



Universidade Federal do Pampa

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**CORROSÃO ACELERADA POR IMERSÃO MODIFICADA (ENSAIO CAIM) DE
ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO CONTENDO CINZA DA CASCA DE
ARROZ E ÁGUA DA MANDIOCA BRAVA**

EDUARDA CARLESSO TRINDADE

**Alegrete
2013**

EDUARDA CARLESSO TRINDADE

**CORROSÃO ACELERADA POR IMERSÃO MODIFICADA (ENSAIO CAIM) DE
ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO CONTENDO CINZA DA CASCA DE
ARROZ E ÁGUA DA MANDIOCA BRAVA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Sílvia Margonei M. Tamborim

**Alegrete
2013**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

T825c Trindade, Eduarda Carlesso
Corrosão acelerada por imersão modificada (Ensaio Caim) de
Estruturas de Concreto Armado Contendo Cinza da Casca de Arroz
e Água da Mandioca Brava / Eduarda Carlesso Trindade.
112 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Pampa,
MESTRADO EM ENGENHARIA, 2013.

"Orientação: Sílvia Margonei Tamborim M. Tamborim".

1. concreto armado. 2. corrosão. 3. Ensaio Caim. 4. Cinza
da Casca de Arroz. 5. Água da Mandioca brava. I. Título.

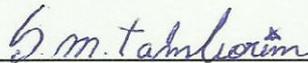
EDUARDA CARLESSO TRINDADE

**CORROSÃO ACELERADA POR IMERSÃO MODIFICADA (ENSAIO CAIM) DE
ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO CONTENDO CINZA DA CASCA DE
ARROZ E ÁGUA DA MANDIOCA BRAVA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação Stricto Sensu em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

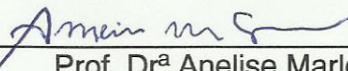
Área de concentração: materiais

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em: 6, Dezembro, 2013
Banca examinadora:



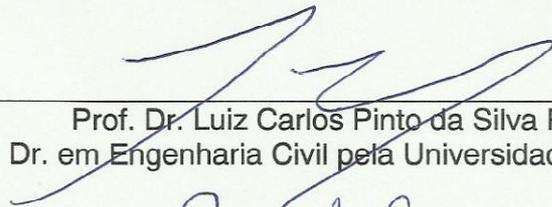
Prof. Drª Silvia Margonei M. Tamborim - UNIPAMPA/RS

Drª. em Ciência dos Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

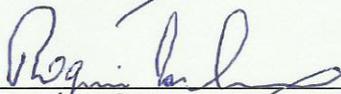


Prof. Drª Anelise Marlene Schmidt - UNIPAMPA/RS

Drª. em Química pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil



Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho - UFRGS/RS
Dr. em Engenharia Civil pela Universidade de Leeds, Inglaterra



Prof. Dr. Rogério Cattelan Antiocheves de Lima - UFSM/RS

Dr. em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Dedico este trabalho a minha família, em especial meus pais Miguel e Maria Angela e ao Gabriel pela dedicação e apoio em todos os momentos.

AGRADECIMENTO

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia, PPEng, pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa na minha cidade natal.

A Prof^a. Dr^a. Sílvia Margonei Mesquita Tamborim pela elegância e clareza da orientação incansável durante toda a elaboração deste projeto.

Aos colegas do PPEng pelo seu auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso.

Aos bolsistas Edvaldo Faour Junior, Thalita Maria Vieira Silva e Eduardo Pio pelo empenho durante os ensaios laboratoriais.

A Unipampa que mantém seu nível de excelência em ensino, pesquisa e extensão e propicia a comunidade ensino gratuito e de qualidade.

Às empresas CAMAL e CAAL e em especial a Construtora Sotrin pelos materiais cedidos para pesquisa e incentivo recebido de todos os funcionários.

A todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para realização do presente trabalho.

E a Deus pela presença em todos os momentos de minha vida.

Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.

Madre Teresa de Calcutá

RESUMO

A corrosão de armaduras é uma das manifestações patológicas mais comuns encontradas em estruturas de concreto armado, consistindo em um processo eletroquímico onde a água presente no concreto atua como eletrólito. Neste sentido através de ensaios de corrosão acelerados (Ensaio CAIM) comparou-se a resistência a corrosão no concreto armado de diferentes traços na presença e ausência de insumos agrícolas como a cinza da casca de arroz e água extraída da mandioca brava. O objetivo principal do presente trabalho foi selecionar qual (quais) o(s) traço(s) com similaridade de resistência a compressão e teor de argamassa apresentaram maior resistência frente ao processo de corrosão em meio contendo íons cloretos (solução que simula água do mar – 35g/L NaCl), aplicando-se voltagens de 15, 30 e 70V durante 8, 24 e 48h. A cinza de casca de arroz e a água extraída da mandioca brava foram caracterizadas pelas técnicas de análise de espectroscopia de infravermelho e de difração de raios-X. Os grupos funcionais silanol e carboxila foram detectados nestes subprodutos agrícolas e relacionados a um mecanismo proposto de inibição contra a corrosão na armadura conforme dados do ensaio CAIM. Análises de microscopia eletrônica de varredura e energia dispersiva de raios-X colaboraram para elucidar o mecanismo proposto. Enquanto que as análises de perda de massa e quantificação de cloretos no concreto após ensaio CAIM através do método de Mohr auxiliaram na validação dos resultados do ensaio.

Palavras-Chaves: Concreto armado, corrosão, cinza de casca de arroz, água da mandioca brava.

ABSTRACT

The corrosion in armatures is one of the most common pathologies found in structures of concrete, consisting in an electrochemical process, where the water in the concrete acts as an electrolyte. In this way, through the assays of accelerated corrosion (CAIM tests), the resistance to corrosion in concrete of different mixtures was compared with the presence and absence of agricultural input so as rice husk and water from mandioca brava. The main objective of this work is to select mixtures with similarity in resistance to compression and grout content present the biggest resistance against the corrosion process amid containing chloride ions (solution simulating seawater – 35g/L NaCl), applying voltages of 15, 30 and 70V during 8, 24 and 48h. The cinder of rice husk and the water extracted from mandioca brava were characterized by the infrared spectroscopy analysis technics and by X-ray diffraction. The functional groups of silanol and carboxyl were detected in these agricultural byproducts and related to a proposed inhibition mechanism against the corrosion in armatures seen in CAIM data tests. Electronic scanning microscopic analysis and dispersive X-ray energy collaborated to elucidate the proposed mechanism. While the studies in weight loss and chloride quantification in concrete after the CAIM test through the Mohr method helped in the validation of the assay results.

Key Words: Concrete, Corrosion, Cinder of rice husk, Manioc water

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Química da adição da pozolana ao cimento	29
Figura 2- Microscopia eletrônica de varredura sílica ativa (a) e cinza da casca de arroz (b).....	29
Figura 3- Esquema da corrosão de armadura no concreto	40
Figura 4- Diagrama simplificado de potencial e pH sistema Fe-H ₂ O.....	43
Figura 5-Atuação simultânea de diversos mecanismos de transporte em uma estrutura marítima	53
Figura 6- Esquema de variação do teor crítico de cloretos em função da qualidade do concreto e a umidade do ambiente	56
Figura 7- Representação do método de ensaio para medir o potencial de Corrosão.....	58
Figura 8- Ensaio de medida de resistividade.....	59
Figura 9- Plantação de mandioca da espécie <i>Manihot esculenta</i>	70
Figura 10-Processo de prensagem da massa.....	70
Figura 11-Vista das formas prismáticas, com as barras posicionadas nos espaçadores.....	71
Figura 12-Detalhes do Ensaio CAIM em execução (a) vista lateral e (b) vista frontal.....	77
Figura 13- Diagrama esquemático do Ensaio CAIM	78
Figura 14- Imersão das barras de aço na solução de limpeza	79
Figura 15- Infravermelho da água extraída da mandioca brava	81
Figura 16- Infravermelho da cinza da casca de arroz	82
Figura 17- Difração de raios-x de cinza de casca de arroz "in natura"obtida por queima controlada a 600° C durante 8 horas.....	83
Figura 18- Resultados do ensaio de absorção de água	84
Figura 19- Resultados do ensaio de compressão axial.....	85
Figura 20- Resposta de corrente em função do tempo de ensaio CAIM para amostras de concreto (■) Normal (●) CCA" in natura" (▲) AMB, (▼) Aditivo (◆)CCA" in natura"+ AMB em (A) 30V 8h e (B) 70V 8h	86
Figura 21- Resposta de corrente em função do tempo de ensaio CAIM para amostras de concreto (■) Normal (●) CCA" in natura" (▲) AMB, (▼) Aditivo (◆)CCA" in natura"+ AMB em (A) 15V 24h e (B) 30V 24h	86

Figura 22- Resposta de corrente em função do tempo de ensaio CAIM para amostras de concreto (■) Normal (●) CCA" in natura" (▲) AMB, (▼) Aditivo (◆)CCA" in natura"+ AMB em (A) 15V 48h e (B) 30V 48h	87
Figura 23- Imagem obtida através de câmera termográfica de corpo de prova ensaiado a 70V	87
Figura 24- Esquema Proposto de grupos funcionais adsorvido (a) carboxilato de etilo e (b) de silanol na superfície de metal	88
Figura 25- Porcentagem de perda de massa para amostras realizadas após o ensaio CAIM,Normal, Aditivo, Cinza da casca de arroz (CCA " in natura"), Água da mandioca brava (AMB) e Cinza de casca de arroz e água da mandioca brava (CCA" in natura+AMB) durante 8h (a) 30V e (b) 70V	89
Figura 26- Porcentagem de perda de massa para amostras realizadas após o ensaio CAIM,Normal, Aditivo, Cinza da casca de arroz (CCA " in natura"), Água da mandioca brava (AMB) e Cinza de casca de arroz e água da mandioca brava (CCA" in natura+AMB) durante 24h (a) 15V e (b) 30V	89
Figura 27- Porcentagem de perda de massa para amostras realizadas após o ensaio CAIM,Normal, Aditivo, Cinza da casca de arroz (CCA " in natura"), Água da mandioca brava (AMB) e Cinza de casca de arroz e água da mandioca brava (CCA" in natura+AMB) durante 48h (a) 15V e (b) 30V	90
Figura 28- Microscopia Eletrônica de Varredura com EDS da superfície da barra de aço inserida no CP normal após Ensaio CAIM por 24h 15V	91
Figura 29- Microscopia Eletrônica de Varredura com EDS da superfície da barra de aço inserida no CP CCA" in natura" após Ensaio CAIM por 24h 15V	91
Figura 30- Microscopia Eletrônica de Varredura com EDS da superfície da barra de aço inserida no CP água da mandioca brava após ensaio CAIM por 24h 15V	91
Figura 31- Microscopia Eletrônica de Varredura com EDS da superfície da barra de aço inserida no CP aditivo após ensaio CAIM por 24h 15V	92
Figura 32- Microscopia Eletrônica de Varredura com EDS da superfície da barra de aço inserida no CP CCA " in natura" e água da mandioca brava após ensaio CAIM por 24h15V	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Teor de vazios relacionado com a resistência em um concreto bem adensado.....	22
Tabela 2. Principais compostos do cimento	24
Tabela 3. Principais tipos de cimentos	25
Tabela 4. Propriedades mecânicas exigíveis das barras e fios de aço destinados à armadura para concreto armado	27
Tabela 5. Relação entre permeabilidade e relação água/cimento para pastas com 93% do cimento hidratado.....	45
Tabela 6. Teor limite de cloretos proposto por diversas normas.....	55
Tabela 7. Critério de avaliação através da medida de potencial de corrosão	58
Tabela 8. Caracterização físico-mecânica e química do cimento utilizado	67
Tabela 9. Composição granulométrica do agregado miúdo	68
Tabela 10. Composição granulométrica do agregado graúdo.....	68
Tabela 11. Traços finais ajustados.....	72
Tabela 12. Resultados Médios da Determinação pelo Método de Mohr	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

μA - micro Ampere (10^{-6} Ampere)

$^{\circ}\text{C}$ - graus Celsius

a/c - relação água/cimento

a/ag - relação água/aglomerante

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI - American Concrete Institute

ANOVA - Análise de Variância

ASHTO - The American Association of State Highway and Transportation Officials

ASTM - American Society for Testing and Materials

C_3A - aluminato tricálcico

C_3S - silicato tricálcico

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ - hidróxido de cálcio

CaCl_2 - cloreto de cálcio

CaCO_3 - carbonato de cálcio

CCA - cinza da casca do arroz

CEB - Comité Euro-Internacional de Beton

Cl^- - íons cloreto

cm - centímetro

CO_2 - dióxido de carbono ou gás carbônico

CPs - corpos-de-prova

CPV-ARI - cimento portland de alta resistência inicial

CH - Hidróxido de cálcio

C-S-H - silicato de cálcio hidratado

dm - decímetro

EDS - energia dispersiva de raio x ou espectroscopia por energia dispersiva

Fc - resistência à compressão axial, em Mpa

H - moléculas de água (H_2O)

HCN - ácido cianídrico

H_2O - água

mg - miligrama

mm - milímetro

MPa - Mega pascal

NaCl - cloreto de sódio

NBR - Norma Brasileira Regulamentada

O₂ - oxigênio

OH⁻ - íons hidroxila ou hidroxila

PPEng – Programa de Pós Graduação em Engenharia

pH - potencial de hidrogênio

U.R. - umidade relativa

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFSM - Universidade Federal de Santa Maria

Unipampa - Universidade Federal do Pampa

SUMÁRIO

1.0	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	Organização do trabalho.....	20
1.2	Objetivo geral.....	21
1.3	Objetivo específico.....	21
2.0	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
2.1	Concreto armado	22
2.2	Componentes do concreto armado.....	23
2.2.1	Agregados	23
2.2.2	Cimento Portland	22
2.2.3	Água	22
2.2.4	Aditivos.....	25
2.2.5	Aço.....	26
2.3	Cinza da casca de arroz	27
2.3.1	Temperatura e tempo de queima.....	30
2.3.2	Efeitos da CCA no concreto.....	32
2.3.3	Resistência a compressão axial.....	34
2.3.4	Densificação da zona de transição e redução da porosidade.....	35
2.4	Água da mandioca brava	36
2.5	Corrosão no concreto armado	37
2.6	Influência do meio na corrosão do concreto armado	40
2.7	Passividade da armadura	41
2.8	Mecanismos de transporte no concreto.....	43
2.8.1	Permeabilidade	44
2.8.2	Absorção capilar	46
2.8.3	Difusão de íons	48
2.8.4	Migração de íons	51
2.8.5	Mecanismos combinados	52
2.9	Corrosão do concreto armado por ataque de íons cloretos.....	53
2.10	Mecanismo de rompimento da camada passiva do concreto armado por ação dos cloretos.....	54
2.11	Limite crítico de cloretos	55

2.12 Medida da profundidade de alcance dos íons cloretos no interior do concreto armado	56
2.13 Técnicas eletroquímicas de avaliação e monitoramento da corrosão.....	57
2.13.1 Potenciais de corrosão	57
2.13.2 Medidas de resistividade elétrica do concreto	59
2.13.3 Medida de resistência Elétrica.....	60
2.13.4 Curvas de polarização.....	60
2.13.5 Impedância eletroquímica	60
2.13.6 Ensaio CAIM	62
2.13.6.1 Evolução do ensaio CAIM	62
2.13.6.2 Considerações finais do ensaio e delimitações do ensaio CAIM	64
3.0 DESCRIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	66
3.1 Materiais e métodos.....	66
3.1.1 Cimento	66
3.1.2 Agregado miúdo.....	67
3.1.3 Agregado graúdo	68
3.1.4 Aditivo	68
3.1.5 Armadura	69
3.1.6 Água de amassamento	69
3.1.7 Cinza da casca de arroz	69
3.1.8 Água da mandioca brava	69
3.2 Preparação dos corpos-de-prova.....	71
3.3 Produção de concreto	71
3.4 Ensaios realizados.....	73
3.4.1 Espectroscopia de Infravermelho.....	73
3.4.2 Difração de Raio X.....	74
3.4.3 Absorção de Água	74
3.4.4 Determinação de cloretos pelo Método de MOHR.....	75
3.4.5 Microscopia eletrônica de varredura	75
3.5 Procedimento do ensaio CAIM	76
3.6 Variáveis do ensaio.....	79
3.6.1 Voltagem de indução	79
3.6.2 Tempo de ensaio	80

3.6.3 Traço.....	80
4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES	81
4.1 Caracterização dos insumos agrícolas	81
4.1.1 Análise de infravermelho	81
4.1.2 Difração de raio X	83
4.2 Caracterização do concreto	83
4.2.1 Absorção de água.....	84
4.2.2 Resistência a compressão axial.....	84
4.3 Análise do comportamento médio da corrente X tempo	85
4.4 Análise da perda de massa	88
4.5 Análise da microscopia eletrônica de varredura	90
4.6 Determinação de cloretos pelo método de Mohr	92
5.0 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	94
5.1 Conclusões Finais.....	94
5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros.....	94
REFERÊNCIAS	96
ANEXOS	109

1.0 INTRODUÇÃO

O concreto é um material que apresenta vantagens na sua utilização, como, por exemplo, versatilidade e menor custo, se comparado a outros materiais de construção, sendo por isso largamente utilizado em todo o mundo (METHA E MONTEIRO, 1994). No entanto, inúmeros problemas relacionados com seu desempenho, especificamente sua durabilidade, vêm sendo detectados.

O principal enfoque dos projetistas das estruturas de concreto armado há algumas décadas atrás, era relacionado às propriedades mecânicas do concreto, com foco na resistência à compressão. Porém, preocupações com os custos de manutenção, reforço e recuperação das estruturas têm provocado uma mudança de comportamento, por ter sido constatado que aspectos relacionados com a durabilidade das estruturas são mais abrangentes, e envolverem, inclusive, os aspectos, relativos às propriedades mecânicas dos concretos (ISAIA E HELENE, 1993, p.13).

Uma das manifestações patológicas mais frequentes em estruturas de concreto armado é a corrosão de armaduras, e sua evolução compromete significativamente a segurança estrutural das obras (HELENE, 1997, p.31). As variáveis que intervêm no processo de corrosão se originam de diversas fontes dificultando um diagnóstico preciso destas estruturas.

A NBR 6118:2007, “Projeto e execução de obras de concreto armado”, estabelece a espessura de cobrimento a qual sofreu alterações em 2003, aumentando o cobrimento com maior espessura a fim de dificultar a penetração dos agentes agressivos na estrutura de concreto.

A corrosão em estruturas de concreto armado tem sua suscetibilidade intensificada com o aumento da agressividade ambiental, resultado da presença de atmosfera industrial e também do crescimento das cidades. Nas regiões litorâneas estas estruturas também ficam submetidas à ação extremamente agressiva da atmosfera marinha (GENTIL, 2012).

De acordo com Neville (1997), o que determina a penetração e deslocamento dos agentes agressivos no concreto é a estrutura de sua pasta de cimento hidratada, as suas características físico-químicas, a concentração superficial das substâncias agressivas e as condições ambientais umidade, temperatura e concentração de agentes agressivos. Esta penetração e deslocamento de gases,

líquidos e íons no concreto só são possíveis por este ser um material poroso, ou seja, nem todo o seu volume é preenchido quando o mesmo encontra-se no estado endurecido (COUTINHO E GONÇALES, 1994 apud PEREIRA, 2001, p.2).

Existem quatro tipos de mecanismos de penetração e transporte no concreto: absorção capilar, permeabilidade, migração iônica e difusão. Os modelos matemáticos para previsão de vida útil das estruturas são baseados nos mecanismos de transporte de água, gases e agentes agressivos através da rede de poros do concreto, como a difusão (HELENE, 1993, p.231).

A penetração de íons na estrutura do concreto pode provocar a despassivação da armadura e gerar a formação de pilhas eletroquímicas, deflagrando a corrosão da armadura (RODOLPHO E ISA 1999 apud Pereira, 2001, p. 2). O teor de cloretos livres é que irá definir a agressividade destes íons, sendo determinante para a relação entre cloretos livres e cloretos combinados as características dos cimentos, a estrutura dos poros e a natureza química das substâncias agressivas (PAGE et al, 1991).

De acordo com Medeiros et al(1999), a influência do tipo de cimento na penetração de íons cloretos está relacionada à composição química destes, pois o aluminato tricálcico, cuja fórmula química é $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ e a fórmula simplificada é C_3A , e o ferro aluminato tetracálcico, cuja fórmula química é $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ e a fórmula simplificada é C_4AF , se combinam com os cloretos para formar os cloroaluminatos. Com esta reação, o fluxo de penetração de cloretos diminui devido a menor concentração de íons livres na solução aquosa dos poros do concreto. Portanto, quanto maior o teor de C_3A no cimento, mais tempo levará a corrosão das armaduras para se iniciar (RASHEEDUZZAFAR, 1992).

Há necessidade em se conhecer mais o concreto e a geometria da sua estrutura, avaliando e classificando o grau de agressividade do ambiente. Desta forma, pode-se fazer uma estimativa, com maior precisão, da vida útil das estruturas, abordando de forma quantitativa a questão de sua durabilidade.

Infelizmente, as técnicas de ensaio e normas para análise da resistência à corrosão ainda não estão completamente sistematizadas. Diferentes esquemas e condições de ensaio foram propostas e aplicadas nos últimos anos (JADOVSKI et al, 1993; SELIESTRE et al, 1993 e 1994; MARCHESAN et al, 1997).

O ensaio CAIM (Corrosão Acelerada por Imersão Modificada) é um ensaio que evoluiu ao longo de duas décadas, a partir de uma concepção inicial proposta por Varela & Espinosa (1998).

O ensaio, utilizado inicialmente por Lima (1990), e depois modificado e aperfeiçoado por Selistre (1993), Marchesan et al (1997), Kirchheim et al (2005) apud Torres (2006, p.4), prediz que uma amostra do corpo-de-prova de concreto armado seja imerso numa solução de cloretos. A migração dos íons cloreto é estimulada pela aplicação de valores de potencial fixos por determinado tempo entre o catodo imerso na solução e a barra de aço, da solução salina em direção a barra de aço do concreto armado. Os resultados são obtidos em termos de correntes de corrosão e perda de massa da armadura permitindo uma avaliação comparativa de materiais ou tratamentos contra a corrosão.

Desta forma, este trabalho mostrou através do ensaio CAIM um estudo comparativo da resistência contra a corrosão no concreto armado na presença e ausência de subprodutos agrícolas como a cinza da casca de arroz e o líquido extraído da mandioca brava.

1.1 Organização do trabalho

O desenvolvimento deste trabalho está dividido em cinco capítulos que serão apresentados como segue:

No capítulo 1, a introdução, apresentou-se um breve resumo e uma visão geral da patologia corrosão nas armaduras e do ensaio de corrosão acelerada por imersão modificada.

No capítulo 2, fez-se uma revisão bibliográfica dos assuntos em geral que foram trabalhados nesta dissertação. Discutiu-se aqui conceitos fundamentais sobre corrosão no concreto armado com ênfase na corrosão causada por íons cloretos.

No capítulo 3, apresentou-se a descrição do programa experimental com a apresentação dos materiais utilizados e dos procedimentos de ensaio adotados.

No capítulo 4, mostraram-se os resultados e discussões do ensaio adotado e a caracterização dos materiais utilizados.

No capítulo 5, temos as conclusões e o que foi analisado no decorrer deste trabalho além de algumas perspectivas para trabalhos futuros e logo após essas perspectivas seguem as referências bibliográficas utilizadas para a realização do mesmo e os Anexos.

1.2 Objetivo geral

Analisar e comparar a resistência à corrosão através do ensaio CAIM em corpos de prova produzidos com diferentes traços na presença e ausência de subprodutos agrícolas como a cinza da casca de arroz e líquido extraído da mandioca brava.

1.3 Objetivos específicos

- Comparar os resultados obtidos no ensaio CAIM através das curvas corrente *versus* tempo dos diferentes corpos-de-prova contendo ou não plastificante, cinza da casca de arroz e a água extraída da mandioca brava;
- Analisar os resultados de % perda de massa dos corpos-de-prova após ensaio CAIM;
- Comparar a quantidade de cloreto no interior dos corpos-de-prova após ensaio CAIM através de método quantitativo de análise;
- Propor um mecanismo de inibição e/ou ativação do processo corrosivo dos diferentes corpos-de-prova.

2.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Concreto armado

O concreto possui excelentes propriedades mecânicas que reúnem a elevada resistência à compressão (MEHTA e MONTEIRO, 2006, p.15). A constituição do concreto é dada por cimento, agregados, aditivos e água, sendo o cimento o material que mais interfere nos processos físicos e químicos que influenciam na sua durabilidade, como por exemplo, a estrutura porosa do concreto e a quantidade de água.

Um concreto pode ser seco, rijo, mole, plástico ou fluído, conforme o sistema de adensamento, ou seja, rolagem, prensagem, centrifugação, vibração, adensamento manual ou auto adensamento (GUIAMMUSSO,1992).

Os concretos bem adensados normalmente possuem de 1% a 2% de vazios, porém um adensamento mal executado pode deixar teores maiores de vazios o que se verifica na Tabela 01.

Tabela 1. Teor de vazios relacionado com a resistência em um concreto bem adensado

Teor de vazios	1%	2%	3%	4%	5%	10%
Redução de resistência	8%	17%	24%	31%	37%	60%

Fonte: Giammusso ,1992, p. 33

O concreto é um material que apresenta alta resistência às tensões de compressão, porém, apresenta baixa resistência à tração. Assim sendo, é imperiosa a necessidade de juntar ao concreto um material com alta resistência à tração, com o objetivo deste material, disposto convenientemente, resistir às tensões de tração atuantes. Com esse material composto (concreto e armadura – barras de aço), surge então o chamado “concreto armado”, onde as barras da armadura absorvem as tensões de tração e o concreto absorve as tensões de compressão, no que pode ser auxiliado também por barras de aço.

2.2 Componentes do concreto armado

O concreto comum e o armado constituem-se dos mesmos componentes: agregados, aglomerantes e água, com a única diferença que no armado é necessário a adição de armadura metálica.

2.2.1 Agregados

Os agregados podem ser definidos como os “materiais granulosos e inertes que entram na composição das argamassas e concretos” (BAUER, 1995). São muito importantes no concreto porque cerca de 70 % da sua composição é constituída pelos agregados, e são os materiais de menor custo dos concretos.

Os agregados são classificados quanto à origem em naturais e artificiais. Os agregados naturais são aqueles encontrados na natureza, como areias de rios e pedregulhos, também chamados cascalho ou seixo rolado. Os agregados artificiais são aqueles que passaram por algum processo para obter as características finais, como as britas originárias da trituração de rochas.

Na classificação quanto às dimensões os agregados são chamados de miúdo, como as areias, e graúdo, como as pedras ou britas. O agregado miúdo tem diâmetro máximo igual ou inferior a 4,8 mm, e o agregado graúdo tem diâmetro máximo superior a 4,8 mm.

As britas são os agregados graúdos mais usados no Brasil, com uso superior a 50 % do consumo total de agregado graúdo nos concretos (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Os agregados podem também ser classificados em leves, normais e pesados. As britas normais são geralmente obtidas pela trituração de rochas, como basalto, gnaisse e granito.

2.2.2 Cimento portland

O cimento Portland foi descoberto na Inglaterra por volta do ano de 1824, e a produção industrial foi iniciada após o ano de 1850.

O cimento portland é um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob ação da água. Depois de endurecido, mesmo que

seja novamente submetido à ação da água, o cimento portland não se decompõe mais. O cimento é o principal elemento dos concretos e é o responsável pela transformação da mistura de materiais que compõem o concreto no produto final desejado.

O cimento é composto de clínquer e de adições, sendo o clínquer o principal componente, presente em todos os tipos de cimento. O clínquer tem como matérias-primas básicas o calcário e a argila. A propriedade básica do clínquer é que ele é um ligante hidráulico, que endurece em contato com a água.

Para a fabricação do clínquer, a rocha calcária inicialmente britada e moída é misturada com a argila moída. A mistura é submetida a um calor intenso de até 1450°C e então bruscamente resfriadas, formando pelotas (o clínquer). Após processo de moagem, o clínquer transforma-se em pó.

As adições são matérias-primas misturadas ao clínquer no processo de moagem, e são elas que definem as propriedades dos diferentes tipos de cimento. As principais adições são o gesso, as escórias de alto-forno, e os materiais pozolânicos e carbonáticos.

Os tipos de cimento que existem no Brasil diferem em função da sua composição, como o cimento portland comum, o composto, o de alto-forno, o pozolânico, o de alta resistência inicial, o resistente a sulfatos, o branco e o de baixo calor de hidratação (SILVA, 1995, p.22).

A Tabela 02 apresenta os principais compostos do cimento e a Tabela 03 apresenta os principais tipos de cimentos:

Tabela 2. Principais compostos do cimento

Compostos	Fórmulas químicas	Fórmulas simplificada
Silicato Tricálcico	3 CaO.SiO ₂	C ₃ S
Silicato Dicálcico	2 CaO.SiO ₂	C ₂ S
Aluminato Tricálcico	3 CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A
Ferro Aluminato Tetracálcico	4 CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

Fonte: Silva ,1995, p. 22

Tabela 3. Principais tipos de cimentos

CIMENTO	TIPO	NBR	CLINQUER E GESSO	ESCÓRIA	POZOLANA	CALCÁRIO
CP I	Comum	5732:1991	100%	-	-	-
CP II	Comum	11578:1991	95 a 99%	1 a 5%	1 a 5%	1 a 5%
CP II - E	Composto	11578:1991	56 a 94%	6 a 34%	-	0 a 10%
CP II - Z	Composto	11578:1991	76 a 94%	-	6 a 14%	0 a 10%
CP II - F	Composto	11578:1991	90 a 94%	-	-	6 a 10%
CP III	"Alto-Forno"	5735:1991	25 a 65%	35 a 70%	-	0 a 5%
CP IV	"Pozolânico"	5736:1991	45 a 85%	-	15 a 50%	0 a 5%
CP V ARI	Alta Resistência	5733:1991	95 a 100%	-	-	0 a 5%

Fonte: Elaboração do autor

Além dos compostos principais do cimento, podem estar presentes compostos menores, tais como, óxido de cálcio livre, óxido de sódio e potássio (denominados de álcalis do cimento), de magnésio, manganês, fosfatos, fluoretos e sulfatos. Esses componentes estão presentes no clínquer e suas proporções no mesmo dependem das composições da rocha calcária e argila, além das proporções da mistura desses materiais.

2.2.3 Água

A água é necessária no concreto para possibilitar as reações químicas no cimento, chamadas reações de hidratação, que irão garantir as propriedades de resistência e durabilidade do concreto. Tem também a função de lubrificar as demais partículas para proporcionar o manuseio do concreto. Normalmente a água potável é a indicada para a confecção dos concretos (MEHTA e MONTEIRO, 2006, p. 30-32).

2.2.4 Aditivos

Pode-se definir como aditivo todo produto não indispensável à composição e finalidade do concreto, que colocado na betoneira imediatamente antes ou durante a mistura do concreto, em quantidades geralmente pequenas e bem homogêneo, faz aparecer ou reforça certas características (BAUER, 2000, p.134).

A classificação dos aditivos pode ser baseada na ação ou nos efeitos. O critério de seleção baseada nos efeitos são:

- Aditivos destinados a melhorar a trabalhabilidade do concreto

1. Plastificantes redutores
 2. Incorporadores de ar
 3. Dispersantes ou fluidificantes
- Modificadores das resistências mecânicas
 1. Redutores plastificantes
 - Modificadores das resistências do concreto e condições especiais de exposição
 1. Incorporadores de ar
 - Modificadores de tempo de pega e endurecimento
 1. Retardadores
 2. Aceleradores
 - Impermeabilizantes
 1. Repelentes à absorção capilar
 2. Redutores de permeabilidade
 - Expansores
 1. Geradores de gás
 2. Estabilizadores de volume
 3. Geradores de espuma
 - Adesivos
 - Anticorrosivos
 - Corantes, Fungicidas, Germicidas e Inseticidas

2.2.5 Aço

O aço geralmente utilizado para o concreto pode ser fornecido por diversas formas, tipos e dimensões. Podendo ser barras laminadas, lisas ou com rugosidades, fios, cordoalhas e malhas soldadas.

Conforme a NBR 6118:2007, nos projetos de estrutura de concreto devem ser utilizados aços de acordo com a característica de resistência de escoamento conforme as categorias: CA-25, CA-50 e CA-60.

A característica de tração do aço pode ser considerada como: tensão de escoamento, tensão de ruptura, alongamento a ruptura e módulo de elasticidade (ANDREOLLO,1976). Na Tabela 4, são apresentadas as propriedades mecânicas exigíveis das barras e fios de aço destinados a armadura para concreto armado.

Tabela 4. Propriedades mecânicas exigíveis das barras e fios de aço destinados a armadura para concreto armado

Categoria	Valores mínimos de tração			
	Resistência característica de escoamento ^a f_{yk} MPa ^e	Limite de resistência ^b F_{st} MPa ^f	Alongamento após ruptura em $10\phi^c$ A %	Alongamento total na força máxima ^d A_{gt} %
CA-25	250	$1,20f_y$	18	-
CA-50	500	$1,08f_y$	8	5
CA-60	600	$1,05f_y^c$	5	-

^a Valor característico do limite superior de escoamento f_{yk} da ABNT NBR6118 obtido a partir do LE ou σ_e da ABNT NBR ISO6892.

^b O mesmo que resistência convencional à ruptura ou resistência convencional à tração (R_m ou σ_t da ABNT NBR ISO6892).

^c ϕ é o diâmetro nominal, conforme 3.4 da ABNT NBR7480.

^d O alongamento deve ser atendido através do critério de alongamento após ruptura (A) ou alongamento total na força máxima (A_{gt}).

Fonte: ABNT NBR 7480:2007

2.3 Cinza da casca de arroz

A cinza da casca de arroz (CCA) é um subproduto agrícola originado da queima da casca de arroz, a qual pode ser obtida pela combustão com ou sem controle de temperatura, em fornos de olarias para a fabricação de tijolos, em engenhos para a secagem dos grãos, e pela queima não controlada a céu aberto.

A casca do arroz é uma dura capa lenhosa, com elevado teor de sílica, composta aproximadamente por 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica anidra (DAL MOLIN,1988). A casca representa um revestimento ou capa protetora formada durante o crescimento do grão, de baixa densidade, elevado volume e altamente porosa, onde a variedade do teor de sílica da amostra depende também

da safra, da variedade plantada, do clima e das condições do solo, além da sua localização geográfica (POUYEI, 2006).

A CCA produzida pela queima da casca a céu aberto ou pela combustão não controlada em fornos industriais geralmente contém uma grande proporção de minerais de sílica não reativos, tais como a cristobalita e a tridmita (SiO_2), as quais são uma mistura de quartzo (SENSALE, 2000).

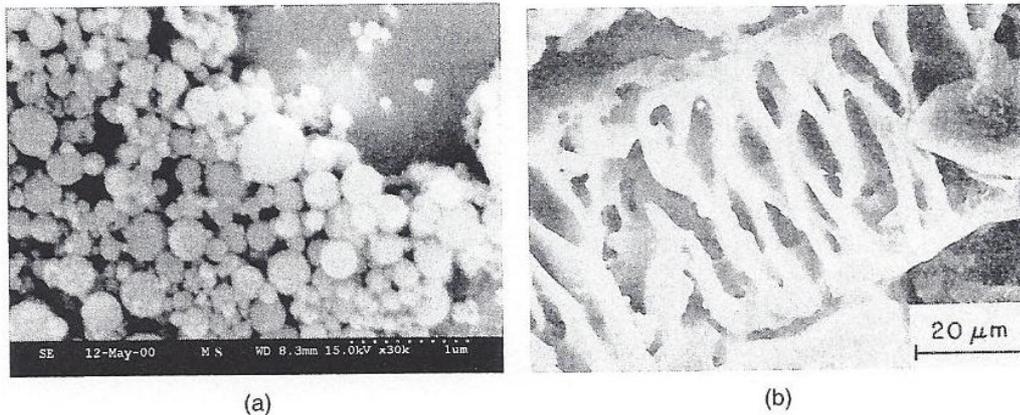
A CCA é caracterizada como um material pozolânico, estes são definidos como materiais siliciosos ou silico-aluminosos, naturais ou artificiais, que contém um elevado teor de sílica em forma reativa. O termo sílica reativa se refere a qualquer forma não cristalina deste material e finamente pulverizada capaz de reagir, na presença de água e à temperatura normal, com hidróxido de cálcio.

As pozolanas são materiais com pouca qualidade cimentante intrínseca, uma vez que por si só são pobres ligantes, mas quando finamente pulverizadas e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura normal, formando então silicatos de cálcio estáveis com apreciável capacidade cimentante (NEVILLE, 1997).

A elevada pozolanicidade da CCA pode ser produzida por combustão controlada quando a sílica não cristalina é formada e uma microestrutura celular conforme Figura (1) é apresentada.

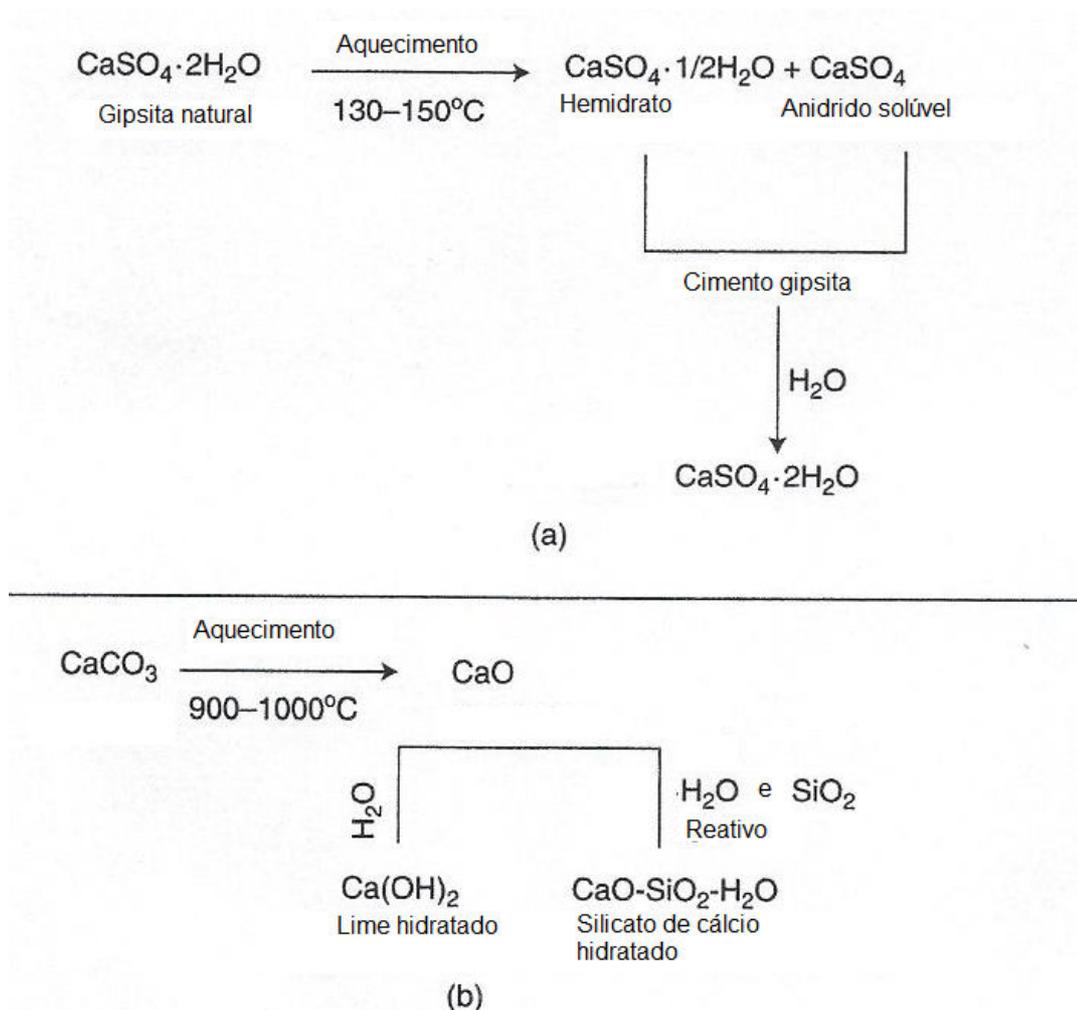
Amostras comerciais deste tipo de CCA apresentam uma área superficial de 50 a 60 m^2/g através da técnica de adsorção de nitrogênio (MEHTA e MONTEIRO, 2006, p.306). A alta reatividade da CCA, comparável à da sílica ativa, se deve ao fato de que ao ser queimada em baixas temperaturas, apresenta superfície microporosa, conforme a Figura (1), facilitando assim a formação de C-S-H secundário (silicato de cálcio hidratado) conforme a reação mostrada na Figura (2-b).

Figura 1- Microscopia eletrônica de varredura referente a (a) sílica ativa e (b) cinza da casca de arroz.



Fonte: METHA E MONTEIRO, 2006, p.306

Figura 2- Química da adição da pozolana ao cimento



Fonte: METHA E MONTEIRO, 2006, p.204

A utilização da CCA configura em uma das soluções para o problema ambiental gerado pela deposição deste material, reduzindo as áreas necessárias para descarte deste resíduo agroindustrial e minimizando os riscos potenciais de poluição ao meio ambiente. Por fim, sua incorporação ao concreto implica em uma redução de custos e de energia, na manutenção das reservas naturais e na possibilidade de melhoria do desempenho de algumas variáveis de durabilidade dos concretos que receberem tal adição. Desta forma, a utilização de CCA é justificada por contribuir para a despoluição dos ambientes, por acarretar em uma sensível economia de energia relacionada à produção do clínquer e, por proporcionar a possibilidade de conservação das reservas naturais de calcário e argila. Além disso, por apresentar uma possibilidade de redução no custo final do concreto, quando a ele incorporado.

2.3.1 Temperatura e tempo de queima

A temperatura de queima e as condições de exposição às quais a casca do arroz estará submetida para a obtenção da CCA apresentam forte influência sobre as características físicas e químicas da amostra. A CCA, quando moída adequadamente, torna-se um material muito fino, onde o tamanho da partícula e a sua área específica e conseqüentemente a sua reatividade são dependentes das condições de combustão da casca. O tamanho das partículas, área específica, distribuição dos poros e as fases cristalográficas o efeito das condições de queima da casca de arroz influenciam sobre as características físicas e a atividade pozolânica da CCA produzida (ZHANG e MALHOTRA (1995), JAMES e RAO, 1986 apud HOPPE, 2008).

Os autores estudaram a CCA em diferentes temperaturas de queima, 400°C, 500°C, 600°C, 700°C, 800°C e 900°C, variando o período de exposição de uma a trinta horas e concluíram que a reatividade da CCA é fortemente influenciada pela temperatura a qual a mesma é produzida e mencionam que a maior atividade pozolânica foi apresentada pelas amostras produzidas a uma temperatura estabelecida na faixa de 500°C. A difração de raios-X em amostras de CCA obtida por combustão durante um período de duas horas a 600°C, continha sílica na sua fase amorfa, permanecendo basicamente amorfa para temperaturas até 700°C (CHOPRA, 1979 apud SENSALÉ, 2000). O autor ainda menciona que com o

aumento do período de exposição e da temperatura de combustão, a sílica tende a apresentar formas cristalinas, reduzindo deste modo sua atividade pozolânica.

El-Hosiny et al (1997, p.809) pesquisaram pastas de cimento com a incorporação de CCA queimada em diferentes temperaturas de queima 450°C, 700°C e 1000°C, com um teor em substituição de cimento Portland de 15% em massa. Por meio de sua pesquisa, verificaram que as CCA's produzidas em temperaturas entre 450°C e 700°C apresentaram boa atividade pozolânica, enquanto que a CCA produzida na temperatura de combustão de 1000°C apresentou pouca reatividade. Os autores atribuíram esse fato à formação de cristais de cristobalita e de tridmita na amostra de CCA queimada na temperatura de 1000°C.

Na mesma linha de pesquisa Isaia (1995), relata que quando a CCA é originada por meio de queima controlada entre 400°C e 600°C ter-se-á sílica amorfa abundante e, conseqüentemente, altamente reativa com compostos hidratados do cimento. Da mesma forma, Neville (1997) enaltece o alto teor de sílica presente na casca de arroz, a qual com tratamento a uma temperatura entre 500°C e 700°C origina um material amorfo com uma estrutura preponderantemente porosa.

Chaudhary et al (2002) defende que aquecimentos superiores a 500°C reduzem a quantidade de sílica ativa pois proporciona a formação dos cristais de cristobalita e de tridmita não ocorrendo a remoção das impurezas da CCA como o teor de carbono. A CCA, em geral, apresenta uma coloração variando do preto ao cinza, devido basicamente às impurezas orgânicas, originadas devido ao teor de carbono não queimado (POUEY, 2006). Quanto mais escura a amostra de CCA, maior o teor de carbono não queimado, ou seja, maior a quantidade de matéria orgânica não queimada durante o processo de combustão da casca de arroz. Agarwal (2006) pesquisou a atividade pozolânica de vários materiais silicosos verificando a influência do teor de carbono presente nas amostras de CCA com relação à sua reatividade. O autor concluiu que, para a CCA, quando o teor de carbono das amostras aumentou de 13% para 20% a atividade pozolânica da CCA decresceu de 26% para 23%.

Para a incorporação de CCA como substituição parcial ao cimento Portland para a produção de concreto estrutural, a indústria do cimento necessita de um material pozolânico de qualidade para a sua utilização, ou seja, os métodos de

produção da CCA devem garantir as características de homogeneidade e reatividade do produto final.

Justamente esses fatores são os principais obstáculos para a sua utilização como material pozolânico em concretos estruturais (SUGITA et al, 2004).

No entanto, diversas pesquisas comprovam que mesmo aquelas CCA's originadas de processos de queima não controlados podem apresentar características pozolânicas satisfatórias (ISAIA, 1995).

2.3.2 Efeitos da CCA no concreto

Muitas propriedades decorrentes da incorporação da CCA ao concreto têm sido reportadas por diversos pesquisadores na área tecnológica. Pouey (2006) verificou que ao ser incorporada ao concreto em substituição ao cimento, a CCA modifica a microestrutura da pasta, gerando uma pasta menos heterogênea, mais resistente e apresentando um menor calor de hidratação.

Além disso a CCA, por possuir partículas de pequeno tamanho, promove o efeito *microfiller* (introdução da adição mineral no concreto nos interstícios da pasta, devido ao tamanho da partícula), pois ocupam os espaços vazios deixados pela pasta de cimento, reduzindo porosidade, exsudação e segregação contribuindo na redução de espaços disponíveis para a água e atuando como pontos de nucleação.

Quanto ao processo de aceleração da hidratação do cimento Portland em decorrência da incorporação de CCA, Zhang & Malhotra (1995) pesquisaram pastas e concretos com a incorporação de 10% de CCA e 10% de sílica ativa (SA), como adições minerais em substituição ao cimento Portland em massa e verificaram que, para a mistura de referência, o valor em percentual de cimento não hidratado foi de 22%, depois de 28 dias de cura úmida. Quando houve a substituição de cimento por SA com teor de 10%, a quantidade de partículas não hidratadas de cimento apresentou um decréscimo para 20%. Para a incorporação de CCA com teor de 10%, a quantidade de partículas de cimento anidro apresentou uma diminuição para 18%.

Os autores afirmam que a incorporação de CCA promoveu uma aceleração da hidratação das partículas de cimento.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), para uma determinada consistência do concreto, o emprego de materiais muito finos, de área específica muito elevada, tal

como a CCA, tende a aumentar a demanda de água necessária para uma trabalhabilidade anteriormente estabelecida. Ismail et al (1996) pesquisaram concretos com a incorporação de CCA nos teores de 0%, 10%, 20% e 30% em substituição ao cimento Portland. Segundo os autores, enquanto observavam as características do concreto fresco, eles notaram que quando o cimento era substituído por teores crescentes de CCA, a trabalhabilidade dos concretos decrescia consideravelmente nos traços investigados. Os autores atribuem esse fato à grande quantidade de material fino nas misturas e devido a este fator, um teor maior de aditivo superplastificante foi necessário para atingir a trabalhabilidade requerida.

Quanto aos aspectos reológicos, conforme Mehta e Monteiro (1994), os concretos frescos mostram uma tendência à exsudação e à segregação. Por outro lado, a incorporação de partículas finas, como as partículas de CCA, tende a propiciar uma melhor coesão devido à redução do tamanho e do volume dos vazios.

Zhang e Malhotra (1995) empregando uma relação a/ag de 0,40 e com um teor de substituição de cimento Portland por CCA de 10%, observaram que a exsudação do concreto tornou-se praticamente desprezível. Desta forma, os autores salientam que o emprego de CCA ao concreto tende a produzir concretos mais coesos, com redução considerável da tendência à segregação e à exsudação, quando comparados a concretos sem a incorporação de CCA.

Outro aspecto relevante sobre as propriedades que a CCA confere aos concretos quando adicionada aos mesmos é em relação ao calor de hidratação. A reação de hidratação dos compostos do cimento é exotérmica, onde ocorre o desprendimento de energia, podendo alcançar 500J/g de cimento (NEVILLE, 1997). O calor de hidratação pode ser substancialmente reduzido pela substituição de clínquer de cimento Portland por CCA, onde a quantidade de clínquer diminui e ocorre uma menor liberação de calor durante as reações de hidratação do cimento Portland (DAL MOLIN, 2005). De acordo com Mehta e Monteiro (1994), o calor de hidratação total produzido pelas reações pozolânicas envolvendo adições minerais, entre elas a CCA pode ser considerado como metade do valor médio produzido pela hidratação do cimento Portland.

Segundo Mehta (1994) apud Sensale (2000) os concretos com a incorporação de CCA desenvolvem menor calor de hidratação aos 7 e 28 dias que os concretos sem a incorporação de CCA.

2.3.3 Resistência a compressão axial

Torna-se consensual afirmar que o emprego de CCA em substituição ao cimento Portland acarreta benefícios ao concreto. Alguns deles são obtidos por meio dos efeitos físicos proporcionados pelo tamanho das partículas de CCA e em outros pelas reações pozolânicas.

Em pesquisa realizada por Isaia et al (2000), que investigaram a substituição de cimento por teores de 12,5%, 25% e 50% de CCA, nas relações a/ag 0,35, 0,50 e 0,65, constatou-se, aos 91 dias, acréscimos na resistência para os três teores acima citados. Quando se observam os valores obtidos frente ao referencial na relação a/ag de 0,35, enfatizando como valor máximo 79,4 MPa contra 68,8 MPa do referencial, valor este ocorrido no concreto com 25% de cinza de casca de arroz.

Na relação 0,50, o concreto com adição de 12,5% de CCA apresentou valor inferior ao referencial, enquanto que, nos teores de 25% e 50% valores superiores ao concreto de cimento Portland foram constatados, salientando-se como valor máximo 61,1 MPa oriundo do concreto com 25% de adição. Ao empregar uma relação a/ag 0,65, o concreto com 50% de CCA apresentou resistência à compressão inferior ao referencial. Entretanto, para os teores de 12,5% e 25% valores superiores foram averiguados e, novamente, o concreto com teor de 25% apresentou o maior valor de resistência (42,8 MPa).

Hoppe (2005) investigou a resistência à compressão em concretos produzidos com CCA e CP V ARI com três relações a/ag 0,35, 0,50 e 0,65 para a comparação das misturas (com 10%, 20% e 30% de CCA), na idade de 91 dias, com o concreto de referência. Observou-se que, para a relação a/ag 0,35, os concretos com a incorporação de 10%, 20% e 30% de CCA apresentaram valores de resistência à compressão 13%, 26% e 16% superiores, respectivamente. Para a relação a/ag 0,50, as misturas com 10%, 20% e 30% de CCA apresentaram valores 21%, 22% e 27% superiores e, para a relação a/ag 0,65, essas mesmas misturas apresentaram acréscimos, nos valores de resistência à compressão, de 10%, 19% e 7%, respectivamente em relação ao concreto de referência.

Rego et al (2002) pesquisaram concretos com a incorporação de CCA residual para a produção de concretos com substituição de cimento Portland por CCA nos teores de 0%, 5%, 10% e 20% com uma relação a/ag estipulada de 0,35. O objetivo dessa pesquisa foi a comparação de dados de resistência à compressão

axial dos concretos produzidos, nas idades de 7, 28 e 63 dias. Para a idade de 7 dias, os teores de substituição de 5% e 10% apresentaram respectivamente um aumento de resistência à compressão de 6,3% e 1,4 % enquanto que o teor de 20% apresentou um decréscimo de 6,2% em relação ao concreto de referência. Já para a idade de 28 dias, todos os concretos com a incorporação de CCA apresentaram valores de resistência à compressão superiores ao concreto de referência. Tendência similar foi demonstrada para a idade de 63 dias, com valores 6,0%, 4,8% e 6,5% superiores ao concreto de referência, para os teores de substituição de 5%, 10% e 20% respectivamente.

Com relação à resistência à compressão, o emprego de CCA ao concreto traz ganhos significativos na taxa de desenvolvimento de resistência nas primeiras idades, principalmente devido ao efeito *microfiller*. Segundo Mehta e Folliard (1995) nenhum outro material pozzolânico, exceto a sílica ativa, tem a habilidade de contribuir para o aumento na resistência mecânica do concreto em baixas idades, como 1 e 3 dias como a CCA.

2.3.4 Densificação da zona de transição e redução da porosidade

Durante a produção do concreto, na interface entre o agregado graúdo e a matriz da pasta de cimento, pode existir um acúmulo de água, o que gera um efeito que depende da forma, dimensão e textura do agregado, tornando a relação a/c maior nesta região que é chamada zona de transição. Devido ao maior volume ocupado pela água nesta zona, ocorre a formação de cristais relativamente grandes de etringita e hidróxido de cálcio que tornam esta região mais porosa do que a matriz de pasta de cimento. Com o tempo de hidratação, existe a formação de C-S-H que acaba por preencher os espaços deixados pelos cristais maiores, de forma a conceder resistência e densidade à zona de transição. Sabe-se que esta região é a mais fraca dentre as fases do concreto endurecido (fases do concreto endurecido: matriz da pasta de cimento hidratada, agregados e zona de transição) e a qualidade da zona de transição pode ser controlada para que suas propriedades se assemelhem às da matriz da pasta. Mehta e Monteiro (2006, p. 45) afirmam que, apesar de a porosidade da zona de transição ser maior que a da matriz da pasta, a permeabilidade do concreto é função da pasta de cimento hidratada, que se constitui na única fase contínua presente no concreto.

Com o objetivo de se avaliar os efeitos que a CCA acarreta na zona de transição Zhang e Malhotra (1996) pesquisaram concretos com a incorporação de 10% de CCA e 10% de sílica ativa (SA) como adições minerais, em substituição ao cimento Portland (em massa) analisando-os em função da distância da superfície do agregado na idade 28 dias. Observa-se que a incorporação de CCA reduziu a porosidade da zona de transição entre o agregado e a matriz pasta de cimento em comparação à mistura sem a incorporação de adição mineral.

Além disso, a incorporação de CCA e de SA segundo os autores acarretou na diminuição da espessura da zona de transição entre o agregado e a matriz pasta de cimento. Tanto o refinamento do tamanho dos poros proporcionado pelo tamponamento da rede de poros devido à formação do C-S-H secundário como o refinamento dos grãos ocasionado pelo consumo das partículas maiores de CH proporcionaram o aumento da resistência da zona de transição, que para concretos convencionais, representa o elemento mais vulnerável à presença de microfissuras no concreto (MEHTA e MONTEIRO, 1994 apud HOPE, 2008, p.55).

2.4 Água da Mandioca Brava

A mandioca (*Manihot esculenta Crantz*) desempenha um importante papel na dieta alimentar dos brasileiros, por seu alto teor energético. O Brasil figura como um dos maiores produtores dessa cultura e também como grande consumidor, apresentando em 1999 um consumo de raízes *per capita* de 42,9Kg/hab/ano, enquanto o consumo *per capita* mundial foi de apenas 16,4Kg/hab/ano (FAO, 2003).

A produção de farinha de mesa, a principal forma de aproveitamento das raízes, é uma atividade de importância social porque um grande contingente da população rural participa desta produção, além de representar uma contribuição econômica significativa para os municípios (FONTES, 1999).

A mandioca pertence ao grupo de plantas cianogênicas por apresentar compostos cianícos e enzimas distribuídas em concentrações variáveis nas diferentes partes da planta. Pela ruptura da estrutura celular da raiz, as enzimas presentes (linamarase), degradam estes compostos, liberando o ácido cianídrico (HCN), que é o componente tóxico da mandioca e cuja ingestão ou mesmo inalação, representa sério perigo à saúde, podendo ocorrer casos extremos de envenenamento. Considera-se que a dose letal é de aproximadamente 10 mg de

HCN por kg de peso vivo. Em relação ao teor de ácido cianídrico na raiz, as cultivares são classificadas em mansas: menos de 50 mg de HCN/kg de raiz fresca sem casca; moderadamente venenosas: 50 a 100 mg de HCN/kg de raiz fresca sem casca; e bravas ou venenosas: acima de 100 mg de HCN/kg de raiz fresca sem casca, sendo as cultivares mansas também conhecidas como de mesa, aipim e macaxeira (CAGNON et al, 2002).

A manipueira, um líquido que sobra da prensagem da mandioca para produção de farinha, está sendo utilizado na produção de tijolos ecológicos (UNISOL, 2012). O Brasil participa com mais de 15% da produção mundial de mandioca, com cerca de 27 milhões de toneladas de raízes (SILVA, 2009). A vantagem da utilização deste líquido (resíduo) é a não poluição do meio ambiente, destacando que o trabalho é executado dentro dos princípios da construção ecológica, buscando o mínimo impacto ambiental, enfocando a utilização de materiais regionais e valorizando a mão-de-obra local.

2.5 Corrosão no concreto armado

Segundo Gentil (2012), a corrosão e deterioração observadas no concreto podem estar associadas a fatores mecânicos, físicos, biológicos ou químicos entre os quais são citados como exemplos:

- Fatores mecânicos tem-se como exemplo as vibrações, que podem causar fissuras no concreto podendo proporcionar o contato da armadura com o meio corrosivo. Líquidos em movimento, principalmente contendo partículas, podem ocasionar erosão no concreto, com seu conseqüente desgaste. Se estes líquidos contiverem substâncias químicas agressivas ao concreto, tem-se ação combinada, isto é, erosão-corrosão.
- Fatores físicos, como as variações na temperatura, podem ocasionar choques térmicos que comprometem a integridade da estrutura ocasionando microfissuras. E desta forma aumentando à suscetibilidade de penetração dos agentes agressivos na estrutura.
- Fatores biológicos, como micro-organismos, podem criar meios corrosivos para a massa do concreto e armadura, como aqueles criados pelas bactérias oxidantes de enxofre ou de sulfetos que aceleram a oxidação destas substâncias para ácido sulfúrico.

- Fatores químicos que se dão pelos diferentes ambientes que podem ter a presença de diversas substâncias químicas, as superfícies expostas das estruturas de concreto, a alta alcalinidade, obtida através do hidróxido de cálcio, podem ser reduzida com o tempo, essa redução ocorre pela ação provocada pelo CO_2 do ar entre outros gases ácidos como SO_2 e H_2S . Este processo é chamado de carbonatação, o qual se inicia através de processo lento, atenuando-se com o tempo. A hidratação crescente no cimento e os próprios produtos da reação de carbonatação, que dificultam o acesso de CO_2 do ar para a parte interior do concreto. O processo pode ocorrer com diversas reações, mas sempre um dos produtos finais será o carbonato de cálcio (CaCO_3).

A deterioração por ação química no concreto pode ocorrer na pasta de cimento, no agregado e na armadura de aço-carbono. A corrosão por ação eletroquímica pode ocorrer na armadura. Quando ocorre a deterioração por ação química pode-se observar a expansibilidade do concreto, lixiviação de componentes, ataque do cimento por ácidos, com aparecimento do aspecto típico do agregado. A corrosão eletroquímica do aço empregado nas armaduras pode apresentar, principalmente, as formas de corrosão uniforme, puntiforme, intergranular, transgranular e fragilização por hidrogênio.

- Corrosão uniforme: Trata-se da corrosão sobre toda a extensão da armadura quando exposta ao meio corrosivo;
- Corrosão puntiforme: É um desgaste localizado sob forma de pites ou alvéolos;
- Corrosão intergranular: É a corrosão que se processa entre os grãos da rede cristalina do material metálico. Quando as armaduras são submetidas a solicitações mecânicas, podem sofrer fratura frágil, perdendo o material toda a condição de utilização;
- Corrosão transgranular: É a corrosão que se processa intragrãos da rede cristalina, levando também à fratura quando houver solicitação mecânica;
- Fragilização pelo hidrogênio: é a corrosão ocasionada por hidrogênio atômico que, difundindo-se para o interior do aço da armadura, possibilita a fragilização com consequente perda de ductibilidade e possível fratura da armadura.

As três últimas formas de corrosão na armadura citadas acima são extremamente graves quando se tem a combinação de solicitações mecânicas e meio corrosivo, pois ocorrerá a corrosão sob tensão fraturante, com a consequente fratura da armadura e reflexos na estabilidade das estruturas de concreto armado (GENTIL, 2012, p.211).

A corrosão da barra de aço interna em estruturas de concreto armado ocorre por mecanismo eletroquímico, no qual há pelo menos uma reação de oxidação, e pelo menos uma reação de redução, ocorrendo simultaneamente. Sobre alguns pontos da superfície metálica ocorre a formação de microrregiões anódicas onde se dá a oxidação do ferro gerando íons ferrosos e liberando elétrons:



Estes elétrons liberados, por sua vez irão reagir nas regiões catódicas da superfície metálica com algumas substâncias do eletrólito, reduzindo-as. As reações de redução que ocorrerão são fortemente influenciadas pelo pH da solução nos poros do concreto.

Em meio ácido a reação mais comum de ocorrer é a redução de hidrogênio conforme reação abaixo:



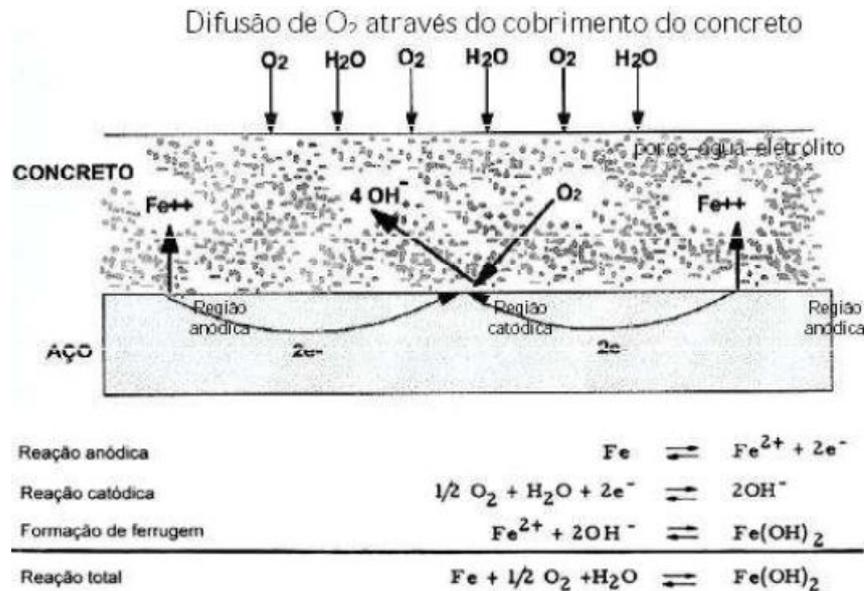
Em meios alcalinos, ou neutros, o oxigênio dissolvido e a água são as espécies que se reduzem:



Tanto o oxigênio quanto o íon hidroxila podem gerar corrosão. O hidrogênio atômico difundindo-se para o interior da barra de aço, pode provocar a fragilização, com consequente perda de ductilidade e possível fratura da barra, desde que o material da barra seja suscetível a esta fragilização (SCHROEDER, 1999). Na Figura (3)

apresenta-se uma corrosão de barra de aço, através das reações anódicas e catódicas.

Figura 3- Esquema da corrosão de armadura no concreto



Fonte: Rattmann, 2005, p.36

2.6 Influência do meio na corrosão do concreto armado

As estruturas do concreto devem ser vistoriadas periodicamente para que eventuais anomalias possam ser identificadas e corrigidas em tempo, mediante tratamento adequado. Nas obras em que os meios possam atuar de maneira desfavorável, é mais comum o aparecimento de corrosão no concreto ou em suas armaduras necessitando uma inspeção especial (CÁNOVAS,1988).

Os tipos de meios destacados com relação à corrosão são os meios de atmosfera rural, urbano, marinha, industrial e viciada (HELENE, 1996).

Atmosfera Rural: são regiões abertas, distantes de fontes poluidoras do ar, com fraca agressão às armaduras no concreto, pelo lento processo da redução da proteção química proporcionada pela película passiva pela alcalinidade. Por falta de ácidos, gases suficientes para depositarem nas superfícies expostas, o aceleração do processo de carbonatação fica impedido, sendo mais lento. Os teores de gases sólidos são desprezíveis a menos que haja uma fonte natural como esterco que libera NH_3 e SO_2 na sua fermentação ou rios e lagos poluídos que possam liberar H_2S .

Atmosfera Urbana: regiões abertas com centros populacionais maiores contendo impurezas em forma de óxidos de enxofre e outros agentes agressivos. O ar atmosférico é a combinação de ar seco e vapor da água. A umidade do ar é um fator importante porque afeta a velocidade da corrosão atmosférica. Na atmosfera urbana não há a formação de barreiras protetoras, com isso o processo de corrosão pode acelerar, a ferrugem aumenta, a superfície fica exposta e com isso a condensação de umidade e deposição de fuligem também aumenta.

Atmosfera Marinha: regiões abertas sobre o mar e perto da costa, contendo em sua atmosfera cloretos de sódio e de magnésio, podendo ter sulfatos, esses elementos são agressivos e podem acelerar o processo de corrosão das armaduras. A possibilidade de corrosão na atmosfera marinha pode variar de 30 a 40 vezes maior do que na atmosfera rural.

Atmosfera Industrial: regiões abertas, industriais, com gases e cinzas agressivos. Contendo gases ácidos que podem reduzir a alcalinidade do concreto aumentando a velocidade de carbonatação, destruindo o revestimento do aço. Essas regiões podem acelerar entre 60 a 80 vezes o processo de corrosão quando comparadas com as rurais. A ação danosa deve ser considerada em conjunto com a umidade da região, podendo assim ocorrer a corrosão.

Atmosfera Viciada: locais fechados cuja taxa de renovação do ar é baixa, nesses locais é intensa a concentração e geração de gases agressivos ao concreto. Nos esgotos pode-se encontrar o ácido sulfúrico, à medida que o esgoto flui pela rede coletora a concentração de ar diminui pela demanda ser maior que o fornecimento, assim o ar é exaurido e os sulfetos aparecem. Os sulfatos também podem ser encontrados na água potável e conforme o seu uso o sulfato pode aumentar. Quando em ambiente fechado, sem oxigênio, as bactérias, por falta de oxigênio, acabam por consumir os íons sulfatos, deixando assim os íons sulfetos livres, resultando no íon HS⁻ e gás sulfúrico. Esse gás quando liberado pode ser absorvido pelo coletor, sendo oxidado mais uma vez através de bactérias aeróbicas, assim transformando-se em ácido sulfúrico.

2.7 Passividade da armadura

Um concreto de boa qualidade proporciona uma excelente proteção física e química à armadura nele embutida. Há na pasta do cimento Portland um equilíbrio

estável entre a fase sólida, composta de silicatos de cálcio hidratados insolúveis, e o fluido dos poros com pH 13 a 14 originados pela concentração de íons Na^+ , K^+ , Ca^{+2} e OH^- . A alta alcalinidade dos poros do concreto e a disponibilidade de oxigênio são uma proteção química e permitem a existência espontânea de um filme de óxido de ferro, isto é, de Fe_2O_3 e/ou Fe_3O_4 . O Diagrama potencial x pH, estabelecido por Gentil (2012, p.25) para o sistema ferro-solução a 25°C prevê este filme que normalmente é transparente, compacto, contínuo e estável, agindo como uma barreira altamente protetora contra a dissolução do ferro por um período de tempo indefinido.

A composição deste filme de óxido passivo já foi objeto de estudo de muitas pesquisas:

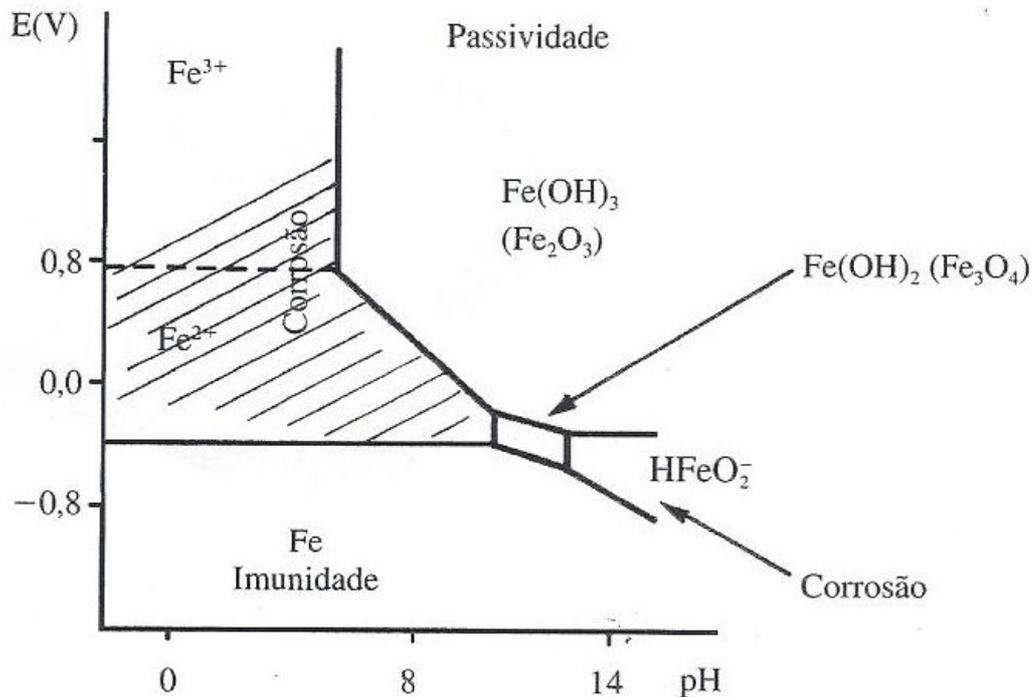
Reinoehl e Beck (1969) descreveram a ocorrência de um filme passivo de composição que varia continuamente, ou seja, uma camada de Fe_2O_3 na interface metal/óxido e uma de $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ mais oxidada na interface óxido/solução.

Gutiérrez e Martínez (1986) estudaram a camada passiva de ferro em soluções alcalinas (pH=13) através da técnica de PMR (*Potential-modulated reflectance*), e identificaram compostos como magnetita (Fe_3O_4) e /ou hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) e íons Fe^{+2} .

Schmuki et al (1995) e Schmuki e Virtanen (1997) demonstraram que o filme passivo de ferro pode ser formado de Fe_2O_4 com pouquíssimo Fe^{+2} ou formado por $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ contendo na sua estrutura aproximadamente, 5% de Fe^{+2} .

Observa-se no Diagrama de Pourbaix Figura (4), para o ferro, que este material, em um meio com um pH da ordem de 12, encontra-se passivado por uma película Fe_3O_4 ou Fe_2O_3 ou pela mistura desses dois óxidos, dependendo do potencial de corrosão das armaduras. Porém, este equilíbrio pode romper-se quando o pH do concreto aumenta (>13) ou é reduzido (< 8) (GENTIL, 2012).

Figura 4 - Diagrama simplificado de potencial e pH sistema Fe-H₂O



Fonte: Gentil, 2012, p.25

A maioria dos processos de corrosão na armadura estão relacionados com o mecanismo de transporte no concreto

2.8 Mecanismos de transporte no concreto

Segundo Nepomuceno (1992), o principal fator de deterioração de estruturas de concreto armado é a interação do meio ambiente com o concreto. Esta interação ocorre através da penetração de agentes agressivos pelos poros do concreto. O que determina esse mecanismo de transporte no concreto é a configuração dos poros (tipo e distribuição do tamanho dos poros ou microfissuras) e o seu preenchimento com água (NEVILLE, 1997), bem como as microfissuras na matriz da pasta de cimento hidratado e da interface pasta-agregado Fib Bulletins (1999) apud Abreu (2004).

Cascudo (1997) apud Abreu (2004) também considera que a estrutura porosa da pasta de cimento endurecida é o que influencia decisivamente no transporte de substâncias no interior do concreto. Segundo o autor, a interconexão dos poros determina a porosidade aberta, que possibilita o transporte das substâncias dentro

do concreto; já a distribuição do tamanho dos poros interfere na velocidade de transporte.

Os mecanismos de transporte no concreto dependem ainda das características físicas e químicas e da concentração superficial das substâncias que penetram no material, das condições ambientais, do grau de umidificação do concreto e da temperatura (NEPOMUCENO (1992) apud ABREU (2004)). Por outro lado, a capacidade de fixação dos íons agressivos por parte do concreto, através de reações químicas ou de adsorção física, reduz o potencial agressivo destes.

O ingresso de fluidos (líquidos e gases) e íons agressivos no concreto ocorre através da permeabilidade (infiltração ou penetração sob pressão externa), difusão (gradiente de concentração), absorção (pressão interna) e da migração (efeito de um campo elétrico) (FIB BULLETINS (1999) apud ABREU (2004)). Estes mecanismos podem atuar simultaneamente, ou sucessivamente, ao longo do tempo, dependendo das condições de exposição (temperatura, umidade, dentre outras) a que o concreto esteja submetido. A seguir serão descritos os principais mecanismos de transporte no concreto.

2.8.1 Permeabilidade

A permeabilidade pode ser definida como a facilidade com que um fluido pode escoar através de um sólido, sob um gradiente de pressão externa, sendo determinada pela continuidade e tamanho dos poros na estrutura do sólido (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

O mecanismo de penetração de água sob pressão se caracteriza pela existência de um gradiente hidráulico que força a entrada da água no concreto (FERREIRA (1999) apud PEREIRA (2001)). Este tipo de movimentação está diretamente relacionado com a porosidade, e sua determinação se constitui em um mecanismo indireto de medição desta propriedade do concreto.

Os principais fatores que determinam a formação da estrutura de poros e que portanto influenciam a facilidade com que fluidos, líquidos ou gases penetram e se deslocam pelo concreto, sob os mais distintos gradientes de pressão, são o tipo de cimento, relação água/cimento, o grau de hidratação do cimento, o teor e tipo de adição, a presença de microfissuras ou fissuras (RASHEEDUZZAFAR, 1992).

Neville (1997) mostra dados em que o valor do coeficiente de permeabilidade no concreto decresce até 4 ordens de grandeza com a diminuição da relação água/cimento de 0,75 para 0,26, sendo que, no intervalo da variação da relação água/cimento de 0,75 a 0,45, a permeabilidade decresce duas ordens de grandeza. A Tabela 5 mostra valores do coeficiente de permeabilidade em diversas idades de uma pasta de cimento.

Tabela 5. Relação entre permeabilidade e relação água/cimento para pastas com 93% do cimento hidratado

Idade (dias)	Coeficiente de Permeabilidade-K(m/s)
Fresco	2×10^{-6}
5	4×10^{-10}
6	1×10^{-10}
8	4×10^{-11}
13	5×10^{-12}
24	1×10^{-12}
Final	6×10^{-13}

Fonte: NEVILLE, 1997

De acordo com Neville (1997), o gel de silicato de cálcio hidratada apresenta, em média, uma porosidade de 28%, porém os poros são muitos pequenos e por isso a permeabilidade ocorre em maior escala através dos poros capilares. Com o decorrer da hidratação do cimento, os poros capilares vão sendo preenchidos pelo gel e assim a permeabilidade diminui, sendo este fenômeno mais pronunciado em concretos com menores relação água/cimento. Segundo Helene (1993), o coeficiente de permeabilidade pode variar seis ordens de grandeza de 1 a 28 dias, conforme se processa a hidratação do cimento, devido a mudanças na estrutura de poros do concreto durante este período esta situação pode ocorrer em estruturas submersas ou parcialmente submersas.

Para o regime laminar, estacionário e não turbulento, a permeabilidade de água no concreto pode ser modelada pela lei de Darcy, conforme a equação abaixo (NEVILLE, 1997).

$$V = k \frac{H}{x} = \frac{Q}{S} \quad (5)$$

Onde:

V = velocidade de percolação da água, em m/s;

k = coeficiente de permeabilidade da água no concreto, em m/s;

H = gradiente de pressão da água, em m.c.a;

x = espessura de concreto percolado pela água, em m;

Q = vazão de água percolada, em m³/c;

S = área da superfície confinada por onde percola a água, em m².

A penetração de cloretos no concreto através deste fenômeno é de importância em casos particulares de estruturas marinhas ou estruturas com grande pressão hidrostática, como, por exemplo, reservatórios de água (KROPP, 1995).

2.8.2 Absorção capilar

De acordo com Petrucci (1987), absorção capilar é o processo físico pelo qual o concreto preenche e retém água nos poros e condutos capilares devido à tensão superficial atuante nestes.

Como o concreto é um material hidrófilo, que tem grande afinidade com água, torna-se difícil controlar a absorção capilar da água no mesmo. Segundo Ferreira (1999) apud Pereira (2001), a tendência do concreto de adsorver água vai ocasionar, se existir disponibilidade suficiente de água, uma sucção de água para o interior dos poros. Se estes poros forem muito pequenos, este fenômeno poderá provocar um acréscimo na profundidade de penetração, gerando o efeito conhecido como ascensão capilar.

Ho e Lewis (1987) comentam que uma absorção lenta indica a existência de capilares de pequenos diâmetros, com maior profundidade alcançada, o contrário de uma absorção rápida que indica a existência de capilares maiores com menor profundidade atingida e maior quantidade de água adsorvida. O que demonstra que, nas estruturas expostas ao ar, a taxa de absorção de água por absorção capilar serve como um indicativo do transporte de água no concreto. Entretanto, segundo Helene (1993), o mais importante é a intercomunicabilidade dos capilares, sendo menos relevante o diâmetro desses, pois de acordo com suas constatações, concretos de baixa relação água/cimento possuem capilares de menor diâmetro e ao

mesmo tempo muito menos intercomunicáveis, resultando em menor absorção de água e, também, menor profundidade de penetração dessa água.

Helene (1986) observou, em concretos de cimento Portland comum, a 28 dias de idade, alturas ou profundidades de penetração de água por absorção capilar de 2cm para relação água/cimento de 0,4 e de 6cm para relação de 0,60, durante um período de 24 horas.

De acordo com Helene (1993), a absorção capilar pode ser modelada pela lei de Jurim, conforme equação abaixo, que relaciona a altura de ascensão capilar ao tempo de contato com a água:

$$h = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{v \cdot r \cdot t}{\eta}}$$

(6)

Onde:

h = altura ou penetração da água no capilar, em m;

v = tensão superficial da água, em kg/m ($\approx 75 \times 10^{-4}$);

r = raio do capilar, em m;

η = viscosidade de água, em kg.s/m²;

t = período de tempo para atingir a penetração h, em s.

Uma vez que atingida uma determinada altura de ascensão, pode-se afirmar, quando comparada a difusão, que a partir da saturação, a absorção capilar é de duração limitada, pois as forças capilares passam a ser insuficientes para gerar movimentação do fluido, até que as condições se alterem (CALÇADA, 2000). Segundo a mesma autora, há um limite para o tempo de absorção, a partir da penetração do líquido para o ingresso contínuo por difusão.

O ingresso da água por absorção capilar depende das características do líquido, tais como viscosidade, densidade e tensão superficial, e das características do concreto, como estrutura dos poros (raio, tortuosidade e continuidade dos capilares) e teor de umidade (BAUER, 1995; NEPOMUCENO, 1992). Deve-se considerar o maior ou menor grau de hidratação do concreto. Não há absorção capilar em concretos saturados, pois o concreto deve estar com os poros secos ou parcialmente secos para que seja possível a absorção de água por capilaridade (HELENE, 1993).

A absorção capilar ocorre principalmente em concretos aparentes e naqueles em contato com solos úmidos e/ou sujeitos a ciclos de umedecimento. Com relação à penetração de íons cloretos, é o principal mecanismo quando a estrutura está submetida a ciclos de molhagem e secagem. No período de molhagem a superfície absorve rapidamente a solução de cloreto e, no período de secagem, a água evapora e o sal se deposita no concreto. Com os ciclos posteriores há um progressivo aumento da concentração de cloretos na solução dos poros do concreto. Dependendo da umidade relativa do ambiente, o sal reduz a evaporação aumentando a umidade no interior do concreto, devido a sua higroscopicidade (KROPP, 1995).

2.8.3 Difusão de íons

A difusão pode ser entendida, segundo Silva Filho (1994), como o mecanismo pelo qual o fluido se movimenta em função da existência de um diferencial de potencial químico ou de um gradiente de temperatura/umidade e, ao contrário dos mecanismos de transporte anteriores, não depende do fluxo de fluídos. Durante o fenômeno, a substância se difunde em uma direção de forma a igualar as concentrações, eliminando o gradiente. Quando o gradiente se mantém através da entrada e saída contínua da substância no sentido do extremo de maior concentração para o de menor, obtém um fluxo contínuo, ou também chamado estado estacionário.

Este fenômeno ocorre tanto para substâncias presentes em meio líquido como para aquelas em meio gasoso. Os dois principais agentes agressivos que comprometem a armadura, o CO_2 e os íons cloretos, tem sua penetração controlada principalmente por este fenômeno. Entretanto, como o enfoque dado neste trabalho é para penetração de cloretos, apenas o fenômeno que ocorre em meio líquido será discutido.

No concreto a difusão ocorre devido ao contato íntimo da solução presente nos poros com o meio ambiente, sendo o fenômeno mais intenso quanto maior a sua concentração na solução externa (MONTEIRO, 1996).

Fick foi o primeiro pesquisador, em 1855, que realizou uma adaptação da equação empírica de Fourier, de condução de calor, ao fenômeno da difusão. O mesmo definiu que o fluxo de uma substância através de um meio é diretamente

proporcional ao produto da difusividade pelo gradiente de concentração, medido na direção perpendicular à seção do fluxo de acordo com a equação abaixo (TUIUTI).

$$J = - D_{\text{eff}} \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \quad (7)$$

Onde:

J = fluxo da substância, em mol/(cm².s);

D_{eff} = coeficiente efetivo de difusão, em cm²/s;

$\frac{\partial c}{\partial x}$ = gradiente de concentração na direção do fluxo, em mol/cm⁴.

O sinal negativo indica que o fluxo ocorre no sentido oposto ao aumento de concentração. Esta equação é chamada de primeira lei de Fick e se aplica para fenômenos de difusão em estado estacionário, para o cálculo do coeficiente efetivo de difusão (D_{eff}). Quando esta condição não é atendida, ou seja, para o estado não estacionário, que contempla o fluxo variável com o tempo e a profundidade de penetração, recorre-se à segunda lei de Fick, para o cálculo do coeficiente aparente de difusão (D_a) conforme a equação abaixo:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_a \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (8)$$

A solução para a equação (8) é dada pela equação abaixo

$$\frac{C - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \text{erf} \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_a \cdot t}} \right) \quad (9)$$

Onde:

C = concentração na profundidade considerada;

C_0 = concentração inicial do agente agressivo que penetrou no interior do concreto;

C_s = concentração do agente agressivo na superfície do concreto, admitida constante;

erf = função do erro de Gauss;

x = profundidade considerada, geralmente em m;

D_a = coeficiente aparente de difusão, geralmente em m^2/s ;

t = tempo considerado, geralmente em s.

Pode-se utilizar esta lei para prever a vida útil de um elemento de concreto armado pois, conhecendo-se os parâmetros como C , C_0 , C_s e D_{eff} , é possível estimar em quanto tempo (t), os agentes agressivos alcançarão a armadura. Outra informação importante, que pode ser obtida, é o tempo (t) necessário para que a concentração de cloretos (C) alcance a concentração de cloretos (C) no valor da concentração limite para que haja corrosão (ANDRADE, 2000). Segundo Cabral (2000), existem outras formulações mais recentes para se modelar a penetração de agentes agressivos para o interior do concreto, mas a segunda lei de Fick é utilizada em função da sua simplicidade de resolução matemática e devido a sua consagração, quando comparada às demais formulações propostas, que ainda necessitam de validações mais consistentes.

Entretanto, estas leis são válidas para materiais homogêneos, com poros contínuos, que não reagem com íon em movimento e não mudam com o tempo (DHIR et al, 1998). Para estudar o fenômeno da difusão em materiais porosos é necessário conhecer a sua estrutura de poros. No caso do concreto, um material com estrutura de poros complexa, esse estudo torna-se difícil. Por isso os estudos de difusão nesse tipo de material, em geral, sofrem alguma simplificação como, por exemplo, considerar os poros como simples capilares cilíndricos (FRANCINETE JR. e FIGUEIREDO, 1999).

Para que ocorra difusão iônica no concreto é necessário um certo teor mínimo de umidade, que permita a movimentação do íon, assim quando o mesmo encontra em seu caminho uma região seca a difusão é interrompida. A difusão iônica é mais efetiva quando os poros da pasta de cimento hidratado estão saturados, mas também ocorre em concretos parcialmente saturados (NEVILLE, 1997).

Quando os poros do concreto estão totalmente saturados de água e o sistema está submetido a baixas pressões, o processo de ingresso predominante é o mecanismo de difusão dos cloretos, podendo-se considerar neste caso um estado de difusão pura (ANDRADE et al apud GUIMARÃES, 1997).

Conforme Helene (1993), as adições aumentam a resistência do concreto à penetração de cloretos. Outro fator de alteração da difusividade está relacionado com as características do cimento, devido ao fato de parte dos cloretos reagir com certos compostos da hidratação do cimento, retendo-os. Segundo Neville (1997), deve-se notar que o coeficiente de difusão varia com a idade, porque o sistema de poros do concreto varia com o tempo, especialmente com a evolução de hidratação do cimento.

O coeficiente de difusão depende de vários fatores. Alguns já foram citados acima, tais como o tipo de cimento; a incorporação de adições no concreto; o grau de saturação dos poros, influenciando o grau de saturação dos poros, podendo ser citados também a porosidade, a natureza do líquido que difunde, a temperatura, a relação água/cimento e o tipo de cátion presente na solução do poro (HELENE, 1993). De acordo com Neville (1997), o aumento da relação água/cimento pode representar um aumento da difusividade, porém esta influência é bem menor no processo de difusão do que nos outros mecanismos de penetração de cloretos. Outro fator importante é que, como os íons são carregados eletricamente, durante o processo de difusão há movimentação de outros íons para que a neutralidade elétrica seja mantida. Por isso podem ocorrer trocas iônicas entre a solução dos poros e a superfície do concreto. Segundo Kropp (1995), à medida que a solução seja, respectivamente, de cloreto de sódio, cloreto de cálcio ou cloreto de magnésio, a taxa de difusão cresce. Para Gjørsv et al (1994) a troca no tipo de cátion, por exemplo de sódio para cálcio, na solução fonte de cloreto, pode aumentar a taxa de penetração de cloreto, portanto, o coeficiente de difusão obtido de diferentes tipos de solução de sal não são comparáveis.

2.8.4 Migração de íons

O mecanismo de migração é um processo de transporte forçado de íons pela ação de um campo elétrico. Este campo elétrico pode ser oriundo da deflagração de pilhas de corrosão eletroquímica ou de uma diferença de potencial gerada por uma fonte externa (HELENE, 1993).

Durante este fenômeno, os íons cloreto (com carga negativa) se movem no sentido da armadura, desde que a mesma esteja polarizada positivamente (BAUER, 1995).

O transporte de massa, neste caso, obedecerá a lei de Faraday (HELENE, 1993), descrita na equação abaixo:

$$m = \frac{i \cdot t \cdot a}{n \cdot F} \quad (10)$$

Onde:

m = massa do metal corroído, em g;

i = corrente elétrica em A;

t = tempo em s;

a = massa atômica;

n = valência dos íons de metal;

F = constante de Faraday (96.493C).

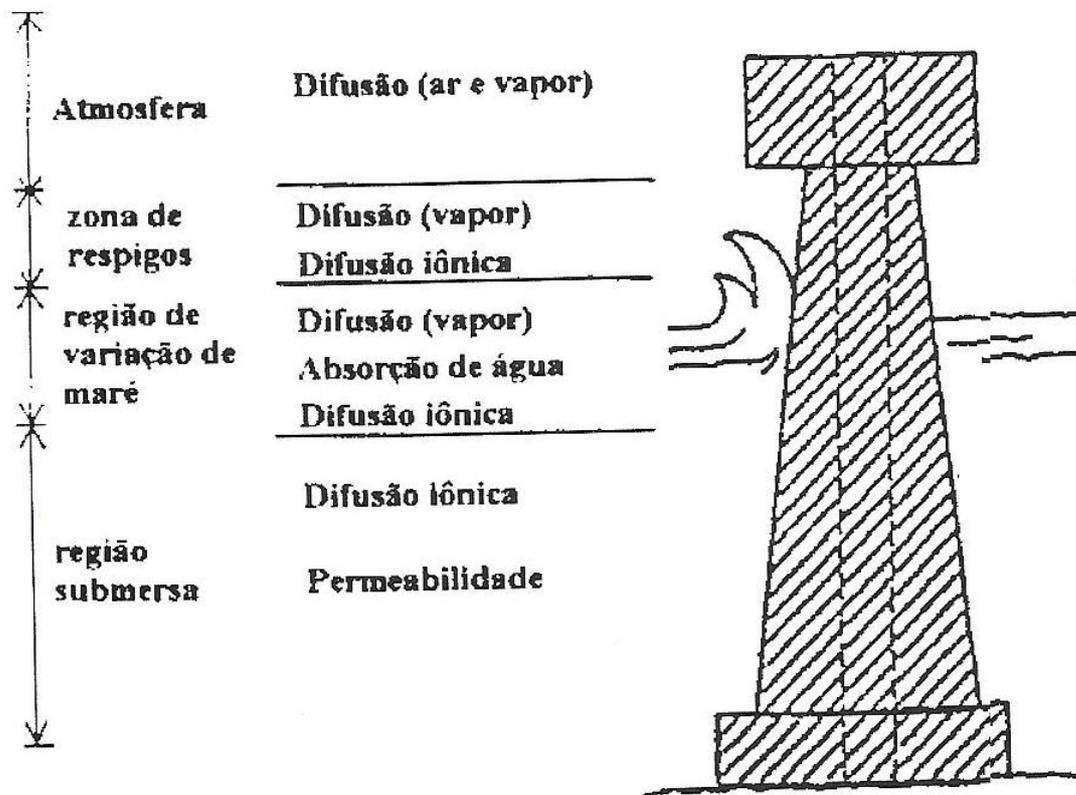
A maior ou menor resistência à migração de íons cloretos também está vinculada aos fatores que influenciam na penetração de cloretos citados anteriormente.

2.8.5 Mecanismos combinados

Segundo Helene (1993), as maiores penetrações de cloreto são observadas onde os mecanismos de penetração de cloretos podem atuar simultaneamente. Helene apud Gallupo (1985), apresenta uma proporção de 1:3:10 para situações onde ocorre difusão pura, difusão associada à absorção capilar e os três mecanismos de penetração em conjunto, respectivamente.

De acordo com Guimarães (1997), geralmente a difusão pura ou a permeabilidade pura só acontecem em estruturas saturadas, onde as forças capilares não podem atuar. Já para o concreto seco ou não saturado, a sucção capilar é o fenômeno predominantemente. A Figura (5) ilustra como uma mesma peça estrutural pode estar sujeita a diferentes mecanismos de transporte.

Figura 5- Atuação simultânea de diversos mecanismos de transporte em uma estrutura marítima



Fonte: *Concrete Society Working Party apud Perraton et al, 1992*

2.9 Corrosão do concreto armado por ataque de íons cloretos

Os íons cloretos podem penetrar no concreto por meio de aceleradores de pega, água de amassamento e de agregados. Outra forma de penetração ocorre frequentemente nos ambientes marinhos (maresia) através de rede de poros. Outro mecanismo marinho encontrado em climas quentes seria o de transporte por forças capilares, muito próprio de ambientes de “névoa salina”.

Grande parte dos processos de corrosão da armadura se dão devido à ação dos íons cloretos que afetam a durabilidade das estruturas de concreto armado, estes presentes em determinadas quantidades podem causar a despassivação do aço inclusive em um meio de alto pH, como é o concreto sem carbonatação.

Segundo Andrade (1992), os cloretos podem ser encontrados no concreto através de cloretos livres (dissolvidos na fase aquosa do concreto) ou como cloretos combinados, formando parte das fases hidratadas do cimento. Os cloretos livres são os mais perigosos e agressivos a armadura já no segundo caso se encontram

combinados na forma de cloroaluminatos. A soma de ambos é denominada de cloretos totais. Embora os cloretos solúveis sejam os únicos capazes de corroer o concreto, é importante determinar os cloretos totais, também levando em conta que parte dos combinados podem vir a ficar disponível para reações deletérias devido a fenômenos como a carbonatação ou aumento de temperatura.

As armaduras nas estruturas de concreto armado encontram-se protegidas pela elevada alcalinidade do meio em que estão inseridas e por uma barreira física que é o revestimento.

Essa ruptura da camada passiva, formada de óxidos, pela ação dos íons cloreto, se dá localmente, ou seja, a presença destes íons provoca uma dissolução pontual desta película e, dada a presença de água e oxigênio, facilita o início do processo corrosivo. Esta ruptura da camada protetora de passivação pelos cloretos gera pequenas áreas ativas, com um pH muito baixo, em torno de 3, que funcionam como ânodo e nas quais, o metal é dissolvido.

Nas proximidades há a zona catódica, de elevado pH, em torno de 13,5, onde ocorre a redução do oxigênio (NEPOMUCENO, 1992). Vale ressaltar que os íons cloreto não são consumidos nas reações de corrosão, permanecendo sempre presentes.

2.10 Mecanismo de rompimento da camada passiva do concreto armado por ação dos cloretos

De acordo com Rattmann (2005), existem três teorias que resumem os efeitos dos íons cloretos na corrosão do aço:

Teoria da Adsorção => se dá quando os íons são adsorvidos na superfície metálica em confronto com o oxigênio dissolvido ou com os íons hidroxilas, a dissolução é facilitada através da hidratação dos íons metálicos promovidos pelo cloreto.

Teoria do Filme óxido => ocorre quando os íons de cloreto penetram no filme de óxido passivamente sobre o aço por meio de poros ou defeitos ou dispersão coloidal. Os íons cloreto diminuem a tensão superficial interfacial ocorrendo a formação de rupturas e falhas deixando o filme passivo debilitado.

Teoria do Complexo transitório => os íons cloreto competem com os íons hidroxilas para produzirem os íons ferrosos, através disto forma-se um complexo

solúvel de cloreto de ferro, este cloreto tem a possibilidade de se difundir através de áreas anódicas, assim ocorre a destruição da camada protetora de $\text{Fe}(\text{OH})_2$ e com isso se permite a continuação do processo corrosivo. A corrosão deverá ser estancada, caso contrário mais íons de ferro continuarão a migrar dentro do concreto a partir da corrosão, e assim reagem com o oxigênio a fim de formar óxidos com o volume quatro vezes maior, causando tensões internas e fissuras no concreto.

2.11 Limite crítico de cloretos

Existem diversas normas de diferentes países que limitam o conteúdo de cloreto, sendo que há grandes variações de um país a outro. Isto se dá devido a uma certa dificuldade em estabelecer um limite seguro de cloretos sem que exista algum comprometimento de despassivação do aço, já que este limite depende de certas variáveis, como o tipo de cimento (finura, conteúdo de gesso, conteúdo de aluminato tricálcico, etc.), proporção de cimento, relação água/cimento, conteúdo de umidade e outros (Tabela 06). Além dessas poderia surgir o aumento da quantidade de água (NBR 6118:2007) ou pelo aumento do consumo de cimento (Normas Estrangeiras), no qual estaria apta a aumentar o teor de cloretos na massa de concreto sem danos a armadura.

Tabela 6. Teor limite de cloretos proposto por diversas normas

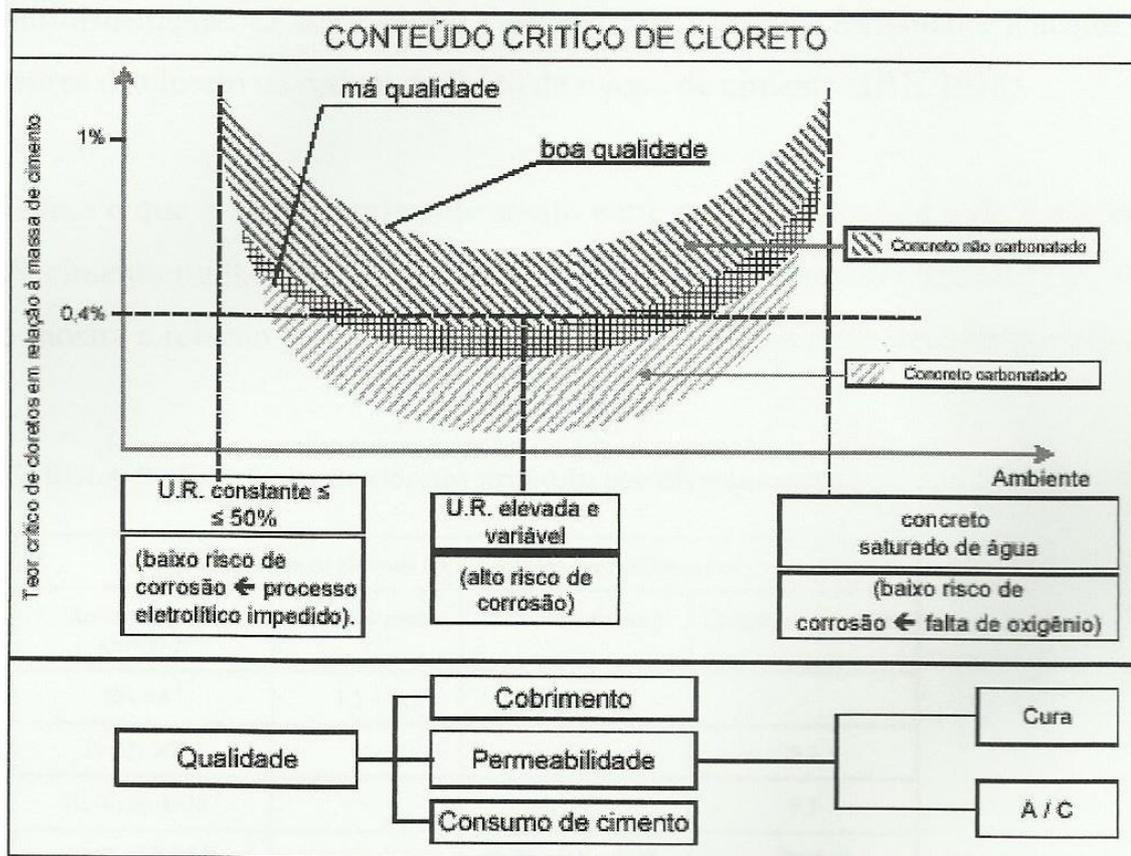
Normas	Teor de Cl^- para concreto armado (%)
EH - 88 (Espanhola)	0,40
Pr EN-206 (Espanhola)	0,40
BS - 8110/85 (Inglesa)	0,20-0,40
ACI - 318/83 (Norte Americana)	- 0,15 - 0,30 - 1,00

Fonte: Andrade (1992, p.26)

Dos valores apresentado na Tabela 06, podemos destacar 0,4% como sendo um valor de consenso na maioria das normas, posto como índice máximo admitido, porém a *Federal Highway Administration*, nos EUA, estabelece que uma concentração de íon cloro maior que 0,3% já é considerada perigosa. A norma Brasileira NBR 6118:2007 estabelece um teor máximo de cloretos de 500mg/l, relacionado ao peso da água de amassamento, considerando os traços

normalmente utilizados no Brasil, esse limite passa a ser da ordem de 0,02% do peso do cimento. Portanto a Figura (6) expressa de maneira mais clara o teor crítico de cloretos em função do concreto e da umidade.

Figura 6- Esquema de variação do teor crítico de cloretos em função da qualidade do concreto e a umidade do ambiente



Fonte: Cascudo, 1997, p.49

2.12 Medida da profundidade de alcance dos íons cloretos no interior do concreto armado

Medida utilizada para expressar a profundidade em que o conteúdo crítico de cloreto atinge em relação à superfície do concreto (FIGUEIREDO, 1993).

A medida é realizada através de amostras retiradas da estrutura em forma de pó ou sólidas. As amostras devem ser retiradas de pontos estratégicos afim de representar toda a estrutura. A análise quantitativa do íon de cloreto pode ser feita quimicamente ou através da fluorescência de raios-X, entre outros.

Para se determinar o teor de cloretos existem vários métodos de ensaio pode-se associar o teor de cloretos totais ao teor medido por meio de dissolução em ácido e o teor de cloretos livres ao teor medido por meio de dissolução em água.

Quando o objetivo é comparar com valores estabelecidos por normas, torna-se mais apropriado o utilizar limites totais, normalmente expressos em %Cl/kg de cimento.

2.13 Técnicas eletroquímicas de avaliação e monitoramento da corrosão

As técnicas eletroquímicas nas quais são utilizadas para o estudo da corrosão de armaduras no concreto permitem uma avaliação cinética da corrosão, a partir da sua intensidade e uma avaliação das reações parciais com suas variáveis influentes no fenômeno global (LIMA, 2000).

Para que tal avaliação seja precisa é necessário o emprego de mais de uma técnica, assim aumentando a confiabilidade nas respostas obtidas.

Poderão ser utilizados métodos para analisar a superfície, técnicas gravimétricas ou então a combinação de mais de uma técnica eletroquímica.

2.13.1 Potencial de Corrosão

O potencial eletroquímico de corrosão é uma grandeza que indica aproximadamente o estado de corrosão ou passividade das armaduras.

Fornecer também informações qualitativas que devem ser utilizadas como complementação de outros ensaios e nunca de forma isolada ou absoluta (OLIVEIRA, 2005 apud DUGATTO, 2006, p.70).

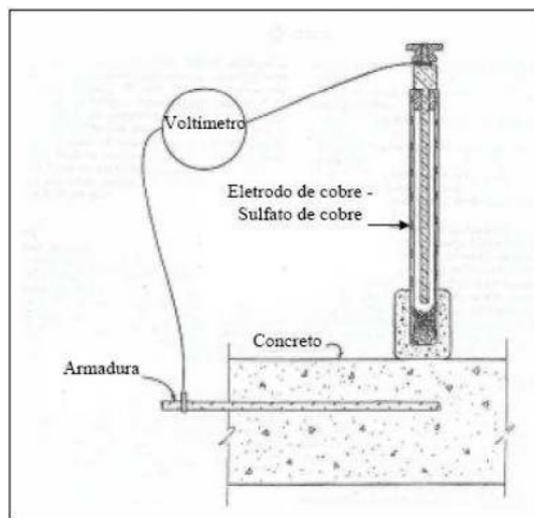
A medida determina a diferença de potencial elétrico entre as armaduras e um eletrodo de referência, onde se coloca em contato com a superfície do concreto. Essa medida tem como vantagem ser uma técnica não destrutiva e de fácil aplicação, sendo que o equipamento é de baixo custo. Lima (2000) prescreve a norma A ASTM C – 876 (1991), tratando-se de um método de ensaio para obter potenciais de corrosão em concreto, podendo ser ensaiado no laboratório.

Dotto (2005, p.273) concluiu que o monitoramento do potencial de corrosão é uma importante medida qualitativa para se avaliar o estado de corrosão da barra embutida no concreto. Medidas de potencial de corrosão também se mostram

bastante úteis para a análise do efeito de inibidores de corrosão no concreto (Lima, 2000). Subramaniam et al (2010) com o auxílio de medidas de potencial de corrosão predizeram o efeito da corrosão conforme a disponibilidade de oxigênio e cloreto ao longo da armadura em um concreto com rachaduras.

Na Figura (7) podemos visualizar a ilustração deste método de ensaio para medir o potencial de corrosão.

Figura 7- Representação do método de ensaio para medir o potencial de Corrosão



Fonte: Norma A ASTM C – 876 (1991)

O critério de avaliação dos valores obtidos na medida de potencial de corrosão está descrito na norma A ASTM C – 876 (1991), e indica a probabilidade de ocorrência da corrosão. Na Tabela 7 são apresentados critérios de avaliação através da medida de potencial de corrosão.

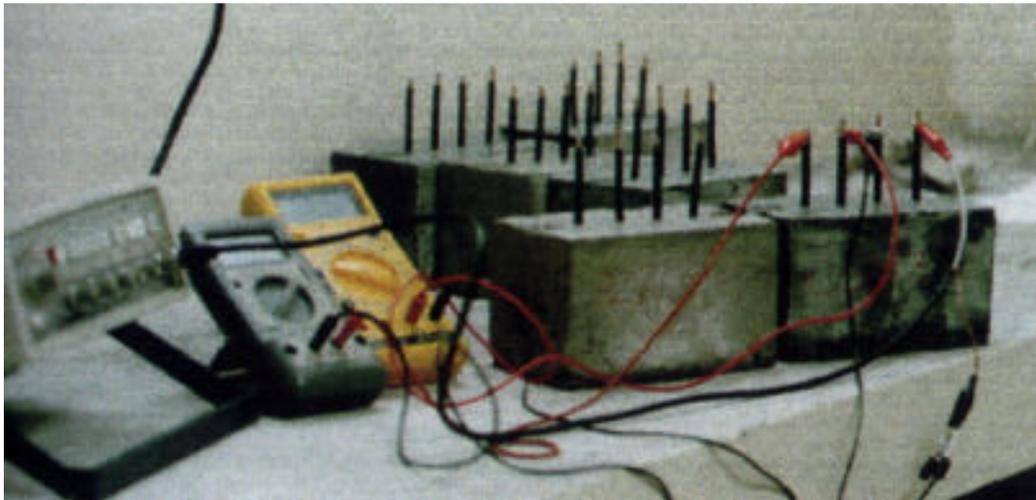
Tabela 07. Critério de avaliação através da medida de potencial de corrosão

Potencial de Corrosão Relativo ao Eletrodo de Referência de Cobre-Sulfato de Cobre	Probabilidade de Corrosão
< -350	>95%
Entre -200 e -350	50%
> -200	<5%

2.13.2 Medidas de resistividade elétrica do concreto

Trata-se de uma medida fundamental para definição do processo inicial da corrosão. Nesta técnica uma maior medida de resistividade está associada a uma maior resistência contra a corrosão uma vez que temos, nesta situação, um concreto menos poroso ou com menos eletrólito disponível (ABREU, 1998). Esta técnica é normalizada pela norma ASTM G-57 para uso em solos, sendo mais tarde adaptada para uso em concreto. A Figura (8) apresenta o ensaio de medida de resistividade.

Figura 8- Ensaio de medida de resistividade



Fonte: Abreu, 1998

O valor da resistividade de acordo com a fórmula de Frank Wenner é calculado através da equação (11):

$$\rho = R \times K$$

$$K = \frac{4\pi a}{\frac{i+2a}{\sqrt{a^2+b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2+4b^2}}}$$

(11)

onde:

- ρ = resistividade calculada do concreto em ohm.cm;
- R = resistência medida pelo instrumento, em ohm;
- a = distância entre eletrodos em cm;
- b = profundidade de penetração dos eletrodos no CP, em cm;

2.13.3 Medida de resistência elétrica

De acordo com Cascudo (1997) a utilização desta técnica iniciou nos anos 70, porém não foi de muito sucesso devido ao limitado número de informações que ela fornece sobre o processo de corrosão, e ao fato de serem utilizadas sondas metálicas embutidas no concreto devidamente projetadas estruturalmente.

A técnica baseia-se no fato que a resistência reflete o grau de dificuldades de que um fluxo de elétrons que percorre determinado material. Assim ao ocorrer o processo de corrosão a sonda metálica diminui sua seção transversal, aumentando a resistência elétrica. Ou seja, com a temperatura mantida constante, a corrosão do elemento metálico pode ser monitorada periodicamente pela medida de sua resistência elétrica. Essa técnica estima a taxa de corrosão das armaduras situadas próximas à sonda.

2.13.4 Curvas de polarização

As curvas de polarização registram, sob condições controladas as relações corrente/potencial do sistema de corrosão. Através dessas relações são produzidas informações sobre taxas de corrosão, películas, passividade, tendência à corrosão por pite e outros. O potenciostato é o equipamento conhecido para obtenção de curvas de polarização estes permitem a aplicação de potencial ao sistema, em direção a polarização anódica ou catódica. Esta técnica é considerada destrutiva, devido à polarização imposta ao sistema, não sendo possível realizar medidas periódicas com o mesmo eletrodo.

LIMA (2000), Dotto (2006), Subramaniam et al (2010) utilizaram esta técnica de avaliação.

2.13.5 Impedância Eletroquímica

É o processo que representa o grau de dificuldade pelo qual um sinal elétrico enviado ao circuito com determinada frequência encontra ao percorrê-lo. A impedância eletroquímica, para uma dada frequência no ponto P (E_0 , I_0), será $Z = \Delta E / \Delta I$. Variando-se a frequência da perturbação senoidal, tem-se para cada valor de frequência um valor de impedância (Z). Graficamente usa-se duas formas mais

conhecidas de representar os resultados de Z. Por meio do diagrama de Nyquist, que apresenta nas abscissas a parte real de Z (Z') e nas ordenadas a parte imaginária de Z (Z''), e por meio do diagrama de Bode, que apresenta nas abscissas o logaritmo da frequência (f) e nas ordenadas ou o ângulo de fase em radianos ($^\theta$), ou o logaritmo do módulo de impedância |Z|. A análise de tais diagramas permite o desenvolvimento de modelos de interpretação de impedância ou circuitos de Randles, que comparam circuitos elétricos (resistores, capacitores e indutores) às propriedades físicas do sistema aço-concreto, facilitando o estudo do comportamento eletroquímico (DOTTO, 2006, P.109).

Através desta técnica se torna possível medir a resistência do concreto por intermédio de simulações de circuitos equivalentes compostos de diferentes elementos de circuito. Os elementos de circuito mais comuns são as resistências que se referem ao filme do produto da corrosão (filme dielétrico) que se desenvolve no aço (R_w), resistências que representam a interface da corrosão (R_f) e resistência de transferência de carga (R_{ct}). Estas resistências encontram-se geralmente associadas em paralelo ou em série com capacitores relacionados a capacitância da dupla camada elétrica C_{dl} e ou capacitância de filme de óxidos (C_w), ou ainda podem estar associadas à elementos constantes de fases CPE que possuem comportamento de um capacitor não ideal como o elemento constante de fase relacionado a processos difusionais denominado impedância de Warburg (Z_w).

Através destes parâmetros é que se define o processo de corrosão e são representados por um circuito equivalente. Warburg define a impedância da concentração e dos processos em relação à difusão, portanto ele é o resultado das limitações do transporte de massa. Sua equação é:

$$Z_w = \frac{\sigma}{\sqrt{\omega}} - j \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{\omega}} \quad (12)$$

Onde:

σ é o coeficiente de Warburg;

ω é a frequência angular.

2.13.6 Ensaio CAIM

O ensaio CAIM - Corrosão Acelerada por Imersão Modificada - é um ensaio acelerado de corrosão que se enquadra entre os ensaios eletroquímicos. Este se concentra na avaliação direta do efeito da corrosão sobre a barra, através de uma medição da perda de massa da mesma após o ensaio. Além disto, permite que se acompanhe a evolução da corrente relacionados aos processos de corrosão, fundamental para avaliar a dinâmica do processo corrosivo.

Por estas razões, considera-se que esta é uma técnica interessante e com grande potencial de utilização para avaliação da degradação provocada pela corrosão em estruturas de concreto armado. Dada suas características, aparentemente se constitui num ensaio sensível, que pode ser usado de forma eficiente para obter dados comparativos de desempenho.

2.13.6.1 Evolução do ensaio CAIM

O ensaio CAIM teve seu primeiro uso no LEME - Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais por Lima (1990), a partir de uma concepção original empregada por Varela & Espinosa (1988).

Originalmente, o ensaio era realizado com auxílio de um aquário de vidro sem fundo, com dimensões de 8 x 8 x 20 cm, que ficava apoiado sobre o corpo-de-prova, sendo fixado com algum tipo de massa vedante. Dentro deste aquário era colocada uma solução 0,6 Molar de cloreto de sódio (equivalente a uma concentração de NaCl de 35,5%, típica da água do mar do Oceano Atlântico e uma placa metálica, conectada a uma fonte de alimentação. O outro pólo era fixado na barra de aço (armadura do corpo-de-prova). Aplicava-se, então, uma diferença de potencial de 60 V, de forma a tornar a barra um pólo positivo e a placa um pólo negativo, induzindo a passagem de corrente elétrica entre elas, que favorecia a movimentação dos íons cloretos na direção da barra. O período de ensaio proposto era de 7 horas, durante as quais se acompanhava, visualmente, a evolução da degradação dos CPs. Ao final do ensaio, dada a complexidade da operação de fixação dos aquários, a equipe do LEME propôs, em 1991, a modificação do conceito do ensaio, passando a utilizar os corpos-de-prova imersos em uma solução de cloretos. Além disto, foi fabricada uma fonte de voltagem contínua regulável, que permitia a indução de diferenças de

potencial entre 15 e 70 V. O equipamento foi projetado de forma que se pudesse acompanhar a evolução da corrente de corrosão ao longo do ensaio.

Foi decidido ainda, que as barras deveriam ficar totalmente inseridas no concreto, sendo deixada para fora uma das ponta do fio de conexão com a fonte. A outra ponta era enrolada em torno de um trecho pequeno da barra. Após as modificações o ensaio foi denominado de ensaio CAIM.

Em 1992, Jadovski et al, utilizaram o procedimento CAIM para o estudo da influência da espessura do revestimento no fenômeno de corrosão. O ensaio consistia em submeter os corpos-de-prova de concreto armado, com barras de 125 mm de diâmetro, a uma fonte de corrente contínua de 80V, enquanto estes estavam parcialmente imersos numa solução salina de cloreto de sódio com concentração de 35 g/l, durante um período de 8 horas. Após as barras eram limpas e pesadas, permitindo que se fizesse a verificação de perda de massa.

Uma inovação deste programa de estudo consistiu na utilização de um procedimento químico, baseado no emprego da solução de limpeza proposta na ASTM G1 - 03 (2003), para limpeza da barra, além da limpeza mecânica.

Selistre et al, em 1993 e 1994, utilizou o CAIM para estudos sobre a influência da relação água/cimento, do revestimento e do tempo de cura na corrosão de armaduras. Estudou também o efeito de técnicas para reversão do processo corrosivo.

Utilizaram-se corpos-de-prova com dimensões de 10x10x20 cm, nos quais foram inseridas barras de aço CA-50 com 12.5 mm de diâmetro (1/2") e aproximadamente 15 cm de comprimento. Nesta ensaio, pela primeira vez, foram usados espaçadores plásticos para garantir um revestimento de 15 mm.

Os corpos-de-prova eram ensaiados aos 28 dias de idade, sendo conectados a uma fonte de corrente contínua de 80V, por um tempo de 8 h (1 ciclo) de parcial imersão dos CPs em uma solução de NaCl. Após as barras eram retiradas, limpas conforme a ASTM G1 - 03 (2003) e pesadas para cálculo da perda de massa.

Marchesan et al, em 1997, utilizaram o CAIM em um estudo sobre aplicação de revestimentos para controle de corrosão. Neste ensaio, os corpos-de-prova eram expostos a uma fonte de corrente contínua de 75V durante 8 horas. Os CPs eram parcialmente submersos (até a altura do revestimento mais a metade do diâmetro da barra) em uma solução de 35 g de NaCl/l. Após as barras eram limpas, conforme ASTM G1 - 03 (2003) e pesadas.

No programa de ensaios desenvolvido por Kirchheim et al (2005), novas modificações foram introduzidas. Dúvidas sobre a possibilidade de o contato direto entre o fio e a barra estarem provocando distorções no processo de corrosão da mesma levaram os pesquisadores a propor uma nova forma de conexão elétrica, na qual o fio era mantido acima da barra, sem contato direto.

Torres (2006, p.113) recomenda que mais estudos devem ser feitos sobre o comportamento do ensaio devendo o mesmo ser aplicado somente de forma comparativa. Este mesmo autor também sugere um tempo padrão de ensaio de 24 horas podendo ser ajustado para mais ou menos tempo conforme as relações a/c.

2.13.6.2 Considerações finais do ensaio e delimitações do ensaio CAIM

O CAIM como técnica de medida de corrosão em armaduras de concreto armado, pode ser considerado um ensaio que possibilita uma análise rápida, pois permite avaliar visualmente o comportamento do mesmo no decorrer do tempo. Seu emprego permite avaliar a intensidade de corrosão, que caracteriza a dinâmica da corrosão, e determinar a perda de massa do aço, importante variável para avaliar os efeitos deletérios do processo corrosivo.

Ao mesmo tempo, porém, é um ensaio que necessita de atenção e dedicação do pesquisador, pois o mesmo tem que acompanhar a evolução da corrente e registrar mudanças visuais nos CPs desde a pesagem inicial até o final das armaduras. É necessário ainda adotar cuidados para garantir um correto posicionamento das barras nos CPs e uma adequada cura do concreto. O pesquisador também deve ter sensibilidade suficiente para encerrar o ensaio se os CPs estiverem em estado de deterioração muito avançado.

Além disto, o ensaio CAIM possui como delimitações e limitações:

- a) A composição iônica da solução dos poros é composta por vários íons, sendo possível que todos participem da migração imposta pelo ensaio CAIM. Assim, a corrente total medida no ensaio não corresponde exclusivamente ao fluxo de íons cloretos;
- b) No momento em que se estabelece o fluxo de íons, os cloretos podem reagir com o C_3A ($3 CaO \cdot Al_2O_3$) do cimento, fazendo com que o fluxo constante seja atingido somente depois de completadas todas as reações

possíveis. Entretanto, o cálculo da carga total passante, desde o início do experimento, não distingue o fluxo simples do fluxo de cloretos em conjunto com as reações;

- c) Devido a elevada diferença de potencial aplicada durante os ensaios, pode ocorrer à elevação da temperatura da solução (efeito Joule), o que também pode ter influência sobre a velocidade no fluxo de íons.

3.0 DESCRIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Materiais e Métodos

Os materiais utilizados para confecção dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios de corrosão (em armaduras de concreto armado) e de resistência à compressão estão descritos a seguir.

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado no experimento foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI). As principais características químicas, físicas e mecânicas do cimento empregado, fornecidas pelo fabricante, encontram-se descritas na Tabela 8.

Tabela 08. Caracterização físico-mecânica e química do cimento utilizado

COMPOSIÇÃO QUÍMICA	TEOR (% EM MASSA)
Perda de fogo (PF)	3,41
Resíduo insolúvel	0,83
Trióxido de enxofre – SO	3,15
Óxido de cálcio livre – CaO	1,62
Óxido de magnésio – MgO	5,14
Óxido de alumínio - Al O	4,37
Óxido de silício – SiO	18,24
Óxido de ferro - Fe O	2,57
Óxido de cálcio – CaO	59,78
Equivalente alcalino	0,58
CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA	
Tempo de início de pega (min)	134
Tempo fim de pega (min)	195
Finura na peneira # 200(%)	0,13
Finura na peneira # 325 (%)	1,07
Expansibilidade a quente (mm)	0,53
Consistência normal (%)	29,51
Resistência a compressão 1 dia (MPa)	23,53
Resistência a compressão 3 dias (Mpa)	35,07
Resistência a compressão 7 dias (Mpa)	41,19
Resistência a compressão 28 dias (MPa)	49,64

Fonte: Cimento Votorantim

3.1.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado tem origem quartzosa, e se encontra disponível no mercado local. As características físicas e distribuição granulométrica estão relacionadas na Tabela 9, fornecidos pelo fabricante e de acordo com a NBR NM 248/2003.

Tabela 09. Composição granulométrica do agregado miúdo

PENEIRA (mm)	% RETIDA	% ACUMULADA
4,8	0,08	0,08
2,4	6,22	7
1,2	14,20	20
0,6	27,33	42
0,3	42,77	97
0,15	8,90	100
< 0,15	0,50	100
Total	100	-
Dimensão máxima característica (mm)		4,8
Módulo de finura		2,66

Fonte: Adaptado autor

3.1.3 Agregado graúdo

Para moldagem dos corpos-de-prova utilizou-se agregado graúdo de origem basáltica. As características físicas e sua distribuição granulométrica, fornecida pelo fabricante estão relacionadas na Tabela 10 de acordo com a NBR NM 248/2003.

Tabela 10. Composição granulométrica do agregado graúdo

PENEIRA (mm)	% RETIDA	% ACUMULADA
25	0	0
19	9,27	9,27
12,5	49,74	59,01
9,5	28,90	87,91
6,3	8,51	96,42
4,8	1,87	98,29
< 4,8	1,71	100
Total	100	-
Dimensão máxima característica (mm)		19
Módulo de finura		6,87

Fonte: Adaptado autor

3.1.4 Aditivo

O aditivo utilizado foi do tipo superplastificante à base de sais sulfonados adiment da Vedacit/Otto Baungart de densidade 1,12 g/cm³. A quantidade de superplastificante foi determinada tendo em vista a necessidade de garantir que o abatimento de tronco de cone do concreto ficasse dentro do intervalo, especificado a priori, de 12 ± 2 cm.

3.1.5 Armadura

Os segmentos de barras de aço utilizados para confecção dos CPs para o ensaio CAIM são da classe CA 50A, com 12,5 mm de diâmetro e 14,5 cm de comprimento.

Antes da manufatura dos corpos-de-prova as barras foram limpas com auxílio de escovas de aço, água e sabão neutro para retirar qualquer tipo de impureza, que afetasse a determinação da massa inicial ou o desencadeamento do processo corrosivo na superfície da mesma.

Após a realização do ensaio CAIM, para realizar a pesagem das barras (verificação da perda de massa), foi efetuada uma limpeza com a solução recomendada pela ASTM G1 - 03 (2003).

3.1.6 Água de amassamento

Em toda a pesquisa foi utilizada água potável, proveniente da rede pública de distribuição (CORSAN - Alegrete).

3.1.7 Cinza da casca de arroz

A casca de arroz utilizada no trabalho foi proveniente da CAAL (Cooperativa arroseira do Alegrete) e CAMAL (Cooperativa arroseira do extremo sul - Camaquã). O processo de combustão foi realizado na mufla (fabricante SANCHIS modelo ETT e controlador do fabricante NOVUS modelo N1100) a 600°C por 6 horas no laboratório de Engenharia Civil da Unipampa - Universidade Federal do Pampa.

3.1.8 Água da mandioca brava

A mandioca é comumente encontrada sob duas espécies, a *Manihot utilíssima* que é comestível e denominada popularmente como aipim e/ou macaxeira, e a *Manihot esculenta* que é conhecida como mandioca brava e/ou amarga. Esta última não pode ser utilizada na alimentação sem processamento específico por conter elevado teor de cianeto.

A água da mandioca utilizada foi fornecida pela empresa Farinha de Mandioca Du Luizão (CNPJ:06.329.698/0001-70) que extrai a mandioca através de uma plantação de 18ha, apresentada na Figura (9) da região de Mucuri - Bahia.

Figura 9- Plantação de mandioca da espécie *Manihot esculenta*.



Fonte: Registro fotográfico do autor

O resíduo líquido proveniente da prensagem da massa da mandioca brava no processo de produção da farinha, também conhecido como manipuera, é um efluente muito danoso ao meio ambiente. Este resíduo é obtido através de prensagem da massa, conforme a Figura (10).

Figura 10- Processo de prensagem da massa

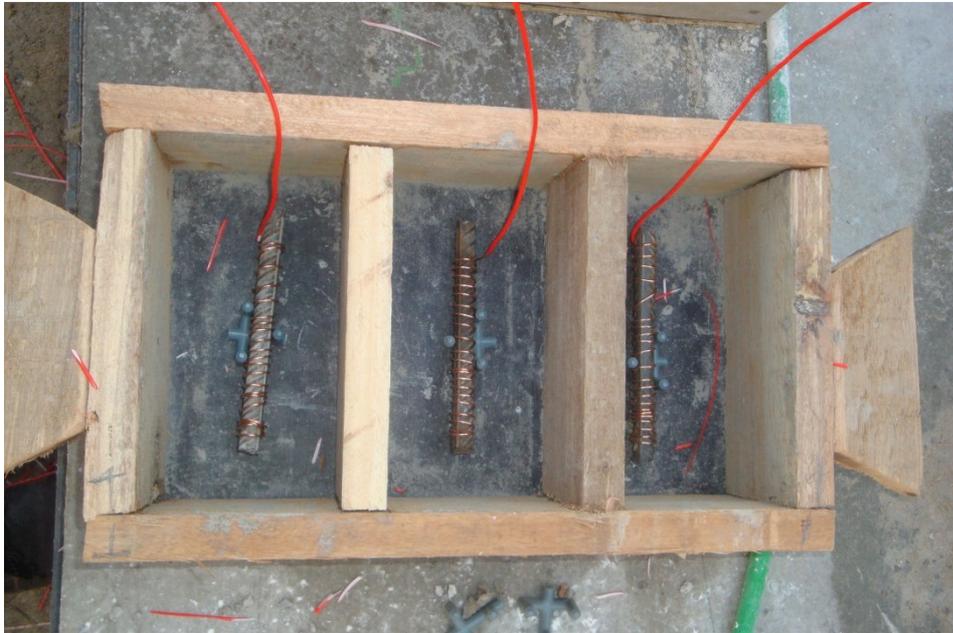


Fonte: Registro fotográfico do autor

3.2 Preparação dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova utilizados, nesta dissertação, para o ensaio de corrosão acelerada, eram prismáticos, apresentando dimensões de 10 x 10 x 20 cm. Um segmento de barra de aço posicionado (internamente a cada um deles), com auxílio de espaçadores plásticos para garantir o cobrimento de 30mm, como se observa na Figura (11).

Figura 11- Vista das formas prismáticas, com as barras posicionadas nos espaçadores



Fonte: Registro fotográfico do autor

Nos ensaios de resistência à compressão foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos, com dimensões de 10 x 20 cm, conforme a norma NBR 5738:2003.

3.3 Produção do concreto

Considerando as variáveis de estudo do ensaio CAIM proposto por Torres (2006), decidiu-se empregar corpos-de-prova elaborados com relação água/cimento 0,5.

Para garantir que os concretos tivessem alguma similaridade, estabeleceu-se, como parâmetro de controle, que o abatimento de tronco de cone das misturas frescas deveria ficar em $120 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$, e que o teor de argamassa seria de 52%.

Nas misturas que não atingiram o abatimento desejado foi adicionado aditivo superplastificante, sendo admitida uma proporção máxima de 1%, em relação à massa do cimento.

Considerando que, para uma determinada consistência do concreto, o emprego de materiais muito finos, de área específica muito elevada, tal como a CCA, tende a aumentar a demanda de água necessária para uma trabalhabilidade anteriormente estabelecida. Num primeiro momento neste trabalho foram substituídos o cimento no traço de concreto armado em 5, 8, 10, e, 15% de CCA, sendo que para as substituição de 10 e 15% não conseguiu-se manter o abatimento de tronco de cone das misturas frescas com traço água/cimento 0,5 sendo necessário a utilização de aditivo superplastificante nestas duas porcentagens de CCA.

Na Tabela 11 estão apresentados os traços finais, ajustados.

Tabela 11. Traços finais ajustados

Tipo de traço	Cimento CPV-ARI (Kg)	Areia 4,8mm (Kg)	Brita 19 mm (Kg)	Cinza de Casca de arroz (Kg)	Plastificant e (% cimento)	Água (litros)	Líquido da mandioca brava (litros)	Consumo de Cimento / m ³ de concreto
CP/Normal	1	1,9	2,72	-	-	0,5	-	389kg
CP/Cinza da casca de arroz "in natura" (CCA" in natura")	0,95	1,9	2,72	0,05	-	0,5	-	≈380kg
	0,92	1,9	2,72	0,08	-	0,5	-	≈380kg
	0,90	1,9	2,72	0,10	0,2	0,5	-	≈380kg
	0,85	1,9	2,72	0,15	0,2	0,5	-	≈380kg
CP/ Água da mandioca brava (AMB)	1	1,9	2,72	-	-	-	0,5	388kg
CP/Cinza de arroz "in natura"+água da mandioca brava (CCA" in natura"+AMB)	0,92	1,9	2,72	0,08	-	-	0,5	380kg
CP/Aditivo	1	2,12	2,88	-	0,2	0,5	-	370kg

Fonte: Adaptado autor

A mistura dos materiais foi realizada em uma betoneira de eixo vertical, previamente imprimada com argamassa de cimento e areia. A ordem de colocação

dos materiais na betoneira foi mantida constante para todas as misturas, conforme a seguinte sequência: brita, 50% da água ou água da mandioca, cimento, aditivo superplastificante ou cinza de arroz com o restante da água ou água da mandioca e areia.

Após a mistura dos materiais foram moldados os corpos-de-prova, de acordo a NBR 5738:2008. Inicialmente foram moldados 3 corpos-de-prova prismáticos para cada tipo de concreto e 3 corpos-de-prova cilíndricos, em cada concretagem realizada, para controle da resistência à compressão.

O processo de adensamento utilizado foi mecânico. Após a moldagem, os CPs foram armazenados em local seco e cobertos com sacos plásticos por um período de 24 horas. Em seguida a desmoldagem, os mesmos foram protegidos de intempérie e envoltos de areia úmida. Os CPs cilíndricos permaneceram protegidos e envoltos de areia úmida até a idade de 28 dias. Aos 28 dias foram efetuados os ensaios de corrosão nos CPs prismáticos e de resistência à compressão nos CPs cilíndricos.

3.4 Ensaios Realizados

3.4.1 Espectroscopia de infravermelho

A espectroscopia de infravermelho é um tipo de espectroscopia de absorção a qual usa a região do infravermelho do espectro eletromagnético. Como as demais técnicas espectroscópicas, ela pode ser usada para identificar um composto ou investigar a composição de uma amostra (VOGEL, 2011, p.386).

A espectroscopia no infravermelho se baseia no fato de que as ligações químicas das substâncias possuem frequências de vibração específicas, as quais correspondem a níveis de energia da molécula (chamados nesse caso de *níveis vibracionais*). Tais frequências dependem da forma da superfície de energia potencial da molécula, da geometria molecular, das massas dos átomos e eventualmente do acoplamento vibrônico.

A amostra de água extraída da mandioca brava foi prensada entre duas placas de um sal de alta pureza (cloreto de sódio). Essa placa é transparente à luz infravermelha e, dessa forma, não introduz nenhuma linha no espectro da amostra. A amostra de cinza da casca de arroz foi preparada misturando-se uma certa

quantidade da cinza da casca de arroz com um sal altamente purificado (brometo de potássio). Essa mistura foi triturada e prensada a fim de se formar uma pastilha pela qual a luz pode passar. Essa pastilha foi prensada a altas pressões a fim de garantir de que ela seja translúcida. Da mesma forma que o cloreto de sódio, o brometo de potássio não absorve radiação infravermelha, então as únicas linhas espectrais a aparecer serão provenientes da cinza de casca de arroz ou da água da mandioca brava.

3.4.2 Difração de Raio X

A difração de raios X é de grande importância na análise microestrutural, esta análise é gerada pelo fenômeno físico da difração e também da interferência, ou seja, quando os raios incidem sobre um cristal, ocorre a penetração do raio na rede cristalina, a partir disso, teremos várias difrações e também interferências construtivas e destrutivas. Os raios X interagirão com os elétrons da rede cristalina e serão difratados fornecendo informações sobre a natureza e os parâmetros do reticulado assim como detalhes a respeito do tamanho da perfeição e da orientação dos cristais (PADILHA E FILHO, 2004, p.45).

3.4.3 Absorção de Água

Para complementar-se a análise proposta no trabalho procedeu-se à verificação da absorção de água através do método prescrito pela NBR 9778, dividindo-se a massa de água contida nos poros do corpo de prova de concreto saturado ($M_{sat}-M_s$) pela massa do corpo de prova seco em estufa 105°C por cerca de 72 horas (M_s). A absorção de água foi definida pela seguinte expressão:

$$\text{Abs}(\%) = \frac{M_{\text{sat}} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (15)$$

A saturação do corpo de prova foi feita por imersão em água na temperatura ambiente durante 72 horas, seguida de permanência em água em ebulição durante 5 horas. Foram moldados dois corpos-de-prova $10 \times 20 \text{cm}$ para cada mistura aglomerante, sendo estes ensaiados aos 35 dias de idade.

3.4.4 Determinação de cloretos pelo Método de MOHR

O método utilizado para quantificação dos íons cloreto será o argentimétrico com detecção visual do ponto de equivalência. Este procedimento é também conhecido como Método de Mohr, para determinação de cloretos e brometos (VOGEL, 2006, p. 223-225).

Na titulação de uma solução neutra ou ligeiramente alcalina contendo íons cloreto com solução padrão de nitrato de prata, adicionamos uma pequena quantidade de solução de cromato de potássio que age como indicador. No final, quando a precipitação do cloreto for completa, primeiro excesso de íons prata combina-se com os íons cromato (indicador) formando um precipitado de cromato de prata, vermelho, fracamente solúvel.



O ponto final ocorre um pouco além do ponto de equivalência, devido a necessidade de se adicionar um excesso de íons Ag^+ para precipitar o Ag_2CrO_4 em quantidade suficiente para ser notada visivelmente na solução amarela que já contém a suspensão de AgCl . Este método requer que uma titulação em branco seja feita para que se possa corrigir o erro cometido na detecção do ponto final 1. O valor da prova em branco obtido deve ser subtraído do valor da titulação propriamente dita.

3.4.5 Microscopia eletrônica de varredura

A importância do conhecimento e das análises quantitativas da microestrutura tem levado a um contínuo desenvolvimento das técnicas experimentais, particularmente da microscopia (PADILHA, 2004,p.85).

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um tipo de microscópio eletrônico capaz de produzir imagens de alta resolução da superfície de uma amostra. Devido a maneira com que as imagens são criadas, imagens de MEV tem uma aparência tridimensional característica e são úteis para avaliar a estrutura superficial de uma dada amostra.

As propriedades dos materiais são em última análise determinadas pelas suas respectivas microestruturas.

A microscopia eletrônica de varredura, por apresentar excelente profundidade de foco, permite a análise de superfícies irregulares. Esta técnica trata de processos de interação entre o elétron e a matéria. Os diversos tipos de elétrons refletidos e os elétrons absorvidos são utilizados para compor informações da amostra analisada (PADILHA, 2004, p.108).

Neste trabalho verificamos através do MEV as amostras ensaiadas após o ensaio CAIM.

3.5 Procedimento do Ensaio CAIM

No presente estudo foi empregado o procedimento de ensaio CAIM, cujo desenvolvimento foi descrito no capítulo 2.

Algumas pequenas modificações no procedimento de ensaio foram adotadas para permitir que o programa experimental proposto fosse executado adequadamente.

Como nos ensaios anteriores, as barras de aço de cada CP foram conectados à fonte de voltagem constante, gerando dois pólos e estimulando a migração dos ânions e elétrons do pólo negativo (solução salina ou eletrodo) ao pólo positivo (armadura).

O ensaio CAIM foi realizado com auxílio de uma solução salina composta de água e cloreto de sódio (NaCl). Foram empregados 35 g de sal por litro de água, para simular a salinidade das águas marinhas.

Para evitar a liberação de vapor contendo cloretos para o ambiente, foram criados recipientes de vidro fechados (vide Figura 12-a e b).

Figura 12- Detalhes do ensaio CAIM em execução (a) vista lateral e (b) vista frontal



(a)



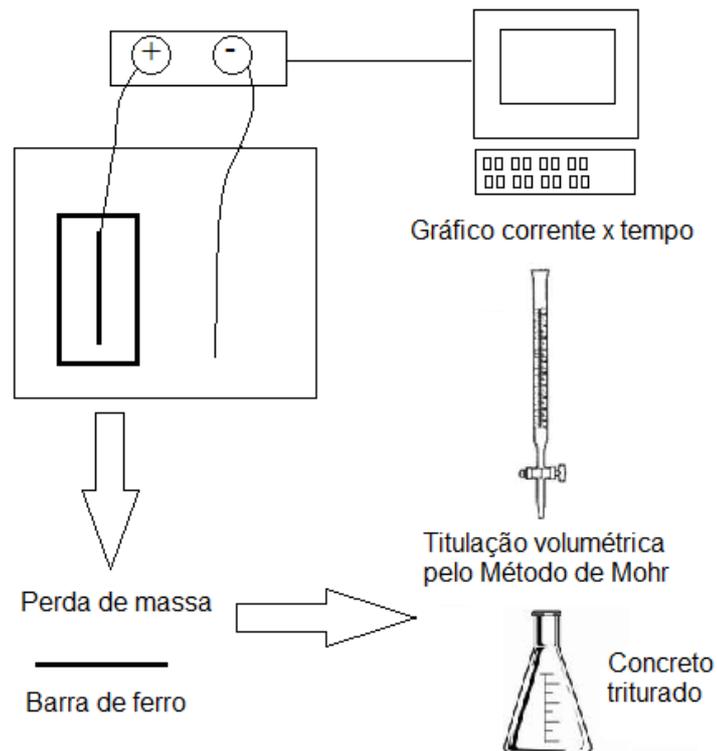
(b)

Fonte: Registro fotográfico do autor.

O ensaio foi monitorado durante o tempo de duração (8, 24 e 48 horas), sendo realizadas leituras de trinta em trinta minutos para verificar a corrente individual através de um multímetro MD-400 com interface RS-232 para aquisição dos dados conforme Figura (13) de cada corpo-de-prova nas voltagens testadas (15, 30 e 70 Volts).

A determinação da perda de massa da barra de aço interna foi determinada pela pesagem das barras após ensaio CAIM e a determinação da quantidade de cloretos no concreto foi determinada por titulação volumétrica pelo método de Mohr após ensaio CAIM conforme Figura (13).

Figura 13- Diagrama esquemático do ensaio CAIM



Fonte: Registro fotográfico do autor.

Após o término do ensaio, os corpos-de-prova foram rompidos em uma prensa hidráulica EMIC PC150 e as barras retiradas.

Antes de realizar a pesagem das barras, foi efetuada uma limpeza com a solução recomendada pela ASTM G1-03 (2003). Este procedimento de limpeza já foi utilizado por diversos autores como Lima (1990 e 1997), Cascudo & Helene (2001), Selistre et al (1994), Kirchheim et al (2005), como discutido no capítulo 2. A solução de limpeza é gerada pela dissolução de 580g de ácido clorídrico e de 3,5 g de hexametileno tetramina em água, até que se complete um litro de solução. As barras ficam imersas na solução por 45 minutos (Figura 14), sendo depois lavadas em água corrente. As barras limpas eram então colocadas em uma estufa, a 45°C, por 45 minutos, para estimular a evaporação de qualquer água remanescente.

Figura 14- Imersão das barras de aço na solução de limpeza



Fonte: Registro fotográfico do autor.

3.6 Variáveis do Ensaio

O objetivo principal proposto para o trabalho, como enfatizado no capítulo 1, consiste na verificação de como os corpos de prova confeccionados com diferentes traços, mas com mesma relação água/cimento, respondem a corrosão acelerada através do ensaio CAIM.

Com este intuito, foram selecionadas algumas variáveis de estudo consideradas prioritárias:

- a) Voltagem de Indução;
- b) Tempo de Ensaio;
- c) Traço.

A seguir se discutem as razões que levaram à seleção de cada uma das variáveis enumeradas acima.

3.6.1 Voltagem de indução

A fonte utilizada neste estudo foi uma fonte de tensão constante, porém com a flexibilidade de variá-la. Considerando a importância da tensão aplicada neste tipo

de ensaio eletroquímico, a qual tem seu aumento proporcional ao aumento da taxa de corrosão, testou-se a voltagem de indução: 15, 30 e 70 Volts

3.6.2 Tempo de ensaio

O tempo de ensaio necessário para que haja efeito de corrosão é um parâmetro muito discutido na maioria dos métodos eletroquímicos, visto que esta variável está diretamente relacionada ao concreto que está sendo estudado. Relações água/cimento maiores apresentam sinais de corrosão em tempos menores que as relações a/c menores. Isto se deve à porosidade do concreto que leva à facilidade de migração de agentes deletérios como os íons cloretos. Neste estudo utilizou-se os tempos de 8, 24 e 48 horas de ensaio para cada voltagem de indução.

3.6.3 Traço

Comparar a resistência a corrosão entre os diferentes traços de concreto armado contendo CCA "in natura", água extraída da mandioca e aditivo, conforme a Tabela 11.

Mais variantes no ensaio como nível da solução e tipo de conexão elétrica foram baseadas em estudos anteriores (TORRES, 2006) de acordo com as condições de ensaio otimizadas e consolidadas.

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos. Para facilidade de interpretação, os dados serão organizados conforme os ensaios realizados: caracterização dos insumos agrícolas, caracterização do concreto, análise do comportamento médio da corrente x tempo, análise da perda de massa e determinação de cloretos pelo método de Mohr.

4.1 Caracterização dos Insumos Agrícolas

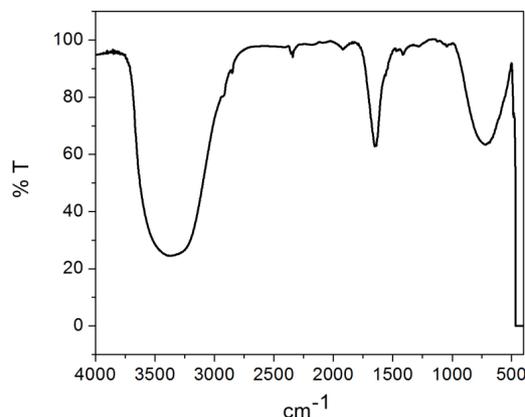
4.1.1 Análise de Infravermelho

A análise de infravermelho da mandioca brava mostra picos largos em 3363 cm^{-1} relacionado com a deformação axial dos grupos OH (Figura 15). Os picos a 770 cm^{-1} confirmam a presença de álcool terciário por deformação angular fora do plano, em 1640 cm^{-1} mostra a presença de carbonila (C=O).

Medidas de PH realizadas em um pHômetro digital confirmam a presença de grupamentos hidroxila pelo pH~12 encontrado.

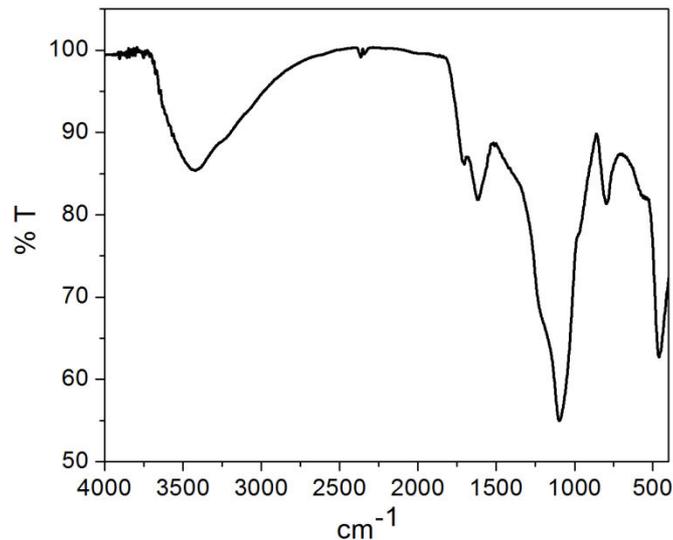
A fim de analisar a toxicidade da água extraída da mandioca brava foi realizado a titulação argentimétrica do cianeto presente na água extraída da mandioca brava que mostrou uma quantidade inferior ao limite mínimo admissível (10 mg de HCN / Kg de peso vivo) (CAGNON, 2002).

Figura 15- Infravermelho da água extraída da mandioca brava



A análise de infravermelho de cinza de casca de arroz (Figura 16) mostra a presença de grupamentos Si-OH e os grupos Si-O conforme picos a 3417 e 1083 cm^{-1} , respectivamente.

Figura 16- Infravermelho da cinza da casca de arroz



A adição de materiais pozolânicos, como a cinza da casca de arroz, está associada a uma diminuição da taxa de corrosão em concretos devido ao refinamento de poros que sua presença causa. Consequentemente, diminui a permeabilidade nestes materiais pela reação do hidróxido de cálcio e a sílica amorfa, resultando no silicato de cálcio hidratado (C-S-H) conforme as reações abaixo:



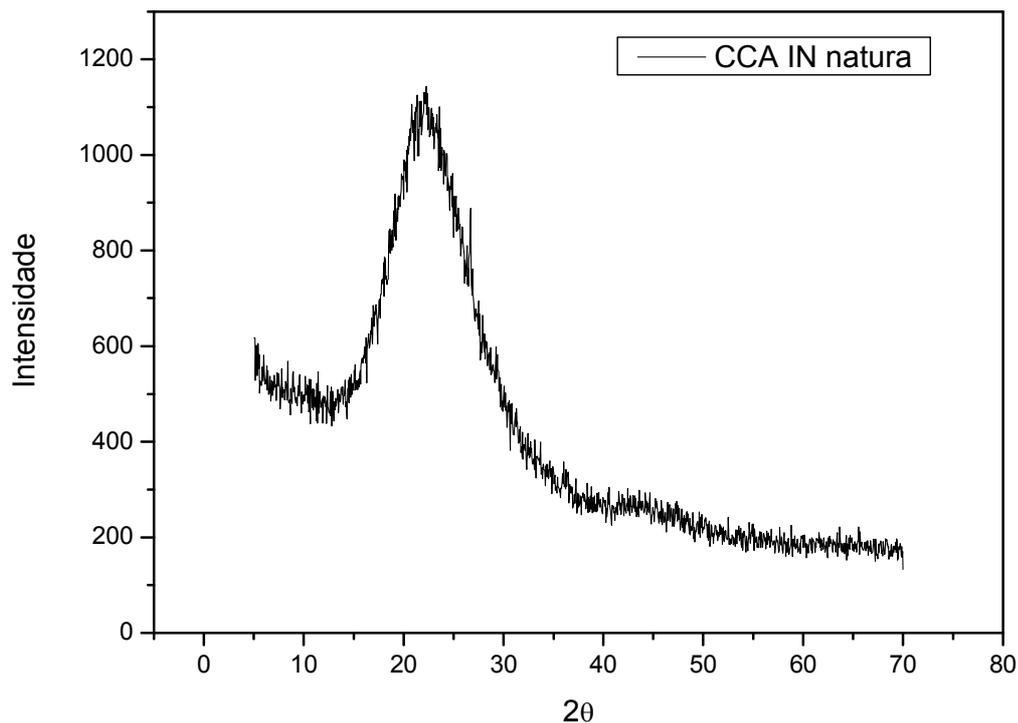
Estudos prévios mostram que a adição de compostos alcalinos (-OH) atuam promovendo a manutenção da passivação da barra de aço em estruturas de concreto armado (DAL RI, 2002, p.34), além de promover uma aceleração no processo de cura (GARCIA et al, 2007). Neste sentido tanto a composição da cinza da casca de arroz e quanto da água da mandioca brava mostram possibilidades promissoras quanto ao retardamento de processos corrosivos.

4.1.2 Difração de Raios-X

A qualidade de cinza de casca de arroz esta profundamente relacionada com a presença de silício e o conteúdo de Carbono, assim como a superfície específica, que são influenciados pela temperatura, tempo e tipo de queima, (Pedrozo, 2008). Neste sentido, é possível observar na Figura (17) a presença de sílica amorfa na casca de arroz utilizada no presente trabalho.

Como a pozolanicidade da cinza da casca de arroz contendo sílica amorfa é superior a cinza da casca de arroz contendo sílica cristalina a análise de difração de raios-x sugere uma boa pozolanicidade para a CCA utilizada.

Figura 17- Difração de raios-x de cinza de casca de arroz "in natura" obtida por queima controlada a 600° C durante 8 horas.



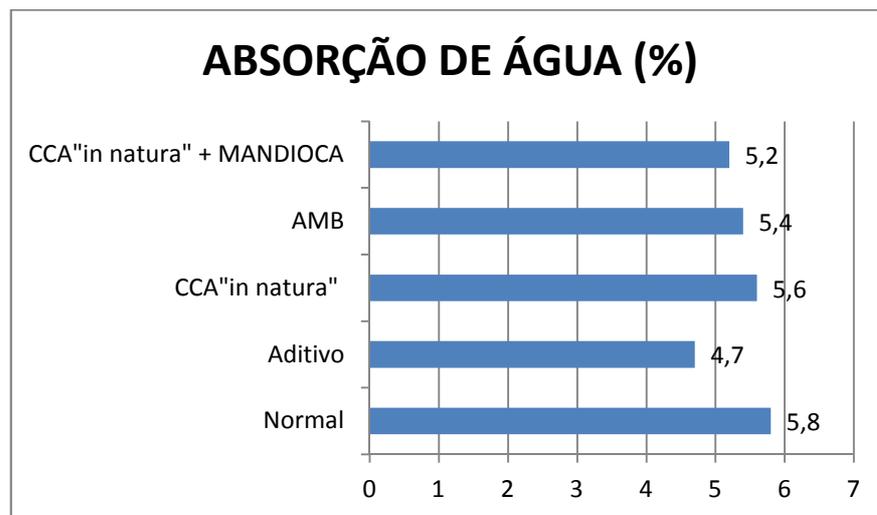
4.2 Caracterização do concreto

A caracterização do concreto foi realizada através do ensaio de absorção de água e resistência a compressão axial.

4.2.1 Absorção de água

Os resultados de absorção de água, segundo NBR 9778:2005 estão apresentados na Figura (18) abaixo. Como esperado o CP aditivo mostrou o menor valor de absorção de água (4,7%), entretanto todos os CPs contendo os subprodutos agrícolas apresentaram valores inferiores ao CP normal.

Figura 18- Resultados do ensaio de absorção de água

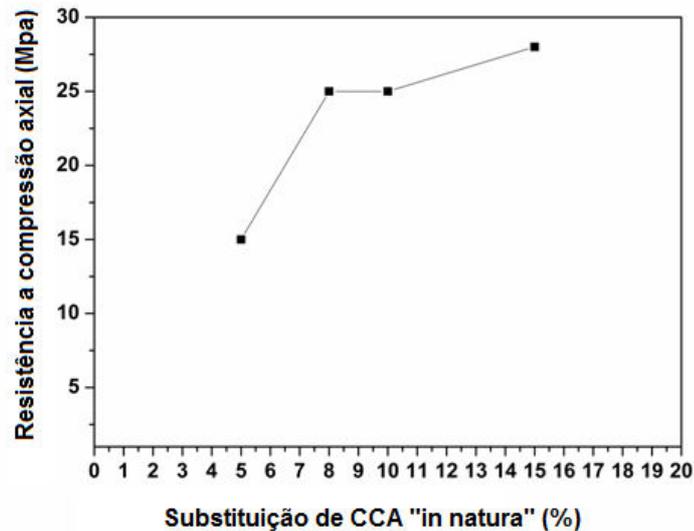


4.2.2 Resistência a compressão axial

A quantidade de cimento na composição do concreto foi substituída na proporção de 5, 8, 10 e 15% por cinza da casca de arroz "in natura". Contudo, nas substituições de 10 e 15%, não foi possível manter a similaridade dos traços, o slump test em $120\text{mm} \pm 20$ milímetros (ABNT NBR NM 67:1998) na composição de 0,5 água / cimento e, na ausência de aditivo. A Figura (19) mostra um melhor resultado de resistência a compressão para 8% de substituição de cinza da casca de arroz (25 MPa) considerando a similaridade dos corpos-de-prova.

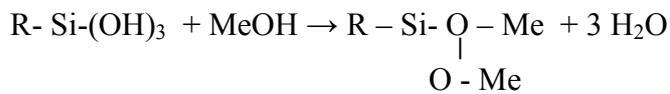
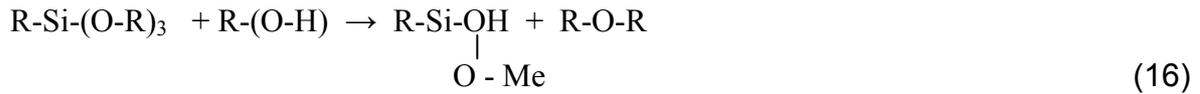
A partir destes resultados seguiu-se as análises dos corpos-de-prova contendo cinza da casca de arroz na proporção de 8%, sendo a partir daqui denominado como CP CCA "in natura" e/ou corpo-de-prova contendo cinza da casca de arroz "in natura".

Figura 19- Resultados do ensaio de compressão axial



4.3 Análise do Comportamento Médio da Corrente X Tempo

Os gráficos do comportamento médio da corrente x tempo sugerem um efeito sinérgico entre a CCA "in natura" e a AMB em 30V para todos os tempos de imersão sobre o comportamento corrosivo conforme os valores de correntes encontrados Figuras (20-a, 21-b e 22-b). Os ensaios realizados a 70V não mostraram boa reprodutibilidade e confiabilidade uma vez que o mesmo tem um aquecimento elevado, cerca de 80°C (veja Figura 23), concordando com resultados de pesquisas anteriores (Torres, 2006). O efeito sinérgico encontrado nas Figuras (20-a, 21-b e 22-b) pode ser atribuído ao efeito passivador dos componentes presentes na água da mandioca brava, tal como álcool (-OH) e a carbonila (C = O), e também aos grupos orgânicos presentes na CCA "in natura" , como o grupo Si - R, em que R pode ser o radical - OSi ou -OH, cujas presenças foram provadas por análise de infravermelhos mostradas nas Figuras (15 e 16). Trabalhos anteriores confirmam a proteção contra a corrosão por meio do efeito de carboxilatos orgânicos, que são responsáveis pela adsorção efetiva na superfície do metal (Figura 24 -a) (ORMELLESE, 2009) . Além disso, as ligações de silanol (Si- OH) gerado pela CCA "in natura" na presença de álcool pode promover a reação entre os grupos silanol (Si-OH) e hidróxido metálico (Me-OH), formando água e , subsequentemente, a ligação metaloxano (R- Si-O- Me), a qual protege a superfície metálica conforme a reação mostrada abaixo.



O efeito protetor também pode ser visualizado através da ilustração esquemática da Figura (24).

Figura 20- Resposta de corrente em função do tempo de ensaio CAIM para amostras de concreto (■) Normal (●) CCA"in natura" (▲) AMB, (▼) Aditivo (◆)CCA"in natura"+ AMB em (A) 30V 8h e (B) 70V 8h.

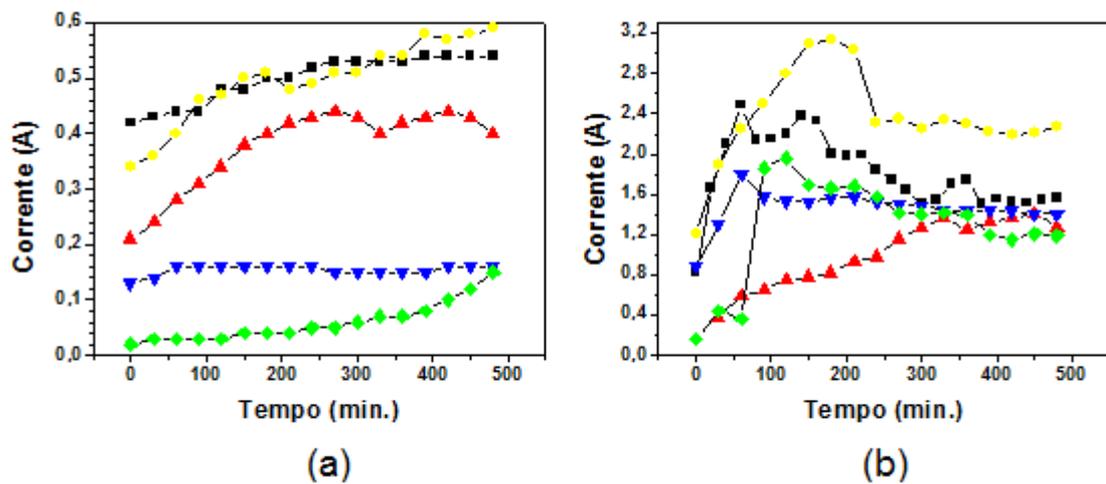


Figura 21- Resposta de corrente em função do tempo de ensaio CAIM para amostras de concreto (■) Normal (●) CCA"in natura" (▲) AMB, (▼) Aditivo (◆)CCA"in natura"+ AMB em (A) 15V 24h e (B) 30V 24h.

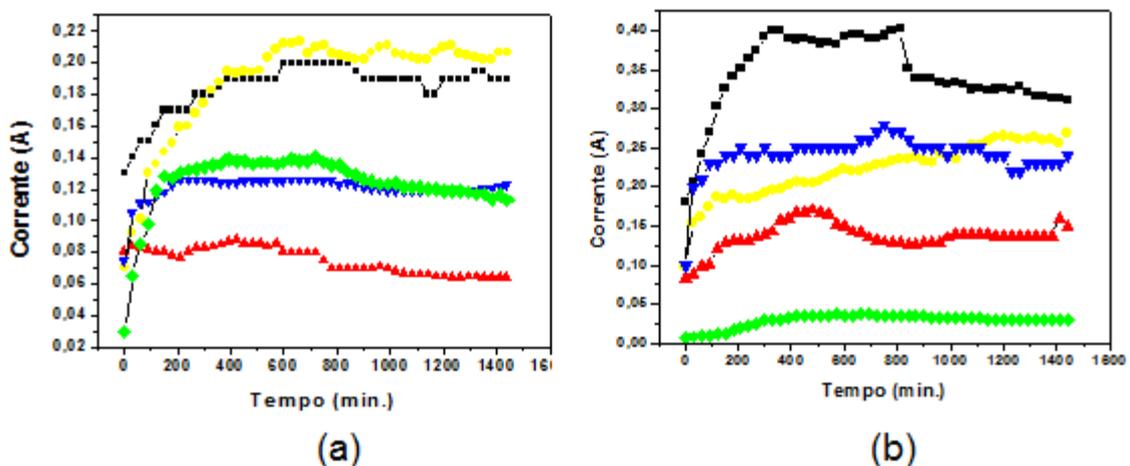


Figura 22- Resposta de corrente em função do tempo de ensaio CAIM para amostras de concreto (■) Normal (●) CCA"in natura" (▲) AMB, (▼) Aditivo (◆)CCA"in natura"+ AMB em (A) 15V 48h e (B) 30V 48h.

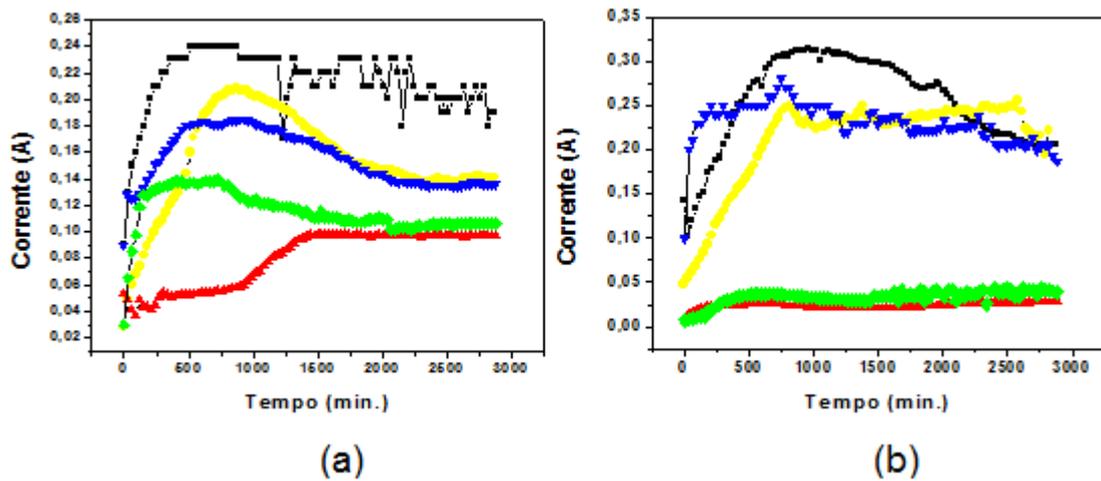


Figura 23- Imagem obtida através de câmera termográfica de corpo de prova ensaiado a 70V.

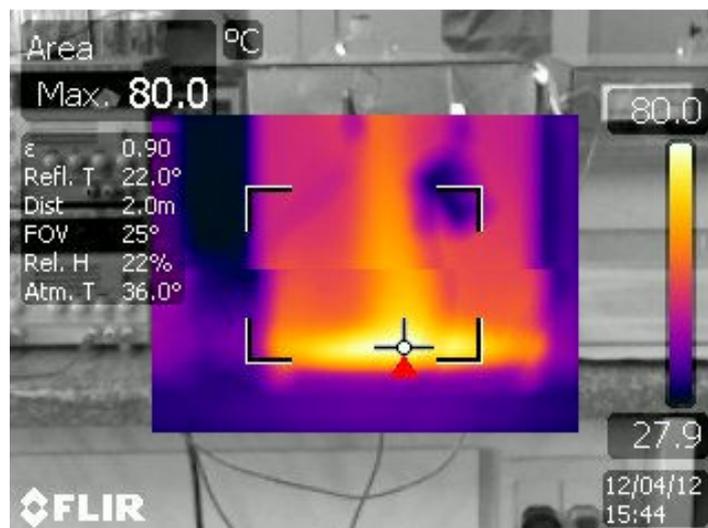
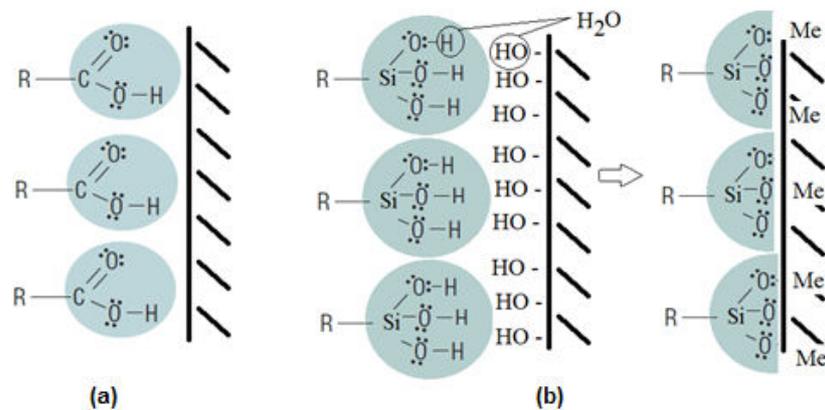


Figura 24- Esquema Proposto de grupos funcionais adsorvido (a) carboxilato de etilo e (b) de silanol na superfície de metal.



Os ensaios realizados a 15 V apesar de não mostrarem um comportamento sinérgico mostraram um comportamento médio da corrente para as amostras de concreto contendo CCA "in natura" e água da mandioca brava igual ou menor que para as amostras contendo aditivo superplastificante o que já configura uma melhora comparativamente ao CP normal. A tensão aplicada de 15 V não é considerada uma boa tensão para validação do ensaio CAIM conforme trabalhos anteriores (Torres, 2006), portanto consideramos no presente trabalho para fins de comparação do comportamento corrosivo os resultados obtidos a 30V.

4.4 Análise da Perda de Massa

O efeito sinérgico da CCA "in natura" e água da mandioca brava pode ser comprovado pela diminuição dos valores de perda de massa após o ensaio CAIM em 30V 8h (de 2,26 g CCA" in natura", AMB 2,31 g e 1,39 g de CCA" in natura+AMB) Figura (26 -a) e de 30V 24h (de 3,16 g de CCA" in natura", 3,77 g de AMB e 2,47 g de CCA" in natura +AMB) na Figura (26 -b). O aumento geral de perda de massa a 8h 70V confirma o processo de corrosão para alta tensão de acordo com os dados obtidos no ensaio de CAIM e trabalhos anteriores (TORRES, 2006). Para tempos de imersão mais longos, tais como de 48 horas, o efeito sinérgico não foi detectado pela perda massa a 15 V (de 5,42 g de CCA" in natura", 5,91 g de AMB e 5,91 g de CCA" in natura"+AMB) na Figura (28 -a), de acordo com o ensaio CAIM . Este comportamento pode ser atribuído a diminuição de processos difusionais em ensaios realizados intermitentemente uma vez que trabalhos confirmam que o ensaio CAIM

realizado em ciclos de 8h promovem uma melhor difusão dos íons Cl^- da solução para a barra de aço através do concreto. A perda de massa em 30V (CCA "in natura" 5,85 g, AMB 6,22 g e CCA "in natura"+AMB 6,25 g) na Figura (27 -b) mostra valores de perda de máximo aproximados para os CPs AMB e CCA" in natura"+AMB. Observa-se nas Figuras (27-a e 27-b) o efeito da diminuição da difusão dos íons Cl^- para ensaios intermitentes de 48h.

Figura 25- Porcentagem de perda de massa para amostras realizadas após o ensaio CAIM, Normal, Aditivo, Cinza da casca de arroz (CCA "in natura"), Água da mandioca brava (AMB) e Cinza de casca de arroz e água da mandioca brava (CCA" in natura"+AMB) durante 8h (a) 30V e (b) 70V.

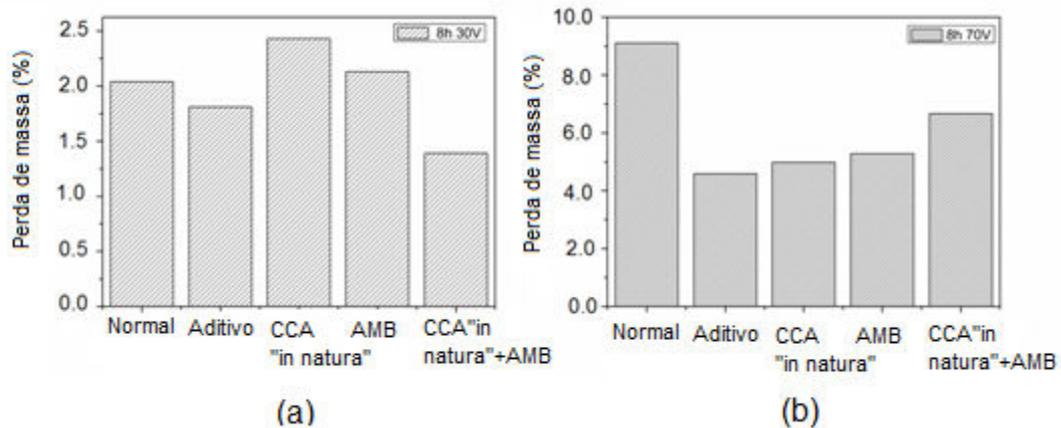


Figura 26- Porcentagem de perda de massa para amostras realizadas após o ensaio CAIM, Normal, Aditivo, Cinza da casca de arroz (CCA "in natura"), Água da mandioca brava (AMB) e Cinza de casca de arroz e água da mandioca brava (CCA" in natura"+AMB) durante 24h (a) 15V e (b) 30V.

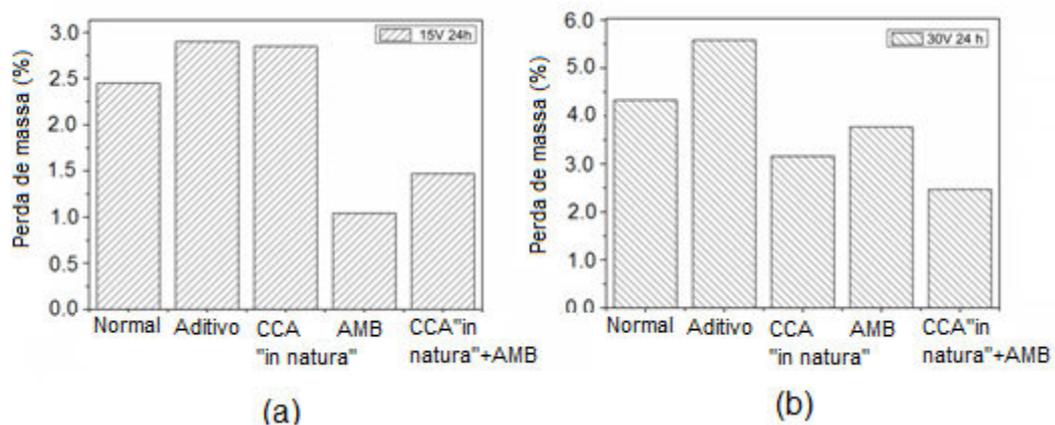
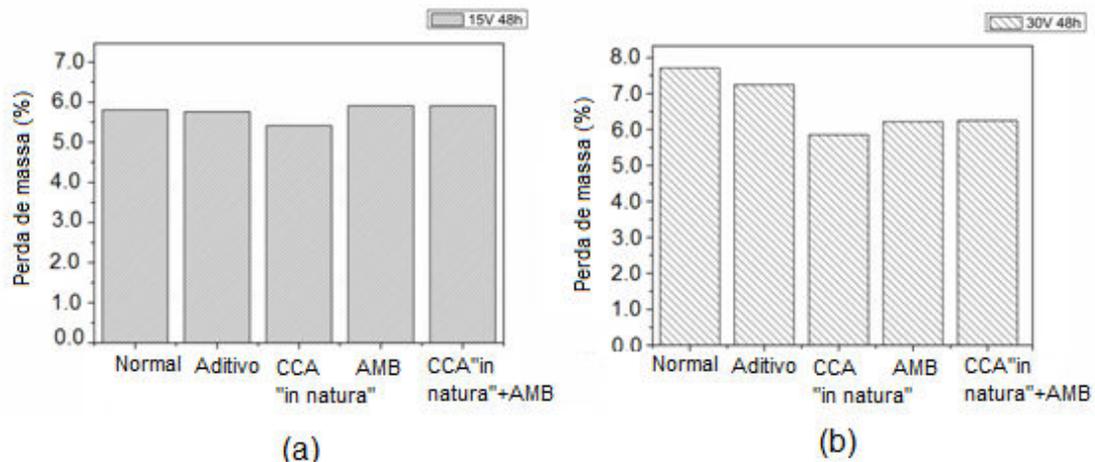


Figura 27- Porcentagem de perda de massa para amostras realizadas após o ensaio CAIM, Normal, Aditivo, Cinza da casca de arroz (CCA "in natura"), Água da mandioca brava (AMB) e Cinza de casca de arroz e água da mandioca brava (CCA "in natura"+AMB) durante 48h (a) 15V e (b) 30V.



4.5 Análise da microscopia eletrônica de varredura

A análise do concreto dos corpos-de-prova após ensaio CAIM foram realizadas no microscópio eletrônico de varredura e estão apresentadas nas Figuras (28, 29, 30, 31 e 32).

Todas as imagens mostradas se referem aos testes realizados por 24 horas a 15 Volts onde temos no CP normal picos relativos aos produtos de corrosão da barra de aço como ferro (Fe) e oxigênio (O) (Figura 28). O Corpo-de-prova contendo CCA "in natura" (Figura 29) apresenta além dos produtos de corrosão característicos a presença de silício (Si) oriundo da sílica presente na cinza da casca de arroz, a qual se mistura a camada de produto de corrosão do ferro na barra de aço possivelmente promovendo a passivação da barra conforme ilustração proposta na Figura (24-b). A água da mandioca brava também apresenta pico relativo a presença de silício (Si) (Figura 30), enquanto que os corpos-de-prova contendo os dois subprodutos agrícolas (CCA "in natura" e AMB) tem em seu produto de corrosão uma mistura complexa de elementos a base de silício e demais componentes da liga de aço (Figura 32). Os corpos-de-prova normal e aditivo não mostram nenhum componente que difere dos tradicionais componentes do processo de corrosão do aço (Figuras 28 e 31).

Figura 28- Microscopia Eletrônica de Varredura com EDS da superfície da barra de aço inserida no CP normal após ensaio CAIM por 24h 15V.

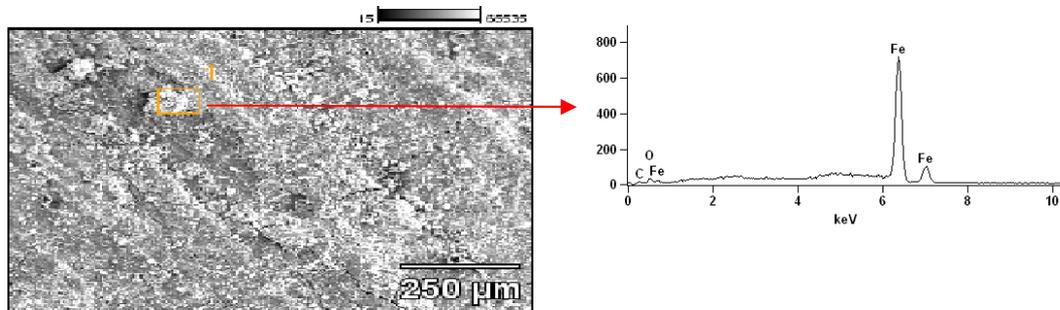


Figura 29- Microscopia Eletrônica de Varredura com EDS da superfície da barra de aço inserida no CP CCA "in natura" após ensaio CAIM por 24h 15V.

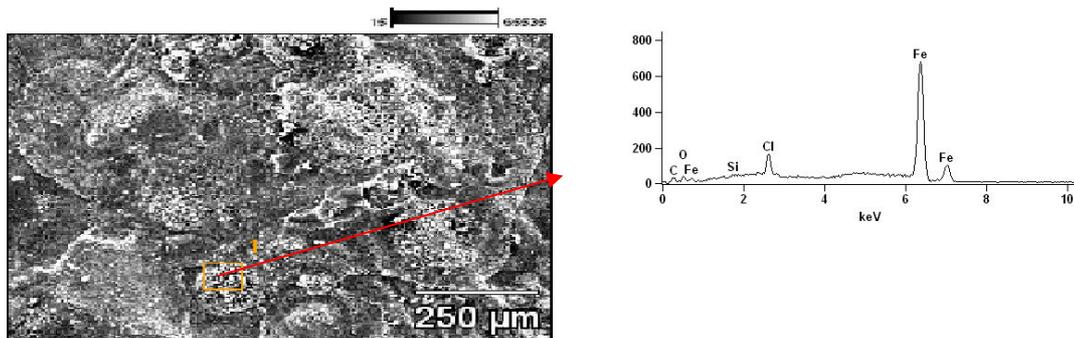


Figura 30- Microscopia Eletrônica de Varredura com EDS da superfície da barra de aço inserida no CP água da mandioca brava após ensaio CAIM por 24h 15V.

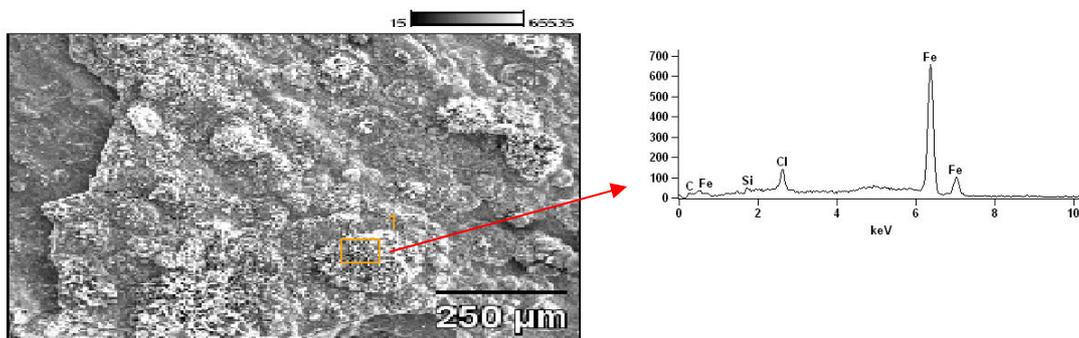


Figura 31- Microscopia Eletrônica de Varredura com EDS da superfície da barra de aço inserida no CP aditivo após ensaio CAIM por 24h 15V.

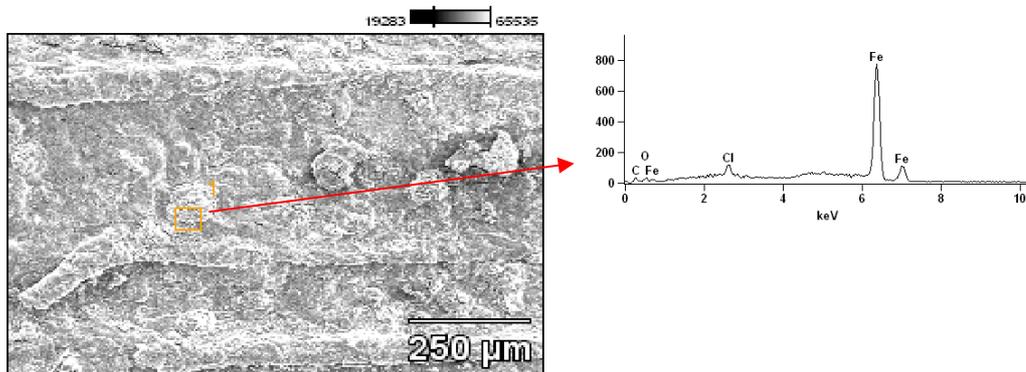
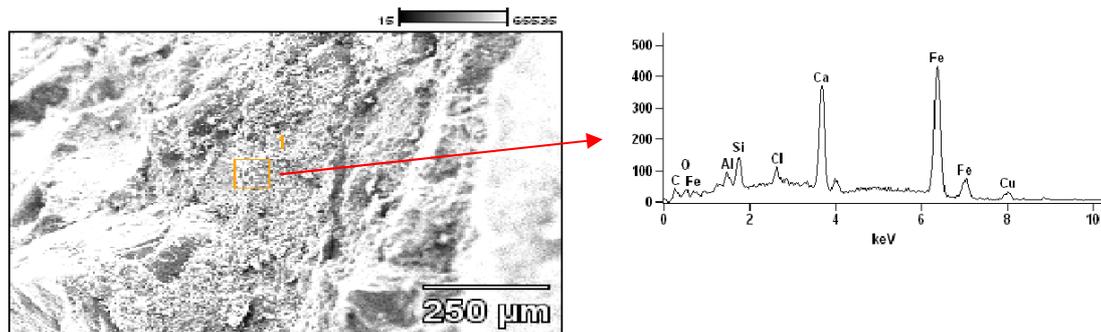


Figura 32- Microscopia Eletrônica de Varredura com EDS da superfície da barra de aço inserida no CP CCA "in natura" e água da mandioca brava após ensaio CAIM por 24h15V.



O mecanismo de inibição proposto na Figura (24) pode ser comprovado também pelas análises de energia dispersiva de raios-X (EDS) conforme componentes encontrados na superfície da barra de aço analisada.

4.6 Determinação de Cloretos pelo Método de Mohr

O efeito sinérgico pode ser avaliado através da titulação volumétrica pelo método de Mohr, quando é realizada a quantificação de íons cloretos contidos em 1 g de concreto triturado do corpo-de-prova após ensaio CAIM.

Como pode ser observado os resultados da Tabela 12, após ensaio CAIM realizado a 30V durante 24 horas o teor de cloreto em amostras de CCA "in natura" + AMB (0,0014293 g Cl⁻/ g concreto) é menor quando comparado com amostras dos CPs de CCA "in natura" (0,002287g Cl⁻ /g concreto) e AMB (0,002433g Cl⁻/g concreto). Os resultados obtidos a 30V durante 48 horas de ensaio CAIM

também mostram teores de cloreto menores para as amostras CCA “in natura” + AMB (0,001512 g Cl⁻ /g concreto) comparado as amostras dos CPs CCA “in natura” (0,001658 g Cl⁻/g concreto) e AMB (0,001569 g Cl⁻/g concreto). Estes resultados confirmam o efeito sinérgico apresentado através do comportamento médio da corrente x tempo no ensaio CAIM e nas análises de perda de massa. Para os ensaios realizados a 15 Volts o teor de cloretos encontrado foi sempre inferior ao teor de cloretos no CP aditivo confirmando o efeito benéfico dos componentes oriundos da água da mandioca brava contra a corrosão. Os desvios padrões das respectivas medidas encontram-se no anexo III deste presente trabalho.

Tabela 12. Resultados Médios da Determinação pelo Método de Mohr

CP	24h 15V	24h 30V	48h 15V	48h 30V
	(gCl ⁻ /g concreto)			
Normal	0,001364	0,00266	0,00164	0,003419
CCA "in natura"	0,001254	0,002269	0,001216	0,001658
AMB	0,000742	0,002433	0,001191	0,001569
Aditivo	0,000941	0,002462	0,001249	0,002684
CCA "in natura"+AMB	0,001226	0,001429	0,001165	0,001512

A determinação de cloretos pelo método de Mohr mostra coerência com os dados do ensaios CAIM configurando uma boa técnica para colaborar com os demais resultados.

5.0 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos resultados obtidos na série de ensaios realizados permitem que se tracem algumas conclusões importantes.

5.1 Conclusões Finais

A revisão dos dados coletados e analisados permite que se levantem as seguintes conclusões para o presente trabalho:

- A proporção de cinza da casca de arroz no traço selecionada foi de 8% considerando-se os valores de resistência a compressão e a similaridade do concreto;
- A análise de absorção de água nos corpos-de-prova contendo cinza da casca de arroz e água extraída da mandioca brava mostraram valores satisfatórios pois apresentaram valores inferiores ao CP normal;
- Através do comportamento médio da corrente *versus* tempo nos ensaios de corrosão acelerados (Ensaio CAIM) observa-se um efeito sinérgico contra a corrosão a 30 V entre a cinza da casca de arroz e a água extraída da mandioca brava;
- O mecanismo proposto para elucidar o efeito sinérgico foi baseado na adsorção dos componentes da cinza da casca de arroz, grupamento silanol, e da água extraída da mandioca brava, grupamento carboxilato, sobre a superfície da armadura de aço conforme análise do microscópico eletrônico de varredura (MEV);
- A determinação de cloretos pelo método de Mohr mostraram coerência com os dados do ensaio CAIM configurando uma boa técnica para colaborar com os demais resultados.

5.2 Sugestão para Trabalhos Futuros

O tema de interesse deste trabalho contribuiu para dar início a uma proposta de metodologia que poderá ser incrementada com outros estudos nas mesma área de

atuação. Neste sentido, são apresentadas a seguir algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Complementar a caracterização das propriedades do concreto contendo cinza da casca de arroz e água extraída da mandioca brava, como índice de vazios, permeabilidade, ...;
- Complementar o estudo comparativo do Ensaio CAIM para diferentes tipos de cimento, aditivos e traços a/c;

REFERÊNCIAS

ABREU, A.G. **Estudo da corrosão da armadura induzida por carbonatação em concretos com cinza volante**. Porto Alegre – RS, 2004. Dissertação (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 138p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book of ASTM Standards**. Standard Method for field measurement of soil resistivity using the Wenner four - electrode method. ASTM G57, Philadelphia, 1984.

_____. **Annual book of ASTM Standards**. Standard test for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. ASTM C876, Philadelphia, 1991.

_____. **Annual book of ASTM Standards**. Standard practice for preparing, cleaning and evaluating corrosion test specimens. ASTM G1 - 03, Philadelphia, 2003.

_____. **Annual book of ASTM Standards**. Standard practice for cleaning, descaling and passivation of stainless steel parts, equipment and systems. (Revision) ASTM A 380, Philadelphia, 1996.

_____. **Annual book of ASTM Standards**. Test Method for Electrician indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. ASTM C1202, Philadelphia, 2005.

ANDRADE, Carmen. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. São Paulo: Pini, 1992.

ANDRADE, C. **Últimos avances en el calculo de la vida util del hormigon estructural**. In JORNADAS SUDAMERICAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 29., 2000, Punta del Este, Uruguay. Memórias...[CD-ROM]. Punta del Este: EDITOR, 2000(a), 31p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto-Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. NBR 5738. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **Projeto e estruturas de concreto - Procedimento**. NBR 6118. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **Cimento Portland de alta resistência inicial.** NBR 5733. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **Aço destinado a armadura para estruturas de concreto armado-Especificação** NBR 7480. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **Cimento Portland comum.** NBR 5732. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **Cimento Portland composto.** NBR 11578. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **Cimento Portland de alto-forno.** NBR 5735. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **Cimento Portland pozolânico.** NBR 5736. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **Materiais metálicos-Ensaio de tração. Parte 1: Método de ensaio a temperatura ambiente.** NBR ISO 6891-1. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **Materiais metálicos-Ensaio de tração. Parte 1: Método de ensaio a temperatura ambiente.** NBR ISO 6891-1. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **Aditivos químicos para concreto de cimento Portland-Requisitos.** NBR 11768. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **Fios de aço para estruturas de concreto protendido - Especificação.** NBR 7482. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **Cordoalhas de aço para estruturas de concreto protendido - Especificação.** NBR 7483. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **Agregados - Determinação da composição granulométrica.** NBR NM 248. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **Argamassa e concreto endurecido - Determinação de absorção de água, índice de vazios e massa específica.** NBR 9778. Rio de Janeiro, 2005.

BAUER, E. **Avaliação comparativa da influência da adição de escória de alto-forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas.** São

Paulo.Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1995.p.236.

BOUZOUBAÂ, N.; B. FOURNIER. **Concrete incorporating rice-husk ash;compressive strength and chloride-ion penetrability**. Materials and technology laboratory, Ottawa, Canada. 2001.

CABRAL, A. E. B.; **Avaliação da Eficiência de Sistemas de Reparo no Combate à Iniciação e à Propagação da Corrosão do Aço Induzida por Cloretos**. Porto Alegre – RS. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000.

CAGNON, J. R.; CEREDA, M. P.; PANTAROTTO, S. In Cd-rom. **Série: Cultura de tuberosas amiláceas latino-americanas**. Vol.2 – Cultura de tuberosas amiláceas latino-americanas. Fundação Cargill. 2002.

CALÇADA, L.M.L, **Estudo da eficácia do ensaio de migração de cloretos na previsão da durabilidade dos concretos**. Exame de qualificação (doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.84p.

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

CASCUDO, O.; **O controle da corrosão de armaduras de concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo/Goiânia: PINI, 1997.

CASCUDO, O. **Influência das características do aço Carbono destinado ao uso como Armadura para Concreto Armado no comportamento frente à Corrosão**. São Paulo – SP. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.

CASCUDO, O.; HELENE, P. R. L. **Resistência à corrosão no concreto dos tipos de armaduras brasileiras para concreto armado**. São Paulo, 2001, p.272.

CHAUDHARY,D.S.; JOLLANS, M.D.; CSER.,F. **Understanding rice hull ash as fillers in polymers: a review**. Silicon Chemistry. vol 1, 2002, p. 281-289.

COUTINHO, A.S, GONÇALVES, A. **Fabrico e propriedades de betão**. 2 ed. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1994, p. 368.

DAL MOLIN, D. C. C. **Fissuras em estruturas de concreto armado: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre-RS. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1988, p. 196.

DAL MOLIN D.C.C.; ISAIA G.C. **Concreto: Ensino Pesquisa e Realizações.** Ed. Geraldo C. Isaia – São Paulo: IBRACON, 2v, 2005, p.1600.

DAL RI, M. **Efeitos da adição de cal hidratada em concretos com altos teores de adição mineral na penetração de cloretos e na solução aquosa dos poros do concreto.** Santa Maria, Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, 2002, p.111.

DHIR, R.K.; JONES, M.R.; NG, S.L.D. **Prediction of total chloride content profile and concentration/time-dependent diffusion coefficient for concrete.** Cement and Concrete Research, v.50, n.1, 1998, p.37-48.

DOTTO, J.M.S, **Corrosão de aço induzida por íons cloretos - Uma análise Crítica das Técnicas Eletroquímicas Aplicadas ao Sistema Aço-Concreto Com ou Sem Pozolana.** Porto Alegre – RS. Dissertação (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

DUGATTO, F.L, **Corrosão nas armaduras de concreto - Estudo de caso Foz do Iguaçu – PR.** Dissertação (Graduação). União Dinâmica de Faculdades Cataratas 2006.

EL HOSINY, F. I.; ABO-EL-ENEIN S. A.; HELMY I.M.; KHALIL, A. **Effect of thermal treatment of rice husk ash on surface properties of hydrated portland cement- rice ash pastes.** Journal of Thermal Analysis, vol 48,1997, p. 809-817.

FAO. **Statistical datas:** <http://apps.fao.org/cgi-bin/nph-db.pl>. 24/abr/2003.

FALCÃO BAUER, L.A. **Materiais de construção.** Volume 1, 5° ed. LTC, 2000, p.135-137

FERREIRA, A.A. **Concreto de alto desempenho com adição de conza da casca de arroz: avaliação de propriedades relacionadas com a durabilidade.** Porto Alegre. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999. 132p.

FIB BULLETINS, Structural Concrete - **The textbook on behavior, desing and performance.** Update Knowledge of the CEB/FIP Model Code, v.1, 1999.

FIGUEIREDO, E. J. P. **Avaliação do desempenho de revestimentos para proteção de armadura contra corrosão através de técnicas eletroquímicas – contribuição ao estudo de reparo de estruturas de concreto armado.** São Paulo. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1994. 391 p.

FIGUEIREDO, E. J. P.; HELENE, P. R. L.; ANDRADE, C. **Fatores determinantes da iniciação e propagação da corrosão da armadura do concreto.** São Paulo: BT/PCC/121, 1993.

FONTES, Enéas de A.; MENEZES, Adélia de N.S. de; CARDOSO, Eloísa M.R.; NASCIMENTO, Rosival P. do; **Fabricação de Farinha de Mandioca;** Belém-PA: SENAR, 1999.

FRANCINETE JR, P.; FIGUEIREDO, E.J.P **Estudo da difusão do oxigênio no concreto.** Boletim Técnico da EPUSP, BT/PCC/238, 1999.

FRIZZO, B. T. **Influência do teor e da finura de pozolanas na permeabilidade ao oxigênio e na absorção capilar do concreto.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, 2001, p.135.

GARCIA, J. R.; OLIVEIRA, I.R.; PANDOLFELLI, V.C. **Processo de hidratação e os mecanismos de atuação dos aditivos aceleradores e retardadores de pega do cimento de aluminato de cálcio.** Cerâmica. Vol 53, 2007, p.42-56.

GENTIL, V. **Corrosão.** Rio de Janeiro : LTC, 2012, p.210

GJORV, O.; VENNESLAND, O.; EL-BASAIIDY, AS.H.S. **Diffusion of Dissolved Oxygen through Concrete.** Materials Performance , v. 25, 1986, p. 39-44.

GIAMMUSSO, Salvador E. **Manual do concreto.** São Paulo: Pini, 1992.

GONZALES, J. A.; FELIÚ, S.; RODRIGUEZ, P.; RAMIREZ, E.; ALONSO, C.; ANDRADE, C. **Some questions on the corrosion of steel in concrete – Part I: when, how and how much steel corrodes.** Materials and Structures. Vol 29 January- February, 1996, p.40-46.

GUIMARÃES, E.A. **Avaliação da capacidade protetora da resina de óleo de mamona contra a penetração de agentes agressivos no concreto.** Brasília. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 1997. 150p.

GUTIÉRREZ, C. e MARTÍNEZ, M.A. **Potential-Modulates Reflectance Study of the Iron Electrode in 0.1 M NaOH.** Journal of the Electrochemical Society, v.133,n.9,1986, p.1873-1874.

HELENE, Paulo R. L. **Corrosão de armadura para concreto armado: pósgraduação em engenharia civil.** São Paulo: Epusp, 1984.

HELENE, Paulo R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado.** São Paulo: PINI, 1986, p.127

HELENE, P.R.L. **Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado.** São Paulo. Tese (Livre Docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1993, p.231.

HELENE, P.R.L, **Introdução da Durabilidade no Projeto das Estruturas de Concreto.** In: WORKSHOP SOBRE DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES. São Leopoldo. Anais...São Leopoldo, 1997, p31-42.

HELENE, Paulo. **Manual de reparo, proteção e reforço de estruturas de concreto armado.** Rede Rehabilitar. São Paulo: Degussa, 2003.

HELENE, P.R.L, TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto.** São Paulo: PINI, 1992.

HO, D. W. S. LEWIS, R. K. **The specification of concrete for reinforcement protection - performance criteria and compliance by strength.** Cement and Concrete Research, v. 18, 1998, p.584-594.

HOPPE, T.F. **Resistividade elétrica de concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz.** Santa Maria. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, 2005, p.147

ISAIA, G. C. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura.** Tese de Doutorado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1995.

ISAIA, G.C, HELENE, P.R.L. **Durabilidade de concreto de elevado desempenho com pozolanas.** In:WORKSHOP SOBRE DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES, 1993, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre, 1993, p.13-33.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G.; MORAES, R. C. **The physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete.** In: Sustainable Construction Into The Next Millenium Environmentally- Friendly And Innovative Cement Based Materials, 2000, João Pessoa. Proceedings Of The International Conference On Sustainable Construction Into The Next Millenium, João Pessoa: Universidade Federal Da Paraíba, 2000. V.1, p. 229-244.

ISMAIL, M.S.; WALIUDDIN, A.M. **Effect os rice hu sk ash on high strength concrete.** Construction and Building Materials, vol 10 N°7, 1996, p. 521-526.

JADOVSKI, I.; LANTELME, E.M.V.; KULAKOWSKI, M.P.; CAMPAGNOLO, J.L.; DAL MOLIN, D.C.C. **A influencia da espessura do cobrimento no fenômeno da corrosão de armaduras.** In: VIII CONGRESSO REGIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA EM ENGENHARIA, 1992, JOINVILLE. Anais... Joinville: FEJ/ UDESC.

JAMES, J.J; RAO, M. S. **Reactivity of rice husk ash .**Cement and Concrete Research, vol 16,1986, p. 296 – 302.

KIRCHHEIM, A. P.; PASA, V.; DAL MOLIN, D. C. C.; SILVA FILHO, L. C. P. **Avaliação de revestimentos de proteção do aço no controle da corrosão das armaduras em concretos brancos.** VII CONGRESSO LATINOAMERICANO DE PATOLOGIA DE LA CONSTRUCCION, X CONGRESSO DE CONTROL DE CALIDAD EN LA CONSTRUCCION, 2005, Asunción, Paraguai. Anais... CONPAT 2005.

KROPP, J. Chlorides in concrete. **Performance Criteria for Criteria for Concrete Durability**, RILEM REPORT 12, Editor: J. Kropp e K. Hilsdorf, 1995, p.138-164.

LIMA, R.C. **Avaliação da eficiência de inibidores de corrosão em reparo de estruturas de concreto.** Monografia (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

LOPES, A.N.M. **Avaliação Comparativa de Concretos com e sem Sílica Ativa para resistências entre 50 e 60 MPa.** Brasília. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 1999, p.170.

MARCHESAN, P. R. C.; SANTAROSA, D.; CAMPAGNOLO, J. L.; FILHO, L. C. P. S.; PACHECO, A. R. **Estudo da influência da aplicação de revestimentos no controle da corrosão.** In: IV CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA

DAS CONSTRUÇÕES E VI CONGRESSO DE CONTROLE DE QUALIDADE, 1997, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: LEME/CPGEC/UFRGS.

MEDEIROS, Marcelo H. F., MONTEIRO, Eliana B. **Utilização do nitrito de sódio como inibidor de corrosão em estrutura de concreto armado sujeitas a ação dos íons de cloretos.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

MEDEIROS, MHF., MONTEIRO, E., BARKOKÉBAS JR, B. **A Corrosão de Armaduras Sob a Ação de Íons Cloreto em Relação a Capacidade de Proteção de Alguns Tipos de Cimentos Nacionais com Adição Pozolânicas.** In: CONGRESSO DE CONTROL DE CALIDAD, 7, Montevideo. Anais...Montevideo, 1999. 2v.v.1, p.500-506.

MEHTA, P. K.; K.J. FOLLIARD. **Rice husk ash – a unique supplementary cementing material: durability aspects.** II International ACI/Canmet Conference on Quality of Concrete Structures and Recent Advances in Concrete Materials Las Vegas /Nevada/USA. 1995, p. 531-554.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto – estrutura, propriedades e materiais.** 2. ed. São Paulo: Pini, 1994.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete - microestrutura, properties, and materials.** 3°. ed. New York, MC Graw-Hill, 2006, p.30-32, 306-307.

MONTEIRO, E.C.B. **Estudo da capacidade de proteção de alguns tipos de cimentos nacionais, em relação à corrosão de armaduras sob a ação conjunta de CO₂ e íons cloretos.** Brasília. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, 1996. 138p.

NEPOMUCENO, A. A.; NEVES, I. B. F. **Avaliação da capacidade de proteção de argamassas produzidas com cinza de casca de arroz em relação à corrosão de armaduras em ambientes com CO.** VI Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto, abril de 2006, Anais.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** São Paulo, PINI, 1997. p. 828.

OLIVEIRA, Manuela Q. **Estudo da Eficiência dos Silanos Aplicados em Estruturas de Concreto Armado com Corrosão de Íons Cloreto.** Pernambuco:Escola Politécnica de Pernambuco, 2005.

ORMELLESE, M.; Lazzari, L.; Goidanich, S.; Fumagalli, G.; Brenna, A. **A study of organic substances as inhibitors for chloride-induced corrosion in concrete.** *Corrosion Science*. 2009, p. 2959–2968.

PADILHA, A.F; FILHO, F.A; **Técnicas de Análise Micro Estrutural.** São Paulo, Hemus, 2004, p. 45,85,190.

PAGE, C.; LAMBERT, P. **Kinetics of Oxigen Diffusion in Hardened Cement Pastes.** *Journal of Material Science*, v. 22, 1987, p. 942-946.

PEREIRA, V.G.A. **Avaliação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos: Influência do tipo de cimento, da relação a/c, da temperatura e do tempo de cura.** Porto Alegre – RS. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2001.

PETRUCCI, E.G.R. **Concreto de cimento Portland.** 11 ed. Rio de Janeiro: Globo, 1987, p.307.

POURBAIX, M. **Recent applications of electrode potential measurements in the thermodynamics and kinetics of corrosion on metals.** *Corrosion*, V.25, n.6, 1969, p.267-281.

POULSEN, E. **Estimation of chloride ingress into concrete and prediction of service lifetime with reference to marine RC structures.** In: DURABILITY OF CONCRETE IN SALINE ENVIROMENT, 1996, London, 1996. p.113-126.

POUYEI, M. T. F. **Beneficiamento da Cinza de Casca de Arroz residual com vistas à produção de cimento portland e/ou pozolânico .** Porto Alegre, Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, 2006, p.345.

RASHEEDUZZAFAR. **Influence of cement composition on concrete durability.** *ACI Material Journal*, v.89, n.6, 1992, p.574-586.

RATTMANN, Karla R. **Avaliação do desempenho de inibidores de corrosão de armaduras do concreto.** 2005. Monografia (Mestrado, trabalho de conclusão de curso). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.

REGO, J.H.S.; FIGUEIREDO, E. J. P. **Rice husk ash (rha) obtained without temperature control as partial substitute of cement in high performance concrete.** III International Conference on High-Performance Concrete, and

Performance and Quality of Concrete Structures, Recife, Pernambuco, Brasil, October 2002.

RODOLFO,P.M, ISA,M.M. **A Influência da Resistência à Penetração de Cloretos e da Carbonatação na Durabilidade das Construções de Microconcreto**, In: CONGRESSO DE CONTROL DE CALIDAD, 7.,1999, Montevideú. Anais..., 1999,2v.v.1, p.313-320.

RODRIGUEZ DE SENSALÉ, G.; REINA, D. **Influencia de la incorporación de ceniza de cáscara de arroz residual uruguayana como material cementíceo suplementario en hormigones de alto desempeño**. In: Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural,2004, Mendoza-Argentina. Anais. Mendoza, Argentina: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, 2004.

REGO, J.H.S. **Caracterização do resíduo cinza de casca de arroz (CCA) no Brasil**. In: Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural, 2004, Mendoza- Argentina. Anais. Mendoza, Argentina: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, 2004.

REGO, J.H.S. ; FIGUEIREDO, E.P.; NEPOMUCENO, A. A. **A utilização da cinza de casca de arroz residual (cca residual) como adição mineral ao cimento em concretos**. 44° Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON 2002.

REINOEHL,J.E e BECK, F.H. **Passivity and Anodic Protection**. Corrosion, v.25, n.6, 1969, p.233-242.

SANTOS. **Avaliação da viabilidade de utilização de cinza de casca de arroz residual em argamassas e concretos**. Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997, p.113.

SCHMUKI,P.;BUCHLER,M;VIRTANEN,S;BOHNI,H;MULLER,R. e GAUCKLER, L.J. **Bulk Metal Oxides as a Model for the Electronic Properties of Passive Films**. Journal of the Electrochemical Society, v.142, n.10, 1995, p.3336-3342.

SCHROEDER, R.M. **Comportamento eletroquímico e susceptibilidade à corrosão sob tensão do aço ABNT 1080 utilizado em armaduras de concreto protendido**. Tese(doutorado), Escola de Engenharia, Programa de pós-graduação em engenharia de minas, metalúrgica e de materiais da UFRGS. Porto Alegre, 1999, p.146.

SELISTRE, F.P.; GASTAL, S.L.; CAMPAGNOLO, J.L. **Estudo de técnicas para reversão do processo corrosivo em estruturas de concreto contaminadas com**

cloretos. In: VI SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E III FEIRA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 1994, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: LEME/ UFRGS.

SELISTRE, F.P.; BOTH, A.A. **A influência do fator A/C, do cobrimento e do tempo de cura na corrosão de armaduras.** In: V SALÃO DE INICIAÇÃO CINETÍFICA E II FEIRA DE INICIAÇÃO CINETÍFICA, 1993, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: LEME/UFRGS.

SENSALE, G. R. B. **Estudo comparativo entre as propriedades mecânicas de concretos de alta resistência e convencionais com cinza de casca de arroz.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, 2000, p.350.

SENSALE, G. R.; DAL MOLIN, D.C.C. **Estudo comparativo entre as propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos de alta resistência e convencionais com cinza da casca de arroz.** In: 44° CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO. Anais. São Paulo, 2002. IBRACON. São Paulo, 2002.

SILVA, A.P, **Aproveitamento sustentável da manipueira.** XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE MANDICA. Botucatu, São Paulo, 2009,

SILVA FILHO, L.C.P, **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito da permeação de água e da adição de microsilica.** Dissertação (Mestrado) - curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1994, p. 143.

SILVA, T.J. **Prediccion de la vida útil de forjados unidireccionales de hormigon mediante modelos matemáticos de deterioro.** Barcelona. Tesis (Doutorado). Universidad Politécnica de Catalunya, 1998

SILVA, P.F.A. **Durabilidade das estruturas de concreto aparente em atmosfera urbana.** São Paulo: Pini, 1995, p.22.

SILVEIRA, A. A.; FERREIRA; DAL MOLIN, D. **A cinza de casca de arroz como adição mineral.** In: **Workshop Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção Civil.** USP. São Paulo, 1996, p. 39-45.

SUBRAMANIAM, K.V; MINGDONG, B.; **Investigation of steel corrosion in cracked concrete: Evaluation of macrocell and microcell rates using Tafel polarization response,** Corros. Sci., vol.52, 2010, 2725-2735

SUGITA, S.; SHOYA, H.; FENG, Q. **Study on the pozzolanic properties of rice husk ash by hydrochloric acid pretreatment.** Cement and Concrete Research, vol. 24, 2004, p 521-526.

SWAMY, R. N. **Fly ash and slag. standart and specifications-help or hidrance.** Materials and Structures, v.26, 1993, p.600-613.

SWAMY, R.N. **The mits and misconception of chloride penetration into concrete.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 10., 1997. Proceeding...v.4, p.551-557.

TEIXEIRA, M;P. **Metodologia auxiliares para doagnóstico de patologias de corrosão em estruturas de concreto.** Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília, , 1998. p. 169.

TORRES, A.S. **Avaliação da sensibilidade do Ensaio CAIM – Corrosão Acelerada por Imersão Modificada – frente ao processo de corrosão em armaduras de concreto armado.** Porto Alegre, Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006, p. 123.

TUUTTI, K. **Service life os strucutres with regard to corrosion of embedded steel.** In: **ACI Publication (SP-65).** International Conference on Performance of Concrete in Marine Environment. Proceedings . August, 1980.

UNISOL, **Tijolo ecológico é feito com mistura de barro e manipueira,** fev. 2012. Disponível em: <>. <http://www.unisolbrasil.org.br/2012/02/14/tijolo-ecologico-e-feito-com-mistura-de-barro-e-manipueira/> Acesso em 24.06.2012.

VARELA, H.; ESPINOZA, L. V. **Penetrabilidad de lones cloruors en Morteros con y sin Revestimiento.** In: VII JORNADAS CHILENAS DEL HORMIGÓN E I JORNADA LATIONAMERICANA DEL CIMENTO Y HORMIGÓN, CURSO: Avances Tecnologicos en el Uso de Cementos y Hormigones, Santiago de Chile. Anais...: Instituto Prodesional de Santiago, 1988, p. 82-91.

VOGEL, A.I. **Análise química quantitativa.**Rio de Janeiro, ed.LTC, 6°ed, 2011, p.223-225, 386.

ZHANG, M.H.; MALHOTRA, V.M. **High-performance concrete incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material.** In: Fifth CANMET/ACI

International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Wisconsin, U.S.A., 1995. ACI Materials Journal. Canadá, 1995, p.1-25.

ZHANG, M.H.; MALHOTRA, V.M. **High-performance concrete incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material**. ACI Materials Journal, v.93, n.6, p.629-636, 1996.

WADA, I.; KAWANO, T.; KAWAKAMI, M. **Reactive rice husk ash on durability of concrete and mortar**. In: MALHOTRA, V. M. (ed.). CANMET/ACI. International Conference on Durability of Concrete, 5., Barcelona, 2000. **Proceedings. American Concrete Institute**, 2 v., v. 1, p. 205-223 (SP-192-13).

WAYERS, R.E. **Service life model for concrete structures in chloride laden environments**. ACI Materials Journal, v.95, n.4, 1998, p. 445-453.

ANEXO A - Controle de ensaios CAIM

CONTROLE DOS ENSAIOS CAIM									
	TRAÇO	VOLTAGEM	TEMPO	N° CPs	PESO INICIAL	PESO FINAL	PERDA DE MASSA(g,%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
CP Normal	0,5	30V	8h	3	144,9528	140,7491	2,90	2,56	0,49
					143,4297	139,4423	2,78		
					144,6792	141,7892	2,00		
					143,3874	141,2374	1,50		
CP Aditivo	0,5	30V	8h	3	139,2545	136,7045	1,83	1,81	0,31
					139,4234	136,4776	2,11		
					141,3733	137,933	2,43		
					145,0089	142,0089	2,07		
CP CCA "in natura"	0,5	30V	8h	3	141,39	137,19	2,97	2,49	0,83
					143,4660	140,9693	1,74		
					143,6392	140,5796	2,13		
					144,8904	141,4781	2,36		
CP AMB	0,5	30V	8h	3	145,6795	144,6606	0,70	2,08	0,31
					144,6949	141,6424	2,11		
					142,8956	140,9124	1,39		
CP AMB + CCA "in natura"	0,5	30V	8h	3	142,8956	140,9124	1,39	1,40	0,71
§									
	TRAÇO	VOLTAGEM	TEMPO	N° CPs	PESO INICIAL	PESO FINAL	PERDA DE MASSA(g,%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
CP Normal	0,5	70V	8h	3	148,7259	134,9351	9,27	7,74	2,75
					147,2332	140,5190	4,56		
					143,1236	129,6895	9,39		
					146,3529	142,3880	2,71		
CP Aditivo	0,5	70V	8h	3	144,8007	136,6151	4,27	4,35	1,68
					140,5597	132,0269	6,07		
					147,3513	139,8069	5,12		
					147,4238	140,7613	4,52		
CP CCA "in natura"	0,5	70V	8h	3	141,2632	134,6832	4,67	4,77	1,59
					144,6490	140,6045	2,80		
					141,7051	132,0459	6,82		
					140,2097	133,9815	4,44		
CP AMB	0,5	70V	8h	3	142,8129	135,6121	5,04	4,68	2,02
					144,5224	135,8967	5,97		
					139,5996	130,8104	6,30		
CP AMB + CCA "in natura"	0,5	70V	8h	3	144,5224	135,8967	5,97	5,77	0,65
					139,5996	130,8104	6,30		
§									
	TRAÇO	VOLTAGEM	TEMPO	N° CPs	PESO INICIAL	PESO FINAL	PERDA DE MASSA(g,%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
CP Normal	0,5	15V	24h	3	137,2811	133,8902	2,47	2,29	0,28
					135,9637	132,6484	2,44		
					136,8231	134,139	1,96		
					141,1279	136,8976	3,00		
CP Aditivo	0,5	15V	24h	3	145,8929	143,4911	1,65	2,48	0,73
					147,6265	143,4929	2,80		
					138,8812	135,1314	2,70		
					144,5931	138,1575	4,45		
CP CCA "in natura"	0,5	15V	24h	3	143,705	140,5574	2,19	3,11	1,04
					143,6178	142,2877	0,93		
					136,5689	134,7093	1,36		
					138,7066	137,2935	1,02		
CP AMB	0,5	15V	24h	3	142,8327	140,6759	1,51	1,10	0,23
					145,9823	142,2889	2,53		
					143,6743	141,865	1,26		
CP AMB + CCA "in natura"	0,5	15V	24h	3	145,9823	142,2889	2,53	1,77	0,67
					143,6743	141,865	1,26		
§									
	TRAÇO	VOLTAGEM	TEMPO	N° CPs	PESO INICIAL	PESO FINAL	PERDA DE MASSA(g,%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
CP Normal	0,5	30V	24h	3	144,1088	137,768	4,40	4,81	1,28
					146,1826	140,6414	3,79		
					159,3487	149,3861	6,25		
					147,5106	142,9146	3,12		
CP Aditivo	0,5	30V	24h	3	134,6376	127,2056	5,52	4,81	1,48
					139,6555	131,5554	5,80		
					141,5349	138,7548	1,96		
					141,2697	135,4176	4,14		
CP CCA "in natura"	0,5	30V	24h	3	141,7593	137,2797	3,16	3,09	1,03
					136,1175	130,9958	3,77		
					137,9524	131,8107	4,45		
					140,411	138,0825	1,66		
CP AMB	0,5	30V	24h	3	142,8839	139,3546	2,47	3,29	1,46
					137,5876	133,2948	3,12		
					141,1421	137,9805	2,24		
CP AMB + CCA "in natura"	0,5	30V	24h	3	142,8839	139,3546	2,47	2,61	0,46
					137,5876	133,2948	3,12		
					141,1421	137,9805	2,24		
§									
	TRAÇO	VOLTAGEM	TEMPO	N° CPs	PESO INICIAL	PESO FINAL	PERDA DE MASSA(g,%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
CP Normal	0,5	15V	48h	3	142,3567	133,0678	6,53	5,45	1,13
					141,018	134,9875	4,28		
					145,4592	136,3433	5,14		
					145,6820	136,6687	6,19		
CP Aditivo	0,5	15V	48h	3	141,9978	143,5033	5,12	5,52	0,66
					142,2774	135,3627	4,86		
					142,4704	134,7472	5,42		
					144,5770	137,9264	4,60		
CP CCA "in natura"	0,5	15V	48h	3	149,7769	140,7899	6,00	5,34	1,78
					142,8945	134,2231	5,91		
					143,6178	132,7619	7,56		
					142,1193	136,0157	4,29		
CP AMB	0,5	15V	48h	3	144,3725	138,381	4,15	5,92	1,63
					137,8378	139,1822	5,91		
					142,7653	133,4369	6,53		
CP AMB + CCA "in natura"	0,5	15V	48h	3	144,3725	138,381	4,15	5,53	1,24
					137,8378	139,1822	5,91		
					142,7653	133,4369	6,53		
§									
	TRAÇO	VOLTAGEM	TEMPO	N° CPs	PESO INICIAL	PESO FINAL	PERDA DE MASSA(g,%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
CP Normal	0,5	30V	48h	3	145,3748	136,5374	6,08	7,70	1,68
					133,9876	121,3457	9,44		
					129,3997	119,5653	7,60		
					146,5364	134,2813	8,36		
CP Aditivo	0,5	30V	48h	3	135,2603	125,0887	7,52	7,54	0,81
					145,4322	135,6155	6,75		
					143,4125	136,3421	4,93		
					146,9156	134,5879	8,39		
CP CCA "in natura"	0,5	30V	48h	3	144,1415	135,7092	5,85	6,39	2,13
					142,0483	133,7954	5,81		
					139,1166	130,2167	6,40		
					140,6325	131,8851	6,22		
CP AMB	0,5	30V	48h	3	145,4248	139,3314	4,19	6,14	0,30
					141,909	130,7176	7,89		
					139,7508	131,0164	6,25		
CP AMB + CCA "in natura"	0,5	30V	48h	3	145,4248	139,3314	4,19	6,11	1,85
					141,909	130,7176	7,89		
					139,7508	131,0164	6,25		

ANEXO B - Registro fotográfico dos corpos-de-prova após ensaio CAIM

8h 30V

				
Normal 143,4297g	Aditivo 139,2545g	AMB 143,6392g	CCA "in natura" 141,3733g	CCA "in natura"+AMB 142,8956g

8h 70V

				
Normal 148,7259g	Aditivo 144,8007g	AMB 140,2097g	CCA "in natura" 141,2832g	CCA "in natura"+AMB 144,5224g

24h15V

				
Normal 135,9637g	Aditivo 147,6265g	AMB 138,7066g	CCA "in natura" 138,8812g	CCA "in natura"+AMB 142, 8327g

24h30V

				
Normal	Aditivo	AMB	CCA "in natura"	CCA "in natura"+AMB
144,1088g	134,6376g	136,1175g	141,7593g	142,8839g

48h15V

				
Normal	Aditivo	AMB	CCA "in natura"	CCA "in natura"+AMB
146,4592g	151,8875g	142,6544g	142,4704g	137,8279g

48h 30V

				
Normal	Aditivo	AMB	CCA "in natura"	CCA "in natura"+AMB
129,3997g	135,2603g	140,6325g	144,1415g	139,7508g

ANEXO C - Resultados análise Método de Mohr

CP	24h 15V (gCl/g concreto)		Média	Desvio Padrão	24h 30V (gCl/g concreto)		Média	Desvio Padrão	48h 15V (gCl/g concreto)		Média	Desvio Padrão	48h 30V (gCl/g concreto)		Média	Desvio Padrão
Normal	0,001398		0,001364	0,000049	0,002775		0,002666	0,000104	0,001674		0,001640	0,000036	0,003634		0,003419	0,000241
	0,001386				0,002654				0,001643				0,003465			
	0,001308				0,002569				0,001602				0,003158			
CCA "in natura"	0,001275		0,001254	0,000025	0,002236		0,002269	0,000029	0,001256		0,001216	0,000036	0,001688		0,001658	0,000034
	0,001262				0,002281				0,001206				0,001666			
	0,001226				0,002289				0,001186				0,001621			
AMB	0,000768		0,000742	0,000028	0,002513		0,002433	0,000080	0,001210		0,001191	0,000023	0,001611		0,001569	0,000055
	0,000745				0,002432				0,001198				0,001589			
	0,000713				0,002354				0,001165				0,001506			
Aditivo	0,000976		0,000941	0,000031	0,002499		0,002462	0,000040	0,001273		0,001249	0,000021	0,002764		0,002684	0,000070
	0,000932				0,002468				0,001241				0,002655			
	0,000915				0,002420				0,001234				0,002633			
CCA "in natura"+AMB	0,001256		0,001226	0,000026	0,001474		0,001429	0,000043	0,001183		0,001165	0,000025	0,001536		0,001512	0,000025
	0,001212				0,001425				0,001176				0,001512			
	0,001209				0,001389				0,001137				0,001487			