mV)	MÉDIA/FACE <sup>2</sup> (mV)	
56	-	1	-0,435	-0,452	-0,455	-0,550	-0,521	-0,542	0,051		0,042	-0,493	-479	-0,230	-0,232	-0,264	-0,401	-0,399	-0,452	0,099		-0,330	-389	0,87%	0,89%
		2	-0,440	-0,432	-0,446	-0,483	-0,495	-0,499	0,030			-0,466		-0,460	-0,445	-0,430	-0,446	-0,439	-0,464	0,013		-0,447		0,91%	
62	-	1	-0,401	-0,402	-0,410	-0,610	-0,583	-0,571	0,101		0,070	-0,496	-481	-0,454	-0,475	-0,475	-0,400	-0,393	-0,418	0,037		-0,436	-433	0,87%	0,91%
		2	-0,459	-0,453	-0,466	-0,481	-0,474	-0,464	0,010			-0,466		-0,457	-0,462	-0,445	-0,416	-0,415	-0,388	0,029		-0,431		0,95%	
63	-	1	-0,487	-0,502	-0,464	-0,586	-0,578	-0,552	0,051		0,052	-0,528	-500	-0,444	-0,446	-0,450	-0,416	-0,410	-0,424	0,017		-0,432	-425	0,87%	0,91%
		2	-0,446	-0,430	-0,447	-0,503	-0,525	-0,478	0,037			-0,472		-0,434	-0,435	-0,422	-0,402	-0,404	-0,414	0,014		-0,419		0,95%	
69	-	1	-0,491	-0,491	-0,488	-0,565	-0,529	-0,531	0,031		0,037	-0,516	-487	-0,451	-0,461	-0,468	-0,427	-0,414	-0,415	0,024		-0,439	-517	0,83%	0,85%
		2	-0,462	-0,449	-0,466	-0,471	-0,455	-0,450	0,009			-0,459		-0,417	-0,431	-0,434	-0,764	-0,755	-0,762	0,183		-0,594		0,87%	
70	-	1	-0,457	-0,474	-0,469	-0,565	-0,529	-0,530	0,043		0,051	-0,504	-466	-0,341	-0,335	-0,316	-0,408	-0,398	-0,408	0,042		-0,368	-427	0,83%	0,85%
		2	-0,415	-0,402	-0,417	-0,452	-0,445	-0,432	0,019			-0,427		-0,430	-0,451	-0,473	-0,516	-0,520	-0,522	0,040		-0,485		0,87%	
77	-	1	-0,166	-0,161	-0,176	-0,129	-0,145	-0,146	0,017		0,019	-0,154	-142	-0,176	-0,169	-0,210	-0,145	-0,150	-0,178	0,023		-0,171	-171	0,63%	0,65%
		2	-0,121	-0,124	-0,123	-0,123	-0,144	-0,140	0,010			-0,129		-0,164	-0,217	-0,175	-0,110	-0,190	-0,164	0,036		-0,170		0,67%	
91	-	1	-0,101	-0,099	-0,136	-0,035	-0,103	-0,105	0,033		0,057	-0,097	-145	-0,270	-0,251	-0,300	-0,200	-0,215	-0,232	0,037		-0,245	-216	0,28%	0,30%
		2	-0,201	-0,195	-0,195	-0,155	-0,198	-0,214	0,020			-0,193		-0,195	-0,235	-0,206	-0,135	-0,178	-0,171	0,034		-0,187		0,32%	
98	-	1	-0,130	-0,136	-0,159	-0,091	-0,140	-0,138	0,022		0,046	-0,132	-172	-0,278	-0,281	-0,312	-0,222	-0,231	-0,238	0,035		-0,260	-228	0,12%	0,14%
		2	-0,197	-0,203	-0,209	-0,198	-0,230	-0,236	0,017			-0,212		-0,232	-0,243	-0,217	-0,142	-0,180	-0,164	0,040		-0,196		0,16%	
425	3	1	-0,626	-0,607	-0,620	-0,616	-0,604	-0,606	0,009		0,009	-0,613	-609	-0,572	-0,560	-0,558	-0,600	-0,590	-0,597	0,019		-0,580	-548	-	-
		2	-0,619	-0,600	-0,605	-0,606	-0,603	-0,597	0,008			-0,605		-0,470	-0,465	-0,478	-0,568	-0,556	-0,561	0,050		-0,516		-	-
426	4	1	-0,297	-0,273	-0,289	-0,291	-0,279	-0,281	0,009		0,008	-0,285	-281	-0,285	-0,276	-0,263	-0,246	-0,237	-0,243	0,019		-0,258	-271	-	-
		2	-0,284	-0,276	-0,273	-0,279	-0,283	-0,270	0,006			-0,278		-0,280	-0,273	-0,288	-0,289	-0,296	-0,278	0,008		-0,284		-	-
427	5	1	-0,247	-0,236	-0,246	-0,247	-0,231	-0,237	0,007		0,014	-0,241	-230	-0,313	-0,303	-0,278	-0,259	-0,246	-0,242	0,030		-0,274	-271	-	-
		2	-0,233	-0,224	-0,219	-0,216	-0,221	-0,204	0,010			-0,220		-0,270	-0,275	-0,272	-0,262	-0,273	-0,263	0,005		-0,269		-	-
428	9	1	-0,252	-0,233	-0,235	-0,241	-0,277	-0,239	0,016		0,024	-0,246	-228	-0,245	-0,246	-0,240	-0,228	-0,213	-0,220	0,014		-0,232	-237	-	-
		2	-0,232	-0,220	-0,215	-0,198	-0,204	-0,195	0,014			-0,211		-0,250	-0,245	-0,240	-0,243	-0,235	-0,238	0,005		-0,242		-	-
429	10	1	-0,238	-0,231	-0,237	-0,275	-0,270	-0,265	0,019		0,023	-0,253	-235	-0,274	-0,265	-0,247	-0,261	-0,243	-0,238	0,014		-0,255	-250	-	-
		2	-0,236	-0,218	-0,216	-0,216	-0,212	-0,208	0,010			-0,218		-0,248	-0,246	-0,238	-0,262	-0,240	-0,241	0,005		-0,246		-	-
433	11	1	-0,653	-0,646	-0,664	-0,648	-0,644	-0,643	0,008		0,013	-0,650	-658	-0,656	-0,652	-0,647	-0,676	-0,662	-0,662	0,010		-0,659	-663	-	-
		2	-0,655	-0,656	-0,656	-0,681	-0,682	-0,662	0,013			-0,665		-0,639	-0,642	-0,643	-0,691	-0,692	-0,693	0,028		-0,667		-	-
434	12	1	-0,392	-0,374	-0,387	-0,408	-0,410	-0,412	0,015		0,040	-0,397	-369	-0,406	-0,401	-0,391	-0,359	-0,343	-0,332	0,032		-0,372	-369	-	-
		2	-0,377	-0,372	-0,373	-0,317	-0,300	-0,303	0,037			-0,340		-0,368	-0,365	-0,360	-0,368	-0,372	-0,364	0,004		-0,366		-	-
435	15	1	-0,391	-0,378	-0,391	-0,385	-0,375	-0,381	0,007		0,017	-0,384	-369	-0,404	-0,398	-0,372	-0,353	-0,342	-0,328	0,031		-0,366	-389	-	-
		2	-0,353	-0,354	-0,368	-0,336	-0,364	-0,354	0,011			-0,355		-0,427	-0,423	-0,427	-0,406	-0,408	-0,384	0,017		-0,413		-	-
436	16	1	-0,256	-0,248	-0,251	-0,272	-0,267	-0,278	0,012		0,010	-0,262	-257	-0,282	-0,281	-0,266	-0,233	-0,234	-0,220	0,027		-0,253	-262	-	-
		2	-0,249	-0,249	-0,253	-0,248	-0,260	-0,253	0,004			-0,252		-0,285	-0,285	-0,285	-0,264	-0,256	-0,249	0,016		-0,271		-	-
439	17	1	-0,622	-0,606	-0,606	-0,606	-0,598	-0,593	0,010		0,013	-0,605	-613	-0,439	-0,423	-0,409	-0,602	-0,572	-0,563	0,087		-0,501	-520	-	-
		2	-0,631	-0,629	-0,632	-0,615	-0,609	-0,607	0,011			-0,621		-0,467	-0,475	-0,482	-0,604	-0,605	-0,597	0,070		-0,538		-	-
440	18	1	-0,290	-0,277	-0,286	-0,276	-0,272	-0,272	0,007		0,013	-0,279	-270	-0,268	-0,263	-0,250	-0,250	-0,234	-0,230	0,016		-0,248	-260	-	-
		2	-0,274	-0,262	-0,265	-0,247	-0,263	-0,251	0,010			-0,260		-0,268	-0,279	-0,280	-0,269	-0,275	-0,261	0,007		-0,272		-	-
441	19	1	-0,226	-0,224	-0,242	-0,241	-0,241	-0,247	0,009		0,017	-0,237	-225	-0,243	-0,240	-0,214	-0,223	-0,217	-0,210	0,014		-0,225	-232	-	-
		2	-0,228	-0,224	-0,231	-0,196	-0,209	-0,195	0,016			-0,214		-0,246	-0,252	-0,250	-0,235	-0,238	-0,216	0,013		-0,240		-	-
442	20	1	-0,197	-0,192	-0,202	-0,216	-0,220	-0,230	0,015		0,017	-0,210	-205	-0,210	-0,207	-0,184	-0,182	-0,171	-0,174	0,017		-0,188	-201	-	-
		2	-0,216	-0,215	-0,220	-0,178	-0,192	-0,180	0,019			-0,200		-0,218	-0,222	-0,226	-0,206	-0,209	-0,200	0,010		-0,214		-	-
443	21	1	-0,191	-0,190	-0,197	-0,216	-0,220	-0,230	0,017		0,022	-0,207	-193	-0,231	-0,234	-0,192	-0,185	-0,166	-0,170	0,030		-0,196	-203	-	-
		2	-0,190	-0,192	-0,193	-0,158	-0,176	-0,162	0,016			-0,179		-0,211	-0,219	-0,214	-0,212	-0,211	-0,190	0,010		-0,210		-	-

**ANEXO A4 DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO**

TRAÇO: :1:4 Sem Cloreto  
 Relação água/cimento: 0,50  
 DATA DA MOLDAGEM: 08/12/2010

IDADE DO CP (DIAS)	DIA DE CICLAGEM	CP Nº	LEITURAS (V)																		Teor de Umidade			
			FACE 1 (Cobrimeto = 1cm)									FACE 2 (Cobrimeto = 3cm)									Teor de Umidade/CP	Média		
			PONTO 1	PONTO 2	PONTO 3	PONTO 4	PONTO 5	PONTO 6	Sd	Sd/4 barras	MÉDIA/FACE (mV)	MÉDIA/FACE <sup>2</sup> (mV)	PONTO 1	PONTO 2	PONTO 3	PONTO 4	PONTO 5	PONTO 6	Sd	Sd/4 barras			MÉDIA/FACE (mV)	MÉDIA/FACE <sup>2</sup> (mV)
56	-	1	-0,320	-0,342	-0,335	-0,441	-0,433	-0,437	0,058		-0,385		-0,309	-0,295	-0,290	-0,374	-0,352	-0,354	0,035		-0,329		1,15%	
		2	-0,357	-0,384	-0,363	-0,436	-0,430	-0,459	0,042	0,165	-0,405	-395	-0,449	-0,452	-0,434	-0,443	-0,438	-0,455	0,008	0,065	-0,445	-387	1,05%	1,10%
62	-	1	-0,327	-0,364	-0,339	-0,438	-0,441	-0,438	0,165		-0,391		-0,398	-0,367	-0,385	-0,410	-0,433	-0,428	0,025		-0,404		1,15%	
		2	-0,353	-0,367	-0,355	-0,338	-0,347	-0,370	0,164	0,042	-0,355	-373	-0,414	-0,412	-0,386	-0,434	-0,427	-0,414	0,171	0,021	-0,415	-409	1,05%	1,10%
63	-	1	-0,438	-0,362	-0,362	-0,409	-0,424	-0,411	0,032		-0,401		-0,392	-0,411	-0,423	-0,494	-0,590	-0,532	0,078		-0,474		1,15%	
		2	-0,344	-0,386	-0,354	-0,412	-0,431	-0,415	0,035	0,166	-0,390	-396	-0,424	-0,422	-0,399	-0,422	-0,419	-0,405	0,010	0,061	-0,415	-444	1,05%	1,10%
69	-	1	-0,382	-0,394	-0,368	-0,673	-0,671	-0,680	0,164		-0,528		-0,349	-0,374	-0,376	-0,688	-0,734	-0,736	0,194		-0,543		1,07%	
		2	-0,343	-0,347	-0,347	-0,343	-0,345	-0,357	0,157	0,144	-0,347	-438	-0,403	-0,400	-0,375	-0,549	-0,570	-0,569	0,160	0,149	-0,478	-510	0,97%	1,02%
70	-	1	-0,642	-0,644	-0,638	-0,562	-0,563	-0,565	0,043		-0,602		-0,361	-0,371	-0,385	-0,425	-0,461	-0,443	0,041		-0,408		1,07%	
		2	-0,361	-0,323	-0,327	-0,439	-0,452	-0,434	0,059	0,122	-0,389	-496	-0,467	-0,456	-0,406	-0,430	-0,425	-0,393	0,028	0,036	-0,430	-419	0,97%	1,02%
77	-	1	-0,090	-0,090	-0,076	-0,099	-0,087	-0,075	0,145		-0,086		-0,136	-0,124	-0,127	-0,185	-0,174	-0,150	0,025		-0,149		0,72%	
		2	-0,128	-0,143	-0,118	-0,125	-0,126	-0,141	0,146	0,025	-0,130	-108	-0,091	-0,095	-0,089	-0,104	-0,100	-0,135	0,155	0,032	-0,102	-126	0,70%	0,71%
91	-	1	-0,080	-0,067	-0,071	-0,097	-0,067	-0,085	0,012		-0,078		-0,144	-0,048	-0,034	-0,123	-0,056	-0,050	0,046		-0,076		0,28%	
		2	-0,154	-0,138	-0,129	-0,128	-0,119	-0,109	0,016	0,150	-0,130	-104	-0,046	-0,016	-0,073	-0,017	-0,033	-0,111	0,037	0,042	-0,049	-63	0,31%	0,29%
98	-	1	-0,075	-0,075	-0,076	-0,104	-0,082	-0,092	0,150		-0,084		-0,113	-0,040	-0,033	-0,087	-0,048	-0,015	0,037		-0,056		-0,20%	
		2	-0,123	-0,105	-0,085	-0,086	-0,086	-0,101	0,150	0,015	-0,098	-91	-0,036	-0,030	-0,072	-0,040	-0,066	-0,115	0,156	0,033	-0,060	-58	0,19%	0,00%
432	4	1	-0,592	-0,584	-0,588	-0,590	-0,589	-0,589	0,003		-0,589		-0,581	-0,591	-0,574	-0,610	-0,590	-0,593	0,012		-0,590		-	
		2	-0,589	-0,580	-0,572	-0,506	-0,460	-0,401	0,076	0,153	-0,518	-553	-0,582	-0,589	-0,583	-0,582	-0,583	-0,580	0,003	0,009	-0,583	-587	-	-
433	5	1	-0,162	-0,161	-0,148	-0,147	-0,153	-0,144	0,128		-0,153		-0,178	-0,210	-0,183	-0,202	-0,200	-0,200	0,012		-0,196		-	
		2	-0,164	-0,163	-0,157	-0,174	-0,174	-0,183	0,130	0,012	-0,169	-161	-0,180	-0,193	-0,174	-0,222	-0,211	-0,209	0,122	0,015	-0,198	-197	-	-
434	6	1	-0,152	-0,145	-0,130	-0,144	-0,149	-0,145	0,008		-0,144		-0,153	-0,193	-0,161	-0,199	-0,190	-0,200	0,020		-0,183		-	
		2	-0,118	-0,126	-0,128	-0,131	-0,129	-0,144	0,008	0,133	-0,129	-137	-0,161	-0,178	-0,514	-0,216	-0,201	-0,190	0,134	0,097	-0,243	-213	-	-
435	7	1	-0,152	-0,137	-0,127	-0,170	-0,174	-0,163	0,137		-0,154		-0,152	-0,180	-0,158	-0,202	-0,202	-0,185	0,021		-0,180		-	
		2	-0,128	-0,131	-0,128	-0,156	-0,156	-0,153	0,139	0,017	-0,142	-148	-0,208	-0,216	-0,195	-0,241	-0,234	-0,229	0,128	0,028	-0,221	-200	-	-
436	8	1	-0,172	-0,177	-0,168	-0,220	-0,210	-0,192	0,021		-0,190		-0,180	-0,202	-0,174	-0,185	-0,186	-0,173	0,011		-0,183		-	
		2	-0,620	-0,170	-0,166	-0,195	-0,205	-0,191	0,178	0,142	-0,258	-224	-0,201	-0,196	-0,169	-0,252	-0,260	-0,219	0,035	0,030	-0,216	-200	-	-
439	11	1	-0,613	-0,623	-0,610	-0,590	-0,577	-0,588	0,144		-0,600		-0,606	-0,597	-0,595	-0,594	-0,580	-0,586	0,009		-0,593		-	
		2	-0,616	-0,618	-0,623	-0,633	-0,632	-0,635	0,115	0,019	-0,626	-613	-0,631	-0,638	-0,626	-0,646	-0,635	-0,647	0,112	0,025	-0,637	-615	-	-
440	12	1	-0,171	-0,162	-0,153	-0,206	-0,172	-0,177	0,018		-0,174		-0,140	-0,186	-0,168	-0,182	-0,190	-0,163	0,019		-0,172		-	
		2	-0,208	-0,192	-0,196	-0,210	-0,215	-0,221	0,011	0,051	-0,207	-190	-0,235	-0,268	-0,233	-0,285	-0,257	-0,211	0,027	0,046	-0,248	-210	-	-
441	13	1	-0,142	-0,146	-0,135	-0,172	-0,167	-0,176	0,052		-0,156		-0,136	-0,171	-0,151	-0,174	-0,170	-0,163	0,015		-0,161		-	
		2	-0,164	-0,156	-0,158	-0,173	-0,171	-0,180	0,054	0,014	-0,167	-162	-0,215	-0,225	-0,202	-0,265	-0,254	-0,235	0,055	0,042	-0,233	-197	-	-
442	14	1	-0,140	-0,147	-0,138	-0,178	-0,164	-0,158	0,015		-0,154		-0,112	-0,137	-0,143	-0,171	-0,165	-0,158	0,022		-0,148		-	
		2	-0,166	-0,165	-0,169	-0,160	-0,163	-0,162	0,003	0,056	-0,164	-159	-0,218	-0,235	-0,216	-0,226	-0,218	-0,212	0,008	0,041	-0,221	-184	-	-
443	15	1	-0,117	-0,116	-0,118	-0,183	-0,174	-0,170	0,060		-0,146		-0,146	-0,157	-0,141	-0,174	-0,167	-0,164	0,013		-0,158		-	
		2	-0,148	-0,146	-0,152	-0,142	-0,155	-0,161	0,062	0,022	-0,151	-149	-0,211	-0,213	-0,198	-0,236	-0,222	-0,211	0,059	0,032	-0,215	-187	-	-
446	18	1	-0,298	-0,296	-0,288	-0,300	-0,269	-0,287	0,011		-0,290		-0,291	-0,285	-0,279	-0,300	-0,286	-0,284	0,007		-0,288		-	
		2	-0,306	-0,299	-0,299	-0,242	-0,234	-0,253	0,033	0,065	-0,272	-281	-0,299	-0,286	-0,293	-0,337	-0,325	-0,332	0,022	0,020	-0,312	-300	-	-
447	19	1	-0,137	-0,142	-0,131	-0,202	-0,199	-0,201	0,028		-0,169		-0,146	-0,161	-0,157	-0,146	-0,155	-0,148	0,006		-0,152		-	
		2	-0,159	-0,150	-0,152	-0,169	-0,166	-0,176	0,023	0,025	-0,162	-165	-0,209	-0,212	-0,206	-0,226	-0,215	-0,216	0,032	0,033	-0,214	-183	-	-
448	20	1	-0,090	-0,091	-0,085	-0,152	-0,152	-0,152	0,035		-0,120		-0,128	-0,161	-0,146	-0,149	-0,152	-0,151	0,011		-0,148		-	
		2	-0,138	-0,135	-0,134	-0,134	-0,137	-0,141	0,003	0,020	-0,137	-128	-0,178	-0,188	-0,182	-0,213	-0,202	-0,193	0,013	0,026	-0,193	-170	-	-
449	21	1	-0,090	-0,086	-0,089	-0,136	-0,144	-0,130	0,018		-0,113		-0,092	-0,129	-0,122	-0,143	-0,135	-0,130	0,018		-0,125		-	
		2	-0,112	-0,114	-0,111	-0,120	-0,130	-0,133	0,013	0,020	-0,120	-116	-0,159	-0,169	-0,167	-0,190	-0,181	-0,180	0,022	0,029	-0,174	-150	-	-
450	22	1	-0,137	-0,144	-0,139	-0,148	-0,145	-0,142	0,004		-0,143		-0,110	-0,141	-0,130	-0,148	-0,146	-0,142	0,014		-0,136		-	
		2	-0,111	-0,118	-0,112	-0,120	-0,128	-0,122	0,006	0,014	-0,119	-131	-0,159	-0,167	-0,164	-0,191	-0,185	-0,173	0,012	0,023	-0,173	-155	-	-

**ANEXO A5 DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO**

TRAÇO: :1:5 Com Cloreto  
 Relação água/cimento: 0,59  
 DATA DA MOLDAGEM: 17/12/2010

IDADE DO CP (DIAS)	DIA DE CICLAGEM	CP Nº	LEITURAS (V)																Teor de Umidade							
			FACE 1 (Cobrimento = 1cm)								FACE 2 (Cobrimento = 3cm)								Teor de Umidade/CP	Média						
			PONTO 1	PONTO 2	PONTO 3	PONTO 4	PONTO 5	PONTO 6	Sd	Sd/4 barras	MÉDIA/FACE (mV)	MÉDIA/FACE <sup>2</sup> (mV)	PONTO 1	PONTO 2	PONTO 3	PONTO 4	PONTO 5	PONTO 6			Sd	Sd/4 barras	MÉDIA/FACE (mV)	MÉDIA/FACE <sup>2</sup> (mV)		
56	-	1	-0,426	-0,405	-0,406	-0,410	-0,397	-0,400	0,010			-0,407	-416	-0,471	-0,472	-0,460	-0,465	-0,461	-0,505	0,017			-0,472	-484	1,06%	1,01%
		2	-0,430	-0,428	-0,433	-0,395	-0,423	-0,444	0,017	0,146	-0,426		-0,501	-0,492	-0,476	-0,484	-0,510	-0,512	0,014		0,019		-0,496		0,96%	
62	-	1	-0,376	-0,383	-0,393	-0,630	-0,606	-0,616	0,128			-0,501	-447	-0,565	-0,573	-0,554	-0,453	-0,463	-0,423	0,066			-0,505	-485	1,02%	0,99%
		2	-0,390	-0,394	-0,397	-0,373	-0,389	-0,416	0,014	0,103	-0,393		-0,451	-0,492	-0,443	-0,482	-0,470	-0,456	0,019		0,051		-0,466		0,96%	
63	-	1	-0,362	-0,396	-0,406	-0,404	-0,407	-0,416	0,019			-0,399	-400	-0,586	-0,572	-0,557	-0,466	-0,477	-0,426	0,066			-0,514	-485	1,02%	0,99%
		2	-0,387	-0,392	-0,413	-0,376	-0,418	-0,419	0,018	0,150	-0,401		-0,452	-0,441	-0,437	-0,477	-0,479	-0,453	0,018		0,055		-0,457		0,96%	
69	-	1	-0,388	-0,394	-0,409	-0,400	-0,397	-0,406	0,008			-0,399	-405	-0,532	-0,522	-0,516	-0,453	-0,424	-0,400	0,056			-0,475	-464	1,02%	0,97%
		2	-0,396	-0,405	-0,410	-0,404	-0,426	-0,420	0,011	0,111	-0,410		-0,462	-0,460	-0,472	-0,458	-0,444	-0,426	0,016		0,041		-0,454		0,92%	
70	-	1	-0,348	-0,358	-0,379	-0,390	-0,380	-0,396	0,019			-0,375	-391	-0,535	-0,524	-0,514	-0,424	-0,408	-0,403	0,062			-0,468	-463	1,02%	0,97%
		2	-0,377	-0,400	-0,396	-0,402	-0,418	-0,444	0,023	0,026	-0,406		-0,455	-0,460	-0,462	-0,470	-0,454	-0,452	0,007		0,043		-0,459		0,92%	
77	-	1	-0,216	-0,206	-0,200	-0,132	-0,122	-0,130	0,044			-0,168	-171	-0,167	-0,161	-0,159	-0,202	-0,193	-0,179	0,018			-0,177	-180	0,55%	0,59%
		2	-0,180	-0,192	-0,188	-0,166	-0,157	-0,165	0,014	0,031	-0,175		-0,205	-0,176	-0,168	-0,204	-0,170	-0,181	0,017		0,017		-0,184		0,64%	
91	-	1	-0,212	-0,198	-0,202	-0,163	-0,167	-0,166	0,022			-0,185	-206	-0,170	-0,153	-0,149	-0,151	-0,157	-0,158	0,008			-0,156	-194	0,16%	0,16%
		2	-0,223	-0,192	-0,209	-0,254	-0,241	-0,249	0,024	0,159	-0,228		-0,233	-0,216	-0,235	-0,250	-0,222	-0,236	0,012		0,041		-0,232		0,16%	
98	-	1	-0,266	-0,268	-0,253	-0,170	-0,154	-0,160	0,056			-0,212	-221	-0,160	-0,130	-0,150	-0,161	-0,167	-0,202	0,024			-0,162	-141	0,16%	0,16%
		2	-0,216	-0,173	-0,166	-0,278	-0,257	-0,286	0,052	0,052	-0,229		-0,091	-0,069	-0,095	-0,144	-0,165	-0,157	0,040		0,038		-0,120		0,16%	
423	1	1	-0,602	-0,589	-0,589	-0,598	-0,588	-0,582	0,007			-0,591	-600	-0,585	-0,562	-0,572	-0,588	-0,541	-0,549	0,019			-0,566	-595	-	-
		2	-0,611	-0,607	-0,614	-0,611	-0,605	-0,605	0,004	0,158	-0,609		-0,635	-0,625	-0,628	-0,616	-0,620	-0,619	0,007		0,033		-0,624		-	-
424	2	1	-0,372	-0,388	-0,371	-0,286	-0,302	-0,311	0,044			-0,338	-313	-0,245	-0,260	-0,248	-0,250	-0,268	-0,278	0,013			-0,258	-278	-	-
		2	-0,308	-0,301	-0,296	-0,261	-0,291	-0,270	0,018	0,041	-0,288		-0,284	-0,293	-0,281	-0,294	-0,336	-0,296	0,020		0,026		-0,297		-	-
425	3	1	-0,318	-0,348	-0,319	-0,275	-0,297	-0,295	0,025			-0,309	-284	-0,252	-0,249	-0,259	-0,254	-0,258	-0,269	0,007			-0,257	-290	-	-
		2	-0,215	-0,214	-0,221	-0,279	-0,312	-0,312	0,048	0,157	-0,259		-0,302	-0,330	-0,334	-0,312	-0,356	-0,305	0,021		0,038		-0,323		-	-
426	4	1	-0,321	-0,348	-0,308	-0,261	-0,278	-0,269	0,034			-0,298	-271	-0,215	-0,200	-0,205	-0,232	-0,247	-0,234	0,018			-0,222	-253	-	-
		2	-0,232	-0,231	-0,232	-0,237	-0,261	-0,269	0,017	0,038	-0,244		-0,224	-0,272	-0,310	-0,282	-0,334	-0,280	0,037		0,043		-0,284		-	-
427	5	1	-0,315	-0,340	-0,301	-0,265	-0,275	-0,275	0,029			-0,295	-271	-0,225	-0,228	-0,238	-0,233	-0,255	-0,230	0,011			-0,235	-258	-	-
		2	-0,230	-0,231	-0,233	-0,252	-0,269	-0,264	0,018	0,165	-0,247		-0,233	-0,268	-0,305	-0,274	-0,331	-0,274	0,034		0,034		-0,281		-	-
431	9	1	-0,673	-0,669	-0,677	-0,693	-0,695	-0,693	0,012			-0,683	-701	-0,702	-0,697	-0,705	-0,684	-0,680	-0,703	0,011			-0,695	-731	-	-
		2	-0,716	-0,719	-0,726	-0,717	-0,715	-0,719	0,004	0,020	-0,719		-0,760	-0,764	-0,772	-0,751	-0,780	-0,770	0,010		0,038		-0,766		-	-
432	10	1	-0,628	-0,691	-0,706	-0,409	-0,485	-0,488	0,124			-0,568	-489	-0,417	-0,432	-0,496	-0,406	-0,445	-0,480	0,035			-0,446	-474	-	-
		2	-0,456	-0,453	-0,421	-0,377	-0,393	-0,363	0,039	0,139	-0,411		-0,469	-0,508	-0,476	-0,501	-0,579	-0,480	0,041		0,047		-0,502		-	-
433	11	1	-0,542	-0,591	-0,551	-0,409	-0,454	-0,475	0,069			-0,504	-454	-0,430	-0,448	-0,508	-0,423	-0,459	-0,476	0,031			-0,457	-492	-	-
		2	-0,403	-0,412	-0,395	-0,376	-0,424	-0,413	0,017	0,071	-0,404		-0,484	-0,542	-0,514	-0,514	-0,603	-0,498	0,042		0,050		-0,526		-	-
434	12	1	-0,360	-0,390	-0,374	-0,291	-0,314	-0,330	0,038			-0,343	-303	-0,285	-0,303	-0,342	-0,287	-0,320	-0,329	0,023			-0,311	-332	-	-
		2	-0,275	-0,280	-0,263	-0,243	-0,265	-0,248	0,015	0,135	-0,262		-0,321	-0,358	-0,356	-0,343	-0,404	-0,340	0,028		0,033		-0,354		-	-
437	15	1	-0,584	-0,589	-0,594	-0,586	-0,596	-0,602	0,007			-0,592	-601	-0,604	-0,620	-0,620	-0,517	-0,546	-0,531	0,047			-0,573	-540	-	-
		2	-0,642	-0,633	-0,621	-0,605	-0,600	-0,554	0,031	0,023	-0,609		-0,542	-0,535	-0,480	-0,537	-0,519	-0,431	0,044		0,055		-0,507		-	-
438	16	1	-0,456	-0,474	-0,468	-0,298	-0,316	-0,320	0,085			-0,389	-337	-0,242	-0,235	-0,238	-0,281	-0,280	-0,290	0,025			-0,261	-304	-	-
		2	-0,336	-0,332	-0,309	-0,241	-0,251	-0,243	0,045	0,074	-0,285		-0,325	-0,354	-0,344	-0,338	-0,392	-0,325	0,025		0,051		-0,346		-	-
439	17	1	-0,365	-0,381	-0,351	-0,279	-0,298	-0,300	0,042			-0,329	-282	-0,216	-0,212	-0,208	-0,243	-0,242	-0,239	0,016			-0,227	-281	-	-
		2	-0,263	-0,270	-0,246	-0,217	-0,219	-0,200	0,028	0,059	-0,236		-0,320	-0,352	-0,325	-0,328	-0,383	-0,309	0,027		0,061		-0,336		-	-
440	18	1	-0,350	-0,375	-0,342	-0,284	-0,303	-0,310	0,034			-0,327	-276	-0,183	-0,187	-0,178	-0,186	-0,190	-0,181	0,004			-0,184	-254	-	-
		2	-0,232	-0,245	-0,228	-0,208	-0,221	-0,208	0,014	0,058	-0,224		-0,296	-0,337	-0,322	-0,314	-0,376	-0,299	0,030		0,076		-0,324		-	-
441	19	1	-0,292	-0,310	-0,280	-0,208	-0,200	-0,209	0,049			-0,250	-224	-0,199	-0,195	-0,199	-0,172	-0,160	-0,154	0,020			-0,180	-250	-	-
		2	-0,186	-0,197	-0,175	-0,205	-0,218	-0,208	0,016	0,044	-0,198		-0,304	-0,337	-0,331	-0,298	-0,362	-0,288	0,028		0,077		-0,320		-	-

**ANEXO A6 DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO**

TRAÇO: :1:5 Com Cloreto  
 Relação água/cimento: 0,59  
 DATA DA MOLDAGEM: 10/12/2010

IDADE DO CP (DIAS)	DIA DE CICLAGEM	CP Nº	LEITURAS (V)																		Teor de Umidade	
			FACE 1 (Cobrimeto = 1cm)									FACE 2 (Cobrimeto = 3cm)									Teor de Umidade/CP	Média
			PONTO 1	PONTO 2	PONTO 3	PONTO 4	PONTO 5	PONTO 6	Sd	Sd/4 barras	MÉDIA/FACE (mV)	MÉDIA/FACE <sup>2</sup> (mV)	PONTO 1	PONTO 2	PONTO 3	PONTO 4	PONTO 5	PONTO 6	Sd	Sd/4 barras		
56	-	1	-0,318	-0,317	-0,301	-0,421	-0,421	-0,435	0,063	-0,369	-297	-0,471	-0,472	-0,460	-0,465	-0,461	-0,505	0,017	-0,472	-484	1,28%	1,27%
		2	-0,235	-0,215	-0,222	-0,233	-0,219	-0,224	0,008	-0,225	-297	-0,501	-0,492	-0,476	-0,484	-0,510	-0,512	0,014	-0,496	-484	1,26%	1,27%
62	-	1	-0,244	-0,229	-0,234	-0,506	-0,466	-0,463	0,134	-0,357	-294	-0,565	-0,573	-0,554	-0,453	-0,463	-0,423	0,066	-0,505	-485	1,28%	1,27%
		2	-0,233	-0,209	-0,244	-0,224	-0,245	-0,231	0,013	-0,231	-294	-0,451	-0,492	-0,443	-0,482	-0,470	-0,456	0,019	-0,466	-485	1,26%	1,27%
63	-	1	-0,278	-0,240	-0,251	-0,390	-0,356	-0,370	0,065	-0,314	-273	-0,586	-0,572	-0,557	-0,466	-0,477	-0,426	0,066	-0,514	-485	1,28%	1,27%
		2	-0,252	-0,223	-0,241	-0,218	-0,226	-0,230	0,013	-0,232	-273	-0,452	-0,441	-0,437	-0,477	-0,479	-0,453	0,018	-0,457	-485	1,26%	1,27%
69	-	1	-0,212	-0,200	-0,201	-0,280	-0,279	-0,291	0,044	-0,244	-231	-0,532	-0,522	-0,516	-0,453	-0,424	-0,400	0,056	-0,475	-464	1,28%	1,27%
		2	-0,244	-0,230	-0,240	-0,198	-0,200	-0,197	0,022	-0,218	-231	-0,462	-0,460	-0,472	-0,458	-0,444	-0,426	0,016	-0,454	-464	1,26%	1,27%
70	-	1	-0,246	-0,247	-0,241	-0,274	-0,275	-0,278	0,017	-0,260	-239	-0,535	-0,524	-0,514	-0,424	-0,408	-0,403	0,062	-0,468	-463	1,28%	1,27%
		2	-0,240	-0,226	-0,243	-0,191	-0,196	-0,210	0,022	-0,218	-239	-0,455	-0,460	-0,462	-0,470	-0,454	-0,452	0,007	-0,459	-463	1,26%	1,27%
77	-	1	-0,163	-0,160	-0,166	-0,127	-0,102	-0,116	0,028	-0,139	-93	-0,167	-0,161	-0,159	-0,202	-0,193	-0,179	0,018	-0,177	-180	0,92%	0,91%
		2	-0,094	-0,038	-0,012	-0,097	-0,020	-0,015	0,039	-0,046	-93	-0,205	-0,176	-0,168	-0,204	-0,170	-0,181	0,017	-0,184	-180	0,90%	0,91%
91	-	1	-0,069	-0,080	-0,098	-0,051	-0,047	-0,068	0,019	-0,069	-66	-0,170	-0,153	-0,149	-0,151	-0,157	-0,158	0,008	-0,156	-194	0,36%	0,36%
		2	-0,072	-0,022	-0,011	-0,143	-0,071	-0,063	0,047	-0,064	-66	-0,233	-0,216	-0,235	-0,250	-0,222	-0,236	0,012	-0,232	-194	0,35%	0,36%
98	-	1	-0,070	-0,096	-0,092	-0,040	-0,052	-0,080	0,022	-0,072	-53	-0,160	-0,130	-0,150	-0,161	-0,167	-0,202	0,024	-0,162	-141	0,24%	0,22%
		2	-0,074	-0,026	-0,009	-0,077	-0,011	-0,012	0,032	-0,035	-53	-0,091	-0,069	-0,095	-0,144	-0,165	-0,157	0,040	-0,120	-141	0,20%	0,22%
430	1	1	-0,548	-0,535	-0,547	-0,576	-0,567	-0,572	0,016	-0,558	-552	-0,596	-0,591	-0,588	-0,566	-0,561	-0,553	0,018	-0,576	-591	-	-
		2	-0,517	-0,520	-0,590	-0,517	-0,536	-0,596	0,037	-0,546	-552	-0,585	-0,579	-0,587	-0,630	-0,629	-0,630	0,025	-0,607	-591	-	-
431	2	1	-0,197	-0,177	-0,184	-0,217	-0,207	-0,215	0,016	-0,200	-240	-0,263	-0,263	-0,254	-0,247	-0,247	-0,252	0,007	-0,254	-246	-	-
		2	-0,223	-0,227	-0,223	-0,323	-0,339	-0,350	0,063	-0,281	-240	-0,248	-0,234	-0,238	-0,234	-0,236	-0,233	0,006	-0,237	-246	-	-
432	3	1	-0,207	-0,189	-0,196	-0,181	-0,178	-0,840	0,265	-0,299	-256	-0,222	-0,211	-0,217	-0,213	-0,219	-0,210	0,005	-0,215	-198	-	-
		2	-0,128	-0,121	-0,134	-0,288	-0,297	-0,308	0,093	-0,213	-256	-0,186	-0,189	-0,184	-0,171	-0,182	-0,176	0,007	-0,181	-198	-	-
433	4	1	-0,237	-0,224	-0,217	-0,204	-0,199	-0,204	0,015	-0,214	-220	-0,245	-0,245	-0,229	-0,256	-0,260	-0,261	0,012	-0,249	-223	-	-
		2	-0,183	-0,180	-0,186	-0,261	-0,260	-0,285	0,048	-0,226	-220	-0,203	-0,204	-0,197	-0,183	-0,193	-0,200	0,008	-0,197	-223	-	-
434	5	1	-0,218	-0,207	-0,190	-0,228	-0,223	-0,221	0,014	-0,215	-227	-0,250	-0,252	-0,245	-0,259	-0,250	-0,239	0,007	-0,249	-219	-	-
		2	-0,155	-0,156	-0,167	-0,308	-0,308	-0,346	0,090	-0,240	-227	-0,200	-0,192	-0,180	-0,173	-0,212	-0,171	0,016	-0,188	-219	-	-
437	8	1	-0,616	-0,599	-0,598	-0,614	-0,620	-0,633	0,013	-0,613	-643	-0,677	-0,680	-0,672	-0,628	-0,628	-0,630	0,026	-0,653	-671	-	-
		2	-0,667	-0,672	-0,672	-0,664	-0,677	-0,682	0,007	-0,672	-643	-0,670	-0,677	-0,683	-0,698	-0,708	-0,705	0,016	-0,690	-671	-	-
438	9	1	-0,345	-0,330	-0,316	-0,363	-0,344	-0,347	0,016	-0,341	-330	-0,253	-0,280	-0,256	-0,280	-0,288	-0,262	0,015	-0,270	-249	-	-
		2	-0,288	-0,293	-0,287	-0,348	-0,358	-0,345	0,034	-0,320	-330	-0,222	-0,180	-0,220	-0,246	-0,261	-0,243	0,028	-0,229	-249	-	-
439	10	1	-0,301	-0,285	-0,275	-0,288	-0,274	-0,273	0,011	-0,283	-288	-0,288	-0,280	-0,240	-0,259	-0,253	-0,256	0,018	-0,263	-244	-	-
		2	-0,254	-0,260	-0,253	-0,322	-0,336	-0,331	0,041	-0,293	-288	-0,234	-0,220	-0,190	-0,218	-0,243	-0,242	0,020	-0,225	-244	-	-
440	11	1	-0,269	-0,266	-0,263	-0,257	-0,243	-0,254	0,009	-0,259	-275	-0,292	-0,289	-0,290	-0,291	-0,300	-0,308	0,007	-0,295	-276	-	-
		2	-0,240	-0,236	-0,239	-0,338	-0,343	-0,353	0,058	-0,292	-275	-0,254	-0,268	-0,219	-0,258	-0,267	-0,270	0,019	-0,256	-276	-	-
441	12	1	-0,203	-0,204	-0,202	-0,247	-0,231	-0,230	0,019	-0,220	-215	-0,222	-0,228	-0,226	-0,224	-0,227	-0,219	0,003	-0,224	-206	-	-
		2	-0,193	-0,191	-0,182	-0,243	-0,233	-0,225	0,026	-0,211	-215	-0,186	-0,185	-0,170	-0,186	-0,196	-0,204	0,011	-0,188	-206	-	-
444	15	1	-0,365	-0,326	-0,330	-0,405	-0,365	-0,370	0,029	-0,360	-321	-0,375	-0,348	-0,340	-0,346	-0,317	-0,308	0,024	-0,339	-314	-	-
		2	-0,258	-0,258	-0,262	-0,297	-0,308	-0,309	0,025	-0,282	-321	-0,277	-0,273	-0,276	-0,302	-0,303	-0,307	0,016	-0,290	-314	-	-
445	16	1	-0,272	-0,262	-0,264	-0,268	-0,251	-0,251	0,009	-0,261	-248	-0,247	-0,250	-0,242	-0,230	-0,230	-0,223	0,011	-0,237	-223	-	-
		2	-0,238	-0,231	-0,225	-0,241	-0,234	-0,234	0,006	-0,234	-248	-0,209	-0,218	-0,184	-0,206	-0,218	-0,213	0,013	-0,208	-223	-	-
446	17	1	-0,239	-0,226	-0,233	-0,210	-0,201	-0,202	0,016	-0,219	-158	-0,205	-0,200	-0,196	-0,171	-0,179	-0,191	0,013	-0,190	-158	-	-
		2	-0,154	-0,160	-0,153	-0,172	-0,172	-0,167	0,009	-0,163	-158	-0,130	-0,112	-0,121	-0,126	-0,138	-0,122	0,009	-0,125	-158	-	-
447	18	1	-0,175	-0,182	-0,181	-0,178	-0,178	-0,181	0,003	-0,179	-141	-0,148	-0,175	-0,168	-0,139	-0,163	-0,175	0,015	-0,161	-141	-	-
		2	-0,154	-0,150	-0,148	-0,180	-0,182	-0,180	0,017	-0,166	-141	-0,119	-0,116	-0,094	-0,112	-0,146	-0,131	0,018	-0,120	-141	-	-
448	19	1	-0,178	-0,176	-0,178	-0,202	-0,197	-0,191	0,011	-0,187	-133	-0,135	-0,165	-0,156	-0,125	-0,156	-0,156	0,015	-0,149	-133	-	-
		2	-0,149	-0,143	-0,143	-0,169	-0,175	-0,156	0,014	-0,156	-133	-0,126	-0,118	-0,114	-0,113	-0,113	-0,116	0,005	-0,117	-133	-	-

## ANEXO B.1

## DADOS PARA DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO PELO MÉTODO DO CACHIMBO

TRAÇO	CP	Absorção de água (ml) em função do tempo (min)															Taxa de Absorção (ml/min)	Taxa Média de Absorção (ml/min)	
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			15
1:3 Sem Cloretos	1	0,00	0,00	0,05	0,10	0,14	0,20	0,26	0,30	0,32	0,40	0,42	0,44	0,45	0,51	0,53	0,60	-	0,03
		0,00	0,00	0,05	0,05	0,04			0,04	0,02		0,02	0,02			0,02		0,04	
	2	0,00	0,05	0,08	0,10	0,12	0,15	0,18	0,20	0,22	0,24	0,28	0,28	0,30	0,31	0,32	0,35	-	
		0,00	0,05	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,04	0,00	0,02	0,01	0,01	0,03	0,02	
1:4 Sem Cloretos	1	0,00	0,06	0,10	0,11	0,11	0,14	0,15	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,26	0,28	0,29	-	0,02
				0,04	0,01		0,03	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04	0,02	0,01	0,02	
	2	0,00	0,00	0,04	0,09	0,11	0,14	0,18	0,20	0,21	0,22	0,29	0,32	0,34	0,34	0,38	0,40	-	
				0,04		0,02	0,03	0,04	0,02	0,01	0,01		0,03	0,02	0,00	0,04	0,02	0,03	
1:5 Sem Cloretos	1	0,00	0,03	0,05	0,07	0,08	0,08	0,09	0,10	0,11	0,11	0,12	0,14	0,15	0,15	0,17	0,17	-	0,03
		0,00	0,03	0,02	0,02	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,02	0,01	0,00	0,02	0,00	0,01	
	2	0,00	0,09	0,11	0,19	0,21	0,30	0,31	0,37	0,40	0,42	0,49	0,50	0,52	0,59	0,60	0,64	-	
		0,00		0,02		0,02		0,01		0,03	0,02		0,01	0,02		0,01	0,04	0,04	
1:3 Com Cloretos	1	0,00	0,10	0,15	0,21	0,27	0,31	0,35	0,40	0,42	0,49	0,50	0,51	0,54	0,58	0,62	0,65	-	0,05
		0,00		0,05	0,06	0,06	0,04	0,04	0,05	0,02	0,07	0,01	0,01	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	
	2	0,00	0,12	0,19	0,26	0,32	0,40	0,48	0,53	0,55	0,57	0,60	0,63	0,65	0,67	0,71	0,74	-	
		0,00		0,07	0,07	0,06			0,05	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,04	0,03	0,05	
1:4 Com Cloretos	1	0,00	0,03	0,10	0,12	0,19	0,21	0,24	0,28	0,30	0,34	0,37	0,40	0,40	0,42	0,44	0,48	-	0,04
			0,03		0,02		0,02	0,03	0,04	0,02	0,04	0,03	0,03	0,00	0,02	0,02	0,04	0,03	
	2	0,00	0,11	0,18	0,22	0,30	0,34	0,38	0,41	0,44	0,50	0,52	0,56	0,58	0,61	0,63	0,68	-	
		0,00			0,04		0,04	0,04	0,03	0,03	0,06	0,02	0,04	0,02	0,03	0,02	0,05	0,05	
1:5 Com Cloretos	1	0,00	0,15	0,27	0,34	0,43	0,51	0,57	0,64	0,68	0,72	0,76	0,83	0,88	0,92	0,98	1,20	-	0,08
				0,12	0,07	0,09	0,08	0,06	0,07	0,04	0,04	0,04	0,07	0,05	0,04	0,06		0,08	
	2	0,00	0,14	0,26	0,34	0,41	0,50	0,53	0,61	0,67	0,72	0,78	0,83	0,88	0,90	0,98	1,10	-	
				0,12	0,08	0,07	0,09	0,03	0,08	0,06	0,05	0,06	0,05	0,05		0,08	0,12	0,07	

## ANEXO B.2

## DADOS PARA DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO POR IMERSÃO

TRAÇO	RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO	MASSA ÚMIDA (Kg)	MASSA SECA (Kg)	MASSA SSS 2 (Kg)	ABSORÇÃO POR IMERSÃO 1	ABSORÇÃO POR IMERSÃO 2	PESO SUBMERSO (Kg)
1:3 Sem Cloretos	0,43	25,04	24,87	25,453	2,091 %	2,344 %	15,158
1:3 Sem Cloretos	0,43	24,67	24,36	25,119	2,956 %	3,116 %	14,867
1:4 Sem Cloretos	0,50	24,97	24,69	25,428	2,673 %	2,989 %	15,137
1:4 Sem Cloretos	0,50	24,78	24,58	25,424	3,295 %	3,434 %	15,129
1:5 Sem Cloretos	0,59	25,57	24,95	25,764	3,046 %	3,263 %	15,262
1:5 Sem Cloretos	0,59	25,18	24,40	25,246	3,238 %	3,467 %	14,972
1:3 Com Cloretos	0,43	25,32	25,00	25,729	2,600 %	2,916 %	15,377
1:3 Com Cloretos	0,43	24,42	24,15	24,901	2,981 %	3,110 %	14,738
1:4 Com Cloretos	0,50	25,08	24,88	25,562	2,412 %	2,741 %	15,163
1:4 Com Cloretos	0,50	25,32	25,13	25,978	3,223 %	3,374 %	15,433
1:5 Com Cloretos	0,59	24,66	24,32	25,218	3,495 %	3,692 %	14,953
1:5 Com Cloretos	0,59	25,09	24,91	25,783	3,171 %	3,505 %	15,26

## ANEXO B.3

## DADOS PARA DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

DADOS PARA CÁLCULO DA ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE																
Área da seção transversal (cm <sup>2</sup> ) CP 45x15 cm	675	675	675	675	675	675	675	675	675	675	675	675	675	Absorção (72h)	Absorção Média	Sd
Tempo (hh:mm)	0 min	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min	3h	6h	24h	48h	72h				
Tempo <sup>0,5</sup>	0,00	0,41	0,58	0,71	0,82	0,91	1,00	1,73	2,45	4,90	6,93	8,49				
Hora do ensaio (hh:mm)	12:15	12:25	12:35	12:45	12:55	13:05	13:15	15:15	18:15	12:15	12:15	12:15				
Massa (kg)	CP I - 1:3 Sem Cloretos	24,13	24,16	24,17	24,18	24,19	24,20	24,20	24,25	24,29	24,40	24,46	24,51	1,57%	1,72%	0,21%
	CP II - 1:3 Sem Cloretos	24,09	24,15	24,18	24,20	24,22	24,23	24,25	24,32	24,36	24,45	24,50	24,54	1,87%		
	CP I - 1:4 Sem Cloretos	24,40	24,45	24,47	24,48	24,49	24,51	24,51	24,59	24,65	24,82	24,92	24,98	2,38%	1,74%	0,90%
	CP II - 1:4 Sem Cloretos	25,25	25,27	25,28	25,29	25,30	25,30	25,31	25,35	25,37	25,44	25,48	25,53	1,11%		
	CP I - 1:5 Sem Cloretos	24,50	24,54	24,56	24,57	24,58	24,59	24,61	24,67	24,71	24,80	24,82	24,88	1,55%	1,82%	0,38%
	CP II - 1:5 Sem Cloretos	24,82	24,88	24,90	24,92	24,93	24,94	24,96	25,04	25,10	25,22	25,30	25,34	2,10%		
	CP I - 1:3 Com Cloretos	24,95	24,97	24,98	24,99	24,99	25,00	25,00	25,03	25,05	25,09	25,11	25,12	0,68%	0,80%	0,17%
	CP II - 1:3 Com Cloretos	25,04	25,06	25,07	25,08	25,08	25,09	25,09	25,13	25,16	25,22	25,25	25,27	0,92%		
	CP I - 1:4 Com Cloretos	24,65	24,66	24,67	24,67	24,67	24,68	24,68	24,72	24,75	24,82	24,86	24,88	0,93%	0,79%	0,21%
	CP II - 1:4 Com Cloretos	24,88	24,89	24,90	24,91	24,91	24,91	24,92	24,95	24,96	25,00	25,02	25,04	0,64%		
	CP I - 1:5 Com Cloretos	24,93	24,99	25,02	25,02	25,04	25,04	25,05	25,11	25,15	25,23	25,28	25,32	1,56%	1,46%	0,15%
	CP II - 1:5 Com Cloretos	24,49	24,54	24,56	24,56	24,58	24,58	24,58	24,62	24,65	24,72	24,78	24,82	1,35%		

ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE (g/cm <sup>2</sup> )	Tempo (hh:mm)	0 min	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min	3h	6h	24h	48h	72h
	CP I - 1:3 Sem Cloretos	-	0,04	0,06	0,07	0,09	0,10	0,10	0,18	0,24	0,40	0,49	0,56
	CP II - 1:3 Sem Cloretos	-	0,09	0,13	0,16	0,19	0,21	0,24	0,34	0,40	0,53	0,61	0,67
	CP I - 1:4 Sem Cloretos	-	0,07	0,10	0,12	0,13	0,16	0,16	0,28	0,37	0,62	0,77	0,86
	CP II - 1:4 Sem Cloretos	-	0,03	0,04	0,06	0,07	0,07	0,09	0,15	0,18	0,28	0,34	0,41
	CP I - 1:5 Sem Cloretos	-	0,06	0,09	0,10	0,12	0,13	0,16	0,25	0,31	0,44	0,47	0,56
	CP II - 1:5 Sem Cloretos	-	0,09	0,12	0,15	0,16	0,18	0,21	0,33	0,41	0,59	0,71	0,77
	CP I - 1:3 Com Cloretos	-	0,03	0,04	0,06	0,06	0,07	0,07	0,12	0,15	0,21	0,24	0,25
	CP II - 1:3 Com Cloretos	-	0,03	0,04	0,06	0,06	0,07	0,07	0,13	0,18	0,27	0,31	0,34
	CP I - 1:4 Com Cloretos	-	0,01	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,10	0,15	0,25	0,31	0,34
	CP II - 1:4 Com Cloretos	-	0,01	0,03	0,04	0,04	0,04	0,06	0,10	0,12	0,18	0,21	0,24
	CP I - 1:5 Com Cloretos	-	0,09	0,13	0,13	0,16	0,16	0,18	0,27	0,33	0,44	0,52	0,58
	CP II - 1:5 Com Cloretos	-	0,07	0,10	0,10	0,13	0,13	0,13	0,19	0,24	0,34	0,43	0,49

**ANEXO C.1 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR  
COMPRESSÃO DIAMETRAL E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES**

<b>Resistência a Tração por Compressão Diametral (MPa)</b>				<b>Resistência à Compressão Simples (MPa)</b>			
<b>Traço</b>	<b>1:3</b>	<b>1:4</b>	<b>1:5</b>	<b>Traço</b>	<b>1:3</b>	<b>1:4</b>	<b>1:5</b>
CP1	3,75	3,40	3,45	CP1	50,10	44,10	27,80
CP2	4,35	3,55	3,25	CP2	50,30	40,90	34,60
CP3	3,75	3,95	2,35	CP3	47,80	41,20	30,20
CP4	3,75	3,55	3,25	CP4	45,10	41,20	30,30
CP5	4,00	3,85	3,35	CP5	51,40	40,20	28,40
CP6	3,55	3,80	3,30	CP6	51,60	41,90	31,80
<b>Média</b>	<b>3,86</b>	<b>3,68</b>	<b>3,16</b>	<b>Média</b>	<b>49,38</b>	<b>41,58</b>	<b>30,52</b>
<b>Coef. Variação</b>	<b>0,08</b>	<b>0,05</b>	<b>0,16</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>6,24</b>	<b>1,82</b>	<b>6,07</b>
<b>Sd</b>	<b>0,28</b>	<b>0,21</b>	<b>0,40</b>	<b>Sd</b>	<b>2,50</b>	<b>1,35</b>	<b>2,46</b>
<b>Média + Sd</b>	<b>4,14</b>	<b>3,90</b>	<b>3,56</b>	<b>Média + Sd</b>	<b>51,88</b>	<b>42,93</b>	<b>32,98</b>
<b>Média - Sd</b>	<b>3,58</b>	<b>3,47</b>	<b>2,76</b>	<b>Média - Sd</b>	<b>46,89</b>	<b>40,23</b>	<b>28,05</b>

## ANEXO D.1 DESENVOLVIMENTO DE TRAÇO

Dimensões dos corpos de prova (cm)									
Cilíndricos				Prismáticos					
Qtde	Diametro	Altura	Volume	Qtde	L1	L2	L3	Volume	
2	10	20	3141,59	1	45	15	15	10125	
6	15	30	31808,63	6	15	15	15	20250	
				2	45	45	20	81000	

Massa específica dos materiais			
cimento	areia	brita	a/c
2,98	2,63	2,65	0,60

Quantidade acrescida devido a possíveis perdas (%)	Volume de concreto	
	m³	litros
25	0,18	182,91

Qtde de brita inicial (kg)	217,39
Slump	100 ± 20
m	5

$$\alpha = \frac{(1 + a)}{(1 + m)}$$

$$m = a + p$$

$\alpha$	44	46	48	50	52	54	56	58	60
a	1,64	1,76	1,88	2,00	2,12	2,24	2,36	2,48	2,60
p	3,36	3,24	3,12	3,00	2,88	2,76	2,64	2,52	2,40
Qtde de Brita (kg)	217,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Qtde de areia (kg)	106,11	11,98	12,90	13,94	15,10	16,41	17,90	19,61	21,57
Qtde de Cimento (kg)	64,70	2,40	2,58	2,79	3,02	3,28	3,58	3,92	4,31

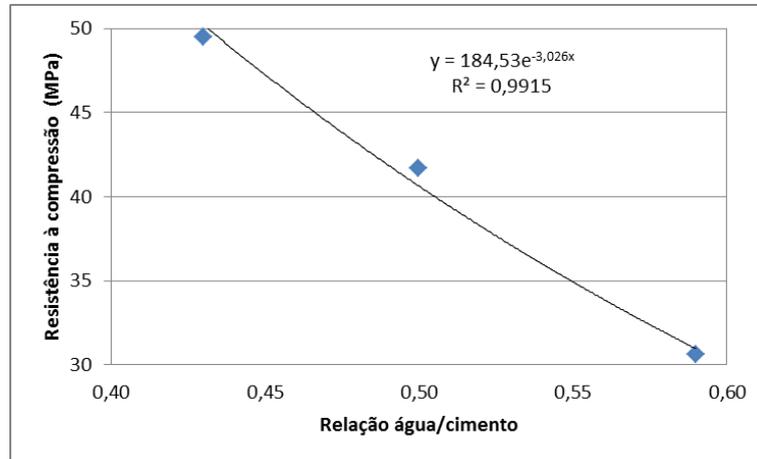
	Qtde	m = 4
água	26,83	0,50
areia	86,06	1,60
cimento	53,79	1,00
brita	129,10	2,40

	Qtde	m = 3
	29,9	0,43
	75,0924	1,08
	69,53	1,00
	133,4976	1,92

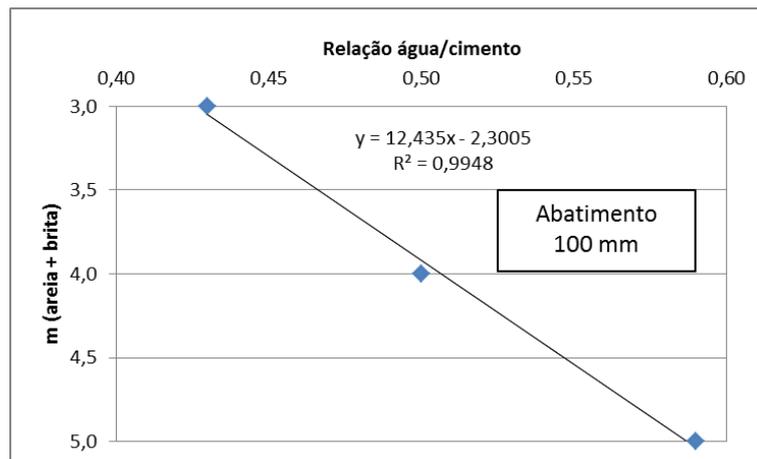
	Qtde	m = 5
	29,3	0,59
	106	2,12
	50	1,00
	144	2,80

Resultado final					
m	traço (cimento: areia: brita: a/c)				Slump
3	1	1,08	1,92	0,43	105
4	1	1,60	2,40	0,50	90
5	1	2,12	2,88	0,59	95

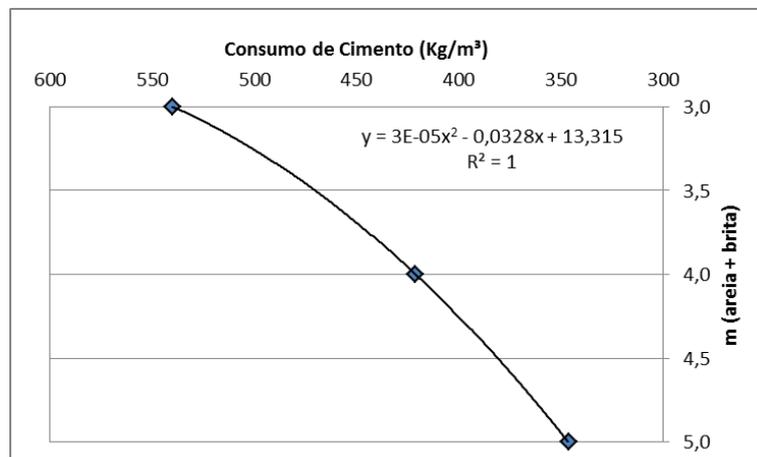
## ANEXO D.2 GRÁFICOS DE DOSAGEM



CORRELAÇÃO ENTRE A RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO



CORRELAÇÃO ENTRE A RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO E A PROPORÇÃO DE AREIA+BRITA



CORRELAÇÃO ENTRE CONSUMO DE CIMENTO PROPORÇÃO DE AREIA+BRITA

