

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**CARACTERÍSTICAS DE DURABILIDADE DE  
CONCRETOS COM CINZA VOLANTE E CINZA DE  
CASCA DE ARROZ COM E SEM BENEFICIAMENTO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**DAIANA DE SOUZA CEZAR**

**Santa Maria, RS, Brasil  
2011**

**CARACTERÍSTICAS DE DURABILIDADE DE CONCRETOS  
COM CINZA VOLANTE E CINZA DE CASCA DE ARROZ  
COM E SEM BENEFICIAMENTO**

**Daiana de Souza Cezar**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Civil**

**Orientador: Prof. Antônio Luiz Guerra Gastaldini**

**Santa Maria, RS, Brasil  
2011**

C425c Cezar, Daiana de Souza  
Características de durabilidade de concretos com cinza volante e cinza de casca de arroz com e sem beneficiamento / por Daiana de Souza Cezar. – 2011.  
143 f. ; il. ; 30 cm

Orientador: Antônio Luiz Guerra Gastaldini  
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 2011

1. Engenharia civil 2. Concreto 3. Durabilidade 4. Cinza de casca de arroz 5. Cinza volante I. Gastaldini, Antônio Luiz Guerra II. Título.

CDU 624

Ficha catalográfica elaborada por Cláudia Terezinha Branco Gallotti – CRB 10/1109  
Biblioteca Central UFSM

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**CARACTERÍSTICAS DE DURABILIDADE DE CONCRETOS COM  
CINZA VOLANTE E CINZA DE CASCA DE ARROZ COM E SEM  
BENEFICIAMENTO**

elaborada por  
**Daiana de Souza Cezar**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Civil**

**Antônio Luiz Guerra Gastaldini, Dr.**  
(Presidente/Orientador)

**Geraldo Cechella Isaia, Dr. (UFSM)**

**André Tavares da Cunha Guimarães, Dr. (FURG)**

Santa Maria, 27 de janeiro de 2011.

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus pais, Luiz Osório e Maria, e aos meus irmãos, Vivian e Luis Adriano, dedico.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente gostaria de agradecer ao meu orientador, professor Antônio Luiz Guerra Gastaldini, pela oportunidade que me foi concedida de realizar esta pesquisa, pela orientação e confiança.

Ao professor Geraldo Cechella Isaia, pelos conhecimentos teóricos e materiais disponibilizados, que me foram de muita valia.

Ao meu irmão (acadêmico do curso de Letras e meu professor de português particular), Luis Adriano, pela correção ortográfica e gramatical.

Às colegas Camila Crauss, Karina Kozoroski Veiga e Monique Pafiadache da Silva, companheiras de mesmo orientador, e ao colega Guilherme Höehr Trindade. Obrigada pelo apoio e ajuda nos momentos em que precisei. Especialmente à Camila Crauss, obrigada pelo apoio incondicional no início do desenvolvimento experimental desta pesquisa.

Aos bolsistas de iniciação científica Pedro Orlando Borges de Almeida Júnior, Guilherme Trevisan dos Santos, Fabrício Bolson, Andriago Kemel Zanella, Lucas Lamberti e Jéssica da Silva Nemitz pelo difícil trabalho laboratorial.

Aos funcionários do Laboratório de Materiais de Construção Civil, em especial João, Vítor, José Pedro e Eduardo, pela ajuda nas horas que necessitei.

## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
Universidade Federal de Santa Maria

### **CARACTERÍSTICAS DE DURABILIDADE DE CONCRETOS COM CINZA VOLANTE E CINZA DE CASCA DE ARROZ COM E SEM BENEFICIAMENTO**

AUTORA: DAIANA DE SOUZA CEZAR  
ORIENTADOR: ANTÔNIO LUIZ GUERRA GASTALDINI  
Data e Local da Defesa: Santa Maria, 27 de janeiro de 2011.

A indústria da construção civil vem estudando a possibilidade da utilização de subprodutos industriais, como uma das ações para solucionar as questões ambientais, tendo em vista que os mesmos são gerados em grandes quantidades e na sua maioria sem destinação específica. No presente trabalho investiga-se a viabilidade de se utilizar a CCA residual, ao natural ou moída, em concretos estruturais, em substituição parcial ao cimento Portland, a partir da análise de características de durabilidade do concreto. Porém, algumas cinzas de casca de arroz naturais apresentam efeito expansivo devido à reação entre a sílica sob a forma microcristalina e os álcalis do cimento. Assim, justifica-se o uso da cinza volante, formando misturas ternárias, como a solução para mitigar a expansão gerada pela reação álcali-agregado (RAA) ou álcali-sílica (RAS). Para isso, foram testadas três misturas aglomerantes: uma composta com CCA ao natural + CV, uma com CCA moída + CV e uma mistura de referência com 80% cimento Portland e 20% de CV, a qual se confrontaram os resultados. Adotou-se o teor de substituição de 15% de CCA, e as relações a/ag de 0,45; 0,55 e 0,65. Procederam-se os ensaios de resistividade elétrica aparente, condutividade elétrica específica, resistência à penetração de cloretos segundo o método de penetração acelerada ASTM C1202 (EAPC). Adicionalmente, foram realizados os ensaios de resistência à compressão axial e de absorção de água por capilaridade, segundo prescrições da ABNT. Os resultados obtidos na pesquisa confirmam que é viável utilizar a CCA residual, ao natural ou moída, como substituição parcial ao cimento Portland, em concretos para uso estrutural. Verificou-se que a idade e a relação a/ag mostraram uma influência expressiva na resistividade elétrica e condutividade elétrica do concreto, em virtude principalmente das alterações na estrutura dos poros e na quantidade e composição da solução dos mesmos, mostrando haver uma ótima correlação entre estes fatores. Quanto a resistência à compressão axial, aos 182 dias, a mistura composta com CCA moída apresentou desempenho superior ao da mistura de referência. Porém, para a mistura com CCA natural, o mesmo comportamento não foi verificado. No EAPC a utilização de CCA moída, queimada sem controle de temperatura, resultou em valores de cargas passantes mais baixos e profundidades de penetração menores, quando comparados aos das misturas com CCA natural e de referência. No caso da absorção de água por capilaridade, constatou-se que a utilização de CCA, em geral, diminuiu a absorção de água dos concretos.

Palavras-chave: concreto, cinza de casca de arroz, cinza volante e durabilidade.

## **ABSTRACT**

Master's Dissertation  
Graduate Program in Civil Engineering  
Universidade Federal de Santa Maria

### **CHARACTERISTICS OF DURABILITY OF CONCRETE WITH FLY ASH AND RICE HUSK ASH WITH AND WITHOUT PROCESSING**

AUTHOR: DAIANA DE SOUZA CEZAR

LEADER: ANTÔNIO LUIZ GUERRA GASTALDINI

Date and Place of Defense: Santa Maria, January 27th, of 2011.

The construction industry has been studying the possibility of using industrial sub-products, as a strategy to remedy the environmental matters, considering that the sub-products are generated in large quantities and mostly without specific destination. In the present study investigates the feasibility of using the RHA residual, natural or ground, in structural concrete, in partial replacement of Portland cement, from the analysis of durability characteristics of the concrete. However, some natural rice husk ash have natural expansive effect due to the reaction of silica under form of microcrystalline and the cement alkali. Thus, it justifies the use of fly ash, forming ternary mixtures, as the solution to mitigate the expansion generated by alkali-aggregate reaction (AAR) or alkali-silica (RAS). For this, three binders mixtures were tested: one composed with the RHA natural + FA, one with RHA ground + FA and the last one composed with a reference mixture 80% of Portland cement and 20% of FA, in which confronted the results. It was adopted the replacement levels of 15% of RHA, and the relations a/g of 0.45; 0.55 and 0.65. It was conducted the trials of apparent electrical resistivity, specific electrical conductivity, resistance to chloride penetration according to the method of accelerated penetration ASTM C1202 (EAPC). Additionally, the trials of axial compressive strength and water absorption by capillarity were performed, according to requirements of ABNT. The obtained results in the research confirm that is feasible to use the residual RHA, natural or ground, as partial replacement of Portland cement, in concrete for structural use. It was found that the age and the ratio a/g showed a significant influence on the electrical resistivity and electrical conductivity of concrete, mainly due to changes in pore structure and the quantity and composition of them solution, showing there is a great correlation among these factors. As for the axial compressive strength, at 182 days, the mixture composed with RHA ground presented higher performance than to the reference mixture. However, for the mixing with RHA natural, the same course was not observed. In the EAPC the use of RHA ground, burned without temperature control, resulted in lower values of loads bystanders and lowest penetration depths, when compared to the mixtures with RHA natural and of reference. In the case of water absorption by capillarity, it was found that the use of RHA, in general, decreased the water absorption of concrete.

Key-words: concrete, rice husk ash, fly ash and durability.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1-	Desempenho ao longo do tempo de um elemento, instalação ou sistema construtivo (MITIDIERI FILHO, 2007) .....	27
Figura 2.2-	Efeito do maior ou menor acesso de oxigênio (CASCUDO, 1997) .....	29
Figura 2.3-	Formação de uma pilha de corrosão – adaptação (MOSKVIN, 1983; ANDRADE, 1995 apud ABREU, 1998) .....	31
Figura 2.4-	Modelo de vida útil em função da corrosão proposto por TUUTTI (1982) .....	32
Figura 2.5-	Tipos de corrosão e fatores que as provocam (CASCUDO, 1997) .....	33
Figura 2.6-	Influência da composição do concreto em parâmetros que governam a proteção da armadura contra à corrosão (SCHIESSL, 1987 apud ABREU, 1998) .....	45
Figura 2.7-	Relação entre a resistividade elétrica e a relação água/cimento em concretos de cimento Portland comum aos 28 dias em cura úmida (HUGHES, SOLEIT e BRIERLEY, 1985) .....	46
Figura 2.8-	Efeito da cinza volante na resistividade elétrica do concreto (BAWEJA et al., 1996 apud WHITING e NAGI, 2003) .....	49
Figura 2.9-	Influência da sílica ativa e da cinza de casca de arroz na resistividade elétrica do concreto. CCA = cinza de casca de arroz; SA = sílica ativa; CPOZ = cimento pozolânico; CARI = cimento de alta resistência inicial (ABREU, 1998) .....	50
Figura 2.10-	Efeito da cinza de casca de arroz na resistividade elétrica do concreto. REF = 100% cimento; V35 = 35% cinza volante; E50 = 50% escória de alto forno; 10A, 20A e 30A = 10%, 20% e 30% de cinza de casca de arroz, respectivamente (MISSAU, 2004) .....	52
Figura 2.11-	Condutividade específica, em $\text{ohm}^{-1}$ , para relação a/ag 0,55 aos 91 dias (DAL RI, 2002) .....	57
Figura 2.12-	Condutividade específica, em %, para relação a/ag 0,55 aos 91 dias (DAL RI, 2002) .....	57

Figura 2.13-	Condutividade elétrica específica das misturas investigadas (PEDROZO, 2008) .....	58
Figura 2.14-	Varição da condutividade ao longo do tempo. (PRINCIGALLO, BREUGEL e LEVITA, 2003) .....	59
Figura 3.1-	Vistas de um aterro com cinza de casca de arroz residual (POUEY, 2006) .....	63
Figura 3.2-	Micrografias de cinza de casca de arroz – (a) produzida em forno comum; (b) produzida em leite fluidizado (AGOPYAN, 1991, apud POUEY, 2006) .....	66
Figura 3.3-	a) Cinza cristalina, após moagem, b) Cinza amorfa, após moagem (BARBOSA et al, 2006) .....	66
Figura 3.4-	Resultado do ensaio de difração de raio-x CCA cristalina (BARBOSA, et al 2006) .....	67
Figura 3.5-	Resultado do ensaio de difração de raio-x CCA amorfa (BARBOSA, et al 2006) .....	67
Figura 3.6-	Difração de Raios-X da CCA (DUART, 2008) .....	68
Figura 3.7-	Micrografia concreto com 25% de CCAN, 3000X, 91 dias (DUART, 2008) .....	69
Figura 3.8-	Microscopia eletrônica de varredura da CCA após moagem (SANTOS, 1997) .....	69
Figura 4.1-	Distribuição Granulométrica do agregado miúdo .....	80
Figura 4.2-	Distribuição Granulométrica dos agregados graúdos .....	80
Figura 4.3-	Esquema dos corpos de prova utilizados no ensaio de medida da resistividade pelo Método dos 4 eletrodos (ABREU, 1998) ..	86
Figura 4.4-	Ensaio de resistividade elétrica sendo executado .....	88
Figura 4.5-	Corpo de prova do ensaio de absorção capilar, após ser rompido, com a distribuição interna da água absorvida desenhada em uma das metades .....	90
Figura 4.6-	Corpo de prova do ensaio ASTM C1202:2005 após a aspersão da solução de nitrato de prata .....	93
Figura 5.1-	Resistência à compressão versus relação a/ag, aos a) 7 dias, b) 28 dias, c) 91 dias e d) 182 dias .....	98

Figura 5.2-	Resistividade elétrica aparente, a) $a/ag = 0,45$ ; b) $a/ag = 0,55$ e c) $a/ag = 0,65$ .....	102
Figura 5.3-	Resultados dos ensaios de resistividade elétrica aparente comparados aos dados obtidos por Hoppe (2005), a) $a/ag = 0,45$ ; b) $a/ag = 0,55$ e c) $a/ag = 0,65$ .....	107
Figura 5.4-	Resistividade elétrica aparente correspondente às resistências à compressão axial de 30MPa, 40MPa e 50MPa, aos 91 dias .	109
Figura 5.5-	Condutividade elétrica específica da pasta, a) 7 dias; b) 28 dias; c) 56 dias; d) 91 dias e e) 182 dias .....	112
Figura 5.6-	Condutividade elétrica específica do concreto, a) 7 dias; b) 28 dias; c) 56 dias; d) 91 dias e e) 182 dias .....	114
Figura 5.7-	Valores médios de absorção capilar para cada mistura, em função da relação $a/ag$ , aos 91 dias .....	116
Figura 5.8-	Carga total passante em função das relações $a/ag$ , para dois períodos de cura a) 7 dias e b) 28 dias – aos 91 dias .....	118
Figura 5.9-	Acréscimo da carga passante versus aumento da relação $a/ag$ , para dois períodos de cura a) 7 dias e b) 28 dias – aos 91 dias .....	121
Figura 5.10-	Varição da Carga Total Passante de cada mistura investigada, aos 91 dias, em função da relação água/aglomerante e do tempo de cura úmida .....	125
Figura 5.11-	Correlação entre carga passante e profundidade de penetração após ensaio ASTM C1202:2005, para dois períodos de cura a) 7 dias e b) 28 dias – aos 91 dias .....	129
Figura 5.12-	Carga passante versus profundidade de penetração (PEDROZO, 2008) .....	130

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1-	Critério de avaliação da resistividade CEB 192 (ABREU, 1998) ....	43
Tabela 4.1-	Características físicas dos aglomerantes.....	77
Tabela 4.2-	Ensaio em argamassa de CII Z .....	77
Tabela 4.3-	Análise química dos aglomerantes .....	77
Tabela 4.4	Características físicas dos agregados .....	79
Tabela 4.5-	Ordem de colocação e tempo de mistura dos materiais na betoneira .....	82
Tabela 4.6-	Consumo dos materiais em quilos por metro cúbico de concreto ..	83
Tabela 4.7-	Idades de ensaio e tamanho dos corpos-de-prova .....	85
Tabela 4.8-	Dados informativos do ensaio de resistividade elétrica aparente ..	87
Tabela 5.1-	Resultados de resistência à compressão .....	96
Tabela 5.2-	Resultados de resistência à compressão obtidos por Pedrozo (2008) .....	96
Tabela 5.3-	Resultados dos ensaios de resistividade elétrica aparente .....	101
Tabela 5.4-	Índice de resistividade elétrica das misturas investigadas .....	104
Tabela 5.5-	Probabilidade de corrosão para as misturas avaliadas segundo o critério do CEB 192 .....	105
Tabela 5.6-	Resultados dos ensaios de resistividade elétrica aparente, obtidos por Hoppe (2005) para as relações a/ag avaliadas nesta pesquisa .....	106
Tabela 5.7-	Coeficientes das equações exponenciais ( $f_c = A/B^x$ ) obtidos para a idade de 91 dias .....	108
Tabela 5.8-	Relações água/aglomerante e resistividades elétricas obtidas, aos 91 dias .....	109
Tabela 5.9-	Condutividade elétrica específica para a solução dos poros da pasta .....	110

Tabela 5.10-	Condutividade elétrica específica da solução dos poros do concreto .....	111
Tabela 5.11-	Resultados de absorção capilar, aos 91 dias .....	115
Tabela 5.12-	Resultados do ensaio acelerado de penetração de cloretos aos 91 dias (ASTM C1202:2005) .....	119
Tabela 5.13-	Cargas passantes encontradas por outros pesquisadores .....	123
Tabela 5.14-	Classificação dos concretos quanto à penetrabilidade aos íons cloreto ASTM C1202:2005 .....	126
Tabela 5.15-	Enquadramento das misturas quanto à penetrabilidade aos íons cloreto segundo ASTM C 1202:2005 .....	127

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**a/ag** – água (água + aditivo)/aglomerante (cimento + adição), em massa

**a/c** – água (água + aditivo)/cimento, em massa

**ABCP** – Associação Brasileira de Cimento Portland

**CaCl<sub>2</sub>** – cloreto de cálcio

**CaCO<sub>3</sub>** – carbonato de cálcio

**CaSO<sub>4</sub>** – sulfato de cálcio

**Ca<sup>2+</sup>** - íons cálcio

**Ca(OH)<sub>2</sub>** – hidróxido de cálcio

**C<sub>3</sub>S** – silicato tricálcico

**C<sub>2</sub>S** – silicato dicálcico

**C<sub>3</sub>A** – aluminato tricálcico

**CCA** – cinza da casca do arroz

**CCA's** – cinzas da casca do arroz

**CCAM** – cinza da casca do arroz, moída

**CCAN** – cinza da casca do arroz, ao natural

**CEB** - Comitê euro-international du béton

**CH** - hidróxido de cálcio

**Cl<sup>-</sup>** - íons cloretos

**Cl<sup>-</sup>/OH<sup>-</sup>** - relação iônica entre cloretos e hidroxilas

**CO<sub>2</sub>** – dióxido de carbono

**CONAB** – Companhia Nacional de Abastecimento

**CP** – Cimento Portland

**C-S-H** – silicato de cálcio hidratado

**C/S** - relação entre cal (CaO) e sílica (SiO<sub>2</sub>)

**CSI** – Cement Sustainability Initiative

**CPII-Z** – Cimento Portland com pozolana

**CV** – cinza volante

**EAPC** – Ensaio Acelerado de Penetração de Cloretos

**Fe<sup>2+</sup>** – íons ferro

**GEPECON** – Grupo de Estudos e Pesquisas em Concreto

**H<sup>+</sup>** - íons hidrogênio

**H<sub>2</sub>S** – gás sulfídrico

**H<sub>2</sub>O** – molécula de água

**K<sup>+</sup>** - íons potássio

**KOH** – hidróxido de potássio

**K<sub>2</sub>O** – óxido de potássio

**KCl** – cloreto de potássio

**K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>** – sulfato de potássio

**LEMIT** – Laboratório de Entrenamiento Multidisciplinario para La Investigación Tecnológica

**MCT** – Ministério de Ciência e Tecnologia

**Mg<sup>2+</sup>** - íons magnésio

**Na<sup>+</sup>** - íons sódio

**NaCl** – cloreto de sódio

**NaOH** – hidróxido de sódio

**NH<sup>4+</sup>** - cátion amônio

**NBR** - Norma Brasileira

**NO<sup>3-</sup>** - nitritos

**µm** - micrometro

**O<sub>2</sub>** – gás oxigênio

**OH<sup>-</sup>** - íons hidroxila ou hidroxila

**PAC** – Programa de Aceleração do Crescimento

**pH** – potencial de hidrogênio ou hidrogeniônico

**PIM** – Porosimetria por Intrusão de Mercúrio

**R<sup>2</sup>** - coeficiente de determinação

**REF** – mistura de referência com 80% de cimento + 20% de cinza volante

**RAA** - reação álcali-agregado

**RAS** – reação álcali-sílica

**S<sup>-</sup>** - íons sulfetos

**SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>** - óxido de enxofre

**SO<sub>2</sub>** – dióxido de enxofre

**SO<sub>3</sub>** – trióxido de enxofre

**SNIC** – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

**#** - abertura da malha da peneira

**15CCAM** – mistura composta com 15% de CCA, moída, em substituição ao aglomerante no concreto

**15CCAN** – mistura composta com 15% de CCA, ao natural, em substituição ao aglomerante no concreto

**UDELAR** – Universidad de La Republica

**WBCSD** – World Business Council for Sustainable Development



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>19</b>
1.1 Justificativa .....	22
1.2 Objetivos .....	23
1.2.1 Objetivos específicos .....	23
1.3 Estrutura da Dissertação .....	24
<b>2 ASPECTOS REFERENTES À DURABILIDADE DO CONCRETO</b> .....	<b>26</b>
2.1 Introdução .....	26
2.2 Corrosão das armaduras .....	27
2.2.1 Introdução .....	27
2.2.2 Corrosão em meio aquoso .....	28
2.2.2.1 Iniciação .....	32
2.2.2.2 Propagação .....	36
2.2.3 Penetração de cloretos .....	36
2.3 Mecanismos de transporte de agentes agressivos no concreto .....	37
2.3.1 Introdução .....	37
2.3.2 Permeabilidade .....	38
2.3.3 Absorção capilar .....	39
2.3.4 Difusão .....	40
2.3.5 Migração .....	40
2.4 Resistividade elétrica aparente .....	41
2.4.1 Introdução .....	41
2.4.2 Efeito da relação água/aglomerante e do consumo de cimento .....	45
2.4.3 Efeito dos agregados .....	47
2.4.4 Efeito das adições minerais .....	47
2.5 Condutividade elétrica específica .....	52
<b>3 ADIÇÕES MINERAIS NO CONCRETO</b> .....	<b>61</b>
3.1 Introdução .....	61
3.2 Cinza de casca de arroz .....	61
3.3 Cinza volante .....	70
<b>4 PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>74</b>
4.1 Introdução .....	74
4.2 Variáveis da pesquisa .....	74
4.3 Caracterização dos materiais .....	75
4.3.1 Aglomerantes .....	76
4.3.2 Agregados .....	78
4.3.3 Aditivo .....	81
4.3.4 Água .....	81
4.4 Ordem de colocação dos materiais na betoneira .....	81
4.5 Dosagem do concreto .....	81
4.5.1 Moldagem e cura .....	83
4.6 Sequência de ensaios .....	85
4.6.1 Ensaios realizados no concreto .....	85
4.6.1.1 Resistividade elétrica aparente .....	85
4.6.1.2 Condutividade elétrica específica da solução aquosa dos poros .....	89

4.6.1.3 Absorção capilar .....	89
4.6.1.4 Ensaio acelerado de penetração de cloretos – ASTM C1202:2005 .....	91
4.6.1.5 Resistência à compressão .....	93
4.6.2 Ensaios realizados na pasta .....	93
4.6.2.1 Condutividade elétrica específica da solução aquosa dos poros .....	93
<b>5 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>95</b>
<b>5.1 Introdução .....</b>	<b>95</b>
<b>5.2 Análise dos resultados de resistência à compressão axial .....</b>	<b>95</b>
<b>5.3 Análise dos resultados de resistividade elétrica aparente .....</b>	<b>101</b>
5.3.1 Avaliação da resistividade elétrica estabelecendo níveis de resistência à compressão .....	108
<b>5.4 Análise dos resultados de condutividade elétrica específica .....</b>	<b>110</b>
<b>5.5 Análise dos resultados de absorção capilar .....</b>	<b>115</b>
<b>5.6 Análise dos resultados do ensaio acelerado de penetração de cloretos (ASTM C1202:2005) .....</b>	<b>117</b>
5.6.1 Influência da relação a/ag .....	120
5.6.2 Influência da utilização de CCA .....	122
5.6.3 Influência do período de câmara úmida .....	124
5.6.4 Classificação das misturas quanto à penetrabilidade aos íons cloreto .....	126
5.6.5 Determinação da profundidade de penetração nos concretos submetidos ao EAPC .....	128
<b>6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>131</b>
<b>6.1 Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>133</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>134</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Desenvolvimento sustentável significa satisfazer as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras. Para isso, é fundamental a elaboração de produtos com menor energia agregada, consumo de matéria prima, desperdício de recursos naturais, poluição e maior reutilização dos recursos disponíveis.

Segundo Isaia (2002), o concreto, que só não é tão consumido pelo homem quanto a água, apresenta a maior representatividade para potencializar o princípio da sustentabilidade. Isso se dá porque pequenas reduções no consumo de materiais na sua constituição, em especial o cimento, representam ganhos muito significativos no consumo de energia, prospecção de recursos naturais e melhoria dos ecossistemas em geral.

O cimento é um produto indispensável, praticamente insubstituível. E o único presente desde o início da obra até o seu término (independente do tipo de construção). De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), o consumo de cimento no Brasil, em 2009, foi de 51.892.312 toneladas. Em 2010, até o mês de agosto, já estava em 38.876.470 toneladas. E esse consumo aumentará à medida que o país for atendendo às necessidades básicas de infraestrutura da população.

O Brasil, atualmente, possui um importante programa de infraestrutura para ser implementado em obras de projetos como: Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) e Minha Casa, Minha Vida, além dos grandes eventos: Copa do Mundo de 2014 e Olimpíadas de 2016. Para isso, o cimento é a base a fim de que sejam construídas casas, hospitais, escolas, sistemas de saneamento, portos, aeroportos, rodovias, estradas de ferro, pontes, hidrelétricas, instalações esportivas, etc.

O grande desafio, no entanto, é produzir cimento suficiente para todos esses projetos, com baixo nível de emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), um dos principais gases causadores do efeito estufa.

De acordo com o SNIC, mais da metade da emissão de CO<sub>2</sub> na indústria do cimento deve-se ao processo de produção, e isso ocorre durante a transformação

físico-química do calcário em clínquer (principal componente do cimento), reação denominada descarbonatação. O clínquer tem alta emissão devido à grande participação do calcário em sua produção (parte dele se transforma em CO<sub>2</sub>.)

Da extração de matéria-prima até a última etapa do processo produtivo, a indústria do cimento nacional toma muitas medidas para reduzir emissões, reaproveitar materiais e preservar a natureza. Por isso, tal indústria está entre uma das mais eficazes no combate aos gases de efeito estufa.

A indústria do cimento no Brasil alinha-se com os esforços internacionais para reduzir as mudanças climáticas. Com isso, o SNIC, a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e grupos associados criaram, em 2008, o Comitê de Mudanças Climáticas, reunindo especialistas em meio ambiente do setor. Entre outras ações, o Comitê dá suporte necessário ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), na elaboração do 2º Inventário Nacional de Emissões de Gases de Efeito Estufa.

Já internacionalmente, a indústria do cimento criou a CSI (Cement Sustainability Initiative), vinculada ao WBCSD (World Business Council for Sustainable Development). A CSI objetiva estimular práticas sustentáveis na indústria, dentre elas o monitoramento, o controle e a redução de suas emissões de CO<sub>2</sub>.

Dados internacionais levantados pela CSI apontam que a América Latina, onde o Brasil é o principal produtor, mostra-se uma das regiões que responde pelos menores índices de emissões de CO<sub>2</sub> por tonelada de cimento.

O uso de cimentos com maior percentual de adições e a substituição parcial do cimento por adições minerais diminuem a utilização de clínquer e a consequente liberação de CO<sub>2</sub> proveniente do consumo de combustíveis no forno e da transformação química do calcário (calcinação). Assim, reduzem-se as emissões totais de CO<sub>2</sub> por tonelada de cimento produzido.

As adições minerais são, em geral, subprodutos industriais ou resíduos agroindustriais, que, hoje, são bastante utilizados nos mais diversos tipos de estruturas de concreto. Neville (1997) acredita que as adições minerais têm seu emprego justificado, em muitos casos, não só pelo menor impacto ambiental gerado, mas também pelo aprimoramento das propriedades do concreto, principalmente, quanto à maior durabilidade e menores custos de manutenção.

Neste estudo, foram usadas cinza de casca de arroz, moída e ao natural, e cinza volante, em substituição parcial ao cimento, como uma das ações para solucionar as questões ambientais.

A cinza de casca de arroz é o resíduo da cadeia produtiva do arroz. Ou seja, é um resíduo agro-industrial, oriundo da queima da casca de arroz para a geração de energia no processo de beneficiamento do grão. Mehta e Monteiro (2008) afirmam que cada tonelada de arroz em casca produz cerca de 200 kg de casca, que por combustão origina 40 kg de cinza.

A CCA, devido ao elevado teor de sílica (90 a 95%) presente na sua composição química, encontra várias aplicações na construção civil (pozolana agregada em cimentos, concretos e argamassas, fabricação de tijolos prensados e estabilização de solos), na indústria cerâmica (processo de obtenção de refratários, porcelanas e isolantes térmicos) e na fabricação de vidros.

Entretanto, algumas CCA's naturais, apresentam efeito expansivo devido à reação entre a sílica, sob a forma microcristalina, e os álcalis do cimento. O uso de cimentos com pozolanas tem sido a solução para mitigar a expansão gerada pela reação álcali-agregado (RAA) ou álcali-sílica (RAS). O cimento CII-Z é um cimento com adições pozolânicas e esse teor pode variar de 6 a 14 % na sua composição, permitindo assim a adição de mais cinza volante na mistura dos traços para os ensaios de durabilidade do concreto. Höehr (2010) ensaiou barras de argamassa e concluiu que a CCA natural gerou expansão. A utilização do cimento CII-Z acrescido com no mínimo de 20 % de cinza volante mostrou-se mitigador da RAS.

A cinza volante é uma pozolana utilizada como adição ao cimento que melhora suas propriedades frente ao ataque de agentes agressivos. É a cinza obtida por precipitação eletrostática dos gases de exaustão de estações alimentadas por carvão. Suas partículas são esféricas e têm uma finura bastante elevada.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a distribuição granulométrica das partículas, morfologia e características de superfície da cinza volante, empregada como adição mineral, exercem influência considerável no consumo de água, na trabalhabilidade do concreto fresco e na velocidade de desenvolvimento da resistência do concreto endurecido.

Portanto, a incorporação das cinzas volantes no concreto traz benefícios de ordem técnica, econômica e ambiental. Isso se dá devido à redução das cinzas não aproveitadas, do consumo de energia e da emissão do CO<sub>2</sub> na atmosfera.

Diante disso, a utilização de adições minerais no concreto é considerada uma solução eficiente no incremento das propriedades relacionadas diretamente com a durabilidade. As adições minerais promovem alterações na estrutura dos poros, na composição da solução dos poros e com isto na resistividade elétrica do concreto, com reflexos na sua durabilidade.

## **1.1 Justificativa**

Uma das causas da falta de interesse pelo uso da CCA está relacionada à necessidade da utilização de fornos com queima controlada, para a obtenção de cinzas amorfas. Porém, os fornos para a queima da casca de arroz para a obtenção de energia são, na sua grande maioria, sem controle de temperatura, o que descartaria para o uso em concretos um volume de cinza muito grande.

Outra causa do pouco interesse da utilização da CCA está relacionado com a necessidade de moagem do material, para ativar sua pozolanicidade, o que exige instalações industriais que aumentam o seu custo de produção.

Em virtude disso, a finalidade desta dissertação é estudar a adição da cinza de casca de arroz natural (CCAN), sem queima controlada e sem moagem, em substituição parcial a mistura aglomerante (composta de 80% de CII-Z e 20% de CV). Isso se justifica, porque é a forma mais comum encontrada nas diversas beneficiadoras de produção de arroz do interior do Brasil. Além disso, este trabalho pretende verificar a durabilidade de um concreto com cinza natural, sem beneficiamento por moagem.

Esta dissertação faz parte do Projeto-Programa denominado “Produção de concreto estrutural com cinza de casca de arroz in natura, sem beneficiamento”, formado pelo grupo técnico: GEPECON (UFSC/Brasil), Universidad de La Republica (UDELAR/ Uruguai) e Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT/Argentina). Os estudos propostos dentro deste programa investigam as propriedades mecânicas, de durabilidade e desempenho do concreto com adição de CCA natural e moída, no estado fresco e endurecido.

Desse modo, esta pesquisa consiste no estudo experimental das propriedades referentes à durabilidade de concreto com adição de volante e cinza

de casca de arroz natural, sem beneficiamento, comparadas com a cinza de casca de arroz moída (CCAM) em laboratório.

## 1.2 Objetivos

O objetivo geral desta dissertação, inserido no contexto do projeto-programa acima citado, é verificar a viabilidade técnica do uso de 15 % de CCA natural sem beneficiamento. Ou seja, sem pré-moagem, sem peneiramento e queimada sem controle de temperatura (em substituição parcial ao cimento na produção de concreto estrutural e produtos estruturais pré-moldados de concreto). Desse modo, formando misturas ternárias entre o cimento CII-Z, a cinza volante e a CCA, será investigada a influência exercida sobre algumas propriedades ligadas à durabilidade do concreto, tais como a resistividade elétrica, a condutividade elétrica da solução aquosa dos poros, a resistência à penetração de cloretos e a absorção capilar. Além disso, a CCA moída foi utilizada nos ensaios a fim de comparação, a qual foi obtida através da moagem por uma hora em um moinho de bolas de aço.

Houve a opção pelo uso de 15 % de CCA, porque, em pesquisas anteriores, provou-se que, na dosagem em concreto, esse teor não apresenta diferenças significativas nas propriedades da microestrutura e durabilidade em relação à CCA moída, para o patamar de resistência à compressão de 30 MPa. Já o uso de 20% de CV, justifica-se pelo estudo realizado por Höehr (2010).

O propósito final desta pesquisa visa buscar subsídios para que a cinza de casca de arroz deixe de ser considerada um resíduo agrícola e torne-se um material cimentício para emprego na construção civil.

### 1.2.1 Objetivos específicos

A presente dissertação tem os seguintes objetivos específicos:

a) estudar o comportamento da resistência à compressão axial de corpos de prova de concreto moldados e curados em laboratório, com substituição de 15% da mistura aglomerante por CCA natural e moída;

b) analisar as características de durabilidade em relação à resistência à penetração de cloretos, à absorção de água por capilaridade, à condutividade elétrica e à resistividade elétrica de concretos com as mesmas composições do item a);

c) comparar os resultados dos ensaios dos concretos com CCA natural e moída com os similares, somente com adição de cinza volante (80% CII Z + 20% CV = referência).

### **1.3 Estrutura da Dissertação**

A seguir, destacam-se os 06 capítulos que compõem esta dissertação.

No capítulo 1, Introdução, abordam-se a justificativa da adição da cinza de casca de arroz na mistura do concreto e os objetivos da pesquisa ao utilizar cinza natural sem beneficiamento.

O capítulo 2, Aspectos referentes à durabilidade do concreto, trata dos fatores que influenciam na corrosão das armaduras do concreto, dando maior atenção à ação dos íons cloreto. Também se discutem os principais mecanismos de transporte de cloretos para o concreto e os processos de permeabilidade, absorção capilar, difusão e migração. Por último, ainda há uma revisão sobre a resistividade elétrica aparente e a condutividade elétrica específica.

O capítulo 3, Adições minerais no concreto, apresenta estudo das adições minerais que fazem parte desta pesquisa.

No capítulo 4, Programa experimental, revelam-se a caracterização e as propriedades dos materiais empregados, a escolha da ordem de colocação dos materiais na betoneira e os procedimentos de dosagem, moldagem e cura dos concretos. Além disso, há a metodologia de cada ensaio realizado.

O capítulo 5, Análise dos resultados e discussão, traz os resultados obtidos, juntamente com a análise teórica e a comparação entre grandezas pertinentes.



Para finalizar, o capítulo 6, Conclusões e considerações finais, destaca os comentários sobre os resultados obtidos e as sugestões para pesquisas futuras.

## **2 ASPECTOS REFERENTES À DURABILIDADE DO CONCRETO**

### **2.1 Introdução**

Durabilidade do concreto não significa vida indefinida, tampouco suportar qualquer tipo de ação. Uma estrutura de concreto é durável quando desempenha as funções que lhe foram atribuídas, mantendo a resistência e utilidade que dela se espera durante um período de vida previsto. O concreto deve suportar o processo de deterioração ao qual se supõe que venha a ser submetido. Portanto, nessas condições, o concreto é considerado durável (NEVILLE, 1997).

Devido às suas características físicas, químicas e mecânicas, o concreto, sendo utilizado nos mais diversos ambientes, está sujeito ao ataque de uma série de agentes deletérios que podem comprometer a sua durabilidade (ANDRADE, 1997). A água comumente está envolvida em toda forma de deterioração ou degradação. Em sólidos porosos, a permeabilidade do material à água, habitualmente, determina a taxa de deterioração (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Sendo assim, o estudo da durabilidade das estruturas de concreto está relacionado com a estimativa da sua vida útil. Neste trabalho, entende-se por vida útil: o período em que a estrutura conserva os requisitos de projeto (segurança, estabilidade, funcionalidade e estética) sem exigir medidas extras de manutenção e reparo. Nesses requisitos, incluem-se aspectos de durabilidade como: as ações do meio ambiente entre as possíveis solicitações a que a estrutura será submetida.

Uma das principais causas da diminuição da vida útil de uma estrutura de concreto é a corrosão das armaduras. A deterioração da estrutura por corrosão pode ocorrer em situações distintas, apresentadas e representadas na Figura 2.1.

Vida útil de projeto: até a despassivação da armadura.

Vida útil de serviço ou de utilização: até o momento em que aparecem manchas na superfície do concreto ou ocorre a abertura da fissura (0,10 mm) no concreto de cobrimento, ou, ainda, quando há o destacamento de concreto de cobrimento.

Vida útil última ou total: até a ruptura e o colapso parcial ou total da estrutura.  
Abertura da fissura de 0,3 mm.

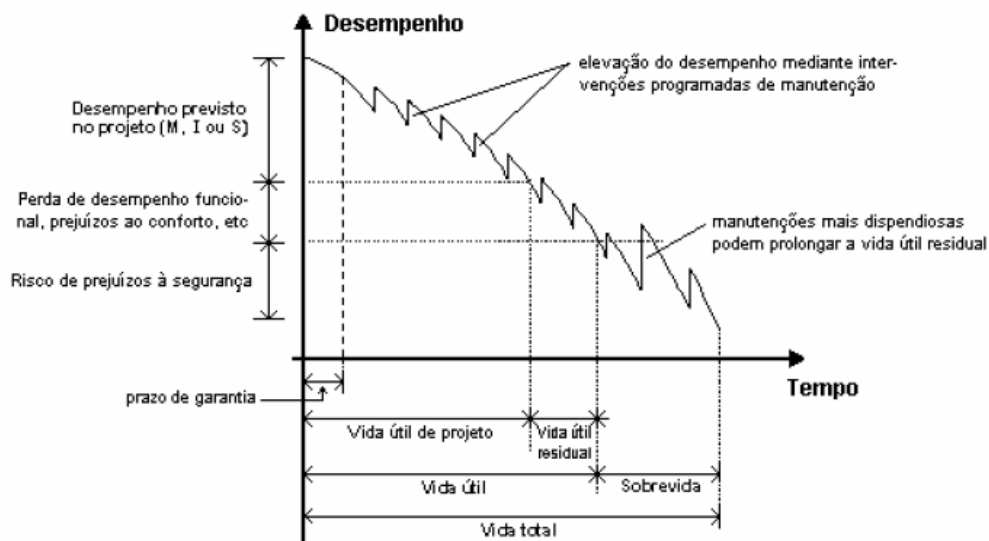


Figura 2.1 - Desempenho ao longo do tempo de um elemento, instalação ou sistema construtivo (MITIDIARI FILHO, 2007).

## 2.2 Corrosão das armaduras no concreto

### 2.2.1 Introdução

A durabilidade das estruturas de concreto armado tem sido limitada por processos de deterioração, principalmente, no que diz respeito à corrosão de armaduras. Corrosão é a deterioração dos materiais pela ação química ou eletroquímica do meio, podendo estar ou não associada a esforços mecânicos. Além disso, pode ser classificada em dois grandes grupos: corrosão química ou oxidação e corrosão eletroquímica ou aquosa (CASCUDO, 1997).

A oxidação se dá por uma reação gás metal, com formação de película de óxido. Este tipo de corrosão é um processo lento que não provoca deterioração

essencial das superfícies metálicas (apenas se existirem gases extremamente agressivos na atmosfera).

Já a corrosão aquosa é um ataque de natureza, essencialmente, eletroquímica, que ocorre em meio aquoso. A corrosão ocorre quando uma película de eletrólito forma-se sobre a superfície da armadura. Esta fina camada de eletrólito constitui-se a partir da presença de umidade no concreto. As armaduras, antes de serem utilizadas, quando ainda armazenadas no canteiro, sofrem o ataque desse tipo de corrosão (HELENE, 1986; CASCUDO, 1997).

O concreto pode, desde que bem executado, proteger a armadura da corrosão. Isto é, fornecer uma proteção física através da camada de cobrimento, que dificulta a entrada de agentes agressivos do meio, e uma proteção química devido ao pH elevado do meio aquoso (aproximadamente 12,5), fator determinante para a formação de uma camada aderente e passivante existente na interface pasta-aço. A alcalinidade do concreto resulta, entre outros motivos, das reações de hidratação dos silicatos de cálcio ( $C_3S$  e  $C_2S$ ), que liberam uma porcentagem de  $Ca(OH)_2$  (hidróxido de cálcio), podendo alcançar cerca de 25% da massa total de compostos hidratados presentes na pasta. O hidróxido de cálcio dissolve-se em água e preenche os poros e capilares do concreto, atribuindo-lhe um caráter alcalino. O  $Ca(OH)_2$  tem um pH da ordem de 12,6, que proporciona uma passivação do aço. A camada passiva é muito aderente e delgada (geralmente invisível), cuja espessura varia de  $10^{-3}$  a  $10^{-1}$   $\mu m$ . Uma vez destruída essa película protetora, seja pela chegada da frente de carbonatação, seja pela ação deletéria dos cloretos, ou, ainda, pela ação simultânea de ambos os fatores, ou mesmo devido à lixiviação do concreto, a armadura ficará vulnerável ao fenômeno da corrosão. (HELENE, 1986).

### 2.2.2 Corrosão em meio aquoso

De acordo com Helene (1986), a corrosão do aço no concreto é um mecanismo eletroquímico, que conduz à formação de óxidos/hidróxidos de ferro – produtos de corrosão avermelhados, pulverulentos e porosos, denominados ferrugem – e só ocorre nas seguintes condições:

- *deve existir um eletrólito*: o eletrólito é um condutor (geralmente um líquido), contendo íons que transportam a corrente elétrica de um ânodo para um cátodo, e a água presente no concreto atua como um excelente eletrólito, principalmente nas regiões da obra expostas às intempéries. Alguns produtos de hidratação do cimento como, por exemplo, a portlandita  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (hidróxido de cálcio), que é solúvel em água, também formam nos poros e capilares uma solução saturada que compõe um bom eletrólito. O eletrólito apresenta-se sob a forma de uma película sobre a superfície do aço e é fornecido pela presença de umidade no concreto.

- *deve haver diferença de potencial*: é essencial ao processo, porque dela depende a formação da pilha eletroquímica e, para se configurar uma pilha, é necessário um ânodo, um cátodo, um condutor metálico (no caso a armadura) e também o eletrólito. A diferença de potencial pode ter origem a partir da diferença de umidade, concentração salina, tensão no concreto e no aço, aeração devido à maior ou menor compactação e qualidade do concreto, etc. Observa-se na Figura 2.2 que, na formação da pilha de aeração diferencial, as zonas menos aeradas (concretos mais densos) tornam-se cátodos, e as zonas mais aeradas (concretos mais porosos) tornam-se áreas preferencialmente anódicas.

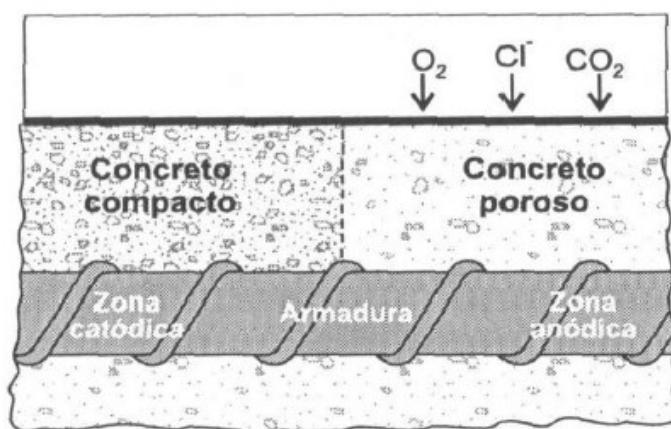


Figura 2.2 – Efeito do maior ou menor acesso de oxigênio. (CASCUDO, 1997).

- *deve haver a presença de oxigênio*: é necessário oxigênio para a formação de ferrugem (óxido/hidróxido de ferro). A porosidade do concreto facilita a entrada do  $\text{O}_2$ , que promove sua interação com o meio. É correto afirmar que todo o processo

eletroquímico de corrosão do aço é controlado pelo acesso de oxigênio dissolvido no eletrólito às regiões catódicas.

• *podem existir agentes agressivos*: a corrosão pode ser acelerada por agentes agressivos contidos ou absorvidos pelo concreto, uma vez que esses aumentam de forma significativa a condutividade elétrica do eletrólito. Dentre os agentes destacam-se os íons sulfetos ( $S^{2-}$ ), os íons cloretos ( $Cl^-$ ), o dióxido de carbono ( $CO_2$ ), os nitritos ( $NO_2^-$ ), o gás sulfídrico ( $H_2S$ ), o cátion amônio ( $NH_4^+$ ), os óxidos de enxofre ( $SO_2$ ,  $SO_3$ ), fuligem, etc. Tais agentes agressivos não permitem a formação ou quebram a película já existente de passivação do aço, assim, promovendo a aceleração do processo de corrosão. Deve-se, neste ponto, lembrar que o papel dos agentes agressivos como aceleradores da corrosão é limitado pelo teor de umidade do concreto, que fornece o eletrólito ao processo eletroquímico.

De acordo com Cascudo (1997), a corrosão desenvolve-se com a presença das seguintes reações:

- reações de dissolução do ferro (oxidação) que ocorrem nas zonas anódicas (corroídas):



- reações de redução de oxigênio que ocorrem nas zonas catódicas (não corroídas):



A partir daí, os íons  $Fe^{2+}$  deslocam-se pelo eletrólito em direção ao cátodo e os íons  $OH^-$  deslocam-se em direção ao ânodo. Em uma área intermediária, esses íons se encontram, e precipita-se o hidróxido ferroso:



O hidróxido ferroso também pode ser formado em regiões próximas do cátodo (região não corroída), pois o  $OH^-$ , um íon maior e de menor massa do que o  $Fe^{2+}$ , apresenta mobilidade iônica menor do que o íon de ferro. Esse produto de corrosão

é de cor marrom e fracamente solúvel; de acordo com o teor de oxigênio presente, ele pode sofrer alterações e gerar outros produtos de corrosão.

A Figura 2.3 apresenta o esquema de uma pilha de corrosão bem como os fatores que possibilitam o processo corrosivo. Com a formação dessa pilha de corrosão, têm-se um ânodo, um cátodo, um condutor metálico e um eletrólito. Qualquer diferença de potencial entre as zonas anódicas e catódicas causa o aparecimento de corrente elétrica. Dependendo da intensidade dessa corrente e do acesso de oxigênio, poderá ou não haver corrosão.

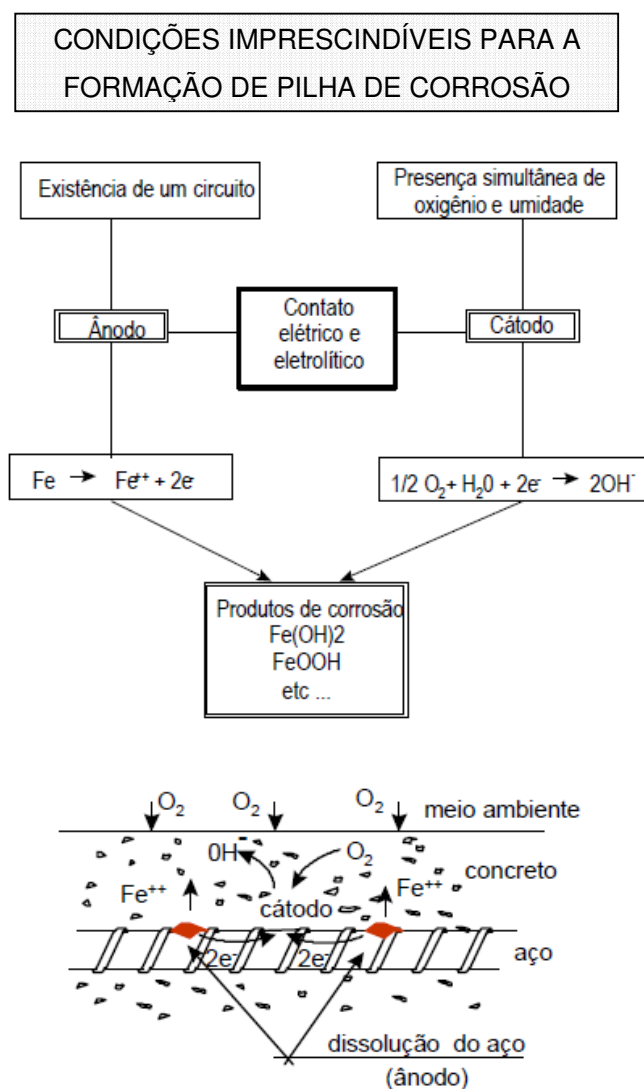


Figura 2.3 – Formação de uma pilha de corrosão – adaptação (MOSKVIN 1983; ANDRADE, 1995 apud ABREU, 1998).

Segundo Cascudo (1997), ânodo é o local da superfície metálica em que se verificam as reações anódicas de oxidação do átomo metálico. No ânodo, ocorre perda de elétrons, pois estes, provenientes das reações anódicas, movem-se para o cátodo, em que serão consumidos em outra reação superficial, sendo o ânodo a região que fica corroída. O cátodo é o local em que se verificam reações catódicas de redução de espécies eletroquímicas ou íons de eletrólito. No cátodo, há um ganho de elétrons oriundos de regiões anódicas, essencial para viabilizar as reações de redução de cátions em suas proximidades. No caso de estruturas de concreto armado, a água dos poros do concreto tem o papel de eletrólito, onde ocorre a condução iônica, e a transferência de cargas (condução eletrônica) se dá através da armadura, que atua como condutor metálico.

Tuutti (1982) propôs um modelo de corrosão, mostrado na Figura 2.4, que subdivide o processo em iniciação e propagação. A iniciação corresponde ao período de tempo (de acumulação) entre a execução da estrutura e início da despassivação da armadura; a propagação consiste no desenvolvimento da corrosão até o aparecimento de uma manifestação patológica considerada grave.

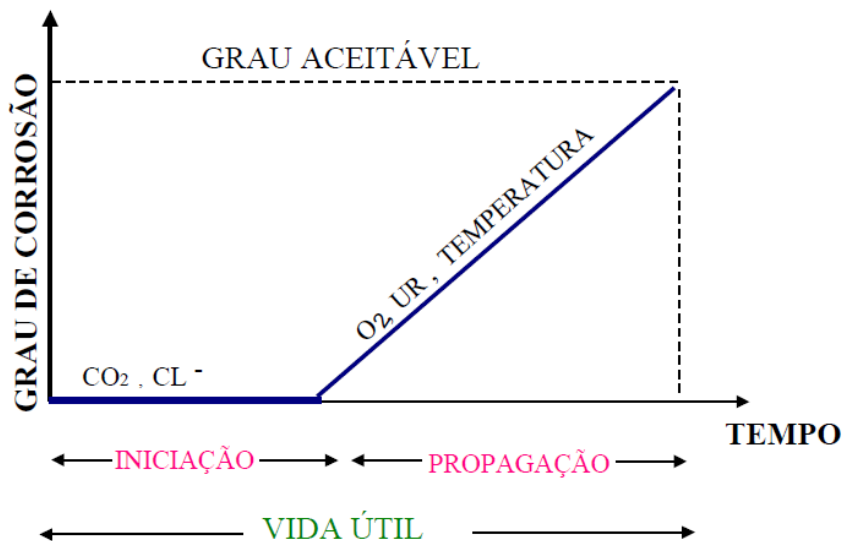


Figura 2.4 – Modelo de vida útil em função da corrosão proposto por TUUTTI (1982).

### 2.2.2.1 Iniciação



Para que a corrosão da armadura do concreto se inicie é necessário que agentes agressivos capazes de destruir a camada passivadora do aço atravessem o cobrimento de concreto e alcancem a armadura em concentrações suficientes para provocar a sua despassivação. No período de iniciação, o concreto da estrutura pode estar sob a ação de dois fatores:

- presença de quantidade suficiente de íons cloreto: podem estar no meio externo e atingir a armadura por difusão, mas também no interior do concreto em razão da água de amassamento e/ou agregados contaminados ou, então, devido à presença de aditivos aceleradores de pega e endurecimento à base de cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ).

- diminuição da alcalinidade do concreto: por reação com substâncias ácidas do meio, principalmente, o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), presente na atmosfera (carbonatação).

A presença de cloretos e a diminuição da alcalinidade determinam o tipo de corrosão que será desencadeada, podendo ser: corrosão generalizada (carbonatação), corrosão localizada por pite (cloretos) ou corrosão localizada sob tensão fraturante (ocorre geralmente em concreto protendido e não tem uma causa direta bem conhecida), conforme revela a Figura 2.5 (CASCUDO, 1997).

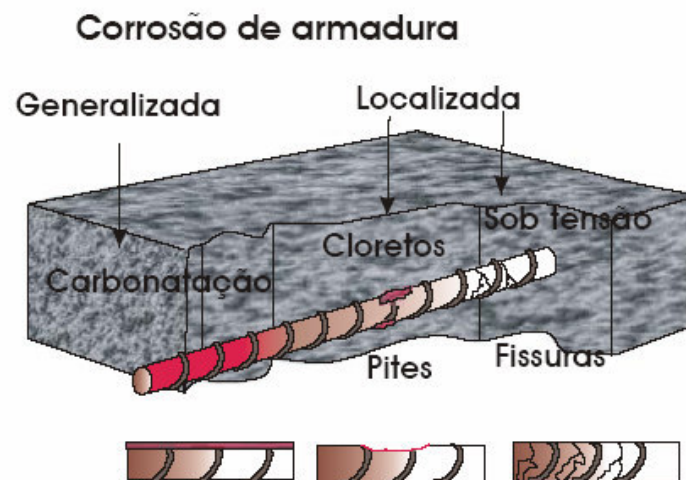
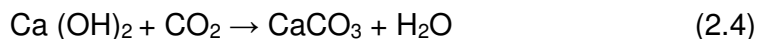


Figura 2.5 – Tipos de corrosão e fatores que as provocam (CASCUDO, 1997).

A carbonatação tem início na superfície do concreto e avança em direção ao interior, dando origem a frente de carbonatação, que separa zonas de pH distintos, com pH superior a 12 ou inferior a 9.

O avanço da frente de carbonatação, através do cobrimento do concreto, depende da reserva alcalina disponível na fase aquosa do concreto. Assim, cimentos que liberam mais  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  permitem o desenvolvimento de menores velocidades de carbonatação. Helene (1993) afirma que a concentração de hidróxido de cálcio nos poros do concreto depende do tipo de cimento, da relação água-cimento e do grau de hidratação.

No processo de carbonatação, o  $\text{CO}_2$  reage com a água presente no concreto e forma inicialmente o ácido carbônico. Este interage com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , formando carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), menos solúvel, que diminui o valor do pH da solução aquosa para 8,5 - 9, levando o aço à despassivação.

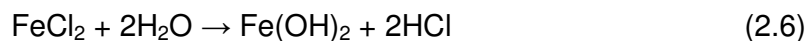


Outras substâncias alcalinas, como KOH e o NaOH, reagem da mesma forma no concreto, contribuindo para a diminuição do pH e do silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

A velocidade do processo de carbonatação ocorre em razão de inúmeros fatores, tais como: umidade relativa do ambiente, concentração de  $\text{CO}_2$  no meio, tipo e quantidade de cimento, relação água/cimento, entre outros. As taxas mais altas de carbonatação ocorrem quando a umidade relativa do ambiente é mantida entre 50 e 75%.

Enquanto isso, os íons cloreto podem estar presentes no concreto devido aos seus componentes: aditivos, água, etc. ou por penetrarem do exterior através da rede de poros. Neste caso, a quantidade de cloretos aumenta com o tempo, podendo atacar toda a superfície da armadura e provocar velocidades de corrosão muito perigosas e intensas (ANDRADE, 1992).

Para Neville (1997), os íons cloretos ativam a superfície do aço e formam o ânodo logo após atravessarem a camada de passivação, sendo o cátodo a superfície passiva. Por esse motivo, ocorrem as seguintes reações:



Desse modo, o  $\text{Cl}^-$  foi regenerado de maneira que o produto de corrosão passou a não conter cloreto, embora se forme cloreto ferroso no estágio intermediário.

Cascudo (1997) mostra que o cloreto apresenta-se de três formas no concreto: quimicamente ligado ao aluminato tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ), formando cloroaluminatos de cálcio, que ficam dissolvidos na fase aquosa dos poros; adsorvido na superfície dos poros e sob a forma de íons livres. Os cloretos livres são os que efetivamente causam preocupação.

Os cloretos têm uma ação extremamente deletéria, que vai desde a despassivação da armadura até a participação plena no processo corrosivo, pois eles aumentam substancialmente a condutividade elétrica do eletrólito e participam das reações para formação dos produtos de corrosão.

A presença de cloretos, sob a forma combinada no concreto, não provoca a despassivação da armadura. Entretanto, existe um teor limite, acima do qual os íons cloreto estão livres para atacar a armadura. Dependendo da relação  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$ , observa-se que o filme protetor pode ser destruído mesmo para valores de pH consideravelmente acima de 11,5. Quando a relação  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  é maior que 0,6 em pasta, o aço mostra-se desprotegido contra a corrosão, possivelmente, porque o filme de óxido de ferro torna-se permeável ou instável sob estas condições. Acredita-se que a quantidade mínima de íons cloretos necessária para despassivar e atacar a armadura está relacionada com a quantidade de íons hidroxilas ( $\text{OH}^-$ ). Sendo assim, sugerem-se valores  $\leq 0,6$  para relação  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$ . (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A fissuração do concreto também exerce influência no processo de iniciação da corrosão. As fissuras constituem um caminho rápido de penetração dos agentes agressivos até a armadura e facilitam o acesso do oxigênio e da umidade, fatores indispensáveis à iniciação da corrosão.

### 2.2.2.2 Propagação

A incapacidade do concreto de exercer sua função protetora tem como consequência a corrosão das armaduras, pois, já que a armadura se encontra despassivada, ela fica vulnerável à corrosão. A propagação do fenômeno inicia-se, desde que hajam os seguintes elementos básicos: eletrólito, diferença de potencial e oxigênio (CASCUDO, 1997).

O período de propagação vai até o momento em que surgem manchas de coloração vermelho-marron-acastanhado que, sendo relativamente solúveis, afloram na superfície indicando avanço da corrosão, ou ocorrem fissuras no concreto de cobrimento, ou, ainda, quando este se destaca.

Com o aumento da umidade do concreto, há uma redução na sua resistividade elétrica, e o desenvolvimento da corrosão é facilitado. Quando os poros estão saturados, a resistividade é baixa e, nestas condições, a difusão do oxigênio é reduzida, o que resulta em uma velocidade de corrosão baixa ou moderada. Se os poros contêm pouca umidade, ou seja, o concreto está seco, a resistividade é muito elevada, e o processo corrosivo é dificultado. Neste caso, a velocidade da corrosão será baixa, mesmo que o concreto se encontre carbonatado e/ ou contaminado por cloretos (ANDRADE, 1992; NEVILLE, 1997).

As maiores taxas de corrosão ocorrem quando o teor de umidade do concreto é alto, porém não saturado. O oxigênio chega até a armadura e a resistividade elétrica é baixa o suficiente para permitir elevadas velocidades de reação. Sendo assim, de acordo com Neville (1997), a umidade relativa do ar ótima para a corrosão está entre 70 e 80%. O autor ainda revela que o avanço da corrosão tem como consequência o surgimento de fissuras no concreto devido à formação de produtos expansivos e a diminuição da seção transversal da armadura na região anódica.

### 2.2.3 Penetração de cloretos

A corrosão das armaduras devido à ação dos íons cloreto é um dos mais sérios problemas das estruturas de concreto armado. Os íons cloreto podem ser

introduzidos no concreto de diversas maneiras: como aditivo, pela contaminação da água ou da areia, ou podem penetrar no concreto, se o mesmo estiver inserido em ambientes que contenham estes íons. Os íons cloreto podem estar presentes no concreto de duas formas:

- fixos, quimicamente combinados com as fases alumino-ferríticas para formar os cloroaluminatos, ou adsorvidos às paredes dos poros na estrutura espacial do C-S-H;

- livres, precipitados ou dissolvidos na fase aquosa do concreto.

Os íons cloreto fixos definem-se como: a reação entre a matriz de poros do concreto e os íons cloreto que resultam da remoção efetiva da fase aquosa. O fator mais importante que afeta a capacidade de fixação de íons cloreto é o conteúdo de  $C_3A$  do cimento. Um aumento no conteúdo de  $C_3A$  resulta no acréscimo da capacidade de fixação de íons cloreto (HELENE, 1986; HELENE, 1993).

De acordo com Monteiro (2002), a agressividade dos íons cloreto está associada ao teor de íons cloreto livres. Segundo Bishara (1991), a porção de íons cloreto livres na fase aquosa é de 75 a 80% do total de íons cloreto presentes.

Há um valor limite de concentração a partir do qual os íons cloreto podem romper a camada de óxidos passivante e provocar a corrosão da armadura. Esse limite não está associado a um valor fixo, embora algumas normas ou recomendações de alguns países apresentem valores orientadores. Isto é devido à dificuldade de estabelecer um limite seguro, acima do qual existe risco de despassivação do aço, já que esse limite depende de numerosas variáveis, entre elas, tipo de cimento, proporção de cimento, relação água/cimento, teor de umidade, etc. (HELENE, 1986; ANDRADE, 1992).

## **2.3 Mecanismos de transporte de agentes agressivos no concreto**

### **2.3.1 Introdução**

De uma forma geral, a durabilidade do concreto depende da facilidade com que os fluidos e os íons entram no concreto e se deslocam em seu interior. Esta

característica é geralmente chamada de permeabilidade, no entanto, este termo refere-se a um dos mecanismos de transporte de fluidos e íons, e a denominação mais apropriada seria penetrabilidade. A penetração de cloretos no concreto se dá através da estrutura dos poros capilares contínuos, da zona de interface e, caso existam, de fissuras. Neville (1997) destaca a diferença entre porosidade e penetrabilidade. Segundo o autor, uma porosidade elevada não é suficiente para que a penetrabilidade também seja. Para que isso aconteça, é necessário que os poros sejam contínuos.

Os principais fluidos que podem penetrar no concreto são o oxigênio, o dióxido de carbono e a água pura ou contaminada. Todos os três são responsáveis e/ou necessários ao processo de corrosão das armaduras.

Destacam-se quatro mecanismos de transporte: permeabilidade, absorção capilar, difusão e migração. Estes mecanismos podem atuar simultânea ou sucessivamente ao longo do tempo, de acordo com as condições de exposição (temperatura, umidade, etc.) a que o concreto esteja submetido. Alguns dos mecanismos de transporte de agentes agressivos para o interior do concreto são abordados a seguir.

### 2.3.2 Permeabilidade

Permeabilidade é o fluxo de um fluido devido a diferentes pressões (NEPOMUCENO, 2005). Os cloretos podem penetrar no concreto por este fenômeno à medida que estejam sob a forma de sal dissolvido em uma dada solução. Assim, o transporte de cloretos será função do fluxo de líquido através do concreto e da concentração de cloretos neste líquido.

A porosidade relaciona-se diretamente com a permeabilidade do concreto. Sendo assim, os fatores que determinam a compacidade e a qualidade do concreto influenciam estas duas propriedades. De acordo com Helene (1993), a faixa de dimensões dos poros que facilitam a permeabilidade está entre  $0,1\mu\text{m}$  e  $1000\mu\text{m}$ .

A permeabilidade de fluidos através do concreto só ocorre quando o sistema de poros capilares é contínuo. Para relações a/ag baixas, a continuidade dos poros capilares é menor. Segundo Ollivier (1998), a permeabilidade do concreto depende das características do seu sistema de poros que, por sua vez, depende da relação

a/c e do grau de hidratação, não havendo influência do tipo de cimento nesta propriedade, quando comparados concretos de mesma resistência.

### 2.3.3 Absorção capilar

Absorção capilar é o transporte de líquidos devido à tensão superficial atuante nos poros capilares do concreto. Este fenômeno é dependente de características do líquido (viscosidade, densidade e tensão superficial) e de características do sólido poroso (raio, tortuosidade e continuidade dos poros, energia superficial, conteúdo de umidade).

De acordo com Helene (1993), a absorção capilar não ocorre em concretos saturados. O autor revela que, a fim de ocorrer, é necessário que os poros estejam total ou parcialmente secos.

A influência da estrutura dos poros é decisiva na absorção capilar, seja no volume de água absorvido, seja na velocidade de absorção, seja na altura de sucção. Segundo Hanzic, Kosec e Anzel (2010), a absorção capilar ocorre em poros finos (10nm - 10 $\mu$ m), em que as forças decorrentes da tensão superficial estão na mesma faixa que as forças da gravidade presentes no líquido.

Teoricamente, quanto menores os diâmetros dos poros, maiores as pressões capilares e a altura. Ao contrário, com poros maiores, têm-se alturas menores e volumes absorvidos maiores. No entanto, segundo Basheer, Kropp e Cleland (2001), concretos de reduzida relação água/cimento apresentam capilares com diâmetros menores, porém muito menos interconectados, resultando menores alturas de sucção e também menores volumes absorvidos.

Cascudo (1997) também afirma que a absorção depende da interconexão e, principalmente, do diâmetro dos poros. O autor assegura que quanto menor for o diâmetro, maior será a força de sucção capilar. Para Helene (1993), os fatores que controlam o diâmetro dos poros do concreto são a relação a/c, o grau de hidratação e a composição do cimento (modificada com o uso de adições minerais).

Uma das formas de controle da absorção capilar é o uso de aditivo incorporador de ar, o qual permite a formação de pequenas bolhas de ar no interior

do concreto, que tem a função de interromper a rede de poros, diminuindo, assim, a capilaridade do conjunto.

Mesmo que a absorção não seja usada como uma forma de medir a qualidade do concreto, afirma-se que, dentre os concretos de boa qualidade, a absorção está sempre abaixo de 10% em massa (NEVILLE, 1997).

#### 2.3.4 Difusão

A difusão pode ser definida como a movimentação de espécies iônicas de uma região de maior concentração para regiões de concentrações mais baixas.

É necessário que o concreto possua certo teor mínimo de umidade que permita a movimentação do íon, pois quando o mesmo encontra em seu caminho uma região seca, a difusão é interrompida. Assim, os maiores coeficientes de difusão são encontrados quando o concreto está saturado e seu valor decresce com a umidade (KROPP, 1995 apud CALÇADA, 2004).

Neville (1997) assevera que o aumento da relação a/c pode representar um aumento da difusividade; esta influência, todavia, é bem menor no processo de difusão do que nos outros mecanismos de penetração.

Este fenômeno ocorre tanto para substâncias presentes em meios líquidos quanto para aquelas presentes em meio gasoso. Segundo Delagrave, Pigeon e Marchand (1996), os íons cloreto, geralmente, penetram no concreto por capilaridade ou difusão. Mas quando os cloretos ultrapassam a camada superficial e alcançam o interior do concreto, a penetração passa a ser por difusão iônica (SCHNEIDER, 2005).

#### 2.3.5 Migração

Migração é o fluxo de íons em campo elétrico devido a uma diferença de voltagem e é, frequentemente, usada para ensaios acelerados de permeabilidade de íons (NEPOMUCENO, 2005).



A diferença de potencial, normalmente, origina-se da presença de dois eletrodos, um positivo e outro negativo, de forma que os íons se dirigem ao eletrodo com carga de sinal oposto. Dessa forma, a movimentação iônica por migração pode permitir o fluxo de íons de regiões de maior tensão para regiões de menor tensão.

No caso de estruturas de concreto, a diferença de potencial responsável pela migração de cloretos se dá entre as regiões catódica e anódica, quando se instaura um processo corrosivo (CALÇADA, 2004).

## **2.4 Resistividade elétrica aparente**

### 2.4.1 Introdução

A propriedade que mais afeta o processo de corrosão é a compacidade do concreto. A porosidade é inerente ao concreto, sendo consequência de alguns fatores, a saber: relação água/cimento, tipo de cimento, adições, condições de cura, etc. A permeabilidade à água ou aos gases depende da maior ou menor comunicação entre os poros capilares, da mesma forma que depende da porosidade ou do volume de vazios totais do concreto. A penetração de soluções de eletrólitos e gases, como o oxigênio e o  $\text{CO}_2$ , ocorrerá em regiões mais permeáveis e porosas, tornando a resistividade do concreto baixa. Portanto, está correto afirmar que um concreto com alta resistividade é obtido com baixa porosidade (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A distribuição do tamanho dos poros determina o teor de umidade interna, a espessura da camada de eletrólito e a disponibilidade de oxigênio na superfície do aço, para uma mesma umidade relativa ambiente.

A quantidade de água no concreto decorre de fatores como relação água/cimento, porosidade, umidade relativa do ar, etc. A umidade relativa determina o grau de saturação dos poros, que controla a resistividade elétrica do concreto de cobertura e, dessa forma, limita a transferência de carga elétrica entre áreas anódicas e catódicas do aço. Sendo assim, quanto mais saturado estiverem os

poros de concreto, menor será a resistividade elétrica e, em princípio, maior será a velocidade de corrosão.

Diminuição da umidade implica diminuição da quantidade de solução dos poros, ou seja, a diminuição do eletrólito responsável pela transmissão da corrente elétrica que atravessa o concreto e, conseqüentemente, o aumento da resistividade elétrica.

Logo, o grau de saturação dos poros é um dos fatores que controla a disponibilidade de oxigênio na barra de aço, porque a difusão de oxigênio é mais lenta no estado dissolvido que no estado gasoso. Sendo o oxigênio necessário para que ocorram as reações catódicas, se o concreto estiver saturado, a velocidade de corrosão será insignificante. O grau de saturação dos poros tem um grande efeito no processo de corrosão, determinando o estado de atividade na interface aço/concreto (ABREU, 1998).

O concreto, em condições normais, oferece uma resistência elevada à passagem de corrente para a armadura ou dela proveniente. Isso se deve, em grande parte, ao efeito eletroquímico que o concreto exerce sobre a armadura por causa da alcalinidade do eletrólito que o contém.

De acordo com Neville (1997), o concreto úmido se comporta como um eletrólito com resistividade elétrica da ordem de  $10^4$  ohm.m. Já o concreto seco em estufa, apresenta uma resistividade de  $10^9$  ohm.m. Esse aumento da resistividade do concreto seco deve-se diminuição da corrente elétrica, que é conduzida através do concreto úmido, essencialmente, por meios eletrolíticos.

A resistividade elétrica está intensamente ligada à velocidade do processo de corrosão das armaduras. É também chamada de resistência específica e definida como resistência elétrica de um material homogêneo e isotrópico, de seção reta e comprimento unitário.

A resistividade elétrica é um parâmetro bastante sensível às características da porosidade do concreto. Com a diminuição do volume total de poros, a resistividade elétrica do concreto tende a aumentar.

Segundo Helene (1986), quanto maior a atividade iônica do eletrólito, menor a resistividade do concreto. Sendo assim, o aumento da relação água/cimento e da umidade relativa ambiente e a presença ocasional de íons, tais como  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{H}^+$ , etc., correspondem à diminuição da resistividade do concreto. Valores de

resistividade menores do que 50 ohm.m apresentam grande risco de causarem o fenômeno da corrosão.

Geralmente, o valor da resistividade elétrica aumenta para baixas relações a/c ou adições de cinza volante, escória de alto forno ou sílica ativa. Normalmente, um concreto com altas relações a/c e sem adições tem baixa resistividade elétrica.

Existem várias interpretações a respeito da indicação de probabilidade de corrosão, conforme a resistividade elétrica do concreto, que são mostradas na Tabela 2.1 e que estão de acordo com o critério de avaliação da resistividade proposto pelo Comitê Euro-International Du Beton (CEB 192, 1988).

Tabela 2.1 – Critério de avaliação da resistividade CEB 192 (ABREU, 1998)

Resistividade do concreto	Probabilidade de corrosão
> 200 ohm.m	desprezível
100 a 200 ohm.m	baixa
50 a 100 ohm.m	alta
< 50 ohm.m	muito alta

A durabilidade das estruturas de concreto armado é resultado da ação protetora do concreto sobre o aço. Quando esta proteção deixa de existir, a estrutura fica vulnerável ao fenômeno de corrosão e, nestas condições, é controlada pela resistividade elétrica do concreto e pela disponibilidade de oxigênio ao redor da armadura.

Com isso, a resistividade elétrica é altamente influenciada pelo teor de umidade do concreto. Em um mesmo elemento de concreto podem ser caracterizadas pelo menos duas regiões, em que os valores da resistividade são distintos: uma superficial, correspondente à região de cobrimento da armadura e que sofre ciclos permanentes de molhagem e secagem, denominada resistividade elétrica aparente; outra interna, em que o teor de umidade do concreto é mais estável, chamada resistividade elétrica volumétrica. Do ponto de vista da corrosão das armaduras, existe um maior interesse na resistividade elétrica aparente (HELENE, 1993).

A resistividade elétrica no concreto é uma propriedade sensível às suas características físicas e químicas. O concreto pode ser considerado um sistema compósito, com vários tamanhos de agregados e partículas embebidas em uma matriz de pasta de cimento. A resistividade do compósito dependerá da resistividade dos agregados, da resistividade da matriz e de ambos os volumes relativos.

A pasta de cimento no concreto consiste, basicamente, de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), sulfoaluminatos de cálcio e grãos de clínquer não hidratado. A estrutura da pasta de cimento hidratada é constituída também por diferentes tipos de vazios, que são classificados, principalmente, em função de suas dimensões. Os espaços interlamelares no C-S-H têm dimensões de poucos nanômetros (nm). Enquanto os poros não preenchidos pelos produtos de hidratação ou pelo cimento, denominados vazios capilares, têm dimensões variando entre 0,01 a 1  $\mu\text{m}$ , dependendo da relação água/aglomerante e do grau de hidratação. Os vazios de ar incorporado são, na maioria das vezes, esféricos e suas dimensões variam normalmente entre 50 a 200  $\mu\text{m}$ , ao passo que os vazios de ar aprisionado podem chegar a 3 mm. Nestes vazios, a água encontra-se sob diferentes formas, tais como: água capilar (descrita também como água livre), água adsorvida, água interlamelar (associada à estrutura do C-S-H) e água quimicamente combinada (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A influência da composição do concreto em suas propriedades e seu efeito nos diversos parâmetros relacionados à corrosão da armadura estão apresentados, esquematicamente, na Figura 2.6.

A Figura 2.6 revela que todos os fatores participantes da composição do concreto, assim como fatores que afetam as propriedades químicas ou físicas do concreto, influenciam, de alguma forma, na sua condutividade elétrica, ou seja, na resistividade.

A resistividade elétrica do concreto depende, sobretudo, da composição química da solução aquosa dos poros, da estrutura dos poros, da umidade e da temperatura do concreto. Os itens a seguir descrevem os principais fatores que envolvem a composição e as propriedades do concreto, relacionando-os à resistividade elétrica.

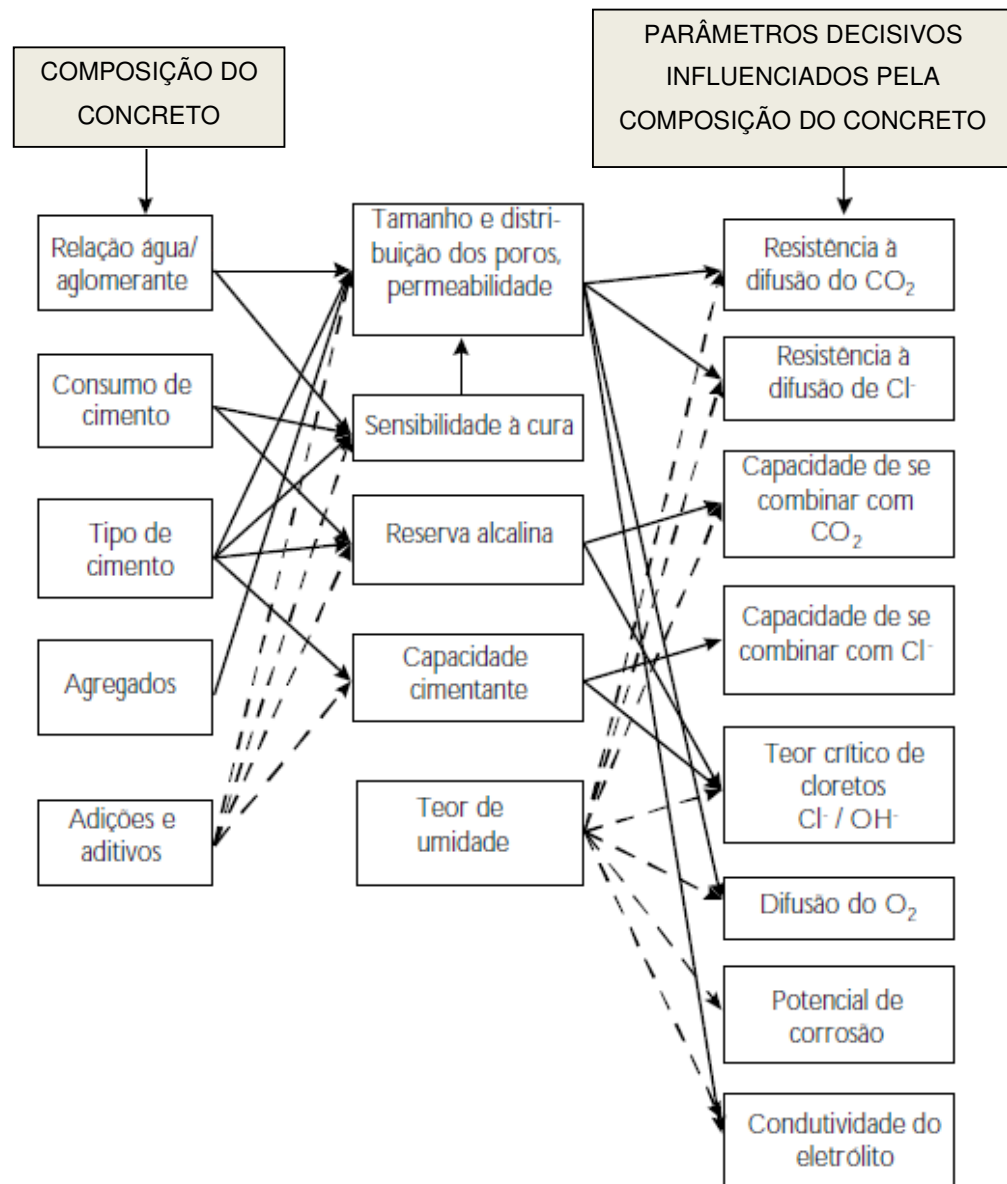


Figura 2.6 - Influência da composição do concreto em parâmetros que governam a proteção da armadura contra a corrosão (SCHIESSL, 1987 apud ABREU, 1998).

#### 2.4.2 Efeito da relação água/aglomerante e do consumo de cimento

A relação água/cimento é um dos principais parâmetros para o desempenho do concreto. Ela determina a qualidade do concreto, isto é, define as características de compacidade ou porosidade da pasta de cimento endurecida e possui influência indireta na resistividade elétrica. Isto significa influência sobre a estrutura dos poros

e concentração iônica da solução dos poros, propriedades que atuam diretamente na resistividade elétrica do concreto.

Neville (1997) relata que um aumento do volume de água e da concentração de íons na solução aquosa dos poros diminui a resistividade da pasta de cimento. Além disso, a resistividade decresce ligeiramente com o aumento da relação água/cimento, em virtude da maior disponibilidade de eletrólito e da maior porosidade. Uma diminuição no consumo de cimento do concreto resulta, da mesma maneira, em aumento na resistividade elétrica, pois, se a relação água/cimento for constante e o consumo de cimento menor, existirá menos eletrólito disponível para a passagem de corrente.

Na Figura 2.7 observa-se a influência do teor de cimento e da relação água/cimento na resistividade elétrica do concreto usando cimento Portland comum aos 28 dias, em cura úmida. À medida que a relação água/cimento diminui, ocorre um aumento gradual no valor da resistividade do concreto. Sendo assim, para relações água/cimento baixas, a variação no consumo de cimento não causa mudanças relevantes na resistividade elétrica do concreto, onde o consumo de cimento é o fator de menor importância para concretos com baixa relação água/cimento.

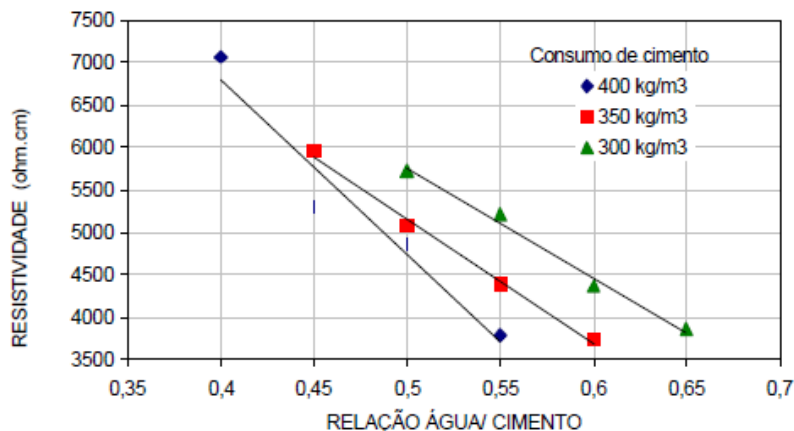


Figura 2.7 - Relação entre a resistividade elétrica e a relação água/cimento em concretos de cimento Portland comum aos 28 dias em cura úmida (HUGHES, SOLEIT e BRIERLEY, 1985).

### 2.4.3 Efeito dos agregados

A resistividade elétrica da pasta de cimento é muito menor do que a resistividade elétrica dos agregados utilizados no concreto. Uma vez que a resistividade elétrica do concreto depende especialmente da pasta de cimento, alterações no tipo e no teor de agregado também influenciam na resistividade elétrica do concreto. Substituindo um agregado de menor resistividade elétrica por outro de maior resistividade elétrica, haverá um aumento na resistividade elétrica do concreto.

Em pesquisas anteriores, Monfore (1968) mediu a resistividade elétrica de alguns agregados caracteristicamente usados no concreto, a saber: o arenito (180 ohm.m), a pedra calcária (300 ohm.m), o mármore (2900 ohm. m) e o granito (8800 ohm.m). Ele observou que a resistividade elétrica do granito é muito maior do que a da pasta de cimento.

O autor ainda afirma que a presença de agregados - partículas praticamente não-condutoras -, entre a matriz do concreto, causa a obstrução da passagem da corrente elétrica, fazendo com que a trajetória a ser percorrida pela corrente seja maior do que a dimensão do agregado na direção da corrente. Assim, quanto maior for o teor de agregados, maior será o seu efeito de obstrução e maior será a resistividade.

Hughes, Soleit e Brierley (1985) também pesquisaram a influência do teor de agregado na resistividade elétrica do concreto e, da mesma forma, observaram que, com o aumento do teor de agregado, a resistividade elétrica do concreto também aumenta.

### 2.4.4 Efeito das adições minerais

As adições minerais vêm sendo utilizadas como uma maneira de aumentar as características de durabilidade das estruturas, associada à redução de custos e às melhorias ambientais que estas adições proporcionam.

As adições minerais podem ser pozolânicas, cimentantes ou cimentantes e pozolânicas. De acordo com Mehta e Monteiro (2008), pozolana é um material silicoso ou sílico-aluminoso que em si mesmo possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante. Todavia, numa forma finamente dividida e na presença de umidade, reage quimicamente com hidróxido de cálcio a temperaturas ambientes para formar compostos com propriedades cimentantes.

Ao substituir parte do cimento por adições minerais, obtêm-se várias vantagens quanto às propriedades do concreto produzido em relação ao outro sem adições minerais. No que se refere aos custos de produção do concreto, há uma economia significativa, pois o custo das adições minerais, especialmente, a cinza volante e a cinza de casca de arroz, é inferior ao do cimento. Sobre o impacto ambiental, substituir o cimento por adições minerais mostra-se o mais nobre destino a ser dado a essas adições, porque sua disposição final sempre implica poluição ambiental, onde quer que sejam depositadas. Como a substituição reduz o consumo de cimento, ainda há o benefício de se utilizar menos clínquer, o que contribui para diminuir o lançamento de gás carbônico na atmosfera no processo de produção.

Neville (1997) afirma que a presença de adições minerais pode reduzir significativamente a penetrabilidade do concreto e aumentar a sua resistividade elétrica e, com isso, reduzir a velocidade de corrosão, uma vez que estejam corretamente proporcionadas na mistura. O uso de adições minerais modifica a porosidade das pastas por transformarem poros grandes em poros menores e menos suscetíveis à percolação de líquidos, diminuindo, assim, a permeabilidade.

As pozolanas têm influência na resistividade elétrica do concreto, porque provocam o refinamento da estrutura dos poros da matriz e, especificamente, no caso dos materiais pozolânicos, diminuem a concentração iônica da solução. Atuam principalmente na interface pasta agregado, que é a fase do concreto mais suscetível à ação de agentes químicos e físicos. Na microestrutura da pasta, ocorre refinamento e melhor distribuição do tamanho dos poros, o que contribui para torná-la mais densa. Já na composição da solução aquosa dos poros, há redução na concentração dos íons, reduzindo a condutividade elétrica da solução dos poros. Assim, a utilização desses materiais leva a um aumento da resistividade do concreto em relação ao concreto convencional.

Baweja et al. (1996 apud WHITING e NAGI, 2003) estudaram o efeito da cinza volante na resistividade elétrica do concreto. Com nível de substituição do



cimento por cinza volante de 25%, a resistividade elétrica do concreto aumentou expressivamente nas três relações água/aglomerante investigadas (0,45, 0,55 e 0,65), conforme está apresentado na Figura 2.8. As amostras foram imersas em água antes do ensaio. Aos 800 dias de idade, a resistividade elétrica do concreto, com 25% de cinza volante e relação água/aglomerante de 0,45, foi, aproximadamente, 5 vezes maior do que a obtida com o concreto normal.

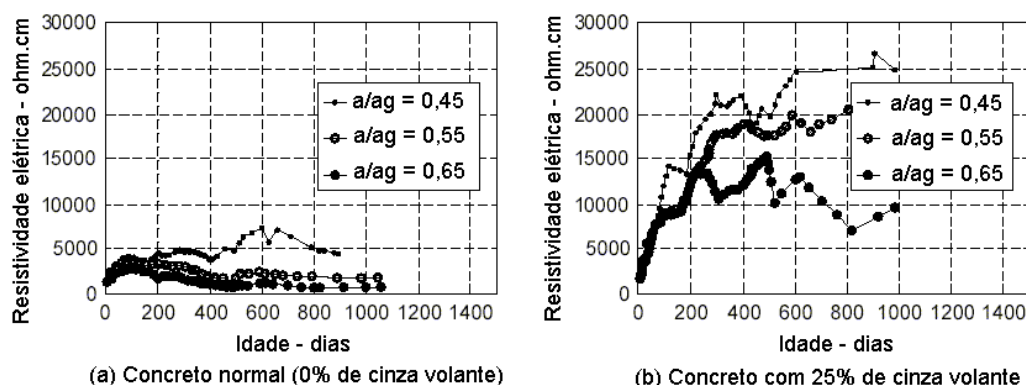


Figura 2.8 – Efeito da cinza volante na resistividade elétrica do concreto (BAWEJA et al., 1996 apud WHITING e NAGI, 2003).

Da mesma forma, Hussain e Rasheeduzzafar (1994) investigaram as mudanças que ocorrem na composição química da solução aquosa dos poros e na estrutura dos poros com a utilização de cinza volante no concreto, e o efeito causado na resistividade elétrica. Quando 30% do cimento foram substituídos por cinza volante, a concentração de íons hidroxila ( $\text{OH}^-$ ) diminuiu, se comparada ao concreto com 100% de cimento. Verificaram também refinamento e melhor distribuição do tamanho dos poros. Em função desses efeitos, a resistividade elétrica do concreto, com adição de cinza volante, foi 2,2 vezes maior do que a obtida com o concreto com 100% de cimento.

Wolsiefier (1991), por sua vez, investigou a influência do teor de sílica ativa na resistividade elétrica do concreto e utilizou misturas com diferentes consumos de aglomerante por  $\text{m}^3$ . A taxa de aumento da resistividade elétrica com o acréscimo do teor de sílica ativa é maior para concretos com maior consumo de aglomerantes. Isso se dá porque possuem maior quantidade de sílica ativa por unidade de volume.

Com 20% de sílica ativa e consumo de aglomerante de  $400 \text{ Kg/m}^3$ , a resistividade elétrica atinge o valor aproximado de  $1300 \text{ ohm.m}$ , bem maior do que o de  $420 \text{ ohm.m}$  alcançado pelo concreto sem sílica ativa e mesmo consumo de aglomerante.

Abreu (1998) investigou o efeito das adições minerais na resistividade elétrica de concretos convencionais. Três condições de cura foram usadas: em câmara úmida até os 28 dias, em câmara climatizada dos 28 aos 91 dias e submerso dos 91 dias aos 217 dias. Os resultados médios mostraram um aumento na resistividade elétrica com o uso dessas adições em comparação ao concreto com 100% de cimento Portland ARI, como mostra a Figura 2.9.

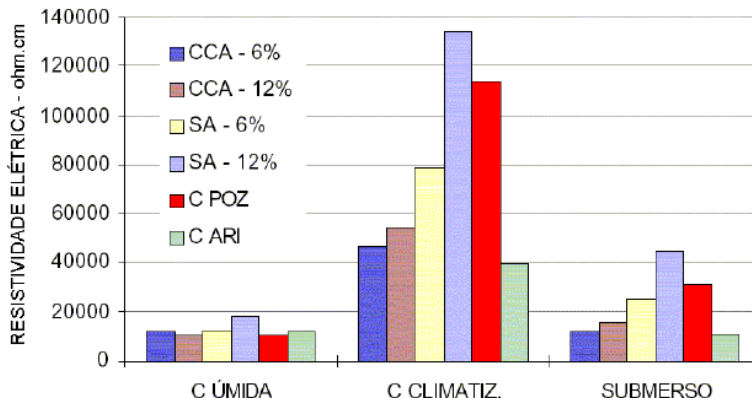


Figura 2.9 – Influência da sílica ativa e da cinza de casca de arroz na resistividade elétrica do concreto. CCA = cinza de casca de arroz; SA = sílica ativa; C POZ = cimento pozolânico; C ARI = cimento de alta resistência inicial (ABREU, 1998).

Utilizando outra adição mineral, Hope e Ip (1987) estudaram concretos com substituição de cimento Portland comum por escória de alto forno. Os níveis de substituição foram 0%, 25% e 50%. Após vários ciclos de molhagem e secagem em solução agressiva contendo 3,5% de NaCl, concluíram que a resistividade elétrica do concreto aumenta com o teor de escória, e a taxa de corrosão da armadura é inversamente proporcional ao teor da adição mineral.

Lübeck (2008) avaliou o desempenho de concretos de cimento Portland branco com elevados teores de escória de alto forno e ativação química quanto à resistividade elétrica aparente entre outras grandezas. A resistividade cresceu proporcionalmente com o teor de escória. O aumento do teor de escória resultou

também em menor condutividade da solução aquosa e refinamento da estrutura de poros da pasta. Os maiores valores de resistividade foram apresentados pelas misturas contendo 70% de escória.

Wee, Suryavanshi e Tin (2000) avaliaram a resistividade elétrica de concretos com adição de escória de alto forno, com 3 níveis de finura, e adição de sílica ativa. A relação água/aglomerante de 0,50 e o consumo total de aglomerante de 370 Kg/m<sup>3</sup> foram adotados para todas as misturas. Além do teor e finura das adições minerais, também a influência do período de cura úmida (3, 7 e 28 dias) foi avaliado. Os autores ainda observaram a elevação da resistividade elétrica com o aumento da finura, teor de adição e período de cura. A resistividade elétrica da mistura com adição de 70% de escória de alto forno, com finura de 8.000 cm<sup>2</sup>/g e cura úmida de 28 dias, foi quase cinco vezes maior do que a resistividade elétrica do concreto de referência, curado por igual período. Isso é atribuído à maior densidade da pasta e à menor condutividade elétrica da solução aquosa dos poros.

Rosa (2005) estudou o comportamento da adição de escória de alto forno na resistividade elétrica aparente dos concretos. Os resultados mostraram que o aumento do teor de escória e do grau de hidratação proporcionou um aumento da resistividade elétrica do concreto. Isso se deve à menor condutividade elétrica específica da solução dos poros e ao refinamento dos poros.

Com relação à cinza de casca de arroz, Missau (2004) estudou a influência do teor da adição mineral na resistividade elétrica de concretos curados em câmara úmida climatizada. Os resultados mostraram elevação na resistividade elétrica com o aumento do teor de substituição e grau de hidratação, como revela a Figura 2.10.

Smith, Schokker e Tikalsky (2004), em seus estudos relacionados ao fenômeno da corrosão de armaduras, investigaram o desempenho das adições minerais - sílica ativa, cinza volante e escória de alto forno, formando misturas binárias e ternárias - na resistividade elétrica do concreto, com relação a/ag 0,43. Obtiveram um grande acréscimo na resistividade elétrica com as adições minerais. A sílica ativa, mesmo em pequenas proporções, promove uma grande elevação na resistividade elétrica nas primeiras idades. A cinza volante e a escória de alto forno também promovem aumentos na resistividade elétrica nas primeiras idades, mas o maior ganho de resistividade ocorre com a maturidade do concreto.

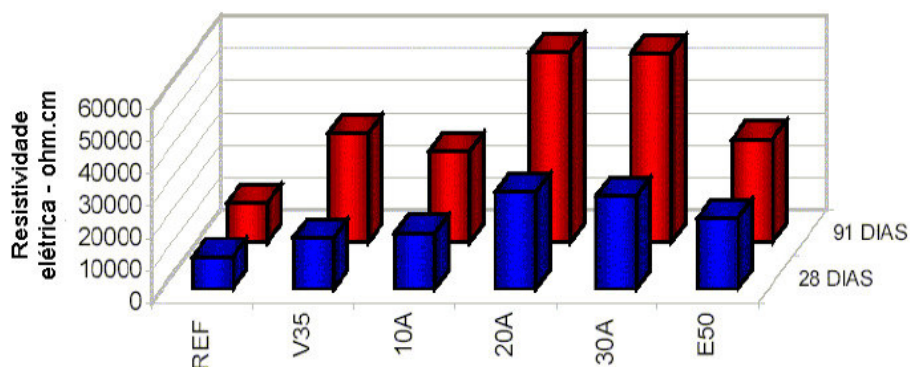


Figura 2.10 – Efeito da cinza de casca de arroz na resistividade elétrica do concreto. REF = 100% cimento; V35 = 35% cinza volante; E50 = 50% escória de alto forno; 10A, 20A e 30A = 10%, 20% e 30% cinza de casca de arroz, respectivamente (MISSAU, 2004).

## 2.5 Condutividade elétrica específica

A condutividade elétrica do concreto está diretamente ligada à mobilidade de íons no seu interior. Quanto maior a mobilidade dos íons, maior será a condutividade elétrica na solução dos poros, o que facilita o processo de formação do processo de corrosão das armaduras no concreto.

A condutividade elétrica depende das características da estrutura dos poros e da química da solução dos poros do concreto. O transporte de íons cloreto tem pouco a ver com a química da solução dos poros, mas muitos fatores como: a composição do cimento, agregado, proporções da mistura do concreto, uso de materiais cimentícios suplementares, aditivos químicos, etc. podem ter efeitos muito significativos nas concentrações dos íons condutivos na solução dos poros (SHI, 2004).

Concentrações de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  provenientes dos componentes do cimento dissolvem na água durante a mistura do concreto. Após a pega e a primeira hidratação do cimento, o  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  diminuem até valores negligenciáveis, deixando a solução composta essencialmente por hidróxidos alcalinos dissolvidos. Na maioria dos casos, a concentração de hidróxidos alcalinos na solução dos poros do concreto é menor que 1M. Sendo assim, a condutividade elétrica específica da solução dos poros do concreto pode ser calculada, com

precisão, com base nas concentrações de  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ , usando as equações propostas por Shi, Stegemann e Caldwell (1998):

$$\lambda_i = \lambda_{i,0} - (0,2289 \lambda_{i,0} + 60,12) \sqrt{C_i} \quad (2.7)$$

$$\rho = \rho_{\text{água}} + \sum C_i \cdot \lambda_i / 1000 \quad (2.8)$$

Onde:

$\lambda_i$  - condutividade equivalente do íon  $i$ ;

$\lambda_{i,0}$  - é a condutividade equivalente a concentração infinita;

$C_i$  - concentração equivalente do íon  $i$ ;

$\rho$  - condutividade elétrica da solução aquosa;

$\rho_{\text{água}}$  - condutividade elétrica da água.

Os estudos sobre a influência das adições minerais na condutividade elétrica e nas modificações da solução aquosa dos poros do concreto encontram-se especificadas neste item.

Quimicamente, Lea (1998) atribui a concentração dos íons  $\text{OH}^-$ , o mais condutivo entre os freqüentemente encontrados na solução dos poros, à quantia de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (hidróxido de cálcio), em maior parte devido à hidratação do  $\text{C}_3\text{S}$ .

A substituição de parte do cimento por adições minerais implica um consumo parcial do CH (hidróxido de cálcio) para a formação do C-S-H (silicato de cálcio hidratado), diminuindo, assim, a concentração do  $\text{OH}^-$  (íon hidroxila). Isso reduz a condutividade elétrica específica em concretos contendo adições minerais quando comparado a concretos sem adição mineral.

O uso de adições minerais combinado com o cimento modifica a estrutura dos poros das pastas ocasionando redução da permeabilidade. As transformações que ocorrem na microestrutura do concreto proporcionam maior compacidade da interface pasta/agregado, devido à grande quantidade de partículas finas presentes nas adições e à formação do C-S-H secundário, originado das reações químicas entre adições minerais e o CH liberado na hidratação do cimento.

Sendo assim, o aumento na finura e no teor das adições minerais em substituição ao cimento contribui para uma maior densificação e impermeabilidade da pasta endurecida e ainda diminui o teor de CH remanescente, proporcionando uma estrutura menos permeável e dificultando o ingresso de agentes agressivos.

Morsy (1999) estudou o efeito da temperatura na condutividade elétrica de pastas de cimento Portland com adição de escória e sílica ativa. Segundo o autor, a condutividade elétrica é um método preciso que fornece informações importantes sobre algumas mudanças físico-químicas que ocorrem durante a hidratação do cimento, especialmente, durante os primeiros estágios da hidratação. Ele afirma que o aumento da condutividade elétrica no início da fase de hidratação do cimento é devido ao aumento da concentração iônica e mobilidade de íons  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ . A alta temperatura no processo de cura acelera o tempo de pega da pasta de cimento. O uso da sílica ativa e escória como substituição parcial do cimento desacelera, em geral, o tempo de pega das pastas. Assim, quanto maior o nível de substituição, maior o efeito.

Abo El-Enein et al (1995) estudaram a condutividade elétrica de concretos contendo sílica ativa. Segundo os pesquisadores, a sílica ativa tende a melhorar tanto as características mecânicas quanto a durabilidade do concreto. A condutividade elétrica do concreto contendo sílica ativa diminuiu com o tempo de cura. Observaram também que a condutividade aumentou à proporção que a relação a/c aumentou. A condutividade elétrica de concretos que contém sílica ativa, com cura úmida de 28 dias, diminuiu com o aumento do teor de substituição de sílica ativa, e a porosidade diminuiu à medida que o teor de sílica ativa aumentou até 5%, e depois aumentou à medida que o teor de sílica ativa aumentou.

McCarter, Starrs e Chrisp (2000), ao analisar o comportamento das adições minerais no concreto, verificaram que a adição de E.A.F em teor de 50% causou redução na concentração dos íons na solução dos poros. Como resultado, os autores constataram, nessa mistura, menor condução elétrica aos 100 dias, quando comparada à mistura de referência (0% E.A.F).

A redução na concentração do íon  $\text{OH}^-$  (íon de maior condutividade elétrica) é apontada por Wee, Suryavanshi e Tin (2000) como a responsável pela diminuição da condutividade elétrica dos concretos contendo escória de alto forno. A condutividade elétrica em misturas contendo escória é influenciada também pela temperatura de hidratação. Este fato foi constatado por Salem e Ragai (2001) que,

ao estudarem o efeito da escória sobre a condutividade elétrica, concluíram que a condutividade aumentou quando ocorreu aumento na temperatura de hidratação acima de 50°C, nos períodos iniciais de hidratação.

Shehata, Thomas e Bleszynski (1999) determinaram a solução aquosa dos poros em concretos contendo três cinzas volantes de origens diferentes. Observaram que, exceto pela alta alcalinidade obtida na solução dos poros de duas misturas com 25% de CV, as demais misturas com teor de substituição de 25% e 50% apresentaram equilíbrio entre  $\text{OH}^-$  e os íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ . Para um teor de substituição de 70%, houve maior concentração dos íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  do que a quantidade de  $\text{OH}^-$ . Isso indica que os outros ânions, como  $\text{SO}_4^{2-}$ , estão na solução dos poros das pastas com 70% de CV.

Shi, Stegemann e Caldwell (1998) investigaram os efeitos das adições minerais na solução aquosa dos poros em diferentes idades. Observaram, no período inicial da hidratação, altas concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{OH}^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  dos componentes do cimento. Logo em seguida, constataram a diminuição nas concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ , resultando na solução, exclusivamente, composta, em sua grande parte, por hidróxidos alcalinos. Observou-se nessa pesquisa que: a) o efeito da CV na composição da solução dos poros depende do teor de álcalis na cinza volante. A utilização desta cinza pode aumentar ou diminuir a concentração de  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  na solução dos poros, mas normalmente diminui a concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{OH}^-$ ; b) a presença de SA geralmente reduz a concentração de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{OH}^-$  na solução dos poros e também diminui o teor de sulfato solúvel. Os autores determinaram ainda a condutividade elétrica da solução dos poros das misturas e verificaram alterações de acordo com o tipo e teor de adição mineral utilizada.

Pavlík (2000) examinou a solução aquosa dos poros de pastas com relação a/agl 0,40 e observou que a adição de 10% de sílica ativa reduz a quantidade de hidroxila e de íons  $\text{Ca}^{2+}$  em relação à mistura de referência. O conteúdo de íons  $\text{K}^+$ , por sua vez, não sofreu alteração.

Medhat et al (2000) concluíram que, ao se substituir parte do cimento por cinza volante, a concentração de álcalis ( $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ ) e íons hidroxila ( $\text{OH}^-$ ) na solução dos poros diminui significativamente. A magnitude desta redução depende de inúmeros fatores, incluindo a natureza da cinza volante, nível de substituição e idade.

Cervo (2001), ao realizar ensaios em concretos com a adição de 25% e 50% de cinza volante e cinza de casca de arroz e 8% de sílica ativa, concluiu que essas adições reduzem a quantidade de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{OH}^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  na solução dos poros, se comparados à mistura da referência, porém sem diminuir o pH para valores menores que 12,8. Para cinza volante, o aumento no teor de substituição de 25% para 50% resultou na diminuição dos valores de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{OH}^-$ . Nos concretos contendo cinza de casca de arroz, o aumento no teor de substituição apresentou um notável decréscimo nas concentrações de  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ .

A autora também observou que todas as misturas com adições minerais apresentaram menores valores de condutividade, se relacionado à mistura de referência. Atribuiu este fato à diminuição no teor de álcalis na solução dos poros e às modificações na estrutura dos poros das misturas aglomerantes, que tornam a estrutura mais densa, diminuindo, assim, a condutividade. Com o aumento no teor de substituição, a condutividade também foi diminuída, devido ao maior consumo de CH, formando C-S-H adicional de menor relação C/S que fixam os álcalis, resultando em uma menor quantidade desses íons livres na solução aquosa dos poros do concreto.

Gastaldini e Isaia (1999) investigaram a composição da solução dos poros de pastas compostas de misturas binárias e ternárias de cinza de casca de arroz e escória de alto forno, sendo a EAF nas finuras Blaine  $400\text{m}^2/\text{kg}$  e  $700\text{m}^2/\text{kg}$ . Na mistura binária composta com 50% de CCA houve diminuição na concentração dos íons investigados,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , nas duas idades de ensaio e relações a/ag, quando comparadas à mistura de referência. Na mistura ternária, contendo EAF na finura Blaine de  $400\text{m}^2/\text{kg}$ , o aumento no seu teor, de 30% para 50%, mantendo o teor de CCA e 20%, resultou em aumento na concentração de  $\text{Na}^+$  e redução nos demais íons. Nas misturas ternárias contendo 30% de EAF e 20% de CCA, o aumento da finura Blaine de EAF de  $400\text{m}^2/\text{kg}$  para  $700\text{m}^2/\text{kg}$  acarretou em acréscimo nos teores de  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  e diminuição dos demais íons. Concluíram que o aumento da finura, embora conduza a uma estrutura da pasta mais compacta, com reflexos na resistência à compressão e distribuição de tamanho de poros, resultou em uma menor inclusão dos íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ , o que se constata da concentração destes na composição da solução dos poros.

Dal Ri (2002) estudou o efeito da adição de cal hidratada, com o intuito de repor o hidróxido de cálcio consumido pelas reações pozolânicas, em misturas



binárias e ternárias compostas com altos teores de adições minerais, cinza volante, cinza de casca de arroz e escória de alto forno, na composição da solução aquosa dos poros do concreto. Todas as misturas aglomerantes apresentaram menores valores de condutividade elétrica que a mistura de referência, como mostram as Figuras 2.11 e 2.12. Isto ocorreu devido a alterações na composição da solução dos poros e às modificações na estrutura de poros das misturas aglomerantes, que tornam a pasta mais densa, diminuindo a condutividade. A adição de cal hidratada resultou em acréscimo na condutividade elétrica das misturas aglomerantes. Porém, os valores obtidos foram inferiores àquele da mistura de referência.

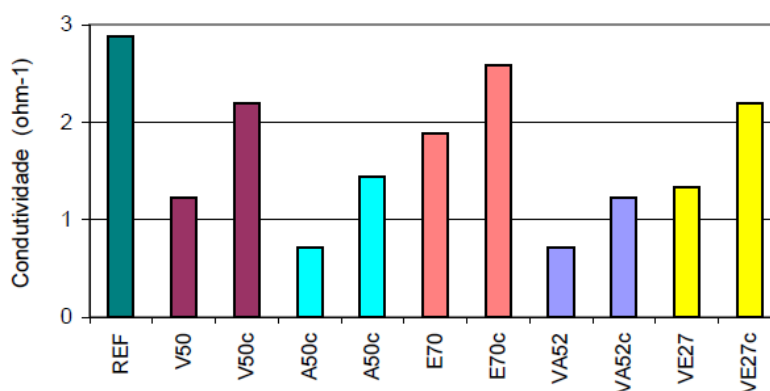


Figura 2.11 – Condutividade específica, em  $\text{ohm}^{-1}$ , para relação a/ag 0,55 aos 91 dias (DAL RI, 2002).

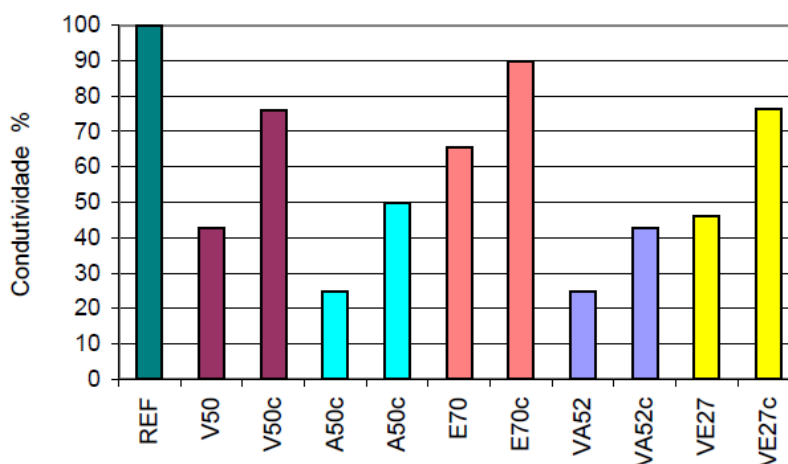


Figura 2.12 – Condutividade específica, em %, para relação a/ag 0,55 aos 91 dias (DAL RI, 2002).

Pedrozo (2008) pesquisou o uso de cinza de casca de arroz residual em concretos estruturais. Para isso, foram testadas cinco misturas aglomerantes: duas compostas com CCA ao natural, duas com CCA moída e uma mistura de referência com 100% de cimento Portland. As misturas compostas com CCA apresentaram menores condutividades elétricas específicas, como revela a figura 2.13.

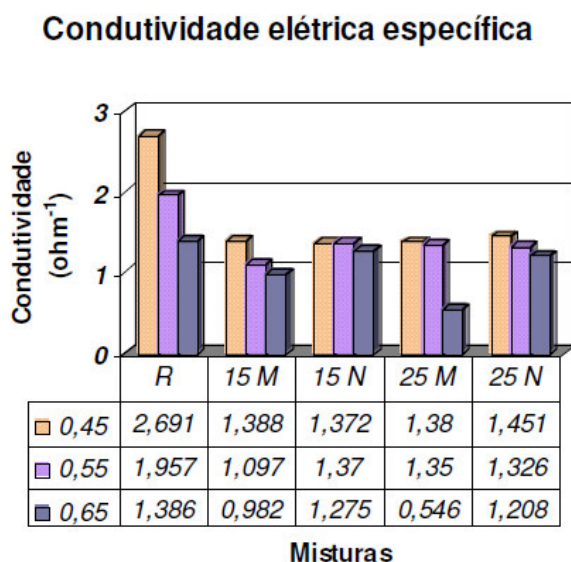


Figura 2.13 – Condutividade elétrica específica das misturas investigadas (PEDROZO, 2008).

Atribui-se este fato, principalmente, à redução no teor de hidróxidos alcalinos provocada pela utilização da CCA. Durante a hidratação do cimento Portland, consideráveis concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{OH}^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  introduzem-se na solução. Entretanto, após a hidratação inicial, os íons  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  reduzem-se até níveis negligenciáveis. Dos íons restantes, a hidroxila, por possuir condutividade elétrica muito superior, influencia em maior proporção na condutividade elétrica da solução dos poros. Assim, a utilização de pozolanas, como a CCA, pode reduzir consideravelmente a concentração de hidróxidos da solução dos poros sem diminuir em grandes proporções o pH, proporcionando redução na condutividade elétrica específica desta solução.

Shi (2004) entende que a condutividade elétrica do concreto decresce com o aumento do volume de agregados na mistura. Isso se dá em função do efeito de

diluição dos íons condutivos da solução dos poros e da adsorção de álcalis na superfície dos agregados. Estes íons, no entanto, podem, posteriormente, ser extraídos e voltarem à solução, aumentando a condutividade elétrica do concreto e, conseqüentemente, diminuindo sua resistividade.

Princigallo, Breugel e Levita (2003) estudaram a influência dos agregados sobre a condutividade elétrica do concreto. Os autores variaram a quantidade total de agregados mantendo a relação, em peso, de 1,2 entre o agregado graúdo e o miúdo. A relação água/aglomerante foi mantida fixa em 0,37. Foi empregada adição de sílica ativa em substituição do cimento. Os resultados de variação de condutividade elétrica ao longo do tempo, em função do teor de agregados apresentados por Princigallo, Breugel e Levita (2003), são dados na figura 2.14.

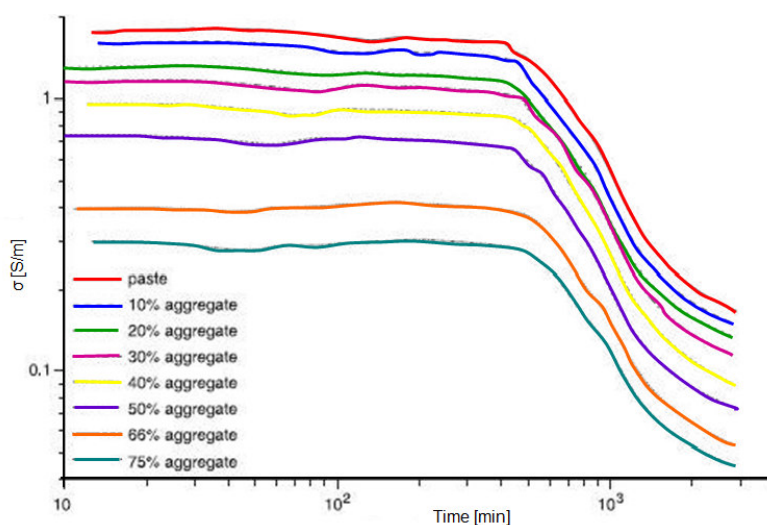


Figura 2.14 - Variação da condutividade ao longo do tempo. (PRINCIGALLO, BREUGEL e LEVITA, 2003).

Os autores concluíram que a condutividade elétrica do concreto diminuiu com o aumento do teor de agregados na mistura. A evolução da condutividade dos concretos testados apresentou desenvolvimento semelhante a das pastas testadas. Ressaltam os pesquisadores que este comportamento evidencia a dominância da matriz cimentícia sobre a condutividade do concreto.

Para pesquisadores e estudiosos em corrosão, é clara a interligação existente entre a resistividade elétrica e a taxa de corrosão de armadura.

Uma vez iniciado o processo de corrosão, que culminará em perda de massa do aço presente nas estruturas de concreto armado, este será controlado pela resistividade elétrica e pela presença de oxigênio.

Há uma ligação entre a resistividade elétrica e a atuação de agentes capazes de levar colapso às estruturas. Íons como cloreto são extremamente agressivos e causadores de manifestações patológicas. Concretos com alta resistividade elétrica são recomendados para diminuir a movimentação destes íons, garantindo, com isso, a manutenção da vida útil especificada durante a fase de projeto.

No entanto, a resistividade elétrica no concreto depende de vários fatores, a saber: composição química do cimento, tipo de adição mineral, relação a/ag, agregado, cura, umidade, volume de pasta e concentração de íons na solução dos poros. Esses fatores em conjunto são responsáveis pela formação da microestrutura da pasta de cimento (poros), determinando uma maior ou menor permeabilidade do concreto.

A resistividade elétrica aparente e a condutividade elétrica específica são parâmetros de grande importância para a avaliação da corrosão, pois suas medidas podem ajudar na criação de novos concretos capazes de retardar ao máximo o tempo de início da deterioração de estruturas de concreto armado.

## **3 ADIÇÕES MINERAIS NO CONCRETO**

### **3.1 Introdução**

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), os efeitos benéficos proporcionados pelas adições minerais ao concreto são de grande importância, porque causam uma redução considerável na porosidade das pastas e propiciam um refinamento dos grãos de CH. Além disso, tamponam os poros capilares, distribuem de forma mais homogênea os produtos de hidratação do cimento Portland, em relação a um concreto tradicional, e diminuem o transporte de fluidos para o interior do concreto.

A redução da porosidade implica uma menor permeabilidade do concreto a fluidos, proporcionada pela alteração da microestrutura da pasta. A redução da permeabilidade do concreto é decorrente de ações físicas (filler) e químicas (pozolânicas) que ocorrem no processo de hidratação dos aglomerantes.

A pozolanicidade e a finura são as principais propriedades que influem no desempenho das adições minerais. A quantidade de pozolana e sua composição granulométrica também têm influência, porém em menor grau (ISAIA, 1995).

Resumidamente, o uso de adições minerais no concreto melhora sua durabilidade e, dependendo do tipo e da quantidade, pode aumentar a resistência à compressão. Também traz um grande benefício à sociedade, por ser um método ambientalmente correto de eliminação de grandes quantidades de materiais que podem poluir não só o ar, como também a água e a terra.

Diante disso, todos esses benefícios justificam as pesquisas e o empenho de vários estudiosos do assunto em propor maiores substituições de cimento por pozolanas na construção civil.

### **3.2 Cinza de casca de arroz**

A produção nacional de arroz, alcançada na safra 2009/10, foi de 11.236,6 mil toneladas, sendo que, somente no estado do Rio Grande do Sul, a produção estava estimada em 6.920,2 mil toneladas, totalizando, aproximadamente, 62% da produção nacional (CONAB, 2010). Essa grande produção anual garante ao Brasil destaque mundial na produção de arroz, transformando-o em um dos principais produtores do grão.

Após as primeiras operações de beneficiamento do grão de arroz, obtém-se a casca como o principal subproduto. A casca de arroz é um revestimento ou capa protetora formada durante o crescimento do grão, de baixa densidade e elevado volume. Possui alto teor de sílica, composta de aproximadamente 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica de base anidra (MEHTA, 1992). O resíduo inorgânico contém, em média, 95 a 98%, em peso, de sílica, na forma amorfa hidratada, perfazendo 13 a 29% do total da casca (HOUSTON, 1972). A lignina e a celulose podem ser removidas através da combustão.

É comum, nas indústrias arroseiras, a utilização da casca do arroz como combustível no processo de beneficiamento de grão. E isso gera uma quantidade considerável de cinza residual, que geralmente não tem destinação específica e acaba sendo dispensada no meio ambiente.

A CCA é considerada um resíduo agro-industrial sem destinação certa, sendo simplesmente descartada ou lançada em aterros, o que gera problemas ambientais, tais como poluição de mananciais de água, do ar e do solo. A Figura 3.1 – no sentido de exemplificar e evidenciar o impacto ambiental - apresenta fotos de um aterro localizado em zona próxima a um conjunto habitacional.



Figura 3.1 - Vistas de um aterro com cinza de casca de arroz residual (POUEY, 2006).

Para Prudêncio, Santos e Dafico (2003), é inaceitável o não reaproveitamento da CCA, uma vez que a mesma é disponibilizada em grande quantidade pela indústria de arroz em vários estados do país. Assim, muitos trabalhos vêm sendo desenvolvidos com o intuito de utilizar esse produto em diversos setores industriais e, de maneira especial, na indústria da Construção Civil. Em trabalho publicado em 1972, Houston apresenta uma listagem com 262 referências bibliográficas sobre as possíveis aplicações da cinza e da casca do arroz. No Brasil, merecem destaque os trabalhos sobre cinza de casca de arroz desenvolvidos por Guedert (1989), Isaia (1995), Silveira (1996), Santos (1997), Dafico (2001), Pouey (2006).

As características químicas deste material estão intimamente ligadas à intensidade com a qual a queima é realizada. Caracteriza-se por conter alto teor de

sílica e apresentar partículas bastante finas e alongadas. Dependendo do grau de moagem (finura), pode apresentar alta superfície específica (quanto maior a finura, maior a superfície específica) e, conseqüentemente, maior reatividade nas primeiras idades (um a três dias), induzindo a um aumento nas resistências inicial e final. Em virtude das características morfológicas dos grãos, essa cinza possui elevada reatividade, apresentando vantagens técnicas quando incorporada ao concreto (NEVILLE, 1997).

Mehta e Monteiro (2008), ao classificarem as adições minerais para concreto, enquadram a cinza de casca de arroz em duas categorias de pozolanas:

- pozolana altamente reativa - quando queimada em processo controlado e constituída essencialmente de sílica pura, na forma não cristalina e em estrutura celular;
- pozolana pouco reativa - quando queimada em campo e constituída essencialmente de silicatos cristalinos, com uma pequena quantidade de matéria não cristalina, indicando que este material deve ser moído e reduzido a um pó muito fino, para desenvolver certa atividade pozolânica.

Um dos pontos críticos apontados por alguns pesquisadores para obtenção de uma boa reatividade da cinza da casca de arroz, seja com a cal, seja com o cimento, é o controle da temperatura de queima que determina o teor de sílica amorfa e, por consequência, a atividade pozolânica.

Segundo Neville (1997), como pozolana, a sílica deve estar em estado amorfo, pois a forma cristalina possui pouca reatividade. Além disso, deve estar finamente subdividida para poder se combinar com hidróxido de cálcio na presença da água e formar silicatos estáveis (reação pozolânica). Ainda segundo o autor, o fenômeno da pozolanicidade é complexo, já que, além da composição química, estão envolvidas a área superficial e a relação entre elas.

Porém, a necessidade de queima controlada e moagem da CCA são fatores que contribuíram para que tal pozolana não ganhasse interesse no mercado, diferente de outras pozolanas como: a cinza volante e sílica ativa, em que o processo de industrialização é mais facilitado.

A utilização da CCA como adição mineral tem sido inviabilizada devido ao alto custo do processo de queima controlada. Assim, os resultados positivos das pesquisas, que revelam o grande potencial da CCA como adição mineral, não são efetivamente aplicados no mercado da construção civil (MISSAU, 2004).



Feng et al. (2003) concluíram que a CCA, sob queima controlada e moída adequadamente, tem alta atividade pozolânica e propicia o aumento da resistência à compressão de concretos com determinados teores de substituição de cimento por CCA e também possibilita o aumento da durabilidade destes concretos.

Para Vieira et al. (2005), a diferença básica entre a CCA residual e a CCA produzida com o processo de queima controlado é o teor de material amorfo das cinzas. A temperatura e duração de queima controlada, bem como o tempo de moagem influenciam as características das cinzas.

Após a queima da casca, com ou sem controle de temperatura, a quantidade de CCA gerada gira em torno de 20% em massa, e o teor de sílica presente neste resíduo é elevado. Houston (1972) apresenta análises químicas, que foram realizadas entre 1870 e 1970, de amostras de CCA nas quais os teores de sílica variam de 87% a 97%, e os teores de álcalis, de 1% a 5%, sendo que os álcalis, juntamente com o carbono, são as maiores impurezas encontradas no resíduo. O álcali encontrado em maior quantidade na CCA é o potássio  $K_2O$ , com seus teores variando em função do tipo e da quantidade de fertilizante utilizado no plantio, podendo chegar a 2,5%.

Quando parcialmente queimada, a casca de arroz gera uma cinza com certo teor de carbono e, por isso, possui cor preta. Quando totalmente queimada, resulta em uma cinza de cor acinzentada, branca ou púrpura, dependendo das impurezas presentes e das condições de queima (PRUDÊNCIO, SANTOS e DAFICO, 2003).

Segundo Mehta e Pitt (1977), se houver controle da temperatura na combustão da casca, obtém-se sílica, em estado amorfo e microporoso, altamente reativa. O mesmo é afirmado por Akasaki et al (2005), o qual também mostra que a temperatura de queima deve ser inferior a 600°C. Já Mehta e Monteiro (2008), asseguram que, a fim disso ocorrer, a temperatura de queima deve ser mantida entre 500°C e 700°C.

Segundo Agopyan (1991 apud POUHEY, 2006), a microestrutura da CCA é diferente conforme o tipo de queima. Como exemplos são apresentadas, na figura 3.2, micrografias de uma mesma cinza produzida em leito fluidizado e forno comum. De acordo com o autor, a cinza do leito fluidizado tem uma estrutura porosa, como a da própria casca, enquanto a cinza comum tem uma fração de estrutura compacta e granulada, provavelmente devido ao longo período no forno.

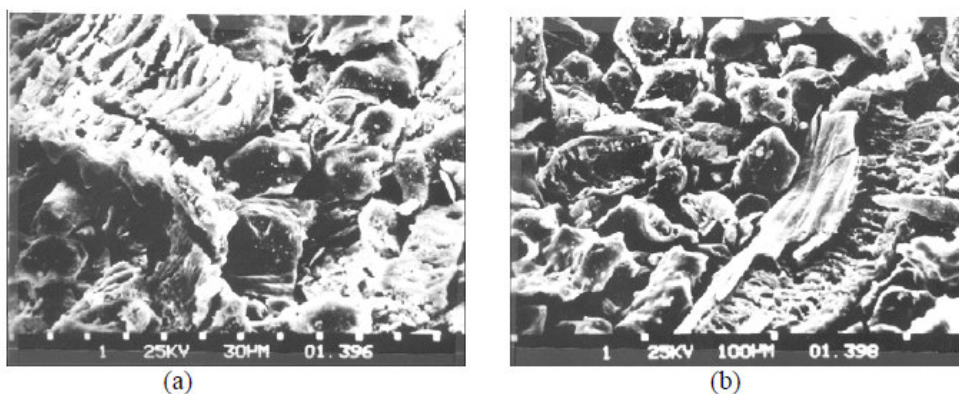


Figura 3.2 - Micrografias de cinza de casca de arroz – (a) produzida em forno comum; (b) produzida em leito fluidizado (AGOPYAN, 1991, apud POUHEY, 2006).

Não existe consenso a respeito da temperatura ideal para a queima da CCA, porém a grande parte dos autores apresenta valores que estão entre 500 e 700°C. A maioria concorda que a quantidade de fases cristalinas na sílica deve ser a menor possível e que temperaturas mais elevadas tendem a produzir CCA mais cristalina, principalmente pelo fato destas serem resfriadas naturalmente ao ambiente.

Estudos realizados revelam que as cinzas apresentam morfologias diferentes conforme a temperatura de queima. Dentre eles, Barbosa et al (2006) estudaram a influência do tempo e da temperatura na queima da casca de arroz. Foi apresentada uma cinza com controle de queima em que a temperatura atinge aproximadamente 600°C (Figura 3.3 - a). E outra cinza, cuja queima se dá por autocombustão sem controle de queima, e o processo dura 36 horas e chega a temperaturas de até 850°C (Figura 3.3 - b).

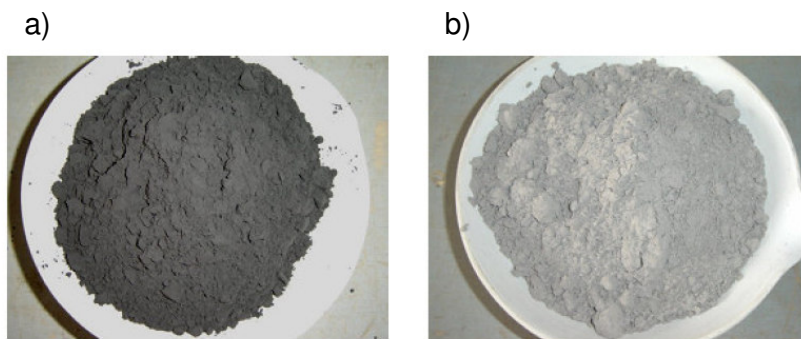


Figura 3.3 - a) Cinza cristalina, após moagem, b) Cinza amorfa, após moagem (BARBOSA et al, 2006).

No mesmo estudo, foi realizado o ensaio de difração de raio-x, para as duas amostras, em que é possível observar a presença de cristais, principalmente, a cristobalita e a tridimita na cinza cristalina (figura 3.4), enquanto que, na cinza amorfa, não ocorrem picos (figura 3.5).

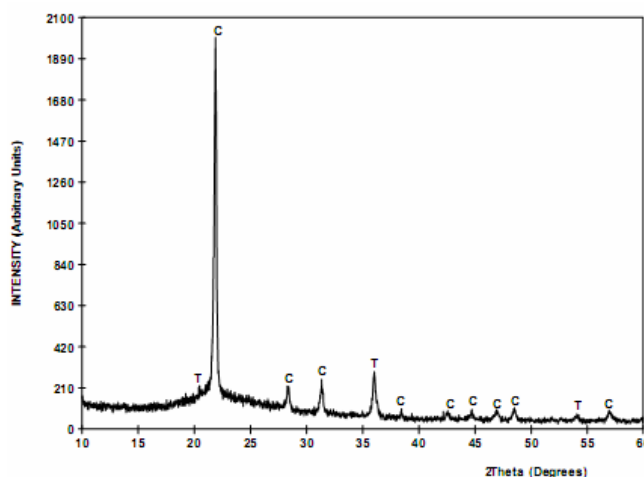


Figura 3.4 - Resultado do ensaio de difração de raio-x CCA cristalina (BARBOSA, et al 2006).

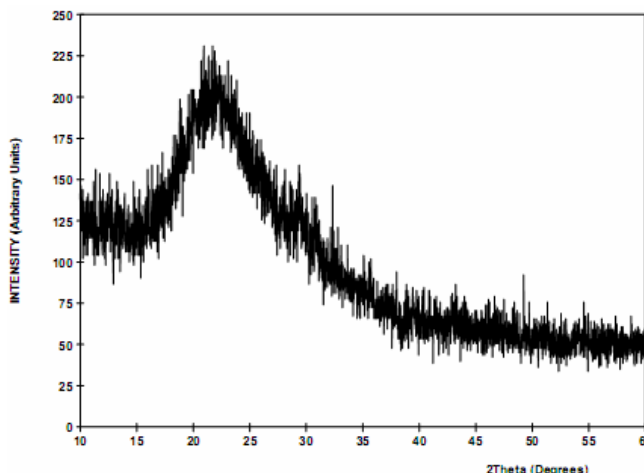


Figura 3.5 - Resultado do ensaio de difração de raio-x CCA amorfa (BARBOSA, et al 2006).

Duart (2008), em sua pesquisa, apresenta o difratograma da CCA amorfa utilizada no seu estudo (Figura 3.6). Nele verificam-se alguns picos cristalinos de

Quartzo (Q) e de Cristobalita (C), resultado de uma queima não controlada da casca de arroz.

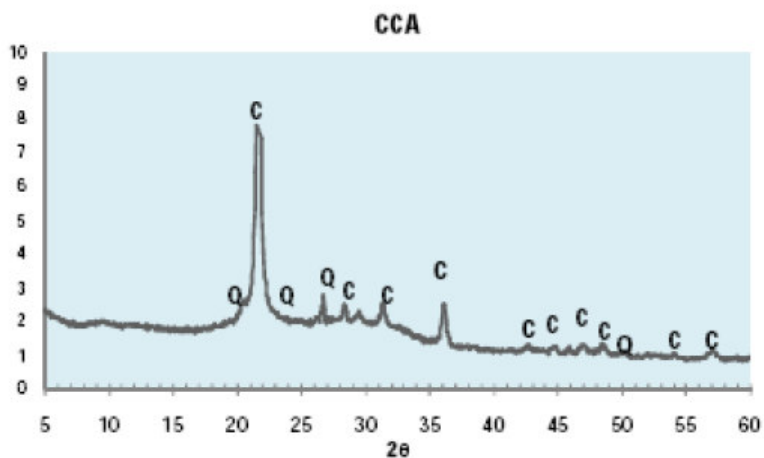


Figura 3.6 - Difração de Raios-X da CCA (DUART, 2008).

O autor também realizou a microscopia eletrônica de um concreto com adição de 25% de cinza de casca de arroz sem moagem (Figura 3.7), que revela a estrutura porosa da CCA. Esta característica da CCA é importante, pois é responsável pela absorção da água de amassamento e também implica em porosidade maior quando submetido o concreto ao ensaio de Porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM).

Essa estrutura porosa pode ser modificada através do processo de moagem da cinza em moinhos de bolas metálicas. A modificação também se dá durante o processo de mistura do concreto, por meio do atrito interno provocado pelos materiais (cimento, areia e brita), de acordo com o tempo de mistura. A moagem da cinza torna as partículas originalmente aciculares em praticamente esféricas, como mostra a Figura 3.8, do ensaio de microscopia eletrônica de varredura.

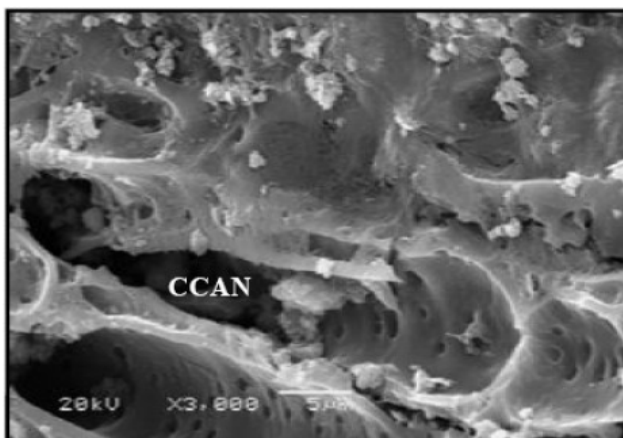
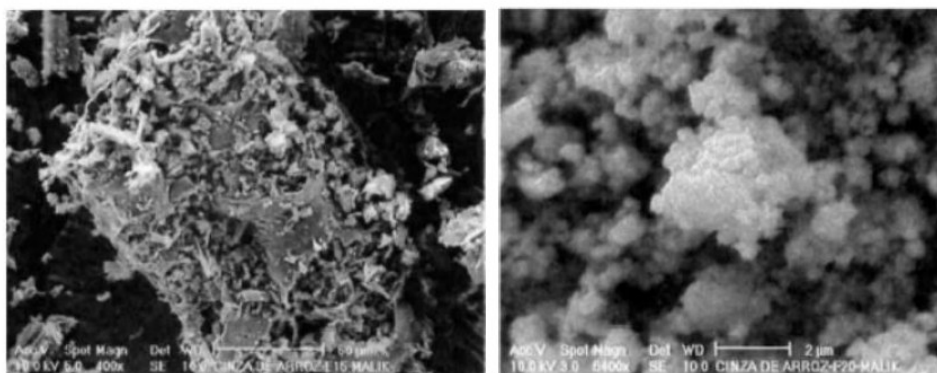


Figura 3.7 - Micrografia concreto com 25% de CCAN, 3000X, 91 dias (DUART, 2008).



(a) Tempo de moagem de 15min;

(b) Tempo de moagem de 20h.

Figura 3.8 - Microscopia eletrônica de varredura da CCA após moagem (SANTOS, 1997).

A cinza de casca de arroz, devido ao seu efeito pozolânico, reage com o hidróxido de cálcio ( $\text{CaOH}_2$ ) e forma silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Essa reação, por ser mais lenta que a reação de hidratação do  $\text{C}_3\text{S}$  do cimento portland, apresenta um ganho de resistência também mais lento.

A maior reatividade das partículas de CCA induz a formação mais rápida de compostos hidratados, sendo que, a partir de 1 a 3 dias, já é possível observar as modificações na estrutura.

Com a adição das partículas finas de CCA no concreto, ocorrem a segmentação dos poros maiores e a redução do teor de hidróxido de cálcio combinado com a sílica, resultando uma interface pasta/agregado mais uniforme.

Assim, as várias características que a CCA apresenta fazem desta pozolana uma adição de interesse entre os pesquisadores, devido às propriedades já comprovadas desta cinza quanto ao aumento na durabilidade das estruturas de concreto.

### 3.3 Cinza volante

A cinza volante é obtida pela queima do carvão mineral em usinas termelétricas e contém alto teor de sílica e alumina.

Segundo Mehta e Monteiro (2008),

Durante a combustão do carvão pulverizado em usinas termoelétricas modernas, quando o carvão passa pela zona de alta temperatura do forno, a matéria volátil e o carbono são queimados, enquanto a maior parte das impurezas minerais, tais como as argilas, o quartzo, e o feldspato, fundem-se a alta temperatura. O material fundido é rapidamente transportado para zonas de temperatura mais baixa, onde se solidifica em partículas esféricas de vidro. Parte da matéria mineral aglomera formando cinza de grelha, mas a maior parte dela é arrastada pela corrente de exaustão do gás e é chamada de cinza volante (MEHTA e MONTEIRO, 2008, p. 297).

Possui forma esférica, também se apresentando, em pequena quantidade, como esferas ocas, denominadas cenosferas, quando estão vazias e plerosferas, quando preenchidas com muitas esferas pequenas. Normalmente, as partículas variam de  $< 1 \mu\text{m}$  a  $100 \mu\text{m}$  de diâmetro.

Segundo a ASTM C618, as cinzas volantes são classificadas em duas categorias: cinzas volantes Classe C e Classe F. A cinza volante é um complexo material formado pela combinação de fases amorfas ou vítreas (60-90%) e fases cristalinas. Estas cinzas são compostas principalmente por silicatos ( $\text{SiO}_2$ , 35-60%), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 10-30%), óxidos de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 4-20%) e de cálcio ( $\text{CaO}$ , 1-35%). Quando a soma dos teores de sílica, alumina e óxido de ferro for superior a 70%, a cinza volante é classificada como de Classe F. Na cinza volante de Classe C esta soma precisa ser superior a 50%. Geralmente as cinzas de Classe C possuem teor de  $\text{CaO}$  maior que 20% (ACI 232.2R, 1996).

As cinzas com baixo teor de cálcio (Classe F) são provenientes da queima do carvão betuminoso e, isoladamente, não possuem propriedades cimentantes. Já as cinzas de Classe C são originadas durante a queima do carvão sub-betuminoso e do

lignito. Por serem ricas em CaO, as cinzas de Classe C possuem propriedades cimentantes em presença da água.

O uso de cinza volante como adição mineral na produção de concretos pode ser em misturas binárias ou ternárias, combinadas com outras pozolanas, ou ainda misturas com cinzas de ambas as categorias.

A cinza volante apresenta um efeito importante no concreto fresco, melhorando a coesão e a trabalhabilidade, diminuindo a exsudação e a segregação e aumentando o tempo de pega. Já no estado endurecido, a cinza volante contribui para a diminuição da temperatura devido às reações de hidratação que se apresentam inicialmente de forma mais lenta. Com o aumento na idade de cura, aproximadamente aos 28 dias, verifica-se o refinamento dos poros da pasta e, conseqüentemente, ganho na resistência do concreto.

A cinza volante proporciona a formação de compostos hidratados mais homogêneos com baixo teor de CH e C-S-H com menor relação C/S, o que resulta em uma pasta mais densa e, ainda, substitui poros grandes por menores, diminuindo a permeabilidade da mistura.

Babu e Rao (1996) notaram que a cinza volante mostra pequena característica aglomerante nas idades iniciais e age como agregado fino (filler). Em idades posteriores, as propriedades pozolânicas conduzem a um considerável aumento de resistência. Da mesma forma, o tipo de cimento, a utilização de superplastificante ou outras misturas químicas, a temperatura elevada, as propriedades físicas, como a composição, conteúdo de vidro, etc., influem nas características aglomerantes da cinza volante.

A relação água/aglomerante é outro fator que transforma a qualidade de concretos com cinza volante, bem como os concretos de referência. Entretanto, além da relação a/ag, o teor de substituição de pozolanas também modifica as características da mistura.

De acordo com Mehta (1989 apud CERVO, 2001), quanto mais elevado for o teor de matéria amorfa, sob a forma de vidro, mais reativas serão as cinzas volantes. Assim, algumas pesquisas têm mostrado que a reatividade da cinza volante é fortemente influenciada pela temperatura de cura e finura da cinza. As cinzas volantes com partículas menores que 10  $\mu\text{m}$  têm uma influência positiva no desenvolvimento da resistência em idades iniciais em misturas de cimento portland e cinza volante.

Juntamente com a reatividade, a finura da cinza volante exerce importante papel na progressão da resistência à compressão, pois, através da composição granulométrica das partículas pequenas (menores do que 15  $\mu\text{m}$ ), desenvolve-se o efeito microfiller de reforço aos produtos de hidratação.

Bouzoubaâ et al. (1997) verificaram que a área específica das cinzas volantes aumentou com o aumento no tempo de moagem de 2, 4 e 10 horas, em moinhos de bolas, sendo que as duas primeiras horas proporcionaram maior aumento na finura. As cinzas volantes ao natural continham grande parte de partículas esféricas com pequena quantidade de plerosferas e partículas de forma irregular. Após duas horas de moagem, muitas plerosferas e partículas grandes haviam sido quebradas. Com o aumento do tempo de moagem, o número de partículas esféricas foi reduzido. Depois de duas horas de moagem, a necessidade de água diminuiu devido à quebra nas partículas grandes. O aumento para quatro horas não afetou substancialmente a necessidade de água, porém de quatro para dez horas aumentou a necessidade de água devido ao aumento de partículas irregulares.

Maiores índices de resistência foram obtidos em misturas compostas com cinza volante moídas por quatro horas, e estes foram de 15% a 27% superiores àquelas com cinzas volantes ao natural. Quando o tempo de moagem aumentou de quatro para dez horas, houve uma significativa diminuição no índice de resistência aos 7 dias devido a maior demanda de água e, aos 28 dias, tal índice não foi afetado significativamente, devido ao aumento na atividade pozolânica das cinzas volantes entre os 7 e 28 dias.

Segundo os autores, baseado nos resultados obtidos, parece existir um tempo de moagem ótimo de aproximadamente 4 horas, sendo que acima deste aumenta a necessidade de água e diminuem os índices de resistência ou não aumentam significativamente.

Hussain e Rasheeduzzafar (1994) constataram que 30% de cinzas volantes misturadas a cimentos com 14% de  $\text{C}_3\text{A}$  provocaram grande melhoria na estrutura física do concreto endurecido, refinando significativamente a distribuição de tamanho dos poros e reduzindo o diâmetro médio dos poros de  $240 \times 10^{-10}$  m para  $166 \times 10^{-10}$  m. Como consequência, o coeficiente de permeabilidade e a difusividade dos cloretos diminuíram em torno de cinco vezes, e a resistividade aumentou em 2,2 vezes. Da mesma forma, Rasheeduzzafar et al. (1987 apud ABREU, 1998) verificaram que a resistividade elétrica de concretos de cimento Portland pozolânico



(25% de cinza volante) apresentou incrementos 3 vezes superior aos concretos sem adição. Este incremento foi verificado em traços com relação água/cimento 0,35 a 0,65.

Portanto, a incorporação das cinzas volantes no concreto traz benefícios não apenas de ordem técnica e econômica, mas também ambiental, devido à redução das cinzas não aproveitadas, do consumo de energia e da emissão do CO<sub>2</sub> relativos à fabricação do clínquer.

## **4 PROGRAMA EXPERIMENTAL**

### **4.1 Introdução**

A iniciação da corrosão em estruturas submetidas à ação de cloretos está relacionada ao ingresso destes íons através da rede porosa do concreto. Por sua vez, este ingresso está relacionado à absorção e à difusividade iônica do concreto que são determinadas pelas características dos poros do concreto e da solução aquosa neles presente.

Assim, realizou-se o ensaio acelerado de penetração de cloretos ASTM C 1202:2005, bem como se determinou a composição iônica da solução dos poros. Ao mesmo tempo, foram realizados os ensaios de resistência à compressão, de acordo com os métodos de ensaio NBR 5738:2003 e 5739:2007, o ensaio de resistividade elétrica e o ensaio de absorção de água por capilaridade segundo NBR 9779:1995, para as diferentes misturas, possibilitando, assim, a análise dos resultados em conjunto.

Para uma análise mais precisa do efeito das cinzas de casca de arroz, moída e ao natural, investigou-se um concreto com aglomerante composto por 80% de CII-Z e 20% de cinza volante, denominado concreto de referência, que serviu de parâmetro para a comparação com as outras misturas aglomerantes. O teor de substituição do aglomerante por CCA foi 15%, ao natural e moída, totalizando, assim, com o concreto de referência, três misturas aglomerantes.

### **4.2 Variáveis da pesquisa**

Para alcançar os objetivos propostos pela pesquisa, foi necessário definir as variáveis utilizadas no experimento, que são:

a) Variáveis independentes:

- Relação água/aglomerante (a/ag): 0,45; 0,55 e 0,65.
- Idade de ensaio:
  - 3, 7, 14, 28, 56, 91 e 182 dias - resistividade elétrica;
  - 7, 28, 56, 91 e 182 dias - condutividade elétrica;
  - 7, 28, 91 e 182 dias - resistência à compressão;
  - 91 dias - penetração de cloretos - ASTM C1202;
  - 91 dias - absorção de água por capilaridade.
- Tipo de adições minerais (utilizadas como substituição em massa de cimento): utilizou-se a cinza volante e a cinza de casca de arroz residual.
- Teor de adição: foram adotados os teores de 20% para a cinza volante (em relação ao CII-Z), e 15% para a cinza de casca de arroz, natural e moída (em relação à mistura CII-Z + CV).
- Finura: a CCA residual (proveniente de queima sem o controle da temperatura) foi utilizada ao natural (sem moagem) e, também, moída por 1h em moinho de bolas. Determinou-se o tempo de 1h, pois um tempo de moagem superior a este, possivelmente, não resultaria em grandes acréscimos na pozolanidade da CCA (tempo de moagem definido pelo grupo em estudos anteriores).

b) Variáveis dependentes:

- No concreto:
  - Resistência à compressão axial.
  - Absorção de água por capilaridade.
  - Resistência à penetração de íons cloreto.
  - Resistividade elétrica.
  - Condutividade elétrica da solução dos poros.
- Na pasta:
  - Condutividade elétrica da solução dos poros.

### 4.3 Caracterização dos materiais

#### 4.3.1 Aglomerantes

O cimento usado na pesquisa foi o cimento Portland com Pozolana (CPII-Z 32), o qual é destinado a fins estruturais como estruturas e produtos de concreto pré-moldados, de fabricação nacional e de acordo com a norma referente, NBR 11578:1991. A cinza volante utilizada é oriunda de termoelétrica regional (Candiota/RS) e foi empregada para mitigar as reações expansivas entre os álcalis do aglomerante e a sílica da CCA.

A CCA investigada é proveniente de uma cooperativa arroseira da região de Santa Maria-RS e decorrente de queima efetuada sem o controle de temperatura. A empresa utiliza-se desta queima apenas para a secagem dos grãos armazenados sem silos. Após a queima, a cinza é transportada por via úmida até seu destino final, o descarte a céu aberto.

Com o intuito de avaliar o desempenho das misturas compostas com CCA frente aos questionamentos propostos da pesquisa, optou-se pela utilização da cinza ao natural sem beneficiamento e também moída por 60min em moinho de bolas.

Nos ensaios de caracterização, para simular a moagem que acontece no interior da betoneira quando se produz concreto, a CCA ao natural passou por moagem na betoneira a seco, com agregados graúdos, pelos mesmos intervalos de tempo utilizados, posteriormente, nas misturas.

Os ensaios realizados na caracterização dos aglomerantes foram os seguintes:

- NBR 11579:1991: Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 micrômetros (número 200);
- NBR NM 23:2001: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica;
- NBR NM 65:2003: Cimento Portland - Determinação do tempo de pega;
- Análise química completa de matéria-prima – ABCP/SP – Método ABCP/SP PO-GT-3051 Revisão 02.

As características físicas e químicas dos aglomerantes são apresentadas nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3.

Tabela 4.1 – Características físicas dos aglomerantes

Grandeza física	CPII-Z	CV	CCAN	CCAM	CCAN-15 <sup>1</sup>
Massa específica (Kg/dm <sup>3</sup> )	2,96	1,88	1,41	2,09	1,96
Área específica Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	5.240	2.310	-	-	-
Resíduo na # 0,075 mm (%)	0,2	-	-	-	-

<sup>1</sup> CCAN-15: cinza natural, misturada por 15 minutos na betoneira com agregados e cimento, com 15% de substituição do cimento por cinza.

Tabela 4.2 – Ensaio em argamassa de CPII-Z

Grandeza física				
Início de pega	Fim de pega	Resistência à compressão (MPa)		
		3 dias	7 dias	28 dias
260 min	330 min	24,3	31,3	38,7

Tabela 4.3 – Análise química dos aglomerantes

Composição química	Porcentagem em massa dos materiais (%)			
	CPII-Z	CV	CCAN	CCAM
CaO	50,84	2,85	1,25	1,32
SiO <sub>2</sub>	21,92	67,08	95,04	94,84
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,33	21,29	0,00	0,39
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,27	4,44	0,44	0,54
SO <sub>3</sub>	2,53	0,14	0,01	0,01
MgO	5,70	0,87	0,45	0,40
K <sub>2</sub> O	1,17	2,05	1,40	1,45
TiO <sub>2</sub>	0,26	-	-	-
Na <sub>2</sub> O	0,16	0,40	0,09	0,11
SrO	0,10	-	-	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,09	-	-	-
MnO	0,10	-	-	-
Perda ao fogo	5,46	0,60	0,51	0,25

#### 4.3.2 Agregados

Como agregado miúdo, foi usado a areia natural, de origem quartzosa, proveniente do município de Santa Maria/RS. A areia foi previamente lavada para remoção de possíveis impurezas, sejam orgânicas, sejam de qualquer outra natureza, que podem influenciar no desempenho esperado para o concreto. Além disso, a areia foi seca em estufa, peneirada na peneira # 4,75mm e também estocada em cubas de alvenaria devidamente tampadas.

O agregado graúdo empregado foi a rocha britada, proveniente de rocha de origem diabásica, procedente do município de Itaara/RS. Este material foi lavado para remoção de componentes que poderiam alterar o desempenho do concreto, seco ao ar para remoção da umidade e, posteriormente, estocado em cubas, semelhante ao procedimento adotado para a areia. As características físicas dos agregados são apresentadas na Tabela 4.4, e as distribuições granulométricas da areia e das britas são apresentadas nas Figuras 4.1 e 4.2, respectivamente.

Com a intenção de promover maior fechamento dos vazios presentes no concreto fresco e, assim, diminuir o consumo de pasta, procedeu-se uma composição de agregados graúdos. As porcentagens ótimas foram 45% brita A + 55% brita B.

Tabela 4.4 – Características físicas dos agregados

# peneiras (mm)	Porcentagens retidas acumuladas (%)		
	Brita A	Brita B	Areia
25	0	0	0
19	0	0	0
12,5	0	57	0
9,5	1	90	0
6,3	58	99	0
4,75	84	100	0
2,36	100	100	6
1,2	100	100	17
0,6	100	100	32
0,3	100	100	73
0,15	100	100	95
Módulo de finura	5,85	6,90	2,23
Dimensão máxima característica (mm)	9,5	19	4,75
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	2,52	2,54	2,62
Massa unitária solta (kg/dm <sup>3</sup> )	1,39	1,40	1,68
Massa unitária solta da composição 45% Brita A + 55% Brita B (kg/dm <sup>3</sup> )		1,46	-
Absorção de água (%)	3,03	2,87	-
Índice de forma	-	2,31	-

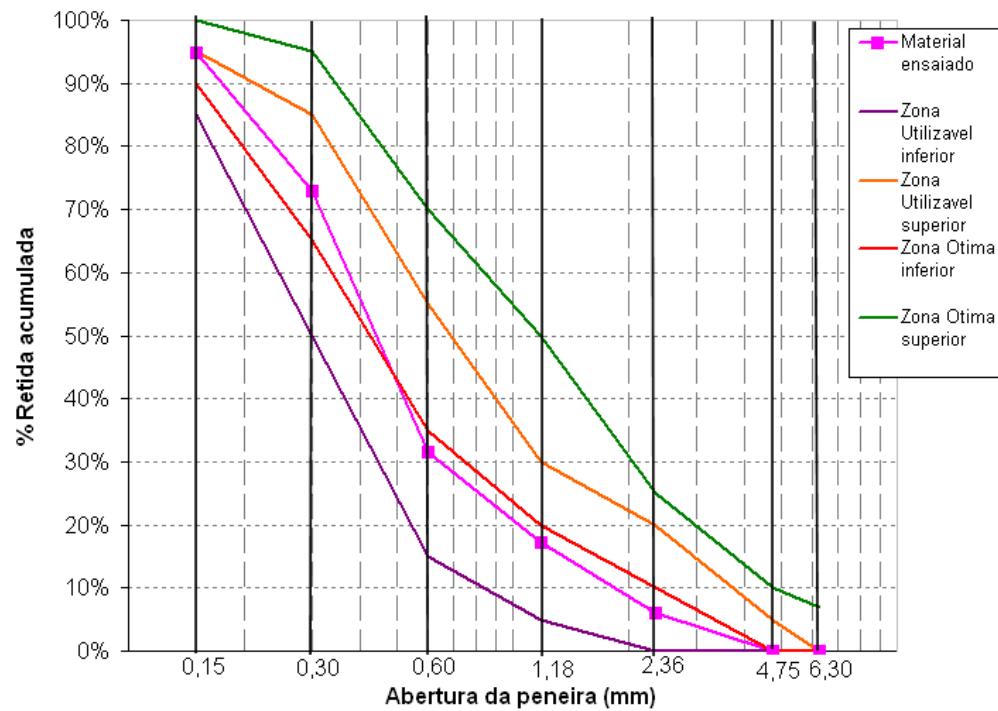


Figura 4.1 – Distribuição Granulométrica do agregado miúdo

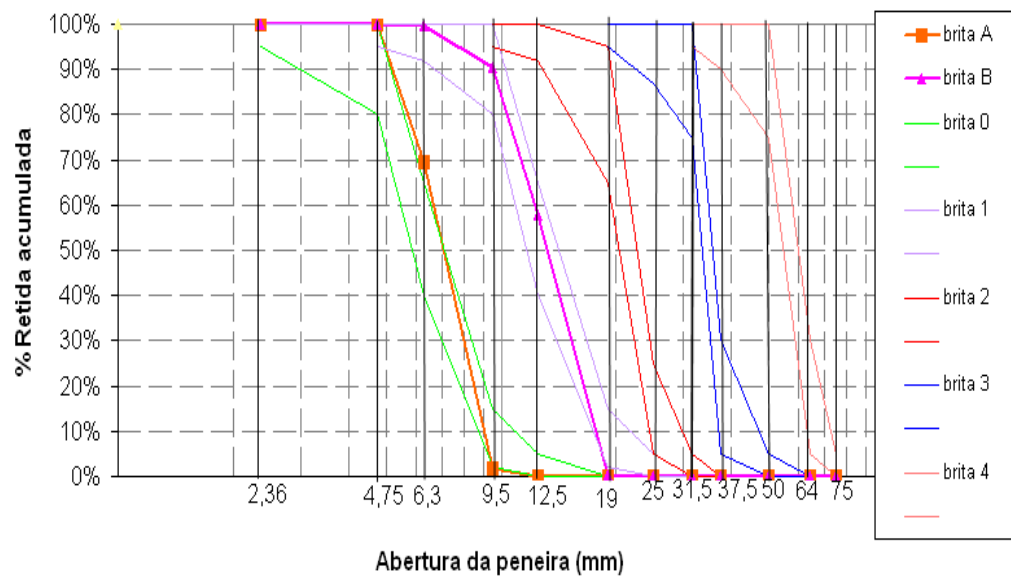


Figura 4.2 – Distribuição Granulométrica dos agregados graúdos



#### 4.3.3 Aditivo

Na mistura de referência, foi usado um aditivo plastificante multifuncional de pega normal. Já nas misturas contendo CCA, usou-se um aditivo superplastificante a base de policarboxilatos, com teor de cloretos < 0,1%, em conjunto com o aditivo plastificante.

#### 4.3.4 Água

Para moldagem dos corpos de prova, utilizou-se água proveniente da rede de abastecimento da Universidade Federal de Santa Maria.

### **4.4 Ordem de colocação dos materiais na betoneira**

Em pesquisa anterior, Pedrozo (2008) determinou a melhor ordem de colocação dos materiais, assim como o tempo de mistura ideal para se atingir a trabalhabilidade desejada, com o menor consumo de superplastificante. Os resultados foram aplicados no presente estudo e estão apresentados na Tabela 4.5.

### **4.5 Dosagem do concreto**

O método de dosagem das misturas empregado foi o proposto por Helene e Terzian (1992). Foram moldadas três misturas, uma de referência contendo 80% de cimento Portland e 20% de cinza volante, e outras duas com CCA em teor de substituição de 15%, ao natural e moída, em relação à mistura CII-Z + CV.

Tabela 4.5 - Ordem de colocação e tempo de mistura dos materiais na betoneira

Traço	Ordem / Tempo	Materiais							Tempo de mistura
		CCAN	Pedra	Água	Aditivo	CCAM	CP + CV	Areia	
REF	Ordem	-	1º	1º	3º	-	2º	4º	10 min
	Tempo	-	2 min		2 min	-	2 min	4 min	
CCAM	Ordem	-	1º	1º	3º	2º	2º	4º	10 min
	Tempo	-	2 min		2 min	2 min		4 min	
CCAN	Ordem	1º	1º	2º	2º	-	3º	4º	15 min
	Tempo	2 min		2 min		-	2 min	9 min	

A previsão de comportamento de cada mistura se dá por meio do traçado da curva de Abrams. Para tal, necessita-se de, pelo menos, três pontos. Sendo assim, utilizaram-se três relações água/aglomerante: 0,45, 0,55 e 0,65. As proporções aglomerante/agregado (m) das misturas foram obtidas em ensaios de trabalhabilidade e chegaram a 1:4,20; 1:5,47 e 1:7,09 para as relações a/ag 0,45, 0,55 e 0,65, respectivamente. O volume de argamassa foi mantido constante para todas as misturas, necessitando de um ajuste no teor de areia dos traços em função da menor massa específica das adições minerais com relação ao cimento.

O teor de argamassa foi obtido experimentalmente e mantido em 51%, em massa seca, para todos os traços.

Os teores dos aditivos, plastificante e superplastificante, foram definidos nos ensaios de trabalhabilidade fixando o abatimento do tronco de cone para todas as misturas em  $80 \pm 10$ mm. O consumo de materiais é apresentado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Consumo dos materiais em quilos por metro cúbico de concreto

Mistura	a/ag	Cimento (Kg/m <sup>3</sup> )	CV (Kg/m <sup>3</sup> )	CCA (Kg/m <sup>3</sup> )	Areia (Kg/m <sup>3</sup> )	Brita (Kg/m <sup>3</sup> )	AP (%) massa	AS (%) massa
REF	0,45	324,4	81,1	-	677,6	1027,5	0,65	-
	0,55	261,7	65,4	-	764,9	1024,0	0,65	-
	0,65	211,3	52,8	-	825,5	1046,8	0,65	-
15 CCAM	0,45	263,6	81,1	60,8	613,9	1027,5	0,65	0,286
	0,55	212,7	65,4	49,1	713,6	1024,0	0,65	0,200
	0,65	171,6	52,8	39,6	783,3	1046,8	0,65	0,227
15 CCAN	0,45	263,6	81,1	60,8	608,6	1027,5	0,65	0,923
	0,55	212,7	65,4	49,1	709,4	1024,0	0,65	0,667
	0,65	171,6	52,8	39,6	780,1	1046,8	0,65	0,785

AP – aditivo plastificante      AS – aditivo superplastificante

#### 4.5.1 Moldagem e cura

Para cada mistura e relação água/aglomerante, foram moldados 21 corpos de prova cilíndricos  $\Phi 10 \times 20$ cm, sendo 16 corpos de prova para o ensaio de resistência à compressão, 2 corpos de prova para o ensaio de permeabilidade a cloretos e 3 corpos de prova para o ensaio de condutividade elétrica. Também foram moldados, para cada mistura e relação água/aglomerante, 5 corpos de prova prismáticos  $10 \times 10 \times 17$ cm e 2 corpos de prova  $\Phi 15 \times 30$ cm destinados ao ensaio de resistividade elétrica aparente e absorção de água por capilaridade, respectivamente.

Os corpos de prova foram moldados segundo as prescrições da NBR 5738:2003, adensados em mesa vibratória em duas camadas. Os corpos de prova  $\Phi 15 \times 30$ cm foram adensados por vibradores de imersão (internos).

A fim de moldar todos os traços com a mesma temperatura do concreto, fez-se o controle da temperatura dos materiais antes da mistura e calculou-se a temperatura em que deveria estar a massa de água para obtenção do concreto a  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ . Dependendo da temperatura dos materiais, aqueceu-se ou resfriou-se a água de amassamento. A equação usada foi a apresentada por Neville (1997) :

$$T = \frac{0,22.(T_m.M_m + T_c.M_c) + T_a.Ma}{0,22.(M_m + M_c) + Ma}$$

(4.1)

Onde:

T – Temperatura da massa de concreto (°F)

T<sub>m</sub> – Temperatura dos agregados (°F)

T<sub>c</sub> – Temperatura do cimento (°F)

T<sub>a</sub> – Temperatura da água (°F)

M<sub>m</sub> – Massa dos agregados (Kg)

M<sub>c</sub> – Massa de cimento (Kg)

M<sub>a</sub> – Massa de água (Kg)

Os corpos de prova permaneceram nos moldes à temperatura ambiente, nas primeiras 24 horas e, posteriormente, foram retirados de suas formas e acondicionados em câmara úmida com temperatura em  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  e umidade  $> 95\%$ .

Para o ensaio acelerado de penetração de cloretos (EAPC), os corpos de prova permaneceram em câmara úmida por dois períodos de cura diferentes, 7 e 28 dias, completando seu tempo de cura em ambiente de laboratório quando, aos 91 dias, foram encaminhados ao ensaio. Antes disso, os corpos de prova foram mantidos imersos por 3 dias (dos 87 aos 90 dias), para depois serem encaminhados ao ensaio.

Também foram moldadas pastas em fôrmas metálicas cilíndricas de  $\Phi 4 \times 8 \text{cm}$  para extração da solução aquosa dos poros com proporção a/ag e teores de aditivo idênticos aos dos concretos estudados. Estas permaneceram nos moldes por 24 horas à temperatura ambiente e, depois de desmoldadas, foram curadas imersas em água com cal até atingirem as idades de ensaio.

A tabela 4.7 apresenta as idades de ensaio e as dimensões dos corpos de prova utilizados em cada ensaio.

Tabela 4.7 - Idades de ensaio e tamanho dos corpos-de-prova

Ensaio	Idade cronológica	Corpos de prova (cm)
Resistividade Elétrica	3, 7, 14, 28, 56, 91 e 182 dias	10x10x17
Resistência à compressão	7, 28, 91 e 182 dias	Φ 10x20
Permeabilidade à cloretos	91 dias	Φ 10x5,1
Absorção capilar	91 dias	Φ 15x15
Condutividade Elétrica (concreto)	7, 28, 56, 91 e 182 dias	Φ 10x10
Condutividade Elétrica (pasta)	7, 28, 56, 91 e 182 dias	Φ 4x8

#### 4.6 Sequência de ensaios

Foram realizados ensaios com o concreto (penetração de cloretos, resistividade elétrica, resistência à compressão, absorção capilar, condutividade elétrica) e com a pasta (condutividade elétrica).

##### 4.6.1 Ensaios realizados no concreto

###### 4.6.1.1 Resistividade elétrica aparente

O método de medida da resistividade elétrica aparente usado na pesquisa foi o método de Wenner ou método dos quatro eletrodos. Este método é originalmente desenvolvido para o uso em solos, mas foi adaptado para uso em concreto.

O ensaio é realizado fazendo-se uso de uma fonte de alimentação de corrente alternada. É aplicada corrente entre os eletrodos externos. Entre os eletrodos internos é medida a diferença de potencial. Os eletrodos devem estar equidistantes

e em linha reta. A Figura 4.3 indica a disposição dos eletrodos para a realização do ensaio de resistividade elétrica.

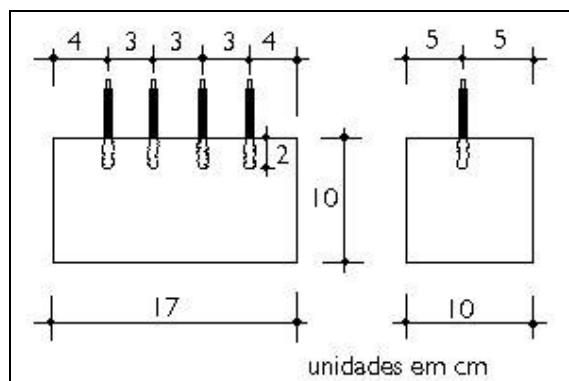


Figura 4.3 – Esquema dos corpos de prova utilizados no ensaio de medida da resistividade pelo Método dos 4 eletrodos (ABREU, 1998).

Para cada mistura, foram moldados 15 corpos de prova, sendo 05 corpos de prova para cada relação a/ag. Cada corpo de prova tem a forma de um prisma com dimensões de 10x10x17 cm.

A tabela 4.8 descreve os dados relativos aos corpos de prova utilizados neste ensaio.

Anteriormente à moldagem dos corpos de prova utilizados nos ensaios da resistividade, procedeu-se ao preparo dos eletrodos (fio de cobre com 10 mm<sup>2</sup>), que consistia em:

1. Cortar o fio em pedaços de aproximadamente 8 cm;
2. Decapar os fios de forma a resultarem 5 cm de fio coberto correspondentes a altura do gabarito;
3. Remover o verniz (antioxidante e isolante) das extremidades com lixa grossa;
4. Amassar a extremidade do fio a ser imersa no concreto (2cm), para aumentar a aderência entre o eletrodo e o concreto.

Os procedimentos descritos anteriormente (preparo dos eletrodos) seguiram os modelos já empregados por Abreu (1998), Missau (2004), Hoppe (2005), Rosa (2005) e Lübeck (2008).

Para a execução das etapas 1 e 2, utilizaram-se gabaritos de modo a agilizar e garantir uma maior precisão na confecção dos eletrodos.

É importante a adoção de uma folga entre a superfície do concreto e a parte inferior do gabarito. Esta solução é necessária para que o gabarito não fique aderido ao concreto na região dos eletrodos, o que provocaria o deslocamento dos eletrodos, por ocasião da desmoldagem dos corpos de prova.

Tabela 4.8 – Dados informativos do ensaio de resistividade elétrica aparente

Misturas	a/agl	Total de cp ensaiado em cada relação a/agl	Idades ensaiadas (dias)	Total de ensaios em cada idade	Total de ensaios por mistura
REF	0,45	05	3, 7, 14, 28, 56, 91 e 182	15	105
	0,55	05			
	0,65	05			
15 CCAM	0,45	05	3, 7, 14, 28, 56, 91 e 182	15	105
	0,55	05			
	0,65	05			
15 CCAN	0,45	05	3, 7, 14, 28, 56, 91 e 182	15	105
	0,55	05			
	0,65	05			
Total de ensaios realizados					315

Para a realização do presente ensaio foi montado um circuito conforme exposto na figura 4.4.



Figura 4.4 - Ensaio de resistividade elétrica sendo executado.

O valor da resistividade, de acordo com a fórmula de Frank Wenner, é feito da seguinte forma (MEDEIROS FILHO, 1979 apud ABREU, 1998):

$$\rho = R \cdot k \quad (4.2)$$

$$k = \frac{4 \cdot \pi \cdot a}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}} \quad (4.3)$$

Onde:

$\rho$  - é a resistividade elétrica (ohm.cm);

R - resistência medida pelo instrumento (ohm.cm);

a - a distância de separação entre os eletrodos (cm);

b - a profundidade de penetração dos eletrodos no corpo de prova (cm).



Para a execução dos ensaios de resistividade elétrica aparente foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Um gerador de função, com papel de emitir uma onda senoidal, com corrente alternada e frequência de 10Hz;
- Um multímetro com função de leitura da corrente alternada;
- Um multímetro com função de leitura da diferença de potencial (com valores em torno de 5V).

Com os valores da diferença de potencial e corrente elétrica medidos, calculou-se a resistividade elétrica aparente, de acordo com a equação 4.2.

#### 4.6.1.2 Condutividade elétrica da solução aquosa dos poros

Foram moldados corpos de prova cilíndricos de  $\Phi$  10x20cm de concreto. Nas idades de ensaio foram cortados com serra diamantada para formarem duas amostras cilíndricas de  $\Phi$ 10x10cm (cada amostra  $\Phi$ 10x10cm obtida foi usada em uma idade de ensaio diferente) e, após isso, levados até uma furadeira de bancada de baixa rotação, onde foi extraído o pó para obtenção da solução. O pó obtido foi peneirado na peneira de #100. A fração passante foi misturada em igual quantidade de água destilada deionizada (proporção 1:1), e agitada em um agitador magnético por 30 minutos, tempo necessário para a estabilização do pH.

Após isso, foi determinada a condutividade elétrica da solução dos poros.

Para determinar a condutividade elétrica da solução dos poros do concreto, utilizou-se o condutímetro portátil, da Marconi, que mede a mobilidade dos íons em solução. O ensaio foi realizado mergulhando-se na solução uma célula de vidro e um sensor de temperatura até a estabilização da leitura. Para cada leitura, a célula foi lavada com água destilada e enxugada com papel absorvente macio.

#### 4.6.1.3 Absorção capilar

Para este ensaio seguiram-se as recomendações da norma NBR 9779:1995. Primeiramente, foram determinadas as massas dos corpos de prova ao ar, após isso, foram secos em estufa à temperatura de  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  até constância de massa. Na sequência, os corpos de prova foram resfriados ao ar à temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  e, feito isso, sua massa foi determinada.

A face curva dos corpos de prova foi selada com verniz poliuretânico. Os corpos de prova foram então colocados em um recipiente e posicionados sobre suportes. O recipiente foi completado com água até que a mesma atingisse a altura de  $5 \pm 1$  mm acima de face inferior dos corpos de prova, evitando molhagem de outras superfícies.

A ascensão de água por absorção capilar foi medida pelos corpos de prova após 3, 6, 24, 48 e 72 horas, contadas a partir da colocação destes em contato com a água. Os corpos foram previamente enxugados com pano úmido.

Completada cada etapa, os corpos de prova retornaram imediatamente ao recipiente de ensaio.

Após a última etapa, os corpos de prova foram rompidos por compressão diametral, conforme a NBR 7222:2010, de modo a permitir a anotação da distribuição da água no seu interior. A altura da ascensão capilar máxima interna foi medida e expressa em cm, assim como a distribuição interna da água absorvida foi desenhada, como mostra a Figura 4.5.

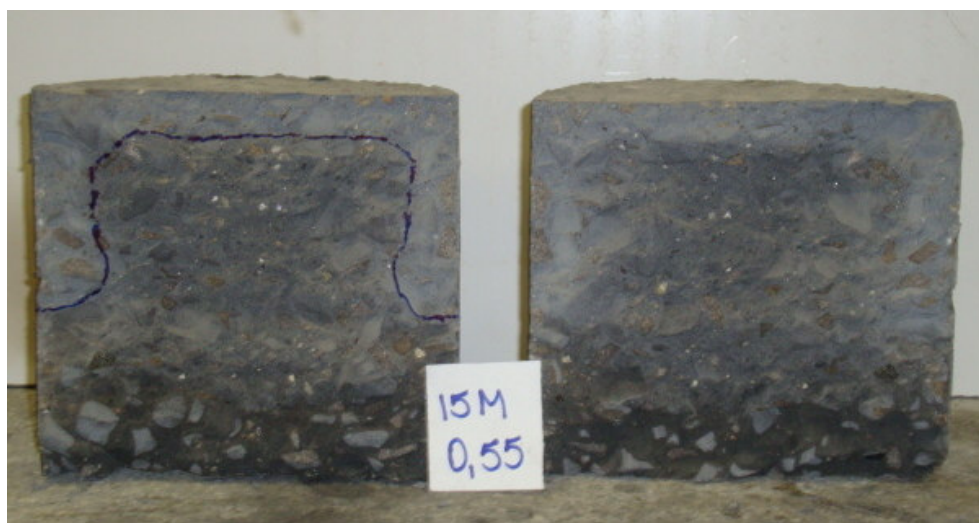


Figura 4.5 – Corpo de prova do ensaio de absorção capilar, após ser rompido, com a distribuição interna da água absorvida desenhada em uma das metades.

A absorção de água por capilaridade foi expressa em g/cm<sup>2</sup> e calculada dividindo o aumento de massa pela área da seção transversal da superfície do corpo de prova em contato com a água, de acordo com a seguinte equação:

$$C = (A - B) / S \quad (4.4)$$

Onde:

C - absorção de água por capilaridade, em g/cm<sup>2</sup>;

A - massa do corpo de prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante um período de tempo especificado, em g;

B - massa do corpo de prova seco, assim que este atingir a temperatura de 23 ± 2 °C, em g;

S - área da seção transversal, em cm<sup>2</sup>.

#### 4.6.1.4 Ensaio acelerado de penetração de cloretos - ASTM C1202:2005.

O ensaio descrito pela norma ASTM C1202:2005 tem por objetivo medir a carga passante em uma amostra de concreto (Ø 10,0 x 5,1 cm), submetida a uma tensão de 60,0 ± 0,1 V, durante um período de 6 horas. As faces do cilindro são expostas uma à solução de cloreto de sódio (3% em água destilada) e a outra à solução de hidróxido de sódio (0,3N em água destilada), nas quais são submersos eletrodos de cobre conectados em uma fonte de corrente contínua, permitindo medir a diferença de potencial no concreto.

Foi realizada a moldagem de três corpos de prova (Ø 10 x 20 cm) por mistura, ou seja, um corpo de prova para cada relação a/ag, e dele retirado duas amostras, em serra de disco diamantado. As extremidades do corpo de prova foram desprezadas. Ao completarem o prazo de cura desejado na câmara úmida (7 e 28 dias), os corpos de prova concluíram o período de cura em sala climatizada (temperatura = 23 ± 2°C e UR = 50 ± 10%) para secagem ao ar.

Na véspera da data de ensaio, os corpos de prova foram submetidos ao pré-condicionamento prescrito por esta norma que consiste em:

- Impermeabilização das superfícies laterais com resina epóxi;
- Aplicação de vácuo por um período de 3 horas;
- Colocação de água deionizada na cuba e aplicação de vácuo submerso por um período de 1h;
- Imersão em água deionizada por um período de  $18 \pm 2$ h.

Na data de ensaio, os corpos de prova foram secos superficialmente e fixados nas células de acrílico com auxílio de cola silicone.

Com a finalização do ensaio (6h), foi então calculada a carga total passante, de acordo com a equação 4.5:

$$C = 900.(I_0 + 2.I_{30} + 2.I_{60} + \dots + 2.I_{330} + I_{360}) \quad (4.5)$$

Onde:

C - carga total passante (Coulombs);

$I_t$  - corrente medida nos tempos t (t em minutos) (Ámperes).

No final de cada ensaio, as amostras foram rompidas ao meio para aspersão de solução de nitrato de prata (0,10N em água deionizada) (conforme Figura 4.6) e permaneceram em ambiente iluminado para que a solução pudesse reagir com os cloretos e o CH. Isso ocorre porque a solução de  $\text{AgNO}_3$ , em presença de luz, reage preferencialmente com os cloretos livres (presentes na região contaminada pelos cloretos) para formar um precipitado branco de cloreto de prata ( $\text{AgCl}$ ) e, em região isenta de cloretos, reage com os íons  $\text{OH}^-$  formando um precipitado marrom de óxido de prata ( $\text{AgO}$ ). Desse modo, a profundidade de cloretos é claramente indicada pela mudança de cor. (OTSUKI, NAGATAKI e NAKASHITA, 1992).



Figura 4.6 – Corpo de prova do ensaio ASTM C1202:2005 após a aspersão da solução de nitrato de prata.

#### 4.6.1.5 Resistência à compressão

Para o ensaio de resistência à compressão axial, foram rompidos 4 corpos de prova cilíndricos de dimensões 10x20cm para cada idade de cura (7, 28, 91 e 182 dias) e traço. Os ensaios foram realizados de acordo com a NBR 5738:2003 e 5739:2007 e capeados com fina camada de enxofre.

A resistência final adotada, para cada mistura e idade, foi a média aritmética dos resultados, quando o desvio padrão mostrou-se menor do que 6%. Optou-se pelo maior dos quatro valores, quando o desvio padrão foi superior a este percentual.

#### 4.6.2 Ensaio realizados na pasta

##### 4.6.2.1 Condutividade elétrica da solução aquosa dos poros

Para o ensaio em pasta foram moldados corpos de prova cilíndricos de  $\Phi 4 \times 8$  cm de pastas. Nas idades de ensaio, os corpos de prova foram retirados da câmara úmida, onde estavam imersos em água com cal, lavados para retirar resquícios da cal, secos e moídos. O pó obtido foi peneirado na peneira de #100, e a fração passante foi misturada em igual quantidade de água destilada deionizada (proporção 1:1). Ambos foram agitados em um agitador magnético por 30 minutos, tempo necessário para a estabilização do pH. Após isso, foi determinada a condutividade elétrica da solução dos poros, da mesma forma que em 4.6.1.2.

## **5 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1 Introdução**

O presente capítulo reúne os resultados dos ensaios de resistividade elétrica aparente, de condutividade elétrica específica, de absorção capilar, de resistência à penetração de cloretos ASTM C1202:2005, e de resistência à compressão.

### **5.2 Análise dos resultados de resistência à compressão axial**

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 7, 28, 91 e 182 dias para as misturas investigadas são apresentados na Tabela 5.1.

Já a Tabela 5.2 apresenta os resultados obtidos por Pedrozo (2008), uma vez que os resultados obtidos nesta pesquisa, para o ensaio de resistência à compressão, serão comparados aos obtidos pelo autor, como mostra a Figura 5.1.

Como esperado, todas as misturas investigadas apresentaram um aumento em sua resistência à compressão axial com a diminuição da relação água/aglomerante e com o aumento do grau de hidratação.

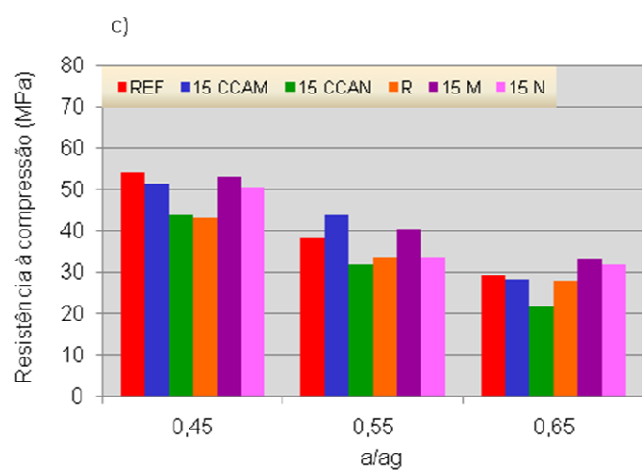
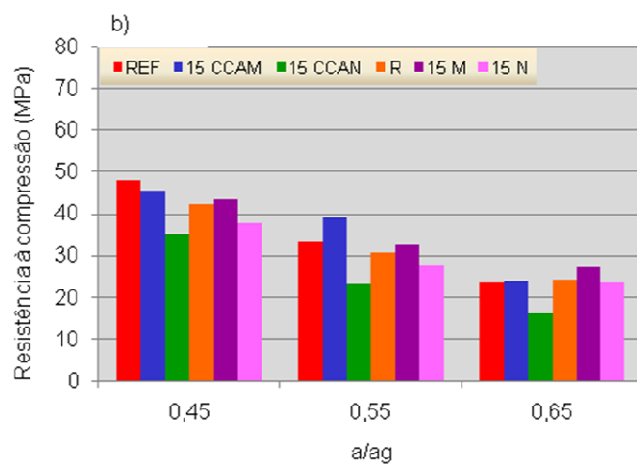
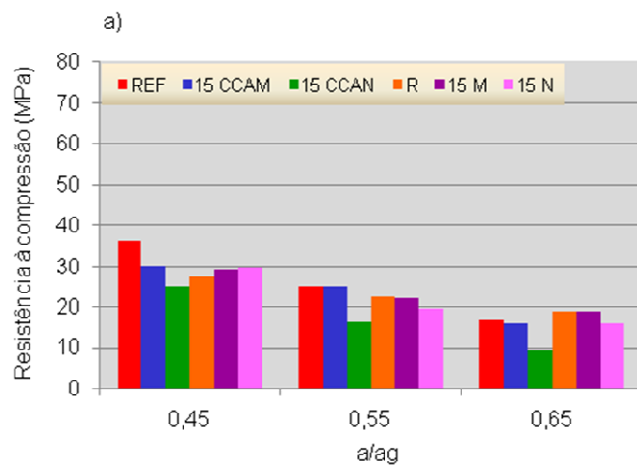
Tabela 5.1 - Resultados de resistência à compressão

Mistura	a/ag	Resistência à compressão (MPa)			
		7	28	91	182
REF	0,45	36,3	48,0	54,0	56
	0,55	25,0	33,3	38,3	42
	0,65	17,0	23,8	29,3	31,5
15 CCAM	0,45	30,0	45,3	51,3	57,5
	0,55	25,0	39,0	43,7	48
	0,65	16,0	24,0	28,3	34
15 CCAN	0,45	25,0	35,3	43,7	49,0
	0,55	16,3	23,3	31,8	40,0
	0,65	9,3	16,3	21,7	28,5

Tabela 5.2 - Resultados de resistência à compressão obtidos por Pedrozo (2008)

Mistura	a/ag	Resistência à compressão (MPa)		
		7	28	91
R	0,45	27,4	42,2	43
	0,55	22,6	30,6	33,6
	0,65	18,8	24,3	28
15 M	0,45	29,2	43,6	53,1
	0,55	22,1	32,6	40,4
	0,65	18,9	27,2	33,4
15 N	0,45	29,8	37,7	50,5
	0,55	19,4	27,5	33,8
	0,65	16,1	23,6	31,9





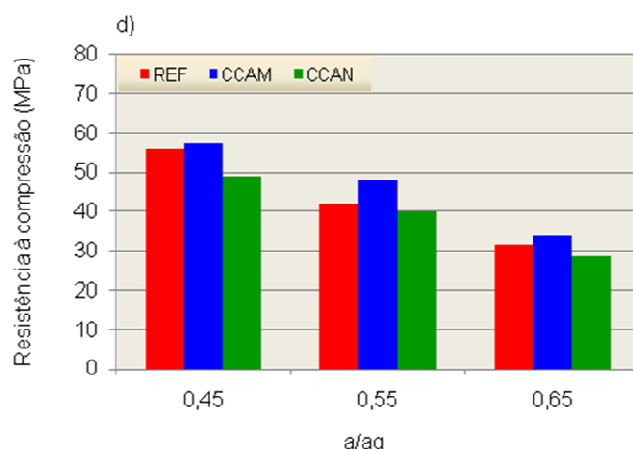


Figura 5.1 – Resistência à compressão versus relação a/ag, aos a) 7 dias, b) 28 dias, c) 91 dias e d) 182 dias

Constata-se, a partir da observação das tabelas 5.1 e 5.2 e da figura 5.1, que a mistura binária REF apresentou resistência ligeiramente inferior a R, somente aos 7 e 28 dias, para a relação a/ag 0,65. Nas demais idades e relações a/ag estudadas, REF mostrou-se superior a R.

A mistura ternária 15 CCAM apresentou resistências muito próximas as da mistura REF. Isso revela que a moagem prévia da cinza de casca de arroz foi decisiva para o aumento da resistência à compressão, devido à menor dimensão das partículas, o que favoreceu a nucleação de compostos hidratados.

Observa-se que a mistura 15 CCAM apresentou resistências menores que a correspondente binária 15M, investigada por Pedrozo (2008), para a relação a/ag 0,65 aos 7, 28 e 91 dias e, aos 91 dias, para a relação a/ag 0,45. Nas demais relações a/ag e idades apresentou resistências superiores a mistura 15 M.

A mistura ternária 15 CCAN e a binária 15 N apresentaram resistências inferiores a REF e R, com exceção da mistura 15 N que, aos 91 dias, com relação a/ag 0,65, superou a mistura REF em 9%. A mistura 15 N mostrou-se superior a 15 CCAN em todas as relações a/ag e idades estudadas.

Nas misturas ternárias, compostas com cinza de casca de arroz moída, observa-se crescimento médio da resistência à compressão dos 7 para os 28 dias de 75% contra 101% para a cinza de casca de arroz ao natural. Aos 182 dias, a mistura 15 CCAM superou a mistura de REF. A mistura CCAN apresentou

resistências à compressão inferiores às misturas CCAM e REF, em todas as idades estudadas. Porém, aos 182 dias, as resistências de CCAN e REF aproximaram-se.

As resistências obtidas aos 7, 28 e 91 dias pela mistura com CCA moída não superaram, ou mantiveram-se muito próximas, àquelas alcançadas pelo concreto de referência. O mesmo foi observado por Ismail e Waliuddin (1996), que estudaram o efeito da cinza de casca de arroz em concretos de alta resistência. Utilizaram cinzas de casca de arroz com finuras diferentes, uma passante na peneira #200 e outra na #325, nos teores de substituição de 10%, 20% e 30%. As relações a/ag das misturas com CCA variaram de 0,30 a 0,36 (o teor de aditivo plastificante foi mantido constante, variando apenas a relação a/ag para se obter abatimentos semelhantes) e a da mistura de referência foi de 0,24. As amostras foram submetidas à cura úmida e ensaiadas à compressão axial aos 3, 7, 28 e 150 dias. Os autores concluíram que o teor ideal de substituição do cimento por CCA encontra-se entre 10% e 20%.

O contrário foi observado por Saraswathy e Song (2007), que investigaram misturas com 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% de CCA, com relação a/ag igual a 0,53. Em todas as idades de ensaio (7, 14 e 28 dias) a mistura com 15% CCA obteve resistência à compressão superior a encontrada para a mistura de referência.

Da mesma forma, Ganesan, Rajagopal e Thangavel (2008) estudaram misturas com teores de CCA de 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% e 35%, relação a/ag igual a 0,53. Para todas as idades de ensaio (1, 3, 7 e 28 dias) a mistura com 15% CCA obteve resistência à compressão maior do que a encontrada para a mistura de referência. Este comportamento inverteu-se a partir do teor de substituição de 30% CCA.

Zang e Malhotra (1996) investigaram misturas com 0% e 10% de CCA, e 10% de sílica ativa, relação a/ag igual a 0,40. A 1, 3, 7, 28, 90 e 180 dias, a resistência à compressão do concreto com CCA foi superior a do concreto com 0% de CCA. Feng et al (2004) observaram o mesmo comportamento.

Do mesmo modo, Nehdi, Duquette e Damatty (2003) estudaram três teores de substituição de CCA moída, 7,5%, 10% e 12,5%, e dois teores de substituição de CCA ao natural, 7,5% e 10%. A relação a/ag foi de 0,40. Aos 28 dias todas as misturas obtiveram resistência à compressão superior à mistura de referência, até mesmo as misturas com CCA ao natural, ao contrário do que foi observado na presente pesquisa e no estudo de Pedrozo (2008).

Chindaprasirt e Rukzon (2008) estudaram a resistência de argamassas feitas com misturas ternárias de cimento Portland, cinza de casca de arroz e cinza volante, com relação água/aglomerante = 0,50. Os resultados revelaram que, em idades mais avançadas, misturas ternárias com baixo nível de substituição (10% CCA + 10% CV) dão origem a argamassas com resistências maiores que a mistura com 100% CP. Os autores afirmam que a incorporação da CV produz os efeitos filler e de dispersão e, também, aumenta a nucleação e precipitação das partículas de cimento. Segundo os pesquisadores, nesse nível de substituição do cimento de até 20%, os efeitos filler e de dispersão podem compensar a redução da resistência devido à diminuição do cimento Portland. Asseguram que o uso da CCA também produz o efeito filler devido à menor dimensão de sua partícula. Já o efeito de dispersão não foi relatado para a CCA. No entanto, sua reatividade é alta devido à sua grande área superficial.

Coutinho (2003) pesquisou cinco misturas aglomerantes, sendo uma composta com 100% de cimento CEM tipo II 32,5 (em conformidade com as Normas Européias), uma com sílica ativa em teor de substituição de 10% e outras três com cinza de casca de arroz em teores de substituição de 10%, 15% e 20%. A relação água/aglomerante foi 0,43. Aos 80 dias, os concretos com CCA atingiram resistências maiores que o concreto de referência e o concreto com sílica ativa. O concreto composto com 20% CCA apresentou valor de resistência à compressão 22,5% superior a do concreto de referência.

Sensale (2006) estudou concretos com dois tipos de CCA. Uma CCA residual de uma indústria de moagem, no Uruguai, e outra produzida por queima controlada, dos Estados Unidos. Os teores de substituição foram 0%, 10% e 20%. E relações água/aglomerante iguais a 0,32; 0,40 e 0,50. A CCA residual proporcionou um efeito positivo na resistência à compressão nas primeiras idades, mas a longo prazo, o comportamento da CCA produzida com queima controlada foi mais significativo. Assim, aos 7 e 28 dias, para as relações a/ag 0,32 e 0,40, somente os concretos com 10% de CCA uruguaia superaram a resistência do concreto de referência. Já na idade de 28 dias, para relação a/ag 0,50, os concretos com 20% CCA uruguaia, 10 e 20% CCA americana revelaram uma resistência à compressão superior a do concreto com 100% de cimento. Aos 91 dias, todos os concretos com CCA apresentaram resistência à compressão superior ao concreto sem adição de CCA,

com exceção do concreto com 10% de CCA uruguaia, que apresentou resistência à compressão praticamente igual.

Possan, Venquiaruto e Dal Molin (2007) investigaram a influência do tempo de moagem e o teor de adição de CCA na resistência à compressão do concreto. O tempo de moagem foi de uma hora e quatro horas. Teores de substituição de CCA de 0%, 25% e 50%, com relações a/ag iguais a 0,35; 0,50 e 0,65. Os concretos foram ensaiados aos 91 dias, mostrando que concretos com substituição de 25 e 50% de cimento por CCA, moídos por quatro horas, atingiram praticamente a mesma resistência, que foi maior entre todos os concretos mostrando que em relação à resistência, a moagem da CCA é compensatória.

Ferreira (2003) observou, em todas as idades de ensaio (7, 28, 91 e 182 dias), valores de resistência à compressão de concretos com CCA superiores aos obtidos pelo concreto de referência, concordando com os resultados da presente pesquisa, no que diz respeito ao uso de cinza de casca de arroz moída.

### 5.3 Análise dos resultados da resistividade elétrica aparente

Os resultados de resistividade elétrica aparente do concreto são apresentados na Tabela 5.3 e na Figura 5.2, para as diferentes idades e relações água/aglomerante investigadas.

Tabela 5.3 – Resultados dos ensaios de resistividade elétrica aparente

Mistura	a/ag	Resistividade elétrica aparente ( $\Omega.m$ )						
		Idade (dias)						
		3	7	14	28	56	91	182
REF	0,45	71,2	104,7	111,4	148,2	318,7	375,9	485,5
	0,55	59,7	88,1	93,5	128,1	292,4	350,7	448,7
	0,65	53,8	80,8	82,7	110,7	243,8	294,3	412,7
15 CCAM	0,45	65,7	85,0	124,0	287,2	448,4	778,0	934,6
	0,55	54,1	82,9	99,1	208,3	352,2	763,9	853,4
	0,65	38,9	60,2	86,6	155,2	262,0	436,6	589,9
15 CCAN	0,45	45,2	67,9	76,4	120,3	166,1	180,6	405,0
	0,55	45,4	57,8	66,1	106,7	141,3	158,9	365,6
	0,65	29,6	55,9	62,6	103,2	118,1	126,5	364,7

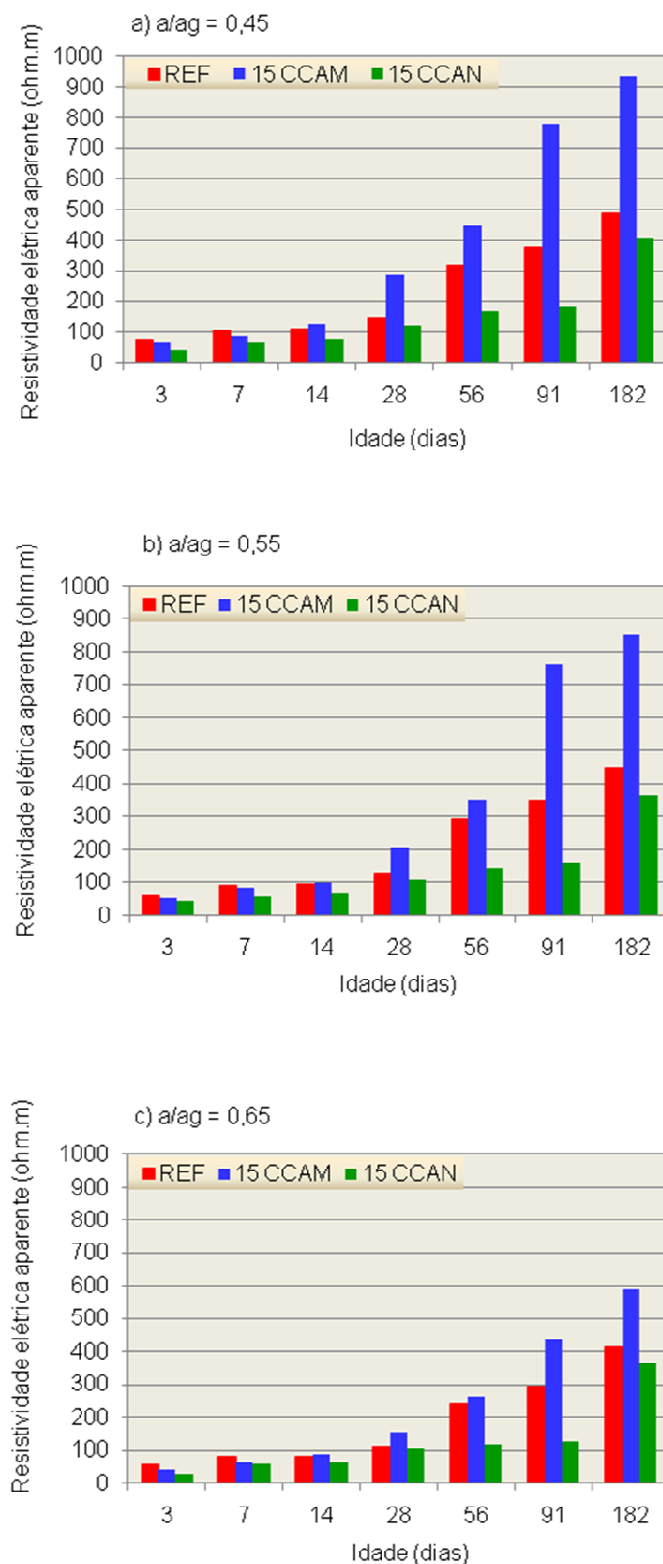


Figura 5.2 – Resistividade elétrica aparente, a)  $a/ag = 0,45$ ; b)  $a/ag = 0,55$  e c)  $a/ag = 0,65$

Analisando os gráficos da Figura 5.2, verifica-se que a idade e a relação  $a/ag$  proporcionaram uma influência muito grande na evolução da resistividade elétrica do concreto. Isto vem confirmar o fato de que a resistividade elétrica do concreto é fortemente influenciada pela composição iônica da solução dos poros e pela continuidade do sistema de poros da pasta endurecida, entre outros fatores. Assim sendo, qualquer fator que tiver influência sobre estas propriedades também interfere na resistividade elétrica.

Comparando as misturas com CCA e a de referência, aos 91 dias, verifica-se que a mistura 15 CCAM obteve resistividade elétrica 107%, 118% e 48% superior a de referência, respectivamente nas relações  $a/ag$  0,45, 0,55 e 0,65, e a mistura 15 CCAN, aos 91 dias, obteve resistividade elétrica inferior ao concreto de referência, em 52%, 55% e 57%, respectivamente nas relações  $a/ag$  0,45, 0,55 e 0,65. Aos 182 dias, a mistura CCAN teve um ganho de resistividade elétrica de 124%, 130% e 188%, respectivamente para as relações  $a/ag$  0,45, 0,55 e 0,65, quase igualando-se à mistura REF.

Analisando a evolução da resistividade elétrica das misturas com o aumento do grau de hidratação, verifica-se, para a relação  $a/ag$  0,45, que aos 91 dias as misturas com 15% de CCA moída e 15% de CCA natural obtiveram valores de resistividade elétrica 1084% e 299,5% maiores do que os valores obtidos aos 3 dias, respectivamente. Para a relação  $a/ag$  0,55, os valores aos 91 dias foram 1312% e 250% maiores do que aos 3 dias e, para a relação  $a/ag$  0,65, os valores aos 91 dias foram 1022% e 327,4% maiores do que os obtidos aos 3 dias. A mistura de referência teve sua resistividade aos 91 dias maior do que aos 3 dias, em 428%, para a relação  $a/ag$  0,45, 487% para a relação  $a/ag$  0,55, 447%, para a relação  $a/ag$  0,65, respectivamente. Esse comportamento demonstra a grande influência do grau de hidratação.

O crescimento da resistividade elétrica da mistura 15 CCAN dos 91 dias para 182 dias, para as três relações  $a/ag$ , foi superior a 100%. O valor alcançado aos 182 dias foi superior àquele da mistura de referência aos 91 dias. Comparando o crescimento dessas duas misturas, é muito provável que em idades mais avançadas (365 dias) a mistura 15 CCAN apresente valor de resistividade elétrica superior à da mistura de referência.

A Tabela 5.4 apresenta os índices de resistividade elétrica das misturas nas idades de 28 e 91 dias. Esses índices correspondem à relação entre a resistividade

elétrica das misturas com adição mineral e a da mistura de referência, em igual relação água/aglomerante e idade.

Tabela 5.4 – Índice de resistividade elétrica das misturas investigadas

Mistura	a/ag	Resist. elét. aparente – $\rho$ ( $\Omega.m$ )		Ip 28	Ip 91
		Idade (dias)			
		28	91		
REF	0,45	148,2	375,9	1,00	1,00
	0,55	128,1	350,7	1,00	1,00
	0,65	110,7	294,3	1,00	1,00
15 CCAM	0,45	287,2	778,0	1,94	2,10
	0,55	208,3	763,9	1,63	2,20
	0,65	155,2	436,6	1,40	1,48
15 CCAN	0,45	120,3	180,6	0,81	0,48
	0,55	106,7	158,9	0,83	0,45
	0,65	103,2	126,5	0,93	0,43

$\rho$  = resistividade elétrica aparente; Ip = índice de  $\rho$ .

O concreto com CCA moída mostrou superioridade, aos 91 dias, em relação ao concreto de referência, para todas as relações água/aglomerante. Isto é devido principalmente à alteração na estrutura dos poros (refinamento dos poros) e na composição da solução aquosa dos mesmos. Já o concreto com CCA natural apresentou comportamento inverso, ou seja, mostrou-se inferior ao concreto de referência para todas as relações a/ag.

O risco de corrosão das armaduras em função da resistividade elétrica do concreto segundo os critérios do CEB 192 é mostrado na tabela 2.1, item 2.4.1, página 42. Os riscos de corrosão para as misturas avaliadas nesta pesquisa segundo os critérios do CEB 192 são dados na tabela 5.5.

Analisando a tabela 5.5 observa-se a capacidade da cinza de casca de arroz moída de diminuir o risco de corrosão das armaduras em função da elevada resistividade elétrica obtida. A mistura 15 CCAM, aos 28 dias, já apresenta risco de



corrosão desprezível. Por sua vez, a mistura 15 CCAN, só vai apresentar risco de corrosão desprezível aos 182 dias, e REF aos 56 dias.

Tabela 5.5 - Probabilidade de corrosão para as misturas avaliadas segundo o critério do CEB 192

Mistura	a/ag	Idade (dias)						
		3	7	14	28	56	91	182
REF	0,45	A	B	B	B	D	D	D
	0,55	A	A	A	B	D	D	D
	0,65	A	A	A	B	D	D	D
15 CCAM	0,45	A	A	B	D	D	D	D
	0,55	A	A	A	D	D	D	D
	0,65	MA	A	A	B	D	D	D
15 CCAN	0,45	MA	A	A	B	B	B	D
	0,55	MA	A	A	B	B	B	D
	0,65	MA	A	A	B	B	B	D

D – desprezível      B – baixa      A- alta      MA – muito alta

A fim de comparar o desempenho quanto à resistividade elétrica de concretos com CCA, os resultados encontrados no presente estudo foram confrontados com os resultados de resistividade elétrica obtidos por Hoppe (2005), que investigou misturas com relações água/aglomerante 0,35, 0,50 e 0,65 com teores de substituição em massa de 10%, 20% e 30% de CCA. Para comparar com os resultados, o autor investigou ainda misturas com 50% de escória de alto forno, 35% de cinza volante e uma mistura de referência com 100% de cimento (CP V – ARI).

A tabela 5.6 e a Figura 5.3 mostram os valores obtidos por Hoppe (2005) para as relações a/ag avaliadas nesta pesquisa.

Tabela 5.6 – Resultados dos ensaios de resistividade elétrica aparente, obtidos por Hoppe (2005) para as relações a/ag avaliadas nesta pesquisa

Mistura	a/ag	Resistividade elétrica aparente ( $\Omega.m$ )				
		Idade (dias)				
		3	7	14	28	91
R	0,45	90,4	120,8	140,3	215,4	214,3
	0,55	70,3	100,9	115,1	164,3	158,6
	0,65	54,7	84,3	94,5	125,4	117,4
10A	0,45	87,7	126,7	157,5	248,6	346,0
	0,55	71,0	102,8	126,8	195,0	277,2
	0,65	57,5	83,4	102,1	152,9	221,9
20A	0,45	82,6	121,0	178,5	246,9	651,7
	0,55	68,5	98,9	150,1	207,6	531,0
	0,65	56,8	80,9	126,2	174,6	432,7

Aos 3, 7, 14 e 28 dias, a resistividade elétrica da mistura R foi superior à da mistura REF. Porém, na idade de 3 dias, para a relação a/ag 0,65, os valores de resistividade obtidos por R e REF foram bastante próximos.

Da mesma forma, até os 14 dias, a mistura 10 A apresentou valores de resistividade elétrica superiores aos da mistura 15 CCAM. Aos 91 dias, os resultados da mistura 15 CCAM duplicaram em relação aos da mistura 10 A. A mistura 20 A foi superior à 15 CCAM somente até os 14 dias. Aos 28 dias, para a relação a/ag 0,55 os valores de resistividade elétrica encontrados foram praticamente os mesmos. Isso revela que a partir dos 91 dias, o teor de 15% de CCAM mostrou-se mais benéfico para o concreto, em relação à resistividade elétrica, do que 10% e 20%.

Já a mistura 15 CCAN apresentou valores de resistividade elétrica inferiores aos de todas as misturas estudadas por Hoppe (2005).

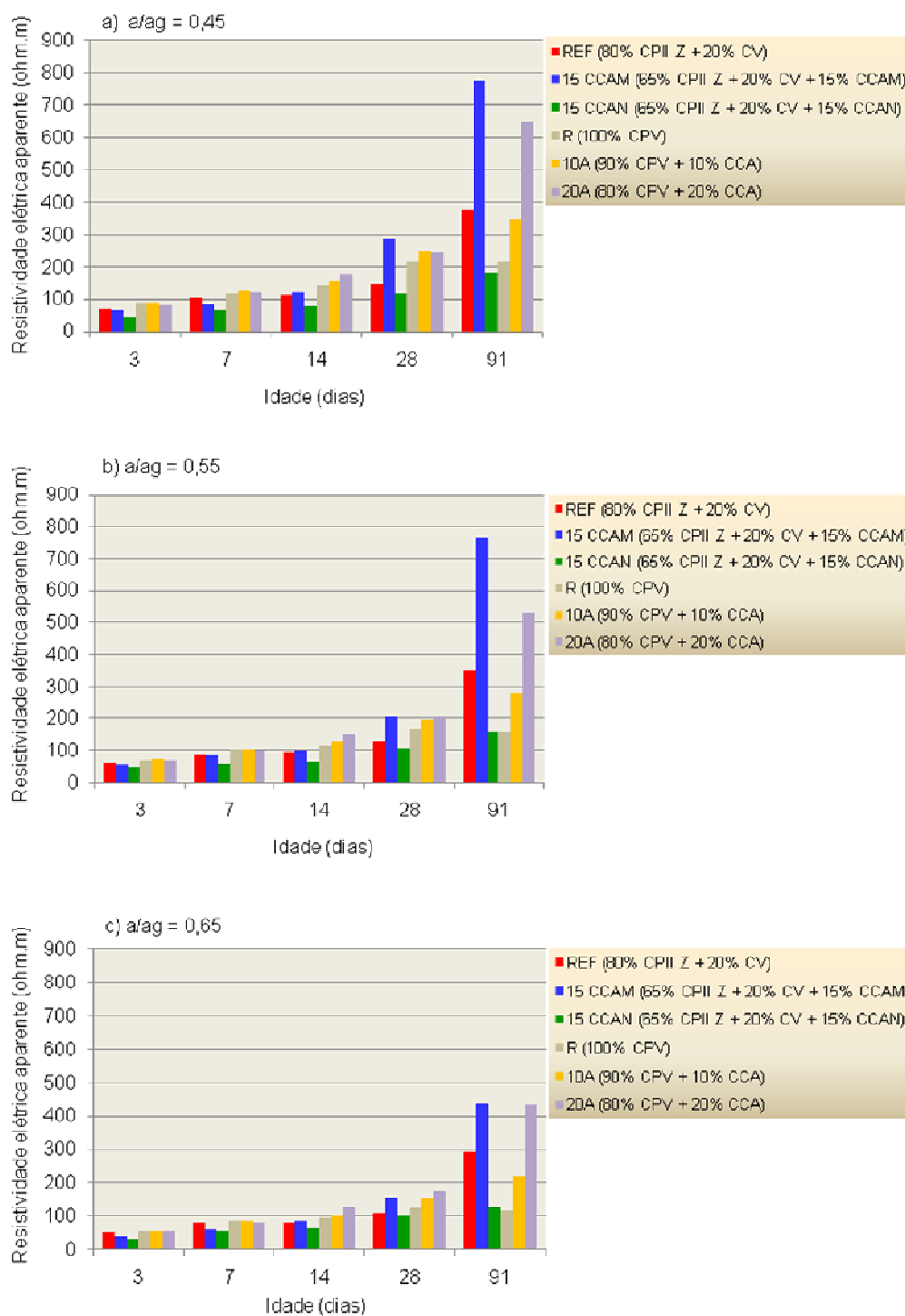


Figura 5.3 – Resultados dos ensaios de resistividade elétrica aparente comparados aos dados obtidos por Hoppe (2005), a)  $a/ag = 0,45$ ; b)  $a/ag = 0,55$  e c)  $a/ag = 0,65$

### 5.3.1 Avaliação da resistividade elétrica estabelecendo níveis de resistência à compressão

Fixar um valor de resistência à compressão no projeto de estruturas de concreto pode não ser suficiente para alcançar os patamares de durabilidade exigidos. Assim, na presente pesquisa, são estabelecidos três níveis de resistência à compressão aos 91 dias, 30 MPa, 40 MPa e 50 MPa, e são avaliadas as relações água/aglomerante necessárias para a obtenção de tais níveis e a resistividade elétrica correspondente para todas as misturas investigadas.

Os coeficientes das equações exponenciais e os respectivos coeficientes de determinação apresentados na tabela 5.7 foram obtidos a partir dos valores de resistência à compressão e resistividade elétrica aparente aos 91 dias para as três relações a/ag.

A tabela 5.8 apresenta as relações a/ag obtidas para os valores de resistência à compressão de 30 MPa, 40 MPa e 50 MPa, aos 91 dias. Na mesma tabela são apresentados os valores de resistividade elétrica correspondentes e o risco de corrosão das armaduras segundo os critérios do CEB 192 apresentados na tabela 5.3. Esses resultados são apresentados em forma de gráfico na Figura 5.4.

Tabela 5.7 - Coeficientes das equações exponenciais ( $f_c = A/B^x$ ) obtidos para a idade de 91 dias

Mistura	Coeficientes	Resistência à compressão	Resistividade elétrica
REF	A	211,03	663,55
	B	21,26	3,40
	R <sup>2</sup>	0,99	0,98
15 CCAM	A	204,74	3123,47
	B	19,57	17,97
	R <sup>2</sup>	0,98	0,88
15 CCAN	A	213,39	409,14
	B	33,12	5,93
	R <sup>2</sup>	1,00	0,99

Tabela 5.8 – Relações água/aglomerante e resistividades elétricas obtidas, aos 91 dias

Mistura	fc = 30MPa			fc = 40MPa			fc = 50MPa		
	a/ag	$\rho$ ( $\Omega.m$ )	Risco	a/ag	$\rho$ ( $\Omega.m$ )	Risco	a/ag	$\rho$ ( $\Omega.m$ )	Risco
REF	0,64	303,23	D	0,54	342,70	D	0,47	373,35	D
15 CCAM	0,65	477,79	D	0,55	637,80	D	0,47	803,60	D
15 CCAN	0,56	150,98	B	0,48	174,09	B	0,41	197,19	B

D – desprezível      B – baixa      A- alta      MA – muito alta

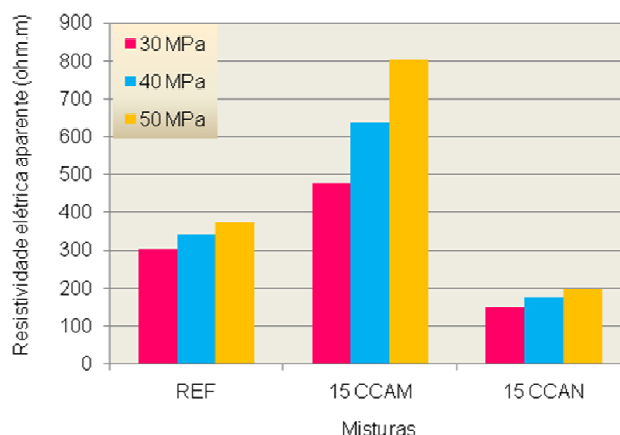


Figura 5.4 – Resistividade elétrica aparente correspondente às resistências à compressão axial de 30MPa, 40MPa e 50MPa, aos 91 dias

A análise das resistividades elétricas obtidas permite identificar que para o nível de resistência à compressão de 30 MPa as misturas REF e 15 CCAM atenderiam o limite de 0,65 para a relação água/aglomerante em ambiente rural ou submerso (agressividade fraca, CAA I), estabelecidos na NBR 12655:2006. Já a mistura 15 CCAN atenderia o limite de 0,60 para a relação água/aglomerante em ambiente urbano (agressividade moderada, CAA II). Para o nível de resistência de 40 MPa todas as misturas atenderiam o limite para atmosfera marinha e industrial (agressividade forte, CAA III), com relação água/aglomerante máxima igual a 0,55. Já para o nível de resistência de 50 MPa as misturas REF e 15 CCAM atenderiam o limite para atmosfera marinha e industrial (agressividade forte, CAA III), e a mistura 15 CCAN atenderia o limite para atmosfera industrial e respingos de maré

(agressividade muito forte, CAA IV), com relação água/aglomerante máxima igual a 0,45.

Quando comparado ao concreto de referência a substituição parcial do cimento por 15% de cinza de casca de arroz moída promoveu um aumento significativo na resistividade elétrica.

#### 5.4 Análise dos resultados de condutividade elétrica específica

Nas tabelas 5.9 e 5.10 são apresentados os resultados de condutividade elétrica específica da solução dos poros, obtidos de amostras de pastas e de concretos das misturas aglomerantes investigadas, nas três relações a/ag e nas idades de 7, 28, 56, 91 e 182 dias.

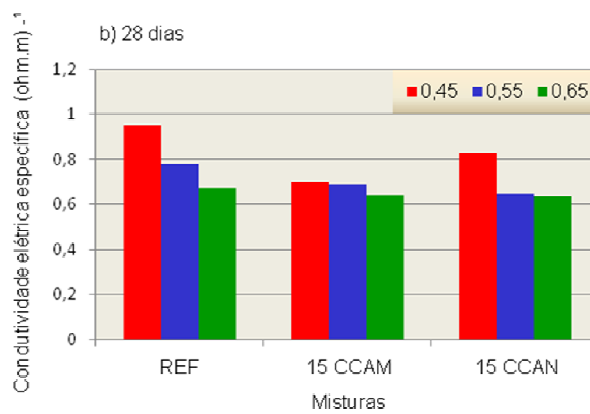
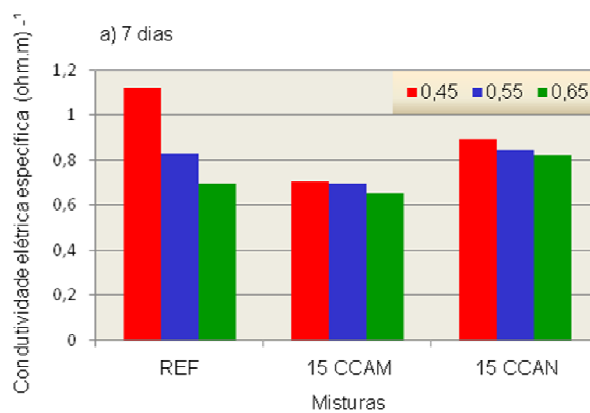
As Figuras 5.5 e 5.6 apresentam, respectivamente, a condutividade elétrica específica da pasta e do concreto, para todas as misturas e idades investigadas.

Tabela 5.9 - Condutividade elétrica específica para a solução dos poros da pasta

Mistura	a/ag	Condutividade elétrica específica ( $\text{ohm}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ )				
		Idade (dias)				
		7	28	56	91	182
REF	0,45	1,12	0,951	0,876	0,862	0,866
	0,55	0,828	0,780	0,707	0,673	0,717
	0,65	0,693	0,676	0,617	0,625	0,653
15 CCAM	0,45	0,706	0,699	0,690	0,629	0,626
	0,55	0,697	0,689	0,666	0,625	0,553
	0,65	0,654	0,644	0,638	0,582	0,437
15 CCAN	0,45	0,895	0,830	0,762	0,691	0,463
	0,55	0,843	0,648	0,749	0,676	0,718
	0,65	0,824	0,635	0,675	0,648	0,678

Tabela 5.10 - Condutividade elétrica específica da solução dos poros do concreto

Mistura	a/ag	Condutividade elétrica específica ( $\text{ohm}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ )				
		Idade (dias)				
		7	28	56	91	182
REF	0,45	0,717	0,687	0,663	0,629	0,638
	0,55	0,682	0,632	0,653	0,608	0,573
	0,65	0,634	0,599	0,631	0,588	0,551
15 CCAM	0,45	0,674	0,685	0,627	0,570	0,547
	0,55	0,648	0,651	0,626	0,547	0,482
	0,65	0,493	0,639	0,569	0,526	0,425
15 CCAN	0,45	0,676	0,634	0,618	0,537	0,543
	0,55	0,669	0,626	0,582	0,506	0,518
	0,65	0,599	0,595	0,564	0,484	0,466



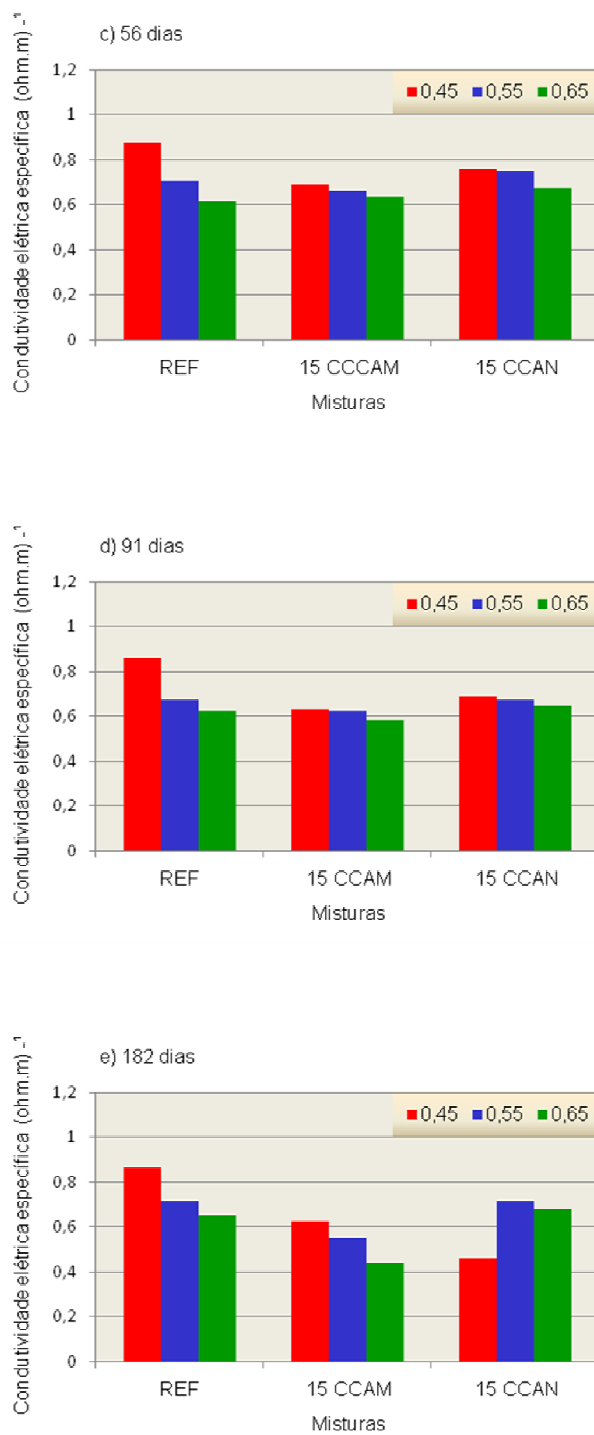
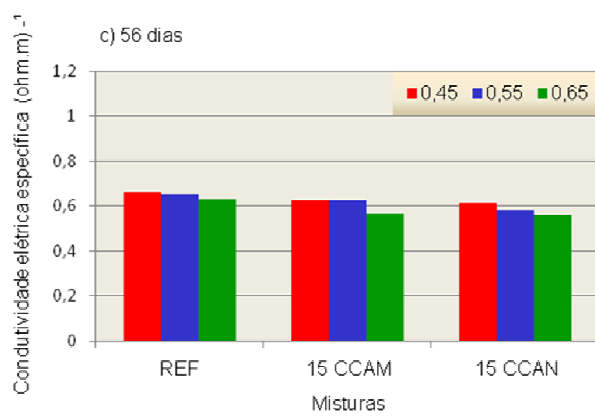
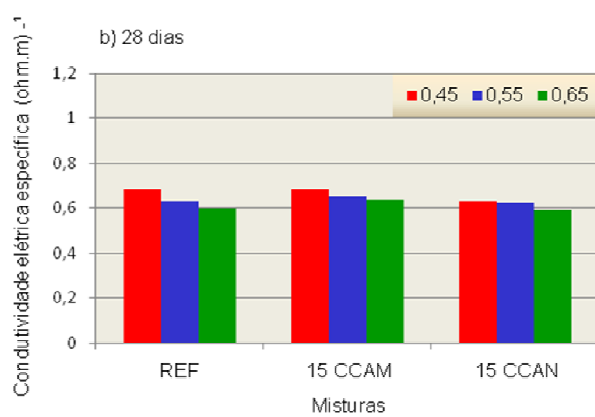
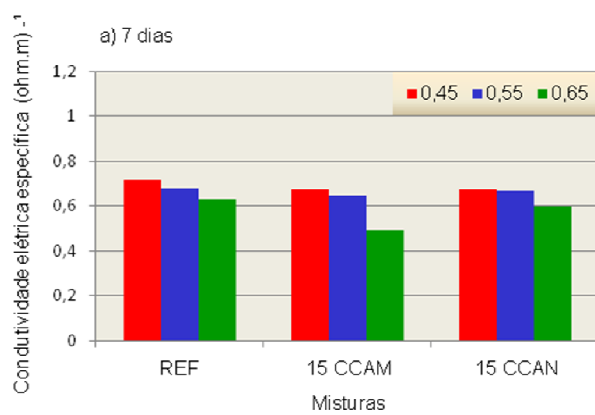


Figura 5.5 – Condutividade elétrica específica da pasta, a) 7 dias; b) 28 dias; c) 56 dias; d) 91 dias e e) 182 dias





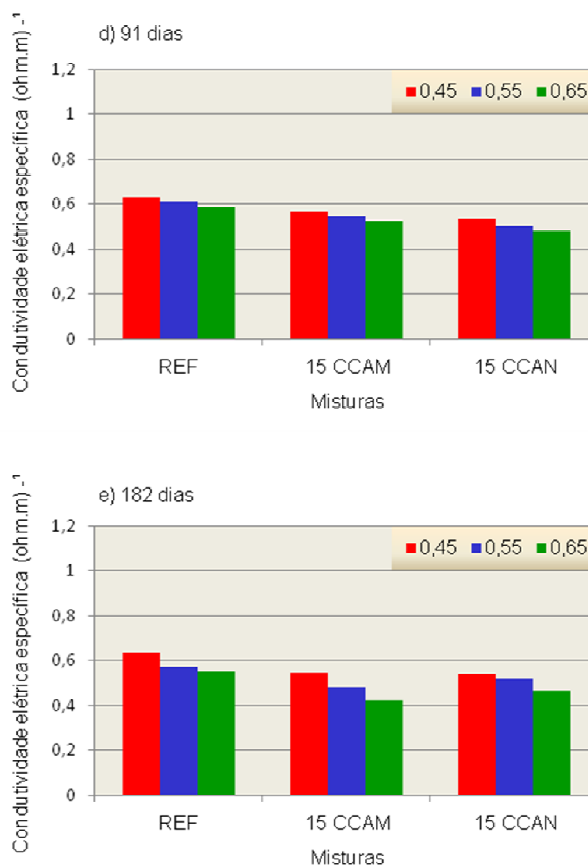


Figura 5.6 – Condutividade elétrica específica do concreto, a) 7 dias; b) 28 dias; c) 56 dias; d) 91 dias e e) 182 dias

Observa-se que todas as misturas compostas com CCA apresentaram menores valores de condutividade elétrica do que a mistura de referência. Este comportamento também foi verificado por outros pesquisadores que estudaram concretos com o uso de adições minerais. (SHI, STEGEMANN e CALDWELL, 1998; DAL RI, 2002; HOPPE, 2005; PEDROZO, 2008).

Os resultados mostram que a condutividade elétrica da solução decresce com o avanço da idade, tanto no concreto quanto na pasta. No caso da influência que as diferentes relações  $a/ag$  exerceram na condutividade, observa-se que à medida que a relação  $a/ag$  aumentou, houve, também, uma diminuição na condutividade elétrica específica. Este fenômeno pode ser explicado pelo fato de que uma maior relação  $a/ag$ , diminui a concentração de íons devido ao efeito de diluição, causando, portanto, uma diminuição da condutividade elétrica da solução dos poros.

A substituição parcial do cimento por CCA, misturas 15 CCAM e 15 CCAN resultou em diminuição nos valores de condutividade elétrica específica em relação ao traço REF. O menor valor de condutividade elétrica observado para a pasta foi aos 182 dias, para a mistura 15 CCAM, relação a/ag 0,65, onde o valor alcançado foi  $0,437 \text{ (ohm.m)}^{-1}$ . Para o concreto, a menor condutividade elétrica observada também foi aos 182 dias, para a mistura 15 CCAM, relação a/ag 0,65, uma vez que foi igual a  $0,425 \text{ (ohm.m)}^{-1}$ .

Desse modo, a utilização da CCA, ao natural ou moída, e a relação a/ag, influenciam na condutividade elétrica da solução dos poros.

### 5.5 Análise dos resultados de absorção capilar

Na tabela 5.11 são apresentados os valores de absorção capilar, aos 91 dias, após 3h, 6h, 24h, 48h e 72h, bem como a altura média que a água atingiu depois de 72 horas de ensaio (hm). Os valores médios de absorção capilar para cada tipo de mistura, aos 91 dias, em função da relação a/ag são mostrados na Figura 5.7.

Tabela 5.11 – Resultados de absorção capilar, aos 91 dias

Mistura	a/ag	Absorção de água por capilaridade (g/cm <sup>2</sup> )					hm (cm)
		3h	6h	24h	48h	72h	
REF	0,45	0,166	0,226	0,385	0,494	0,572	8,20
	0,55	0,185	0,236	0,415	0,555	0,622	7,22
	0,65	0,204	0,283	0,521	0,698	0,826	7,35
15 CCAM	0,45	0,166	0,191	0,321	0,398	0,441	10,19
	0,55	0,160	0,204	0,340	0,423	0,470	9,98
	0,65	0,158	0,211	0,381	0,494	0,573	10,59
15 CCAN	0,45	0,162	0,215	0,347	0,438	0,502	12,09
	0,55	0,155	0,211	0,385	0,502	0,577	8,13
	0,65	0,192	0,257	0,445	0,577	0,675	6,65

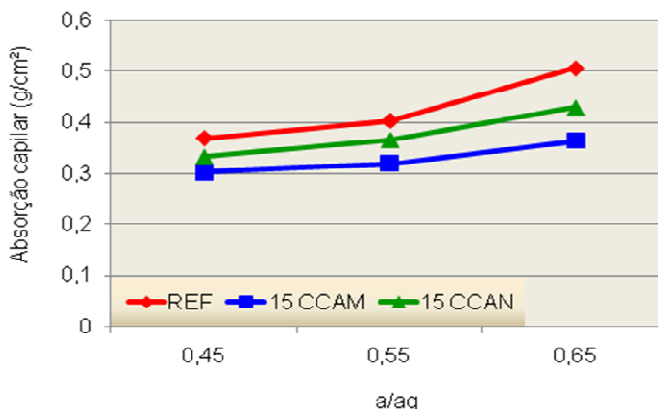


Figura 5.7 – Valores médios de absorção capilar para cada mistura, em função da relação a/ag, aos 91 dias

Observa-se que ocorre o aumento da absorção capilar à medida que cresce a relação a/ag das misturas investigadas.

O menor valor de absorção capilar, após 72h, foi de 0,441 g/cm<sup>2</sup> obtido pela mistura 15 CCAM. Já o maior valor foi de 0,826 g/cm<sup>2</sup> alcançado pela mistura REF. A água atingiu a maior altura no concreto com cinza de casca de arroz natural. Os resultados indicam que a adição de cinza de casca de arroz moída reduziu significativamente a absorção de água quando comparada com o concreto com cinza de casca de arroz ao natural e o concreto de referência.

Neville (1997) diz que a tendência de crescimento dos valores de absorção capilar com o aumento da relação a/ag pode ser atribuída a uma porosidade muito mais aberta e interconectada para os concretos com relação a/ag elevada.

Já com relação à redução da absorção capilar com a redução da relação a/ag, Helene (1993) afirma que concretos de reduzida relação a/c apresentam capilares de menor diâmetro, ao mesmo tempo em que eles são muito menos intercomunicáveis, resultando disso menores alturas de sucção e menores volumes absorvidos.

Ainda segundo Helene (1993), quanto menor o diâmetro dos poros capilares, maior a pressão capilar e, conseqüentemente, maior a penetração de água no concreto. Assim, quanto maior o diâmetro dos poros capilares, menor a altura de ascensão capilar da água, porém a quantidade total de água absorvida será maior, como observado nesta pesquisa.

Saraswathy e Song (2007) investigaram misturas com 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% de substituição do cimento Portland por cinza de casca de arroz, e também observaram que o coeficiente de absorção de água nos concretos com cinza de casca de arroz foi menor quando comparado ao concreto de referência.

Coutinho (2003) observou que os valores de sortividade<sup>1</sup> de concretos com 10%, 15% e 20% de CCA são menores do que os valores encontrados para o concreto de referência.

Hoppe Filho (2002) investigou a absorção capilar de concretos seguindo as recomendações da Norma RILEM TC 116-PCD (RILEM, 1999), e observou que a absorção capilar aos 91 dias para concretos com 50% de cinza volante, após 24h de ensaio, foi igual a 0,283 g/cm<sup>2</sup> e 0,331 g/cm<sup>2</sup>, respectivamente para as relações a/ag 0,45 e 0,55, ou seja, 26% e 20% menor do que para concreto de referência do presente estudo (20% de cinza volante). Por sua vez, para concretos com 20% de cinza de casca de arroz, o autor encontrou valores de absorção capilar iguais 0,378 g/cm<sup>2</sup> e 0,519 g/cm<sup>2</sup>, respectivamente para as relações a/ag 0,45 e 0,55, o que significa 17% e 53% maior do que o encontrado no concreto com cinza de casca de arroz moída e, também, 9% e 35% superior ao observado no concreto com cinza de casca de arroz natural desta pesquisa.

## **5.6 Análise dos resultados do ensaio acelerado de penetração de cloretos (ASTM C1202:2005)**

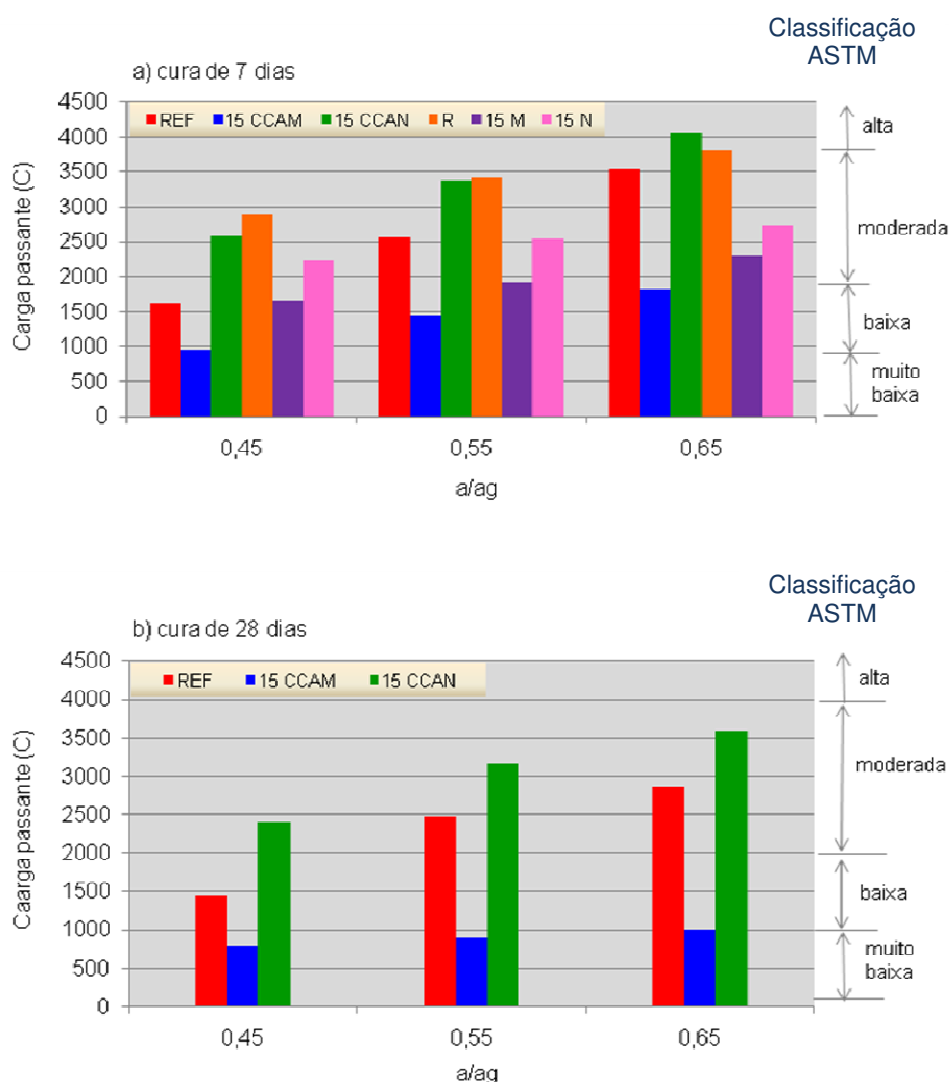
A Figura 5.8 mostra a carga total passante para cada mistura realizada para as diferentes relações a/ag e períodos de cura estudados, junto com as faixas de classificação ASTM C1202:2005. Os resultados aos 91 dias com período de cura igual a 7 dias foram comparados com os dados obtidos por Pedrozo (2008), que investigou cinco misturas aglomerantes, uma composta com 100% de cimento Portland (CPII F-32) e outras quatro com CCA em teores de substituição de 15% e

---

<sup>1</sup> A sortividade é o gradiente da curva que relaciona a absorção capilar e a raiz quadrada do tempo. Desta forma, em uma mesma data, a sortividade e a absorção capilar são diretamente proporcionais (NEVILLE, 1997).

25%, ao natural e moída. Utilizou os mesmos agregados, a mesma cinza de casca de arroz empregada no presente estudo e adotou as mesmas relações  $a/ag$  0,45; 0,55 e 0,65.

Na Tabela 5.12 são apresentados os valores de carga passante obtidos de acordo com o método de ensaio ASTM C1202:2005, assim como os valores dos coeficientes  $a$ ,  $b$  e  $(r^2)$  da equação  $C=a/b^x$ , que correlacionam os valores de carga passante e a relação  $a/ag$  dos concretos ensaiados.



Nota: R, 15 M e 15 N são os valores de Pedrozo (2008). REF, 15 CCAM e 15 CCAN são os valores obtidos nesta pesquisa.

Figura 5.8 Carga total passante em função das relações  $a/ag$ , para dois períodos de cura a) 7 dias e b) 28 dias – aos 91 dias

Tabela 5.12 – Resultados do ensaio acelerado de penetração de cloretos aos 91 dias (ASTM C1202:2005)

Mistura	a/ag	Carga Total Passante (Coulombs)							
		Cura	Coeficientes			Cura	Coeficientes		
		7 dias	A	B	R <sup>2</sup>	28 dias	A	B	R <sup>2</sup>
REF	0,45	1617				1446			
	0,55	2561	285,38	0,020	1,00	2470	329,44	0,032	0,97
	0,65	3531				2872			
15 CCAM	0,45	957				795			
	0,55	1450	233,16	0,040	1,00	894	469,84	0,310	1,00
	0,65	1817				1004			
15 CCAN	0,45	2578				2400			
	0,55	3372	937,34	0,102	1,00	3169	989,62	0,132	0,99
	0,65	4066				3599			
R	0,45	2885				-			
	0,55	3421	-	0,249	0,99	-	-	-	-
	0,65	3809				-			
15 M	0,45	1654				-			
	0,55	1915	777,97	0,190	0,99	-	-	-	-
	0,65	2306				-			
15 N	0,45	2231				-			
	0,55	2533	-	0,354	0,99	-	-	-	-
	0,65	2746				-			

Nota: R, 15 M e 15 N são os valores de Pedrozo (2008). REF, 15 CCAM e 15 CCAN são os valores obtidos nesta pesquisa.

Como pode ser observado, independente da relação a/ag e do período de cura adotados, o concreto 15 CCAN apresentou carga total passante (C) superior às misturas 15 CCAM e REF, caracterizando-o como concreto de menor resistência à penetração de cloretos, dentre aqueles testados na presente pesquisa. A mistura de melhor desempenho foi a 15 CCAM.

Já no estudo de Pedrozo (2008), a mistura de referência foi a que apresentou a maior carga passante e, da mesma forma que ocorreu no presente estudo, o concreto de melhor desempenho foi o composto com CCA moída.

As menores cargas passantes, com 7 dias de cura úmida, foram obtidas pela mistura 15 CCAM. Já as maiores cargas passantes, com o mesmo período de cura, foram apresentadas pela mistura R, para as relações a/ag 0,45 e 0,55. A mistura 15 CCAN obteve a maior carga passante para a relação a/ag 0,65.

Observa-se que as diferentes relações a/ag, a utilização de CCA e os diferentes períodos de câmara úmida influenciaram na resistência à penetração de cloretos, o que pode ser expresso pelas diferenças apresentadas nas cargas passantes.

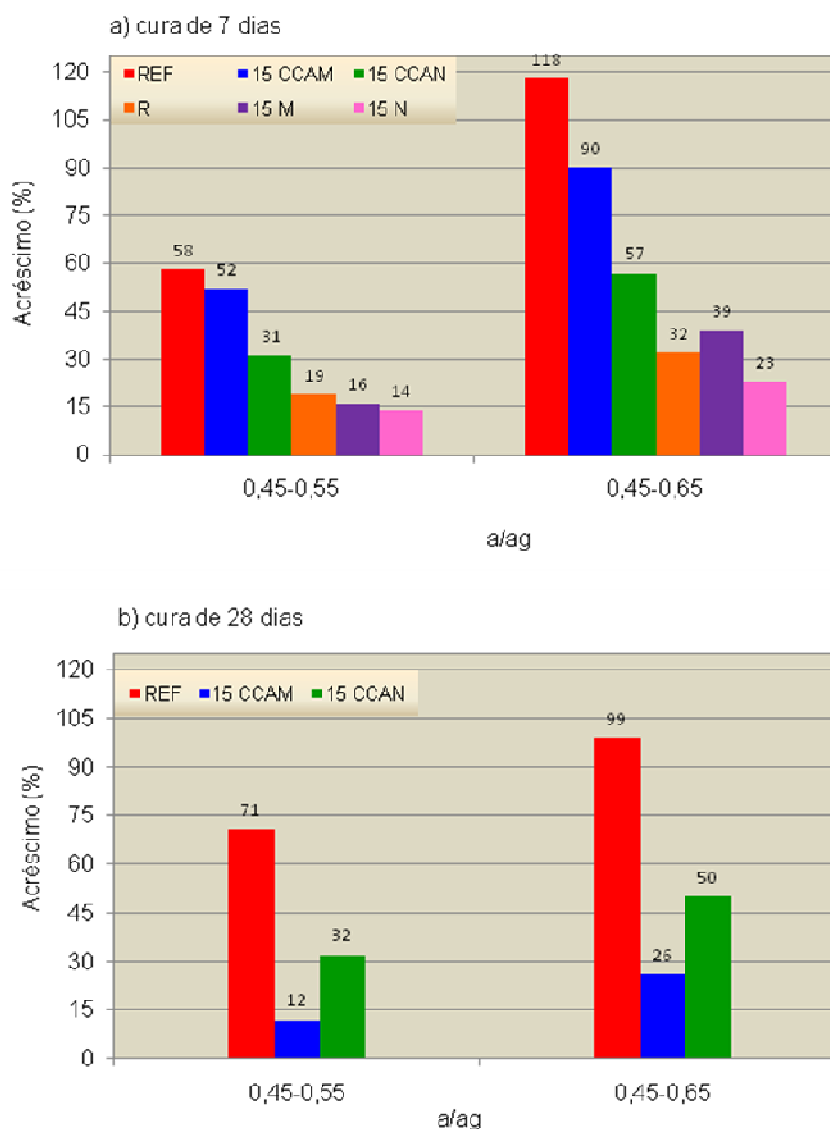
Nos próximos subitens serão realizadas análises sobre a influência que cada um desses fatores exerce na carga passante. Também será feita uma classificação das misturas, segundo a norma ASTM C1202:2005, quanto à penetrabilidade aos íons cloretos e uma verificação da profundidade de penetração de cloretos, pelo método colorimétrico, após o ensaio acelerado.

#### 5.6.1 Influência da relação a/ag

Na figura 5.9 observa-se a influência da relação a/ag na penetração de cloretos das misturas investigadas. O aumento da relação a/ag promoveu a diminuição da resistência à penetração de cloretos em todas as misturas, o qual pode ser observado pelo aumento provocado nas cargas passantes.

Segundo Ngala, Page e Parrott (1995), a relação a/ag é o parâmetro principal que influencia a penetração de cloretos no concreto, devido ao refinamento da porosidade capilar que se obtém com baixas relações a/ag. Nestes concretos, os íons cloreto são obrigados a propagarem-se por caminhos mais tortuosos e desconectos, o que dificulta o seu ingresso para o interior do concreto.





Nota: R, 15 M e 15 N são os valores de Pedrozo (2008). REF, 15 CCAM e 15 CCAN são os valores obtidos nesta pesquisa.

Figura 5.9 - Acréscimo da carga passante versus aumento da relação a/ag, para dois períodos de cura a) 7 dias e b) 28 dias – aos 91 dias

Aos 91 dias, a mistura binária (REF), cura de 7 dias, apresentou o maior acréscimo na carga passante por influência da relação a/ag. Quando a relação a/ag aumentou de 0,45 para 0,55 o acréscimo na carga passante foi de 52%, e quando aumentou de 0,45 para 0,65, esta mistura apresentou acréscimo de 118%.

Na mesma idade, as misturas R e 15 N apresentaram acréscimos de 19% e 14% quando a relação a/ag aumentou de 0,45 para 0,55, e acréscimos de 32% e

23% quando a relação a/ag aumentou de 0,45 para 0,65, representando as menores diferenças na carga passante por influência da relação a/ag, dentre as misturas estudadas.

O acréscimo da carga passante com o aumento da relação a/ag foi observado por outros pesquisadores como Dal Ri (2002), Missau (2004), Saciloto (2005), Schneider (2005), entre outros.

Assim, observa-se que a relação a/ag exerce grande influência na resistência à penetração de cloretos no concreto, sendo a carga total passante elevada na razão direta da quantidade de água da mistura.

#### 5.6.2 Influência da utilização da CCA

As alterações na microestrutura e na composição iônica da solução dos poros, promovidas pelas adições minerais, são os principais parâmetros a influenciar na carga passante (SHI, STEGEMANN e CALDWELL, 1998).

Verifica-se que a utilização da CCA exerce grande influência sobre as cargas passantes das misturas. As misturas ternárias, compostas com CCA moída, apresentaram cargas passantes menores do que as demais misturas. Porém, a mistura 15 CCAN apresentou carga passante maior que a mistura R, ao contrário do que foi observado por Pedrozo (2008) e Nedhi, Duquette e Damatty (2003). Na pesquisa desenvolvida por Nedhi, Duquette e Damatty (2003), para todos os níveis de substituição, a mistura de referência foi a que apresentou o maior valor de carga passante, seguida pela mistura com CCA ao natural.

Assim, efeito da moagem sobre a carga passante é um fator relevante, uma vez que todas as misturas com CCA moída apresentaram cargas passantes menores que as misturas com CCA ao natural. Isso provavelmente ocorreu devido à finura mais elevada da CCA moída, em relação a CCA natural, promover um maior refinamento dos poros, o que dificulta a migração dos íons cloreto. Cervo (2001), estudou teores de substituição de 25% e 50% de CCA, com diferentes finuras, e também verificou maior redução na carga passante em concretos que continham CCA de finuras mais elevadas, aos 91 dias. O mesmo foi observado por Possan, Venquiaruto e Dal Molin (2007).

Na tabela 5.13 são mostrados alguns resultados de cargas passantes, apresentados por outros pesquisadores, em concretos com o mesmo teor de CCA utilizado na presente pesquisa – 15% de CCA.

Tabela 5.13 - Cargas passantes encontradas por outros pesquisadores  
Ganesan, Rajagopal e Thangavel (2008) – segundo ASTM C1202

Teor de CCA	a/ag	Carga Passante (C)	
		28 dias	90 dias
0%	0,53	2750	2500
5%	0,53	2250	1800
10%	0,53	1600	1000
15%	0,53	1300	950
20%	0,53	1000	800
25%	0,53	900	750
30%	0,53	950	700
35%	0,53	1100	950

Saraswathy e Song (2007) – segundo ASTM C1202:1994

Teor de CCA	a/ag	Carga passante aos 28 dias (C)
0%	0,53	1161
5%	0,53	1108
10%	0,53	653
15%	0,53	309
20%	0,53	265
25%	0,53	213
30%	0,53	273

Coutinho (2003) – segundo AASTHO T277-83

Teor de CCA	a/ag	Carga passante entre 90 e 100 dias (C)
0%	0,43	2349,3
10%	0,43	435
15%	0,43	322
20%	0,43	260

Para Ganesan, Rajagopal e Thangavel (2008), a carga total passante das misturas com CCA diminui continuamente com o aumento do teor de CCA até 25%. Esta observação é válida para ambos períodos de cura – 28 e 90 dias.

Na pesquisa de Saraswathy e Song (2007), as amostras foram curadas por 28 dias e, assim como observaram Ganesan, Rajagopal e Thangavel (2008), para os teores de CCA de 0% a 25% também houve redução nas cargas passantes com o aumento do teor de substituição, entretanto, os pesquisadores constataram um acréscimo na carga passante quando o teor de substituição aumentou de 25% para 30% de CCA, fato que os levou a concluir que teores de substituição menores de 30% são recomendáveis para concretos.

Da mesma forma, o estudo de Coutinho (2003) também revelou que o uso de CCA aumenta consideravelmente a resistência à penetração de cloretos em relação ao concreto de referência.

Sendo assim, Ganesan, Rajagopal e Thangavel (2008), Saraswathy e Song (2007) e Coutinho (2003) constataram que até os 25% de substituição por CCA há uma redução na carga passante em relação ao concreto de referência. E assim, como foi observado na presente pesquisa, 15% CCA aumenta a resistência do concreto à penetração de cloretos em relação ao concreto sem adição de CCA.

### 5.6.3 Influência do período de câmara úmida

De acordo com Neville (1997), a cura do concreto favorece as reações de hidratação do cimento e pozolânicas, assim como evita a saída prematura de água do interior dos poros. Este processo dá origem a uma microestrutura mais densa, com menor volume de poros capilares e, conseqüentemente, resulta em um concreto de menor permeabilidade (AİTCIN, 2000).

A Figura 5.10 apresenta as curvas que correlacionam a carga total passante (C) em função do período de cura adotado para todas as misturas investigadas. Observa-se nesta figura, o deslocamento das curvas no sentido dos menores valores de C, devido ao prolongamento do período de cura de 7 para 28 dias.

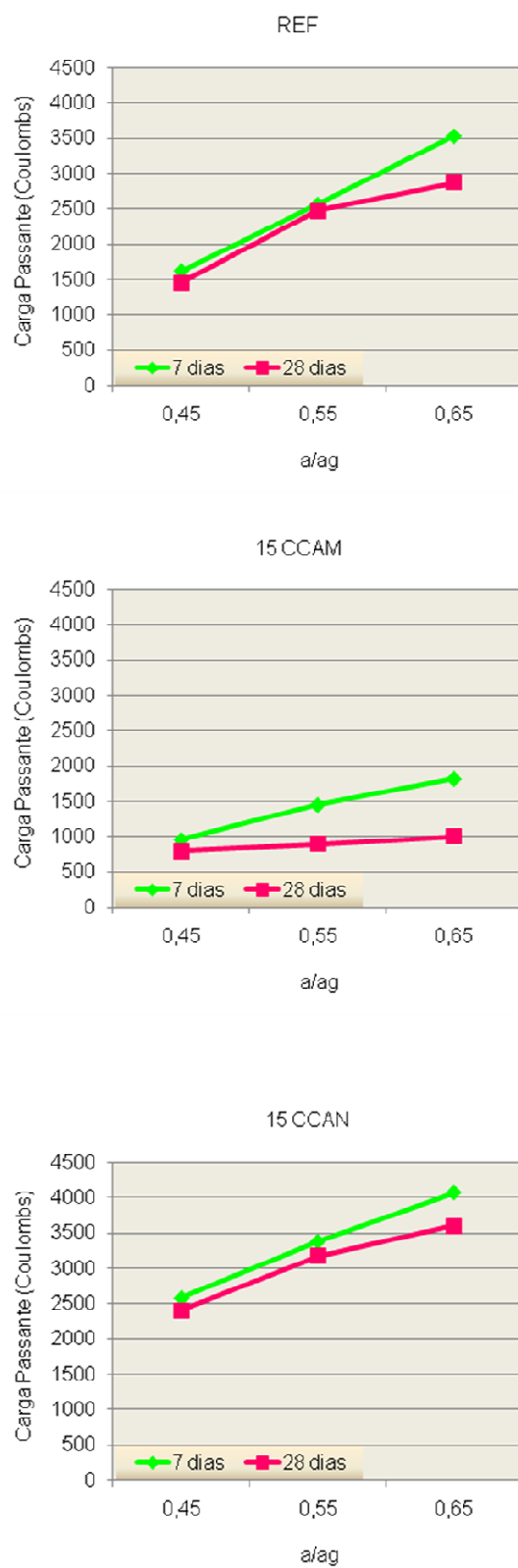


Figura 5.10 – Variação da Carga Total Passante de cada mistura investigada, aos 91 dias, em função da relação água/aglomerante e do tempo de cura úmida

A mistura REF obteve redução na carga passante devido ao aumento do período de cura de 7 para 28 dias, de 11%, 4% e 19%, respectivamente para as relações a/ag 0,45, 0,55 e 0,65. A mistura 15 CCAM apresentou redução de C de 17%, 38% e 11%, respectivamente para as relações a/ag 0,45, 0,55 e 0,65. Já o concreto 15 CCAN obteve redução de 7%, 6% e 11% para as mesmas relações a/ag.

Portanto, pode-se afirmar que a cura do concreto tem influência na capacidade deste resistir à penetração de agentes agressivos, como os íons cloreto.

#### 5.6.4 Classificação das misturas quanto à penetrabilidade aos íons cloreto.

A tabela 5.14 apresenta a classificação quanto à penetrabilidade aos íons cloreto segundo ASTM C 1202:2005. Com base nesta classificação, na tabela 5.15 é apresentado o enquadramento das misturas investigadas. Observa-se que as misturas com CCA moída apresentaram os melhores desempenhos dentre as misturas investigadas.

Tabela 5.14 - Classificação dos concretos quanto à penetrabilidade aos íons cloreto ASTM C1202:2005

Penetrabilidade aos íons cloreto	Alta	Moderada	Baixa	Muito baixa	Desprezível
Carga passante (coulombs)	> 4000	2000 a 4000	1000 a 2000	100 a 1000	< 100

Tabela 5.15 - Enquadramento das misturas quanto à penetrabilidade aos íons cloreto segundo ASTM C 1202:2005

Mistura	a/ag	Penetrabilidade aos íons cloreto aos 91 dias	
		7 dias	28 dias
REF	0,45	B	B
	0,55	M	M
	0,65	M	M
15 CCAM	0,45	MB	MB
	0,55	B	MB
	0,65	B	B
15 CCAN	0,45	M	M
	0,55	M	M
	0,65	A	M
R	0,45	M	-
	0,55	M	-
	0,65	M	-
15 M	0,45	B	-
	0,55	B	-
	0,65	M	-
15 N	0,45	M	-
	0,55	M	-
	0,65	M	-

MB – Muito baixo    B – Baixo    M – Moderado    A – Alto

Aos 91 dias, a mistura 15 CCAM, com cura úmida de 7 dias, enquadrou-se na penetrabilidade muito baixa para a relação a/ag 0,45 e baixa para as relações a/ag 0,55 e 0,65. Com cura úmida de 28 dias, a mesma mistura ajustou-se na penetrabilidade muito baixa para as relações a/ag 0,45 e 0,55 e baixa para a relação a/ag 0,65. Já a mistura 15M enquadrou-se na penetrabilidade baixa para as relações a/ag 0,45 e 0,55.

A mistura 15 CCAN, com cura úmida de 7 dias, enquadrou-se na penetrabilidade alta para a relação a/ag 0,65. Para as demais relações a/ag enquadrou-se na penetrabilidade moderada, assim como as misturas 15 N e R.

Para a relação a/ag 0,65 praticamente todos os concretos apresentaram classificação de penetrabilidade moderada. As exceções foram a mistura 15 CCAM que apresentou classificação baixa e a mistura 15 CCAN que mostrou classificação alta para esta relação a/ag.

#### 5.6.5 Determinação da profundidade de penetração nos concretos submetidos ao EAPC

Após a realização do ensaio acelerado de penetração de cloretos, as amostras foram rompidas ao meio por compressão diametral e receberam, nas faces rompidas, um spray de solução de nitrato de prata (0,1 M) com o intuito de medir a profundidade de penetração de cloretos pelo método colorimétrico.

Na figura 5.11 é apresentada a correlação entre carga passante e profundidade de penetração aos 91 dias. Já na figura 5.12 observa-se a correlação entre a carga passante e profundidade de penetração obtida por Pedrozo (2008). Nota-se que a profundidade de penetração nas misturas aumenta com a diminuição de resistência à penetração de cloretos.

De acordo com estes gráficos e seus coeficientes de correlação ( $R^2$ ), observa-se a forte dependência mútua entre estas duas grandezas, também verificada por Andrade et al. (1999).



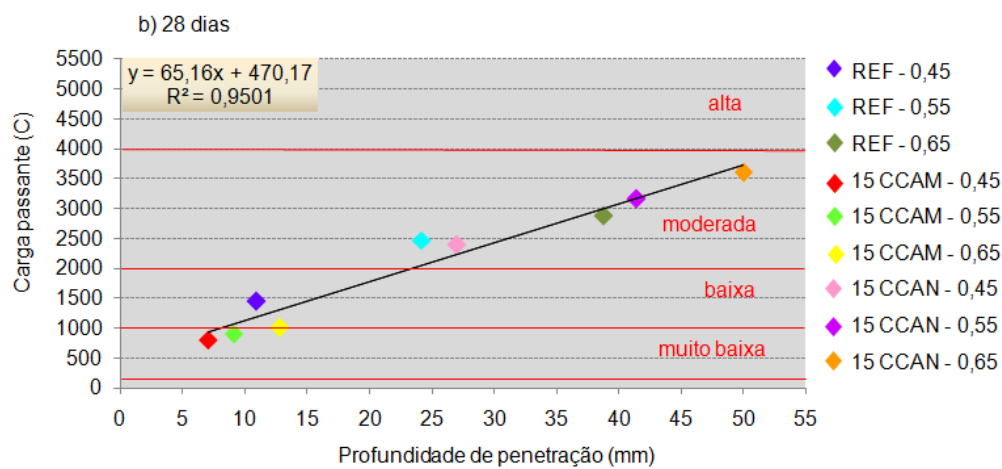
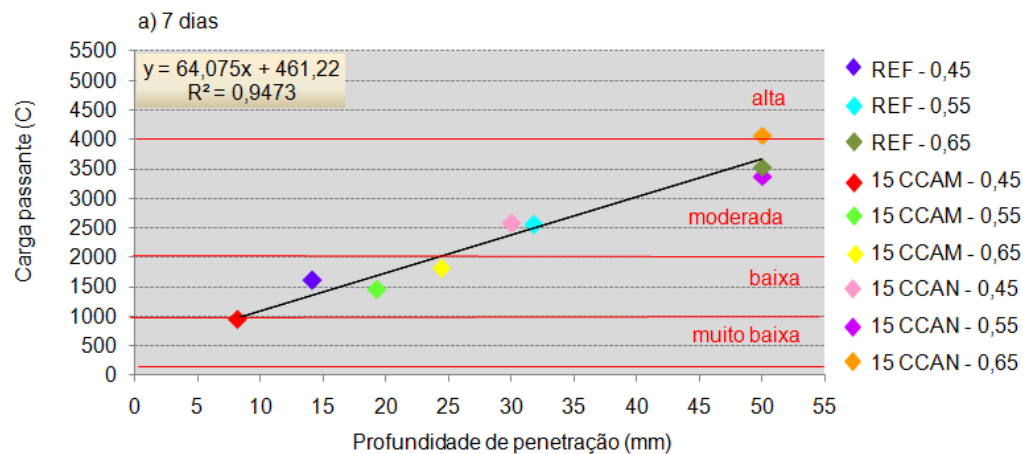


Figura 5.11 – Correlação entre carga passante e profundidade de penetração após ensaio ASTM C1202:2005, para dois períodos de cura a) 7 dias e b) 28 dias – aos 91 dias

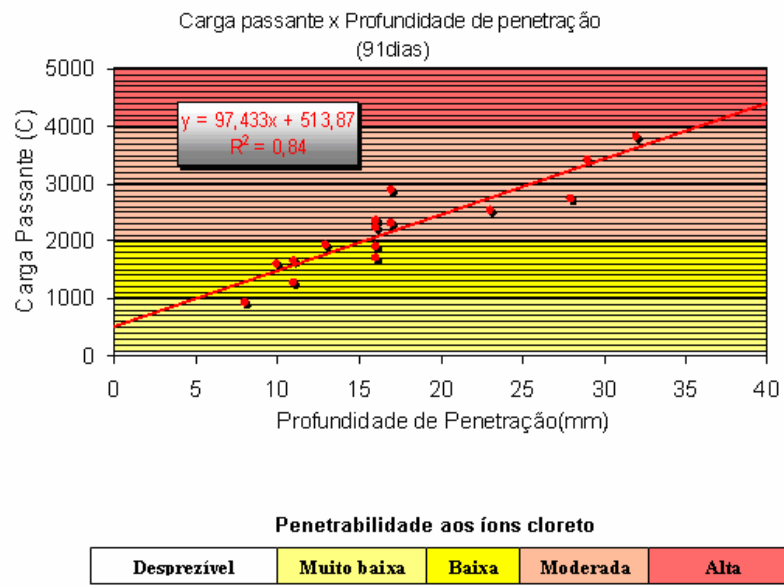


Figura 5.12 – Carga passante versus profundidade de penetração  
(PEDROZO, 2008)

## 6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa teve por objetivo investigar a viabilidade técnica da substituição de parte do cimento por cinza de casca de arroz residual, sem queima controlada e sem moagem, sobre algumas propriedades ligadas à durabilidade do concreto.

Da revisão bibliográfica, constatou-se que a resistividade elétrica do concreto apresenta-se como uma propriedade sensível às suas características físicas e químicas. Dos resultados obtidos, verificou-se que a idade, a relação água/aglomerante e as adições minerais têm uma relação expressiva com a resistividade elétrica do concreto, em virtude principalmente das alterações na estrutura dos poros e na quantidade e composição da solução aquosa dos mesmos, corroborando os preceitos teóricos.

As misturas apresentaram aumento na resistividade elétrica com a diminuição da relação água/aglomerante. Isso devido principalmente a uma maior compactidade do concreto e menor quantidade de eletrólito. Esse aumento na resistividade elétrica também foi observado nas três relações a/ag, com o aumento do grau de hidratação, até os 182 dias, cujas reações tornam a estrutura do concreto mais compacta.

Conforme os critérios de avaliação da resistividade elétrica, verificou-se que todos os concretos apresentaram, aos 182 dias, probabilidade desprezível de corrosão, inclusive na relação água/aglomerante 0,65 e estando com alto teor de umidade.

O uso de CCAM foi benéfico para a resistividade elétrica do concreto, conferindo valores significativamente superiores aos obtidos quando utilizada a CCAN. Dessa forma, conclui-se que a adição de cinza de casca de arroz, em especial a moída, contribui para elevar a durabilidade do concreto, em se tratando da sua resistividade elétrica.

No que se refere à condutividade elétrica, as misturas apresentaram aumento na condutividade elétrica com a diminuição da relação água/aglomerante. A condutividade elétrica, em geral, diminuiu com o aumento da idade. A utilização de CCAM foi benéfica para a condutividade elétrica da pasta e do concreto, conferindo valores inferiores aos obtidos quando utilizada a CCAN.

Com relação à absorção de água por capilaridade, observou-se que o concreto com CCAM apresentou menores coeficientes de absorção quando comparados com concretos com CCAN e aqueles sem CCA, bem como atingiu maiores valores de ascensão capilar, após 72 h de ensaio. Isso prova que diâmetros menores geram tensões capilares maiores, ocasionando uma maior ascensão capilar. Porém, esses poros pouco influenciam na durabilidade do material.

Na análise experimental da resistência à penetração de íons cloreto dos concretos, conforme proposto pela ASTM C1202:2005, verificou-se que o concreto com CCAM apresentou menor penetrabilidade ao íon cloreto. Enquanto o concreto com CCAN apresentou risco moderado de penetração desses íons, com CCAM a penetração de  $\text{Cl}^-$  foi muito baixa e sem CCA, de baixa a moderada. Observou-se também que o período de cura úmida, de 7 para 28 dias, não foi suficiente para mudar o enquadramento das misturas quanto à penetrabilidade aos íons cloreto, exceto para a mistura CCAM, relação a/ag 0,55, onde o enquadramento passou de baixo para muito baixo, e para mistura CCAN, relação a/ag 0,65, que passou de alto para moderado.

Em relação à resistência à compressão axial, a mistura com CCAM apresentou os maiores valores de resistência à compressão aos 182 dias, ultrapassando a mistura de referência. Até essa idade, a mistura com CCAN não alcançou a mistura com CCAM e a sem CCA.

Através dos resultados obtidos na presente pesquisa, fica evidente que existe a viabilidade técnica do uso de 15% de cinza de casca de arroz natural sem beneficiamento, na produção de concreto estrutural e produtos estruturais pré-moldados de concreto. Com efeito, os valores obtidos nos ensaios corroboram com esta afirmação porque, nas variáveis estudadas, os resultados mostram que, aos 182 dias, a mistura 15 CCAN obteve resistividade elétrica superior à apresentada por REF, aos 91 dias, e o seu crescimento dos 91 para os 182 dias foi superior a 100%. A condutividade elétrica do concreto e da pasta, da mistura 15 CCAN, foi menor que da mistura REF. Os valores médios de absorção capilar da mistura 15 CCAN foram menores que os apresentados por REF. No EAPC, o enquadramento quanto à penetrabilidade aos íons cloreto das misturas 15 CCAN e REF foi semelhante, ou seja, moderado. Com exceção da mistura REF, relação a/ag 0,45, que apresentou penetrabilidade aos íons cloreto baixa (para os dois períodos de

cura úmida), e da mistura 15 CCAN, relação a/ag 0,65, cura úmida de 7 dias, que apresentou penetrabilidade alta.

Além disso, a viabilidade técnica do uso da cinza de casca de arroz residual, sem moagem, também está relacionada à grande redução no gasto de energia, que seria gerado com o processo de moagem da cinza da casca de arroz.

### **6.1 Sugestões para trabalhos futuros**

Uma pesquisa em andamento, dentro desse mesmo projeto, está estudando a neutralização da RAS da CCA natural pelo emprego de cimentos com adições minerais, assim como a substituição parcial do cimento CII-Z por cinza volante. Está sendo empregado o método de expansão acelerada em argamassas e em prismas de concreto, para verificar se haverá mitigação da RAS nas misturas.

Como continuidade deste trabalho, sugere-se dar prosseguimento ao estudo da resistividade elétrica para CCAN, haja vista o crescimento dos 91 dias para os 182 dias.

Sugere-se, também, que sejam realizados os ensaios de resistência à ácidos sulfatos, carbonatação, porosimetria de mercúrio e permeabilidade a oxigênio para o cimento CII-Z com CV. Esses ensaios já foram realizados para o cimento CII-F.

## REFERÊNCIAS

ABO EL-ENEIN, S. A.; KOTKATA, M. F.; HANNA, G. B.; SAAD, M.; ABD EL RAZEK, M. M. Electrical conductivity of concrete containing silica fume. **Cement and Concrete Research**, v. 25, nº 8, p. 1615-1620, 1995.

ABREU, A. G., **Efeito das adições minerais na resistividade elétrica de concretos convencionais**. Porto Alegre. 1998. 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

AITCIN, P.C. **Concreto de Alto Desempenho**. 1.ed. São Paulo: Pini, 2000. 667p.

AKASAKI J. L.; SILVA, E. J.; TASHIMA, M. M.; BARSBOSA, M. B. **Influência da adição de cinza de casca de arroz nos tempos de pega e retração por secagem**. UNESP, Campus de Ilha Solteira, São Paulo, Brasil, PPGEC/2005.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Manual of Concrete Practice**. Use of Fly Ash in Concrete: ACI 232.2R, Farmington Hills, 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Anual Book of ASTM Standards**. ASTM C 1202: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. Philadelphia, 2005.

\_\_\_\_\_. ASTM C 618: Standard Specification for Fly ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete. Philadelphia, 1978.

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

ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M.; ALONSO, C.; GONZÁLEZ, C. Relation between colourimetric chloride penetration depth and charge passed in migration tests of the type of standard ASTM C1202-91. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 417-421, 1999.

ANDRADE, J. J. O. **Durabilidade das estruturas de concreto armado: análise das manifestações patológicas nas estruturas no estado de Pernambuco**. Porto Alegre. 1997. 148 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós

Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro, 2003.  
\_\_\_\_\_. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 9779: Argamassa e concreto endurecido - Determinação da absorção da água por capilaridade - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. **NBR 11578: Cimento Portland composto - Especificação**. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 11579: Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (n° 200) - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NM 23: Cimento portland - Determinação e massa específica**. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NM 65: Cimento Portland - Determinação do tempo de pega**. Rio de Janeiro, 2003.

BABU, K. G.; RAO, G. D. N. Efficiency of fly ash in concrete with age. **Cement and Concrete Research**, Elsevier Science (ed). V.26, p. 465-474, 1996.

BARBOSA, M. B.; VITA, M. O.; AKASAKI, J. L.; ALCÂNTARA, M. A. M.; SILVA, E. J.; FREITAS, I. R. M. Estudo comparativo das propriedades mecânicas do CAD com resíduos de borracha de pneu e cinza de casca de arroz de diferentes composições orfológicas., **48º Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON 2006**.

BASHEER, L.; KROPP, J. Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review. **Construction and Building Materials**, v.15, p. 93-103, 2001.

BISHARA, S. W. Rapid, Accurate Method for Determining Water-Soluble chloride in concrete, Cement, Mortar, and Aggregate: Application to Quantitative Study of Chloride Ion Distribution in Aged Concrete. **ACI Materials Journal**. V. 88, p. 265-270, 1991.

BOUZOUBAË, N.; ZHANG, M. H.; BILODEAU, A.; MALHOTRA, V. M. The effect of grinding on the physical properties of fly ashes and a Portland cement clinker. **Cement and Concrete Research**, V 27, p. 1861-1874, 1997.

CALÇADA, L. M. L. **Estudo da eficácia do ensaio de migração em condições de fluxo não estacionário na previsão da penetração de cloretos em concreto**. Florianópolis, 2004, 214p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo: Pini; Goiânia: Ed. UFG, 1997.

CERVO, T. C. **Influência da finura e do teor de pozolana na penetração de cloretos e na solução aquosa dos poros do concreto**. Santa Maria. 2001. 147 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.

CHINDAPRASIRT, P.; RUKSON, S. Strength, porosity and corrosion resistance of ternary blend Portland cement, rice husk ash and fly ash mortar. **Construction and Building Materials**, v.22, p. 1601-1606, 2008.

COMITE EURO-INTERNACIONAL DU BETON. Durable concrete structures CEB Desing Guide. **CEB – Bulletin D'Information**. N° 183. Paris. 1992. 112p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). In: <http://www.conab.gov.br/conab/Main.php?MagID=3&MagNo=74>. Acesso: 15 dez. 2010.

COUTINHO, J. S. The combined benefits of CPF and RHA in improving the durability of concrete structures. **Cement & Concrete Composites**, v.25, p. 51-59, 2003.



DAFICO, D. A. **Estudo da dosagem de concreto de alto desempenho utilizando pozolanas provenientes da casca do arroz.** 2001. 191f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001.

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. 2002. 111 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

DELAGRAVE, A.; PIGEON, M.; MARCHAND, J. et al. Influence of chloride ions and pH level on the durability of high performance cement pastes (part II). **Cement and Concrete Research**. V.26, p. 749-760. 1996.

DUART, M. A. **Estudo da microestrutura do concreto com adição de cinza de casca de arroz residual sem beneficiamento.** Santa Maria. 2008. 134p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

FENG, Q.; YAMAMICHI, H.; SHOYA, M.; SUGITA, S. Efficiency of highly active Rice husk ash on the high-strength concrete. **11<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC)**. Durban, South Africa, Proceedings ... 2003. 1 CD-ROM.

FENG, Q.; YAMAMICHI, H.; SHOYA, M.; SUGITA, S. Study on the pozzolanic properties of Rice husk ash by hydrochloric acid pretreatment. **Cement and Concrete Research**, V. 34, p.521-526, 2004.

FERREIRA, R. B. **Influência das adições minerais nas características do concreto de cobrimento e seu efeito na corrosão de armadura induzida por cloretos.** Goiânia. 2003. 224p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v.22, p. 1675-1683, 2008.

GASTALDINI, A. L. G. & ISAIA, G. C. Chloride permeability of high performance concrete with mineral addition: binary and ternary mixtures. **INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE**, 2. Gramado, Brasil, **Proceedings ...** 1999. 1 CD-ROM.

GUEDERT, L. O. **Estudo da viabilidade técnica e econômica do aproveitamento da cinza de casca de arroz como material pozolânico**. 1989. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1989.

HANZIC, L.; KOSEC, L.; ANZEL, I. Capillary absorption in concrete and the *Lucas-Washburn* equation. **Cement & Concrete Composites**, V. 32, p. 84-91, 2010.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Ed. Pini, 1992. 349p.

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

\_\_\_\_\_. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: Ed. Pini, 1986.

HELENE, P. R. L.; ANDRADE, T. **Concreto de Cimento Portland**. Cap. 27. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto, IBRACON. 2007.

HÖEHR, G.; ISAIA, G.; GASTALDINI, A.; CERVO, T.; et al. **Mitigação da reação álcali-silica entre cimento com adições e cinza de casca de arroz natural, pelo método acelerado em barras de argamassa e prismas de concreto**. In: 52º Congresso Brasileiro do Concreto. Anais. IBRACON, 2010.

HOPE, B. B.; IP, A. K. C. Corrosion of steel in concrete made with slag cement. **ACI Materials Journal**, v. 84, n. 6, p. 525-531, November-december, 1987.

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

HOPPE FILHO, J. **Efeitos da adição de cal hidratada sobre a permeabilidade ao oxigênio e absorção capilar de concreto com altos teores de adições minerais**. Santa Maria. 2002. 181p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

HOUSTON, D. F. **Rice: Chemistry and Technology**. American Association of Cereals Chemistry, Minnesota, p. 301-352, 1972.

HUGHES, B. P.; SOLEIT, A.K.O.; BRIERLEY, R. W. New technique for determining the electrical resistivity of concrete. **Magazine of Concrete Research**. v. 37, p. 243-248, 1985.

HUSSAIN, S. E.; E RASHEEDUZZAFAR. Corrosion resistance performance of fly ash blended cement concrete. **ACI Materials Journal**, vol. 91, p. 264-272, may-june, 1994.

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**. São Paulo. 1995. 280p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

\_\_\_\_\_. **Sustentabilidade do concreto ou das estruturas de concreto? Uma questão de durabilidade**. In: 44<sup>º</sup> Congresso Brasileiro do Concreto. Anais. IBRACON, 2002.

ISMAIL, M. S.; WALIUDDIN, A. M. Effect of rice husk ash on high strength concrete. **Construction and Building Materials**, v.10, n<sup>º</sup> 7, p. 521-526, 1996.

LEA. **Lea's chemistry of cement and concrete**. London : Arnold , 1998.

LÜBECK, A. **Resistividade elétrica de concretos de cimento portland branco e elevados teores de escória de alto forno**. Santa Maria. 2008. 142p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

McCARTER, W. J.; STARRS, G.; CHRISP, T. M. Electrical conductivity, diffusion and permeability of Portland cement-based mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 1395-1400, 2000.

MEDHAT, H. S.; THOMAS, M. D. A.; BLESZYNSKIA, R. F. The effects of fly ash composition on the chemistry of pore solution in hydrated cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 1915-1920, 1999.

MEHTA, P. K. **Rice Husk Ash: A Unique Supplementary Cementing Material**, Advances in Concrete Technology, Ottawa: Canmet, p. 407-431, 1992.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 2008.

MEHTA, P. K. & PITT, N. A. **A new process of rice husk utilization.** In: international Conference on the utilization of Rice by-products. Valencia, 1977. Proceedings ... Valencia IATA 1977. p.p. 45-58.

MISSAU, F. **Penetração de cloretos em concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz.** Santa Maria, 2004, 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

MITIDIERI FILHO, C. V. **Qualidade e Desempenho na Construção Civil.** Cap. 2. In: ISAIA, G. C. (Ed.). Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto, IBRACON. 2007.

MONFORE, G. E. The electrical resistivity of concrete. **Journal of the PCA Research and Development Laboratories**, v. 10, n. 2, p. 35-48, may, 1968.

MONTEIRO, E. C. B. **Avaliação do Método de Extração Eletroquímica de cloretos para reabilitação de estruturas de concreto com problemas de corrosão de armaduras.** São Paulo, 2002, 211p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MORSY, M. S. Effect of temperature on electrical conductivity of blended cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 603-606, 1999.

NEHDI, M.; DUQUETTE, J.; DAMATTY, AEI. Performance of rice husk ash produced using a new technology as a mineral admixture in concrete. **Cement Concrete Research**, v. 33, p.1203-1210, 2003.

NEPOMUCENO, A. A. **Mecanismos de transporte de fluidos no concreto.** Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações, IBRACON, p.793 – 827, V. 2, ed. Geraldo C. Isaia, São Paulo, 2005.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 2ª ed. São Paulo: Pini, 1997.

NGALA, V. T.; PAGE, C. L.; PARROTT, L. J.; YU, S. W. Diffusion in cementitious materials: II. further investigations of chloride and oxygen diffusion in well-cured OPC and OPC/30% PFA pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 25, p. 819-826, 1995.

OLLIVIER, J. P. **Durability of concrete**. Boletim técnico da Escola Politécnica da USP, BT/PCC/192, 1998, 129p.

OTSUKI, N.; NAGATAKI, S.; NAKASHITA, K. Evaluation of AgNO<sub>3</sub> solution spray method for measurement of chloride penetration into hardened cementitious matrix materials. **ACI Materials Journal**, v. 89, n. 6, p.587-592, 1992.

PAVLÍK, V. Water extraction of chloride, hydroxide and other ions from hardened cement pastes. **Cement and concrete research**, v. 30, p. 895-906, 2000.

PEDROZO, E. C. **Estudo da cinza da casca do arroz residual em concretos estruturais: uma análise da durabilidade aos cloretos**. 2008. 142f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

POSSAN, E.; VENQUIARUTO, S. D.; DAL MOLIN, D. C. C. **Adição de cinza de casca de arroz no concreto: benefícios de durabilidade**. VI Encontro Tecnológico da Engenharia Civil e Arquitetura. ENTECA, 2007.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas a produção de cimento composto e/ou pozolânico**. 2006. 320f. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do sul. Porto Alegre, 2006.

PRINCIGALLO, A.; BREUGEL, K. V.; LEVITA, G. Influence of the aggregate on the electrical conductivity of Portland cement concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 11, p. 1755-1763, November, 2003.

PRUDÊNCIO, L. R.; SANTOS, S.; DAFICO, D. A. **Cinza de Casca de Arroz, Coletânea Habitare** - vol. 4 - Utilização de Resíduos na Construção Habitacional, 2003.

RILEM. Recommendations of TC 116-PCD. Tests for gas permeability of concrete. **Revista Materials and Structures**. V.32, n. 217, p. 163-179, abril 1999.

ROSA, D. W. **Resistividade elétrica de concretos com diferentes teores de escória de alto forno e ativador químico**. Santa Maria, 2005, 149 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

SACILOTO, A. P. **Comportamento frente à ação de cloretos de concretos compostos com adições minerais submetidos a diferentes períodos de cura.** Santa Maria, 2005, 179 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

SALEM, Th. M.; RAGAI, Sh. M. Electrical conductivity of granulated slag cement kiln dust-silica fume pastes at different porosities. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 781-787, 2001.

SANTOS, S. **Estudo da viabilidade de utilização de cinza de casca de arroz residual em argamassas e concretos.** Florianópolis, 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

SARASWATHY, V.; SONG, H. Corrosion performance of Rice husk ash blended concrete. **Construction and Building Materials**, v.21, p. 1779-1784, 2007.

SCHNEIDER, J. A. **Penetração de cloretos em concretos com escória de alto forno e ativador químico submetidos a diferentes períodos de cura.** 2005. 137f. Dissertação (Mestrado em engenharia civil). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2005.

SENSALE, G. R. Strength development of concrete with rice-husk ash. **Cement and Concrete Composites**, v.28, p. 158-160, 2006.

SHEHATA, M. H.; THOMAS, M. D. A.; BLESZYNSKI, R. F. The effects of fly ash composition on the chemistry of pore solution in hydrated cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 1915-1920, 1999.

SHI, C.; STEGEMANN, J.A.; CALDWELL, R.J. Effect of supplementary cementing materials on the specific conductivity of pore solution and this implications on the Rapid Chloride Permeability Test (AASHTO T277 and ASTM C1202) results. **ACI Materials Journal**, USA: American Concrete Institute, v. 95, p. 389-394, 1998.

SHI, C. Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSTHO T277) results. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 537-545, march, 2004.

SILVEIRA, A. A. **A utilização da cinza de casca de arroz com vistas à durabilidade de concretos: estudo do ataque por sulfatos.** 1996. 139 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

SMITH, K. M.; SCHOKKER, A. J.; TIKALSKY, P. J. Performance of supplementary cementitious materials in concrete resistivity and corrosion monitoring evaluations. **ACI Materials Journal**, v. 101, n. 5, p. 385-390, September-october, 2004.

SNIC. **Sindicato Nacional da Indústria de Cimento.**

Disponível em: < <http://www.snic.org.br/>>. Acesso em: 25 nov. 2009.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete.** Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982.

VIEIRA, F. L.; LIDUÁRIO, A. S.; LOPES, A. D.; BITTENCOURT, R. M.; GUIMARÃES, E. M. **Comparativo da determinação do teor de amorfismo da cinza de casca de arroz (CCA) através de difração de raios – x e método químico.** In: 47<sup>o</sup> Congresso Brasileiro do Concreto, 2005, Anais. IBRACON, 2005, 372-381.

WEE, T. H.; SURYAVANSHI, A. K.; TIN, S. S. Evaluation of rapid chloride permeability test (RCPT) results for concrete containing mineral admixtures. **ACI Materials Journal**, v. 97, n. 2, p. 221-232, march-april, 2000.

WHITING, D. A.; NAGI, M. A. **Electrical resistivity of concrete.** A literature review. 2003. 57 p. R&D Serial n. 2457, Portland Cement Association. Skokie, Illinois, USA.

WOLSIEFER, J. T. **Silica fume concrete: A solution to steel reinforcement corrosion in concrete.** In: SECOND CANMET/ACI INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF CONCRETE. Proceedings ... American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, SP-126, p. 527-553, 1991.

ZHANG, M.; MALHOTRA, V. M. High-performance concrete incorporating Rice husk ash as a supplementary cementing material. **ACI Materials Journal**, v.93, n<sup>o</sup> 6, p. 629-636, 1996.