

MARCELO BATISTA LIMA

**AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE PROTEÇÃO
CONTRA A CORROSÃO DA ARMADURA INDUZIDA
POR CLORETOS DE CONCRETOS COM ADIÇÕES
MINERAIS E INIBIDORES DE CORROSÃO**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás para obtenção do título de mestre.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientador: Oswaldo Cascudo, Dr.

Co-orientadora: Nicole Pagan Hasparyk, Dra.

D0003C09

GOIÂNIA

2009

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(GPT/BC/UFG)

Lima, Marcelo Batista.

B333a Avaliação da capacidade de proteção contra a corrosão da arma-dura induzida por cloretos de concretos com adições minerais e inibidores de corrosão [manuscrito] Marcelo Batista Lima. – 2009.

221 f. : il., figs., tabs., color.

Orientador: Prof. Dr. Osvaldo Cascudo; Co-Orientadora:

Profa.

Dra. Nicole Pagan Hasparyk.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil.

Escola

de Engenharia Civil, 2009.

Bibliografia: f. 179-190.

Inclui lista de figuras, tabelas, abreviações, siglas e de nomenclatura da química do cimento.

Apêndices e anexos.

1. Concreto – Corrosão 2. Adições minerais 3. Inibidores de corrosão 4. Corrosão da armadura I. Cascudo, Osvaldo. II. Hasparyk, Nicole Pagan. III. Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil. IV. Título.

CDU:

693.542.5



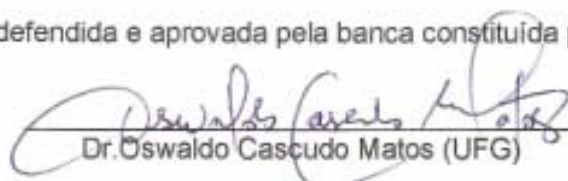
Universidade Federal de Goiás
Escola de Engenharia Civil
Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil

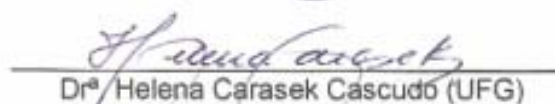
FOLHA DE APROVAÇÃO

**“Avaliação da capacidade de proteção contra a corrosão
da armadura induzida por cloretos de concretos com
adições minerais e inibidores de corrosão”**

Marcelo Batista Lima

Dissertação defendida e aprovada pela banca constituída pelos senhores:


Dr. Oswaldo Cascudo Matos (UFG)


Dr.ª Helena Carasek Cascudo (UFG)


Dr. Gibson Rocha Meira (UIFPB)

Goiânia, 28 Setembro 2009

Dedico este trabalho às pessoas que mais amo e preciso em minha vida:

Meus pais, Maia Lima e Neusa Maria, que junto aos meus “pais do céu” e meu competentíssimo anjo da guarda, sempre me proporcionaram tudo o que se é necessário para que eu pudesse viver até aqui, uma vida simplesmente maravilhosa.

Minha vó Maria Ercília, sempre torcendo e orando por mim aqui na terra junto com meu vô Ari lá no céu.

Marina Vaz Monteiro, pelo carinho, amor, compreensão, infinitos bons momentos desde a 5ª série do colégio, companheirismo incondicional; pessoa sem a qual eu não teria conseguido realizar esse trabalho, me ajudando em tudo o que lhe pedia e não pedia, desde o início até o fim do mesmo; Ich liebe dich!

AGRADECIMENTOS

Inicialmente às principais pessoas responsáveis por eu querer ter feito o mestrado e que de diferentes formas, me ajudaram a entrar no mestrado: Ricardo Barbosa Ferreira (Ricardo), Alexandre de Castro Pereira (Alexandre), Maria de Jesus Gomides (Ziza) e Renato Resende Angelim.

Ao professor Oswaldo Cascudo, pelo convite para fazer o mestrado, pela confiança em me ter como seu orientando e pela inquestionável orientação neste trabalho. Apesar de suas inúmeras atividades, nunca, em momento algum quando lhe procurei, deixou de me atender e de me ajudar, sempre com muita paciência, respeito, compreensão e vontade em ensinar.

À Nicole Hasparyk, que não pode participar da defesa pela necessidade de repouso em função do seu nono mês de gravidez, pela confiança passada ao longo de todo trabalho, principalmente nos momentos de maior necessidade (qualificação, finalização do trabalho e defesa) e pela enorme ajuda despendida na difícil fase de finalização do trabalho.

Às pessoas que, junto aos orientadores, ajudaram a construir e dar forma a este trabalho: Alexandre, Ricardo, prof^a. Helena Carasek, Cecília de Castro Bolina (Cecília) e Ziza. MUITÍSSIMO obrigado pelas dúvidas retiradas, pelas sugestões, opiniões, tempo despendido em me ajudar e principalmente, a amizade. Nesse sentido de ajudar a dar forma a este trabalho, não posso deixar de agradecer também os dois consultores do projeto no qual essa dissertação está inserida: professores Elton Bauer e Jean Pierre Olivier.

Às pessoas sem as quais teria sido impossível realizar o programa experimental proposto: Cecília, Danilo Gonçalves Batista e Luciano Bernardes dos Santos. Além destes, os inúmeros funcionários de Furnas que me ajudaram diretamente e indiretamente na pesquisa (ex: Jésus, Sabão, Tizo, Moacir, Maurice, Gambale, André, Cícero, Queltson, Aloísio, Luiz, Rosângela, Josean, ...), e dos quais não menciono mais nomes por ser uma missão impossível citar todos eles.

À todos colegas de mestrado, companheiros de batalha, em especial aos que compartilharam as dificuldades do mestrado diariamente, Wilson Ferreira Cândido e Marcus Vinicius de A. S. Mendes, companheiros deste o início da graduação e estágio em FURNAS, respectivamente. Neste grupo, não posso deixar de mencionar nossa amiga e secretária do mestrado, Cida.

A todos os amigos de faculdade, de infância e principalmente, à minha família. Neste último grupo, agradeço de forma especial ao meu irmão Fábio, que iluminou nossas vidas com o nosso querido Mateus.

Às instituições e empresas que tornaram possível a realização deste trabalho: UFG (pelo mestrado), FURNAS (pela estrutura do DCT.C disposta para realização de todo o programa experimental da pesquisa e financiamento da pesquisa), ANEEL (pelo financiamento da pesquisa junto a FURNAS), CAPES (pelo suporte financeiro da bolsa), UEG (pela graduação e aulas como professor, imprescindíveis para ampliação dos meus conhecimentos e provisão do suporte financeiro após o término da bolsa CAPES), SIKA (sempre solícita na doação dos aditivos superplastificantes), FUNAPE e demais empresas que tornaram possível a realização do trabalho.

À todas as pessoas que não cheguei a mencionar o nome, mas que sabem que me ajudaram de alguma forma durante o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

O aumento da durabilidade é um aspecto primordial para os elementos estruturais de concreto, em especial aqueles constituintes das estruturas de geração de energia em parques eólicos, sujeitos ao fenômeno de corrosão das armaduras. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo geral avaliar a capacidade de proteção de diferentes concretos frente ao fenômeno da corrosão da armadura induzida por cloretos. Para tanto, foi adotado um planejamento estatístico baseado em um modelo fatorial fracionado em que as variáveis estudadas foram: a relação água/aglomerante (0,35; 0,45 e 0,55), o tipo de adição mineral (sílica ativa e escória de alto-forno, em teores específicos), o tipo de inibidor de corrosão (nitrito de cálcio, nitrito de sódio e amina) e o teor de inibidor de corrosão (mínimo e máximo recomendado por cada fabricante). Na avaliação dos concretos, foram realizados ensaios de potencial de corrosão, resistência de polarização e impedância eletroquímica. Ao longo de todo experimento foi possível constatar o efeito benéfico da redução da relação a/agl. Também foi possível verificar o efeito extremamente positivo da incorporação das adições minerais, em especial da sílica ativa. Constatou-se também o efeito positivo dos diversos inibidores avaliados, em seus teores mínimo e máximo, benefício que se mostrou mais pronunciado quando da utilização conjunta com as adições minerais. Um estudo paralelo foi realizado para se fazer uma análise comparativa dos inibidores dentro da mesma faixa de teores empregados (teores de 0,76%; 2,21% e 3,66% de sólidos do aditivo em relação à massa de cimento), no qual se verificou que a utilização desses teores fixos para os diferentes tipos de inibidores não se mostrou tão eficiente quanto em relação à utilização dos aditivos na dosagem de recomendação do fabricante. Quanto a estes teores (recomendados pelos fabricantes), verificou-se que os percentuais mais altos não funcionaram bem para o nitrito de sódio, ao passo que para a amina e para o nitrito de cálcio os teores mais elevados resultaram em melhores resultados. Em relação ao tanino, inibidor que também foi avaliado no estudo paralelo referido anteriormente (específico sobre os inibidores), só houve algum resultado de inibição de corrosão para o teor de 0,76% (mais baixo dos teores), tendo-se obtido resultados anômalos para os outros 2 teores mais altos. Tais resultados permitiram constatar que cada tipo de inibidor de corrosão possui sua concentração ótima de utilização no concreto. Fazendo-se uma análise de custo e avaliando-se o acréscimo em Reais no valor do m³ do concreto proporcionado pelos diversos aditivos inibidores e nos teores de mesma faixa de emprego, verificou-se uma relativa paridade de preços entre os nitritos e um elevadíssimo custo da amina. No entanto, ao se realizar a mesma análise, mas utilizando os teores recomendados pelos fabricantes de cada inibidor, verificou-se que a grande disparidade de preços entre os nitritos e a amina foi reduzida de forma considerável. Uma avaliação da viabilidade técnico-econômica dos concretos também foi realizada, a partir dos dados de eficiência de inibição à corrosão e custo/m³ das misturas que não apresentaram comportamento típico de despassivação de suas armaduras até a idade de ataque considerada.

Palavras-chave: Concreto. Adições minerais. Sílica ativa. Escória de alto-forno. Inibidores de corrosão. Corrosão da armadura. Técnicas eletroquímicas.

ABSTRACT

Increasing the durability of concrete structural elements is primordial, especially those related to power generation in eolic areas that are subjected to the phenomenon of reinforcement corrosion. In this context, this study aims to evaluate the overall protection ability of concrete to the phenomenon of reinforcement corrosion induced by chlorides. To this end, it was adopted a statistical program based on a fractional factorial design in which the variables studied were as follows: the water-binder ratio (0.35, 0.45 and 0.55), the type of mineral admixture (silica fume and blast furnace slag at specific levels), the type of corrosion inhibitor (calcium nitrite, sodium nitrite and amine) and the level of corrosion inhibitor (minimum and maximum recommended by each manufacturer). In the concrete investigations, the tests performed were corrosion potential, polarization resistance and electrochemical impedance. Throughout the experiments, it was possible to testify the beneficial effect of reducing the water-binder ratio. It was also possible to prove the very positive effect of the incorporation of mineral admixtures, especially of silica fume. The satisfactory performance of various inhibitors evaluated was also verified, specially when concrete contains mineral admixtures. A parallel study was conducted to make a comparative analysis of inhibitors at the same range of concentrations (at solid levels of 0.76%, 2.21% and 3.66% of the compound on the cement mass), nevertheless this study have demonstrated that fixing contents for all inhibitor is not appropriated, and the recommended dosages by the manufacturer is the best condition. As the levels recommended by manufacturers, it was found that the higher percentages have not worked well for sodium nitrite otherwise, for amine and nitrite calcium, the higher levels implied better results. Regarding the tannin inhibitor also assessed in the parallel study mentioned above (related to specific inhibitors), its good performance related to corrosion inhibition happened just for the content of 0.76% (the lowest levels). For the other contents, it was verified anomalous results. These results demonstrated that each type of corrosion inhibitor has its optimal concentration for use in concrete. Based on a cost-benefit analysis and evaluating the increase in the concrete value for cubic meter (in R\$) in the presence of inhibitors at the same contents, it was verified a relative parity prices among the tested nitrites and an extremely high cost of amine. However, when performing the same analysis but using the levels recommended by the manufacturers for each inhibitor independent, it was found that the large disparity in prices between nitrite and amine was reduced considerably. An assessment of technical and economic feasibility was also performed based on the efficiency of corrosion inhibition and cost per cubic meter of concrete mixtures that did not show a typical depassivation of their stell bar up to the attack age evaluated.

Keywords: Concrete. Mineral admixture. Silica fume. Blast furnace slag. Corrosion Inhibitors. Steel corrosion. Electrochemical techniques.

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 – Anéis pré-moldados de concreto sendo utilizados na estrutura das torres de energia eólica do parque eólico de Osório/RS (JORNALJÁ, 2008)	28
Figura 2.1 – Pilha eletroquímica de corrosão no concreto armado	34
Figura 2.2 – Modelo de vida útil proposto por Tuutti (1982)	35
Figura 2.3 – Ilustração da evolução do processo corrosivo em uma estrutura de concreto armado (modificado – GRAEFF, 2007)	36
Figura 2.4 – Diagrama simplificado de Pourbaix (modificado - POURBAIX, 1974).....	38
Figura 2.5 – Representação da frente de carbonatação (MEDEIROS; HELENE, 2001 modificado por CASTRO, 2003)	40
Figura 2.6 – Representação do avanço da frente de carbonatação até a despassivação da armadura (CARMONA, 2005)	40
Figura 2.7 – Efeitos do contato do ácido úrico, proveniente da urina humana, no concreto armado. a) vista geral do ponto de ônibus; b) detalhe do lascamento do concreto e da armadura sendo corroída	41
Figura 2.8 – a) Lixiviação do concreto na laje de um subsolo; b) detalhe da eflorescência gerada.....	42
Figura 2.9 – Principais morfologias de corrosão (ANDRADE, 1988).....	43
Figura 2.10 – Formas de íons cloreto no concreto (CASCUDO, 1997)	44
Figura 2.11 – Representação esquemática da corrosão na presença de cloretos: mecanismo da formação do complexo transitório de FeCl_2 , de acordo com o ACI 222 (1991)	45
Figura 2.12 – Perfil típico de concentração dos cloretos ao longo do cobrimento, em um concreto contaminado por impregnação externa de solução rica em cloreto (CASCUDO, 1997)	47
Figura 2.13 – Formas de penetração de cloretos no concreto (ANDRADE, 2001).....	48
Figura 2.14 – Zonas de agressividade em uma atmosfera marinha (modificado – POLITO, 2006)	49

Figura 2.15 – Medida da taxa de deposição média de cloretos em estruturas de concreto armado na costa brasileira, nas distâncias de 10, 100, 200 e 500 m em relação ao mar (MEIRA <i>et al.</i> , 2006)	50
Figura 2.16 – Concentração superficial de cloretos em diversas estruturas de concreto no Japão em função do tempo de exposição (SWAMY <i>et al.</i> , 1994 <i>apud</i> ANDRADE, 2001)	51
Figura 2.17 – Perfis de concentração de cloretos mostrando as zonas de absorção e de difusão para concretos com diferentes relações a/c (CASTRO <i>et al.</i> , 1999 <i>apud</i> ANDRADE, 2001)	52
Figura 2.18 – Perfis de concentração de cloretos em concretos submersos na água da mar de diferentes locais do mundo com clima quente (LINDVALL, 2007).....	53
Figura 2.19 - Relação entre deposição acumulada de cloretos e concentração total média em estruturas de concreto situados na costa brasileira (MEIRA <i>et al.</i> , 2006).....	53
Figura 2.20 – Processo eletroquímico de corrosão (CASCUDO, 1997 modificado por FERREIRA, 2003)	58
Figura 2.21 – Processo eletroquímico de corrosão em elementos estruturais (POURSAEE; HANSSON, 2009).....	59
Figura 2.21 – Curva de Tafel (SOUZA, 2007)	61
Figura 2.22 – Diferentes modos de classificação dos aditivos inibidores de corrosão	64
Figura 2.23 – Ação dos inibidores de corrosão: (a) inibidores anódicos, exemplo: nitritos, cromatos, silicatos e benzoatos; (b) inibidores catódicos, exemplo: sulfato de zinco, poli-fosfatos; (c) inibidores mistos, exemplo: aminas, ésteres, taninos. (Modificado - RANGLÉN, 1972 <i>apud</i> BOLINA, 2008).....	65
Figura 2.24 – Classificação das adições minerais para concreto estrutural (MEHTA; MONTEIRO, 2006; DAL MOLIN, 2005).....	72
Figura 2.25 – Estudo piloto realizado pelo presente autor para definição do teor de escória a ser utilizado na pesquisa	74
Figura 2.26 – Micrografias ilustrando aspectos da microestrutura de um concreto sem adição de sílica ativa (a) (LIMA <i>et al.</i> , 2007) e um concreto com adição de sílica ativa (b) (CASTRO, 2003).....	77
Figura 2.27 – Valores médios globais de penetrabilidade de íons cloreto. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem estatisticamente entre si (FERREIRA, 2003)	78

Figura 3.1 – Organograma das variáveis independentes para cada uma das três relações a/agl adotadas	83
Figura 3.2 – Organograma das variáveis do estudo paralelo específico sobre inibidores	86
Figura 3.3 – Difratoograma de raios X da escória de alto-forno moída	90
Figura 3.4 – Difratoograma de raios X da sílica ativa	90
Figura 3.5 – Curva de distribuição granulométrica do agregado miúdo, que se classifica segundo a NBR 7211 (2005) como um agregado de zona utilizável.....	91
Figura 3.6 – Curva de distribuição granulométrica do agregado graúdo, que se classifica segundo a NBR 7211 (2005) na zona granulométrica correspondente à menor (4,75 mm) e à maior (12,5 mm) dimensões do agregado graúdo	92
Figura 3.7 – a) Aspecto geral da rocha, mostrando a textura granular alotriomórfica. Quartzo (1), microclínio (2), plagioclásio (3) e muscovita (4).....	93
Figura 3.8 – Caracterização no estado fresco: a) consistência; b) massa específica e c) teor de ar	96
Figura 3.9 – a) resistência à compressão e b) módulo de elasticidade.....	98
Figura 3.10 – a) Moldes cilindros metálicos para os ensaios mecânicos e b) corpos-de-prova cúbicos com arestas de 15 cm para os ensaios eletroquímicos	100
Figura 3.11 – a) Limpeza mecânica das barras e b) pesagem das barras já limpas	101
Figura 3.12 – a) barras sendo ligas ao fio metálico e b) envolvimento das barras com fita isolante	102
Figura 3.13 – a) detalhe da área da barra a ser exposta e b) envolvimento da área exposta com fita isolante a ser retirada no momento da concretagem	102
Figura 3.14 – a) pintura com resina epóxi sobre toda região com fita isolante e b) reforço de fita isolante sobre a pintura epóxi na região de contato com os estribos.....	103
Figura 3.15 – Fôrma com a armadura posicionada, referente ao corpo-de-prova cúbico utilizado na avaliação dos concretos sob a ação de cloretos	104
Figura 3.16 – a) local de dosagem dos concretos e a betoneira utilizada; b) detalhe da introdução de materiais na betoneira	104

Figura 3.17 – Ambientes de cura: a) dos corpos-de-prova cilíndricos destinados aos ensaios mecânicos (câmara úmida); b) dos corpos-de-prova prismáticos destinados aos ensaios eletroquímicos (cura ao ar a partir dos 28 dias de idade até os 91 dias – até os 28 dias estes também ficavam na câmara úmida).....	106
Figura 3.18 – Processo de indução e aceleração da corrosão: a) molhagem em solução com cloreto de sódio (durante 3 dias) b) secagem em uma estufa com circulação de ar (duração 4 dias).....	106
Figura 3.19 – a) Imersão até 1/3 da altura do corpo-de-prova, com concentração de cloretos em torno de 3,5% em massa (durante os 6 primeiros ciclos) e b) imersão até 2/3 da altura do corpo-de-prova e com uma concentração de cloretos igual a 10% em massa (após o 6º ciclo)	107
Figura 3.20 – a) Potenciostato utilizado nas medidas eletroquímicas e b) Célula de corrosão	108
Figura 3.21 – Diagrama de Nyquist	113
Figura 3.22 – Configuração para determinação do potencial de corrosão	115
Figura 4.1 – Potenciais de corrosão em função do tempo dos concretos de relação a/agl 0,55 do estudo principal	118
Figura 4.2 – Tempo de ataque (em ciclos) até o comportamento típico de despassivação, baseado nos valores de potencial de corrosão, dos concretos com relação a/agl 0,55 do estudo principal	120
Figura 4.3 – Potenciais de corrosão em função do tempo dos concretos de relação a/agl 0,45 do estudo principal	121
Figura 4.4 – Tempo de ataque (em ciclos) até o comportamento típico de despassivação, baseado nos valores de potencial de corrosão, dos concretos com relação a/agl 0,45 do estudo principal	122
Figura 4.5 – Potenciais de corrosão em função do tempo (número de ciclos).....	123
Figura 4.6 – Superfície de resposta obtida dos valores de resistência à compressão aos 28 dias em função das variáveis do estudo	124
Figura 4.7 – a) Concretos com tanino e b) Mistura do tanino em pó na água do traço	125
Figura 4.8 – Tempo de ataque (em ciclos) até o comportamento típico de despassivação, baseado nos valores de potencial de corrosão, dos concretos com relação a/c 0,45 do estudo específico sobre aditivos inibidores de corrosão.....	126
Figura 4.9 – Potenciais de corrosão em função do tempo para os concretos de relação a/agl 0,35	127

Figura 4.10 – Tempo de ataque (em ciclos) até o comportamento típico de despassivação, baseado nos valores de potencial de corrosão, dos concretos com relação a/agl 0,35 do estudo principal	128
Figura 4.11 – Tempo de ataque (em ciclos) até o comportamento típico de despassivação, baseado nos valores de potencial de corrosão dos concretos do estudo principal	130
Figura 4.12 – Resistência de polarização dos concretos com relação a/agl 0,55 dos concretos do estudo principal	131
Figura 4.13 – Taxa de corrosão eletroquímica dos concretos com relação a/agl 0,55	132
Figura 4.14 – Resistência de polarização dos concretos com a/agl 0,45 do estudo principal	134
Figura 4.15 – Taxa de corrosão eletroquímica dos concretos com a/agl 0,45 do estudo principal	134
Figura 4.16 – Resistência de polarização dos concretos com relação a/c 0,45 do estudo específico sobre aditivos inibidores de corrosão	136
Figura 4.17 – Taxa de corrosão eletroquímica em função do tempo (número de ciclos)....	137
Figura 4.18 – Resistência de polarização dos concretos com a/agl 0,35 do estudo principal	139
Figura 4.19 – Taxa de corrosão eletroquímica dos concretos com relação a/agl 0,35	139
Figura 4.20 – Intensidade de influência dos fatores nos valores de taxa de corrosão eletroquímica após 16 ciclos de indução e aceleração da corrosão dos concretos do estudo principal.....	142
Figura 4.21 – Influência (não significativa) do tipo de aditivo inibidor de corrosão nos valores globais da taxa de corrosão eletroquímica (após o 16º ciclo de ataque) dos concretos do estudo principal.....	143
Figura 4.22 – Influência (significativa) do teor de aditivo inibidor de corrosão nos valores globais da taxa de corrosão eletroquímica (após o 16º ciclo de ataque) dos concretos do estudo principal.....	143
Figura 4.23 – Influência (significativa) do tipo de adição mineral nos valores globais da taxa de corrosão eletroquímica (após o 16º ciclo de ataque) dos concretos do estudo principal.....	145

Figura 4.24 – Influência (significativa) da relação a/agl nos valores globais da taxa de corrosão eletroquímica (após o 16º ciclo de ataque) dos concretos do estudo principal.....	146
Figura 4.25 – Comparação múltipla de médias das taxas de corrosão eletroquímicas dos concretos do estudo principal para os fatores do estudo, efetuada pelo método de Duncan.....	146
Figura 4.26 – Superfície de resposta obtida a partir da análise estatística dos dados de taxa de corrosão eletroquímica (após o 16º ciclo de ataque) dos concretos do estudo principal em função das variáveis tipo de adição mineral e relação a/agl	147
Figura 4.27 – Superfície de resposta obtida a partir da análise estatística dos dados de taxa de corrosão eletroquímica (após o 16º ciclo de ataque) dos concretos do estudo principal em função das variáveis: tipo de adição mineral e teor de aditivo inibidor.....	148
Figura 4.28 – Diagramas de Nyquist do concreto referência do estudo específico sobre aditivos inibidores, com as medidas de impedância tendo sido realizadas anteriormente ao início do ataque por cloretos e após 6 e 12 ciclos de ataque	153
Figura 4.29 – Diagramas de Nyquist dos concretos 0,45RA0,76 (a esquerda) e 0,45RNC3,66 (a direita) do estudo específico sobre aditivos inibidores, com as medidas de impedância tendo sido realizadas anteriormente ao início do ataque por cloretos e após 6 e 12 ciclos de ataque	153
Figura 4.30 – À esquerda: Diagrama de Nyquist do concretos 0,45RRNS0,76, com as medidas de impedância tendo sido realizadas anteriormente ao início do ataque por cloretos e após 6 e 12 ciclos de ataque; à direita: valores de impedância de três concretos após 16 ciclos de ataque, quais sejam: o referência e dois concretos com tanino, o 0,45RT0,76 e o 0,45RT3,66.....	153
Figura 4.31 – À esquerda: Diagrama de Nyquist dos três concretos com nitrito de sódio após 16 ciclos de ataque, quais sejam: o 0,45RNS0,76; o 0,45RNS2,21 e o 0,45RNS3,66. À direita: Diagrama de Nyquist dos três concretos com nitrito de cálcio após 16 ciclos de ataque, quais sejam: o 0,45RNC0,76; o 0,45RNC 2,21 e o 0,45RNC3,66.	156
Figura 4.32 – Diagramas de Nyquist dos concretos do estudo específico sobre inibidores que não apresentaram comportamento de despassivação (pelos dados de taxa de potencial de corrosão e taxa de corrosão eletroquímica) até o 16º ciclo de indução da corrosão	157
Figura 4.33 – À esquerda: Diagrama de Nyquist do concreto 0,55RA0, com as medidas de impedância tendo sido realizadas anteriormente ao início do ataque por cloretos e após 6 e 12 ciclos de ataque. À direita: Diagrama de Nyquist dos três concretos sem adição mineral e sem aditivo inibidor de corrosão após 16 ciclos de ataque, quais sejam: o 0,35RNS0; o 0,45RNC0 e o 0,55RA0.	161

Figura 4.34 – À esquerda: Diagramas de Nyquist dos três concretos sem aditivo inibidor de corrosão da relação a/agl 0,35 após 16 ciclos de ataque, quais sejam: o 0,35RNS0; o 0,35ENC0 e o 0,35SA0. À direita: Diagramas de Nyquist do concreto 0,35ENC0, com as medidas de impedância tendo sido realizadas anteriormente ao início do ataque por cloretos e após 6 e 12 ciclos de ataque.....	162
Figura 4.35 – Diagramas de Nyquist dos concretos com relação a/agl 0,55 do estudo principal que não apresentaram despassivação após 16 ciclos de ataque.....	163
Figura 4.36 – Diagramas de Nyquist dos concretos com relação a/agl 0,45 do estudo principal que não apresentaram despassivação após 16 ciclos de ataque.....	164
Figura 4.37 – Diagramas de Nyquist dos concretos com relação a/agl 0,35 do estudo principal que não apresentaram despassivação após 16 ciclos de ataque.....	165
Figura 4.38 – Custo dos inibidores utilizados considerando apenas os teores de sólidos. Preço no varejo dos aditivos: Tanino (pó) = R\$ 3,21 o kg; Nitrito de cálcio (forma líquida com 33,14% de sólidos) = R\$ 70 balde de 20 kg; Nitrito de Sódio (pó) = R\$ 14 o kg; amina (forma líquida, com 21,63% de sólidos) = R\$335 balde de 25kg.....	167
Figura 4.39 – Acréscimo no valor do m^3 de concreto (considerando concretos com relação a/c 0,45, idêntico ao concreto de referência do estudo específico sobre inibidores) utilizando os inibidores nos teores 0,76%; 2,21% e 3,66 %.....	167
Figura 4.40 – Acréscimo no valor do m^3 de concreto utilizando os inibidores nos teores recomendados pelos fabricantes	168
Figura 4.41 – Custo por metro cúbico dos concretos do estudo principal que não despassivaram até o ciclo padrão de análise	171
Figura 4.42 – Viabilidade técnico-econômica dos concretos do estudo principal que apresentaram elevadas eficiências.....	172

LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 2.1 – Teor máximo de íons cloreto para proteção das armaduras do concreto de acordo com a NBR 12655 (2006)	43
Tabela 2.2 – Eficiência dos filmes formados em solução preparada com amostras de flores e em pequenos arbustos (CRIVELARO; COSTA, 2005).....	66
Tabela 2.3 – Teor de nitrito de sódio em relação à massa do cimento (CÁNOVAS, 1988) ...	69
Tabela 2.4 – Dosagem do Nitrito de Cálcio (BENTUR <i>et al.</i> , 1997)	70
Tabela 2.5 – Comparativo entre algumas adições minerais e o cimento Portland (adaptada de CARASEK; HASPARYK, 2007)	75
Tabela 3.1 – Apresentação das 27 situações de estudo determinadas pelo software Statística 7.1 e a codificação utilizada para identificação de cada situação.....	85
Tabela 3.2 – Apresentação das 12 situações de estudo utilizadas no estudo paralelo específico sobre inibidores.....	87
Tabela 3.3 – Características cimento utilizado.....	88
Tabela 3.4 – Características das adições minerais utilizadas.....	89
Tabela 3.5 – Caracterização dos agregados miúdo e graúdo.....	91
Tabela 3.6 – Características básicas do aditivo superplastificante	93
Tabela 3.7 – Principais características do tanino	93
Tabela 3.8 – Principais características do nitrito de cálcio	94
Tabela 3.9 – Principais características da amina	94
Tabela 3.10 – Principais características do nitrito de sódio P.A.	94
Tabela 3.11 – Proporcionamento das misturas do estudo principal.....	95
Tabela 3.12 – Proporcionamento das misturas do estudo paralelo sobre aditivos inibidores.....	96
Tabela 3.13 – Resultados da caracterização no estado fresco dos concretos do estudo principal.....	97

Tabela 3.14 – Resultados da caracterização no estado fresco do estudo paralelo sobre inibidores.....	97
Tabela 3.15 – Resultados médios (os ensaios foram realizados em duplicata) da caracterização no estado endurecido dos concretos do estudo principal.....	99
Tabela 3.16 – Resultados médios (os ensaios foram realizados em duplicata) da caracterização no estado endurecido dos concretos do estudo específico sobre aditivos inibidores de corrosão.....	99
Tabela 3.17 – Critério de avaliação dos valores de taxa de corrosão (ALONSO; ANDRADE, 2001)	111
Tabela 3.18 – Critério de avaliação dos valores de potencial de corrosão de acordo com a ASTM C 876 (2009)	115
Tabela 4.1 – Tempo de ataque total a qual foi submetido cada concreto do estudo principal e os respectivos ciclos com características de despassivação do aço	129
Tabela 4.2 – Tempo de ataque total ao qual foi submetido cada concreto do estudo específico sobre inibidores de corrosão e os respectivos ciclos de despassivação do aço	129
Tabela 4.3 – Resultados da ANOVA realizada com os dados de taxa de corrosão após 16 ciclos de ataque dos concretos do estudo principal, para as variáveis independentes consideradas no modelo estatístico.....	141
Tabela 4.4 – Eficiência dos inibidores usando os valores de taxa de corrosão eletroquímica dos concretos do estudo específico sobre aditivos inibidores de corrosão, em seus 16º de ataque.....	149
Tabela 4.5 – Eficiência dos sistemas usando os valores de taxa de corrosão eletroquímica dos concretos do estudo principal, no 16º ciclo de ataque.....	159
Tabela 4.6 – Custo por metro cúbico dos concretos do estudo principal.....	169
Tabela 4.7 – Custo por metro cúbico dos concretos do estudo principal, destacando-se, em negrito, os que não apresentaram comportamento de despassivação após 112 dias de ataque.....	170

LISTA DE ABREVIações

a/agl - água/aglomerante (cimento + adição mineral)

a/c - água/cimento

ANOVA - Análise estatística de variância

0,55RA0 - concreto de relação a/agl 0,55; sem adição mineral e sem aditivo inibidor de corrosão

0,55RNSmín - concreto de relação a/agl 0,55; sem adição mineral e com aditivo inibidor nitrito de sódio no teor mínimo de recomendação

0,55RNCmáx - concreto de relação a/agl 0,55; sem adição mineral e com aditivo inibidor nitrito de cálcio no teor máximo de recomendação

0,55SNC0 - concreto de relação a/agl 0,55; com sílica ativa e sem aditivo inibidor de corrosão

0,55SAmín - concreto de relação a/agl 0,55; com sílica ativa e aditivo inibidor amina no teor mínimo de recomendação

0,55SNSmáx - concreto de relação a/agl 0,55; com sílica ativa e nitrito de sódio no teor máximo de recomendação

0,55ENS0 - concreto de relação a/agl 0,55; com escória de alto-forno e sem aditivo inibidor de corrosão

0,55ENCmín - concreto de relação a/agl 0,55; com escória de alto-forno e aditivo inibidor nitrito de cálcio no teor mínimo de recomendação

0,55EAmáx - concreto de relação a/agl 0,55; com escória de alto-forno e aditivo inibidor amina no teor máximo de recomendação

0,45RNC0 - concreto de relação a/agl 0,45; sem adição mineral e sem aditivo inibidor de corrosão

0,45RAmín - concreto de relação a/agl 0,45; sem adição mineral e aditivo inibidor amina no teor mínimo de recomendação

0,45RNSmáx - concreto de relação a/agl 0,45; sem adição mineral e nitrito de sódio no teor máximo de recomendação

0,45SNS0 - concreto de relação a/agl 0,45; com sílica ativa e sem aditivo inibidor de corrosão

0,45SNCmín - concreto de relação a/agl 0,45; com sílica ativa e aditivo inibidor nitrito de cálcio no teor mínimo de recomendação

0,45SA_{máx} - concreto de relação a/agl 0,45; com sílica ativa e aditivo inibidor amina no teor mínimo de recomendação

0,45EA₀ - concreto de relação a/agl 0,45; com escória de alto-forno e sem aditivo inibidor de corrosão

0,45ENS_{mín} - concreto de relação a/agl 0,45; com escória de alto-forno e aditivo inibidor nitrito de sódio no teor mínimo de recomendação

0,45ENC_{máx} - concreto de relação a/agl 0,45; com escória de alto-forno e aditivo inibidor nitrito de cálcio no teor máximo de recomendação

0,35RNS₀ - concreto de relação a/agl 0,35; sem adição mineral e sem aditivo inibidor de corrosão

0,35RNC_{mín} - concreto de relação a/agl 0,35; sem adição mineral e aditivo inibidor nitrito de cálcio no teor mínimo de recomendação

0,35RA_{máx} - concreto de relação a/agl 0,35; sem adição mineral e aditivo inibidor amina no teor máximo de recomendação

0,35SA₀ - concreto de relação a/agl 0,35; com sílica ativa e sem aditivo inibidor de corrosão

0,35SNS_{mín} - concreto de relação a/agl 0,35; com sílica ativa e aditivo inibidor nitrito de sódio no teor mínimo de recomendação

0,35SNC_{máx} - concreto de relação a/agl 0,35; com sílica ativa e aditivo inibidor nitrito de cálcio no teor máximo de recomendação

0,35ENC₀ - concreto de relação a/agl 0,35; com escória de alto-forno e sem aditivo inibidor de corrosão

0,35EA_{mín} - concreto de relação a/agl 0,35; com escória de alto-forno e aditivo inibidor amina no teor mínimo de recomendação

0,35ENS_{máx} - concreto de relação a/agl 0,35; com escória de alto-forno e aditivo inibidor nitrito de sódio no teor máximo de recomendação

0,45RR₀ – concreto de relação a/c 0,45 e sem aditivo inibidor de corrosão

0,45RA_{0,76} - concreto de relação a/c 0,45 e aditivo inibidor amina no teor (de sólidos) 0,76%, em relação à massa de cimento

0,45RA_{2,21} - concreto de relação a/c 0,45 e aditivo inibidor amina no teor (de sólidos) 2,21%, em relação à massa de cimento

0,45RA_{3,66} - concreto de relação a/c 0,45 e aditivo inibidor amina no teor (de sólidos) 3,66%, em relação à massa de cimento

0,45RNC_{0,76} - concreto de relação a/c 0,45 e aditivo inibidor nitrito de cálcio no teor (de sólidos) 0,76%, em relação à massa de cimento

0,45RNC_{2,21} - concreto de relação a/c 0,45 e aditivo inibidor nitrito de cálcio no teor (de sólidos) 2,21%, em relação à massa de cimento

0,45RNC3,66 - concreto de relação a/c 0,45 e aditivo inibidor nitrito de cálcio no teor (de sólidos) 3,66%, em relação à massa de cimento

0,45RNS0,76 - concreto de relação a/c 0,45 e aditivo inibidor nitrito de sódio no teor (de sólidos) 0,76%, em relação à massa de cimento

0,45RNS2,21 - concreto de relação a/c 0,45 e aditivo inibidor nitrito de sódio no teor (de sólidos) 2,21%, em relação à massa de cimento

0,45RNS3,66 - concreto de relação a/c 0,45 e aditivo inibidor nitrito de sódio no teor (de sólidos) 3,66%, em relação à massa de cimento

0,45RT0,76 - concreto de relação a/c 0,45 e aditivo inibidor tanino no teor (de sólidos) 0,76%, em relação à massa de cimento

0,45RT2,21 - concreto de relação a/c 0,45 e aditivo inibidor tanino no teor (de sólidos) 2,21%, em relação à massa de cimento

0,45RT3,66 - concreto de relação a/c 0,45 e aditivo inibidor tanino no teor (de sólidos) 3,66%, em relação à massa de cimento

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – *American Concrete Institute*

ANEEL – Agencia Nacional de Energia Elétrica

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CEB – *Comitê Euro – International du Beton*

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente

DCT.C – Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas

EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

IPT – Instituto de Pesquisa Tecnológicas

NBR – Norma Brasileira de Regulamentação

ONU – Organização das Nações Unidas

PPG/GECON – Programa de Pós Graduação em Geotecnia e Construção Civil

P&D – Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico

PROINFA – Programa de Incentivos às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

SWERA – *Solar and Wind Energy Resource Assessment*

WWEA – *World Wind Energy Association*

NOMENCLATURA DA QUÍMICA DO CIMENTO

Principais óxidos: C – CaO; S – SiO₂; A – Al₂O₃; F – Fe₂O₃; H – H₂O; M – MgO; N – Na₂O; K – K₂O

C₃S – silicato tricálcico

C₂S – silicato dicálcico

C₃A – aluminato tricálcio

C₄AF – ferroaluminato tetracálcico – ferrita

CH ou Ca(OH)₂ – hidróxido de cálcio – portlandita

Cl⁻ – íon cloreto

Cl⁻/OH⁻ – relação iônica entre cloretos e hidroxilas

C-S-H – silicato de cálcio hidratado

C/S – relação CaO/SiO₂

C₃A.CaCl₂.10H₂O - cloroaluminato de cálcio hidratado – sal de Friedel

KOH – hidróxido de potássio

Mg(OH)₂ – hidróxido de magnésio – brucita

NaOH – hidróxido de sódio

Na₂O_{eq} – equivalente alcalino (%Na₂O + 0,658.%K₂O)

OH⁻ – íon hidroxila

SiO₂ – sílica

SO₄²⁻ – íon sulfato

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIACÕES

LISTA DE SIGLAS

NOMENCLATURA DA QUÍMICA DO CIMENTO

	Pág.
1 INTRODUÇÃO	26
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA	26
1.2 IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA DO TEMA	28
1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO	29
1.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA	30
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	32
2 REVISÃO DA LITERATURA	33
2.1 CORROSÃO DE ARMADURAS EM CONCRETO.....	33
2.1.1 Considerações Iniciais	33
2.1.2 Período de Passivação do Aço	36
2.1.3 Período de Iniciação da Corrosão ou Despassivação do Aço	39
2.1.3.1 Corrosão Ocasionalada por Fenômenos que Diminuem a Alcalinidade do Concreto	39
2.1.3.2 Corrosão Ocasionalada Pela Ação Cloretos.....	42
2.1.3.2.a Penetração de Cloretos no Concreto	45
2.1.3.2.b Concentração Superficial de Cloretos em Atmosfera Marinha.....	48
2.1.3.2.c Ação Conjunta com a Carbonatação	54
2.1.4 Período de Propagação da Corrosão	55
2.1.5 Cinética da Corrosão em Meio Aquoso	59
2.2 FORMAS DE PREVENÇÃO DA CORROSÃO	62
2.2.1 Aditivos Inibidores	63
2.2.1.1 Tanino	66

2.2.1.2 Amina	67
2.2.1.3 Nitrito De Sódio	68
2.2.1.4 Nitrito De Cálcio	69
2.2.2 Adições Minerais	71
2.2.2.1 Escória de Alto-Forno	73
2.2.2.2 Sílica Ativa	75
2.2.2.3 Efeitos da Sílica Ativa e da Escória de Alto-Forno na Capacidade de Proteção dos Concretos Frente à Corrosão de Armaduras Induzidas por Cloretos	77
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	80
3.1 VARIÁVEIS DE ESTUDO	80
3.1.1 Relação Água/Aglomerante	80
3.1.2 Adição Mineral	81
3.1.3 Aditivo Inibidor de Corrosão	81
3.1.4 Teor de Aditivo Inibidor de Corrosão	82
3.1.5 Apresentação Geral do Experimento	82
3.2 PLANEJAMENTO ESTATÍSTICO DOS EXPERIMENTOS.....	84
3.3 ESTUDO PARALELO ESPECÍFICO SOBRE TEORES DE INIBIDORES	85
3.4 MATERIAIS	87
3.4.1 Cimento	88
3.4.2 Adições Minerais	88
3.4.3 Agregados	90
3.4.4 Aditivos	93
3.5 CONCRETOS ESTUDADOS	94
3.6 CORPOS-DE-PROVA	100
3.6.1 Preparação dos Corpos-de-Prova para Avaliação dos Concretos sob a Ação de Cloretos	101
3.6.1.1 Preparação das Barras de Aço	101
3.6.1.2 Preparação das Fôrmas	103
3.6.2 Moldagem dos Corpos-de-Prova	104
3.6.3 Cura dos Corpos-de-Prova	105
3.7 AVALIAÇÃO DOS CONCRETOS SOB A AÇÃO DE CLORETOS	106
3.7.1 Processo de Indução e Aceleração da Corrosão.....	106
3.7.2 Processo de Monitoramento da Corrosão por meio de Técnicas Eletroquímicas.....	108
3.7.2.1 Resistência de Polarização.....	109

3.7.2.1.a Determinação da Taxa de Corrosão Eletroquímica Via Resistência de Polarização.....	110
3.7.2.2 Impedância Eletroquímica.....	112
3.7.2.3 Potencial de Corrosão.....	114
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	117
4.1 POTENCIAIS DE CORROÇÃO.....	117
4.1.1 Relação a/agl 0,55.....	118
4.1.2 Relação a/agl 0,45.....	120
4.1.3 Relação a/agl 0,35.....	126
4.2 TAXA DE CORROÇÃO VIA RESISTÊNCIA DE POLARIZAÇÃO.....	131
4.2.1 Relação a/agl 0,55.....	131
4.2.2 Relação a/agl 0,45.....	133
4.2.3 Relação a/agl 0,35.....	138
4.3 ANÁLISE GLOBAL DOS RESULTADOS.....	140
4.3.1 Análise Estatística dos Dados	140
4.3.2 Eficiência de Inibição dos Aditivos Inibidores de Corrosão e Discussões Gerais sobre a Atuação Desses Inibidores.....	148
4.3.3 Eficiência dos Concretos do Estudo Principal.....	158
4.4 ANÁLISE COMPARATIVA DE CUSTO DOS CONCRETOS	166
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	174
5.1 CONCLUSÕES	174
5.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	174
5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	178
REFERÊNCIAS.....	179
APÊNDICE A – Discussão dos Resultados dos Ensaios de Caracterização dos Concretos do Estudo Principal no Estado Endurecido	191
APÊNDICE B – Resultados de Impedância Eletroquímica.....	202
ANEXO A – Análise Petrográfica do Agregado Graúdo Utilizado.....	210
ANEXO B – Catálogos dos Aditivos Inibidores de Corrosão.....	212
ANEXO C – Distribuição de Fisher.....	220