

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

**ABSORÇÃO CAPILAR E RESISTIVIDADE ELÉTRICA
DE CONCRETOS COMPOSTOS COM CINZA DE
CASCA DE ARROZ DE DIFERENTES TEORES DE
CARBONO GRAFÍTICO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CARLOS ZINN MOSTARDEIRO NETO

**Santa Maria, RS, Brasil
2011**

**ABSORÇÃO CAPILAR E RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE
CONCRETOS COMPOSTOS COM CINZA DE CASCA DE
ARROZ DE DIFERENTES TEORES DE CARBONO
GRAFÍTICO**

Carlos Zinn Mostardeiro Neto

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. Dr. Antônio Luiz Guerra Gastaldini

**Santa Maria, RS, Brasil
2011**

M915a Mostardeiro Neto, Carlos Zinn
Absorção capilar e resistividade elétrica de concretos compostos com cinza de casca de arroz de diferentes teores de carbono grafítico / por Carlos Zinn Mostardeiro Neto. – 2011.
165 p. : il. ; 31 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. Cinza de casca de arroz 4. Absorção capilar 5. Resistividade elétrica 6. Durabilidade I. Gastaldini, Antônio Luiz Guerra II. Título.

CDU 624.012.4

Ficha catalográfica elaborada por Simone G. Maisonave – CRB 10/1733

Biblioteca Central UFSM

© 2011

Todos os direitos autorais reservados a Carlos Zinn Mostardeiro Neto. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor. Endereço: Rua Visconde de Pelotas, 1193/102 – Centro – Santa Maria - RS, 97015-140 Fones: (55) 3304.1193 / 9162.5486. *Endereço eletrônico:* carloszinn@yahoo.com.br

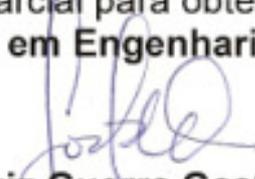
**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

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

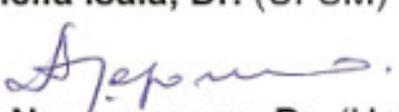
**ABSORÇÃO CAPILAR E RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE
CONCRETOS COMPOSTOS COM CINZA DE CASCA DE ARROZ DE
DIFERENTES TEORES DE CARBONO GRAFÍTICO**

elaborada por
Carlos Zinn Mostardeiro Neto

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


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


Geraldo Cechella Isaia, Dr. (UFSM)


Antônio Alberto Nepomuceno, Dr. (UnB)

Santa Maria, 15 de Dezembro de 2011

*“O amor é o caminho do coração.
O estudo o caminho da mente.
O trabalho o caminho do progresso material”.*

***Comunicação mediúnica,
autor desconhecido (28/09/2011)***

À minha esposa Vanessa, com todo o amor que possuo em meu espírito,
dedico.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, pela oportunidade da vida, de minha existência e pelo privilégio de reencarnar em um ambiente com condições de desenvolver o raciocínio através do estudo, uma das asas do progresso humano.

Ao meu orientador, professor Antônio Luiz Guerra Gastaldini, pela aposta em meu potencial, pela transmissão de conhecimentos, paciência e orientação durante esta pesquisa.

A todos os meus familiares e amigos, em especial aos meus amados pais, Carlos e Eliane, às minhas irmãs, Patrícia e Priscila, e aos pais de minha esposa, Omero e Myrta, os quais, de perto, torceram muito pelo êxito desta ocasião, acreditando em minha capacidade, muito mais do que eu poderia supor.

À Vanessa, minha esposa, pelo desprendimento em todos os momentos, pela motivação, pelos cuidados, pelo incentivo e por seu amor, o qual tornou meus passos mais leves e meu coração mais feliz.

Ao meu guia espiritual, pela intuição e proteção.

Aos meus antigos e atuais chefes que, de alguma forma, proporcionaram que eu pudesse conciliar as atividades de trabalho e estudo, em particular, ao Capitão da Aeronáutica Walter Wippel Júnior, por sua sabedoria e camaradagem.

À UFSM, pelo conhecimento ofertado e oportunidade de crescimento intelectual.

Aos colegas de mestrado Fabrício Beltrame Zamberlan e Monique Pafiadache da Silva, orientados pelo mesmo orientador, companheiros de trabalho experimental, além de Daiana de Souza Cezar, pela ajuda disponibilizada.

Aos bolsistas de iniciação científica, Bruno César Silva Gonçalves, Daniel Luis Teixeira, Maurício Silveira dos Santos, Pedro Orlando Borges de Almeida Júnior, Lucas Lamberti, e demais bolsistas que, de alguma forma, participaram do desenvolvimento experimental desta pesquisa, especialmente à Patrícia Hennig Osmari, no apoio inicial dos trabalhos.

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

À Tchuca, pelo companheirismo de sempre.

RESUMO

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

ABSORÇÃO CAPILAR E RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE CONCRETOS COMPOSTOS COM CINZA DE CASCA DE ARROZ DE DIFERENTES TEORES DE CARBONO GRAFÍTICO

AUTOR: CARLOS ZINN MOSTARDEIRO NETO

ORIENTADOR: ANTÔNIO LUIZ GUERRA GASTALDINI

Local e Data da Defesa: Santa Maria, 15 de Dezembro de 2011

Há, cada vez mais, uma busca de alternativas para reduzir o impacto ambiental na produção de insumos, como o cimento, que é altamente poluente. Adições minerais têm sido investigadas como substituições parciais ao cimento no concreto, pois, além de propiciar o aproveitamento de resíduos industriais, os quais muitas vezes não possuem destinação específica e são degradantes do ponto de vista ambiental, podem oferecer melhora nas características de durabilidade do material, conforme verificado em estudos anteriores. No Brasil, que é um grande produtor de arroz, são geradas anualmente milhões de toneladas da casca deste cereal, sendo parte dessa utilizada para produção de energia, em usinas termoelétricas. A cinza da casca de arroz, resultante da queima da casca, tem sido fonte de pesquisas visando a sua utilização como substituição parcial ao cimento do concreto. Ainda são poucos os estudos que fazem um comparativo da influência da viabilidade da utilização da cinza de casca de arroz com diferentes teores de carbono grafítico (cinza clara e escura), obtidas por queima controlada, frente a características de durabilidade em concretos. Neste trabalho, misturas contendo diferentes teores de CCA clara e escura foram investigadas quanto ao desempenho em concreto estrutural, através dos ensaios de absorção de água por capilaridade, segundo a NBR 9779:1995 e resistividade elétrica aparente, conforme o método dos quatro eletrodos (Wenner). Adicionalmente, realizou-se o ensaio de resistência à compressão axial, de acordo com a NBR 5739:2007. Para isso, foram testadas oito misturas aglomerantes, investigadas nas relações a/ag 0,35, 0,50 e 0,65: uma composta por 100% de cimento Portland, REF, três com substituição de cimento por CCA clara, em teores de 10%, 20% e 30%, denominadas 10 CCAC, 20 CCAC e 30 CCAC, respectivamente, outras três com os mesmos teores de troca de cimento por CCA escura, identificadas por 10 CCAE, 20 CCAE e 30 CCAE, respectivamente, e uma mistura com 10% de sílica ativa, 10 SA, para comparação de resultados. O aumento no prazo de cura e no teor de substituição de cimento por CCA resultou em melhor desempenho para as propriedades investigadas. Em igualdade de relação a/ag, no geral, os valores de resistência à compressão foram semelhantes, indiferentemente do teor de carbono grafítico da CCA. As misturas compostas com CCAE apresentaram melhor desempenho quanto à absorção capilar, embora superadas pela mistura com SA. Com relação à resistividade elétrica, a mistura composta com 30% de CCAC apresentou melhor desempenho em todas as idades de ensaio.

Palavras-chave: concreto, cinza de casca de arroz, absorção capilar, resistividade elétrica e durabilidade.

ABSTRACT

Master's Dissertation
Post-Graduation Program in Civil Engineering
Universidade Federal de Santa Maria

CAPILLARY ABSORPTION AND ELECTRICAL RESISTIVITY OF CONCRETE COMPOSED WITH RICE HUSK ASH OF DIFFERENT CONTENTS OF CARBON GRAPHITIC

AUTHOR: CARLOS ZINN MOSTARDEIRO NETO
ADVISER: ANTÔNIO LUIZ GUERRA GASTALDINI

Place and Date of Defense: Santa Maria, December 15th, 2011

There are constant searches for alternatives to reduce the environmental impact in the production of consumables, like concrete, that is actually a pollutant. Mineral additions have been investigated as partial substitutions for cement in concrete because other than taking advantage of industrial residues, that many times don't have a specific distinction and are degrading in the ambiental view, they can offer better material durability characteristics, as proved in previous studies. In Brazil, a big rice producer, millions of tons of rice husk are produced, where part is utilized for energy production in thermoelectric plants. The rice husk ash, result of the burning of the husk, has been the font of studies as a partial substitution of cement in concrete. There are still very few studies that make a comparison of the viability influence of the utilization of rice husk ash with different levels of carbon graphitic (light and dark grey), obtained by controlled burnings, a durable characteristic in concretes. In this work, mixtures containing different levels of light and dark RHA were investigated in concrete structural performance through water capillary absorption, following the NBR 9779:1995 and apparent electrical resistivity, conforming to the four electrode method (Wenner). Additionally, an analysis was made of the axial compressive strength in accordance with the NBR 5739:2007. For this, eight compound mixtures were tested and investigated in relation to their w/wc 0,35, 0,50 e 0,65: one composed of 100% Portland cement, REF, three with substitution of cement by light RHA in levels of 10%, 20% and 30%, namely 10 LRHA, 20 LRHA, 30 LRHA, respectively, and another three with the same levels of dark RHA replace cement, identified as 10 DRHA, 20 DRHA and 30 DRHA, respectively, and a mixture with 10% of silica fume, 10 SF, to compare results. The increase in cure time and in the purport of the substitution of cement by RHA resulted in better performance as to the investigated properties. In equality of w/wc relations, the compressive strength values were, in general, similar, indifferent to the level of carbon graphitic of the RHA. The composite mixture with DRHA presented better performance with regards to capillary absorption, even though it was overcome by the mixture with SF. In relation to electrical resistivity, the composed mixture of 30% LRHA presented better performance in all analysis times.

Key-words: concrete, rice husk ash, capillary absorption, electrical resistivity and durability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquemática do processo eletroquímico da corrosão.....	45
Figura 2.2 - Tipos de corrosão e fatores determinantes do processo	46
Figura 2.3 - Efeitos do maior ou menor acesso de oxigênio	47
Figura 2.4 - Evolução da degradação de uma estrutura de concreto armado, devido à corrosão por carbonatação	49
Figura 2.5 - Liberação de íons cloretos da fase sólida por carbonatação	51
Figura 2.6 – Esquema de realização do ensaio de absorção capilar pelo método do RILEM TC 116-PCD 1999	57
Figura 2.7 – Formação de uma pilha de corrosão - adaptação	58
Figura 2.8 - Efeito da saturação de água e relação a/ag na resistividade elétrica do concreto.....	61
Figura 2.9 - Resistividade elétrica x consumo de cimento/m ³ de concreto.....	62
Figura 2.10 - Método dos quatro eletrodos para medir a resistividade elétrica do concreto	69
Figura 2.11 – Esquema de montagem do corpo-de-prova para o ensaio de resistividade elétrica volumétrica, segundo a NBR 9204:1985	71
Figura 2.12 - “Pellets” de casca de arroz	72
Figura 2.13 - Depósito de cinza de casca de arroz a céu aberto	74
Figura 2.14 - Relação entre o tempo de moagem e o índice de atividade pozolânica da cinza de casca de arroz	76
Figura 2.15 - Difração de Raios-X da cinza de casca de arroz	79
Figura 2.16 - Micrografia de CCA produzida em forno fluidizado.....	79
Figura 2.17 - Micrografia de CCA produzida em forno comum	80
Figura 2.18 - Moinho utilizado para refinamento da CCA.....	80
Figura 2.19 - CCA moída por 30 minutos.....	81
Figura 2.20 - Análise no MEV, concreto de referência.....	83

Figura 2.21 - Análise no MEV, concreto contendo 25% de cinza de casca de arroz	83
Figura 3.1 - Distribuição granulométrica à laser do cimento	88
Figura 3.2 - Difratoograma da amostra de cimento	89
Figura 3.3 - Difratoograma da amostra de CCAC	89
Figura 3.4 - Difratoograma da amostra de CCAE.....	89
Figura 3.5 - Difratoograma da amostra de Sílica Ativa.....	90
Figura 3.6 - Curva granulométrica do agregado miúdo	93
Figura 3.7 - Curva granulométrica do agregado graúdo.....	93
Figura 3.8 - Corpos-de-prova moldados para os ensaios de resistência à compressão axial, de absorção capilar e de resistividade elétrica aparente	97
Figura 3.9 - Cura dos corpos-de-prova, câmara úmida.....	99
Figura 3.10 - Prensa utilizada no ensaio de resistência à compressão axial	100
Figura 3.11 - Corpos-de-prova posicionados sobre suportes dentro de recipientes com nível de água constante	101
Figura 3.12 - Pesagem de um corpo-de-prova, ensaio de absorção capilar	102
Figura 3.13 - Disposição do corpo-de-prova para rompimento por compressão diametral.....	103
Figura 3.14 - Desenho da distribuição de água de um corpo-de-prova utilizado no ensaio de absorção de água por capilaridade.....	103
Figura 3.15 - Esquema dos corpos-de-prova utilizados no ensaio de REA, pelo método de Wenner.....	104
Figura 3.16 - Circuito do ensaio de REA do concreto	105
Figura 3.17 - Molde utilizado no ensaio de REA do concreto.....	106
Figura 4.1 - Resistência à compressão versus relação a/ag: a) aos 28 dias com 3 dias de cura; b) aos 28 dias com 7 dias de cura; c) 91 dias com 3 dias de cura e d) 91 dias com 7 dias de cura	110-112
Figura 4.2 - Valores médios de absorção capilar para cada mistura, em função da relação a/ag, aos 28 dias de moldagem, cura 3 dias	121
Figura 4.3 - Valores médios de absorção capilar para cada mistura, em função da relação a/ag, aos 28 dias de moldagem, cura 7 dias	121

Figura 4.4 - Valores médios de absorção capilar para cada mistura, em função da relação a/ag, aos 91 dias de moldagem, cura 3 dias	122
Figura 4.5 - Valores médios de absorção capilar para cada mistura, em função da relação a/ag, aos 91 dias de moldagem, cura 7 dias	122
Figura 4.6 - Resistividade elétrica aparente versus idade: a) relação a/ag = 0,35, b) relação a/ag = 0,50 e c) relação a/ag = 0,65.....	130-131
Figura 4.7 - Absorção capilar correspondente aos níveis de resistência à compressão axial de 36,6 MPa e 56,6 MPa, aos 28 dias, para as misturas com prazo de cura de 3 dias.....	142
Figura 4.8 - Absorção capilar correspondente aos níveis de resistência à compressão axial de 36,6 MPa e 56,6 MPa, aos 28 dias, para as misturas com prazo de cura de 7 dias.....	143
Figura 4.9 - Resistividade elétrica aparente correspondente aos níveis de resistência à compressão axial de 36,6 MPa e 56,6 MPa, aos 28 dias, para as misturas com prazo de cura de 3 dias	147
Figura 4.10 - Resistividade elétrica aparente correspondente aos níveis de resistência à compressão axial de 36,6 MPa e 56,6 MPa, aos 28 dias, para as misturas com prazo de cura de 7 dias	147

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Critérios de avaliação da resistividade elétrica – CEB 192	65
Tabela 2.2 - Resistividade do concreto e risco de corrosão, 20°C	66
Tabela 2.3 - Comparação de propriedades químicas da cinza de casca de arroz de diferentes localizações	75
Tabela 3.1 - Valores de dimensão média e do diâmetro equivalente a 10% e 90% de partículas passantes de cimento.....	88
Tabela 3.2 - Caracterização por difratometria de raios x.....	90
Tabela 3.3 - Composição química dos aglomerantes	91
Tabela 3.4 - Caracterização física dos aglomerantes	91
Tabela 3.5 - Ensaio em argamassa do CPV-ARI	91
Tabela 3.6 - Características físicas dos agregados.....	92
Tabela 3.7 - Consumo dos materiais por metro cúbico de concreto	96
Tabela 3.8 - Idade de ensaio, dimensão dos corpos-de-prova e número de camadas (adensamento).....	97
Tabela 3.9 - Dados informativos do ensaio de resistividade elétrica aparente.....	108
Tabela 4.1 - Resultados do ensaio de resistência à compressão axial	110
Tabela 4.2 - Valores de resistência à compressão axial, em relação à mistura de referência	113
Tabela 4.3 - Resultados de absorção capilar aos 28 dias, cura de 3 dias	118
Tabela 4.4 - Resultados de absorção capilar aos 28 dias, cura de 7 dias	119
Tabela 4.5 - Resultados de absorção capilar aos 91 dias, cura de 3 dias	119
Tabela 4.6 - Resultados de absorção capilar aos 91 dias, cura de 7 dias	120
Tabela 4.7 - Resultados do ensaio de resistividade elétrica aparente	130
Tabela 4.8 - Resistividade elétrica aparente, período de 7 para 182 dias.....	133

Tabela 4.9 - Classificação das misturas investigadas quanto à probabilidade de ocorrer corrosão, segundo critérios do CEB 192	134
Tabela 4.10 - Coeficientes “A” e “B” da equação $f_c = A/B^{a/ag}$ e coeficientes de determinação, R^2 , das misturas investigadas para a idade de 28 dias, em cp’s com 3 dias de cura	140
Tabela 4.11 - Coeficientes “A” e “B” da equação $f_c = A/B^{a/ag}$ e coeficientes de determinação, R^2 , das misturas investigadas para a idade de 28 dias, em cp’s com 7 dias de cura	140
Tabela 4.12 - Coeficientes “C” e “D” da equação $A_c = C/D^{a/ag}$, para cada mistura investigada, idade de 28 dias, cura dos cp’s 3 dias	141
Tabela 4.13 - Coeficientes “C” e “D” da equação $A_c = C/D^{a/ag}$, para cada mistura investigada, idade de 28 dias, cura dos cp’s 7 dias	141
Tabela 4.14 - Relações a/ag e absorção capilar (A_c) para os níveis de resistência à compressão de 3,6 MPa e 56,6 MPa, idade de 28 dias	142
Tabela 4.15 - Coeficientes “E” e “F” da equação $\rho = E/F^{a/ag}$, para cada mistura investigada, idade de 28 dias	146
Tabela 4.16 - Relações a/ag e resistividade elétrica (ρ) para os níveis de resistência à compressão de 36,6 MPa e 56,6 MPa, idade de 28 dias	146

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
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al₂O₃	óxido de alumínio
C	cristobalita
CaCl₂	cloreto de cálcio
CaCO₃	carbonato de cálcio
CaO	óxido de cálcio
Ca(OH)₂	hidróxido de cálcio
C₃A	aluminato tricálcico
C₄AF	ferro aluminato tetracálcio
CCA	cinza de casca de arroz
CCAC	cinza de casca de arroz clara
CCAconv	cinza de casca de arroz obtida sem tratamento prévio
CCAE	cinza de casca de arroz escura
CCAqui	cinza de casca de arroz obtida por tratamento químico antes da incineração
CEB	<i>Comité Euro-international du Béton</i>
Cl⁻	íons cloretos
CO₂	dióxido de carbono
COP-15	Conferência das Partes
COST 509	Corrosion and protection of metals in contact with concrete
CP	Cimento Portland
CP-I	Cimento Portland comum
CP-III	Cimento Portland de alto forno
CPB	Cimento Portland branco
Cp's	corpos-de-prova
C-S-H	silicato de cálcio hidratado
CV	cinza volante
∅	diâmetro

EAF	escória de alto forno
Fe₂O₃	óxido de ferro
GEPECON	Grupo de Estudos e Pesquisas em Concreto
H₂O	molécula de água
IRGA	Instituto Rio Grandense do Arroz
K₂O	óxido de potássio
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
MEV	microscópio eletrônico de varredura
µm	micrômetro
mA	miliampère
MgO	óxido de magnésio
MnO	óxido de manganês
mV	milivolts
NaCl	cloreto de sódio
Na₂O	óxido de sódio
Na₂SO₄	sulfato de sódio
NBR	Norma Brasileira
Ω.cm	Ohm.cm
Ω.m	Ohm.m
O₂	gás oxigênio
OH⁻	íons hidroxila ou hidroxila
P₂O₅	pentóxido de difósforo
pH	potencial de hidrogênio ou hidrogeniônico
Q	quartzo
R²	coeficiente de determinação
REA	resistividade elétrica aparente
ρ_v	resistividade elétrica volumétrica
REF	mistura de referência, sem adição mineral
SA	sílica ativa
Sd	desvio padrão
SiO₂	óxido de silício
SO₃	trióxido de enxofre
SrO	óxido de estrôncio
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

TiO₂	óxido de titânio
#	abertura da malha da peneira
10 CCAC	mistura composta por 10% de CCAC, em substituição parcial ao cimento no concreto
20 CCAC	mistura composta por 20% de CCAC, em substituição parcial ao cimento no concreto
30 CCAC	mistura composta por 30% de CCAC, em substituição parcial ao cimento no concreto
10 CCAE	mistura composta por 10% de CCAE, em substituição parcial ao cimento no concreto
20 CCAE	mistura composta por 20% de CCAE, em substituição parcial ao cimento no concreto
30 CCAE	mistura composta por 30% de CCAE, em substituição parcial ao cimento no concreto
10 SA	mistura composta por 10% de SA, em substituição parcial ao cimento no concreto
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	35
1.1 Definição da temática	38
1.1.1 Apresentação do tema	38
1.2 Justificativa	38
1.3 Objetivos	40
1.3.1 Objetivo geral	40
1.3.2 Objetivos específicos.....	40
1.4 Estrutura da dissertação	41
2 REVISÃO DA LITERATURA	43
2.1 Corrosão das armaduras	44
2.1.1 Considerações iniciais.....	44
2.1.2 Corrosão por carbonatação.....	48
2.1.3 Corrosão por cloretos.....	50
2.1.4 Corrosão sob tensão	52
2.2 Absorção capilar do concreto	52
2.2.1 Considerações iniciais.....	52
2.2.2 Fatores que influenciam na absorção capilar	53
2.2.3 Efeitos das adições minerais na absorção capilar do concreto	54
2.2.4 Medidas de absorção capilar.....	56
2.2.4 Determinação da absorção capilar pelo método da NBR 9779:1995.....	56
2.2.4 Determinação da absorção capilar conforme orientação do RILEM TC 116-PCD (1999)	56
2.3 Resistividade elétrica aparente do concreto	57
2.3.1 Considerações iniciais.....	57
2.3.2 Fatores que influenciam na resistividade elétrica.....	59
2.3.3 Efeitos das adições minerais na resistividade elétrica do concreto.....	63
2.3.4 Critérios de avaliação do risco de corrosão, baseado nos valores de resistividade elétrica	65
2.3.5 Medidas de resistividade elétrica	66
2.3.5.1 Método do simples eletrodo	67
2.3.5.2 Método dos dois eletrodos	67
2.3.5.3 Método dos quatro eletrodos (método de Wenner)	68

2.3.5.4 Método da resistividade elétrica volumétrica.....	70
2.4 Cinza de casca de arroz.....	71
2.4.1 Considerações iniciais.....	71
2.4.2 Características da cinza de casca de arroz.....	73
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	85
3.1 Introdução.....	85
3.2 Variáveis da pesquisa.....	86
3.2.1 Variáveis independentes.....	86
3.2.2 Variáveis dependentes.....	86
3.3 Caracterização dos materiais.....	87
3.3.1 Aglomerantes.....	87
3.3.2 Agregados.....	92
3.3.3 Aditivos.....	94
3.3.4 Água.....	94
3.4 Dosagem dos concretos.....	94
3.4.1 Moldagem e cura dos corpos-de-prova.....	96
3.5 Ensaio realizados.....	99
3.5.1 Resistência à compressão axial.....	99
3.5.2 Absorção de água por capilaridade.....	100
3.5.3 Resistividade elétrica aparente.....	104
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	109
4.1 Introdução.....	109
4.2 Análise dos resultados de resistência à compressão axial.....	109
4.3 Análise dos resultados de absorção capilar.....	118
4.4 Análise dos resultados de resistividade elétrica aparente.....	129
4.5 Análise de resultados em igualdade de resistência mecânica.....	139
4.5.1 Avaliação da absorção capilar, estabelecendo níveis de resistência à compressão axial.....	140
4.5.2 Avaliação da resistividade elétrica aparente, estabelecendo níveis de resistência à compressão axial.....	145
5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	151
5.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	153
REFERÊNCIAS.....	155

1 INTRODUÇÃO

O aumento da temperatura média da superfície da terra, denominado aquecimento global, vem sendo um dos temas mais discutidos na atualidade. Nos últimos anos, principalmente após a revolução industrial, alterações climáticas como elevação da temperatura global, retenção de calor na superfície terrestre, alteração no regime de secas e chuvas, derretimento das geleiras dos pólos e, conseqüentemente, a elevação do nível dos oceanos tem sido resultado deste processo. Somando-se a isso, muitos gases, provenientes da atividade antropogênica, têm atuado como verdadeiro catalisador deste fenômeno.

A preocupação com as mudanças climáticas ocorre no âmbito mundial. Conforme citado pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2011), em várias reuniões internacionais, como a Conferência das Partes (COP-15), realizada em Copenhague, em 2009, debateram assuntos a respeito da importância de países em desenvolvimento, como o Brasil, de estabelecer metas para reduzir a emissão de gases causadores do efeito estufa, mesmo que essas medidas acabem interferindo na competição industrial.

Raman et al. (2011) citaram que na produção de cimento se consome muita energia, com elevada emissão de dióxido de carbono (CO₂). Laranjeiras (2002) afirmou que a produção de cada tonelada de clínquer de cimento Portland libera uma tonelada de CO₂ na atmosfera, embora Carvalho (2001 apud ISAIA, 2007) considere que o CP-I¹ fabricado nacionalmente libere aproximadamente 0,8 toneladas de CO₂ por tonelada de clínquer produzido. Contudo, segundo John, Sjöström e Agopyan (2002), somente no Brasil, a indústria cimenteira é responsável pela emissão de mais de 10% do CO₂, proveniente da calcinação dos compostos do cimento, durante a sua fabricação, acrescida da queima de combustíveis fósseis para atingir este fim.

Conforme o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2011), a produção nacional de cimento tem crescido anualmente, tendo chegado a quase 60 milhões de toneladas no ano de 2010. Essa situação é bastante preocupante, tendo

¹ CP-I: cimento Portland comum sem qualquer adição além de gesso.

em vista que o cimento é fundamental para a produção do concreto, que é um dos materiais mais utilizados pelo homem.

Assim, muitas alternativas têm sido pesquisadas para minimizar o consumo energético e o impacto ambiental na produção de insumos como o cimento. De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland, já em 1997, mais de 80% dos cimentos continham algum tipo de adição, pozolânicas ou não, reduzindo os impactos econômicos e ambientais da utilização do cimento. John (1995) citou que os cimentos compostos, por não haver necessidade de calcinação dessas adições minerais, podem reduzir em até 80% o consumo de energia na produção do cimento.

O aproveitamento de resíduos, aliado ao bom desempenho tecnológico de produtos, faz parte do ciclo ideal de produção, em que o descarte deve ser igual ou próximo de zero. Dessa maneira, adições minerais, geradas como resíduos de processos diversos, têm sido utilizadas em concretos com intuito de obter seu próprio reaproveitamento, proporcionando benefícios ambientais, econômicos, estratégicos e, segundo Zerbino, Giaccio e Isaia (2011), produzindo benefícios como o aperfeiçoamento de propriedades mecânicas e de durabilidade² ao material.

Dentre os maiores problemas de durabilidade das estruturas de concreto armado, destaca-se a corrosão das armaduras, que reduz a vida útil das estruturas. Hope, Ip e Manning (1985) afirmaram que a corrosão ocorre em presença de oxigênio e quando há destruição da passividade do aço, que pode ocorrer a partir de uma concentração de íons cloretos. Ela é controlada pela resistividade elétrica do concreto entre o ânodo e o cátodo e pela disponibilidade de oxigênio no cátodo.

A resistividade elétrica é a propriedade elétrica que caracteriza a dificuldade com que os íons se movimentam no concreto, ou seja, ela controla o fluxo que os íons difundem no concreto através da solução aquosa presente nos seus poros, sendo altamente sensível ao teor de umidade de equilíbrio e à temperatura do concreto (HELENE, 1993).

Por ser dependente da microestrutura da pasta, bem como da concentração iônica da solução dos poros, a resistividade elétrica é influenciada pela composição química e teor de cimento, relação água/cimento (a/c), presença de adições minerais, ativadores químicos e aditivos. A relação a/c irá influenciar no teor de

² Durabilidade é a capacidade do concreto de resistir às intempéries e aos demais processos de degradação (SOUZA; OLIVEIRA, 2011).

umidade presente no concreto, ou seja, na facilidade com a qual a água penetra no mesmo.

Van den Heede, Gruyaert e De Belie (2010) salientaram que o estudo da acessibilidade à água e permeabilidade ao ar é fundamental quando se ambiciona analisar os parâmetros de durabilidade do concreto.

Neville (1997) considerou que muitas propriedades do concreto, referentes à durabilidade, são aprimoradas pelo incremento de adições minerais. Esses minerais constituem-se em grande parte de subprodutos industriais e resíduos agroindustriais que, muitas vezes, sem destinação específica, acabam por causar danos ao meio ambiente. Quando finamente particuladas muitas destas adições minerais apresentam propriedades cimentíceas e pozolânicas, alterando a microestrutura de concretos e contribuindo com a durabilidade do material, além de proporcionar reaproveitamento de resíduos e diminuir a emissão de CO₂ produzida no processo de fabricação do cimento.

A cinza de casca de arroz (CCA), antes considerada resíduo agroindustrial sem aproveitamento, vem sendo alvo de estudos que apontam a possibilidade de seu emprego em concretos. Autores têm constatado melhorias não só nas propriedades mecânicas como também nas características de durabilidade.

De acordo com o Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA, 2011), a safra brasileira 2010/2011 foi de 13,1 milhões de toneladas do produto. Somente no Estado do Rio Grande do Sul, a produção foi de 8,5 milhões de toneladas de arroz na mesma safra, constituindo-se esse estado no principal produtor brasileiro deste cereal. Deste montante, significativas quantidades de cinzas são geradas através de processos de combustão da casca de arroz.

No entanto, apesar da quantidade disponível da cinza da casca de arroz, especialmente no estado do Rio Grande do Sul, sua aplicação no concreto pode sofrer dificuldade de aceitação no meio técnico quando apresentar coloração enegrecida, quando empregadas cinzas com elevado teor de carbono grafítico. Além disso, para apresentar cinzas amorfas, há necessidade de queima em fornos com controle de temperatura, o que muitas vezes não ocorre. Também há o custo de moagem envolvido para melhoria da pozolanicidade da CCA, o que eleva o seu valor comercial.

Todavia, há toda a problemática ambiental envolvida, em que alternativas sustentáveis se apresentam como fundamentais à sobrevivência do planeta.

Segundo Isaia (2007), o crescimento do nível de exigência das sociedades, especialmente das mais avançadas, resultou em um consumo de recursos naturais muito além de aquele que a natureza é capaz de oferecer, aumentando também a geração de resíduos e a poluição. Nesse sentido, Mehta (1994 apud ISAIA, 2007) alertou que os ecossistemas terrestres ficaram sob grande pressão pelo impulso do aumento da população e dos avanços tecnológicos.

1.1 Definição da temática

1.1.1 Apresentação do tema

O tema proposto consistiu no estudo do concreto com diferentes adições minerais: cinza de casca de arroz com diferentes teores de carbono grafítico e sílica ativa (SA). Teve como premissa avaliar o desempenho dessas adições minerais comparando os concretos frente à resistência à compressão, à absorção capilar e à resistividade elétrica.

1.2 Justificativa

A produção brasileira de arroz é bastante significativa, especialmente no estado do Rio Grande do Sul, o que proporciona uma quantidade expressiva de cinzas provenientes de processos como a queima da casca deste cereal. Segundo Prudêncio, Santos e Dafico (2003), a cinza representa aproximadamente 4% em peso do arroz em casca. Deste modo, somente no Brasil, entre os anos de 2010 e 2011, podem ter sido geradas mais de 500 mil toneladas de cinza de casca de arroz, por processos de queima da casca, já que a safra nacional 2010/2011 foi de 13,1 milhões de toneladas de arroz em casca (IRGA, 2011). Para Amato (2002 apud MEIRA, 2009) pode-se obter a energia de um barril de petróleo com a queima de

500 kg de CCA, ou seja, seria possível gerar uma pequena parcela da energia elétrica brasileira com a queima da casca de arroz em termoelétricas.

A cinza de casca de arroz, resultante de um processo de queima controlada, apresenta características de reatividade hidráulica, possibilitando a sua utilização no concreto, conferindo-lhe condições de durabilidade (COUTINHO, 2003; SARASWATY; SONG, 2007; ZANG; MALHOTRA, 1996). Todavia, mesmo através de diferentes processos de queima não controlada, Rêgo et al. (2004) constataram que as cinzas de casca de arroz apresentam características físicas e químicas que demonstram uma grande viabilidade para sua utilização como adição mineral ao cimento.

No entanto, a aplicação da CCA em concretos pode fornecer uma cor enegrecida à mistura, quando utilizadas cinzas de elevado teor de carbono grafítico, além de haver necessidade da queima desse mineral em fornos com controle de temperatura para que apresente estrutura amorfa, o que muitas vezes não ocorre. Também há o custo de moagem envolvido para obtenção da pozzolanicidade da CCA, o que eleva o seu valor comercial.

Contudo, muitas pesquisas têm sido realizadas com a utilização de adições minerais em concretos, como a cinza de casca de arroz, visando o aperfeiçoamento de características relativas à durabilidade do material. Dessa forma, pode-se associar qualidade ao material com redução de resíduos de processos industriais e agroindustriais, proporcionando benefícios ambientais e redução da emissão de CO₂ gerado pelas cimenteiras, durante a fabricação do cimento.

Assim, esta pesquisa consistiu no estudo experimental de propriedades ligadas à durabilidade de concretos que utilizam cinza de casca de arroz, com diferentes teores de carbono grafítico, sendo essas cinzas obtidas como resíduos de processos de geração de energia, além de sílica ativa, para comparação de resultados.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta dissertação é fornecer subsídios técnicos e científicos referentes a parâmetros de durabilidade do concreto, tendo como objetivo estudar a influência que a substituição de parte do cimento por cinza de casca de arroz exerce sobre algumas propriedades do material, em especial a absorção capilar e a resistividade elétrica aparente (REA), buscando determinar qual teor proporcionou as melhores características.

1.3.2 Objetivos específicos

A presente dissertação teve os seguintes objetivos específicos:

a) verificar se a adição de cinza de casca de arroz traz benefícios relacionados à durabilidade de concretos, particularmente relativos à absorção de água por capilaridade e resistividade elétrica aparente;

b) determinar em que medida o teor CCA influencia na absorção capilar e resistividade elétrica aparente do concreto;

c) estudar como varia a absorção capilar e a resistividade elétrica aparente à medida que ocorre uma elevação na relação a/ag^3 e idade das misturas utilizadas;

d) comparar as cinzas com diferentes teores de carbono gráfico entre si, perante as propriedades investigadas;

e) analisar como se comporta a absorção capilar e a resistividade elétrica aparente dos concretos a partir de um patamar de resistência à compressão axial especificado; e

f) estimar a mistura de melhor benefício, em relação às propriedades estudadas.

³ Aglomerante: para a mistura de referência, cimento. Para as demais misturas investigadas, cimento mais a adição mineral utilizada.

1.4 Estrutura da dissertação

A seguir, será relatado como foi composto este trabalho.

No capítulo 1, Introdução, comenta-se a importância da substituição de cimento por adições minerais, como a cinza de casca de arroz, em relação à sustentabilidade, à problemática ambiental e às características de durabilidade de concretos, e expõe-se a definição da temática deste trabalho, a justificativa e os objetivos que nortearam esta pesquisa. Também se mostra como está dividido e organizado este estudo.

No capítulo 2, Revisão da literatura, é feita uma abordagem dos aspectos relacionados à corrosão em estruturas de concreto armado, com ênfase nos processos de carbonatação e penetração de cloretos. Além disso, são discutidas propriedades de concretos como absorção de água por capilaridade e resistividade elétrica aparente. Generalidades sobre a cinza de casca de arroz também são verificadas nesse capítulo.

No capítulo 3, Programa experimental, identifica-se quais são as variáveis desta pesquisa, a caracterização dos materiais envolvidos, a dosagem dos concretos e os ensaios realizados, com a respectiva metodologia aplicada.

No capítulo 4, Análise e discussão de resultados, são explanados e debatidos os resultados dos ensaios realizados, comparando-os entre si, e analisando teoricamente os valores obtidos.

Por fim, no capítulo 5, Conclusões e considerações finais, são destacados os comentários sobre os resultados obtidos neste estudo e as sugestões para pesquisas futuras.

2 REVISÃO DE LITERATURA

O concreto é o material mais utilizado na construção civil em todo o mundo, tendo como principal atrativo suas características de durabilidade e resistência. Essas características são alcançadas quando o material é devidamente proporcionado e executado. Assim, grande parte dos pesquisadores que trabalham com estruturas de concreto tem se preocupado na obtenção de materiais de elevado desempenho mecânico e, além de tudo, duráveis.

Bertolini (2010) mencionou que uma estrutura só pode ser considerada durável se sua vida útil⁴ for pelo menos igual à vida útil requerida na fase de projeto, sendo necessários alguns parâmetros para conseguir esta condição, como a definição da vida útil de projeto e condições ambientais em que estará submetida à estrutura, à avaliação dos efeitos do ambiente e à prevenção da degradação dos materiais, à escolha de materiais que não comprometam a funcionalidade da própria estrutura e à formulação de normas tanto sobre os materiais como sobre as modalidades de execução da estrutura.

Segundo Bryant Jr., Weyers e Garza (2009) cinco fatores podem afetar a durabilidade do concreto: os materiais constituintes, as práticas construtivas, as propriedades físicas, as condições ambientais de exposição e as condições de carregamento.

Qualquer que seja o processo de deterioração – das armaduras, gelo e degelo, ataque por sulfatos, agregado reativo – a degradação do concreto envolve processo de penetração e subsequentemente movimento de ar, água, ou outros fluidos transportando agentes agressivos para o interior do material pelo sistema de poros (BRYANT JR.; WEYERS; GARZA, 2009).

Num processo corrosivo, uma vez destruída a camada passivadora do concreto, o fenômeno será controlado pela resistividade elétrica e pela disponibilidade de oxigênio. As propriedades elétricas do concreto são dependentes da quantidade de água livre presente no concreto, do tipo e teor de material

⁴ Período durante o qual a estrutura é capaz de garantir não apenas sua estabilidade mas todas as funções para as quais foi projetada (BERTOLINI, 2010). Segundo a NBR 15.575-1:2010, vida útil é o “período de tempo durante o qual o edifício (ou seus sistemas) mantém o desempenho esperado, quando submetido às atividades de manutenção predefinidas em projeto”.

aglomerante, da relação a/ag, e da quantidade de agregados (WHITING; NAGI, 2003). A quantidade de solução aquosa e a mobilidade dos íons são diretamente ligadas à porosidade e à estrutura dos poros da pasta de cimento endurecido e, portanto, relacionadas à permeabilidade⁵ do concreto (BRYANT JR.; WEYERS; GARZA, 2009).

Com o propósito de nortear a investigação, apresenta-se, brevemente, a caracterização do fenômeno da corrosão das armaduras do concreto, a absorção de água por capilaridade, a resistividade elétrica aparente e a adição mineral a ser investigada neste trabalho, ou seja, a cinza de casca de arroz.

2.1 Corrosão das armaduras

2.1.1 Considerações iniciais

Várias podem ser as causas de degradação do concreto: problemas no projeto; execução da estrutura mal realizada; ação do ambiente sobre a estrutura; ações mecânicas imprevistas; exposição do material às altas temperaturas; entre outras.

Os códigos e normas relativos à durabilidade do concreto, em geral, contém restrições quanto aos materiais a serem utilizados, a resistência mecânica da estrutura, os limites de substâncias deletérias, como cloretos e sulfatos, as limitações de fissuras e as recomendações a partir da classe de exposição do material (ANDRADE, 2010). No entanto, as maiores causas da perda da durabilidade das estruturas de concreto armado estão relacionadas com a corrosão das armaduras.

De modo geral, a corrosão dos metais é distinguida em: i) corrosão úmida, em que os materiais metálicos entram em contato com soluções aquosas, como água doce, água do mar, soluções ácidas ou alcalinas ou encontram-se em ambientes

⁵ Segundo Rêgo e Figueiredo (2002), a permeabilidade é o principal fator responsável pela durabilidade dos concretos

que contenham água ou umidade; ou ii) corrosão seca, que ocorre sob alta temperatura. Para o concreto em condições normais de utilização, apenas tem relevância os fenômenos da corrosão úmida (BERTOLINI, 2010).

A corrosão de metais em um ambiente úmido ocorre através de um processo eletroquímico, conforme esquema proposto por Pedeferrri (2003 apud BERTOLINI, 2010) (Figura 2.1). São verificados quatro processos:

- uma reação anódica de oxidação do metal, que propicia a formação de produtos de corrosão e torna disponíveis elétrons na rede cristalina do metal;
- uma reação catódica, que consome os elétrons produzidos pelo processo anódico;
- fluxo de corrente no metal, produzida pelo deslocamento de elétrons na rede cristalina do metal; e,
- circulação de corrente no ambiente, devido à migração elétrica dos íons dissolvidos na solução líquida em contato com o metal.

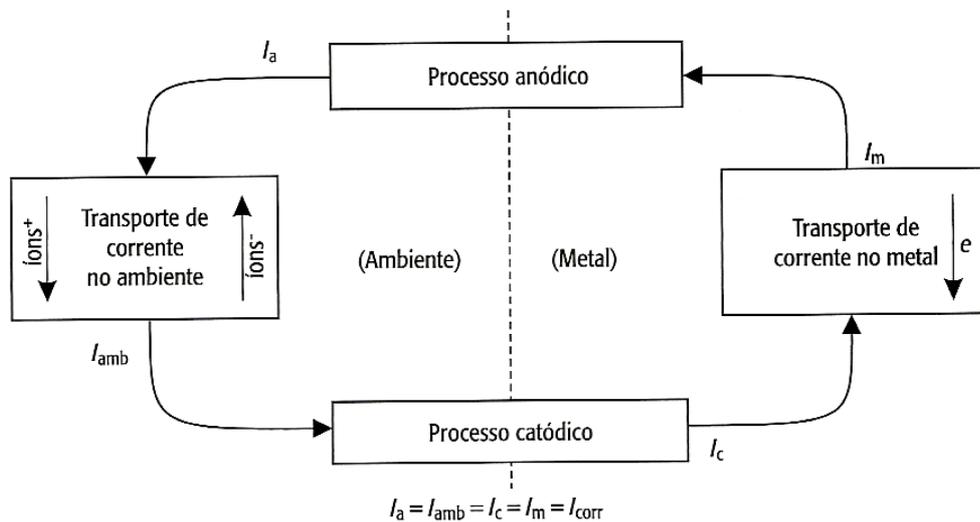


Figura 2.1 – Esquemática do processo eletroquímico da corrosão. (PEDEFERRI, 2003 apud BERTOLINI, 2010, p. 51).

O concreto protege as armaduras de aço em seu interior tanto por ação física como por ação química, devido à sua alta alcalinidade. A solução alcalina contida nos poros da pasta de cimento desenvolve condições de estabilidade à película

passivadora que protege as armaduras de aço do processo corrosivo no concreto. A corrosão das armaduras pode ser induzida pela carbonatação ou penetração de cloretos (CARVAJAL et al., 2005; PEDEFERRI; BERTOLINI, 1996), e pela presença de umidade e oxigênio (MIYAZATO; OTSUKI, 2010). Em um pequeno número de ocorrências, pode-se constatar a presença da corrosão por correntes de fuga ou, em aços de alta resistência, empregados em concreto protendido, por fragilização por hidrogênio (BERTOLINI, 2010).

Conforme se visualiza na Figura 2.2, a corrosão pode ser generalizada (por carbonatação), localizada por pites (cloretos) ou localizada sob tensão fraturante (sem uma causa diretamente identificada, geralmente verificada em concretos protendidos).

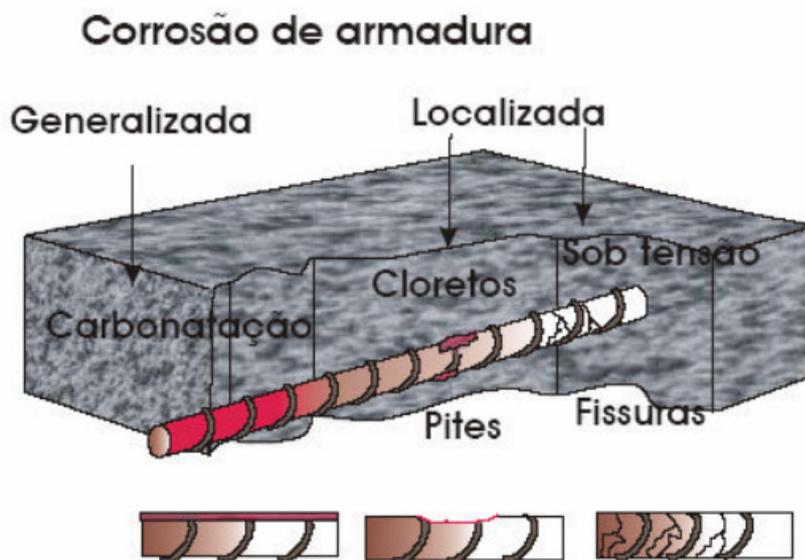


Figura 2.2 – Tipos de corrosão e fatores determinantes do processo (CASCUDO, 1997, p. 19).

Basheer et al. (2002) descrevem a corrosão ocorrendo quando a alcalinidade do concreto é reduzida, pelo fenômeno da carbonatação, pelo da lixiviação dos álcalis ou da presença de quantidade significativa de íons cloreto (Cl⁻) no concreto. Hope, Ip e Manning (1985) relatam que a despassivação do aço pode ocorrer na presença de íons cloreto, num limiar de 0,15% na massa de cimento, verificando-se principalmente em estruturas marinhas ou estruturas de concreto construídas com agregados contaminados de íons cloretos.

Para a ocorrência de corrosão, é necessária:

- a presença de um eletrólito, como a água ou produtos de hidratação do cimento (hidróxido de cálcio – $\text{Ca}(\text{OH})_2$);
- a existência de oxigênio, necessário para formação da ferrugem (óxido/hidróxido de ferro), assim como eletrólito (umidade) e presença de hidróxido de cálcio;
- a possibilidade de haver agentes agressivos, que não permitem a formação ou rompem a película de passivação do aço. Dentre estes, podem ser encontrados íons sulfetos, cloretos, dióxido de carbono, gás sulfídrico, óxidos de enxofre, nitritos entre outros; e,
- a existência uma diferença de potencial, que pode ser provocada por presença de umidade, concentração de sais ou tensões no concreto.

As diferenças de potencial podem ter origem em alterações do ambiente do concreto, por exemplo, quando uma parte está imersa em água do mar e outra parte está exposta a ciclos de molhagem e secagem. Por diferença de concentração salina na água dos poros ou devido ao acesso não uniforme de oxigênio, há formação de células eletroquímicas, conforme ilustrado por Cascudo (1997) (Figura 2.3).

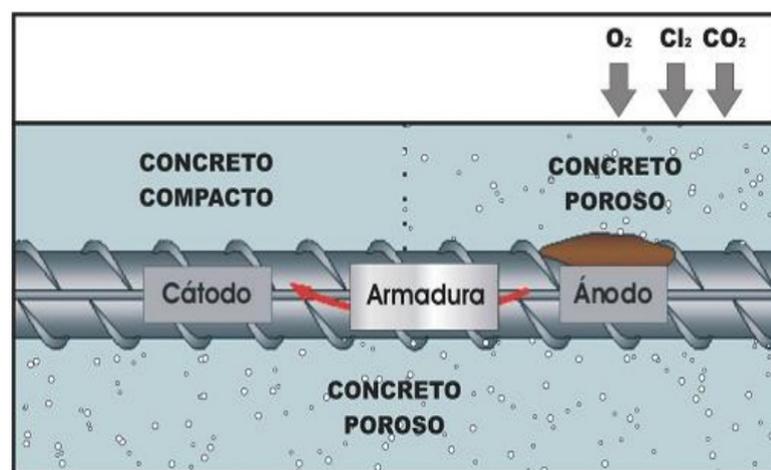


Figura 2.3 – Efeitos do maior ou menor acesso de oxigênio (CASCUDO, 1997, p. 54).

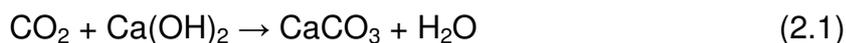
Não há corrosão em concreto seco, assim como, na maioria dos casos, não há corrosão de concreto completamente imerso (saturado). A umidade relativa ótima para corrosão é entre 70% e 80% (CASCUDO, 1997).

A corrosão das armaduras gera produtos expansivos nas armaduras com perda da seção resistente da mesma. A formação de produtos expansivos leva à fissuração do concreto e posterior lascamento do material, o que facilita o acesso de agentes agressivos à estrutura.

Concretos de má qualidade e executados com pequena espessura de cobertura são mais suscetíveis ao fenômeno da corrosão, pois facilitam os mecanismos de transportes de substâncias deletérias que desencadeiam este processo.

2.1.2 Corrosão por Carbonatação

Na carbonatação, o CO_2 reage com a água contida no concreto formando o ácido carbônico, que, por sua vez, interage com o Ca(OH)_2 , produzindo carbonato de cálcio (CaCO_3), o qual diminui o pH (potencial de hidrogênio ou hidrogeniônico) da solução aquosa, conduzindo-o a valores próximos da neutralidade. Carvajal et al. (2005) comentaram que, pela carbonatação, há uma redução do pH da solução dos poros do concreto de 12,6 a valores menores que 9, com destruição do filme de passivação do aço, aumentando o risco de corrosão. A reação de carbonatação, que se produz em solução aquosa através de várias reações intermediárias, pode ser resumida assim:



Dessa forma, o aço no concreto carbonatado não está mais protegido pela camada de passividade. Se o concreto está contaminado por cloretos, a carbonatação também causa a liberação, na solução dos poros, dos cloretos que estavam ligados à matriz do cimento (BERTOLINI, 2010).

No processo de carbonatação, o CO_2 penetra do meio externo para o interior do concreto, através do sistema de poros do material, por difusão (CARVAJAL et al., 2005; KAZMIERCZAK; HELENE, 1993). Quando a frente de carbonatação atinge a superfície do aço despassivado, começa o processo corrosivo, numa fase denominada ativação (Figura 2.4).

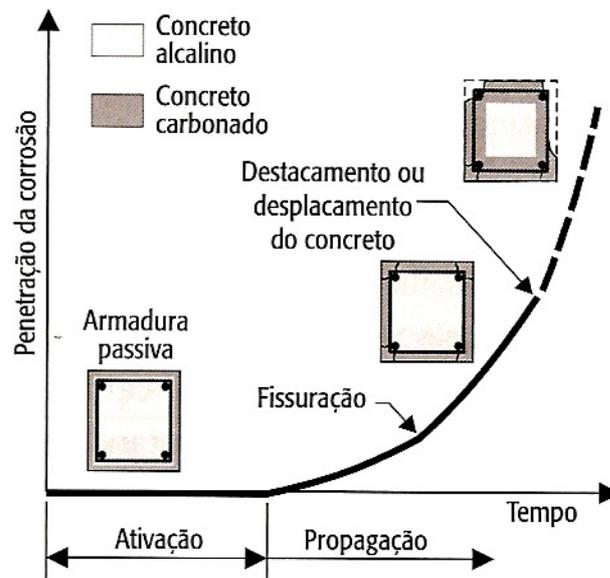


Figura 2.4 – Evolução da degradação de uma estrutura de concreto armado, devido à corrosão por carbonatação (BERTOLINI, 2010, p. 140).

A propagação da corrosão forma produtos expansivos no aço, de duas a seis vezes o tamanho original da seção do material, podendo causar fissuração, lascamento e desprendimento do revestimento da armadura. À medida que evolui essa situação, pode haver comprometimento da capacidade estrutural da estrutura de concreto armado, além de a mesma ficar suscetível à penetração de agentes deletérios.

De acordo com Cascudo (1997), em concretos carbonatados, a armadura pode se comportar como se estivesse exposta à atmosfera, sem qualquer proteção, com o agravante de que a umidade permanece no interior do concreto por mais tempo do que se estivesse exposta ao ar.

A reação de carbonatação é controlada pelo ingresso de CO_2 por difusão no sistema de poros do concreto. O tipo de cimento e relação a/ag são fatores que

afetam a difusão do CO_2 (CARVAJAL et al., 2005). Cimentos com alta quantidade de álcalis resultam em elevada concentração de hidróxidos alcalinos na solução dos poros do concreto, propiciando redução na difusão do CO_2 (ISAIA; GASTALDINI, 2005). Cimentos que liberam mais Ca(OH)_2 desenvolvem menores velocidades de carbonatação, por apresentarem maior reserva alcalina no concreto.

A velocidade de corrosão por carbonatação depende das condições ambientais (concentração de CO_2 , umidade relativa do ambiente), da disponibilidade de oxigênio e de água (umidade) na superfície do aço.

Segundo Helene (1993) a carbonatação é um processo lento, pois os produtos dessa reação tendem a diminuir com o tempo, haja vista que a permeabilidade ao CO_2 se reduz com a carbonatação do concreto, que tende a colmatar os poros e capilares.

Entretanto, através da lixiviação ou do emprego de pozolanas, pode ocorrer o esgotamento do Ca(OH)_2 , tendo início a carbonatação do C-S-H (silicato de cálcio hidratado), o que acarretaria prejuízos à integridade do concreto (NEVILLE, 1997).

2.1.3 Corrosão por cloretos

O processo de deterioração de estruturas de concreto expostas à corrosão ambiental contendo íons cloretos pode ser geralmente classificado em quatro estágios: estágio de iniciação, propagação, aceleração e deterioração (MARUYA et al., 2003).

A corrosão por pites (cavidades) acontece quando há um rompimento localizado de um filme de passividade em um material passivo, através de uma concentração-limite suficiente de íons cloretos para que haja essa ruptura. Este tipo de corrosão, induzida por cloretos, é localizada em um pequeno ânodo, escarificando o aço. Ocorre freqüentemente em zonas marinhas ou com presença de sais de degelo, a base de cloretos (cloreto de sódio, NaCl ou cloreto de cálcio, CaCl_2).

Quanto maior o teor de cloretos e oxigênio no ambiente, maior a chance de corrosão por pites. A ativação dos pites cresce com a elevação do pH e aumento no tempo de permanência em contato com o ambiente agressivo (BERTOLINI, 2010).

Zarzar Júnior, Oliveira e Bittencourt (2011) verificaram que o tempo inicial de corrosão por íons cloretos e a vida útil em serviço aumentaram com a redução da relação água/cimento. No entanto, Miyazato e Otsuki (2010) observaram que uma baixa relação água/cimento não é necessariamente garantia de uma baixa relação de corrosão por cloretos, caso o concreto localize-se em ambientes que contenham íons cloretos e que sejam submetidos a repetidos ciclos seco/úmido.

Helene (1993) citou que o elevado teor de cloretos, aliado à grande mobilidade dos mesmos, gerado pela ação de um campo eletroquímico e ocasionado pela pilha de corrosão, pode acelerar o processo corrosivo, de maneira significativa.

Os cloretos totais do concreto são encontrados sob duas formas: cloreto livre, na água dos poros, como íon, solúvel ou dissociável e cloreto combinado, como parte das fases hidratadas do cimento. O cloreto livre é o agressivo à armadura, enquanto o cloreto combinado geralmente se encontra unido na forma de cloroaluminato conhecido como sal de Friedel (HELENE, 1993). Todavia, fenômenos como carbonatação (Figura 2.5), elevação da temperatura ou ação de sulfatos podem proporcionar a liberação de cloretos combinados, passando à condição de cloretos livres.

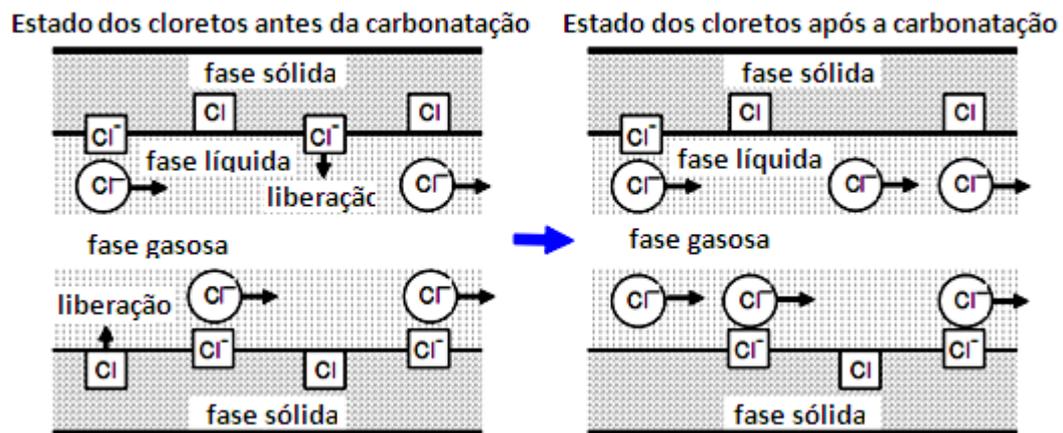


Figura 2.5 – Liberação de íons cloretos da fase sólida por carbonatação (MARUYA et al., 2003, p. 149).

Bertolini (2010) citou que a penetração de cloretos depende das propriedades e da microestrutura do concreto, do mecanismo de transporte das soluções em que

os cloretos estão dissolvidos (difusão, absorção capilar, permeação e migração), da concentração de cloretos, da espessura da camada de cobertura da armadura e das condições locais de exposição da estrutura.

A corrosão por cloretos constitui-se num ataque bastante insidioso, que pode ser ou tornar-se grave e perigoso por ser extremamente localizado, pois a zona anódica (área de ruptura do filme passivo) é geralmente muito pequena e circundada por uma grande área ainda passiva, com função de cátodo.

2.1.4 Corrosão sob tensão

É um processo que se verifica geralmente em estruturas de concreto protendido, porém muito raramente, devido à pouca suscetibilidade de combinações para ocorrência desse fenômeno no âmbito da construção civil. Como as cargas aplicadas às armaduras de concreto protendido são elevadas, as conseqüências desse tipo de corrosão podem ser mais graves, se comparadas ao concreto convencional.

Esse tipo de corrosão inicia-se pela formação de uma fissura que pode ser gerada através da combinação de um ambiente pouco agressivo e de uma solicitação de tração. Bertolini (2010) explicou que essa fissura pode se propagar através de dois mecanismos: propagação da ponta da fissura, pelo processo anódico de dissolução do metal, e ruptura mecânica do ápice (ponta) da fissura por hidrogênio, que pode ser produzido pela reação catódica.

2.2 Absorção capilar do concreto

2.2.1 Considerações iniciais

A absorção capilar está diretamente relacionada à durabilidade de estruturas de concreto armado. Através dos mecanismos de transportes de líquidos no interior

do material, pode haver condução de substâncias deletérias como sais e outros agentes agressivos, que podem levar à corrosão das armaduras.

A absorção capilar é um fenômeno que ocorre em estruturas porosas e consiste na ação de forças de atração dos poros da estrutura sobre os líquidos que estão em contato com a superfície (NEVILLE, 1997). A absorção capilar caracteriza-se pelo transporte de líquidos devido à tensão superficial que atua nos poros capilares do concreto, dependendo das características do líquido e do sólido poroso e, segundo Helene (1993), necessita que os poros do material estejam secos ou parcialmente secos para que ocorra.

Conforme explanado por Neville (1997), mesmo na direção vertical, os líquidos deslocam-se através da força de atração dos poros capilares às moléculas que se encontram na sua superfície e que acabam por atrair as moléculas adjacentes, ocorrendo esse processo até que as forças de atração dos capilares se equilibrem pelo peso do líquido.

Substâncias como cloretos, que ocasionam despassivação do aço, podem penetrar no concreto através da rede de poros, estando o concreto em ambientes que contenham este elemento. Muitas vezes os cloretos podem se encontrar na superfície de concretos, na fase sólida, e, na presença de chuvas ou umidade, se dissolvem aquosamente, sendo conduzidos ao interior do material.

Apesar da absorção capilar não ser parâmetro de qualidade de concretos, Neville (1997) afirmou que a maioria dos bons concretos tem absorção bem abaixo de 10% em massa. Para Kosmatka et al. (2002 apud SAFIUDIN; WEST; SODKI, 2010) a absorção de água de concretos de alta qualidade é usualmente menor que 5%.

2.2.2 Fatores que influenciam na absorção capilar

A absorção capilar depende da viscosidade, densidade e tensão superficial do líquido, assim como da saturação, raio, tortuosidade e continuidade dos capilares do material poroso. A estrutura, tamanho e interconexão de poros são determinantes nos mecanismos da absorção capilar. Poros menores apresentam maior pressão e

altura de ascensão capilar que poros maiores, no entanto esse fato apenas se consolida se os poros estiverem conectados entre si.

De maneira geral, poros de menor diâmetro favorecem uma absorção capilar mais rápida pelo concreto, pelo aumento da pressão exercida (CASCUDO, 1997; MEHTA; MONTEIRO, 1994). No entanto, Ho e Lewis (1987 apud KIRCHHEIM, 2003) afirmaram que uma absorção rápida indica a existência de capilares maiores com menor profundidade e maior quantidade de água absorvida, inversamente à absorção lenta, que indica a existência de capilares de pequenos diâmetros, com maior profundidade atingida.

Helene (1993) relatou que concretos com menores relações a/ag apresentam capilares de menor diâmetro e menor interconexão, com menor absorção e profundidade de penetração de água, demonstrando que a interconexão dos poros exerce maior influência que seu diâmetro no processo de absorção capilar. No mesmo estudo, o autor considerou que não pode haver absorção capilar em concretos saturados, sendo importante verificar o grau de saturação do concreto.

Há uma grande dificuldade em controlar o fenômeno da absorção capilar, pois depende não só do diâmetro dos capilares, como também da continuidade dos mesmos. No entanto, a absorção capilar pode ser controlada com o uso de aditivos incorporadores de ar, que permitem interromper a comunicação entre os poros pela incorporação de bolhas em seu interior, reduzindo a capilaridade do conjunto.

2.2.3 Efeitos das adições minerais na absorção capilar do concreto

Materiais granulares com origem mineral têm sido empregados em concretos com objetivo de melhorar as propriedades do material. São denominados de adições minerais, podendo ser classificados de cimentantes, como a escória de alto forno ou pozolanas, como a cinza volante e a cinza de casca de arroz. Minerais de granulometria mais fina que o cimento acabam fragmentando a percolação de água na pasta de cimento, reduzindo a exsudação e segregação no concreto (FURQUIM, 2006).

Quando utilizadas em substituição parcial ao cimento no concreto, as adições minerais atuam, por meio das reações pozolânicas, sobre a estrutura da pasta do

material, reduzindo o tamanho dos poros e refinando o tamanho do grão. Tais efeitos foram observados por Metha e Monteiro (1994). Vazios capilares grandes foram preenchidos por partículas de pozolana, através da formação dos produtos de hidratação secundários (C-S-H), tornando o material microporoso (refinamento dos poros). Os autores também verificaram o refinamento do tamanho do grão, ou seja, a formação de nucleação de hidróxido de cálcio ao redor de pequenas e finas partículas pozolânicas, formando numerosos, pequenos e menos orientados cristais de hidróxido de cálcio, com produtos de reação pouco cristalinos.

Da mesma forma, Metha e Aïtcin (1990 apud FURQUIM, 2006) verificaram que, por serem menos reativas que o cimento, as pequenas partículas de pozolanas provocam locais de nucleação dos produtos de hidratação, tornando a pasta mais homogênea e os poros do material mais finos. Por efeito físico, o “empacotamento com o cimento” originado das pequenas partículas reduz o efeito parede da zona de transição, aumentando a resistência do concreto. Todavia, Isaia (1995) salientou que a resistência mecânica obtida pelo incremento das adições minerais em concretos é menos relevante que a redução da absorção de água provocada.

Isaia e Gastaldini (2005) salientaram que as adições minerais resultam em refinamento dos poros do concreto, com desconexão de poros capilares e redução da permeabilidade do material.

Segundo Bakar, Putrajaya e Abdulaziz (2010) o efeito de “empacotamento” foi observado no emprego de cinza de casca de arroz em concretos, reduzindo o volume dos poros do material e, conseqüentemente, provocando a diminuição da absorção capilar.

Assim, constata-se que, com o incremento de adições minerais, alterações provocadas na estrutura dos poros e porosidade da pasta podem tornar o concreto menos suscetível à percolação de agentes agressivos em seu interior. No entanto, o tipo e teor de adição mineral devem ser cuidadosamente estudados, pois, por serem partículas mais finas que o cimento, apresentam maior superfície específica, necessitando aditivos ou maior quantidade de água para manter a mesma trabalhabilidade das misturas, para um mesmo nível de resistência estimada. Desta maneira, poderia haver o comprometimento da durabilidade do concreto, além de ultrapassar os limites da relação a/ag estabelecido pela NBR 12655:2006, de acordo com a ambiente de exposição da estrutura.

2.2.4 Medidas de absorção capilar

2.2.4.1 Determinação da absorção capilar pelo método da NBR 9779:1995

A absorção capilar é medida através da diferença de massa de corpos-de-prova (cp's) cilíndricos, submetidos a um nível de água constante, no qual os cp's são pesados num período de 3h, 6h, 24h, 48h e 72h em relação à sua massa inicial, de acordo com a NBR 9779:1995, a qual avalia a absorção capilar de água em concretos endurecidos.

Cabe ressaltar que, antes do início do ensaio, cada corpo-de-prova deve ser seco em estufa à temperatura de $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$, até a constância de massa. Após, os mesmos deverão ser resfriados ao ar à temperatura de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e, a partir de então, determina-se a massa inicial de cada corpo-de-prova.

No final do ensaio, os corpos-de-prova são rompidos por tração na compressão diametral, seguindo-se a leitura do nível de ascensão capilar, em cm. A unidade absorção capilar é dada em g/cm^2 .

2.2.4.2 Determinação da absorção capilar conforme orientação do RILEM TC 116-PCD (1999)

Este ensaio consiste em imergir uma das faces de cada corpo-de-prova cilíndrico (15 x 5 cm) em água, de maneira que atinja um cobrimento de 3,0 mm de sua superfície lateral, que deve ser previamente selada com verniz poliuretânico, durante a etapa de pré-condicionamento. A camada de verniz na face curva dos corpos-de-prova é aplicada com o propósito de que a absorção capilar ocorra somente pela face do corpo-de-prova em contato com a água. A face superior dos corpos-de-prova deve receber uma proteção tipo capuz plástico, de modo a evitar a pressão do ambiente sobre os poros do material. Na Figura 2.6 observa-se o

esquema de realização do ensaio de absorção capilar pelo método do RILEM TC 116-PCD (1999), conforme ilustrado por Barin (2008).

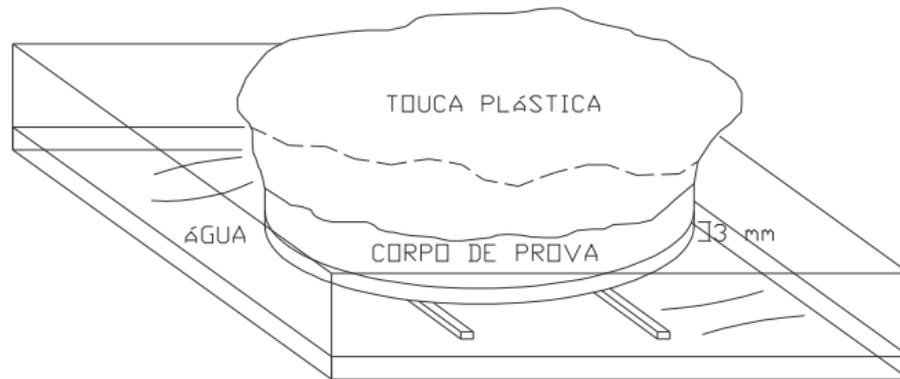


Figura 2.6 – Esquema de realização do ensaio de absorção capilar pelo método do RILEM TC 116-PCD 1999 (BARIN, 2008, p. 100).

Realiza-se a pesagem dos corpos-de-prova antes da imersão em água e posteriormente a esse procedimento, em intervalos de tempo de 10 minutos, 1 hora, 4 horas e 24 horas, sendo a superfície dos corpos-de-prova em contato com a água levemente seca antes de cada pesagem, a fim de remover o excesso de água. A absorção capilar é obtida através da diferença entre a massa em que o corpo-de-prova permaneceu em contato com a água, no tempo considerado, e sua massa inicial, antes do início do ensaio, expressa em g/m^2 .

2.3 Resistividade elétrica aparente do concreto

2.3.1 Considerações iniciais

A resistividade elétrica é uma importante propriedade do concreto, pois controla a passagem de corrente elétrica pelo material, interferindo diretamente na durabilidade de estruturas de concreto armado. A unidade de resistividade elétrica é usualmente o Ohm x metro ($\Omega \cdot \text{m}$).

Esbach e Souders (1975) definiram a resistividade elétrica como sendo a resistência elétrica de um condutor de volume unitário e seção constante, quando submetido a uma corrente contínua e uniformemente distribuída.

Segundo Polder (2001) a resistividade elétrica é uma propriedade que descreve a resistência elétrica relacionada entre uma voltagem aplicada e a corrente resultante em uma pilha elétrica unitária, indicando uma baixa resistividade às estruturas que apresentam alto risco de corrosão e necessitam proteção da armadura. Observa-se, na Figura 2.7, a formação de uma pilha de corrosão. Concretos com elevado nível de corrosão apresentam baixos valores de resistividade elétrica (LIM; NOGUCHI; SHIN, 2010).

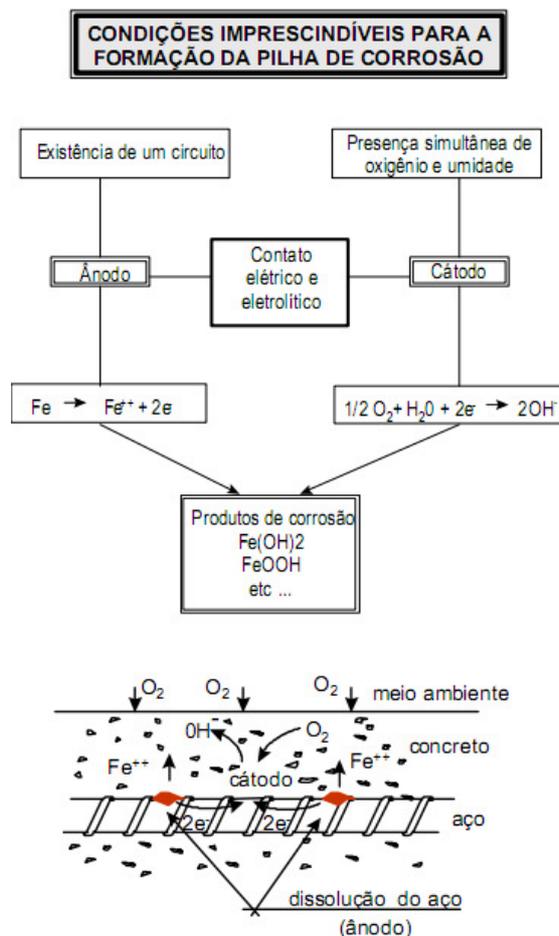


Figura 2.7 – Formação de uma pilha de corrosão - adaptação (MOSKVIN, 1983; ANDRADE, 1995 apud ABREU, 1998, p. 8).

Uma alta resistividade elétrica permite indiretamente avaliar a penetração de íons cloretos no concreto (SENGUL; GJØRV, 2008; WHITING; NAGI, 2003). Polder e Peelen (2002) avaliaram que a resistividade elétrica é inversamente proporcional ao coeficiente de difusão de cloretos no concreto. Da mesma forma, Ramezaniapour et al. (2011) consideraram que a resistividade elétrica pode determinar a permeabilidade de íons cloreto no concreto, embora esta propriedade não seja recomendada para avaliar a evolução da resistência à compressão do material.

Gjørv (1997 apud GASTALDINI et al., 2009) salientou que quando a camada passivadora está comprometida, a relação de corrosão é controlada pela resistividade elétrica e variação de oxigênio no interior do concreto.

Para Sengul e Gjørv (2009) a resistividade elétrica pode ser definida como a resistência do concreto contrária à fluência de uma corrente elétrica através do material, no qual a corrente elétrica é transportada pelo fluxo de íons através dos poros do concreto.

Bryant Jr., Weyers e Garza (2009) afirmaram que a resistividade elétrica pode ser usada para caracterizar as propriedades elétricas do concreto, relacionando a resistividade em função da condutividade iônica da água dos poros do material.

De acordo com Andrade (2010) a resistividade elétrica pode ser compreendida como uma indicação da microestrutura do concreto, e como tal pode ser usada como um indicador de durabilidade ou como um modelo simples para estimar a vida de serviço do material.

Condutividade elétrica é uma propriedade inversa à resistividade elétrica, ou seja, está ligada à facilidade de passagem de corrente elétrica através do concreto (ANDRADE, 2010; POLDER, 2001; WEE; SURYAVANSHI; TIN, 2000; WHITING; NAGI, 2003).

2.3.2 Fatores que influenciam na resistividade elétrica

A resistividade elétrica do concreto é uma propriedade muito sensível, sendo assim, muitos fatores tem influência no seu comportamento, como a relação a/a_g , o período de cura, o grau de hidratação, a composição do material, o tipo e o teor de adições minerais utilizadas e a temperatura. As dimensões também interferem na

resistividade elétrica de um material, pois quanto maior for o seu comprimento e menor for a área de sua seção transversal, isto é, quanto mais fino for o condutor, maior a elevação dessa propriedade.

Para Polder (2001) a resistividade elétrica do concreto pode variar bastante, de $10^1 \Omega.m$ a $10^5 \Omega.m$, dependendo da composição do material, verificando-se o crescimento desta propriedade quando há uma baixa relação a/ag, longo período de cura (hidratação) e pelo uso de adições minerais como escória de alto forno, cinza volante e sílica ativa.

No trabalho de Whittington, McCarter e Forde (1981) verificou-se que a resistividade elétrica do concreto é diretamente relacionada à hidratação da pasta de cimento, sendo dependente da relação a/ag utilizada. Quanto maior a relação a/ag, menor a resistividade elétrica. Os autores também verificaram que a resistividade elétrica do concreto foi de três ou quatro vezes maior que a pasta de cimento da respectiva mistura, sugerindo a influência do agregado graúdo.

Os efeitos dos agregados na resistividade elétrica do concreto também foram observados no trabalho de Whiting e Nagi (2003). Os autores relataram que, embora a resistividade elétrica do concreto seja governada principalmente pela pasta de cimento, o tipo e teor de agregados alteram a resistividade elétrica do concreto. Segundo Monfore (1968) concretos com agregados de origem calcária e arenítica apresentam uma resistividade elétrica muito menor que concretos elaborados com granito.

No estudo de Wee, Suryavanshi e Tin (2000) observou-se que a resistividade elétrica é controlada pela microestrutura e condutividade de íons, especialmente OH^- (íons hidroxila).

Conforme constatado por Mindess, Young e Darwin (2003 apud RIDING et al., 2008) a resistividade é diretamente relacionada à tortuosidade das redes de poros ou à permeabilidade do concreto, embora esta relação não seja perfeita.

Safiuddin, West e Soudki (2010) verificaram uma elevada resistividade elétrica do concreto relacionada à redução da porosidade total do material. Da mesma forma, Chao-Lung, Anh-Tuan e Chun-Tsun (2011) observaram um aumento na resistividade elétrica a partir da redução do volume dos poros capilares e do aumento da impermeabilidade do concreto.

Castellote, Andrade e Alonso (2002) e Andrade (2005) explicaram que a resistividade elétrica do concreto saturado de água é uma medida indireta da

conectividade dos poros do concreto. Os autores também constataram que, em diferentes temperaturas, o grau de saturação da rede de poros poderá mudar com mudanças na umidade relativa. A temperatura interfere na resistividade elétrica pela mobilidade de íons na fase sólida.

Polder (2001) verificou que as trocas de temperatura têm importantes efeitos na resistividade elétrica do concreto, identificando que a elevação da temperatura ocasiona um decréscimo nesta propriedade e vice-versa, devido à influência na mobilidade de íons e interações entre íons e íons-sólido.

Gjørø, Vennesland e El-Busiady (1977) compararam os efeitos da saturação de água e relação a/ag em concretos perante a resistividade elétrica, verificando o aumento dessa propriedade para menor saturação de água e menor relação a/ag , conforme apresentado na Figura 2.8.

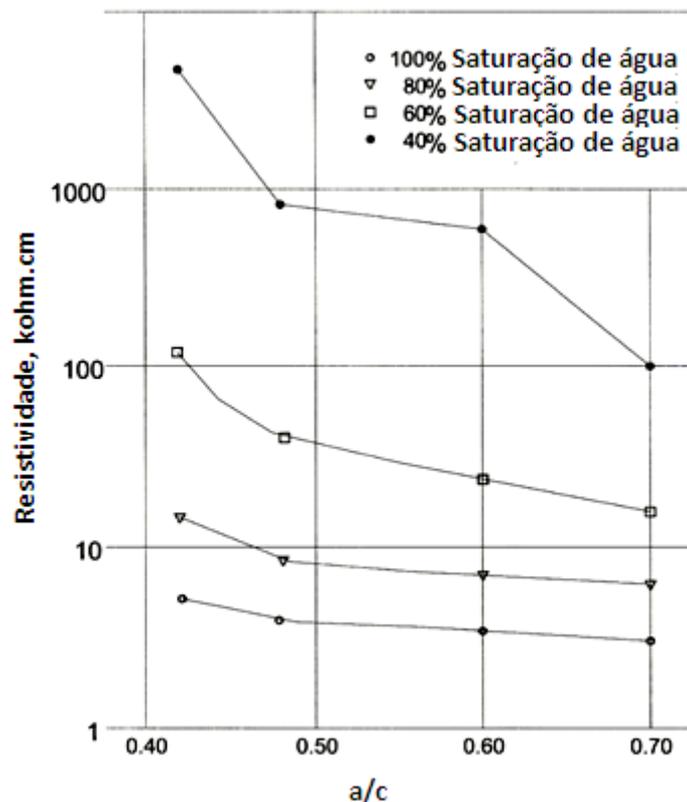


Figura 2.8 – Efeito da saturação de água e relação a/ag na resistividade elétrica do concreto (GJØRV; VENNESLAND; EL-BUSIADY, 1977, p. 587).

Em sua pesquisa, Whiting e Nagi (2003) verificaram que o tipo de cimento, conteúdo de álcalis e C_3A ⁶, componentes da composição química do cimento, influencia na resistividade elétrica do concreto. Os autores observaram que cimentos com alta quantidade de alumina apresentaram menor resistividade elétrica que o cimento de referência. Misturas com baixa quantidade de álcalis mostraram menor resistividade elétrica que outras com maior quantidade, porém esta diferença não foi muito significativa. Cimentos com alto e baixo teor de C_3A apresentaram comportamento semelhante, porém observaram elevação na resistividade elétrica nos períodos iniciais de cura, com decréscimo desta propriedade em cura mais avançada, até a estabilização em períodos mais longos. Misturas com maiores teores de cimento/ m^3 de concreto demonstraram redução na resistividade elétrica do material, mesmo para diferentes relações água/aglomerante, conforme se observa na Figura 2.9.

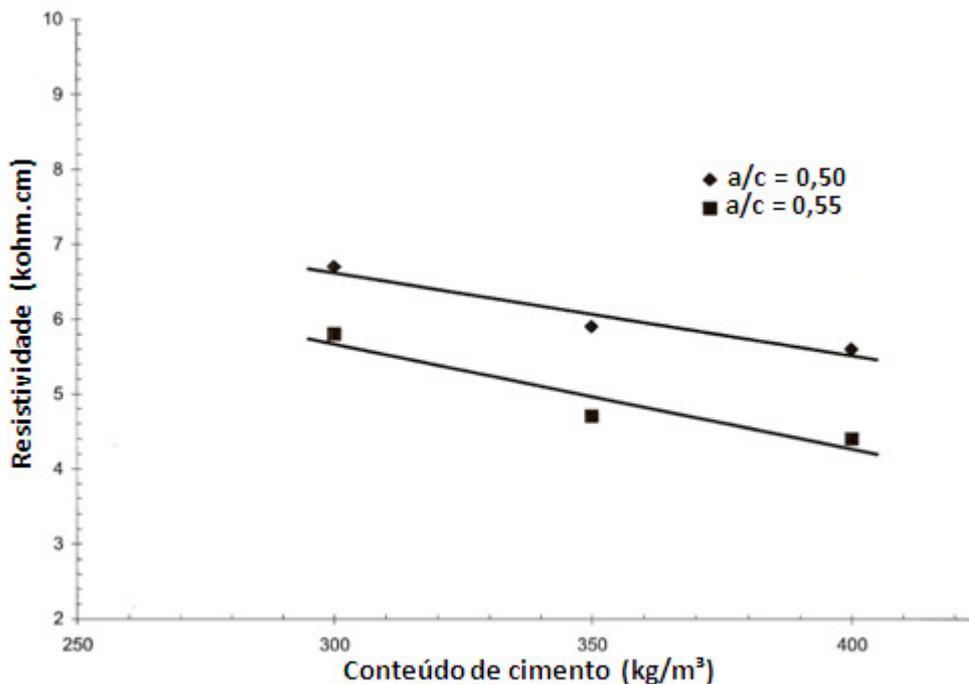


Figura 2.9 – Resistividade elétrica x consumo de cimento/ m^3 de concreto (HUGHES et al., 1985 apud WHITING; NAGI, 2003, p. 19).

⁶ C_3A = Aluminato Tricálcio.

Os aditivos não alteram a resistividade elétrica do concreto. No estudo de Neville (2007) o autor não encontrou interferência dessa propriedade com a aplicação de aditivos, assim como no trabalho de Whiting e Nagi (2003) em que essa influência foi definida como pequena ou inexistente. No entanto, o emprego de aditivos pode trazer benefícios indiretos, pois aditivos plastificantes e superplastificantes possibilitam reduções na relação a/ag da mistura, mantendo a mesma trabalhabilidade, tornando o concreto mais denso e menos permeável, com resistividade elétrica mais elevada.

2.3.3 Efeitos das adições minerais na resistividade elétrica do concreto

Quando adições minerais são usadas como substituição parcial ao cimento no concreto, comumente há uma significativa redução do tamanho dos poros do material, apresentado uma importante influência na resistividade elétrica. Os resultados dependem de uma série de variáveis, como o teor, a granulometria e a composição química das adições minerais utilizadas.

Em seu trabalho, Whiting e Nagi (2003) verificaram que adições minerais, como cinza volante, sílica ativa e escória de alto forno, são comumente empregadas como materiais suplementares na produção de concretos, os quais, devido aos efeitos pozolânicos e propriedades físicas, influenciam na microestrutura da pasta matriz, assim como na mobilidade e concentração de íons nos poros do material. Dessa maneira, exercem uma grande influência na resistividade elétrica do concreto, elevando essa propriedade em grande parte dos casos estudados.

Polder e Peelen (2002) verificaram que cimentos contendo uma elevada porcentagem de escória desenvolveram significativamente uma alta resistividade elétrica nos primeiros dias de cura, enquanto misturas com cinza volante demonstraram um bom desempenho para idades mais avançadas.

Na sua pesquisa, Smith, Schokker e Tikalsky (2004) observaram que mesmo uma pequena quantidade de microssílica resulta em elevação inicial da resistividade elétrica do concreto, e que cinza volante e escória oferecem uma elevada resistividade elétrica nas idades iniciais e posteriores de cura.

Rosa (2005) investigou misturas com 50% e 70% de Escória de Alto Forno (EAF) em substituição parcial ao cimento de referência, que não possui adição mineral, nas idades de 3, 7, 28, 56 e 91 dias de cura. A partir de 28 dias, todas as misturas com essa adição mineral produziram resultados de resistividade elétrica superiores à mistura de referência, para todas as relações a/ag analisadas (0,35, 0,50 e 0,65). O autor identificou que quanto maior o teor de escória presente nos concretos, maiores foram os resultados de REA em relação ao concreto sem escória (REF).

Lübeck (2008) também verificou a resistividade elétrica de misturas contendo as mesmas porcentagens de escória de alto forno da pesquisa de Rosa (2005), porém utilizando cimento Portland branco (CPB), nas relações a/ag 0,30, 0,42 e 0,55 e idades de 3, 7, 14, 28, 56 e 91 dias de cura. A partir dos sete dias de cura, para todas as relações a/ag, o autor também constatou um melhor desempenho nos valores da REA em relação à mistura sem escória. O aumento no teor de escória também elevou a REA estudada. Comparando os resultados encontrados por Rosa (2005) que utilizou cimento Portland cinza, Lübeck (2008) verificou que o CPB apresentou melhor desempenho quanto à REA a partir dos 28 dias de cura, para todas as relações a/ag utilizadas.

A presença de cinza de casca de arroz, em substituição parcial ao cimento, foi investigada por Hoppe (2005). Nas três relações a/ag experimentadas, 0,35, 0,50 e 0,65, após 91 dias de cura, as misturas contendo 10%, 20% e 30% de CCA apresentaram uma elevação na resistividade elétrica em relação ao concreto de referência, sem adição mineral. O autor ainda ensaiou misturas com 50% de EAF e 35% de cinza volante (CV), que também apresentaram melhor desempenho que a mistura de referência, no mesmo período de cura. Dentre todas as misturas investigadas pelo autor, a mistura com 30% de CCA apresentou os melhores resultados de resistividade elétrica aos 91 dias, identificando que o teor de CCA demonstra forte influência na REA do material.

Gastaldini et al. (2009), substituindo cimento por CCA, cinza volante e escória de alto forno, em diferentes teores e relações a/ag, averiguaram uma elevação na resistividade elétrica do concreto com o aumento no teor das adições minerais empregadas, em relação à mistura de referência (sem adição mineral), a partir dos 14 dias de cura, devido às alterações na microestrutura do material.

Conseqüentemente, observou-se uma redução da condutividade elétrica do concreto com as adições minerais utilizadas.

No trabalho de Chao-Lung, Anh-Tuan e Chun-Tsun (2011), a substituição de cinza de casca de arroz resultou, em relação à mistura de referência, uma redução no volume de poros capilares e diminuição da permeabilidade do concreto, com aumento da resistividade elétrica das misturas, principalmente após os 14 dias, sendo esse aumento tanto maior quanto maior foi o grau de hidratação e teor de adição mineral utilizada. Os autores atribuíram esse fato ao aumento da compacidade devido às reações pozolânicas proporcionadas pelo uso da cinza de casca de arroz.

2.3.4 Critérios de avaliação do risco de corrosão, baseado nos valores de resistividade elétrica

Diversos autores apresentam valores de resistividade elétrica do concreto associados ao risco de corrosão das armaduras, os quais se assemelham àqueles propostos pelo *Comité Euro-International Du Béton* (CEB 192), apresentado por Abreu (1998), conforme exposto na Tabela 2.1.

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

Resistividade do concreto (Ohm.m)	Indicação de probabilidade de corrosão
< 50	Muito Alta
50 a 100	Alta
100 a 200	Baixa
> 200	Desprezível

Langford e Broomfield (1987 apud SENGUL; GJØRV, 2009) também relacionaram o risco de corrosão com a resistividade elétrica, em valores semelhantes aos da Tabela 2.1. Broomfield et al. (1993 apud WHITING; NAGI, 2003) acrescentaram que a resistividade elétrica tem que exceder 500 $\Omega.m$ para reduzir a corrosão a um estado aceitável, e que necessitaria haver uma resistividade acima de 1.000 $\Omega.m$ para interromper a corrosão por completo.

Na Tabela 2.2, apresentada por COST 509⁷ (1997 apud POLDER, 2001), são sugeridos valores de resistividade elétrica relacionados ao risco de corrosão, aplicados para o concreto de cimento Portland comum, a 20°C.

Tabela 2.2 – Resistividade do concreto e risco de corrosão, 20°C (COST 509, 1997 apud POLDER, 2001)

<i>Resistividade do concreto (Ohm.m)</i>	<i>Risco de corrosão</i>
< 100	Alto
100 a 500	Moderado
500 a 1000	Baixo
> 1000	Negligenciável

Os valores apresentados na Tabela 2.2 são relativamente mais altos que os mostrados na Tabela 2.1, porém se restringem a um tipo de cimento específico, a uma temperatura determinada. Todavia, demonstram maior cautela, pois associam o risco de corrosão a resultados substancialmente mais elevados de resistividade elétrica.

2.3.5 Medidas de resistividade elétrica

Serão apresentados diferentes métodos para determinação da resistividade elétrica do concreto, conforme será visto a seguir. Abreu (1998) salientou que há duas regiões características num elemento de concreto, as quais possuem valores de resistividade elétrica distintos: uma região mais superficial, sujeita a ciclos de molhagem e secagem, denominada resistividade elétrica aparente, e outra região mais interna, onde, segundo a autora, a umidade é mais estável, identificada como resistividade elétrica volumétrica.

Desta forma, antes de escolher qual o método a ser utilizado, torna-se imperioso definir qual a área (interna ou superficial) mais relevante na determinação da resistividade elétrica do material, pois pode haver diferença nos valores obtidos

⁷ COST 509, Corrosion and protection of metals in contact with concrete, Final report, In: Cox RN, Cigna R., Vennesland O., Valente T. editors. European Commission, Directorate General Science, Research and Development, Brussels, EUR 17608 EN, ISBN 92-828-0252-3, 1997-148.

de resistividade elétrica. Para Helene (1993), a resistividade elétrica aparente é de maior interesse, do ponto de vista da corrosão das armaduras.

2.3.5.1 Método do simples eletrodo

Esse método baseia-se no uso de um pequeno disco metálico inserido na superfície do concreto como um eletrodo e um reforço de barra de aço como um contra-eletrodo (BROOMFIELD, 1997 apud WHITING; NAGI, 2003; POLDER, 2001). A resistividade elétrica do concreto é calculada de acordo com a equação 2.2, onde ρ é a resistividade elétrica em Ohm.m, R a resistência em Ohm e D o diâmetro do disco metálico em metros (m).

$$\rho = 2 \cdot R \cdot D \quad (2.2)$$

Esse método apresenta vantagem de que a localização do ponto de teste é irrelevante, desde que a influência da barra de aço esteja eliminada, todavia a sensibilidade da resistência de contato apresenta-se como desvantagem.

2.3.5.2 Método dos dois eletrodos

O método dos dois eletrodos foi descrito por Whiting e Nagi (2003). É baseado na passagem de uma corrente alternada entre dois eletrodos inseridos na superfície do concreto, medindo-se o potencial entre eles. Apresenta algumas desvantagens. A medição da resistividade é influenciada principalmente pela área de concreto nas proximidades da ponta do eletrodo. Se o eletrodo é colocado sobre o agregado, há uma grande variação na resistividade elétrica, pois a REA do agregado é muito maior que a REA da matriz. Na maior parte dos casos, a resistividade elétrica medida representa uma área com um diâmetro equivalente a dez vezes o raio de contato da ponta do eletrodo. Um menor raio de contato medido

representará uma elevada REA, o que demonstra sua grande influência na variação nos resultados da REA do concreto. Polder (2001) enfatizou que o tamanho dos eletrodos tem um importante efeito nos valores da resistividade elétrica obtidos pelo método dos dois eletrodos, não recomendando este método por ser pouco utilizado e pouco preciso.

2.3.5.3 Método dos quatro eletrodos (método de Wenner)

O método dos quatro eletrodos é uma das técnicas mais usadas para se determinar a resistividade elétrica aparente do concreto. Inicialmente, foi desenvolvido para se determinar a resistividade elétrica do solo, sendo adaptado por Wenner para o uso em concreto. Por essa razão, também é chamado de Método de Wenner. É o método normalizado pela NBR 7117:1981 para medição da resistividade elétrica do solo.

O ensaio consiste em submeter o corpo-de-prova, através dos eletrodos mais externos, à passagem de uma corrente elétrica alternada de onda senoidal de frequência de 10 Hz, fixada de tal forma que a diferença de potencial entre esses eletrodos seja de 5 V. Após um período de tempo determinado, são realizadas duas medidas da diferença de potencial entre os eletrodos internos e duas leituras da corrente elétrica passante entre os eletrodos externos do corpo-de-prova. A Figura 2.10 apresenta um esquema do ensaio de resistividade elétrica do concreto.

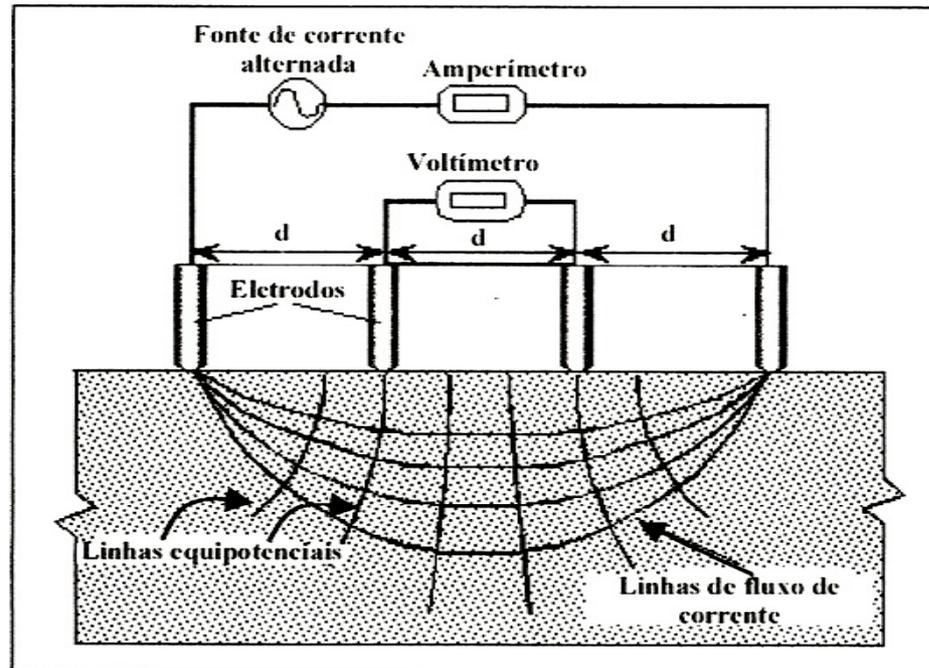


Figura 2.10 – Método dos quatro eletrodos para medir a resistividade elétrica do concreto (CARINO, 1988 apud HOPPE, 2005, p. 64).

A equação seguinte, adaptada por Medeiros Filho (1979 apud ABREU, 1998), foi proposta para medir a resistividade elétrica pelo método dos quatro eletrodos.

$$\rho = (4 \cdot \pi \cdot d \cdot V) / i \cdot \{ 1 + [2 \cdot d / \sqrt{(d^2 + 4 \cdot b^2)}] - [d / \sqrt{(d^2 + b^2)}] \} \quad (2.3)$$

Onde:

ρ = resistividade elétrica aparente do concreto, em $\Omega \cdot m$;

V = diferença de potencial medida, em Volts;

i = corrente elétrica, em Ampères;

d = distância média entre os eixos dos eletrodos, em metros e

b = profundidade de penetração dos eletrodos no concreto, em metros.

O método dos quatro eletrodos apresenta como vantagens, em relação ao método dos dois eletrodos, o cálculo da REA da área de concreto entre os eletrodos internos, considerada grande para a própria ponta do eletrodo. Também evita a

influência do agregado, quando o espaço no interior dos eletrodos internos excede ao tamanho da largura da partícula do agregado (WHITING; NAGI, 2003). Observa-se, no entanto, que, embora seja simples e bastante utilizado, Hoppe (2005) afirmou que o método dos quatro eletrodos deve ser aplicado cuidadosamente para que não ocorra influência de fatores externos, relacionados à geometria dos corpos-de-prova, superfície de contato entre os eletrodos e o concreto, heterogeneidade do concreto, presença de armaduras, tipo de onda, frequência e intensidade da corrente aplicada.

2.3.5.4 Método da resistividade elétrica volumétrica

O método da resistividade elétrica volumétrica foi apresentado por Abreu (1998), conforme descrito na NBR 9204:1985, de acordo com esquema ilustrado na Figura 2.11. Para este método, utilizam-se corpos-de-prova cilíndricos, de dimensões 15 x 15 cm, extraídos de estruturas ou moldados de acordo com a NBR 5738:2003 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)

Durante a execução deste ensaio, a umidade de cada corpo-de-prova monitorada. Realiza-se a medição da resistividade elétrica volumétrica em diversas idades, através da aplicação de uma tensão de $50 \pm 0,5$ V, com corrente contínua. Decorridos 10 minutos, procede-se à leitura da corrente que atravessa o corpo-de-prova, em miliampère (mA).

Em cada ensaio, coleta-se a massa do corpo-de-prova, assim como se mede a temperatura e a umidade nas imediações do mesmo, além da tensão e corrente. O cálculo da resistividade elétrica volumétrica (ρ_v) é realizado de acordo com a seguinte expressão:

$$\rho_v = \frac{V.A}{I.h} \quad (2.4)$$

Onde:

ρ_v = resistividade elétrica volumétrica do corpo-de-prova na idade de ensaio, em $\Omega \cdot \text{cm}$;

V = tensão aplicada no corpo-de-prova, em milivolts (mV);

A^8 = área do eletrodo principal ou blindado, em centímetros quadrados;

i = corrente elétrica que atravessa o corpo-de-prova, em miliampères; e

h = altura total do corpo-de-prova, em centímetros.

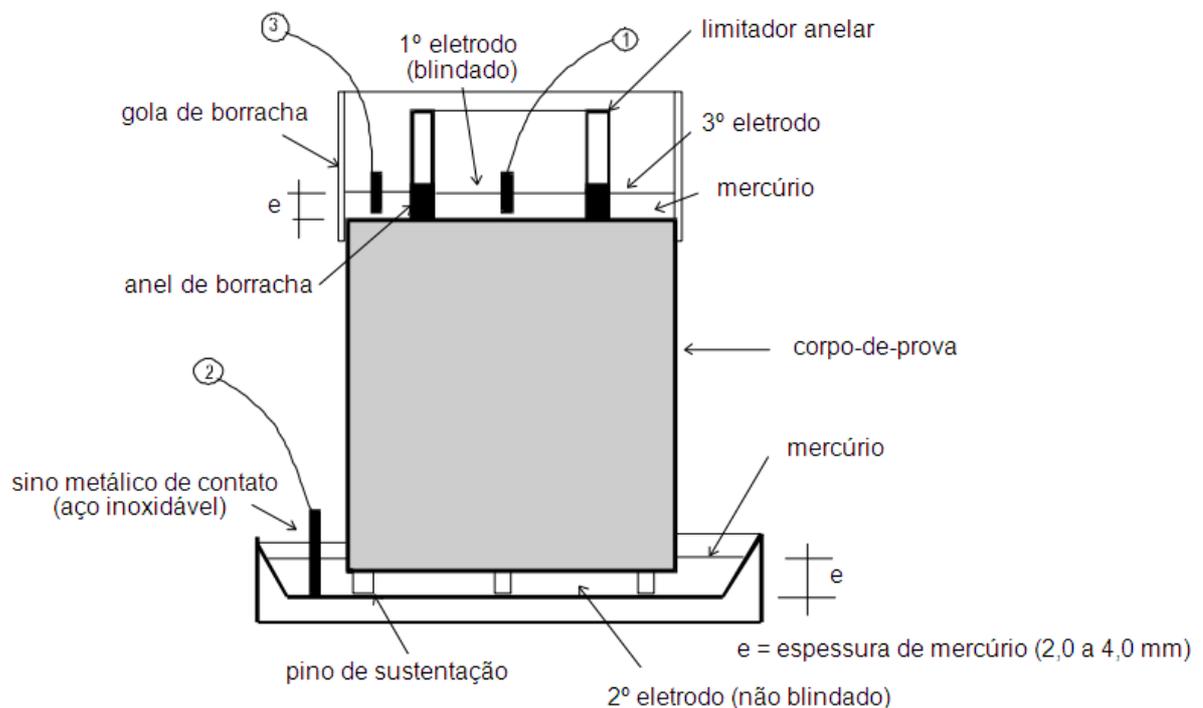


Figura 2.11 – Esquema de montagem do corpo-de-prova para o ensaio de resistividade elétrica volumétrica, segundo a NBR 9204:1985 (ABREU, 1998, p. 27).

2.4 Cinza de casca de arroz

2.4.1 Considerações iniciais

Sabe-se que, quando parte do cimento é substituído por uma adição mineral, há um refinamento nos poros com reflexo na permeabilidade, assim como

⁸ $A = (\pi \cdot D^2)/4$, onde D é a média do diâmetro interno e externo do limitador anelar.

diminuição da concentração iônica e, com isto, redução na condutividade da solução dos poros. Assim, a sua utilização no concreto torna-se imprescindível, em alguns casos, para conferir condições de durabilidade às estruturas, além de proporcionar redução do lançamento de CO₂ na atmosfera, gerado na produção do clínquer, e também descarte de material poluidor e manutenção das reservas de matérias primas.

O arroz é um cereal produzido em larga escala no país, particularmente no Rio Grande do Sul, e sua casca vem sendo utilizada há bastante tempo para a produção de energia e até mesmo como combustível no processo de beneficiamento do grão, nas próprias arrozzeiras. Mehta e Monteiro (2008) afirmaram que, por combustão da casca do cereal, podem ser produzidos cerca de 40 kg de cinza por tonelada de arroz em casca. Há casos de formação de “pellets” de casca de arroz para posterior queima para obtenção da cinza proveniente da casca do cereal, conforme apresentado na Figura 2.12 (CHAO-LUNG; ANH-TUAN; CHUN-TSUN, 2011).



Figura 2.12 – “Pellets” de casca de arroz (CHAO-LUNG; ANH-TUAN; CHUN-TSUN, 2011, p. 2).

Segundo Prudêncio, Santos e Dafico (2003), desde a década de 70, a utilização da cinza de casca de arroz como material pozolânico tem sido intensamente investigada, principalmente em países como a Índia e os EUA, porém, somente a partir da década de 80, com o desenvolvimento tecnológico do concreto

de alto desempenho, a preocupação em se obter o máximo de pozolanicidade do material se tornou premente.

Assim, diante do exposto, o emprego de cinzas de casca de arroz em concretos tem sido justificado pelos benefícios ambientais da utilização deste resíduo e, principalmente, pelo incremento de propriedades relacionadas à durabilidade do material, embora alguns tipos de cinzas demonstrem coloração escura, a qual é transferida ao concreto.

2.4.2 Características da cinza de casca de arroz

Com o intuito de aproveitar subprodutos de processos industriais e agroindustriais, reduzir a emissão de poluentes na atmosfera e aliar desempenho tecnológico ao concreto, associados a um menor impacto ambiental e à melhoria nas características de durabilidade, muitas pesquisas têm sido realizadas com a utilização de adições minerais ao material, como a cinza da casca de arroz (BAKAR; PUTRAJAYA; ABDULAZIZ, 2010; CHATVEERA; LERTWATTANARUK, 2009; FENG et al., 2003; GANESAN; RAJAGOPAL; THANGAVEL, 2008; RÊGO; FIGUEIREDO, 2002; TEIXEIRA, 2005).

Através de estudos anteriores, verificou-se a pozolanicidade das cinzas de casca de arroz que, quando finamente moídas e em contato com a água, reagem com o hidróxido de cálcio e formam produtos com propriedades cimentantes.

Tuan et al. (2011) constataram que o emprego da CCA em concretos proporcionou um aumento no grau de hidratação do cimento e refinamento dos poros da estrutura, com redução do conteúdo de Ca(OH)_2 resultante. Rêgo et al. (2006) também observaram uma redução no teor de hidróxido de cálcio e um refinamento da estrutura dos poros de pastas quando elevaram o teor de substituição de cimento por CCA, amorfa ou cristalina, sendo esse efeito mais pronunciado para a CCA amorfa.

Bakar, Putrajaya e Abdulaziz (2010) salientaram que a adição de CCA contribui para o aumento da resistência nas idades iniciais do concreto devido à formação de silicato de cálcio hidratado gel ao redor das partículas de cimento com alta densidade e menor porosidade.

Para Prudêncio, Santos e Dafico (2003) o bom desempenho da cinza de casca de arroz pode ser justificado pela elevada área específica que possui a sílica, presente nestas cinzas, e pelo efeito filler gerado pela presença de carbono não combusto⁹, que é um material extremamente fino.

A utilização da cinza de casca de arroz em concretos, além oferecer características de resistência e durabilidade, também possibilita reduzir o custo de armazenagem e transporte deste resíduo do arroz, minimizar gastos com geração de energia e ser aplicada na construção civil em vários segmentos como vidros, cerâmicas entre outros, por ser a CCA rica em sílica. Porém, muitas vezes, sem destinação específica, a CCA é dispensada ao meio ambiente, propagando problemas ambientais, conforme ilustrado na Figura 2.13.



Figura 2.13 – Depósito de cinza de casca de arroz a céu aberto (MISSAU, 2004, p. 35).

A casca de arroz é uma capa lenhosa do grão, dura, com alto teor de sílica, composta de aproximadamente 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica de base anidra (MEHTA, 1992 apud PRUDÊNCIO; SANTOS; DAFICO, 2003). Na queima da casca de arroz, há remoção da celulose e lignina, permanecendo a sílica.

⁹ É justamente a presença desse carbono que faz com que os valores medidos de área específica para amostras de cinza de casca de arroz não tenham uma correspondência direta com sua reatividade (nota dos autores).

Na Tabela 2.3, apresentada por Muthadhi, Anitha e Kothandaraman (2007 apud BAKAR; PUTRAJAYA; ABDULAZIZ, 2010), é feito um comparativo da composição química da cinza de casca de arroz de diferentes continentes. Os autores verificaram que os teores de sílica presentes e demais constituintes não apresentaram grande variação, com exceção da quantidade de potássio e magnésio, e atribuíram as variações nas propriedades físicas e químicas das cinzas de casca de arroz à composição química do solo, às diferenças nos arrozais, à variedade da casca e às condições climáticas e, além disso, aos fertilizantes aplicados no cultivo do arroz.

Tabela 2.3 – Comparação de propriedades químicas da cinza de casca de arroz de diferentes localizações

<i>Constituinte</i>	<i>Peso, %</i>		
	<i>Malásia</i>	<i>Brasil</i>	<i>Holanda</i>
SiO ₂	93,1	92,9	86,9
Al ₂ O ₃	0,21	0,18	0,84
Fe ₂ O ₃	0,21	0,43	0,73
CaO	0,41	1,03	1,40
K ₂ O	2,31	0,72	2,46
MgO	1,59	0,35	0,57
Na ₂ O	*	0,02	0,11
SO ₃	*	0,10	*
LOI	2,36	*	5,14

*OBS: não constatado

Fonte: Muthadhi, Anitha e Kothandaraman (2007 apud BAKAR; PUTRAJAYA; ABDULAZIZ, 2010)

Neville (1997) explicou que a cinza de casca de arroz pode apresentar alta superfície específica, dependendo do grau de moagem e da queima realizada, com grande reatividade nas primeiras idades e conseqüentemente elevadas resistências iniciais e finais. No entanto, o controle de temperatura da queima, que determina a forma de sílica e a reatividade (pozolanicidade) da CCA, tem elevado custo, o que tem impedido um uso mais amplo na construção civil.

Prudêncio, Santos e Dafico (2003) relataram que a coloração da cinza da casca de arroz depende das impurezas presentes e das condições de queima, apresentando cor acinzentada, branca ou púrpura, quando totalmente queimada e coloração escura, quando parcialmente queimada, devido à presença de carbono. Segundo os autores, as cinzas resultantes da queima da casca de arroz não têm sido muito utilizadas para a produção de concretos, tanto no Brasil quanto no

exterior. Isso pode ser atribuído ao fato de que as cinzas de boa atividade pozolânica geralmente possuem teores elevados de carbono (acima de 5%), produzindo uma coloração cinza-escura no concreto, pouco aceita no mercado consumidor. Além disso, a presença desse tipo de cinza faz com que os concretos por ela produzidos possuam coesão excessiva.

No entanto, Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2009) afirmaram que as cinzas de casca de arroz produzidas sem controle de queima usualmente contêm alto teor de carbono e uma porção de sílica em estado cristalino em sua composição, podendo comprometer sua atividade pozolânica. Todavia, os autores salientam que o efeito adverso do elevado teor de carbono e a presença de componentes cristalinos podem ser minimizados pelo acréscimo do tempo de moagem dos grãos da cinza de casca de arroz, gerando partículas ultrafinas, aumentando a reatividade pozolânica da CCA, conforme apresentado na Figura 2.14.

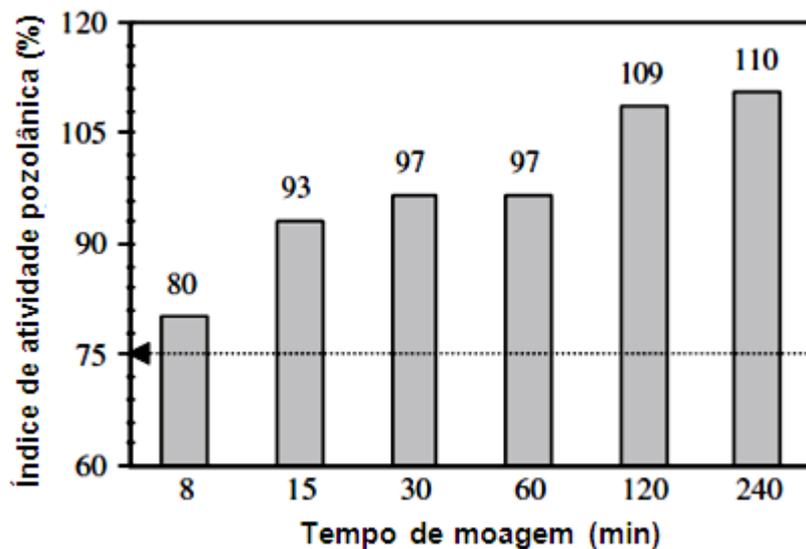


Figura 2.14¹⁰ – Relação entre o tempo de moagem e o índice de atividade pozolânica da cinza de casca de arroz (CORDEIRO; TOLEDO FILHO; FAIRBAIRN, 2009, p. 6).

A temperatura ideal de queima da cinza de casca de arroz é discutida em vários trabalhos:

¹⁰ A linha tracejada representa os valores mínimos de um material pozolânico, de acordo com a NBR 12653:1992.

- Mehta (1979) sugeriu que uma sílica essencialmente amorfa pode ser produzida mantendo a temperatura de queima da CCA abaixo de 500°C por prolongado período ou acima de 680°C em um tempo mais reduzido;
- Yeoh et al. (1979) salientaram que a CCA pode apresentar forma amorfa numa temperatura de combustão acima de 900°C em tempo menor que uma hora, enquanto a sílica cristalina é produzida acima de 1000°C com combustão de cinco minutos;
- Boateng e Skeete (1990) afirmaram que a CCA apresenta-se amorfa e reativa quando queimada entre 800°C e 900°C;
- Sugita, Shoya e Tokuda (1992) verificaram que, numa temperatura de queima abaixo de 600°C, por um período de 80 minutos, a CCA atinge um índice máximo de atividade pozolânica, em comparação com outros materiais pozolânicos, como a cinza volante;
- Mazlum e Uyan (1992 apud BOUZOUBAË; FOURNIER, 2001) observaram um teor ótimo de composição pozolânica na CCA queimada à 600°C, informando que a CCA requer uma moagem muito fina para adquirir pozolanicidade se for queimada acima dessa temperatura (sílica transformada em cristobalita, quartzo e tridimita) e, caso queimada abaixo desta temperatura, a sílica formada é de natureza pozolânica;
- Isaia (1995) citou que quando a cinza é originada através da queima controlada entre 400°C e 600°C, obtém-se sílica amorfa, com alta reatividade com compostos hidratados do cimento;
- Ferreira (1996) investigou a queima de CCA, de 1,5 a 3 horas, observando que cinzas queimadas em temperaturas abaixo de 800°C apresentam uma estrutura mais porosa, enquanto que estruturas mais densas (compactas) são verificadas na queima da CCA, em temperaturas entre 800°C e 1100°C;
- Prudêncio, Santos e Dafico (2003), ao estudar o trabalho de vários autores, consideraram que a CCA deve ser queimada em temperaturas baixas (500°C a 800°C), para que apresentem boa atividade pozolânica;
- Pouey (2006) comentou que a queima da casca de arroz até 500°C gera como resíduo uma cinza preta, rica em carbonos fixos e constituída basicamente de sílica amorfa e que, a partir de 750°C, a cinza se torna

mais clara, devido à oxidação dos carbonos fixos, resultando numa sílica mais cristalina;

- Ganesan, Rajagopal e Thangavel (2008) constataram que a CCA queimada durante uma hora à temperatura de 650°C se transforma em um excelente material pozolânico, rico em sílica amorfa (87%), com perda ao fogo relativamente baixa (2,1%);
- Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2009) citaram que a temperatura de queima da CCA deve ser menor que 900°C, para evitar a formação de produtos cristalinos;
- Zain et al. (2011) consideraram que podem ser encontradas cinza de casca de arroz de boa qualidade em diferentes temperaturas de queima da casca do cereal, todavia a temperatura e tempo de combustão estão condicionados ao tipo de forno empregado.

Apesar de não haver consenso quanto à temperatura de queima ideal para a CCA, nota-se que a finura e a área superficial são influenciadas pela temperatura de queima da CCA, assim como se observa o aparecimento de fases cristalinas na sílica contida na CCA, quando esta é queimada em elevadas temperaturas. Quando a temperatura de queima da casca de arroz é baixa e o tempo de exposição à alta temperatura é pequeno, a sílica contida na cinza é amorfa (PRUDÊNCIO; SANTOS; DAFICO, 2003).

Uma queima não controlada da casca de arroz resulta num difratograma de uma CCA com picos de quartzo (Q) e cristobalita (C), de acordo com a Figura 2.15. No seu experimento, Tashima et al. (2005) também verificaram no difratograma de raios-X que a CCA utilizada apresentou uma estrutura amorfa, além de encontrar, na composição química do material, alto teor de sílica e superfície específica 234% maior que o cimento de referência utilizado (CP-III).

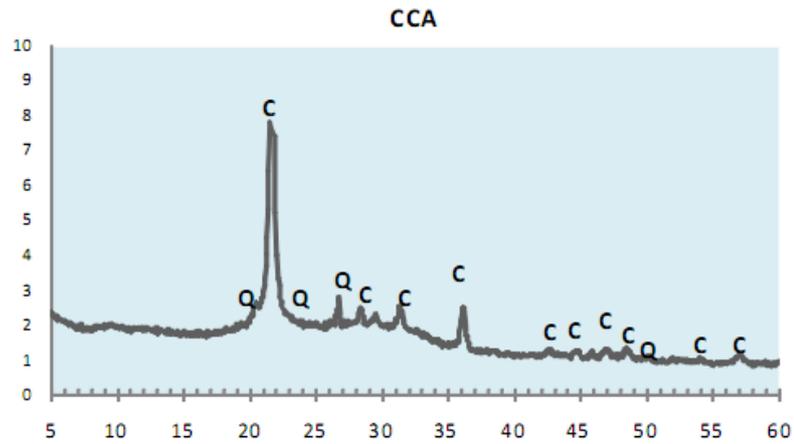


Figura 2.15 – Difração de Raios-X da cinza de casca de arroz (DUART, 2008, p. 32).

Segundo Agopyan (1991 apud POUEY, 2006) a microestrutura da CCA é modificada pelo processo de queima: na Figura 2.16, é visualizada a micrografia da CCA produzida em leito fluidizado, a qual resulta em uma cinza de estrutura porosa, como a da própria casca, enquanto na Figura 2.17 observa-se a mesma CCA, porém produzida em forno comum, resultando em uma estrutura mais compacta e granulada, possivelmente pelo prolongado período de permanência neste tipo de forno.

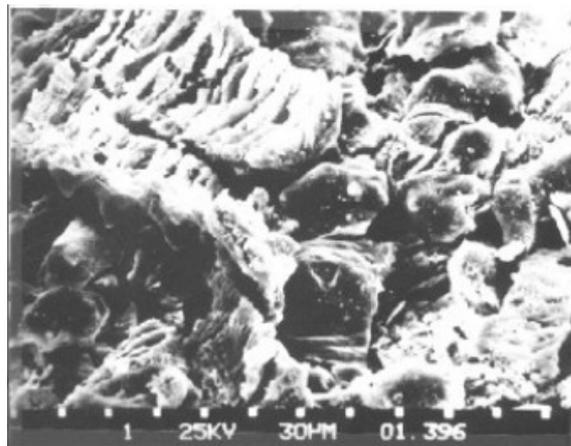


Figura 2.16 – Micrografia de CCA produzida em forno fluidizado (AGOPYAN, 1991 apud POUEY, 2006, p. 26).



Figura 2.17 – Micrografia de CCA produzida em forno comum (AGOPYAN, 1991 apud POUEY, 2006, p. 26).

Na pesquisa de Duart (2008), o autor salientou que a estrutura porosa (em forma de esponja) apresentada pela CCA pode ser modificada pelo atrito interno do contato com os materiais inseridos na betoneira, ou anteriormente, se moída em moinho de bolas de aço por determinado período de tempo. A Figura 2.18 apresenta um moinho de bolas de aço, enquanto na Figura 2.19 se pode observar uma CCA queimada numa temperatura de 600 a 850°C após a moagem de 30 minutos no respectivo moinho.

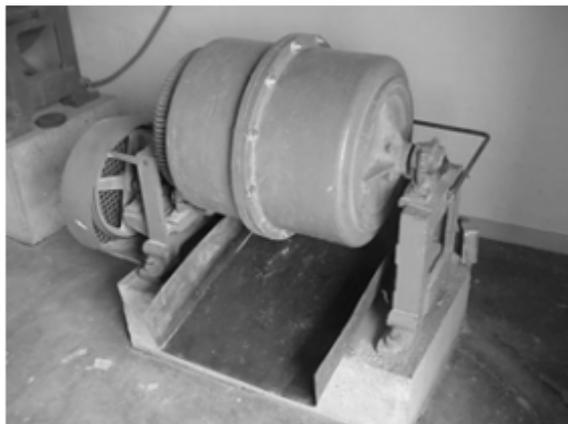


Figura 2.18 – Moinho utilizado para refinamento da CCA (TASHIMA et al., 2005, p. 3).



Figura 2.19 – CCA moída por 30 minutos (TASHIMA et al., 2005, p. 3).

Propriedades mecânicas do concreto, como elevação da resistência à compressão e decréscimo na absorção de água, foram observadas por Tashima et al. (2005) quando se utilizaram CCA incorporada ao concreto.

Teixeira (2005) constatou aumento na resistência à compressão de concretos com 5% e 10% de cinza de casca de arroz, no entanto outras propriedades como absorção de água, resistência à abrasão e profundidade de carbonatação apresentaram desempenho inferior à mistura de referência.

Feng et al. (2003) também verificaram um acréscimo da resistência à compressão de misturas com 10%, 20% e 30% de CCA, além da redução no conteúdo de Ca(OH)_2 liberado da hidratação do cimento, indicando a elevada atividade pozzolânica da sílica presente na CCA.

Ganesan, Rajagopal e Thangavel (2008), ao analisar concretos com substituição de cimento por 30% de cinza de casca de arroz, constataram uma redução de 35% na permeabilidade à água, 28% na difusão de cloretos e 75% na penetração de cloretos, quando comparados com o concreto de referência.

Nepomuceno e Neves (2006), investigando argamassas de cimento substituídas parcialmente por CCA, nos teores de 5%, 10% e 20% e relação a/ag 0,65, verificaram redução no tempo de iniciação da corrosão, em relação à argamassa de referência, para todos os teores de substituição utilizados.

Saraswathy e Song (2007), utilizando cinza de casca de arroz em teores de 10%, 15%, 20%, 25% e 30% em substituição ao cimento, encontraram benefícios em propriedades relacionadas à resistência à corrosão do concreto, como redução da penetração de cloretos e permeabilidade do material, com melhor desempenho

para a mistura com 25% de CCA.

De modo semelhante, Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2009), utilizando teores de 10%, 15% e 20% de partículas ultrafinas de CCA em substituição parcial ao cimento no concreto, observaram uma redução acima de 78% nos valores de carga passante nos testes de penetrabilidade de íons cloretos, em todas as misturas com adição mineral.

Givi et al. (2010), ao substituir cimento por 5%, 10%, 15% e 20% de cinza de casca de arroz de partículas ultrafinas (média de 5 μm), verificaram que houve uma significativa redução na porcentagem, velocidade e coeficiente de absorção de água no concreto, para todas as idades de ensaio.

Azevedo, Martins e Silveira (2002), analisando concretos com variados teores de CCA, produzidas com ou sem controle de temperatura, verificaram que pode haver redução da absorção de água, em relação à mistura de referência, independente do tipo de CCA empregada, todavia os autores citam que a absorção de água é mais influenciada pela relação a/ag do que pelo teor de CCA utilizado.

Chatveera e Lertwattanakul (2009), investigando o emprego de diferentes teores de cinza de casca de arroz de coloração escura ao concreto, constataram o aumento na resistência ao ataque por sulfatos (sulfato de sódio e magnésio), com menor expansão, em relação à mistura de referência.

Castro et al. (2005) averiguaram que minerais como a cinza de casca de arroz contribuem para a durabilidade de estruturas submetidas à ambientes agressivos, pois alteram a distribuição dos poros do concreto e possibilitam a obstrução de grandes poros capilares (efeito filler), aumentando a resistência e reduzindo o sistema de permeabilidade.

Tuan et al. (2011), estudando a microestrutura decorrente de ultra alta performance de compostos com CCA, verificaram que a adição de CCA gera um refinamento e uma redução do volume total de poros duas vezes maior em relação à mistura de referência pelo efeito filler e pelas elevadas reações pozolânicas provocadas pelas pequeníssimas partículas de CCA.

Memon, Shaikh e Akbar (2011) investigaram a utilização da cinza de casca de arroz como agente modificador de viscosidade no concreto autocompactado. Os autores observaram que o aumento no teor de CCA diminuiu o escoamento e, com relação ao custo, os autores constataram que pode haver uma redução significativa, a partir do emprego de CCA em concretos.

Através da análise no microscópio eletrônico de varredura (MEV), Castro et al. (2005) visualizaram uma maior compacidade no concreto contendo cinza de casca de arroz em substituição parcial ao cimento de referência, conforme se observa nas Figuras 2.20 e 2.21.

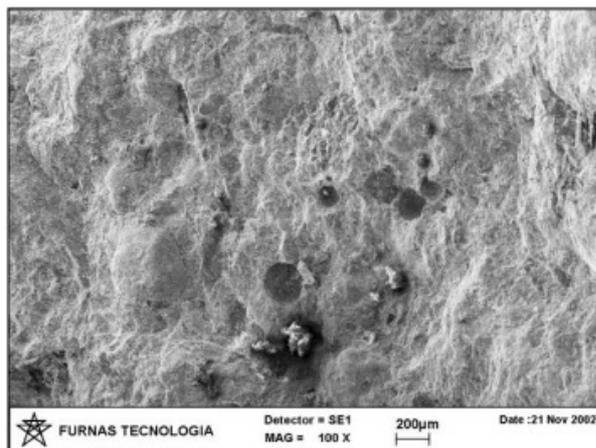


Figura 2.20 – Análise no MEV, concreto de referência (CASTRO et al., 2005, p. 13).

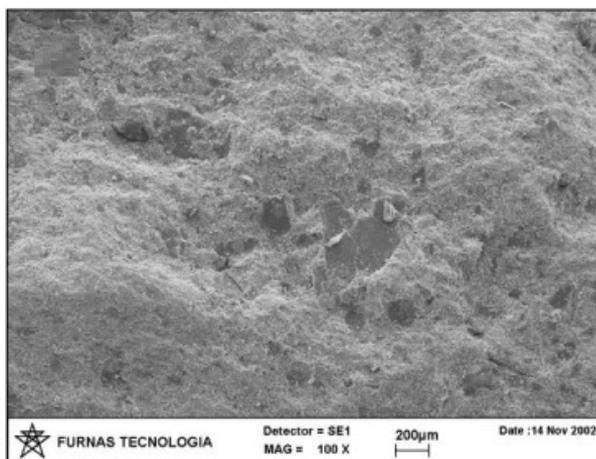


Figura 2.21 – Análise no MEV, concreto contendo 25% de cinza de casca de arroz (CASTRO et al., 2005, p. 14).

No entanto, apesar de a cinza de casca de arroz ter sido investigada por diferentes autores quanto ao seu desempenho em concreto, justificando seu uso pelo melhoramento de propriedades mecânicas e de durabilidade do material, é imprescindível analisar as características da cinza empregada, tipo e tempo de queima, processo de moagem e teor de substituição em relação ao cimento, a fim de

que possa ser obtido um concreto de melhor desempenho e vida útil, em relação ao uso a que se destina. Em seu trabalho, Feng et al. (2003) limitaram o emprego de CCA ao teor de 30%, a fim de propiciar uma certa reserva de Ca(OH)_2 , elevando a proteção do concreto frente à carbonatação.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Introdução

Com o intuito de verificar alguns dos conhecimentos teóricos já existentes, além de buscar respostas às questões norteadoras deste trabalho, foi realizada uma pesquisa quantitativa, exploratória, experimental.

A pesquisa realizou-se na cidade de Santa Maria-RS, com os experimentos executados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), anexo ao Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

De modo a atingir os objetivos propostos, foram realizados os seguintes ensaios:

- resistência à compressão axial (NBR 5738:2003 e NBR 5739:2007);
- absorção de água por capilaridade (NBR 9779:1995); e,
- resistividade elétrica aparente (método de Wenner, adaptado para o uso em concretos – NBR 1771:1981).

Para verificar a influência do teor da cinza de casca de arroz nas propriedades do concreto relacionadas a este estudo, foram utilizadas misturas com teores variados de cinza de casca de arroz de coloração clara (CCAC), e cinza de casca de arroz de coloração escura (CCAEC), em substituição parcial ao cimento de referência (REF), CPV-ARI, o qual não contém nenhum tipo de adição mineral (100% de cimento).

As cinzas de casca de arroz empregadas, clara e escura, são diferenciadas pelo teor de carbono gráfico presente (0,41%, para a CCAC e 3,69%, para a CCAEC).

Para comparação de resultados, utilizou-se uma mistura com 10% de sílica ativa (SA). Todas as misturas foram investigadas nas relações água/aglomerante 0,35, 0,50 e 0,65.

3.2 Variáveis da Pesquisa

De forma metodológica, foram definidas e quantificadas as variáveis envolvidas na presente pesquisa, de forma a alcançar os objetivos pré-estabelecidos. As variáveis dividem-se em:

3.2.1 Variáveis Independentes

São as variáveis que determinam o grau de compactação e a relação sólido/espaco na pasta.

- Relação água/aglomerante (a/ag): é o quociente entre a parte líquida, formada por água e aditivo, e a parte sólida, constituída por cimento e adição mineral, relativa às misturas investigadas. Para todas as misturas, utilizaram-se as relações a/ag 0,35, 0,50 e 0,65.
- Idade de realização dos ensaios
Resistência à compressão axial: 28 e 91 dias;
Absorção de água por capilaridade: 28 e 91 dias;
Resistividade elétrica aparente: 7, 14, 28, 56, 91 e 182 dias.
- Tipo de adição mineral: cinza de casca de arroz clara, cinza de casca de arroz escura e sílica ativa;
- Teor de substituição da adição mineral, em relação à massa de cimento:
10%, 20% e 30%, para cinza de casca de arroz clara;
10%, 20% e 30%, para cinza de casca de arroz escura; e
10%, para sílica ativa;

3.2.2 Variáveis dependentes

São as variáveis que dependem das demais para poderem ser determinadas.

- Resistência à compressão axial;

- Absorção de água por capilaridade; e
- Resistividade elétrica aparente.

3.3 Caracterização dos materiais

3.3.1 Aglomerantes

O cimento utilizado foi o cimento Portland de alta resistência inicial, CPV-ARI, fabricado nacionalmente, em conformidade com a norma NBR 5733:1991.

As cinzas de casca de arroz empregadas são provenientes de geradora de energia elétrica, localizada no estado do Rio Grande do Sul, cuja finalidade principal da casca de arroz é de gerar energia. O procedimento de queima da casca de arroz está em processo de patenteamento. As cinzas de casca de arroz, cinza clara e escura, diferem-se pelo teor de carbono grafitico presente em cada uma. A cinza de casca de arroz escura foi moída na indústria de origem, ao passo que a cinza de casca de arroz clara foi moída durante 1 hora, em moinhos de bolas de aço, semelhante ao ilustrado na Figura 2.18.

A sílica ativa é procedente de fornecedor nacional.

A fim de obter as características dos aglomerantes, foram realizados os seguintes ensaios:

- 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; e
- Análise química completa de matéria-prima – ABCP/SP – Método ABCP/SP PO-GT-3051 Revisão 02.

A Figura 3.1 mostra a distribuição granulométrica à laser do cimento utilizado nesta pesquisa.

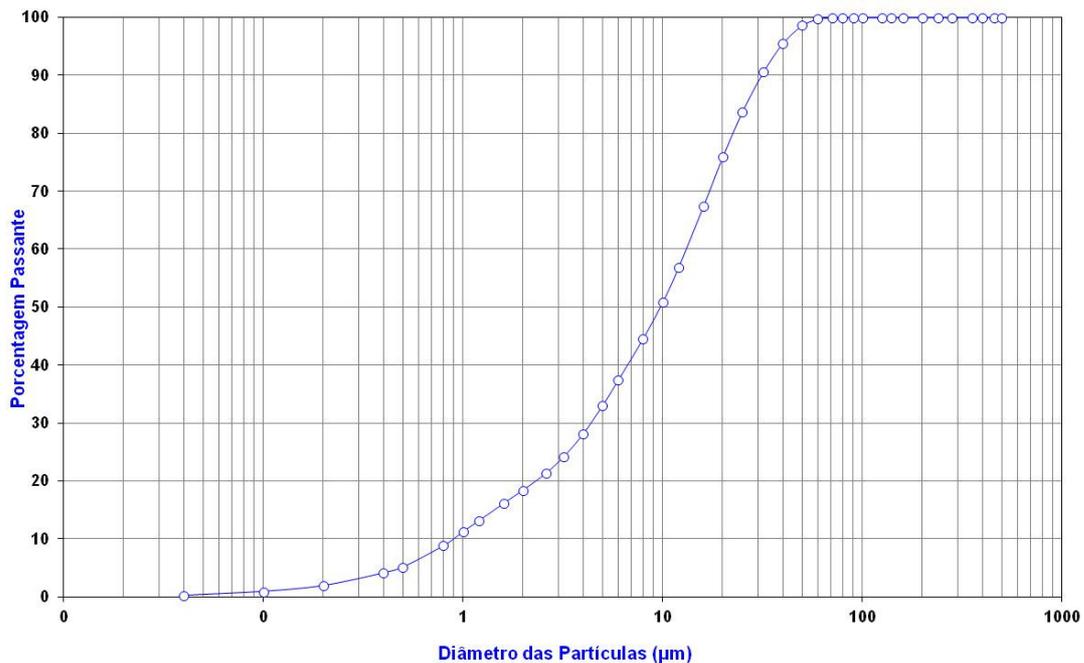


Figura 3.1 – Distribuição granulométrica a laser do cimento. Fonte: relatório nº 68500 do laboratório da Associação Brasileira de Cimento Portland.

Pode-se visualizar, na Tabela 3.1, os valores de dimensão média e do diâmetro equivalente a 10% e 90% de partículas passantes de cimento.

Tabela 3.1 - Valores de dimensão média e do diâmetro equivalente a 10% e 90% de partículas passantes de cimento

<i>Identificação das amostras</i>	<i>Dimensão média (μm)</i>	<i>Diâmetro abaixo do qual se encontram 10% das partículas (μm)</i>	<i>Diâmetro abaixo do qual se encontram 90% das partículas (μm)</i>
Cimento CPV-ARI	9,63	0,94	30,39

A fim de caracterizar a mineralogia presente nos aglomerantes utilizados, realizaram-se análises difratométricas de raios x, referentes às quatro amostras em estudo, Cimento CPV-ARI, CCAC, CCAE e SA, apresentados nas Figuras 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5, respectivamente. O método de ensaio foi o PG-GT-5042 (Procedimento de Análise por Difratometria de Raios X).

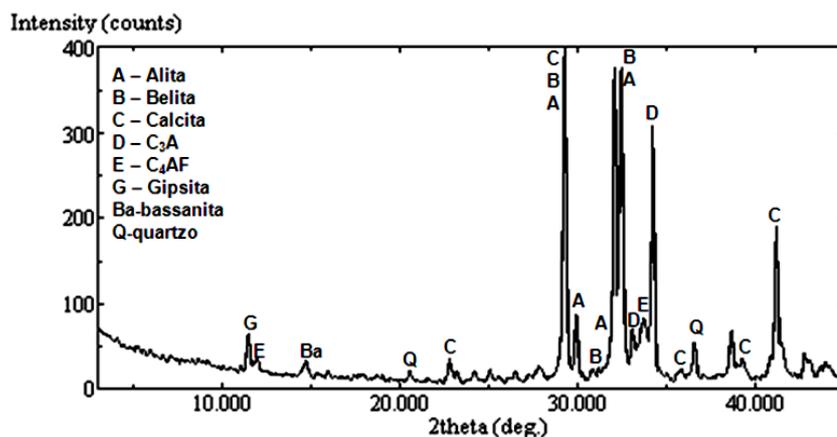


Figura 3.2 – Difratoograma da amostra de cimento. Fonte: relatório nº 68500 do laboratório da Associação Brasileira de Cimento Portland.

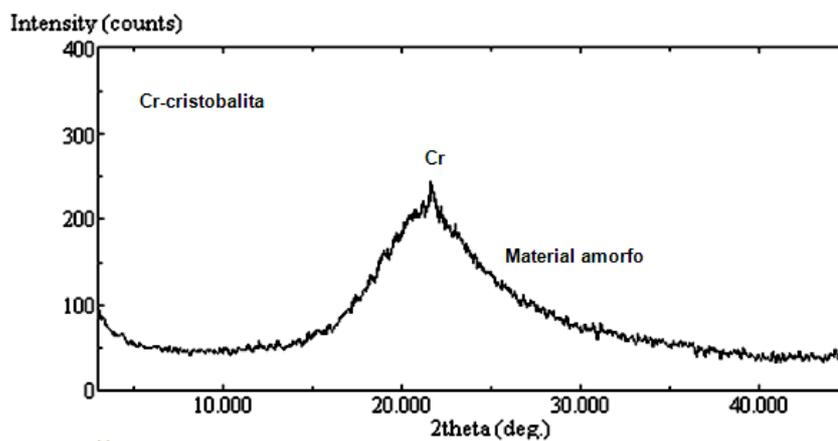


Figura 3.3 – Difratoograma da amostra de CCAC. Fonte: relatório nº 68500 do laboratório da Associação Brasileira de Cimento Portland.

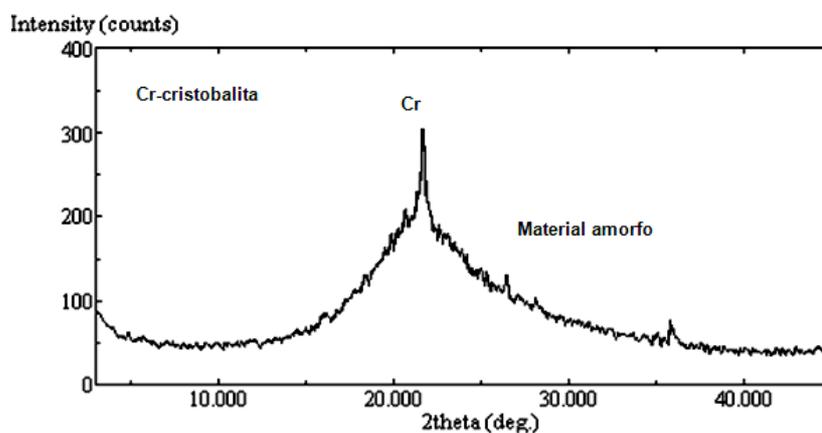


Figura 3.4 – Difratoograma da amostra de CCAE. Fonte: relatório nº 68500 do laboratório da Associação Brasileira de Cimento Portland.

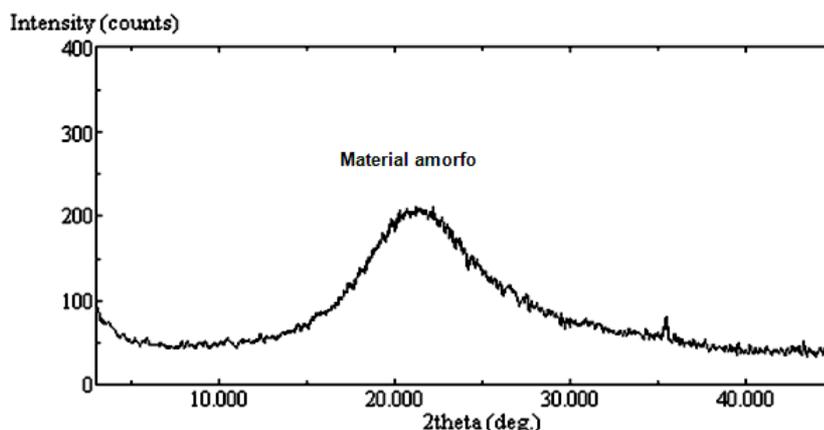


Figura 3.5 – Difratograma da amostra de Sílica Ativa. Fonte: relatório nº 68500 do laboratório da Associação Brasileira de Cimento Portland.

Com base nos difratogramas das Figuras 3.2 a 3.5, realizados com as amostras in natura, caracterizaram-se os compostos mineralógicos cristalizados constantes na Tabela 3.2, em que se verifica que a amostra de cimento é constituída pelos minerais do clínquer Portland (Alita, Belita, C₃A e C₄AF), Calcita, Quartzo e minerais de gesso (Gipsita e Bassanita); as amostras de cinzas e sílica ativa são compostas principalmente por material amorfo; as amostras de cinza possuem a presença secundária de Cristobalita.

Tabela 3.2 – Caracterização por difratometria de raios x¹¹

<i>Minerais</i>	<i>Quimismo aproximado</i>	<i>Distância interplanar principal (Å)</i>	<i>Frequência relativa</i>			
			<i>Cimento</i>	<i>CCAC</i>	<i>CCAE</i>	<i>SA</i>
Gipsita	CaSO ₄ .2H ₂ O	7,66	*	-	-	-
Bassanita	CaSO ₄ .½H ₂ O	6,03	tr	-	-	-
Portlandita	Ca(OH) ₂	4,90	-	-	-	-
Cristobalita	SiO ₂	4,13	-	tr	*	-
Calcita	CaCO ₃	3,04	*	-	-	-
Alita	Ca ₃ SiO ₅	2,77	***	-	-	-
Belita	Ca ₂ SiO ₄	2,75	*	-	-	-
C ₃ A	Ca ₃ Al ₂ O ₆	2,70	*	-	-	-
C ₄ AF	Ca ₄ Al ₂ Fe ₂ O ₁₀	2,65	*	-	-	-
Periclásio	MgO	2,11	-	-	-	-

nd= não detectado; tr= traços; *= presente; **= pouco frequente; ***= frequente; ****= muito frequente

¹¹ A avaliação semiquantitativa (expressa em número de asteriscos) das fases está fundamentada na altura dos picos de difração, cuja intensidade é função do teor, da simetria e do grau de cristalinidade do constituinte.

Nas Tabelas 3.3, 3.4 e 3.5 são apresentadas a composição química e as características físicas dos aglomerantes empregados neste trabalho. Na Tabela 3.3 constata-se uma grande quantidade de sílica nas cinzas de casca de arroz (93,54%, para a CCAC e 88,12%, para a CCAE) e sílica ativa (94,20%), superando o teor de sílica do cimento utilizado (19,19%).

Tabela 3.3 – Composição química dos aglomerantes

<i>Composição química</i>	<i>Porcentagem em massa dos materiais (%)</i>			
	<i>CPV-ARI</i>	<i>CCAC</i>	<i>CCAЕ</i>	<i>SA</i>
CaO	62,64	0,79	0,83	0,61
SiO ₂	19,19	93,54	88,12	94,20
Al ₂ O ₃	5,16	0,52	0,56	0,27
Fe ₂ O ₃	2,95	0,20	0,15	0,15
SO ₃	2,52	0,05	0,10	0,11
MgO	2,75	0,49	0,49	0,57
K ₂ O	0,64	1,65	1,60	0,40
Na ₂ O	0,12	0,03	0,21	0,15
TiO ₂	0,23	-	-	-
SrO	0,28	-	-	-
P ₂ O ₅	0,13	-	-	-
Cal Livre	1,39	-	-	-
Resíduo Insolúvel	0,49	-	-	-
Carbono grafítico	1,93	0,41	3,69	-
Perda ao fogo	3,39	2,32	5,88	2,03

Tabela 3.4 – Caracterização física dos aglomerantes

<i>Grandeza física</i>	<i>CPV-ARI</i>	<i>CCAC</i>	<i>CCAЕ</i>	<i>SA</i>
Massa específica (kg/dm ³)	3,04	2,15	2,13	2,18
Área específica BET (m ² /g)	1,14	18,89	20,73	18,83
Finura # 0,075 mm (%)	0,22	-	-	-

Tabela 3.5 – Ensaio em argamassa do CPV-ARI

	<i>Grandeza física</i>	
Tempo de pega (min)	Início de pega	180
	Fim de pega	250
Resistência à compressão axial (MPa)	1 dia	13,8
	3 dias	33,0
	7 dias	36,8
	28 dias	49,2

3.3.2 Agregados

O agregado miúdo utilizado nesta pesquisa, proveniente do município de Santa Maria/RS, constitui-se de areia natural, quartzosa, a qual foi submetida à lavagem para retirada de impurezas, seca em estufa e peneirada na peneira #6,3 mm, sendo armazenada em cubas de alvenaria, com tampa de madeira, até a data das moldagens.

O agregado graúdo foi constituído de pedra britada de rocha diabásica, proveniente do município de Itaara/RS, sendo submetida a peneiramento na peneira #19,0 mm e lavado na #6,3 mm para eliminar possíveis impurezas que pudessem influenciar nas propriedades do concreto. Por fim, a brita foi seca à temperatura ambiente para remoção de umidade, antes de ser armazenado em cubas de alvenaria com tampa de madeira, para posterior utilização.

Na Tabela 3.6 são apresentadas as características físicas dos agregados e, nas Figuras 3.6 e 3.7, observam-se as distribuições granulométricas do agregado miúdo e graúdo, respectivamente.

Tabela 3.6 – Características físicas dos agregados

<i>Grandeza física</i>	<i>Agregado graúdo</i>	<i>Agregado miúdo</i>
Módulo de finura	6,92	1,85
Dimensão máxima característica (mm)	19,0	1,2
Massa específica (kg/dm ³)	2,48	2,66
Massa unitária solta (kg/dm ³)	1,38	1,62
Absorção de água (%)	2,87	-
Índice de forma	2,23	-

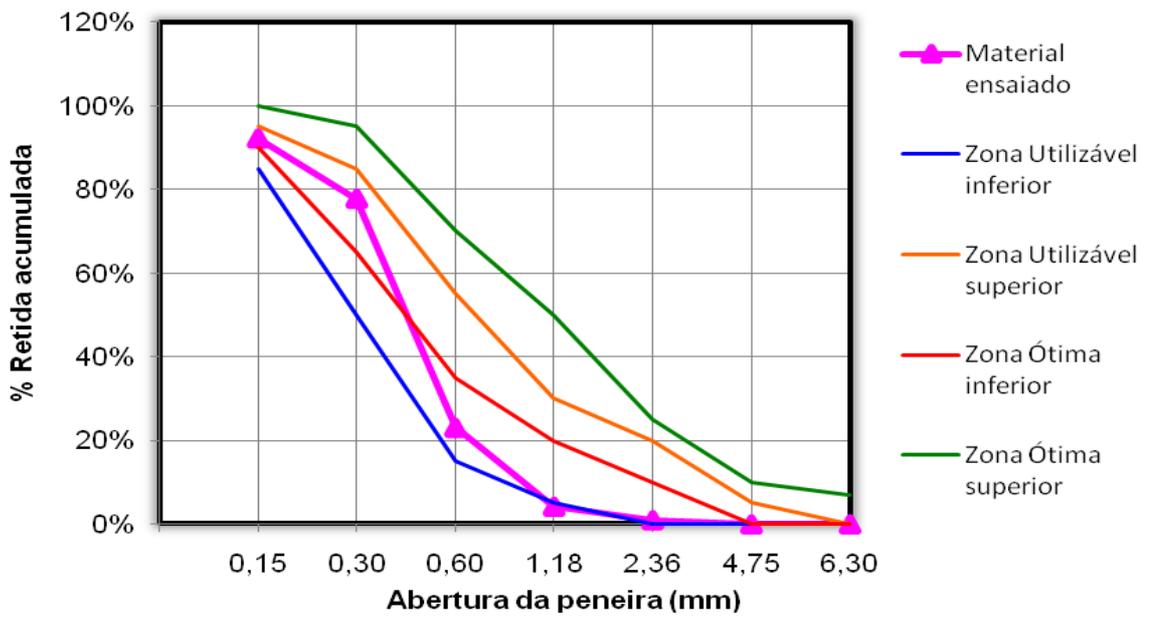


Figura 3.6 – Curva granulométrica do agregado miúdo.

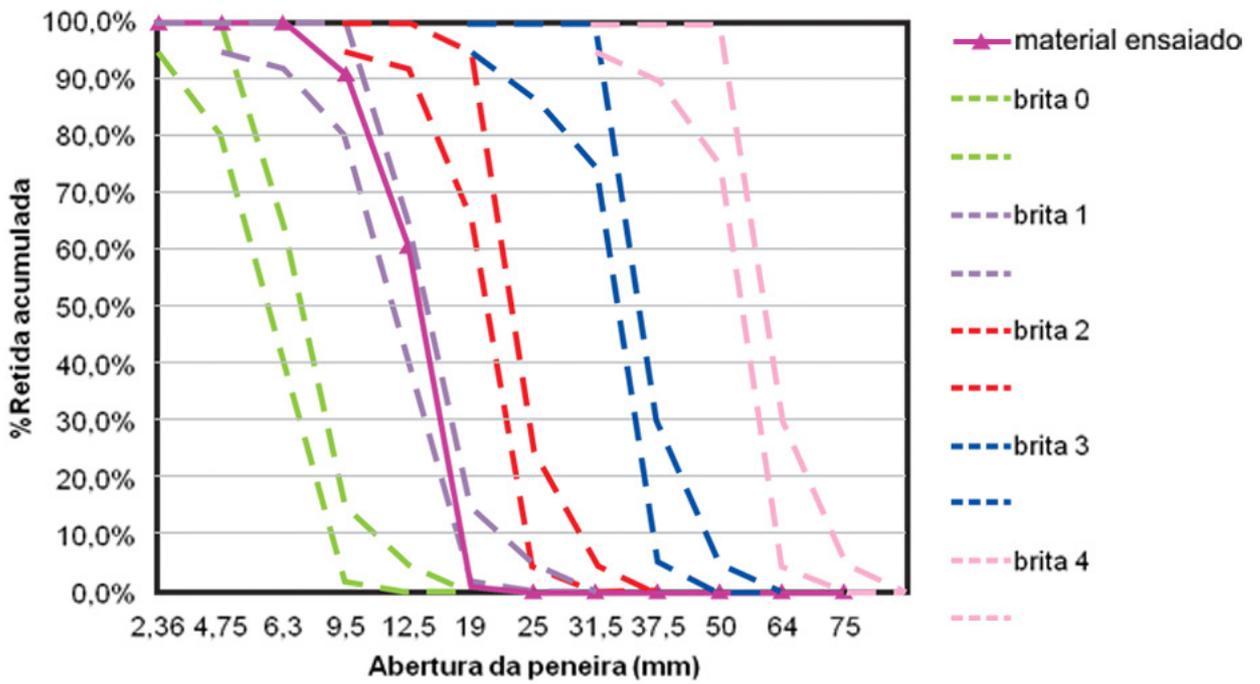


Figura 3.7 – Curva granulométrica do agregado graúdo.

3.3.3 Aditivos

De modo a se obter a consistência desejada nas misturas investigadas, 90 ± 10 mm, utilizou-se aditivo plastificante e superplastificante. O aditivo superplastificante foi usado em conjunto com o aditivo plastificante apenas nos casos em que a consistência determinada não foi obtida após a dosagem máxima de aditivo plastificante, ou seja, 1,0%.

O aditivo plastificante adotado foi do tipo multifuncional, de pega normal. O aditivo superplastificante empregado foi à base de policarboxilatos, com teor de cloretos $< 0,1\%$. Os aditivos atenderam às prescrições da norma ASTM C 494:2005.

Antes do início da moldagem, foram realizadas pré-moldagens com o objetivo de verificar os teores de aditivo plastificante e superplastificante que foram utilizados na moldagem final.

3.3.4 Água

A água utilizada na moldagem dos corpos-de-prova foi proveniente da rede que abastece a Universidade Federal de Santa Maria.

3.4 Dosagem dos concretos

A dosagem do concreto foi realizada de acordo com os procedimentos propostos por Helene e Terzian (1992).

Foram moldadas oito misturas, sendo uma composta apenas por cimento e outras seis com teores de 10%, 20% e 30% de substituição parcial de cimento por cinza de casca de arroz, além de uma mistura composta com 10% de sílica ativa em substituição parcial do cimento, conforme nomenclatura abaixo:

- REF (100% de cimento);

- 10 CCAC, 20 CCAC e 30 CCAC (10%, 20% e 30% de cinza de casca de arroz clara);
- 10 CCAE, 20 CCAE e 30 CCAE (10%, 20% e 30% de cinza de casca de arroz escura); e,
- 10 SA (10% de sílica ativa).

A previsão do comportamento de cada mistura dá-se por meio do cálculo das constantes A e B da expressão $f_c = A/B^x$ (curva de Abrams) para cada idade de ensaio.

Para poder compor a curva de Abrams de cada mistura, são necessários no mínimo três pontos. Desta forma, estabeleceram-se três relações água/aglomerante, 0,35, 0,50 e 0,65, com proporções de aglomerante para agregados (m) determinados para cada relação a/ag, em massa, em função do ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone, de acordo com a NBR NM 67:1996, em que se obtiveram, para as relações a/ag 0,35, 0,50 e 0,65 os valores de 1:3,51; 1:5,00 e 1:6,51, respectivamente.

O agregado graúdo permaneceu constante para as misturas de mesma relação a/ag, enquanto foi feita uma pequena compensação no teor de agregado miúdo para manter o volume de argamassa constante e igual ao da mistura de referência, nas misturas com adições minerais (devido à menor massa específica das adições minerais em relação ao cimento).

Para todos os traços, manteve-se o teor de argamassa em 51%, em massa seca, conforme obtido experimentalmente.

O teor de aditivos utilizado, definido no ensaio de consistência, assim como o consumo de materiais dos experimentos deste trabalho apresentam-se na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Consumo dos materiais por metro cúbico de concreto

Mistura	Relação a/ag	Cimento (kg/m³)	Adição Mineral¹²: CCAC, CCAE ou SA (kg/m³)	Areia (kg/m³)	Brita (kg/m³)	P (%)	SP (%)
REF	0,35	485,72	-	631,44	1.073,44	0,90	-
	0,50	358,57	-	738,65	1.054,20	-	-
	0,65	283,55	-	802,45	1.043,46	-	-
10 CCAC	0,35	438,34	48,70	608,81	1.073,44	1,00	0,55
	0,50	321,99	35,78	722,70	1.054,20	0,50	-
	0,65	255,90	28,43	790,44	1.043,46	0,10	-
20 CCAC	0,35	389,99	97,50	589,86	1.073,44	1,00	1,05
	0,50	287,23	71,81	710,90	1.054,20	1,00	-
	0,65	227,58	56,89	779,48	1.043,46	0,35	-
30 CCAC	0,35	340,92	146,11	574,70	1.073,44	1,00	1,40
	0,50	251,50	107,78	697,00	1.054,20	1,00	0,30
	0,65	199,24	85,39	768,50	1.043,46	0,80	-
10 CCAE	0,35	438,34	48,70	608,81	1.073,44	1,00	0,40
	0,50	321,99	35,78	722,70	1.054,20	0,25	-
	0,65	255,90	28,43	790,44	1.043,46	0,20	-
20 CCAE	0,35	389,99	97,50	589,86	1.073,44	1,00	0,45
	0,50	287,23	71,81	710,90	1.054,20	0,50	-
	0,65	227,58	56,89	779,48	1.043,46	0,20	-
30 CCAE	0,35	340,92	146,11	574,70	1.073,44	1,00	0,60
	0,50	251,50	107,78	697,00	1.054,20	1,00	-
	0,65	199,24	85,39	768,50	1.043,46	0,50	-
10 SA	0,35	438,34	48,70	608,81	1.073,44	1,00	0,20
	0,50	321,99	35,78	722,70	1.054,20	0,50	-
	0,65	255,90	28,43	790,44	1.043,46	0,20	-

P - aditivo plastificante, utilizado em relação à massa de aglomerante

SP - aditivo superplastificante, utilizado em relação à massa de aglomerante

3.4.1 Moldagem e cura dos corpos-de-prova

Foram moldados, para cada relação a/ag das misturas utilizadas, corpos-de-prova cilíndricos para os ensaios de resistência à compressão axial e à absorção de água por capilaridade e corpos-de-prova prismáticos para o ensaio de resistividade elétrica aparente, de acordo com a NBR 5738:2003, conforme apresentado na Tabela 3.8 e Figura 3.8. Para os ensaios de resistência à compressão axial, resistividade elétrica aparente e absorção capilar, moldaram-se quatro, quatro e três corpos-de-prova, respectivamente, para cada idade de ensaio e relação a/ag investigada.

¹² Adição mineral utilizada em substituição parcial em massa de cimento, conforme a mistura: cinza de casca de arroz clara, cinza de casca de arroz escura ou sílica ativa.

Tabela 3.8 – Idade de ensaio, dimensão dos corpos-de-prova e número de camadas (adensamento)

<i>Ensaio</i>	<i>Idade de ensaio (dias)</i>	<i>Dimensão dos cp's (cm)</i>	<i>Vibração (camadas)</i>
Resistência à compressão	28 e 91	Ø 10x20	2
Resistividade elétrica	7, 14, 28, 56, 91 e 182	10x10x17	2
Absorção capilar	28 e 91	Ø 15x15	2

Os corpos-de-prova do ensaio de resistência à compressão axial e de resistividade elétrica aparente foram adensados em mesa vibratória, em duas camadas, enquanto que os corpos-de-prova de absorção capilar foram adensados com o auxílio do vibrador de imersão.

A conferência do resultado da consistência de cada mistura, 90 ± 10 mm, realizou-se através do ensaio de abatimento do tronco de cone, segundo a NBR NM 67:1998, em que se verificaram os valores pré-determinados.

**Figura 3.8** – Corpos-de-prova moldados para os ensaios de resistência à compressão axial, de absorção capilar e de resistividade elétrica aparente.

Durante a moldagem de cada mistura, para que fossem evitadas variações na temperatura da massa de concreto e a mesma permanecesse constante independente da temperatura do ambiente, foi utilizada a fórmula de Metha e Monteiro (1994), que considera a massa e a temperatura de todos os elementos constituintes da mistura (aglomerantes, agregados e água):

$$T = \frac{0,22.(T_m.M_m + T_c.M_c) + T_a.M_a}{0,22.(M_m + M_c) + M_a} \quad (3.1)$$

Onde:

T = Temperatura da massa de concreto (°F);

T_m = Temperatura dos agregados (°F);

T_c = Temperatura do aglomerante (°F);

T_a = Temperatura da água (°F);

M_m = Massa dos agregados (kg);

M_c = Massa do aglomerante (kg); e

M_a = Massa de água (kg).

As temperaturas foram medidas com o uso de termômetro digital. Com a fórmula acima, foi possível encontrar a temperatura da água utilizada em cada mistura, em função da temperatura do ambiente e dos materiais. Como as moldagens ocorreram no verão, houve necessidade de resfriamento da água de amassamento, de modo a obter a temperatura da massa de concreto aproximadamente constante em $19 \pm 2^\circ\text{C}$.

Após a moldagem, os corpos-de-prova foram mantidos nos moldes por 24 horas, onde receberam cobertura superficial a fim de evitar a perda de água por evaporação. A desmoldagem ocorreu após este período, e foi seguida da identificação e encaminhamento de cada corpo-de-prova à câmara úmida, Figura 3.9, com temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa maior que 95%.



Figura 3.9 – Cura dos corpos-de-prova, câmara úmida.

Os corpos-de-prova destinados aos ensaios de resistência à compressão axial e de absorção capilar foram curados em câmara úmida em períodos de três e sete dias, permanecendo em ambiente de laboratório até a data dos ensaios. Já os corpos-de-prova utilizados no ensaio de resistividade elétrica aparente foram mantidos em câmara úmida até a data dos ensaios, retornando imediatamente à mesma após cada ensaio.

3.5 Ensaios realizados

3.5.1 Resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão axial das misturas investigadas foi realizado de acordo com as normas NBR 5738:2003 e NBR 5739:2007. Foram moldados 16 corpos-de-prova cilíndricos \varnothing 10x20 cm para cada mistura e relação

a/ag. Os corpos-de-prova foram curados em câmara úmida por três e sete dias. Após o período de cura os corpos-de-prova foram conservados em ambiente de laboratório até as idades de ensaio, 28 e 91 dias. Antes do ensaio, houve capeamento dos corpos-de-prova com enxofre, com posterior rompimento dos mesmos em prensa hidráulica, conforme apresentada na Figura 3.10.



Figura 3.10 – Prensa utilizada no ensaio de resistência à compressão axial.

O valor da resistência final adotada, para cada mistura e idade, constituiu-se da média aritmética de quatro corpos-de-prova, quando o desvio médio relativo mostrou-se menor do que 6%.

3.5.2 Absorção de água por capilaridade

Para o ensaio de absorção de água por capilaridade, foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos, de dimensões $\varnothing 15 \times 15$ cm. As formas empregadas apresentaram $\varnothing 15 \times 30$ cm, sendo assim, os corpos-de-prova foram cortados ao meio, após o período de cura. A cura foi realizada em câmara climatizada, em dois períodos distintos, três e sete dias, para cada idade e relação a/ag das misturas

investigadas. Após o período de cura, os corpos-de-prova foram acondicionados em ambiente de laboratório, protegido de intempéries, com temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, até a data dos ensaios, 28 e 91 dias.

O ensaio seguiu as determinações da norma NBR 9779:1995. De início, houve a verificação das massas de cada corpo-de-prova ao ar e, em seguida, os mesmos foram encaminhados à secagem em estufa à temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$, até que obtivessem a constância de massa, ou seja, a diferença de massa entre duas pesagens consecutivas do mesmo corpo-de-prova não excedesse a 0,5% do menor valor obtido, durante o período de permanência dos mesmos em estufa. Posteriormente, os corpos-de-prova foram resfriados ao ar à temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e, na sequência, suas massas foram determinadas.

Antes da imersão em água, a lateral curva de cada corpo-de-prova recebeu camada de verniz poliuretânico, e sua superfície foi coberta com um capuz plástico, a fim de evitar influência do meio exterior ao resultado do experimento.

Para que cada corpo-de-prova permanecesse com nível de água constante e igual a 5 ± 1 mm acima de sua face inferior¹³, os mesmos foram posicionados sobre suportes e inseridos em recipientes com água no nível determinado, evitando que outras superfícies fossem molhadas e houvesse interferência no ensaio, conforme Figura 3.11.



Figura 3.11 – Corpos-de-prova posicionados sobre suportes dentro de recipientes com nível de água constante.

¹³ Utilizou-se como face inferior a face serrada do corpo-de-prova, de modo que a mesma permanecesse em contato com a água, durante o ensaio de absorção capilar.

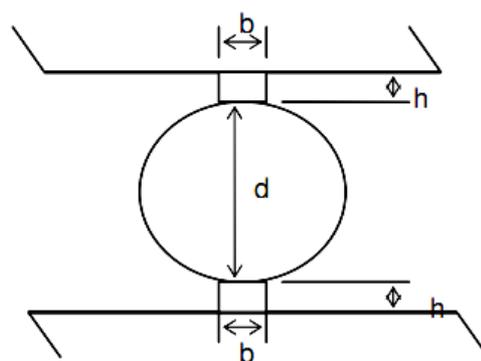
A absorção capilar foi medida nos períodos de tempo de 3, 6, 24, 48 e 72 horas de imersão dos corpos-de-prova em água, sendo obtida pela divisão do aumento da massa em cada tempo especificado pela área da seção transversal da superfície do corpo-de-prova em contato com a água, através da média dos resultados observados em três corpos-de-prova, para cada período de cura, idade e relação a/ag das misturas investigadas.

Antes de cada pesagem, durante o ensaio, a superfície de cada corpo-de-prova em contato com a água foi enxugada com pano úmido. Terminadas as leituras das pesagens iniciais (tempo = 3, 6, 24 e 48 horas de imersão em água), os corpos-de-prova retornaram imediatamente ao recipiente de ensaio, até a leitura da pesagem final (tempo = 72 horas). A pesagem de um corpo-de-prova é apresentada na Figura 3.12.



Figura 3.12 – Pesagem de um corpo-de-prova, ensaio de absorção capilar.

Após a última leitura (tempo = 72 horas), os corpos-de-prova foram rompidos por compressão diametral, de acordo com a NBR 7222:2010, Figura 3.13, permitindo, desta forma, que fosse verificada a altura de ascensão capilar máxima obtida e desenhada a distribuição de água no interior de cada corpo-de-prova, conforme a Figura 3.14.



Onde: $b = (0,10 \pm 0,01) \cdot d$
 $h = (0,5 \pm 0,1) \text{ cm}$

Figura 3.13 – Disposição do corpo-de-prova para rompimento por compressão diametral (MEIRA, 2009, p. 63).

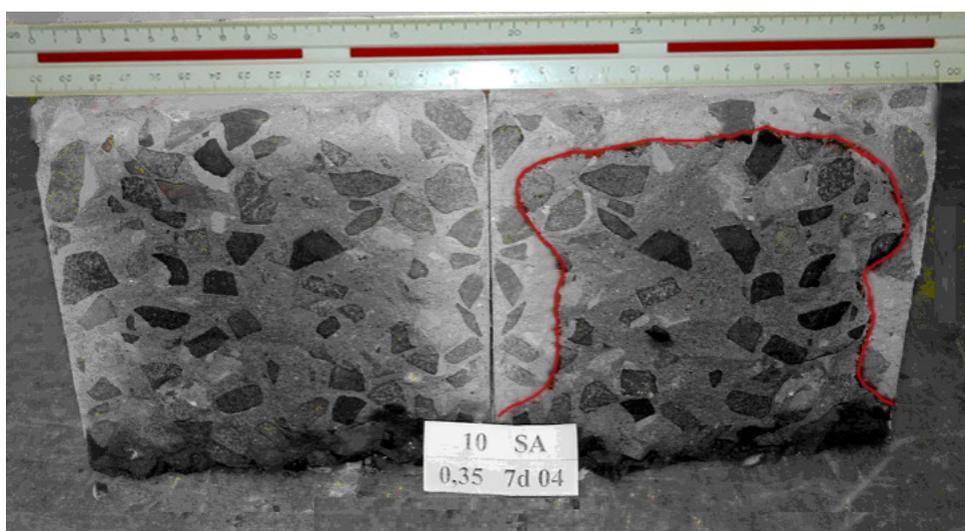


Figura 3.14 – Desenho da distribuição de água de um corpo-de-prova utilizado no ensaio de absorção de água por capilaridade.

A absorção capilar de água para cada mistura é expressa em g/cm^2 , dada pela seguinte expressão:

$$C = \frac{A - B}{S} \quad (3.2)$$

Onde:

C = absorção de água por capilaridade;

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

B = massa do corpo-de-prova seco, assim que esse atingir a temperatura de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$, em gramas; e,

S = área de seção transversal, em cm^2 .

3.5.3 Resistividade elétrica aparente

O ensaio de resistividade elétrica aparente foi realizado de acordo com o método dos quatro eletrodos (pontos), também conhecido como método de Wenner. Este método foi originalmente desenvolvido para medir a resistividade elétrica aparente do solo, porém, após sofrer adaptações, passou a ser utilizado em concretos. Para cada mistura, relação a/ag e idade de ensaio (7, 14, 28, 56, 91 e 182 dias), foram moldados quatro corpos-de-prova prismáticos, conforme ilustrado na Figura 3.15.

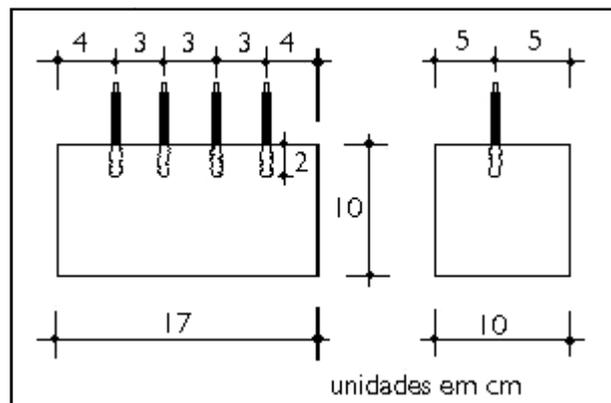


Figura 3.15 – Esquema dos corpos-de-prova utilizados no ensaio de REA, pelo método de Wenner (ABREU, 1998, p. 52).

O ensaio de REA foi realizado de maneira não destrutiva. Os corpos-de-prova foram removidos da câmara climatizada apenas nas datas dos ensaios, individualmente, retornando imediatamente depois de realizada a leitura da corrente e voltagem da medição da REA, de modo a não ocorrer perda de umidade. Assim, cada corpo-de-prova foi envolvido por um pano umedecido com água, no momento em que esteve fora da câmara climatizada (durante o ensaio), conforme Figura 3.16.



Figura 3.16 – Circuito do ensaio de REA do concreto.

A preparação dos eletrodos ocorreu antes da moldagem dos corpos-de-prova, de modo análogo ao já empregado nos trabalhos de Rosa (2005), Lübeck (2008) e Cezar (2011), conforme a sequência abaixo:

- corte do fio (eletrodo) em pedaços de aproximadamente 8,0 cm;
- decapagem das extremidades dos fios, removendo 1,0 cm de um lado e 2,0 cm do outro, de modo a permanecer 5,0 cm de fio encapado;
- remoção da camada antioxidante de isolante das extremidades do eletrodo com lixa grossa; e,
- amassamento da extremidade do fio que fica imersa no prisma de concreto (2,0 cm), de modo a aumentar a aderência entre o eletrodo e o concreto.

Um exemplo de molde utilizado neste ensaio apresenta-se na Figura 3.17. É importante que, além da estanqueidade e precisão nas dimensões, os moldes

apresentassem uma folga aproximada de 1,0 cm entre a superfície do prisma de concreto e a parte inferior do gabarito, onde se posicionaram os eletrodos, a fim de que não ocorresse a aderência do gabarito ao concreto na região dos eletrodos. Desta maneira, poderia haver um deslocamento dos eletrodos durante a desmoldagem das amostras.

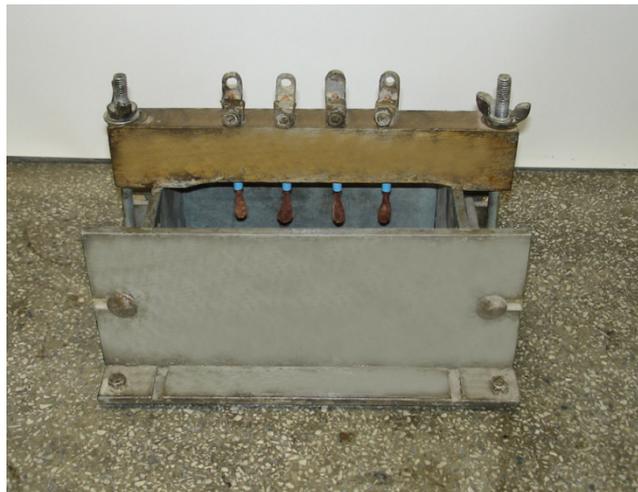


Figura 3.17 – Molde utilizado no ensaio de REA do concreto.

O valor da REA pelo método de Wenner foi obtido pela fórmula de Medeiros Filho (1979 apud ABREU, 1998):

$$\rho = R \cdot K \quad (3.3)$$

$$k = \frac{4 \cdot \pi \cdot a}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}} \quad (3.4)$$

Onde:

ρ = resistividade elétrica calculada do concreto, em Ohm.m;

R = resistência medida pelo instrumento, em Ohm.m;

a = distância de separação entre os eletrodos, em metros;

b = profundidade de penetração dos eletrodos no corpo-de-prova, em metros;

Com a utilização do circuito acima exposto, Figura 3.16, foram medidas a corrente elétrica entre os eletrodos externos e a diferença de potencial entre os eletrodos internos. Aplicou-se uma corrente elétrica alternada de onda senoidal de frequência de 10,0 Hz entre os eletrodos externos, por nove minutos, de modo que a diferença de potencial entre estes eletrodos fosse de 5,0 V. No décimo e décimo primeiro minuto de ensaio, mediu-se a corrente elétrica entre os eletrodos externos e a diferença de potencial entre os eletrodos internos. A média aritmética dos valores de corrente elétrica e da diferença de potencial obtidos no décimo e décimo primeiro minuto de ensaio foram aplicadas na equação 3.3, em que se obteve a resistividade elétrica aparente de cada corpo-de-prova.

O valor da resistividade elétrica aparente final de cada mistura, relação a/ag e idade de ensaio, foi obtido através da média aritmética de quatro corpos-de-prova, sendo eliminados deste cálculo os resultados de REA dos cp's que apresentaram desvio relativo maior que 6%, em relação à resistividade média dos quatro cp's.

Para a realização do ensaio de REA, utilizaram-se os seguintes instrumentos:

- um gerador de função de corrente alternada e frequência de 10,0 Hz (para emissão de onda senoidal); e
- dois multímetros, um para leitura de corrente alternada e outro para efetuar a medição da diferença de potencial entre os eletrodos.

Na Tabela 3.9 são apresentados dados informativos do ensaio de resistividade elétrica aparente.

Tabela 3.9 – Dados informativos do ensaio de resistividade elétrica aparente

<i>Mistura</i>	<i>Relação a/ag</i>	<i>Total de cp's ensaiados em cada relação a/ag</i>	<i>Idades ensaiadas (dias)</i>	<i>Total de ensaios em cada idade</i>	<i>Total de ensaios por mistura</i>
REF	0,35	04	7, 14, 28, 56, 91 e	12	72
	0,50	04	182		
	0,65	04			
10 CCAC	0,35	04	7, 14, 28, 56, 91 e	12	72
	0,50	04	182		
	0,65	04			
20 CCAC	0,35	04	7, 14, 28, 56, 91 e	12	72
	0,50	04	182		
	0,65	04			
30 CCAC	0,35	04	7, 14, 28, 56, 91 e	12	72
	0,50	04	182		
	0,65	04			
10 CCAE	0,35	04	7, 14, 28, 56, 91 e	12	72
	0,50	04	182		
	0,65	04			
20 CCAE	0,35	04	7, 14, 28, 56, 91 e	12	72
	0,50	04	182		
	0,65	04			
30 CCAE	0,35	04	7, 14, 28, 56, 91 e	12	72
	0,50	04	182		
	0,65	04			
10 SA	0,35	04	7, 14, 28, 56, 91 e	12	72
	0,50	04	182		
	0,65	04			
Total de ensaios					576

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão axial, absorção de água por capilaridade e resistividade elétrica aparente. A influência das adições minerais e teores utilizados, relação água/aglomerante, tempo de cura e idade dos ensaios também serão debatidos.

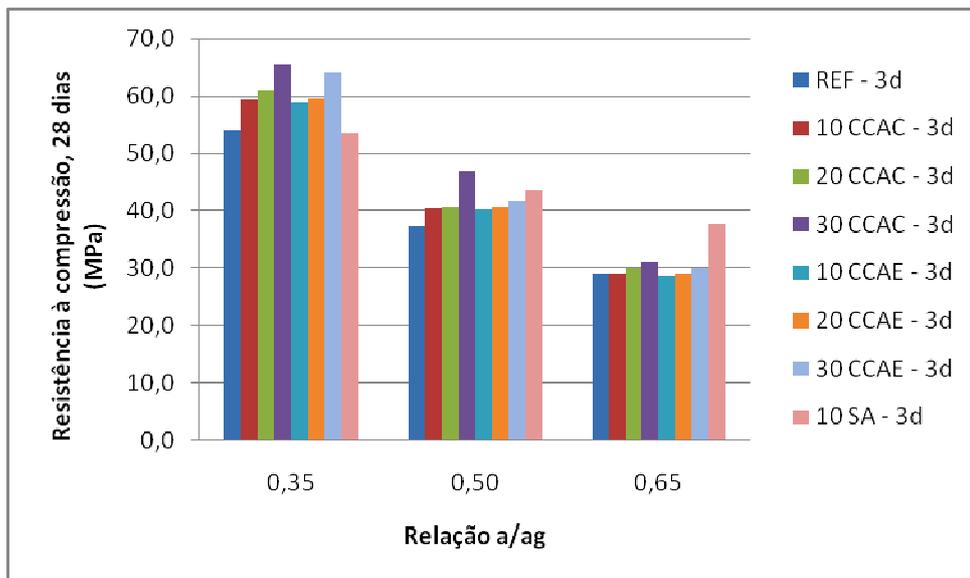
4.2 Análise dos resultados de resistência à compressão axial

Os resultados do ensaio de resistência à compressão axial para todas as misturas e idades investigadas, são apresentados na Tabela 4.1 e Figura 4.1, para os dois períodos de cura estudados.

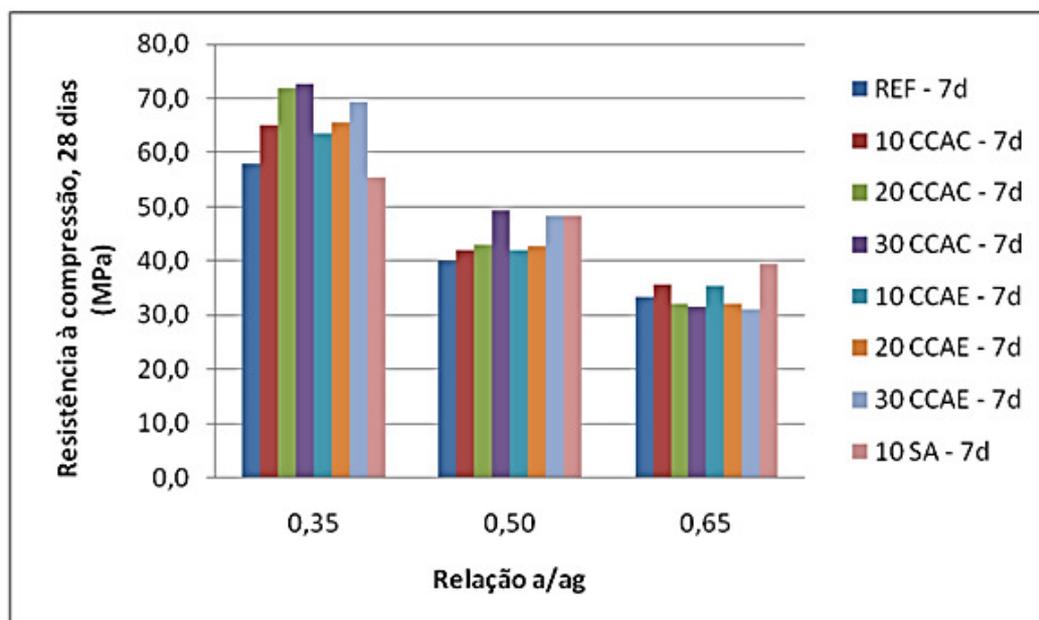
Tabela 4.1 – Resultados do ensaio de resistência à compressão axial

Mistura	Relação a/ag	Resistência à compressão axial (MPa)			
		28 dias		91 dias	
		cura 3 dias	cura 7 dias	cura 3 dias	cura 7 dias
REF	0,35	54,0	58,0	59,8	64,3
	0,50	37,3	40,0	41,0	45,0
	0,65	29,0	33,3	30,0	34,3
10 CCAC	0,35	59,3	65,0	66,8	70,5
	0,50	40,5	42,0	48,3	54,5
	0,65	29,0	35,7	38,0	40,3
20 CCAC	0,35	61,0	72,0	72,3	81,0
	0,50	40,7	43,0	50,3	53,7
	0,65	30,0	32,0	38,0	42,5
30 CCAC	0,35	65,7	72,7	67,5	75,8
	0,50	47,0	49,3	53,8	56,5
	0,65	31,0	31,7	37,8	41,5
10 CCAE	0,35	59,0	63,7	67,3	74,3
	0,50	40,3	42,0	47,8	54,3
	0,65	28,7	35,3	35,8	41,5
20 CCAE	0,35	59,5	65,7	70,5	74,0
	0,50	40,8	42,7	45,0	49,8
	0,65	29,0	32,0	35,3	40,3
30 CCAE	0,35	64,0	69,5	67,0	75,0
	0,50	41,8	48,3	46,0	54,8
	0,65	30,0	31,0	36,3	42,0
10 SA	0,35	53,5	55,5	62,8	73,0
	0,50	43,5	48,3	47,3	51,0
	0,65	37,8	39,5	40,0	43,7

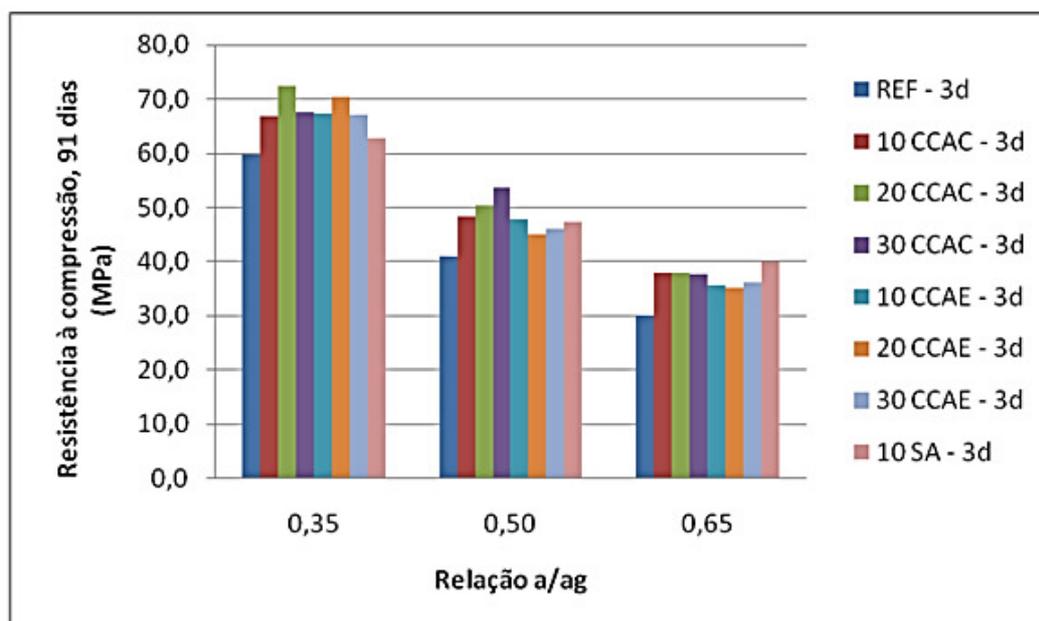
a)



b)



c)



d)

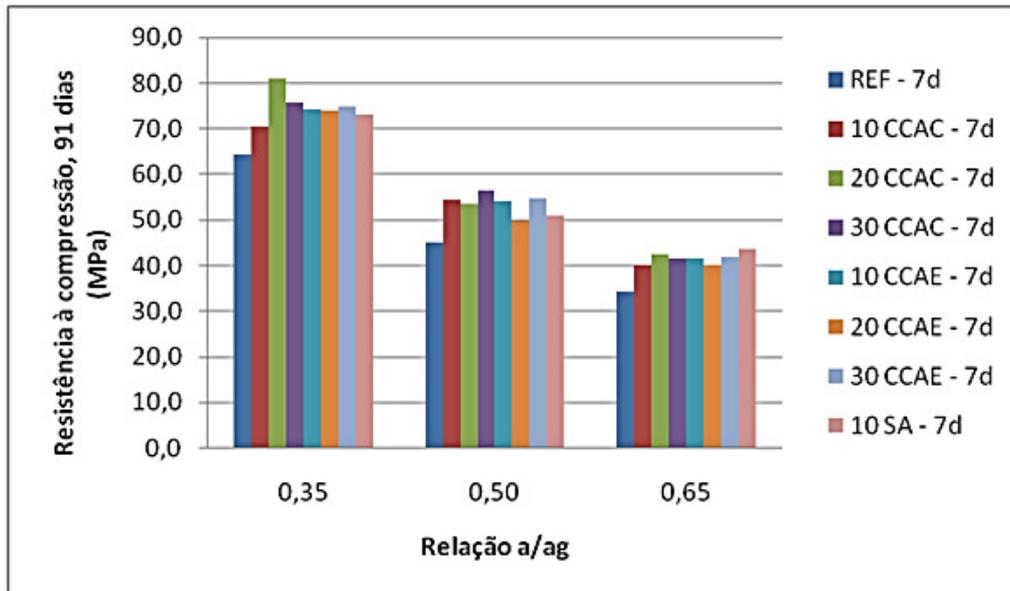


Figura 4.1 – Resistência à compressão versus relação a/ag: a) aos 28 dias com 3 dias de cura; b) aos 28 dias com 7 dias de cura; c) 91 dias com 3 dias de cura e d) 91 dias com 7 dias de cura.

Da análise da Tabela 4.1 e Figura 4.1, constata-se, para todas as misturas, que a resistência à compressão aumenta com a redução da relação a/ag, com o aumento no grau de hidratação e acréscimo no período de cura.

De modo geral, as misturas com adições minerais apresentaram valores de resistência à compressão superiores à mistura de referência, com exceção, aos 28 dias de ensaio, das misturas 10 CCAC e 20 CCAE, relação a/ag 0,65 e três dias de cura, no qual não houve modificação dessa propriedade; já para as misturas 20 CCAC, 30 CCAC, 20 CCAE e 30 CCAE, relação a/ag 0,65 e sete dias de cura; 10 CCAE, relação a/ag 0,65 e três dias de cura; e 10 SA, relação a/ag 0,35, três e sete dias de cura, a resistência à compressão axial foi inferior à da mistura de referência, aos 28 dias, conforme observado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Valores de resistência à compressão axial, em relação à mistura de referência

Mistura	Relação a/ag	Elevação da resistência à compressão axial (%)			
		28 dias		91 dias	
		cura 3 dias	cura 7 dias	cura 3 dias	cura 7 dias
10 CCAC	0,35	9,9	12,0	11,7	9,7
	0,50	8,5	5,0	17,9	21,1
	0,65	0,0	7,3	26,7	17,2
20 CCAC	0,35	13,0	24,1	21,1	26,1
	0,50	8,9	7,5	22,8	19,3
	0,65	3,4	-3,8	26,7	23,8
30 CCAC	0,35	21,6	25,3	13,0	17,9
	0,50	25,9	23,1	31,1	25,6
	0,65	6,9	-4,8	25,8	20,9
10 CCAE	0,35	9,3	9,8	12,7	15,6
	0,50	7,8	5,0	16,5	20,6
	0,65	-1,1	6,3	19,2	20,9
20 CCAE	0,35	10,2	13,2	18,0	15,2
	0,50	9,2	6,7	9,8	10,6
	0,65	0,0	-3,8	17,5	17,2
30 CCAE	0,35	18,5	19,8	12,1	16,7
	0,50	11,8	20,6	12,2	21,7
	0,65	3,4	-6,8	20,8	22,3
10 SA	0,35	-0,9	-4,3	5,0	13,6
	0,50	16,5	20,6	15,2	13,3
	0,65	30,2	18,8	33,3	27,2

OBS – o sinal negativo representa a redução (%) da resistência à compressão axial, em relação à mistura de referência

Nas misturas em que houve emprego de CCAC, CCAE e SA, a elevação da resistência à compressão pode ser atribuída à maior finura e pozolanicidade das adições minerais utilizadas, quando comparadas com o concreto de referência, as quais aumentam a compacidade da pasta e majoram a formação de C-S-H.

Aos 28 dias de ensaio, os maiores valores de resistência à compressão foram identificados nos concretos 30 CCAC, para as relações a/ag 0,35 e 0,50 e 10 SA, para a relação a/ag 0,65, tanto aos três como aos sete dias de cura. No ensaio de 91 dias, os melhores resultados de resistência à compressão foram verificados nos concretos 20 CCAC, 30 CCAC e 10 SA, para as relações a/ag 0,35, 0,50 e 0,65, respectivamente, nos dois períodos de cura investigados. A mistura de melhor desempenho foi aquela composta com 20% de cinza de casca de arroz clara (ensaio de 91 dias, sete dias de cura).

Na maioria dos casos, quando analisadas em igualdades de condições, as misturas com cinza clara¹⁴ e escura¹⁵ não apresentaram grandes variações entre si, apesar da diferença do teor de carbono grafítico entre ambas (89%). De modo geral, a mistura com apenas 10% de sílica ativa apresentou desempenho próximo aos das misturas com 30% de cinza de casca de arroz.

Resultados similares ao deste trabalho encontram-se no experimento de vários autores. Gastaldini et al. (2009), pesquisando misturas com 10%, 20% e 30% de CCA, com relação a/ag 0,35, 0,50 e 0,65, observaram uma elevação na resistência à compressão quando comparadas com a mistura de referência (sem adição mineral), nos dois períodos de ensaio, 28 e 91 dias. Da mesma forma que esta pesquisa, o melhor desempenho foi verificado na mistura com 20% de CCA. Todavia, foi constatado que o uso das adições minerais eleva o custo das misturas, pois, por apresentarem maior superfície específica, requerem o emprego de aditivos superplastificantes.

No trabalho de Zang, Lastra e Malhotra (1996) foi realizado um estudo com argamassas e concretos contendo 10% de CCA e o mesmo teor de sílica ativa, com relação a/ag 0,30. Os autores verificaram que, em relação à mistura de referência, houve um acréscimo na resistência à compressão dos concretos de 16% e 29%, aos 28 dias, e 12% e 10%, aos 91 dias, respectivamente, para as misturas com CCA e SA. Entretanto, para as argamassas com adições minerais de CCA e SA, nos dois períodos de ensaio, o desempenho foi inferior à da mistura de referência.

De modo semelhante, Ferreira et al. (2005), investigando concretos compostos por 10% de CCA e 10% de SA, nas relações a/ag 0,40, 0,55 e 0,70, constataram, aos 28 e 91 dias, uma elevação da resistência à compressão destas misturas, em comparação à mistura de referência. Através de parâmetros estatísticos, os autores averiguaram que a relação a/ag foi o fator de maior influência nos resultados de resistência à compressão, seguido da idade de ensaio e da adição mineral utilizada.

Coutinho (2003) analisou a resistência à compressão de concretos compostos com 10%, 15% e 20% de CCA e 10% de SA, com relação a/ag 0,43, aos 80 dias. O autor observou, em relação à mistura de referência, melhor desempenho para os concretos compostos com adições minerais, sendo que a mistura constituída de

¹⁴ Teor de carbono grafítico = 0,41%.

¹⁵ Teor de carbono grafítico = 3,69%.

20% de CCA, a exemplo do ocorrido no presente trabalho, apresentou melhor comportamento.

Tuan et al. (2011), ao investigar misturas com 20% de CCA e 20% de sílica ativa, em diferentes idades, curadas até a data dos ensaios e com relação a/ag 0,18, verificaram um acréscimo na resistência à compressão, em relação à mistura de referência, para ambas as misturas com adições minerais, tanto aos 28 como aos 91 dias, com desempenho superior para a mistura composta por 20% de CCA. Segundo os autores, a CCA e SA apresentam uma composição química similar, com área de superfície específica muito alta, porém, a CCA não é um material ultrafino como a SA. A elevada área de superfície específica da CCA é originada da porosidade interna, por isso a CCA pode comportar-se diferentemente da SA, em termos de hidratação e microestrutura do concreto.

Estudando concretos de alto desempenho, Salas et al. (2009) verificaram propriedades mecânicas de misturas com cinza da casca de arroz e SA, ambas com relação a/ag 0,45. A mesma CCA foi pré-condicionada de duas formas distintas: tratada quimicamente com solução de ácido hidroclorito por 24 horas antes da incineração a 600°C durante três horas (CCAqui), ou simplesmente queimada às mesmas condições, sem tratamento prévio (CCAconv). Nas idades de ensaio (20 a 180 dias), o comportamento das misturas foi similar, com elevação na resistência mecânica dos concretos com 5% e 10% de CCAqui e CCAconv, em relação ao concreto de referência (100% de cimento). Porém, quando o teor de substituição de cimento por CCA foi mais elevado (15% e 20%), a resistência à compressão da mistura de referência foi superior. Os autores atribuíram esse fato a possíveis problemas durante a mistura e coesão das amostras em estado fresco. Também foi verificado que o desempenho das misturas com CCAqui e SA foi similar em igualdade de condições e, na comparação entre as misturas com CCA, a mistura CCAqui apresentou melhor desempenho.

Investigando concretos de 7% a 15% de CCA, com relação a/ag 0,45 e concretos com 10% de CCA, com relação a/ag 0,40, Ramezaniapour et al. (2011) constataram, aos 28 dias, um aumento na resistência à compressão com o emprego dessa adição mineral, assim como também averiguaram benefícios na resistência da misturas com 4,5% e 7,5% de sílica ativa, em diferentes relações a/ag, quando comparados com misturas sem adição mineral.

Ganesan, Rajagopal e Thangavel (2008), estudando misturas com 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% e 35% de CCA e relação a/ag 0,53, constataram, aos 28 e 90 dias, que as misturas com até 30% de CCA, obtiveram resistência à compressão superior à mistura de referência. Os autores também verificaram uma elevação na resistência à compressão na medida em que se elevou o teor de adição mineral até 25%; no entanto, a partir deste limite, houve uma redução nos valores de resistência à compressão, sendo essa redução tanto maior quanto maior foi o teor de CCA acrescentado.

Rêgo, Figueiredo e Nepomuceno (2002), investigando concretos compostos com CCA residual, moída por cinco horas, em substituição ao cimento, nas proporções de 0%, 5%, 10% e 20% e com relação a/ag 0,50, verificaram, nas idades de 7, 28 e 63 dias, uma elevação da resistência à compressão das misturas, em relação à mistura sem adição mineral, com melhor desempenho para os concretos compostos com 5%, 5% e 10% de CCA, para as idades de 7, 28 e 63 dias, respectivamente. A exceção verificada foi para a mistura composta com 20% de CCA, aos sete dias, a qual apresentou resistência à compressão inferior à da mistura de referência. Os autores atribuíram esse fato à necessidade de um maior tempo para que ocorressem todas as reações pozolânicas para a mistura com maior quantidade de adição mineral.

Na análise de misturas com teores de 0% a 30% de CCA, tratada termicamente, em substituição ao cimento de referência, utilizando relações a/ag 0,30, 0,35, 0,40 e 0,50, Safiuddin, West e Soudki (2010) observaram, aos 28 e 56 dias, que o concreto com 30% de CCA e relação a/ag 0,35 apresentou melhor desempenho quanto à resistência à compressão, enquanto que a mistura sem CCA, com maior relação a/ag (0,50) demonstrou comportamento inverso, com o mais baixo nível de resistência. Os autores atribuíram a elevada resistência à compressão pelo efeito microfiller e ao aumento das reações pozolânicas ocasionadas pelo emprego da CCA, a qual proporcionou uma redução da porosidade do concreto pelo preenchimento dos poros e melhoria da microestrutura do material (zona de transição pasta-agregado).

Teixeira (2005), ao estudar misturas com 5% e 10% de cinza de casca de arroz, com relação a/c 0,50, verificou um aumento da resistência à compressão, frente à mistura de referência, de 7% e 2%, aos 28 dias e 5% e 8%, aos 91 dias, respectivamente, para as misturas com 5% e 10% de substituição de cimento por

CCA. No mesmo estudo, os acréscimos na resistência à compressão, comparados com a mistura de referência, verificados na relação a/c 0,60, foram de 15% e 20%, aos 28 dias e 14% e 28%, aos 91 dias, respectivamente, para as misturas com 5% e 10% de CCA.

Em contrapartida, Chao-Lung, Anh-Tuan e Chun-Tsun (2011), investigando a resistência à compressão de concretos compostos com teores de 10%, 20% e 30% de CCA residual, queimada à temperatura de 600 à 800°C, moída durante uma hora para elevar a finura (87 μm para 12 μm), observaram, em relação à mistura de referência, valores similares à mesma, tanto aos 28 como aos 91 dias. No entanto, acima do teor de 20% de CCA, houve decréscimo na resistência à compressão.

Utilizando misturas com 6% e 12% de sílica ativa, nas relações a/ag 0,50, 0,65 e 0,80, Dotto et al. (2004) também verificaram, conforme exposto neste trabalho, um melhor desempenho das misturas com SA no que tange à resistência à compressão, em relação à mistura de referência, no ensaio de 28 dias, obtendo melhor desempenho com o aumento do teor de substituição de SA.

De modo análogo, Sabir (1997) observou, na idade de 28 dias, valores de resistência à compressão de concretos com 5% e 10% SA e relação a/ag 0,50 superiores aos obtidos pelo concreto de referência. A presente pesquisa, em igualdade de condições, concorda com os resultados do presente autor.

Conforme já esperado no ensaio de resistência à compressão axial e verificado na bibliografia acima descrita, na maioria das situações, a utilização da cinza de casca de arroz proporcionou acréscimo na resistência à compressão, assim como também foi observado com emprego de sílica ativa, quando comparadas com a mistura de referência, sendo esse acréscimo mais pronunciado com o aumento no teor de adição mineral. Não houve grandes variações no resultado das misturas com cinza de casca de arroz de diferentes teores de carbono grafítico, quando analisadas em igualdade de condições. O destaque foi para a mistura 20 CCAC, que apresentou o maior valor de resistência à compressão (81 MPa), aos 91 dias.

4.3 Análise dos resultados de absorção capilar

Os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade das misturas investigadas, após 3 h, 6 h, 24 h, 48 h e 72 h, aos 28 dias, para os períodos de cura três e sete dias, são expressos nas Tabelas 4.3 e 4.4 e, aos 91 dias, nos mesmos prazos de cura, nas Tabelas 4.5 e 4.6, respectivamente. Nas Tabelas 4.3 a 4.6 são apresentadas, também, a leitura da altura média (h) que a água atingiu no interior dos corpos-de-prova, ao término do ensaio de absorção capilar.

Tabela 4.3 – Resultados de absorção capilar aos 28 dias, cura de 3 dias

<i>Mistura</i>	<i>Relação a/ag</i>	<i>Absorção de água por capilaridade (g/cm²)</i>					<i>h (cm)</i>
		<i>3 h</i>	<i>6 h</i>	<i>24 h</i>	<i>48 h</i>	<i>72 h</i>	
REF	0,35	0,217	0,321	0,585	0,726	0,811	8,40
	0,50	0,283	0,415	0,783	1,019	1,151	10,03
	0,65	0,274	0,415	0,802	1,085	1,245	10,67
10 CCAC	0,35	0,254	0,352	0,420	0,630	0,730	12,85
	0,50	0,320	0,450	0,740	0,880	1,060	12,25
	0,65	0,420	0,530	0,820	1,060	1,250	9,70
20 CCAC	0,35	0,151	0,198	0,264	0,368	0,396	12,10
	0,50	0,217	0,302	0,453	0,604	0,679	11,00
	0,65	0,283	0,377	0,613	0,811	0,934	10,93
30 CCAC	0,35	0,141	0,179	0,226	0,255	0,258	13,32
	0,50	0,179	0,236	0,311	0,368	0,375	12,93
	0,65	0,236	0,292	0,462	0,566	0,607	11,67
10 CCAE	0,35	0,368	0,453	0,556	0,604	0,688	10,70
	0,50	0,274	0,396	0,698	0,849	1,028	9,57
	0,65	0,292	0,424	0,792	1,019	1,236	10,00
20 CCAE	0,35	0,061	0,073	0,090	0,104	0,111	11,67
	0,50	0,073	0,085	0,123	0,153	0,172	11,27
	0,65	0,066	0,101	0,193	0,262	0,311	11,25
30 CCAE	0,35	0,035	0,050	0,078	0,090	0,101	12,30
	0,50	0,050	0,068	0,111	0,146	0,163	12,27
	0,65	0,068	0,101	0,179	0,245	0,259	10,80
10 SA	0,35	0,042	0,047	0,061	0,068	0,073	12,83
	0,50	0,054	0,061	0,092	0,111	0,125	12,57
	0,65	0,083	0,101	0,170	0,229	0,264	11,97

Tabela 4.4 – Resultados de absorção capilar aos 28 dias, cura de 7 dias

<i>Mistura</i>	<i>Relação a/ag</i>	<i>Absorção de água por capilaridade (g/cm²)</i>					<i>h (cm)</i>
		<i>3 h</i>	<i>6 h</i>	<i>24 h</i>	<i>48 h</i>	<i>72 h</i>	
REF	0,35	0,226	0,330	0,575	0,688	0,745	7,43
	0,50	0,245	0,358	0,651	0,877	1,000	9,17
	0,65	0,283	0,406	0,736	0,971	1,113	9,33
10 CCAC	0,35	0,201	0,294	0,390	0,580	0,700	12,90
	0,50	0,290	0,410	0,730	0,831	1,020	12,60
	0,65	0,391	0,491	0,750	0,910	1,100	10,00
20 CCAC	0,35	0,123	0,160	0,198	0,264	0,302	12,37
	0,50	0,179	0,255	0,358	0,462	0,528	11,87
	0,65	0,226	0,302	0,481	0,622	0,726	11,47
30 CCAC	0,35	0,104	0,123	0,141	0,170	0,179	13,33
	0,50	0,151	0,170	0,236	0,264	0,274	13,30
	0,65	0,160	0,189	0,245	0,283	0,304	12,97
10 CCAE	0,35	0,207	0,311	0,519	0,575	0,679	6,57
	0,50	0,170	0,302	0,622	0,811	1,000	8,93
	0,65	0,283	0,406	0,717	0,887	1,075	10,10
20 CCAE	0,35	0,038	0,045	0,064	0,080	0,085	11,10
	0,50	0,057	0,073	0,111	0,141	0,160	11,47
	0,65	0,064	0,087	0,156	0,205	0,243	11,63
30 CCAE	0,35	0,026	0,040	0,054	0,073	0,078	13,07
	0,50	0,040	0,054	0,092	0,118	0,132	12,57
	0,65	0,057	0,080	0,127	0,167	0,167	12,40
10 SA	0,35	0,033	0,038	0,047	0,052	0,054	12,90
	0,50	0,054	0,057	0,083	0,101	0,113	12,63
	0,65	0,075	0,085	0,141	0,184	0,212	12,20

Tabela 4.5 – Resultados de absorção capilar aos 91 dias, cura de 3 dias

<i>Mistura</i>	<i>Relação a/ag</i>	<i>Absorção de água por capilaridade (g/cm²)</i>					<i>h (cm)</i>
		<i>3 h</i>	<i>6 h</i>	<i>24 h</i>	<i>48 h</i>	<i>72 h</i>	
REF	0,35	0,170	0,264	0,453	0,585	0,660	12,80
	0,50	0,189	0,264	0,528	0,726	0,830	10,40
	0,65	0,226	0,302	0,604	0,811	0,953	10,97
10 CCAC	0,35	0,170	0,212	0,354	0,410	0,439	7,00
	0,50	0,269	0,368	0,637	0,806	0,934	8,75
	0,65	0,314	0,410	0,750	0,948	1,089	9,90
20 CCAC	0,35	0,132	0,141	0,226	0,264	0,292	11,93
	0,50	0,113	0,207	0,349	0,443	0,472	6,67
	0,65	0,236	0,284	0,425	0,512	0,573	8,00
30 CCAC	0,35	0,094	0,132	0,151	0,189	0,198	11,90
	0,50	0,104	0,151	0,217	0,255	0,283	11,47
	0,65	0,132	0,189	0,311	0,396	0,424	9,83
10 CCAE	0,35	0,160	0,198	0,283	0,311	0,349	11,83
	0,50	0,160	0,207	0,340	0,424	0,481	11,37
	0,65	0,236	0,292	0,434	0,528	0,585	10,60
20 CCAE	0,35	0,038	0,050	0,068	0,078	0,083	12,00
	0,50	0,054	0,066	0,104	0,127	0,141	11,17
	0,65	0,073	0,101	0,179	0,233	0,264	9,97
30 CCAE	0,35	0,035	0,040	0,059	0,059	0,066	11,73
	0,50	0,050	0,064	0,099	0,113	0,123	11,07
	0,65	0,059	0,073	0,113	0,141	0,158	11,03
10 SA	0,35	0,021	0,031	0,040	0,047	0,052	12,53
	0,50	0,045	0,061	0,090	0,111	0,120	12,03
	0,65	0,068	0,087	0,139	0,170	0,193	11,87

Tabela 4.6 – Resultados de absorção capilar aos 91 dias, cura de 7 dias

<i>Mistura</i>	<i>Relação a/ag</i>	<i>Absorção de água por capilaridade (g/cm²)</i>					<i>h (cm)</i>
		<i>3 h</i>	<i>6 h</i>	<i>24 h</i>	<i>48 h</i>	<i>72 h</i>	
REF	0,35	0,151	0,217	0,387	0,500	0,547	11,47
	0,50	0,170	0,255	0,462	0,622	0,698	11,40
	0,65	0,189	0,283	0,604	0,830	0,943	11,07
10 CCAC	0,35	0,170	0,212	0,325	0,396	0,424	8,00
	0,50	0,241	0,297	0,509	0,651	0,707	6,60
	0,65	0,269	0,368	0,679	0,877	0,976	10,25
20 CCAC	0,35	0,113	0,151	0,217	0,264	0,283	12,53
	0,50	0,132	0,170	0,264	0,340	0,368	7,50
	0,65	0,198	0,245	0,396	0,509	0,566	6,90
30 CCAC	0,35	0,094	0,123	0,123	0,141	0,151	12,20
	0,50	0,075	0,113	0,132	0,160	0,189	10,97
	0,65	0,104	0,151	0,198	0,226	0,255	12,57
10 CCAE	0,35	0,141	0,170	0,236	0,292	0,311	11,67
	0,50	0,179	0,226	0,349	0,434	0,472	11,10
	0,65	0,207	0,264	0,415	0,509	0,575	10,80
20 CCAE	0,35	0,031	0,040	0,054	0,061	0,068	12,50
	0,50	0,050	0,059	0,087	0,106	0,118	11,77
	0,65	0,068	0,092	0,144	0,184	0,203	10,43
30 CCAE	0,35	0,026	0,031	0,047	0,047	0,054	12,17
	0,50	0,042	0,050	0,075	0,087	0,099	12,17
	0,65	0,045	0,057	0,090	0,106	0,120	11,30
10 SA	0,35	0,024	0,026	0,033	0,035	0,042	13,00
	0,50	0,042	0,052	0,075	0,087	0,097	11,67
	0,65	0,059	0,078	0,120	0,144	0,167	11,43

Nas Figuras 4.2 e 4.3 são mostrados os valores médios de absorção capilar em função da relação a/ag para cada tipo de mistura, com três e sete dias de cura, respectivamente, ensaiadas aos 28 da data de moldagem. Os mesmos resultados de absorção capilar em função da relação a/ag, porém às misturas com 91 dias de moldagem, são visualizados nas Figura 4.4 e 4.5, referente aos prazos de cura três e sete dias, respectivamente.

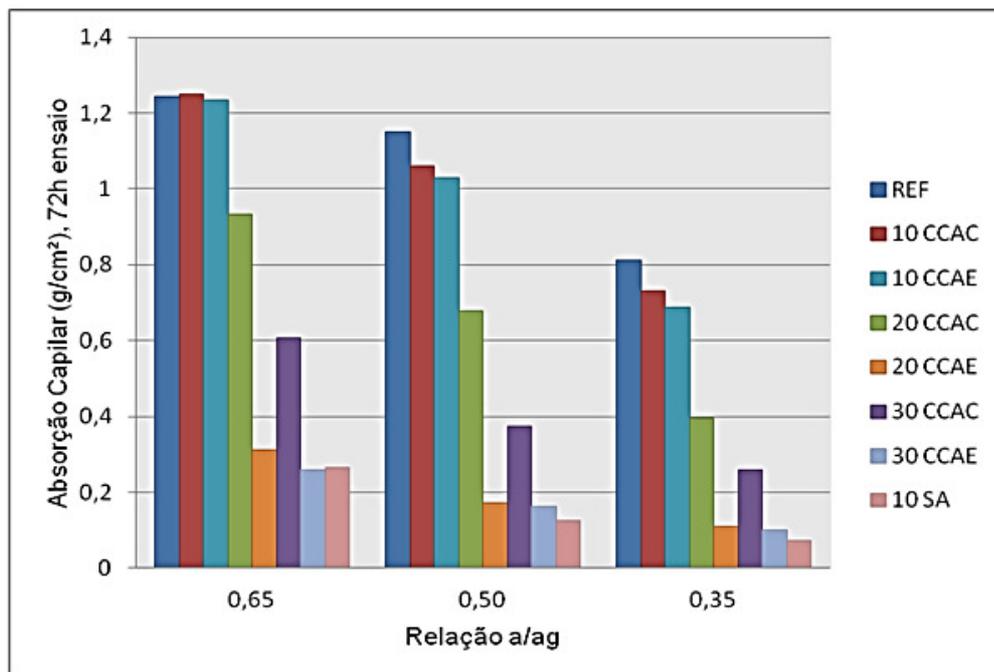


Figura 4.2 – Valores médios de absorção capilar para cada mistura, em função da relação a/ag, aos 28 dias de moldagem, cura 3 dias.

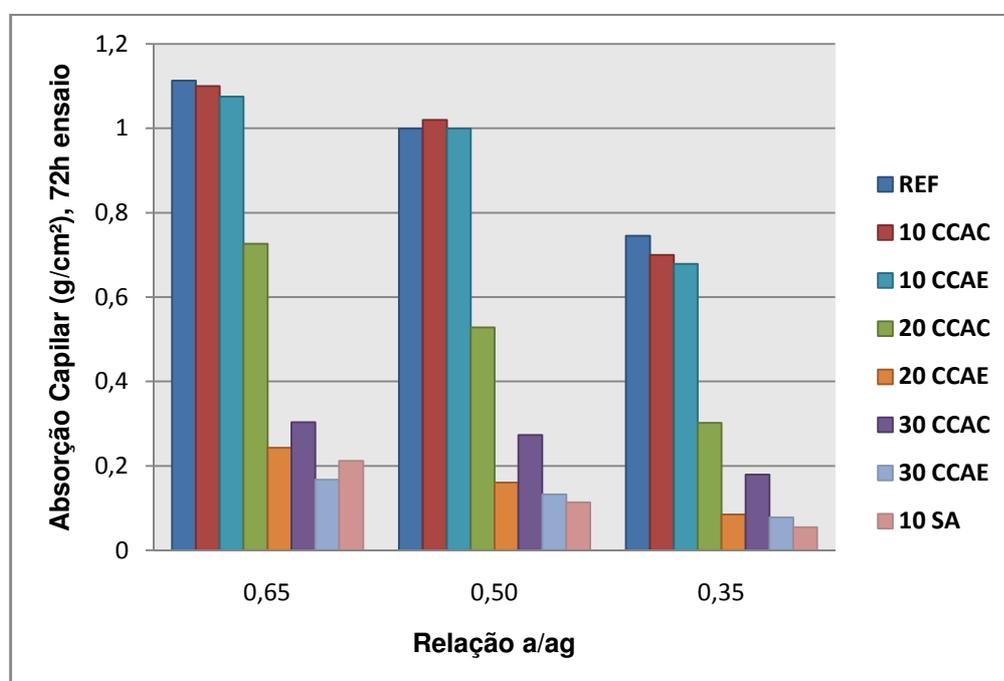


Figura 4.3 – Valores médios de absorção capilar para cada mistura, em função da relação a/ag, aos 28 dias de moldagem, cura 7 dias.

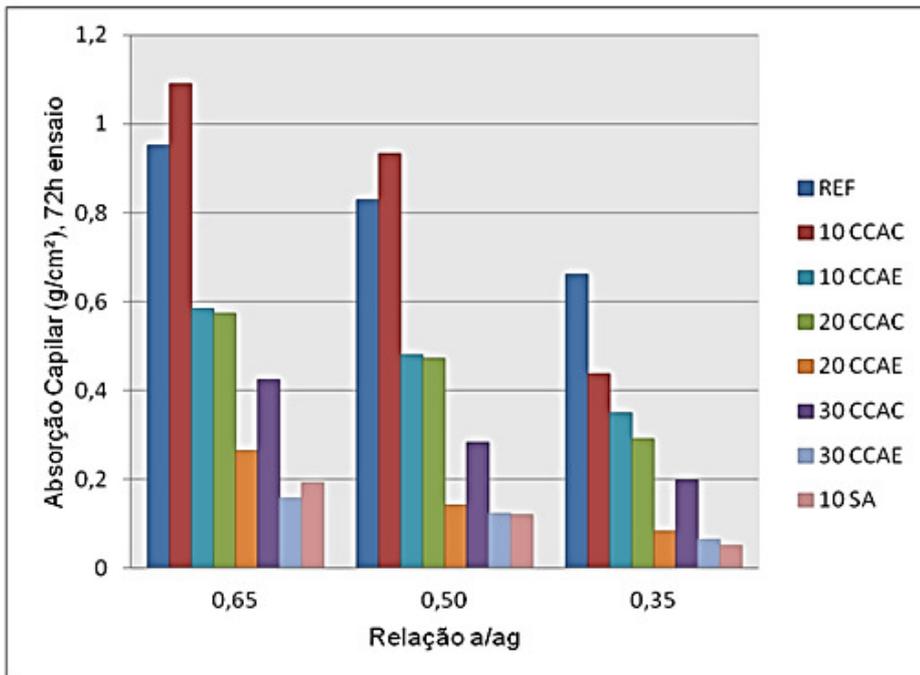


Figura 4.4 – Valores médios de absorção capilar para cada mistura, em função da relação a/ag, aos 91 dias de moldagem, cura 3 dias.

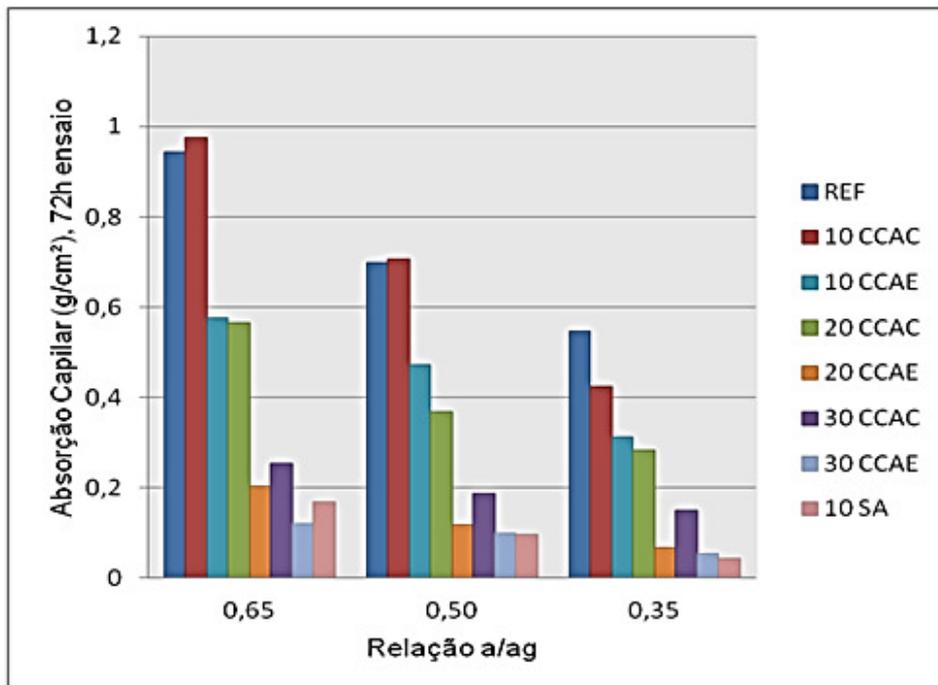


Figura 4.5 – Valores médios de absorção capilar para cada mistura, em função da relação a/ag, aos 91 dias de moldagem, cura 7 dias.

Da análise das Tabelas 4.3 a 4.6, verifica-se, de modo geral, que as misturas com adição de cinza de casca de arroz e sílica ativa apresentaram valores de

absorção capilar menores que os encontrados na mistura de referência, nos dois períodos de cura investigados. Esse comportamento está de acordo com o relatado por Azevedo, Martins e Silveira (2002), embora os autores tenham citado que a absorção de água é mais influenciada pela relação a/ag do que pelo teor de CCA utilizado. Após 72h, observou-se que apenas a mistura 10 CCAC apresentou valores de absorção capilar maiores que a mistura de referência, nos ensaios de 28 dias (três dias de cura, relação a/ag 0,65 e sete dias de cura, relação a/ag 0,50) e de 91 dias (nos dois prazos de cura investigados, relação a/ag 0,65 e 0,50).

Para todas as misturas estudadas, o acréscimo no período de cura, de três para sete dias, resultou numa redução na absorção de água por capilaridade, em média, 18% e 16%, aos 28 e 91 dias de ensaio, respectivamente. Também foi verificado melhora nesta propriedade com o aumento no grau de hidratação das amostras, de 28 para 91 dias.

Em relação à mistura de referência, na idade de 28 dias, e prazo de cura de três dias, as misturas 10 CCAC, 20 CCAC, 30 CCAC, 10 CCAE, 20 CCAE, 30 CCAE e 10 SA apresentaram uma redução na absorção de água por capilaridade, no tempo 72 h, de 10%, 51%, 68%, 15%, 86%, 88% e 91%, respectivamente, para a relação a/ag 0,35; 8%, 41%, 67%, 11%, 85%, 86% e 89% para a relação a/ag 0,50 e 0%, 25%, 51%, 1%, 75%, 79% e 79%, para a relação a/ag 0,65.

Da mesma forma, na idade de 28 dias, e prazo de cura de sete dias, a redução da absorção capilar, em relação à mistura REF, no tempo 72 h, para as misturas 10 CCAC, 20 CCAC, 30 CCAC, 10 CCAE, 20 CCAE, 30 CCAE e 10 SA foi de 6%, 59%, 76%, 9%, 89%, 90% e 93%, respectivamente, para a relação a/ag 0,35; -2%¹⁶, 47%, 73%, 0%, 84%, 87% e 89%, para a relação a/ag 0,50 e 1%, 35%, 73%, 3%, 78%, 85% e 81%, para a relação a/ag 0,65.

Em análise similar, na idade de 91 dias, e prazo de cura de três dias, as misturas 10 CCAC, 20 CCAC, 30 CCAC, 10 CCAE, 20 CCAE, 30 CCAE e 10 SA apresentaram, no tempo 72 h, redução na absorção de água por capilaridade, em relação à mistura REF, de 34%, 56%, 70%, 47%, 88%, 90% e 92%, respectivamente, para a relação a/ag 0,35; -13%, 43%, 66%, 42%, 83%, 85% e 86% para a relação a/ag 0,50 e -14%, 40%, 55%, 39%, 72%, 83% e 80%, para a relação a/ag 0,65.

¹⁶ O sinal negativo indica que a referida mistura apresentou absorção capilar mais elevada que a mistura de referência, na porcentagem indicada.

De modo semelhante, na idade de 91 dias, e prazo de cura de sete dias, constata-se a redução da absorção capilar, em relação à mistura REF, no tempo 72 h, para as misturas 10 CCAC, 20 CCAC, 30 CCAC, 10 CCAE, 20 CCAE, 30 CCAE e 10 SA de 22%, 48%, 72%, 43, 88%, 90% e 92%, respectivamente, para a relação a/ag 0,35; -1%, 47%, 73%, 32%, 83%, 86% e 86%, para a relação a/ag 0,50 e -4%, 40%, 73%, 39%, 79%, 87% e 82%, para a relação a/ag 0,65.

Da análise das Figuras 4.2 a 4.5, observa-se que a absorção capilar, independente do período de cura, diminui com a redução da relação a/ag, numa relação quase linear, para todas as misturas investigadas, tanto aos 28 como aos 91 dias de ensaio.

Comparando-se as misturas com cinza de casca de arroz, observa-se que, em igualdade de condições, as misturas com cinza de casca de arroz escura apresentaram menores valores de absorção de água por capilaridade, nos dois períodos de ensaio, independente do período de cura examinado, sugerindo a influência positiva da maior área superficial desta cinza na microestrutura com reflexo no comportamento da absorção capilar. Também foi averiguado que quanto mais elevado o teor de substituição de cimento por cinza de casca de arroz, menor foi a absorção capilar das misturas investigadas, em conformidade com os resultados de Rêgo e Figueiredo (2002), os quais avaliaram a absorção capilar de concretos com CCA residual em teores de 0%, 5%, 10% e 20% de substituição em relação ao cimento.

A mistura com 10% de sílica ativa foi a que apresentou os menores índices de absorção capilar, nos dois períodos de ensaio. Seu desempenho foi muito próximo ao da mistura com 30% de cinza de casca de arroz escura.

Ao examinar as alturas médias de ascensão capilar, Tabelas 4.3 a 4.6, verificou-se, de forma geral, que as mesmas decresceram com a elevação da relação a/ag, de 0,35 a 0,65. As exceções verificadas ocorreram na mistura de referência, especialmente aos 28 dias, além das misturas 10 CCAE e 20 CCAE, na mesma data de ensaio, e 10 CCAC e 20 CCAC, aos 91 dias, as quais demonstraram comportamento inverso.

Helene (1993) afirmou que a redução da relação a/c provoca a redução do diâmetro dos capilares, elevando a pressão capilar. Esse fato proporciona um aumento na altura de ascensão capilar das misturas, conforme observado neste trabalho.

Na maioria das amostras, nas duas idades de ensaio, 28 e 91 dias, a diferença no período de cura de três para sete dias pouco interferiu na altura média de ascensão capilar; porém, se observa uma leve redução (5%) na altura média de ascensão capilar das misturas para o período mais prolongado de cura. A menor altura média de ascensão capilar foi de 6,57 cm, encontrada na mistura 10 CCAE, ensaio de 28 dias, relação a/ag 0,35 e cura de sete dias, enquanto o maior valor de h foi 13,33 cm, identificado na mistura 30 CCAC, relação a/ag 0,35 e cura de sete dias, verificada também no ensaio de 28 dias.

A redução da absorção capilar com o incremento das adições minerais utilizadas neste trabalho reflete as modificações ocorridas na estrutura dos poros das amostras investigadas (intercomunicabilidade, distribuição, diâmetro, entre outros). No entanto, somente com um estudo mais aprofundado na microestrutura das amostras pode-se explicar melhor o comportamento das misturas frente à absorção de água por capilaridade.

Com o emprego de adições minerais, ocorre o chamado refinamento dos poros do material. Nessa situação, o diâmetro dos poros é reduzido, porém as tensões nos capilares crescem, aumentando a velocidade de absorção. Essa afirmação pode justificar o comportamento da mistura com pequenas quantidades de adição mineral, 10 CCAC, a qual, no ensaio de 28 dias (relação a/ag 0,65, cura três dias; relação a/ag 0,50, cura sete dias) e de 91 dias (relação a/ag 0,65 e 0,50, nos dois períodos de cura), apresentou absorção capilar maior que a absorção da mistura de referência.

No entanto, com maiores teores de adição mineral, o diâmetro dos capilares torna-se ainda mais reduzido, a ponto de interferir na continuidade do conjunto capilar, onde provavelmente fragmentará este sistema, aumentando a compacidade do conjunto. No caso das misturas com CCAC e CCAE utilizadas neste experimento, esse comportamento ficou evidente quando se elevou o teor dessas adições minerais para 20% e 30%.

Safiuddin, West e Soudki (2010) investigaram misturas com teores de 0% a 30% de substituição de cimento Portland por cinza de casca de arroz, aos 28 e 56 dias, nas relações a/ag 0,30, 0,35, 0,40 e 0,50, observando uma redução na absorção de água das misturas com a diminuição da relação a/ag utilizada, elevação no teor de CCA e acréscimo no período de ensaio (56 dias). Os resultados desta pesquisa foram semelhantes aos da investigação dos autores acima. O melhor

desempenho foi verificado na mistura com 30% de CCA, para o qual os autores creditaram a significativa redução da absorção de água à redução da porosidade pelo elevado conteúdo de CCA.

Memon, Shaikh e Akbar (2011), pesquisando misturas com 0%, 25% e 50% de cinza de casca de arroz nas relações a/ag 0,40, 0,38 e 0,36, respectivamente, observaram uma redução na absorção de água, aos 28 dias, de 69% para a mistura com 25% de CCA e de 74% para a mistura com 50% de CCA, em comparação à mistura com 0% de CCA, quando utilizaram, para todas as misturas, um teor de 4% de aditivo superplastificante. Todavia, no mesmo período de ensaio, quando o teor de aditivo superplastificante foi reduzido para 3,5%, a absorção de água, em relação à mistura sem CCA, foi 9% superior para a mistura com 25% de CCA e 37% inferior para a mistura com 50% de CCA, para o qual foi sugerida a influência positiva do conteúdo mais elevado do aditivo superplastificante utilizado. Os autores atribuíram o decréscimo na absorção de água das misturas com a elevação do teor de cinza de casca de arroz ao efeito microfiller e à adicional produção de C-S-H, com redução do volume e tamanho dos poros do material.

No trabalho de Salas et al. (2009), ao estudar concretos com diferentes teores de cinza da casca de arroz tratada quimicamente (CCAqui), CCA convencional (CCAconv) e sílica ativa, na relação a/ag 0,45, os autores também constataram redução na absorção capilar das misturas, em relação ao concreto de referência, com melhor desempenho para as misturas com adição de CCAqui e SA, atribuindo este desempenho ao refinamento dos poros do material provocado pelas adições minerais utilizadas.

Ganesan, Rajagopal e Thangavel (2008) investigaram concretos compostos com 5% a 35% de cinza de casca de arroz, com o objetivo de determinar a porcentagem ótima de substituição. Verificaram, entre outras propriedades, a absorção capilar, e constataram, na idade de 28 dias, que essa aumenta com o aumento do teor de substituição de cimento por CCA. Os autores atribuíram este fator ao efeito higroscópico e à maior finura da CCA em relação ao cimento de referência. Entretanto, na idade de 90 dias, a porcentagem de absorção de água decresceu consideravelmente com o incremento do teor de CCA, até o limite de 25%. Acima desse teor, os resultados foram superados pelos resultados da mistura de referência. Segundo os autores, com o prolongamento do período de cura investigado, a adição de CCA certamente reduziria ainda mais a permeabilidade das

amostras. No mesmo trabalho, também foi verificado o coeficiente de absorção de água e sortividade¹⁷ das misturas. Aos 90 dias, todas as misturas com CCA apresentaram melhor desempenho nessas duas propriedades, em comparação à mistura de referência.

Da mesma forma, Mahmud et al. (2009), investigando misturas com teor de 5% a 20% de cinza de casca de arroz, verificaram uma redução na absorção de água dessas misturas, quando comparadas com a mistura de referência, atribuindo à elevada área de superfície específica das partículas de CCA, com o incremento de reações pozolânicas, formando produtos de hidratação secundários e provocando a descontinuidade do sistema de poros do material. Ao analisar a sortividade das misturas, os autores constataram que a presença de CCA resulta em valores significativamente mais baixos dessa propriedade, quando comparados com os resultados da mistura de referência, e também que houve redução da sortividade com a elevação da idade do concreto.

Coutinho (2003) averiguou que concretos com substituição de cimento por 10%, 15% e 20% de cinza de casca de arroz, aos 105 dias, demonstraram menores valores de sortividade, em relação ao concreto de referência.

Ao investigar misturas com 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% de cinza de casca de arroz em substituição parcial ao cimento Portland, Saraswathy e Song (2007) observaram, aos 28 dias, que o coeficiente de absorção de água das misturas com adição mineral foi menor que o verificado na mistura de referência.

Frizzo (2001) analisando a absorção capilar, aos 91 dias, de misturas com diferentes tipos de adições minerais, como cinza volante, cinza de casca de arroz e sílica ativa, em variados teores e relações a/ag, constatou a redução desta propriedade em relação ao concreto de referência, para todas as misturas com adições minerais, independente do tipo, teor e relação a/ag investigada.

Tashima et al. (2005) estudaram a influência da cinza da casca de arroz, queimada com controle de temperatura, na absorção capilar do concreto, com amostras com teores de 5% e 10% de CCA em substituição ao cimento de referência, para uma relação a/ag 0,42. No ensaio de 91 dias, a redução da absorção capilar, em relação à mistura de referência, foi de 14% e 39%, para as

¹⁷ Sortividade é a mensuração das forças capilares manifestadas na estrutura dos poros através dos fluidos no interior do material (HALL, 1989 apud GANESAN; RAJAGOPAL; THANGAVEL, 2008). É caracterizada pela tendência do material poroso em absorver e transmitir água por ações capilares (HALL, 1989 apud MAHMUD et al., 2009).

misturas com 5% e 10% de CCA, respectivamente, verificando a redução da absorção capilar com a elevação do teor de CCA. Os autores atribuíram os baixos valores de absorção capilar à maior finura da cinza utilizada, em comparação com o cimento de referência.

Todavia, Teixeira (2005) estudando misturas com 5% e 10% de CCA em substituição ao cimento de referência, aos 91 dias, verificou que a absorção capilar aumentou para os concretos com 5% e 10% de CCA em relação ao concreto de referência, na proporção de 3% e 11%, respectivamente, para a relação a/c 0,50 e 6% e 5%, respectivamente, para a relação a/c 0,60. Segundo o autor, este comportamento ocorre porque a principal ação das partículas de cinza de casca de arroz em concretos é o efeito microfiller; assim as referidas partículas não permitem o fechamento dos poros do material para evitar a penetração de água e conseqüentemente aumenta a absorção do concreto. Comparando-se com o presente trabalho, a mistura 10 CCAC apresentou comportamento semelhante, para as relações a/ag 0,50 e 0,65.

No trabalho de Cezar (2011) foram realizados ensaios de absorção de água por capilaridade, segundo a norma NBR 9779:1995, aos 91 dias de moldagem. Foram investigadas misturas com teores de 15% de cinza de casca de arroz natural e moída (15 CCAN, 15 CCAM), em substituição parcial ao cimento de referência (REF), nas relações a/ag 0,45, 0,55 e 0,65. A autora verificou que todas as misturas apresentaram aumento na absorção capilar com o aumento na relação a/ag, concordando com os resultados da presente pesquisa, determinando este fator à uma porosidade mais aberta e interconectada para concretos com relação a/ag elevada, conforme elucidado por Neville (1997). Averiguou, também, que as misturas com adição mineral apresentaram valores de absorção capilares menores que os valores encontrados na mistura de referência, em todas as relações a/ag. Com relação à altura média de ascensão capilar, de modo geral, as misturas 15 CCAN e 15 CCAM apresentaram resultados mais elevados, em comparação à mistura de referência, à exceção da mistura 15 CCAN que apresentou a menor altura de ascensão capilar do ensaio, na relação a/ag 0,65.

Conforme exposto nos resultados de absorção capilar desta pesquisa, verificou-se a redução dessa propriedade com o aumento do prazo de cura, elevação do período de ensaio, redução da relação a/ag e incremento de adições minerais, especialmente nos teores de 20% e 30%.

Dentre as misturas com cinza de casca de arroz, a de maior área superficial (CCAÉ) apresentou melhor desempenho. O menor valor de absorção de água por capilaridade, após 72 h de ensaio, foi observado na mistura com 10% de sílica ativa, 0,042 g/cm², aos 91 dias (relação a/ag 0,35, sete dias de cura).

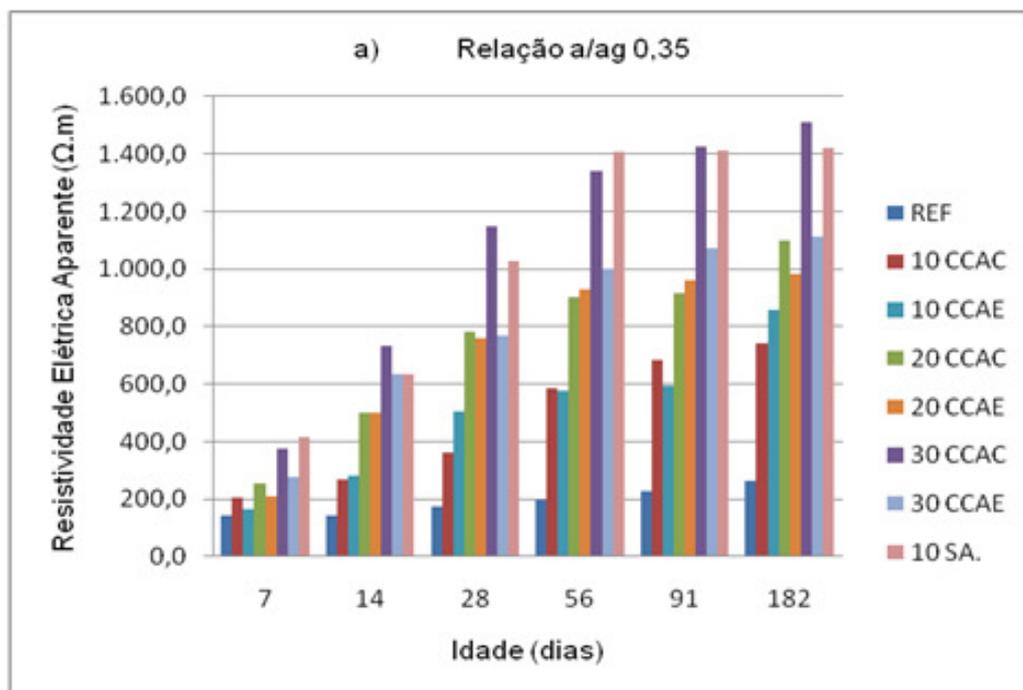
Comparando-se este trabalho com as pesquisas de vários autores, de acordo com o acima exposto, constatou-se que o emprego de adições minerais produziu alterações na microestrutura das misturas investigadas, em especial à estrutura dos poros, com benefícios relacionados à absorção capilar das misturas.

4.4 Análise dos resultados de resistividade elétrica aparente

Para a análise dos resultados de resistividade elétrica aparente, consideraram-se as influências da relação a/ag, o percentual de adições minerais adicionadas aos concretos e a idade dos corpos-de-prova. A fim de comparar os resultados, as misturas foram analisadas obedecendo a critérios de similaridade, tanto para a relação a/ag utilizada quanto para a idade dos cp's. Os resultados do ensaio de resistividade elétrica aparente para todas as idades e relações a/ag das misturas investigadas são expressos na Tabela 4.7 e Figura 4.6.

Tabela 4.7 – Resultados do ensaio de resistividade elétrica aparente

Mistura	Relação a/ag	Resistividade elétrica aparente ($\Omega.m$)					
		Idade (dias)					
		7	14	28	56	91	182
REF	0,35	141,0	143,7	173,0	198,1	226,1	261,4
	0,50	87,7	97,4	105,0	129,8	132,7	145,2
	0,65	68,8	70,2	78,3	94,2	117,6	133,5
10 CCAC	0,35	203,9	266,7	360,8	585,3	683,7	742,5
	0,50	111,3	174,7	268,1	383,0	417,0	479,0
	0,65	109,9	158,2	233,6	303,5	407,7	446,2
20 CCAC	0,35	256,4	502,4	780,9	902,1	916,9	1.099,7
	0,50	193,3	380,9	501,7	572,0	739,2	775,1
	0,65	129,4	277,3	417,4	448,1	547,2	697,0
30 CCAC	0,35	376,0	731,0	1.147,8	1.338,0	1.424,7	1.511,4
	0,50	291,4	572,9	858,3	908,8	1.009,7	1.110,7
	0,65	251,3	502,5	670,5	766,5	901,0	1.035,4
10 CCAE	0,35	167,1	280,4	506,6	575,5	592,4	858,7
	0,50	95,4	151,9	256,7	306,5	338,6	494,5
	0,65	85,2	130,6	229,8	292,5	327,4	474,1
20 CCAE	0,35	209,1	500,0	759,5	928,4	960,2	984,4
	0,50	118,3	356,4	504,2	656,3	714,2	736,4
	0,65	96,3	232,4	462,3	496,0	574,6	600,4
30 CCAE	0,35	278,0	635,6	766,7	998,6	1.070,3	1.110,3
	0,50	217,4	460,4	623,1	837,7	854,9	885,1
	0,65	165,6	372,1	549,0	760,4	775,4	837,5
10 SA	0,35	414,0	635,6	1.026,5	1.406,3	1.413,3	1.420,2
	0,50	276,6	480,1	716,1	799,9	835,0	870,0
	0,65	107,1	295,5	461,1	531,1	543,3	555,5



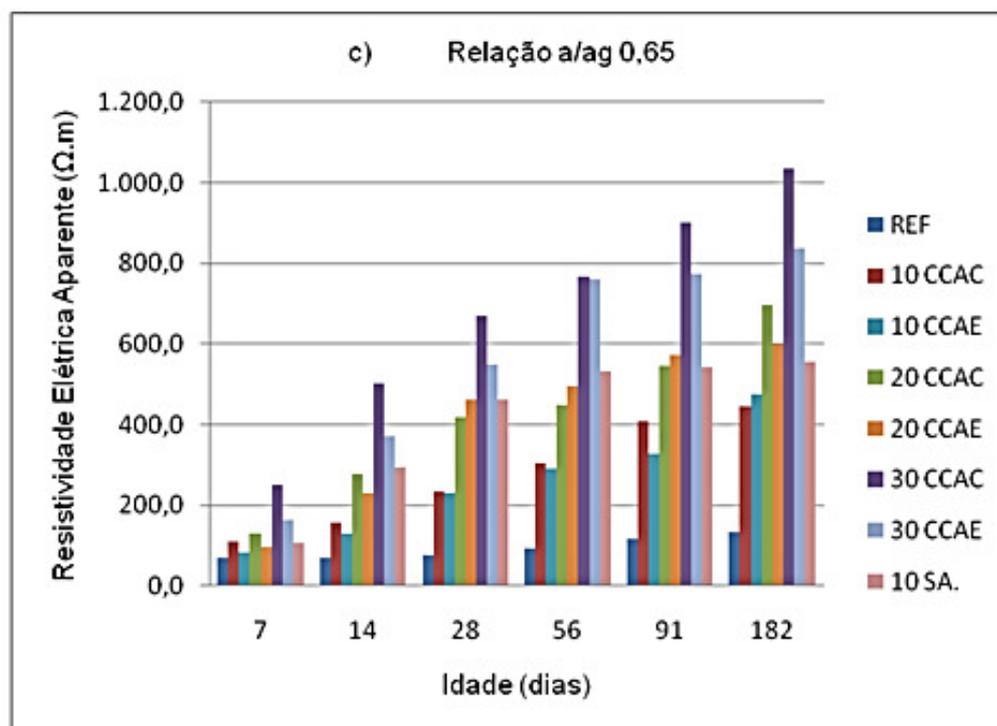
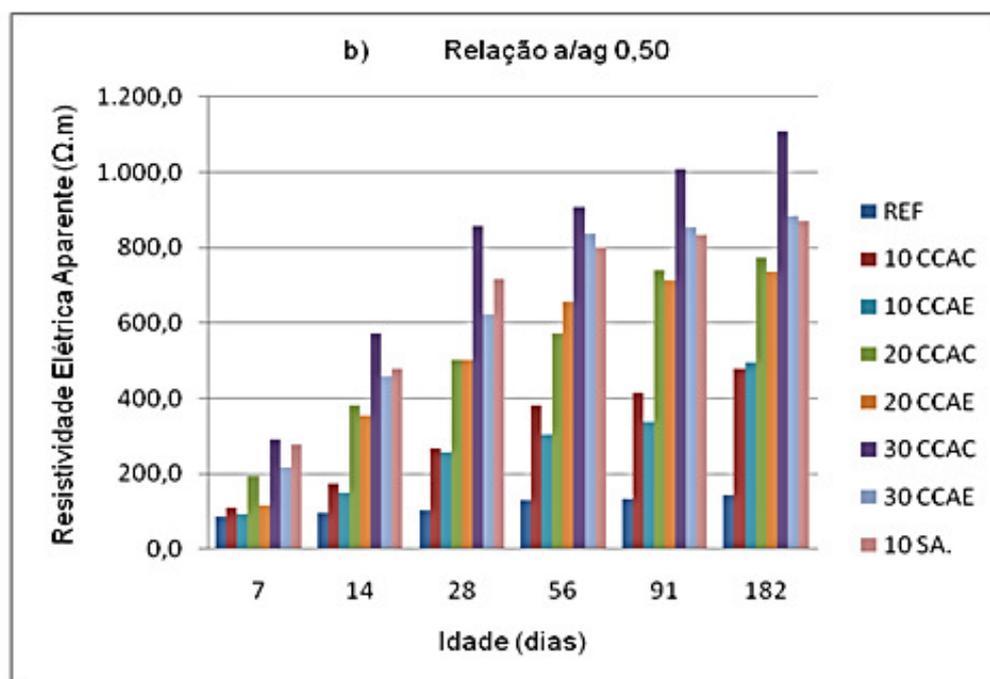


Figura 4.6 – Resistividade elétrica aparente versus idade: a) relação a/ag = 0,35, b) relação a/ag = 0,50 e c) relação a/ag = 0,65.

De maneira análoga ao constatado no ensaio de resistência à compressão axial, verifica-se, no presente ensaio que, para todas as misturas, a resistividade

elétrica aparente aumenta com a redução da relação a/ag, aumento no grau de hidratação e acréscimo no período de cura. Observa-se na Tabela 4.7 e Figura 4.6 que todas as misturas com adições minerais apresentaram valores de resistividade elétrica muito superior àqueles da mistura de referência, o que pode ser atribuído ao refinamento dos poros obtido pelo incremento das adições minerais.

Da análise da Tabela 4.7, constata-se que, aos 91 dias, para a relação a/ag 0,35, os concretos 10 CCAC, 20 CCAC, 30 CCAC, 10 CCAE, 20 CCAE, 30 CCAE e 10 SA apresentaram valores de REA 202%, 306%, 530%, 162%, 325%, 373% e 525% maiores que o concreto de referência; para a relação a/ag 0,50, as misturas 10 CCAC, 20 CCAC, 30 CCAC, 10 CCAE, 20 CCAE, 30 CCAE e 10 SA obtiveram valores de REA 214%, 457%, 661%, 155%, 438%, 544% e 529% maiores que o REF; para a relação a/ag 0,65, os concretos 10 CCAC, 20 CCAC, 30 CCAC, 10 CCAE, 20 CCAE, 30 CCAE e 10 SA demonstraram valores de REA 247%, 365%, 666%, 179%, 389%, 559% e 362% maiores que a mistura de referência.

Ainda de acordo com a Tabela 4.7, foi possível verificar, aos 182 dias, para a relação a/ag 0,35, que os concretos 10 CCAC, 20 CCAC, 30 CCAC, 10 CCAE, 20 CCAE, 30 CCAE e 10 SA apresentaram valores de REA 184%, 321%, 478%, 229%, 277%, 325% e 443% maiores que o concreto de referência; para a relação a/ag 0,50, as misturas 10 CCAC, 20 CCAC, 30 CCAC, 10 CCAE, 20 CCAE, 30 CCAE e 10 SA obtiveram valores de REA 230%, 434%, 665%, 241%, 407%, 510% e 499% maiores que o REF; para a relação a/ag 0,65, os concretos 10 CCAC, 20 CCAC, 30 CCAC, 10 CCAE, 20 CCAE, 30 CCAE e 10 SA demonstraram valores de REA 234%, 422%, 676%, 255%, 350%, 527% e 316% mais elevados que a mistura de referência.

Conforme a Figura 4.6, para a maioria dos casos investigados, independente da relação a/ag e idade, os maiores valores de resistividade elétrica aparente foram identificados no concreto composto com 30% de CCAC, com exceção da mistura 10 SA que, na relação a/ag 0,35, superou a mistura 30 CCAC aos 7 e 56 dias. A mistura de melhor desempenho foi a que possui 30% de cinza de casca de arroz clara (ensaio de 182, relação a/ag 0,35).

Em igualdades de condições, a mistura com 30% de cinza de casca de arroz escura apresentou resultados de resistividade elétrica aparente próximos aos da mistura com 20% de cinza de casca de arroz clara, sugerindo a influência da diferença do teor de carbono grafítico entre ambas (89%). Na relação a/ag 0,35, a

mistura com apenas 10% de sílica ativa teve desempenho próximo ao da mistura com 30% de cinza de casca de arroz clara; nas demais relações a/ag, seu desempenho foi semelhante ao da mistura com 30% de cinza de casca de arroz escura.

Na Tabela 4.8 é apresentada a elevação da resistividade elétrica aparente, verificada de sete para 182 dias, de acordo com o aumento no grau de hidratação das misturas investigadas. O crescimento médio da resistividade elétrica aparente, considerando as três relações a/ag, dos sete para os 182 dias, foi de 82%, 300%, 356%, 298%, 430%, 472%, 337% e 292%, respectivamente, para as misturas REF, 10 CCAC, 20 CCAC, 30 CCAC, 10 CCAE, 20 CCAE, 30 CCAE e 10 SA. Assim, nesse período, observa-se maior crescimento para a mistura composta por 20% de cinza de casca de arroz escura. A maior hidratação das amostras tornou a sua estrutura mais compacta, contribuindo para o aumento da resistividade elétrica aparente quanto mais elevado se tornou o período de cura.

Tabela 4.8 – Resistividade elétrica aparente, período de 7 para 182 dias

<i>Mistura</i>	<i>Relação a/ag</i>	<i>Elevação da REA (%)</i>	
		<i>Idade (dias)</i>	
		<i>7 - 182</i>	<i>Média (%)</i>
REF	0,35	85	82
	0,50	66	
	0,65	94	
10 CCAC	0,35	264	300
	0,50	330	
	0,65	296	
20 CCAC	0,35	329	356
	0,50	301	
	0,65	438	
30 CCAC	0,35	302	298
	0,50	281	
	0,65	312	
10 CCAE	0,35	414	430
	0,50	418	
	0,65	456	
20 CCAE	0,35	371	472
	0,50	522	
	0,65	524	
30 CCAE	0,35	299	337
	0,50	307	
	0,65	406	
10 SA	0,35	243	292
	0,50	215	
	0,65	418	

A Tabela 4.9 apresenta uma classificação das misturas investigadas neste estudo, frente à probabilidade de ocorrer corrosão, de acordo com os critérios estabelecidos pelo CEB 192 (Tabela 2.1).

Tabela 4.9 – Classificação das misturas investigadas quanto à probabilidade de ocorrer corrosão, segundo critérios do CEB 192 (ABREU, 1998)

Mistura	Relação a/ag	Idade (dias)					
		7	14	28	56	91	182
REF	0,35	B	B	B	B	D	D
	0,50	A	A	B	B	B	B
	0,65	A	A	A	A	B	B
10 CCAC	0,35	D	D	D	D	D	D
	0,50	B	B	D	D	D	D
	0,65	B	B	D	D	D	D
20 CCAC	0,35	D	D	D	D	D	D
	0,50	B	D	D	D	D	D
	0,65	B	D	D	D	D	D
30 CCAC	0,35	D	D	D	D	D	D
	0,50	D	D	D	D	D	D
	0,65	D	D	D	D	D	D
10 CCAE	0,35	B	D	D	D	D	D
	0,50	A	B	D	D	D	D
	0,65	A	B	D	D	D	D
20 CCAE	0,35	C	D	D	D	D	D
	0,50	B	D	D	D	D	D
	0,65	A	D	D	D	D	D
30 CCAE	0,35	D	D	D	D	D	D
	0,50	D	D	D	D	D	D
	0,65	B	D	D	D	D	D
10 SA	0,35	D	D	D	D	D	D
	0,50	D	D	D	D	D	D
	0,65	B	D	D	D	D	D

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

De acordo com a Tabela 4.9, verifica-se uma desprezível probabilidade de risco de corrosão para os concretos com cinza de casca de arroz, a partir dos 28 dias, em função da alta resistividade elétrica aparente obtida pelas misturas nesse período ($> 200 \Omega.m$). No concreto de referência essa condição é obtida somente a partir dos 91 dias, e apenas na relação a/ag 0,35. A mistura com 10% de sílica ativa se enquadrou na mesma faixa de valores da mistura com 30% de cinza de casca de arroz escura.

Mesmo para a relação a/ag 0,65, considerada segundo a norma NBR 12655:2006 como adequada para concreto exposto à ambiente de agressividade fraca (classe I), os valores de resistividade elétrica, quando se substitui o cimento

por 10%, 20% ou 30% de cinza de casca de arroz, clara ou escura, a partir de 28 dias, correspondem a uma probabilidade de corrosão desprezível, de acordo com o CEB 192.

Entretanto, pelo critério proposto por COST 509 (1997 apud POLDER, 2001), Tabela 2.2, somente as misturas 20 CCAC, na relação a/ag 0,35 aos 182 dias; 30 CCAC, na relação a/ag 0,50 a partir dos 91 dias e na relação a/ag 0,35 a partir dos 28 dias; 30 CCAE, na relação a/ag 0,35 a partir de 91 dias e 10 SA, na relação a/ag 0,35 a partir de 28 dias apresentaram risco de corrosão negligenciável, ou seja, valores de resistividade elétrica maior do que 1000 Ω .m. A mistura de referência, mesmo na menor relação a/ag (0,35) e maior período de cura (182 dias), não obteve desempenho superior ao considerado como de moderado risco de corrosão, conforme a Tabela 2.2.

Cabe ressaltar que, no trabalho de Nepomuceno e Neves (2006), investigou-se a capacidade de proteção da corrosão em armaduras embutidas em corpos-de-prova, em relação à penetração de CO₂. Foram produzidas argamassas com o emprego de CCA de estrutura amorfa e cristalina, além de argamassas com SA, substituídas parcialmente ao cimento de referência, CP-I, nos teores de 5%, 10% e 20%. Os autores verificaram, durante o ensaio de carbonatação acelerada, aos 91 dias, que todas as argamassas com o emprego de adições minerais apresentaram maior intensidade de corrosão, quando comparadas com a argamassa de referência (a qual apresentou despassivação em momento posterior às demais misturas), sendo esta tendência mais acentuada com o aumento do teor de adição mineral, especialmente na mistura com 20% de CCA cristalina (despassivação mais rápida).

Deste modo, embora a Tabela 4.9 apresente uma probabilidade de ocorrer corrosão, segundo os critérios do CEB 192, como desprezível, a partir dos 28 dias, para todas as misturas com adições minerais, Nepomuceno e Neves (2006) salientaram que a utilização de misturas com adição de CCA substituídas parcialmente ao cimento, quando empregadas em ambientes com possibilidade de carbonatação, requer cuidados especiais, tendo em vista a redução da alcalinidade do material, aumentando os riscos de corrosão das armaduras por carbonatação.

Para Andrade (1998 apud SANTOS, 2006), a partir de uma espessura de revestimento em conformidade com as normas atuais, a resistividade elétrica pode ser considerada como parâmetro que define a resistência do concreto às ações do ambiente de exposição do material. A partir de uma tabela sugerida pela autora,

observaram-se valores mínimos de resistividade elétrica em função do tipo de ataque (carbonatação, cloretos) e da agressividade do ambiente. Posteriormente, Andrade (2004) propôs um modelo de previsão da vida útil de estruturas de concreto, utilizando-se a resistividade como parâmetro para determinação dos períodos de iniciação e de propagação da corrosão, o qual foi adotado por Santos (2006), ao avaliar concretos submetidos à ação dos íons cloretos.

No entanto, Santos (2006) alertou para a necessidade de avaliação e da adequação de algumas variáveis que podem contribuir para a dispersão de resultados no modelo proposto por Andrade (2004). Seguindo este modelo, Santos (2006) verificou, em seu experimento, que as misturas com 10% de sílica ativa, diferente do esperado, apresentaram períodos de iniciação à corrosão, medidos experimentalmente, menores do que os obtidos nos concretos de referência (0% de sílica ativa), o que pode ser atribuído a problemas (fissuras) com origem na moldagem nos cp's com SA, os quais facilitam o acesso de agentes agressivos ao material, interferindo nos resultados da pesquisa.

O presente estudo teve seus resultados comparados com os do trabalho de Hoppe et al. (2005), estando de acordo com os resultados encontrado por estes autores. No trabalho atual adotou-se teores de cinza de casca de arroz e relações a/ag idênticas às do trabalho de Hoppe et al. (2005), sendo a sua cinza de casca de arroz de cor escura, devido ao elevado teor de carbono gráfico. Os autores constataram a superioridade dos concretos com cinza de casca de arroz em relação ao concreto de referência, com 100% de cimento Portland. Os maiores resultados de resistividade elétrica aparente foram obtidos para os concretos compostos com 30% de cinza de casca de arroz, e os autores atribuíram este fato ao refinamento dos poros do material, promovido pela cinza de casca de arroz. Na idade de 91 dias, Hoppe et al. (2005) observaram que as misturas compostas com cinza de casca de arroz, para as três relações a/ag, apresentaram valores de resistividade elétrica que se enquadraram, segundo o CEB 192, como de baixa probabilidade de corrosão.

Para os teores de substituição de 10%, 20% e 30% de cimento por CCA, Hoppe et al. (2005) verificaram, aos 91 dias, um crescimento nos valores de resistividade elétrica, em relação ao concreto de referência, de 41%, 157% e 341% para a relação a/ag 0,35; de 88%, 268% e 442%, para a relação a/ag 0,50 e de 78%, 243% e 404% para a relação a/ag 0,65.

Ao analisar a evolução da resistividade das misturas com o aumento do grau de hidratação, Hoppe et al. (2005) verificaram que, para a relação a/ag 0,35, aos 91 dias, as misturas com adição de 10%, 20% e 30% de cinza de casca de arroz obtiveram valores de resistividade elétrica aparente 36%, 160% e 133% maiores que os valores obtidos aos 28 dias. Para a relação a/ag 0,50, os valores aos 91 dias foram de 41%, 121% e 194% maiores do que aos 28 dias e, para a relação a/ag 0,65, os resultados aos 91 dias foram 45%, 122% e 109% maiores do que os encontrados aos 28 dias, demonstrando a grande influência do grau de hidratação, concordando com os resultados da pesquisa atual.

Outros autores também analisaram a influência da cinza de casca de arroz na resistividade elétrica aparente do concreto. Safiuddin, West e Soudiki (2010), ao empregar teores de 15% e 20% de cinza de casca de arroz em substituição ao cimento, verificaram, aos 28 dias, nas relações a/ag 0,30, 0,35, 0,40 e 0,50, uma elevação da resistividade elétrica aparente das misturas, em relação à mistura sem adição mineral, sendo essa elevação tanto maior quanto menor foi a relação a/ag e maior o teor de CCA utilizado, conforme já constatado neste trabalho. Os autores atribuíram o bom desempenho da REA das misturas com CCA à redução da porosidade total e às alterações na zona de transição pasta-agregado provocada pelo uso da cinza de casca de arroz.

No trabalho de Chao-Lung, Anh-Tuan e Chun-Tsun (2011) foi realizado um estudo com misturas contendo 10%, 20% e 30% de CCA, na relação a/ag 0,35. Os autores averiguaram, nos ensaios de REA de um, três e sete dias, que a mistura de referência, sem adição mineral, apresentou melhor desempenho nessa propriedade. No entanto, nas demais idades, 14, 28, 56 e 91 dias, houve um acréscimo na REA das misturas com CCA, quando comparadas com a mistura de referência, com valores de REA tanto maiores quanto maior foi o teor de CCA utilizado. Em relação à mistura de referência, aos 91 dias, houve uma elevação nos valores de REA de 79%, 180% e 202%, para as misturas com 10%, 20% e 30% de CCA, respectivamente, observando a eficiência do emprego de CCA em propriedades ligadas à durabilidade de concretos.

Whiting e Nagi (2003) apresentaram um estudo da resistividade elétrica de concretos com diferentes teores de sílica ativa, verificando um aumento daquela propriedade com o emprego desta adição mineral. Quanto menor a relação a/ag utilizada, maior foi a influência da sílica ativa. Para um teor de 15% de sílica ativa, foi

encontrada, na relação a/ag 0,38, uma resistividade elétrica aparente quase 11 vezes maior que a REA da mistura de referência (sem adição mineral), sendo esta resistividade elétrica atribuída à alta reatividade pozolânica das pequenas partículas de SA, e também pelo refinamento dos poros do concreto gerado pelo emprego dessa adição mineral. Devido a essas características da sílica ativa, ocorre uma redução na concentração iônica da solução dos poros, com o aumento da resistividade elétrica aparente.

Da mesma forma, Carsana e Bertolini (2011) averiguaram o efeito do refinamento dos poros do concreto através das reações pozolânicas produzidas pelo uso de adições minerais. Ao substituir cimento por 30% de sílica ativa, utilizando relação a/ag 0,50, os autores obtiveram valores de resistividade elétrica aparente maior que 200 Ω .m em amostras com três meses de cura, sendo que, na mistura de referência (sem adição mineral), a REA não ultrapassou os 55 Ω .m, mesmo após seis meses. O trabalho atual concorda com esses resultados, já que, na relação a/ag 0,50, tanto aos 91 como aos 182 dias, a mistura com 10% de sílica ativa apresentou uma REA aproximadamente 6 vezes maior que a REA da mistura de referência, analisada em igualdade de condições.

Dotto et al. (2004), investigando a resistividade elétrica de concretos com 6% e 12% de sílica ativa, nas relações a/ag 0,50, 0,65 e 0,80, através do método de Wenner, observaram, aos 98 dias, um melhor desempenho das misturas com SA, em relação à mistura de referência, sendo este desempenho elevado com o aumento do teor de substituição de SA e redução da relação a/ag. Quando comparado com a mistura de referência, a adição de 12% de SA aumentou a REA 5,2, 3,85 e 2,45 vezes, para a relação a/ag 0,50, 0,65 e 0,80, respectivamente. Os coeficientes de variação foram menores que 13,2%, 14,3% e 11,7%, para a relação a/ag 0,50, 0,65 e 0,80, com e sem a presença de SA, respectivamente.

Também pelo método de Wenner, ao pesquisar concretos com teores de 5% e 10% de sílica ativa, com relação a/ag 0,50, Wee, Suryavanshi e Tin (2000) constataram, aos três e sete dias, uma resistividade elétrica aparente similar entre estas misturas e a mistura de referência, que não continha adição mineral. Todavia, após 28 dias, as misturas com sílica ativa apresentaram um aumento na REA muito superior à mistura de referência, sendo este aumento com maior magnitude para a mistura com 10% de adição mineral. Os autores salientaram que a alta resistividade elétrica está relacionada à menor condutividade iônica (íons OH^-) dos poros e

densificação da microestrutura do material gerado pelo incremento da SA. Entretanto, Cao e Chung (2004), investigando pastas de cimento com relação a/ag 0,35, ao substituírem cimento por sílica ativa, no teor de 15%, encontraram, aos 28 dias, uma resistividade elétrica aparente da mistura com sílica ativa 94% menor que a resistividade da mistura de referência.

Conforme visualizado na Tabela 4.7, o emprego das adições minerais utilizadas neste trabalho proporcionou uma influência muito grande na resistividade elétrica do concreto, contribuindo para a durabilidade do material, pois, de acordo com a Tabela 4.9, a partir de 28 dias, independente da relação a/ag, todas as misturas com adições minerais apresentam risco de corrosão considerado desprezível.

Da mesma forma, a idade, a relação a/ag e o teor de adição mineral exerceram papel determinante na resistividade elétrica do concreto, devido às alterações produzidas na microestrutura do material, já que a REA sofre grande influência da composição iônica da solução dos poros do material.

Dentre as misturas com cinza de casca de arroz, a de menor teor de carbono grafítico apresentou melhor desempenho. A mistura 30 CCAC obteve o mais elevado resultado de REA, 1.511,4 $\Omega.m$.

4.5 Análise dos resultados em igualdade de resistência mecânica

Partindo-se dos resultados do ensaio de resistência à compressão axial, foram avaliadas as relações água/aglomerante necessárias para a obtenção de determinados níveis de resistência, aos 28 dias, assim como a absorção capilar e resistividade elétrica correspondente a esses níveis, para todas as misturas investigadas.

4.5.1 Avaliação da absorção capilar, estabelecendo níveis de resistência à compressão axial

Nas Tabelas 4.10 e 4.11 são apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão axial aos 28 dias, para todas as misturas investigadas, considerando os prazos de cura de três e sete dias, assim como os coeficientes das equações do tipo $f_c = A/B^{a/ag}$ e os seus respectivos coeficientes de determinação.

Tabela 4.10 – Coeficientes “A” e “B” da equação $f_c = A/B^{a/ag}$ e coeficientes de determinação, R^2 , das misturas investigadas para a idade de 28 dias, em cp’s com 3 dias de cura

Mistura	Cura (dias)	Relação a/ag			Resistência à compressão axial			Coeficientes		
					(MPa)			A	B	R^2
REF	3	0,35	0,50	0,65	54,0	37,3	29,0	109,38	7,94	0,98
10 CCAC	3	0,35	0,50	0,65	59,3	40,5	29,0	135,68	10,87	0,99
20 CCAC	3	0,35	0,50	0,65	61,0	40,7	30,0	137,27	10,65	0,98
30 CCAC	3	0,35	0,50	0,65	65,7	47,0	31,0	159,81	12,21	0,99
10 CCAE	3	0,35	0,50	0,65	59,0	40,3	28,7	135,95	11,09	0,99
20 CCAE	3	0,35	0,50	0,65	59,5	40,8	29,0	136,73	10,97	0,99
30 CCAE	3	0,35	0,50	0,65	64,0	41,8	30,0	152,43	12,50	0,98
10 SA	3	0,35	0,50	0,65	53,5	43,5	37,8	79,49	3,20	0,99

Tabela 4.11 – Coeficientes “A” e “B” da equação $f_c = A/B^{a/ag}$ e coeficientes de determinação, R^2 , das misturas investigadas para a idade de 28 dias, em cp’s com 7 dias de cura

Mistura	Cura (dias)	Relação a/ag			Resistência à compressão axial			Coeficientes		
					(MPa)			A	B	R^2
REF	7	0,35	0,50	0,65	58,0	40,0	33,3	107,60	6,39	0,98
10 CCAC	7	0,35	0,50	0,65	65,0	42,0	35,7	125,08	7,39	0,95
20 CCAC	7	0,35	0,50	0,65	72,0	43,0	32,0	178,77	14,93	0,97
30 CCAC	7	0,35	0,50	0,65	72,7	49,3	31,7	193,19	15,94	0,99
10 CCAE	7	0,35	0,50	0,65	63,7	42,0	35,3	121,55	7,12	0,99
20 CCAE	7	0,35	0,50	0,65	65,7	42,7	32,0	148,33	10,98	0,98
30 CCAE	7	0,35	0,50	0,65	69,5	48,3	31,0	180,57	14,75	0,99
10 SA	7	0,35	0,50	0,65	55,5	48,3	39,5	83,36	3,11	0,99

Com os valores de Ac^{18} obtidos no ensaio de absorção capilar, aos 28 dias, e suas respectivas relações a/ag, foram calculados os coeficientes da equação $Ac =$

¹⁸ Absorção de água por capilaridade, tempo 72 horas.

$C/D^{a/ag}$, apresentados nas Tabelas 4.12 e 4.13, para o prazos de cura dos corpos-de-prova de três dias e sete dias, respectivamente.

Tabela 4.12 – Coeficientes “C” e “D” da equação $Ac = C/D^{a/ag}$, para cada mistura investigada, idade de 28 dias, cura dos cp’s 3 dias

Mistura	Ensaio (dias)	Relação a/ag			Absorção capilar (g/cm ²)			Coeficientes		
								C	D	R ²
REF	28	0,35	0,50	0,65	0,811	1,151	1,245	51,50	23,90	0,95
10 CCAC	28	0,35	0,50	0,65	0,730	1,060	1,250	40,30	16,60	0,99
20 CCAC	28	0,35	0,50	0,65	0,396	0,679	0,934	15,09	5,72	0,99
30 CCAC	28	0,35	0,50	0,65	0,258	0,375	0,607	9,34	5,77	0,98
10 CCAE	28	0,35	0,50	0,65	0,688	1,028	1,236	36,01	14,19	0,99
20 CCAE	28	0,35	0,50	0,65	0,111	0,172	0,311	3,25	3,23	0,98
30 CCAE	28	0,35	0,50	0,65	0,101	0,163	0,259	3,38	4,33	0,99
10 SA	28	0,35	0,50	0,65	0,073	0,125	0,264	1,57	1,38	0,97

Tabela 4.13 – Coeficientes “C” e “D” da equação $Ac = C/D^{a/ag}$, para cada mistura investigada, idade de 28 dias, cura dos cp’s 7 dias

Mistura	Ensaio (dias)	Relação a/ag			Absorção capilar (g/cm ²)			Coeficientes		
								C (x10 ⁻²)	D(x10 ⁻²)	R ²
REF	28	0,35	0,50	0,65	0,745	1,000	1,113	48,12	26,23	0,98
10 CCAC	28	0,35	0,50	0,65	0,700	1,020	1,100	43,44	22,17	0,94
20 CCAC	28	0,35	0,50	0,65	0,302	0,528	0,726	11,30	5,37	0,99
30 CCAC	28	0,35	0,50	0,65	0,179	0,274	0,304	10,18	17,11	0,96
10 CCAE	28	0,35	0,50	0,65	0,679	1,000	1,075	41,87	21,62	0,94
20 CCAE	28	0,35	0,50	0,65	0,085	0,160	0,243	0,36	0,02	0,90
30 CCAE	28	0,35	0,50	0,65	0,078	0,132	0,167	3,37	7,91	0,99
10 SA	28	0,35	0,50	0,65	0,054	0,113	0,212	1,12	1,05	0,99

Assim, a partir das tabelas 4.10 e 4.11 pode-se determinar as relações a/ag para obtenção dos níveis de resistência à compressão de 36,6 MPa e 56,6 MPa¹⁹, na idade de 28 dias. Com essas relações a/ag e a equação $Ac = C/D^{a/ag}$, foi possível definir os valores de absorção capilar para esses níveis de resistência à compressão. Na tabela 4.14 são apresentados os valores de absorção capilar e relação a/ag para os níveis de resistência à compressão axial de 36,6 MPa e 56,6 MPa e, nas Figuras 4.7 e 4.8, visualiza-se os valores de absorção capilar de cada

¹⁹ Os níveis de resistência à compressão, na idade de 28 dias, $f_{cj} = 36,6$ MPa e $f_{cj} = 56,6$ MPa, foram determinados a partir da definição do $f_{ck} = 30$ MPa e $f_{ck} = 50$ MPa, respectivamente, através da equação $f_{cj} = f_{ck} + 1,65.S_d$ (desvio padrão), considerando-se um desvio padrão = 4,0 MPa.

mistura para esses mesmos níveis de resistência à compressão, aos três e sete dias de cura, respectivamente.

Tabela 4.14 – Relações a/ag e absorção capilar (A_c) para os níveis de resistência à compressão de 36,6 MPa e 56,6 MPa, idade de 28 dias

Mistura	Ensaio (dias)	Relação a/ag				Absorção capilar (g/cm^2)			
		fcj = 36,6 MPa		fcj = 56,6 Mpa		fcj = 36,6 MPa		fcj = 56,6 Mpa	
		3 dias	7 dias	3 dias	7 dias	3 dias	7 dias	3 dias	7 dias
REF	28	0,53	0,58	0,32	0,35	1,0971	1,0477	0,8118	0,7649
10 CCAC	28	0,55	0,61	0,37	0,40	1,0804	1,0961	0,7782	0,7893
20 CCAC	28	0,56	0,59	0,37	0,43	0,7466	0,6283	0,4406	0,3921
30 CCAC	28	0,59	0,60	0,41	0,44	0,5013	0,2941	0,3050	0,2227
10 CCAE	28	0,55	0,61	0,36	0,39	1,0445	1,0681	0,7333	0,7601
20 CCAE	28	0,55	0,58	0,37	0,40	0,2149	0,5208	0,1150	0,1106
30 CCAE	28	0,56	0,59	0,39	0,43	0,1991	0,1517	0,1158	0,1006
10 SA	28	0,67	*	*	0,34	0,2730	0,3053	0,0548	0,0530

* – fora dos limites de confiabilidade

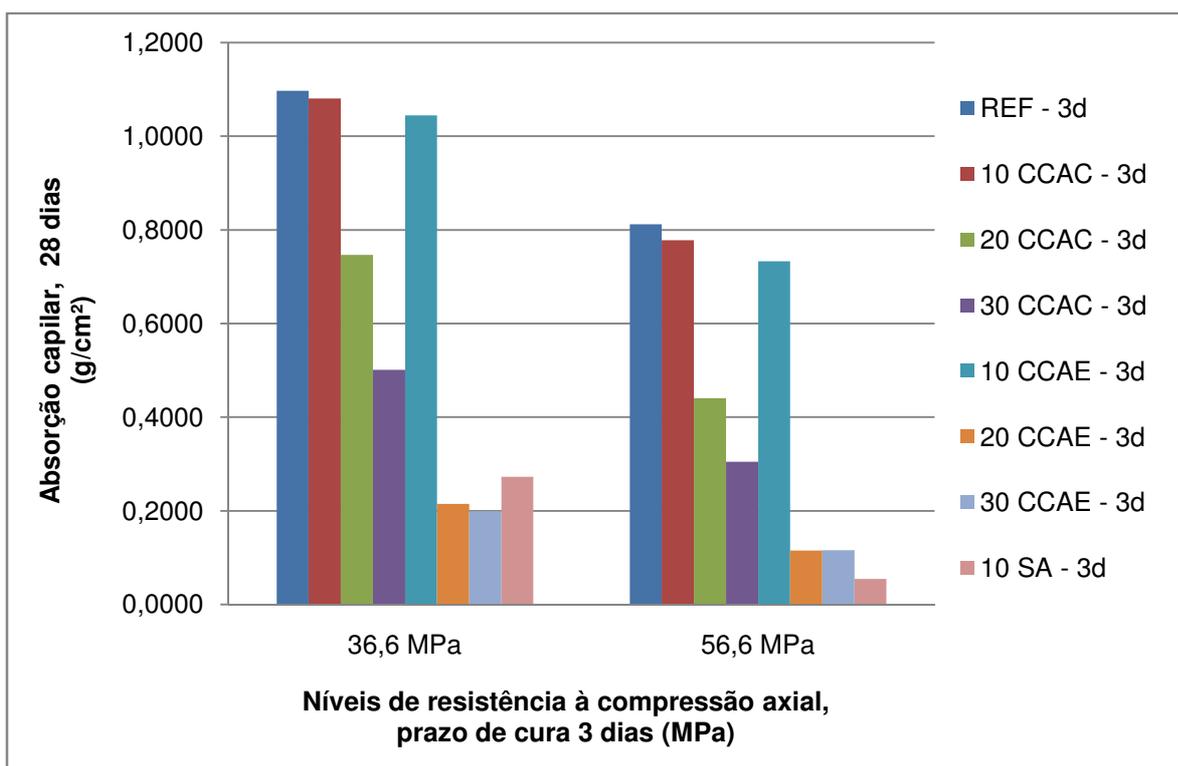


Figura 4.7 – Absorção capilar correspondente aos níveis de resistência à compressão axial de 36,6 MPa e 56,6 MPa, aos 28 dias, para as misturas com prazo de cura de 3 dias.

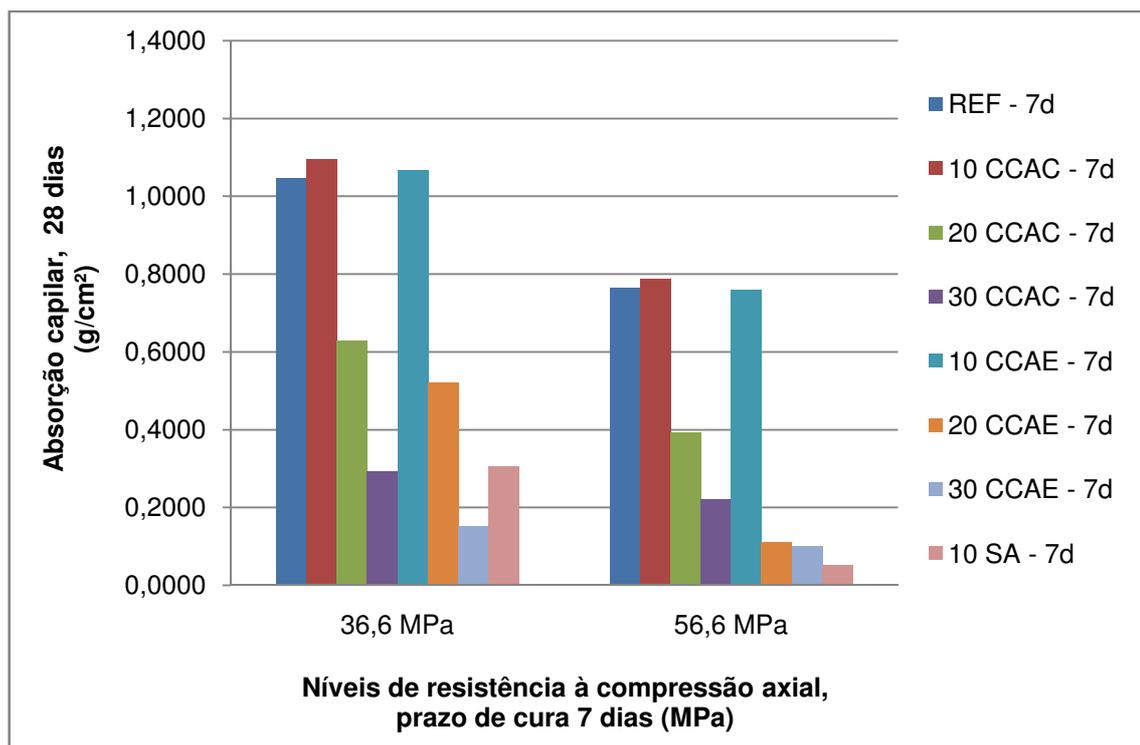


Figura 4.8 – Absorção capilar correspondente aos níveis de resistência à compressão axial de 36,6 MPa e 56,6 MPa, aos 28 dias, para as misturas com prazo de cura de 7 dias.

Conforme apresentado na Tabela 4.14 e Figuras 4.7 e 4.8, verifica-se, de modo geral, que a substituição parcial de cimento por 10%, 20% e 30% de cinza de casca de arroz, mesmo com diferentes teores de carbono gráfico, proporcionou redução na absorção capilar das misturas investigadas, para os dois níveis de resistência à compressão estabelecidos, 36,6 MPa e 56,6 MPa.

Na análise da Tabela 4.14, constata-se que, para o nível de resistência à compressão de 36,6 MPa (correspondente ao $f_{ck} = 30$ MPa), as relações a/ag variam de 0,53 a 0,67 para o prazo de cura de três dias, e de 0,58 a 0,61 para o prazo de cura de sete dias. Embora o valor de $f_{ck} = 30$ MPa seja 50% superior ao mínimo exigido pela NBR 6118:2007 e satisfaça à exigência da NBR 12655:2006 para a classe de agressividade III (forte), apenas as relações a/ag das misturas REF, 10 CCAC, 10 CCAE e 20 CCAE, aos 3 dias de cura, atenderam à respectiva norma que fixa valor da relação $a/ag \leq 0,55$ para essa classe de agressão. Entretanto, para o prazo de cura de três dias, os valores de absorção capilar variaram de 1,0971 g/cm² (REF, $a/ag = 0,53$) à 0,1991 g/cm² (30 CCAE, $a/ag = 0,56$) e, para o prazo de cura de sete dias, os valores de absorção de água por

capilaridade variaram de 1,0961 g/cm² (10 CCAC, a/ag = 0,61) à 0,1517 g/cm² (30 CCAE, a/ag = 0,59).

Deste modo, observa-se que, mesmo para altas relações a/ag, as misturas compostas com cinza de casca de arroz apresentam baixos valores de absorção capilar. Apesar das relações a/ag não sofrerem grandes variações com a elevação do prazo de cura de três dias para sete dias, os valores de absorção capilar variaram consideravelmente, especialmente ao comparar a mistura de referência com as misturas com CCA, em teores mais elevados de substituição.

Com o aumento no nível de resistência à compressão de 36,6 MPa para 56,6 MPa, as relações a/ag variaram de 0,32 a 0,41, para o prazo de cura de três dias, e de 0,34 a 0,44, para o prazo de cura de sete dias. Assim, constatou-se que todas as misturas satisfazem as exigências da NBR 12655:2006 para o nível de agressividade IV (muito forte), nos dois períodos de cura investigados.

Houve uma redução significativa da absorção capilar das misturas quando a resistência à compressão passou de 36,6 MPa para 56,6 MPa. Para o prazo de cura de três dias, essa redução foi de 26%, 28%, 41%, 39%, 30%, 46%, 42% e 80% para as misturas REF, 10 CCAC, 20 CCAC, 30 CCAC, 10 CCAE, 20 CCAE, 30 CCAE e 10 SA, respectivamente. Para essas mesmas misturas e prazo de cura de sete dias, a redução observada foi de 27%, 28%, 38%, 24%, 29%, 79%, 34% e 83%, respectivamente. Assim, ao elevar a resistência à compressão de 36,6 MPa para 56,6 MPa, a maior redução na absorção capilar foi verificada na mistura 10 SA, nos dois prazos de cura investigados.

Para o nível de resistência à compressão de 56,6 MPa (correspondente ao $f_{ck} = 50$ MPa), aos sete dias de cura, a relação a/ag da mistura 10 SA (0,34) é próxima à das misturas 10 CCAC (0,40) e 10 CCAE (0,39) e muito próxima à da mistura REF (0,35); todavia, a absorção capilar da mistura 10 SA é mais de dez vezes inferior à apresentada pelas misturas 10 CCAC, 10 CCAE e REF. Tuan et al. (2011) justificaram esse comportamento no seu trabalho, onde constataram o aumento do grau de hidratação e refinamento dos poros do concreto provocado pelo emprego da CCA, porém com efeito menos significativo que o observado com a adição de sílica ativa.

Para o nível de resistência à compressão de 36,6 MPa, o aumento no teor de CCAC, de 10% para 30%, resultou em um decréscimo na absorção capilar de 53% e 73%, para os prazos de cura de três dias e sete dias, respectivamente e, para os

mesmos teores de CCAE, a redução desta propriedade foi de 81% e 86%, nos prazos de cura três dias e sete dias, respectivamente. A elevação no teor de substituição de CCA por cimento proporciona uma redução mais significativa nos valores de absorção capilar de concretos, devido à maior finura da CCA em relação ao cimento de referência (GANESAN; RAJAGOPAL; THANGAVEL, 2008; TASHIMA et al., 2005).

Da mesma forma, para o nível de resistência à compressão de 56,6 MPa, o acréscimo no teor de CCAC, de 10% para 30%, resultou em uma redução da absorção capilar de 61% e 72%, para o prazo de cura de três dias e sete dias, respectivamente e, para os mesmos teores de CCAE, a redução observada foi de 84% e 87%, nos prazos de cura três dias e sete dias, respectivamente.

4.5.2 Avaliação da resistividade elétrica aparente, estabelecendo níveis de resistência à compressão axial

Da mesma forma que no item anterior, 4.5.1, realizou-se a avaliação da resistividade elétrica aparente, aos 28 dias, para os níveis de resistência à compressão de 36,6 MPa e 56,6 MPa (correspondente aos $f_{ck} = 30$ MPa e $f_{ck} = 50$ MPa, respectivamente), tendo como base os valores do respectivo ensaio e coeficientes das equações $f_c = A/B^{a/ag}$ "A", "B" e "R²", conforme já apresentado nas Tabelas 4.10 e 4.11, para os prazos de cura de três dias e sete dias, respectivamente.

Com os valores de ρ^{20} obtidos no ensaio de resistividade elétrica aparente, aos 28 dias, e suas respectivas relações a/ag , foram calculados os coeficientes da equação $\rho = E/F^{a/ag}$, apresentados na Tabela 4.15.

²⁰ Resistividade elétrica aparente.

Tabela 4.15 – Coeficientes “E” e “F” da equação $\rho = E/F^{a/ag}$, para cada mistura investigada, idade de 28 dias

Mistura	Ensaio (dias)	Relação a/ag			Resistividade elétrica aparente ($\Omega.m$)			Coeficientes		
					A	B	R ²			
REF	28	0,35	0,50	0,65	173,0	105,0	78,3	420,83	14,05	0,97
10 CCAC	28	0,35	0,50	0,65	360,8	268,1	233,6	583,3	4,26	0,97
20 CCAC	28	0,35	0,50	0,65	780,9	501,7	417,4	1.553,2	8,07	0,96
30 CCAC	28	0,35	0,50	0,65	1.147,8	858,3	670,5	2.133,0	6,00	0,99
10 CCAE	28	0,35	0,50	0,65	506,6	256,7	229,8	1.164,45	13,95	0,99
20 CCAE	28	0,35	0,50	0,65	759,5	504,2	462,3	1.284,63	5,23	0,92
30 CCAE	28	0,35	0,50	0,65	766,7	623,1	549,0	1.116,64	3,04	0,99
10 SA	28	0,35	0,50	0,65	1.026,5	716,1	461,1	2.645,06	14,40	0,99

Deste modo, a partir das tabelas 4.10 e 4.11 é possível obter as relações a/ag para a aquisição dos níveis de resistência à compressão de 36,6 MPa e 56,6 MPa, aos 28 dias. A partir dessas relações a/ag e a equação $\rho = E/F^{a/ag}$, pode-se determinar os valores de resistividade elétrica aparente para esses níveis de resistência à compressão. Na tabela 4.16 são apresentados os valores de resistividade elétrica e relação a/ag para os níveis de resistência à compressão axial de 36,6 MPa e 56,6 MPa e, nas Figuras 4.9 e 4.10, visualizam-se os valores de resistividade elétrica aparente de cada mistura para estes mesmos níveis de resistência à compressão, aos três e sete dias de cura, respectivamente.

Tabela 4.16 – Relações a/ag e resistividade elétrica (ρ) para os níveis de resistência à compressão de 36,6 MPa e 56,6 MPa, idade de 28 dias

Mistura	Ensaio (dias)	Relação a/ag				Resistividade elétrica aparente ($\Omega.m$)			
		fcj = 36,6 MPa		fcj = 56,6 Mpa		fcj = 36,6 MPa		fcj = 56,6 Mpa	
		3 dias	7 dias	3 dias	7 dias	3 dias	7 dias	3 dias	7 dias
REF	28	0,53	0,58	0,32	0,35	104,2	90,5	181,6	168,5
10 CCAC	28	0,55	0,61	0,37	0,40	263,2	239,4	343,0	328,4
20 CCAC	28	0,56	0,59	0,37	0,43	483,6	456,2	710,6	638,9
30 CCAC	28	0,59	0,60	0,41	0,44	742,4	726,9	1.014,4	963,8
10 CCAE	28	0,55	0,61	0,36	0,39	276,6	232,4	445,9	417,3
20 CCAE	28	0,55	0,58	0,37	0,40	516,9	488,8	698,5	660,5
30 CCAE	28	0,56	0,59	0,39	0,43	595,9	577,5	722,0	691,5
10 SA	28	0,67	*	*	0,34	446,9	382,2	1.214,4	1.064,9

* – fora dos limites de confiabilidade

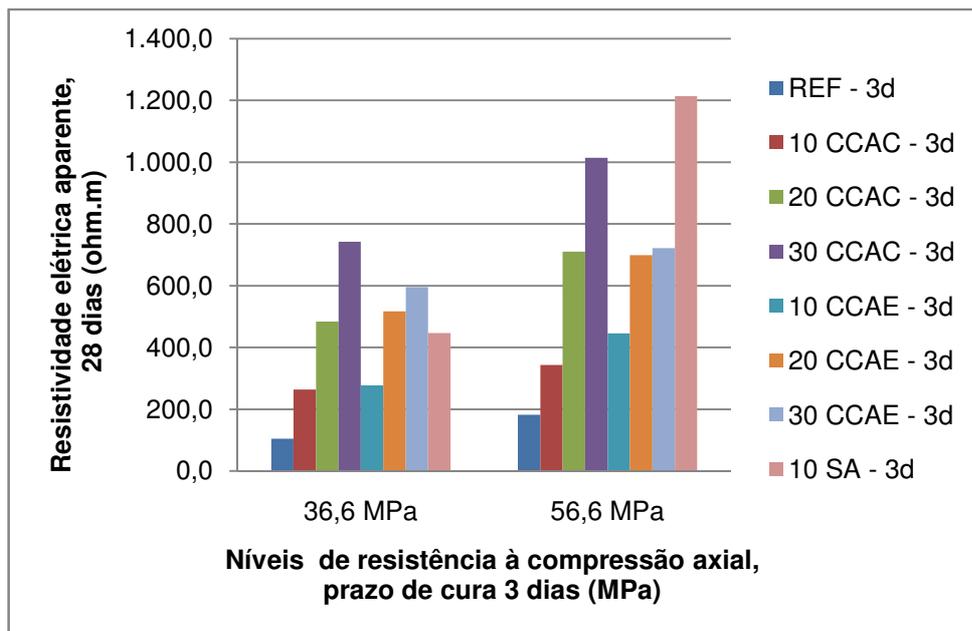


Figura 4.9 – Resistividade elétrica aparente correspondente aos níveis de resistência à compressão axial de 36,6 MPa e 56,6 MPa, aos 28 dias, para as misturas com prazo de cura de 3 dias.

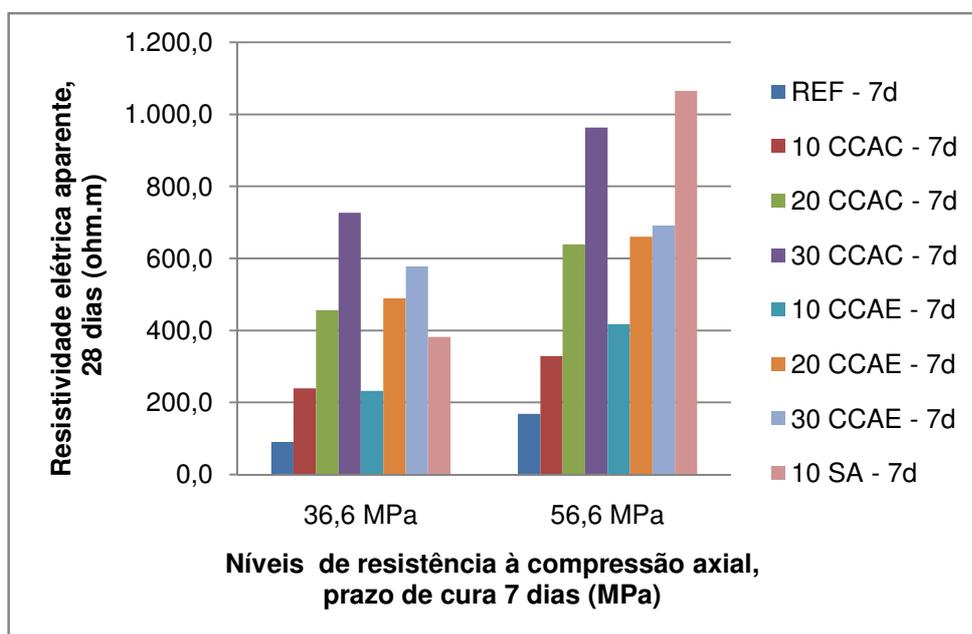


Figura 4.10 – Resistividade elétrica aparente correspondente aos níveis de resistência à compressão axial de 36,6 MPa e 56,6 MPa, aos 28 dias, para as misturas com prazo de cura de 7 dias.

Conforme já observado no item 4.5.1, verifica-se, na Tabela 4.16, que para o nível de resistência à compressão de 36,6 MPa (correspondente ao $f_{ck} = 30$ MPa), as relações a/a_g variaram de 0,53 a 0,67 para o prazo de cura de três dias, e de

0,58 a 0,61 para o prazo de cura de sete dias. Deste modo, a exceção das misturas REF, 10 CCAC, 10 CCAE e 20 CCAE, com prazo de cura três dias, nenhum concreto enquadra-se na classe de agressividade III (forte), de acordo com a NBR 12655:2006. Todavia, as misturas investigadas (exceto as misturas 10 CCAC e 10 CCAE, com prazo de cura de sete dias e 10 SA, nos dois períodos de cura pesquisados) enquadram-se apenas na classe de agressividade moderada (classe II, relação $a/ag \leq 0,60$). Contudo, para o prazo de três dias de cura, os valores de resistividade elétrica das misturas com CCA variaram de 263,2 $\Omega.m$ (10 CCAC, relação $a/gl = 0,55$) à 742,4 $\Omega.m$ (30 CCAC, relação $a/ag = 0,59$) e, para o prazo de cura de sete dias, a variação observada foi de 232,4 $\Omega.m$ (10 CCAE, relação $a/ag = 0,61$) à 726,9 $\Omega.m$ (30 CCAC, $a/ag = 0,60$).

Assim, observa-se que, mesmo para altas relações a/ag , as misturas compostas com cinza de casca de arroz apresentam valores de resistividade elétrica que se enquadram com probabilidade de corrosão considerada desprezível, de acordo com os valores propostos na Tabela 2.1 (CEB 192). Embora, para a obtenção do nível de resistência à compressão de 36,6 MPa, as relações a/ag das misturas investigadas apresentaram pouca variação no prazo de cura de sete dias (REF, relação a/ag 0,58 e 10 CCAC/10 CCAE, relação a/ag 0,61), os valores de resistividade elétrica variaram consideravelmente, especialmente ao comparar a mistura de referência com aquelas compostas com CCA.

Com a elevação do nível de resistência à compressão de 36,6 MPa para 56,6 MPa, todas as misturas satisfizeram as condições de enquadramento ao nível de agressividade muito forte (nível IV, NBR 12655:2006 – condições em que é necessário um concreto de baixa permeabilidade à água), nos dois prazos de cura investigados.

Ocorreu um aumento significativo da resistividade elétrica quando a resistência à compressão passou de 36,6 MPa para 56,6 MPa. Para o prazo de cura de três dias, esse aumento foi de 74%, 30%, 47%, 37%, 61%, 35%, 21% e 172% para as misturas REF, 10 CCAC, 20 CCAC, 30 CCAC, 10 CCAE, 20 CCAE, 30 CCAE e 10 SA, respectivamente. Para essas mesmas misturas e prazo de cura de sete dias, o aumento verificado foi de 86%, 37%, 40%, 33%, 80%, 35%, 20% e 179%, também respectivamente às misturas acima.

Nos dois prazos de cura investigados, três dias e sete dias, constata-se um grande aumento na resistividade elétrica da mistura 10 SA quando a resistência à

compressão variou de 36,6 MPa para 56,6 MPa. Embora, aos sete dias de cura, para o nível de resistência à compressão de 56,6 MPa, a relação a/ag da mistura 10 SA (0,34) seja próxima à da mistura 10 CCAE (0,39), esta última apresenta valor de resistividade elétrica 61% inferior. Esse comportamento pode ser justificado por um maior refinamento dos poros e menor condutividade elétrica específica da solução dos poros da mistura composta com 10% de sílica ativa (BERKE et al., 1991).

Para o nível de resistência à compressão de 36,6 MPa, o aumento no teor de CCAC, de 10% para 30%, resultou em um aumento da resistividade elétrica de 182% e 203%, para os prazos de cura de três e sete dias, respectivamente e, para os mesmos teores de CCAE, a elevação da REA foi de 115% e 148%, nos prazos de cura três e sete dias, respectivamente. Gastaldini et al. (2009) e Horsakulthai, Phiuvanna e Kaenbud (2011) observaram que o aumento no teor de CCA resultou em superiores valores de resistividade elétrica e diminuição nos valores de condutividade elétrica da solução dos poros, assim como aumento na proporção de pequenos poros.

Da mesma forma, para o nível de resistência à compressão de 56,6 MPa, o acréscimo no teor de CCAC, de 10% para 30%, resultou em uma elevação da resistividade elétrica de 195% e 193%, nos prazos de cura três dias e sete dias, respectivamente e, para os mesmos teores de CCAE, o aumento da REA foi de 62% e 66%, para os prazos de cura de três dias e sete dias, respectivamente.

Quando comparado com a mistura de referência, a substituição parcial de cimento por 10%, 20% e 30% de cinza de casca de arroz, mesmo com diferentes teores de carbono gráfico, proporcionou um aumento significativo na resistividade elétrica, para os dois níveis de resistência à compressão estabelecidos, 36,6 MPa e 56,6 MPa.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve por objetivo a investigação de aspectos relacionados à durabilidade de estruturas de concreto que receberam adição de cinza de casca de arroz, em especial a absorção de água por capilaridade, a resistividade elétrica aparente e a resistência à compressão axial. Os concretos foram produzidos com dois tipos de cinza de casca de arroz, que se diferenciam pelo conteúdo de carbono grafítico, as quais foram utilizadas em substituição parcial à massa de cimento, nos teores de 10%, 20% e 30%. Todas as misturas foram comparadas com uma mistura de referência (100% de cimento Portland) e com aquela composta por 10% de sílica ativa.

Verificou-se a influência do teor de adição mineral, da relação a/ag, do período de cura e da idade sobre as propriedades investigadas. De modo geral, os resultados indicaram que houve acréscimo na resistência à compressão com o incremento do teor de cinza de casca de arroz, clara e escura, com a redução da relação a/ag, com o acréscimo do prazo de cura e quando houve aumento no grau de hidratação das amostras. Esses resultados são justificados pela literatura existente, devido às alterações na microestrutura das misturas compostas com as adições minerais utilizadas, através do refinamento dos poros e do tamanho dos grãos, tornando-as mais compactas, com aumento das reações pozolânicas e pelo efeito filler. Em igualdade de relação a/ag, no geral, os valores de resistência à compressão foram semelhantes, indiferentemente do teor de carbono grafítico da CCA.

Com relação aos ensaios de absorção de água por capilaridade, nota-se a redução desta propriedade em concretos com o aumento do prazo de cura, pela redução da relação a/ag e pelo emprego da cinza de casca de arroz, principalmente em teores maiores mais elevados (20% e 30%). Devido ao refinamento dos poros, há acréscimo nas tensões capilares e, conseqüentemente, elevação da altura média de ascensão capilar das amostras; todavia, este fato não aparenta reduzir a durabilidade do material, haja vista os baixos valores de absorção apresentados.

As misturas com teor de carbono grafítico mais elevado (CCA-E) apresentaram menores valores de absorção capilar, em comparação com as

misturas compostas com cinza de casca de arroz clara, o que pode ser atribuído à maior área superficial da CCAE (maior obstrução dos poros). Para o teor de substituição de 10%, o comportamento foi semelhante na idade de 28 dias, indiferentemente do teor de carbono grafítico da cinza de casca de arroz e, aos 91 dias, o desempenho da mistura com 10% de CCAE foi muito próximo ao obtido pela mistura com 20% de CCAC. Contudo, o melhor desempenho do ensaio de absorção de água por capilaridade ficou por conta da mistura com 10% de sílica ativa. Embora a CCA e SA apresentem uma composição química similar, com área de superfície específica muito alta, a CCA não é um material ultrafino como a SA. A elevada área de superfície específica da CCA é originada da porosidade interna, por esta razão, a CCA pode comportar-se diferentemente da SA, em termos de hidratação e microestrutura do concreto.

Quanto à resistividade elétrica aparente, verifica-se a contribuição das propriedades físicas e químicas do concreto ante esta propriedade, conforme expresso na literatura consultada. Em similaridade de condições, no geral, observou-se superioridade de desempenho para a CCAC, em relação à CCAE. Nas três relações a/ag estudadas, os resultados obtidos apontam que o maior prazo de cura e a elevação do teor de cinza de casca de arroz proporcionaram aumento na resistividade elétrica aparente. A redução da relação a/ag também tem papel importante na REA, já que a menor quantidade de eletrólito presente dificulta a circulação de corrente elétrica pelo interior das amostras, assim como promove modificações na estrutura de poros, aumentando os valores de resistividade elétrica do material.

A partir de 28 dias, mesmo na relação a/ag 0,65, todas as misturas com cinza de casca de arroz ou sílica ativa apresentaram risco de corrosão considerado desprezível, de acordo com a tabela proposta pelo CEB 192 (Tabela 2.1).

Aos 182 dias, todas as misturas com adições de cinza de casca de arroz apresentaram resultados de resistividade elétrica aparente muito acima daqueles obtidos pela mistura de referência (superiores a 100%). A mistura composta com 30% de cinza de casca de arroz clara, com relação a/ag 0,35, obteve o maior valor de resistividade elétrica.

Para o nível de resistência à compressão de 36,6 MPa, as misturas compostas com 30% de CCAC apresentaram maiores valores de resistividade elétrica do que as mesmas misturas compostas com CCAE em igual teor; entretanto,

para os teores 10% e 20% de substituição de cimento por CCA, não houve variação significativa nos valores de REA entre os dois tipos de cinza investigados. No caso da absorção capilar, as misturas com CCA clara e escura apresentaram desempenho semelhante no teor de substituição de 10%; porém, quando o teor de CCA foi elevado, as misturas com CCAE obtiveram menor absorção capilar. Para esse mesmo nível de resistência à compressão, os concretos com sílica ativa apresentaram valores de resistividade elétrica situados entre os valores das misturas com o emprego de 10% e 20% de cinza de casca de arroz e resultados de absorção capilar aproximados aos das misturas com 30% de cinza de casca de arroz.

Para o nível de resistência à compressão de 56,6 MPa, os concretos compostos com 20% e 30% de CCAC apresentaram melhor desempenho nos resultados de REA, quando comparados com as misturas de mesmos teores de CCAE. Para o teor de 10%, observou-se comportamento contrário. No entanto, em igualdade de condições, as misturas com CCAE apresentaram os menores índices de absorção capilar, em comparação com as misturas com CCAC. Contudo, a mistura com 10% de sílica ativa apresentou melhor desempenho nos resultados de absorção capilar e de resistividade elétrica, para esse mesmo nível de resistência à compressão.

Assim, de acordo com os resultados obtidos na presente pesquisa, verifica-se a viabilidade técnica do emprego de misturas com adições de cinza de casca de arroz em concretos, tanto a cinza clara quanto a escura. Deste modo, além de favorecer propriedades ligadas à durabilidade de estruturas de concreto, a utilização de cinza de casca de arroz proveniente de processo de geração de energia beneficia o meio ambiente, através da redução do gasto energético e de emissão de CO₂ despedido na atmosfera, proveniente da produção de cimento.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Vários estudos seguem como complemento deste trabalho. O GEPECON/UFSM continua investigando a influência da cinza de casca de arroz em propriedades relacionadas à durabilidade de concretos, como a suscetibilidade à penetração de íons cloretos, carbonatação acelerada, retração hidráulica e permeabilidade ao oxigênio.

Sugere-se investigar outros teores de adição de cinza de casca de arroz em concretos e proceder a uma avaliação dos custos de produção. Outros dados importantes a serem adicionados poderiam ser obtidos através da análise minuciosa da microestrutura das amostras com cinza de casca de arroz, através dos ensaios de porosimetria de mercúrio, microscópio eletrônico de varredura, difração de raios X, hidróxido de cálcio remanescente, água combinada e composição da solução dos poros.

REFERÊNCIAS

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.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book of ASTM standards**. ASTM C494/C494M-05: Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. Philadelphia, 2005.

ANDRADE, C. Calculation of initiation and propagation periods of service life of reinforcement by using the electrical resistivity. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCES IN CONCRETE THROUGH SCIENCE AND ENGINEERING, RILEM. **Proceedings ...** Evanston: 2004. p. 1-8.

ANDRADE, C. Model for prediction of reinforced concrete service life based on electrical resistivity. **IBRACON Materials Journal**, v.1, n.1, p. 1-5, Dez., 2005.

_____. Types of models of service life of reinforcement: the case of the resistivity. **Concrete Research Letters**, v.1, n.2, Jun., 2010.

ABCP. **Associação Brasileira de Cimento Portland**. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/>>. Acesso em: 15 jun. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

_____. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão em corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

_____. **NBR 7117**: Medição da Resistividade do Solo pelo Método dos Quatro Pontos (Wenner). Rio de Janeiro: ABNT, 1981.

_____. **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

_____. **NBR 9779:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

_____. **NBR 11579:** Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (nº 200) – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

_____. **NBR 12653:** Materiais Pozolânicos. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

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

_____. **NBR 15575-1:** Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

_____. **NM 23:** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

_____. **NM 65:** Cimento Portland – Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NM 67:** Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

AZEVEDO, A. A.; MARTINS, M. L. C.; SIVEIRA, A. A. Effect of combustion conditions of rice husk ash on water absorption of concrete. In: III INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 2002, Recife, Brazil. **Anais ...** Recife: III International Conference on High-Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures, 2002.

BARIN, D. S. **Carbonatação e absorção capilar em concretos de cimento Portland branco com altos teores de adição de escória de alto forno e ativador químico.** Santa Maria, 2008, 171 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

BAKAR, B. H. A.; PUTRAJAYA, R.; ABDULAZIZ, H. Malaysian rice husk ash – improving the durability and corrosion resistance of concrete: pre-review. **Concrete Research Letters**, v.1, n.1, mar., 2010.

BASHEER, P. A. M.; GILLEECE, P. R. V.; LONG, A. E.; McCARTER, W. J. Monitoring electrical resistance of concretes containing alternative cementitious materials to assess their resistance to chloride penetration. **Cement & Concrete Composites**, v.24, n.5, p. 437-49, 2002.

BERKE, N. S.; SCALI, M. J.; REGAN, J. C.; SHESH, D. F. Long term corrosion resistance of steel in silica fume and/or fly ash containing concretes. In: Proceedings, second CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, 1991.

Farmington Hills, MI. **Anais ...** Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 1991. SP-126, p. 343-415.

BERTOLINI, L. **Materiais de construção: patologia, reabilitação e prevenção**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

BOATENG, A. A.; SKEETE, D. A. Incineration of rice hull for use as a cementitious material: the Guyana experience. **Cement & Concrete Composites**, v. 20, p. 795-802, 1990.

BOUZOUBAÂ, N.; FOURNIER, B. Concrete incorporating rice-husk ash: compressive strength and chloride-ion penetrability. **Materials Technology Laboratory**, MTL 2001-5 (TR), p.1-16, Jul., 2001.

BRYANT JR., J. W.; WEYERS, R. E.; GARZA, J. M. In-place resistivity of bridge deck concrete mixtures. **ACI Materials Journal**, Title nº106-M14, mar.-abr., 2009.

CAO, J.; CHUNG, D. D. L. Microstructural effect of the shrinkage of cement-based materials during hydration, as indicated by electrical resistivity measurement. **Cement and Concrete Research**, vl. 34, p.1893-7, 2004.

CARSANA, M.; BERTOLINI, L. Recycling ground glass as a pozzolanic addition to improve concrete performance. In: 7º CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS – CINPAR 2011. **Anais ...** Fortaleza: CINPAR, 2011.

CARVAJAL, A. M.; BENAVIDES, F.; SILVA, C.; VALIENTE, J.; VENEGAS, A. Effect of accelerated carbonation on concretes of different types of cement. In: IV INTERNATIONAL ACI/CANMET CONFERENCE ON QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES AND RECENT ADVANCES IN CONCRETE MATERIALS AND TESTING. 08-05, 2005. **Anais ...** Coimbra: American Concrete Institute, 2005. Paper XII. p. 218-27.

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

CASTELLOTE, M., ANDRADE, C., ALONSO, M. C. Standardization, to a reference of 25°C, of electrical resistivity for mortars and concretes in saturated or isolated conditions. **ACI Materials Journal**. Title nº 99-M9. Mar.-Abr., 2002.

CASTRO, A.; LOPES, A. N. M.; HASPARYK, N. P.; CARASEKY, H.; CASCUDO, O. Microstructural analysis of carbonated concretes containing mineral admixtures. In: IV INTERNATIONAL ACI/CANMET CONFERENCE ON QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES AND RECENT ADVANCES IN CONCRETE MATERIALS AND TESTING. 08-05, 2005. **Anais ...** Coimbra: American Concrete Institute, 2005. Paper III. p. 276-95, 2005.

CEZAR, D. S. **Características de durabilidade de concretos com cinza volante e cinza de casca de arroz com e sem beneficiamento**. Santa Maria, 2011, 143 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

CHAO-LUNG, H.; ANH-TUAN, B. L.; CHUN-TSUN, C. Effect of rice husk ash on the strength and durability characteristics of concrete. **Construction and Build Materials**, v. 25, p. 3768-72, 2011.

CHATVEERA, B.; LERTWATTANARUK, P. Evaluation of sulfate resistance of cement mortars containing black rice husk ash. **Journal of Environmental Management**, v. 90, p. 1435-41, 2009.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. Durable concrete structures CEB Design Guide. **CEB – Bulletin D'Information**, v. 183. Paris, 1992.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO; R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Use of ultrafine rice husk ash with high-carbon content as pozzolan in high performance concrete. **Materials and Structures**, v. 42, p. 983-92, 2009.

COUTINHO, J. S. The combined benefits of CPF and RHA in improving the durability of concrete structures. **Cement & Concrete Composites**, v. 25, p. 51-9, 2003.

DOTTO, J. M. R.; ABREU, A. G.; DAL MOLIN, D. C. C.; MÜLLER, I. L. Influence of silica fume addition on concretes physical properties and on corrosion behavior of reinforcement bars. **Cement & Concrete Composites**, v. 26, p. 31-9, 2004.

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

ESBACH, O. E.; SOUDERS, M. **Handbook of engineering Fundamentals**. New York: John Wiley & Sons, 1975.

FENG, Q.; YAMAMICHI, H.; SHOYA, M.; SUGITA, S. Efficiency of highly active Rice husk ash on the high-strength concrete. In: 11th INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT (ICCC), 2003, Durban, South Africa. **Anais ... 2003**. 1 CD-ROM.

FERREIRA, A. A. **Influência da temperatura de queima da cinza de casca de arroz na pozolanidade e microestrutura do concreto**. Seminário da disciplina de novos materiais, Escola de Engenharia, curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1996.

FERREIRA, R.; CASTRO, A.; LOPES, A. N. M.; CARASEK, H.; CASCUDO, O. Influence of high and low-reactivity mineral admixtures on some mechanical

properties and durability of concrete. In: IV INTERNATIONAL ACI/CANMET CONFERENCE ON QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES AND RECENT ADVANCES IN CONCRETE MATERIALS AND TESTING. American Concrete Institute. 08-05, 2005. **Anais ...** Coimbra: American Concrete Institute, 2005. Paper XII.15, p. 805-21, 2005.

FRIZZO, B. T. **Influência do teor e da finura de pozolanas na permeabilidade ao oxigênio e na absorção capilar do concreto**. Santa Maria, 2001, 158 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.

FURQUIM, P. R. V. **Estudo estatístico de produção de concretos com adições minerais**. Santa Maria, 2006, 208 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

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. 1675-83, 2008.

GASTALDINI, A. L. G.; ISAIA, G. C.; HOPPE, T. F.; MISSAU, F.; SACILOTO, A. P. Influence of the use of rice husk ash on the electrical resistivity of concrete: a technical and economic feasibility study. **Construction and Build Materials**, v. 23, p. 3411-9, 2009.

GIVI, A. N.; RASHID, S. A.; AZIZ, F. N. A.; SALLEH, M. A. M. Assessment of the effects of rice husk ash particle size on strength, water permeability and workability of binary blended concrete. **Construction and Build Materials**, v. 24, p. 2145-50, 2010.

GJØRV, O. E.; VENNESLAND, Ø; EL-BUSIADY, A. H. S. Electrical resistivity of concrete in the oceans. In: 9th ANNUAL OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, May 2-5, 1977. **Anais ...** Houston, Texas, 1977, p. 581-8.

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

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

HOPE, B. B.; IP, A. K.; MANNING, D. G. Corrosion and electrical impedance in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 15, p. 525-34, 1985.

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

HOPPE, T. F.; GASTALDINI, A. L. G.; ISAIA, G. C.; MISSAU, F.; SACILOTO, A. P. Influência do teor de cinza de casca de arroz na resistividade elétrica do concreto. In: 47^º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO – CBC2005, 2005. **Anais ...** São Paulo: CBC, 2005. v. 5, trabalho 47CBC0143, p. V933-944.

HORSAKULTHAI, V.; PHIUVANNA, S.; KAENBUD, W. Investigation on the corrosion resistance of bagasse-rice husk-wood ash blended cement concrete by impressed voltage. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 54-60, 2011.

IRGA. Instituto Rio Grandense do Arroz. Disponível em <<http://www.irga.rs.gov.br/index.php?action=newsletter>>. Acesso em: 08 abr. 2011.

ISAIA, G. C. A ciência e a engenharia de materiais de construção civil. In: ____ (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais**. São Paulo: IBRACON. 2v, p 108-9, 2007.

_____. **Efeitos das misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho**: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura. 1995, 280f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) -Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G. Effects on durability of HPC with very high levels of mineral additions and hydrated lime. In: IV INTERNATIONAL ACI/CANMET CONFERENCE ON QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES AND RECENT ADVANCES IN CONCRETE MATERIALS AND TESTING. American Concrete Institute. 08-05, 2005. **Anais ...** Coimbra: American Concrete Institute, 2005. Paper XII.03, p. 741-60, 2005.

JOHN, V. M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. 1995, 200f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

JOHN, V. M.; SJÖSTRÖM, C.; AGOPYAN, V. Durability in the built environment and sustainability in developing countries. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF BUILDING MATERIALS COMPONENTS, 9th, 2002, Brisbane. **Anais** Melbourne: CSIRO, 2002, p. 11-1-11-7.

KAZMIERCZAK, C. S.; HELENE, P. R. L. **Análise e fatores que influenciam a velocidade de carbonatação em estruturas de concreto armado**. IBRACON – Reunião Anual. Controle de qualidade do concreto. Processos construtivos em obras de concreto. Brasília: IBRACON, 1993.

KIRCHHEIM, A. P. **Concreto de cimento Portland branco estrutural**: avaliação da carbonatação e absorção capilar. Porto Alegre, 2003, 169 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

LARANJEIRAS, A. C. R. **Estruturas de concretos duráveis: uma chave para o sucesso do desenvolvimento sustentável.** São Paulo: IBRACON, 2002.

LIM, Y.; NOGUCHI, T.; SHIN, S. W. Corrosion evaluation by estimating the surface resistivity of reinforcing bar. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 8, n. 2, p. 113-119, 2010.

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

MAHMUD, H. B.; MALIK, M. F. A.; KAHAR, R. A.; ZAIN, M. F. M.; RAMAN, S. N. Mechanical properties and durability of normal and water reduced high strength grade 60 concrete containing rice husk ash. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 7, n. 1, p. 21-30, 2009.

MARUYA, T.; HSU, K.; TAKEDA, H.; TANGTERMSIRIKUL, S. Numerical modeling of steel corrosion in concrete structures due to chloride ion, oxygen and water movement. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 1, n. 2, p. 147-160, 2003.

MEHTA, P. K. The chemistry and technology of cements made from rice husk ash. In: UNIDO/ESCAP/RCTT, WORKSHOP ON RICE-HUSK ASH CEMENT, 1979. **Anais ...** Peshawar, Pakistan, 1979. p. 113–122.

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

_____; _____. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MEIRA, L. R. **Propriedades mecânicas e retração do concreto com adição de cinza de casca de arroz natural, sem beneficiamento de moagem.** Santa Maria, 2009. Santa Maria, 2009, 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

MEMON, S. A.; SHAIKH, M. A.; AKBAR, H. Utilization of rice husk ash as viscosity modifying agent in self compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 1044-8, 2011.

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.

MIYAZATO, S.; OTSUKI, N. Steel corrosion induced by chloride or carbonation in mortar with bending cracks or joints. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 8, n. 2, p. 135-44, 2010.

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

NEPOMUCENO, A. A.; NEVES, I. B. F. Avaliação da capacidade de proteção de argamassas produzidas com cinza de casca de arroz em relação à corrosão de armaduras em ambientes com CO₂. In: VI SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2006, São Paulo. **Anais ...** São Paulo: USP, 2006.

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

PEDEFERRI, P.; BERTOLINI, L. **La corrosione nel calcestruzzo e negli ambienti naturali**. Itália: McGraw-Hill, 1996.

POLDER, R. B.; PEELEN, W. H. A. Characterization of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by electrical resistivity. **Cement & Concrete Composites**, v.24 p. 427-35, 2002.

POLDER, R. B. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete – a RILEM TC-154 technical recommendation. **Construction and Building Materials**, v. 15, n. 2-3, p.125-31, 2001.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico**. 2006. 360f. Tese (Doutorado). - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto alegre, 2006.

PRUDÊNCIO, L.R; SANTOS, S; DAFICO, D.A. Cinza da Casca de Arroz. In: **Coletânea HABITARE: Utilização de Resíduos na Construção Habitacional**. Porto Alegre : ANTAC, v.4, p. 240-261, 2003.

RAMAN, S. N.; NGO, T.; MENDIS, P.; MAHMUD, H. B. High-strength rice husk ash concrete incorporating quarry dust as a partial substitute for sand. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 3123-30, 2011.

RAMEZANIANPOUR, A. A.; PILVAR, A.; MAHDIKHANI, M.; MOODI, F. Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength. **Construction and Build Materials**, v. 25, p. 2472-9, 2011.

RÊGO, J. H. S.; FIGUEIREDO, E. P. Rice husk ash (RHA) obtained without temperature control as partial substitute of cement in high performance concretes. In: III INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 2002, Recife, Brazil. **Anais ...**Recife, 2002.

RÊGO, J. H. S.; FIGUEIREDO, E. P.; NEPOMUCENO, A. A. A utilização da cinza de casca de arroz residual (CCA residual) como adição mineral ao cimento em concretos. In: 44^a REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 2002, Belo Horizonte. **Anais ...** Belo Horizonte: IBRACON, 2002. p. 1-15.

RÊGO, J. H. S.; NEPOMUCENO, A. A.; VIEIRA, F. L.; LOPES, A. N. M. Caracterização do resíduo de cinza de casca de arroz (CCA) no Brasil. In: XXXI JORNADAS SUD-AMERICANAS DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL, 2004, Mendoza, Argentina. **Anais ...**Mendonza, 2004.

RÊGO, J. H. S.; NEPOMUCENO, A. A.; FIGUEIREDO, E. P.; VIEIRA, F. L. Análise da microestrutura e da estrutura porosa de pastas de cimentos compostos com cinza de casca de arroz (CCAs) amorfa e cristalina. In: 48^o CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - IBRACON, 2006, Rio de Janeiro. **Anais ...** Rio de Janeiro: - IBRACON, 2006.

RIDING, K. A.; POOLE, J. L.; SCHINDLER, A. K.; JUENGER, M. C. G.; FOLLIARD, K. J. Simplified concrete resistivity and rapid chloride permeability test method. **ACI Materials Journal**, v. 105, n. 4, Title n. 105-M45, jul.-ago., 2008.

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.

SABIR, B. B. Mechanical properties and frost resistance of silica fume concrete. **Cement & Concrete Composites**, v. 19, p. 285-94, 1997.

SAFIUDDIN, Md.; WEST, J. S.; SOUDKI, K. A. Hardened properties of self-consolidating high performance concrete including rice husk ash. **Cement & Concrete Composites**, v. 32, p. 708-17, 2010.

SALAS, A.; DELVASTO, S.; GUTIERREZ, R.; LANGE, D. Comparison of two processes for treating rice husk ash for use in high performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 39, p. 773-8, 2009.

SANTOS, L. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto**. Brasília, 2006, 161 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SARASWATY, V.; SONG, H. Corrosion performance of rice husk ash blended concrete. **Construction and Building Materials**, v. 21, p. 1779-84, 2007.

SENGUL, O; GJØRV, O. E. Effect of embedded steel on electrical resistivity measurements on concrete structures. **ACI Materials Journal**, v. 106, n. 1, Title n. 106-M02. Jan.-Fev., 2009.

_____; _____. Electrical resistivity measurements for quality control during concrete construction. **ACI Materials Journal**, v. 105, n. 1, Title n. 105-M61. Nov.-Dez., 2008.

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. 104, n. 1, Title n. 101-M43. Set.-Out., 2004.

SNIC. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. Disponível em: <<http://www.snic.org.br/>>. Acesso em: 01 jul. 2011.

SOUZA, A. A. A.; OLIVEIRA, V. C. Corrosão e degradação do concreto – Caracterização dos diferentes ambientes em contato com as estruturas de concreto. In: 7º CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS CINPAR 2011, Fortaleza. **Anais ...** Fortaleza: CINPAR, 2011.

SUGITA, S.; SHOYA, M.; TOKUDA, H. Evaluation of pozzolanic activity of Rice husk ash. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE, 4th, 1992, Istanbul. **Anais ...** Detroit: American Concrete, 1993. 2v., v. 1, p. 495-512. (SP-132).

TASHIMA, M. M.; SILVA, C. A. R.; AKASAKI, J. L.; BARBOSA, M. B. Influence of rice husk ash in mechanical characteristics of concrete. In: IV INTERNATIONAL ACI/CANMET CONFERENCE ON QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES AND RECENT ADVANCES IN CONCRETE MATERIALS AND TESTING. American Concrete Institute. 08-05, 2005. **Anais ...** Coimbra: American Concrete Institute, 2005. Paper XII.08, p. 780-90, 2005.

TEIXEIRA, L. M. **Rice husk ash additions in concrete, under durability aspects.** In: IV INTERNATIONAL ACI/CANMET CONFERENCE ON QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES AND RECENT ADVANCES IN CONCRETE MATERIALS AND TESTING. American Concrete Institute. 08-05, 2005. American Concrete Institute, 2005. Paper XII.06, p. 770-79, 2005.

TUAN, N. V.; YE, G.; BREUGEL, K. V.; COPUROGLU, O. Hydration and microstructure of ultra high performance concrete incorporating rice husk ash. **Cement and Concrete Research**. CEMCON-04306, 2011. 8 p.

VAN DEN HEEDE, P.; GRUYAERT, E.; DE BELIE, N. Transport properties of high-volume fly ash concrete: capillary water sorption, water sorption under vacuum and gas permeability. **Cement & Concrete Composites**, v. 32, p. 749-56, 2010.

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. 200, Title n^o 97-M29, Mar.-Abr. 2000.

WHITTINGTON, H. W.; MAcCARTER, J.; FORDE, M. C. The conduction of electricity through concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 33, n. 114, Mar., 1981.

WHITING, D. A.; NAGI, M. A. **Electrical resistivity of concrete**: a literature review. R&D Serial No. 2457. Skokie, Illinois, USA: Portland Cement Association, 2003.

YEOH, A. K.; BIDIN, R.; CHONG, C. N.; TAY, C. Y. The relationship between temperature and duration of burning of rice-husk in the development of amorphous rice-husk ash silica. In: UNIDO/ESCAP/RCTT, FOLLOW-UP MEETING ON RICE-HUSK ASH CEMENT, 1979, Malaysia. **Anais ... Malaysia: Alor Setar, 1979.**

ZAIN, M. F. M.; ISLAM, M. N.; MAHMUD, F.; JAMIL, M. Production of rice husk ash for use in concrete as a supplementary cementitious material. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 798-805, 2011.

ZARZAR JÚNIOR, F. C.; OLIVEIRA, R. A.; BITTENCOURT, T. N. Análise paramétrica da influência do consumo de microssílica sobre a vida útil de componentes de concreto armado atacados por íons cloretos. In: 7^o CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS – CINPAR 2011, 2011, Fortaleza. **Anais ... Fortaleza: CINPAR, 2011.**

ZERBINO, R.; GIACCIO, G.; ISAIA, G. C. Concrete incorporating rice-husk ash without processing. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 371-8, 2011.

ZHANG, M. H.; LASTRA, R.; MALHOTRA, V. M. Rice-husk ash paste and concrete: some aspects of hydration and the microstructure of the interfacial zone between the aggregate and paste. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 6, p. 963-77, mar. 1996.

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