

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

**RESISTIVIDADE ELÉTRICA E ABSORÇÃO CAPILAR
DE CONCRETOS COMPOSTOS COM CINZA DE
LODO DE ETA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Fábio Dischkaln do Amaral

Santa Maria, RS, Brasil

2015

RESISTIVIDADE ELÉTRICA E ABSORÇÃO CAPILAR DE CONCRETOS COMPOSTOS COM CINZA DE LODO DE ETA.

Fábio Dischkaln do Amaral

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 a obtenção do grau de

Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Professor Dr. Antônio Luiz Guerra Gastaldini

Santa Maria, RS, Brasil

2015

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Dischkaln do Amaral, Fábio
RESISTIVIDADE ELÉTRICA E ABSORÇÃO CAPILAR DE CONCRETOS
COMPOSTOS COM CINZA DE LODO DE ETA / Fábio Dischkaln do
Amaral.-2015.

105 p. ; 30cm

Orientador: Antonio Luiz Guerra Gastaldini
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2015

1. Concreto 2. Resistividade elétrica 3. Absorção de
água por capilaridade 4. Cinza de lodo de ETA I. Guerra
Gastaldini, Antonio Luiz II. Título.

© 2015

Todos os direitos autorais reservados a Fábio Dischkaln do Amaral. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte. E-mail: fabio_amaral@ymail.com

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

**RESISTIVIDADE ELÉTRICA E ABSORÇÃO CAPILAR DE
CONCRETOS COMPOSTOS COM CINZA DE LODO DE ETA.**

elaborada por

Fábio Dischkaln do Amaral

como requisito parcial para obtenção do grau de

Mestre em Engenharia Civil

COMISSÃO EXAMINADORA:

Antônio Luiz Guerra Gastaldini, Dr. (UFSM)

(Presidente/Orientador)

Geraldo Cechella Isaia, Dr. (UFSM).

Almir Barros da Silva Santos Neto, Dr. (UNIPAMPA).

Santa Maria, 13 de Janeiro de 2015.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, meus pais Eduir e Elizabeth e meu irmão Alan, por me darem educação durante toda a minha vida, pelo incentivo e suporte durante toda essa jornada, pois sem vocês parte do meu sonho não seria realidade.

Ao meu professor orientador Dr. Antônio Luiz Guerra Gastaldini, pelos ensinamentos transmitidos não só para a vida acadêmica, mas ela num todo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa concedida.

Ao professor Dr. Geraldo Cechella Isaia, por todos os conhecimentos passados e por sua simplicidade transmitida.

Ao casal, Mirdes e Matheus, pela hospitalidade, incentivo e amizade.

A todos os colegas e funcionários do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), pelos ensinamentos e colaboração no desenvolvimento desse estudo.

Aos integrantes do Grupo de Estudos e Pesquisas em Concreto (GEPECON), pelos ensinamentos, companhia e imensa colaboração nas atividades de laboratório.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGEC) pelos ensinamentos e ajudas prestadas.

Aos membros da banca examinadora, Dr. Geraldo Cechella Isaia e Dr. Almir Barros da Silva Santos Neto pela atenção e colaboração.

Ao CNPq e a CAPES, pelos recursos financeiros concedidos.

A Universidade Federal de Santa Maria, por possibilitar essa pesquisa.

A todos, muito obrigado.

“Nada é impossível, apenas pouco provável”.

RESUMO

Dissertação de Mestrado

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Universidade Federal de Santa Maria

RESISTIVIDADE ELÉTRICA E ABSORÇÃO CAPILAR DE CONCRETOS COMPOSTOS COM CINZA DE LODO DE ETA

AUTOR: FÁBIO DISCHKALN DO AMARAL

ORIENTADOR: ANTONIO LUIZ GUERRA GASTALDINI

Data e local da Defesa: Santa Maria, 13 de Janeiro de 2015.

O setor da construção civil tem sido um dos mais abrangentes para a aplicação destes resíduos, pois possibilita a reintrodução dos rejeitos industriais na composição de argamassas e concretos. Tais subprodutos como a cinza de lodo de estação de tratamento de água (CLETA), cinza de casca de arroz (CCA) e escória de alto forno (EAF), possibilitam a sua utilização no concreto, conferindo-lhe condições de durabilidade. Neste trabalho foram investigadas misturas contendo diferentes teores de CLETA, CCA e EAF, através dos ensaios de resistividade elétrica aparente, conforme o método dos quatro eletrodos (Wenner), absorção de água por capilaridade, segundo a ABNT NBR 9779 e resistência à compressão axial, pela ABNT NBR 5739. Para isso, foram testadas dez misturas aglomerantes, nas relações água/aglomerante 0,35, 0,50 e 0,65 e três tipos de cura, cura úmida de 7, 14, 28, 56 e 91 dias, cura úmida de três e cura úmida de sete dias, sendo ensaiados aos 28 e 91 dias. As substituições do cimento Portland por CLETA variaram 0% a 30%, havendo ainda misturas ternárias, 20% CLETA e 5% EAF, 20% CLETA e 10% EAF, e quaternária, 15% CLETA, 5% EAF e 5% CCA. Em relação aos ensaios de absorção de água por capilaridade, constatou-se que com o acréscimo no período de cura, de três para sete dias, houve redução na absorção de água por capilaridade. No ensaio de resistividade elétrica aparente, ocorreu aumento com a redução da relação água/aglomerante e aumento no grau de hidratação, onde os melhores resultados foram encontrados nas misturas com CCA, que apresentaram elevação da resistividade elétrica aparente de 257% em relação ao concreto referência. Sendo assim, a partir dos ensaios realizados, verificou-se que a substituição parcial do cimento por CLETA, CCA e EAF confere benefícios ao concreto no que diz respeito à resistividade elétrica aparente e a absorção capilar.

Palavras – chave: cinza de casca de arroz, escória de alto forno, durabilidade.

ABSTRACT

Master's Dissertation

Graduate Program in Civil Engineering

Federal University of Santa Maria

ELECTRICAL RESISTIVITY AND CAPILLARY ABSORPTION OF CONCRETE COMPOSED WITH SEWAGE SLUDGE ASH

AUTHOR: FÁBIO DISCHKALN DO AMARAL

ADVISOR: ANTONIO LUIZ GUERRA GASTALDINI

Presentation date and venue: Santa Maria, 13th of January, 2015.

The construction sector has been one of the most comprehensive for the application of these residues, because it allows the reintroduction of industrial rejects in the composition of mortars and concretes. Byproducts such as sewage sludge ash (SSA), rice husk ash (RHA) and blast furnace slag (BFS) enable its use in concrete, conferring durability conditions. In this work were investigated mixtures containing different amounts of SSA, RHA and BFS, the apparent electrical resistivity as been made conforming to the four electrode method (Wenner), water capillary absorption, according to ABNT NBR 9779 and compressive strength, by ABNT NBR 5739. Ten binders have been tested, water/binder ratio 0,35, 0,50 and 0,65 and tree type of curing, wet curing periods of 7, 14, 28, 56 and 91 days and wet curing periods of three and seven days, tested at 28 and 91 days. The Portland cement substitutions by SSA varied from 0% to 30%, with further ternary mixture of 20% BFS and 5% SSA, 20% BFS and 10% SSA, and quaternary, SSA 15%, 5% BFS and 5% RHA. In relation to water capillary absorption tests, it was found that with the increase in the curing time of three to seven days there was reduction in absorption of water by capillarity. In the test of apparent resistivity occurred increased with the reduction of the water/binder and an increase in the degree of hydration where the best results were obtained in mixtures with RHA, which had high apparent electrical resistivity of 257% compared to the reference concrete. Based on the tests performed, it was found that the partial replacement for cement concrete SSA, RHA and BFS gives benefits as regards the apparent electrical resistivity and capillary absorption.

Keywords: rice husk ash, blast furnace slag, durability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de corrosão e fatores determinantes do processo (CASCUDO, 1997, p. 19).....	22
Figura 2 - Representação esquemática de Bakker adaptada. (CASCUDO & CARESEK, 2011).....	23
Figura 3 - Granulação da escória (JACOMINO et al., 2002).....	29
Figura 4 - Método dos quatro eletrodos para medir a resistividade elétrica do concreto (CARINO, 1988 apud HOPPE, 2005, p. 64).	39
Figura 5 - Esquema de montagem do corpo-de-prova para o ensaio de resistividade elétrica volumétrica, segundo ABNT NBR 9204:2012.	42
Figura 6 - Esquema de realização do ensaio de absorção capilar pelo método do RILEM TC 116-PCD 1999 (BARIN, 2008, p. 100).	46
Figura 7 - Curva granulométrica do agregado miúdo.....	54
Figura 8 - Curva granulométrica do agregado graúdo.	54
Figura 9 - Esquema dos corpos-de-prova utilizados no ensaio de resistividade elétrica aparente, pelo método de Wenner (ABREU, 1998, p. 52).	62
Figura 10 - Resistência à compressão versus relação a/ag: a) cura úmida de 7 dias; b) cura úmida de 28 dias; c) cura úmida de 91 dias; d) 28 dias com 3 dias de cura; e) 28 dias com 7 dias de cura; f) 91 dias com 3 dias de cura e g) 91 dias com 7 dias de cura.....	69
Figura 11 - Valores médios de absorção capilar para cada mistura, em função da relação a/ag, aos 28 dias de moldagem, cura 3 dias, 72 horas.....	75
Figura 12 - Valores médios de absorção capilar para cada mistura, em função da relação a/ag, aos 28 dias de moldagem, cura 7 dias, 72 horas.....	75
Figura 13 - Valores médios de absorção capilar para cada mistura, em função da relação a/ag, aos 91 dias de moldagem, cura 3 dias, 72 horas.....	76
Figura 14 - Valores médios de absorção capilar para cada mistura, em função da relação a/ag, aos 91 dias de moldagem, cura 7 dias, 72 horas.....	76
Figura 15 - Resistividade elétrica aparente versus idade: a) relação a/ag = 0,35, b) relação a/ag = 0,50 e c) relação a/ag = 0,65.....	81
Figura 16 - Absorção capilar correspondente aos níveis de resistência à compressão axial de 36,6 MPa e 56,6 MPa, aos 28 dias, cura de 3 dias.....	88
Figura 17 - Absorção capilar correspondente aos níveis de resistência à compressão axial de 36,6 MPa e 56,6 MPa, aos 28 dias, cura de 7 dias.....	88
Figura 18 - Resistividade elétrica aparente correspondente aos níveis de resistência à compressão axial de 36,6 MPa e 56,6 MPa, aos 28 dias.	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critérios de avaliação da resistividade elétrica – CEB 192 (1989).	33
Tabela 2 - Valores indicativos de resistividade e riscos associados (Andrade, 2004).	33
Tabela 4 - Características físicas dos agregados.....	49
Tabela 5 - Consumo dos materiais por metro cúbico de concreto.....	52
Tabela 6 – Tipo de cura, idade de ensaio, dimensão dos corpos-de-prova e número de camadas (adensamento)	53
Tabela 7 - Dados informativos do ensaio de resistividade elétrica aparente.	59
Tabela 8 - Resultados do ensaio de resistência à compressão axial.	60
Tabela 9 - Valores de resistência à compressão axial, em relação à mistura de referência. 65	
Tabela 10 - Resultados de absorção capilar aos 28 dias, cura de 3 dias.....	66
Tabela 11 - Resultado de absorção capilar aos 28 dias, cura de 7 dias.....	67
Tabela 12 - Resultados de absorção capilar aos 91 dias, cura de 3 dias.....	68
Tabela 13 - Resultados de absorção capilar aos 91 dias, cura de 7 dias.....	69
Tabela 15 - Resultados do ensaio de resistividade elétrica aparente.....	73
Tabela 16 - Resistividade elétrica aparente, período de 7 para 91 dias.	77
Tabela 17 - Classificação das misturas investigadas quanto à probabilidade de ocorrer corrosão, segundo critérios do CEB 192 (ABREU, 1998).	78
Tabela 18 - Coeficientes "A" e "B" da equação $f_c = A/Ba^{/ag}$ e coeficientes de determinação, R ² , das misturas investigadas para a idade de 28 dias, 3 dias de cura.	80
Tabela 19 - Coeficientes "A" e "B" da equação $f_c = A/Ba^{/ag}$ e coeficientes de determinação, R ² , das misturas investigadas para a idade de 28 dias, 7 dias de cura.	80
Tabela 20 - Coeficiente "C" e "D" da equação $A_c = C/Da^{/ag}$, para cada mistura investigada, idade de 28 dias, cura de 3 dias.	81
Tabela 21 - Coeficiente "C" e "D" da equação $A_c = C/Da^{/ag}$, para cada mistura investigada, idade de 28 dias, cura de 7 dias.	81
Tabela 22 - 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.	82
Tabela 23 - Coeficientes "A" e "B" da equação $f_c = A/Ba^{/ag}$ e coeficientes de determinação, R ² , das misturas investigadas para a idade de 28 dias, cura úmida.	84
Tabela 24 - Coeficiente "E" e "F" da equação $\rho = E/Fa^{/ag}$, para cada mistura investigada, idade de 28 dias	84
Tabela 25 - Relações a/ag e resistividade elétrica aparente (ρ) para os níveis de resistência à compressão de 36,6 MPa e 56,6 MPa, idade de 28 dias.	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/ag	água (água + aditivo)/aglomerante (cimento + adição), em massa
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Ag	aglomerante
Al ₂ O ₃	óxido de alumínio
C ₂ MS ₂	hematite
C ₃ A	aluminato de tricálcio
C ₃ MS ₂	merrwinita
C ₄ AF	ferro aluminato tetracálcio
Ca(OH) ₂	hidróxido de cálcio
CaCl ₂	cloreto de cálcio
CaCO ₃	carbonato de cálcio
CaO	óxido de cálcio
CCA	cinza de casca de arroz
CCAC	cinza de casca de arroz clara
CCAE	cinza de casca de arroz escura
CEB	Comité Euro-International Du Béton
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CLETA	cinza de lodo de estação de tratamento de água
CO ₂	dióxidos de carbono
Conab	Companhia Nacional de Abastecimento
CP II E	Cimento Portland composto de escória
CP III	Cimento Portland de alto-forno
CPV-ARI	Cimento Portland V de alta resistência inicial
Cp's	corpos-de-prova
CPB	Cimento Portland branco
C-S-H	silicato de cálcio hidratado
CST	Companhia Siderúrgica de Tubarão
CV	cinza volante
DTG	análise termogravimétrica diferencial
EAF	escória de alto forno
ES	Espírito Santo

ETA	estação de tratamento de água
Fe ₂ O ₃	óxido de ferro
FIB	Fédération Internationale Du Béton
H ₂ O	molécula de água
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
K ₂ O	óxido de potássio
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
mA	miliampère
MCCA	microssílica da cinza de casca de arroz
MgO	óxido de magnésio
MnO	óxido de manganês
Na ₂ O	óxido de sódio
NBR	Norma Brasileira
Ω.cm	Ohm.cm
Ω.m	Ohm.m
P ₂ O ₅	pentóxido de difósforo
pH	potencial de hidrogênio ou hidrogeniônico
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
REA	resistividade elétrica aparente
REF	mistura de referencia, sem adição mineral
RS	Rio Grande do Sul
SiO ₂	óxido de silício
SO ₃	trióxido de enxofre
TG	termogravimetria
TiO	óxido de titânio
UFMS	Universidade Federal de Santa Maria
ρ	resistividade elétrica aparente do concreto
ρ _v	resistividade elétrica volumétrica
#	abertura da malha da peneira
5 CCA	mistura composta por 5% CCA, 5% EAF e 15% CLETA, em substituição parcial ao cimento no concreto
5 EAF	mistura composta por 5% EAF e 20% CLETA, em substituição parcial ao cimento no concreto

- 5 L mistura composta por 5% CLETA, em substituição parcial ao cimento no concreto
- 10 EAF mistura composta por 10% EAF e 20% CLETA, em substituição parcial ao cimento no concreto
- 10 L mistura composta por 10 % CLETA, em substituição parcial ao cimento no concreto
- 15 L mistura composta por 15% CLETA, em substituição parcial ao cimento no concreto
- 20 L mistura composta por 20% CLETA, em substituição parcial ao cimento no concreto
- 25 L mistura composta por 25% CLETA, em substituição parcial ao cimento no concreto
- 30 L mistura composta por 30% CLETA, em substituição parcial ao cimento no concreto

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivos	17
1.1.1 Objetivo Geral	17
1.1.2 Objetivos específicos	17
2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	19
3. REVISÃO DE LITERATURA	20
3.1 Corrosão das armaduras	21
3.1.1 Considerações iniciais.....	21
3.1.2 Corrosão por carbonatação.....	23
3.1.3 Corrosão por cloretos.....	24
3.1.4 Corrosão sob tensão.....	25
3.2 Adições minerais	26
3.2.1 Cinza de lodo de estação de tratamento de água	27
3.2.1.1 Características da cinza de lodo de estação de tratamento de água	28
3.2.2 Escória de alto forno	29
3.2.2.1 Características da escória de alto forno.....	30
3.2.3 Cinza de casca de arroz.....	31
3.2.3.1 Características da cinza de casca de arroz	32
3.3 Resistividade elétrica aparente do concreto	34
3.3.1 Considerações iniciais.....	34
3.3.2 Fatores que influenciam na resistividade elétrica	34
3.3.3 Efeitos das adições minerais na resistividade elétrica do concreto.....	35
3.3.4 Critérios de avaliação do risco de corrosão, baseado nos valores de resistividade elétrica	37
3.3.5 Medidas de resistividade elétrica	37
3.3.5.1 Método do simples eletrodo.....	37
3.3.5.2 Método dos dois eletrodos.....	38
3.3.5.3 Método dos quatro eletrodos (método de Wenner)	39
3.3.5.4 Método da resistividade elétrica volumétrica	40
3.4 Absorção capilar do concreto	42
3.4.1 Considerações iniciais.....	42
3.4.2 Fatores que influenciam na absorção capilar	43
3.4.3 Efeitos das adições minerais na absorção capilar do concreto.....	43
3.4.4 Medidas de absorção capilar.....	45

3.4.4.1	Determinação da absorção capilar pelo método da ABNT NBR 9779:2012....	45
3.4.4.2	Determinação da absorção capilar conforme orientação do RILEM TC 116-PCD (1999).....	46
3.5	Resistência à compressão axial	47
3.5.1	Considerações iniciais.....	47
3.5.2	Fatores que influenciam na resistência à compressão axial	47
3.5.3	Efeitos das adições minerais na resistência à compressão axial.....	48
3.5.4	Medidas de resistência à compressão axial	48
3.	PROGRAMA EXPERIMENTAL	50
3.1	Introdução	50
3.2	Variáveis da Pesquisa	50
3.2.1	Variáveis independentes	51
3.2.2	Variáveis dependentes.....	51
3.3	Caracterizações dos materiais	52
3.3.1	Aglomerantes.....	52
3.3.2	Agregados.....	53
3.3.3	Aditivos	55
3.3.4	Água	55
3.4	Dosagem dos concretos	55
3.4.1	Moldagem e cura dos corpos-de-prova	57
3.5	Ensaio realizado	60
3.5.1	Resistência à compressão axial	60
3.5.2	Absorção de água por capilaridade	60
3.5.3	Resistividade elétrica aparente	61
4.	ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	65
4.1	Introdução	65
4.2	Análise dos resultados de resistência à compressão axial	65
4.3	Análise dos resultados de absorção capilar	71
4.4	Análise dos resultados de resistividade elétrica aparente	78
4.5	Análise dos resultados em igualdade de resistência mecânica	85
4.5.1	Avaliação da absorção capilar, estabelecendo níveis de resistência à compressão axial.	85
4.5.2	Avaliação da resistividade elétrica, estabelecendo níveis de resistência à compressão axial	90
5.	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
	REFERÊNCIAS	96

1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento populacional a demanda por produtos é cada vez maior acarretando no aumento de resíduos gerados. Caso esses resíduos não recebam um destino final adequado eles acabam se tornando um problema ambiental e a reutilização destes é o melhor destino final para um resíduo, pois ele retorna ao ciclo de produção.

A disposição final destes resíduos tem causado preocupação, pois vem desencadeando diversos problemas ambientais, como a poluição do solo, da água e do ar. Exemplo disso são os resíduos gerados nas áreas de saneamento básico, alimentação e processos industriais. Com isso, o setor da construção civil tem sido um dos mais abrangentes para a aplicação desses resíduos, pois possibilita a reintrodução dos rejeitos industriais na composição de argamassas e concretos.

Segundo Di Bernardo et al (2012), o número de Estações de Tratamento de Água (ETAs) em operação em 2008 era em torno de 6040, localizadas em 5564 municípios. Do total desses municípios 37,7% geravam lodo de ETA e cerca de 67,4% dispunham seus resíduos em rios, geralmente sem qualquer tipo de tratamento.

Segundo dados da Conab (2013), o Brasil, na safra de 2012/2013, produziu mais de 12 milhões de toneladas de arroz e para a próxima safra é esperado um aumento de 4% na produção brasileira de arroz para a safra de 2013/2014. Porém, para que este cereal sirva como alimento o mesmo necessita perder sua casca, a qual é considerada um resíduo. Este resíduo tem um grande poder calorífico e por combustão da casca do cereal, podem ser produzidos cerca de 40 kg de cinza por tonelada de arroz em casca (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

A produção mundial de ferro gusa e brasileira no ano de 2012 foi de 1,12 bilhões de toneladas e 32,4 milhões de toneladas, respectivamente (CGEE, 2014). Segundo Oliveira (2000), para a produção de uma tonelada de ferro gusa são produzidos 300 kg de escória granulada de alto-forno. Logo pode-se dizer, com base nesses dados, que mundialmente foram produzidos 336 milhões de toneladas de escória de alto forno, sendo que 9,7 milhões de toneladas são brasileiras.

Estudos feitos por diversos autores mostram a viabilidade ambiental e econômica do uso de subprodutos das agroindústrias e indústrias. Tais subprodutos como a cinza de casca de arroz (CCA), cinza de lodo de estação de tratamento de água (CLETA) e escória de alto forno (EAF), possibilitam a sua utilização no concreto, conferindo-lhe condições de durabilidade (HENGGEN, 2014; NEVILLE, 1997; SANTOS, 2006).

O aproveitamento de resíduos, aliado ao bom desempenho tecnológico de produtos, faz parte de ciclo ideal de produção, onde o descarte deve ser igual ou próximo de zero. Desta maneira, adições minerais podem e devem trazer benefícios ambientais, econômicos, estratégicos e, sobretudo, em muitos casos técnicos, conferindo condições de durabilidade ao concreto.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

A presente dissertação é parte integrante de um projeto maior e tem por objetivo investigar a utilização da cinza do lodo de ETA, como substituição parcial ao cimento Portland, em algumas características de durabilidade como a resistividade elétrica e a absorção capilar.

1.1.2 Objetivos específicos

Para atingir-se o objetivo principal foram levantadas as seguintes questões de pesquisa, mais específicas, conexas ao objetivo principal, que são:

a) Verificar se a substituição parcial do cimento por diferentes teores de cinza do lodo de ETA confere benefícios ao concreto no que diz respeito à resistividade elétrica e a absorção capilar.

b) Estudar como varia a resistividade elétrica e a absorção capilar com a elevação da relação a/ag e o tempo de cura.

c) Investigar o comportamento de misturas ternárias e quaternárias (cimento, CLETA e escória de alto forno e cimento, CLETA, cinza de casca de arroz e escória de alto forno) nas propriedades investigadas.

d) Analisar como se comporta a resistividade elétrica e a absorção capilar das misturas investigadas para um determinado nível de resistência à compressão especificada.

2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A seguinte Dissertação é organizada em 5 Capítulos contados a partir da Introdução.

No capítulo 1, Introdução, é apresentada uma parte introdutória, os objetivos que nortearam esta pesquisa, apresentando a importância do uso destes materiais alternativos na substituição do cimento nas estruturas de concreto. 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 das armaduras 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, resistividade elétrica aparente e resistência à compressão axial. Generalidades sobre a cinza de lodo de estação de tratamento de água, cinza de casca de arroz e escória de alto forno 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.

3. REVISÃO DE LITERATURA

Em função dos crescentes problemas de degradação precoce observados nas estruturas, das novas necessidades competitivas e das exigências de sustentabilidade no setor da Construção Civil, observa-se, nas últimas duas décadas, uma tendência mundial no sentido de privilegiar os aspectos de projeto voltados à durabilidade e à extensão da vida útil das estruturas de concreto armado e protendido (CLIFTON, 1993).

A resistência da estrutura de concreto à ação do meio ambiente e ao uso dependerá, no entanto, da resistência do *concreto*, da resistência da *armadura*, e da resistência da *própria estrutura*. Qualquer um que se deteriore, comprometerá a estrutura como um todo (MEDEIROS et al, 2011).

Uma vez destruída a camada passivadora do concreto, o processo corrosivo será controlado pela resistividade elétrica e pela disponibilidade de oxigênio. As propriedades elétricas do concreto são dependentes de diversos fatores, tais como: composição química do cimento; adições minerais; relação água/aglomerante (a/ag); consumo de cimento no concreto, dentre outras (WHITING; NAGI, 2003; PRESUEL-MORENO et al, 2013; MEDEIROS-JUNIOR, 2014). 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 permeabilidades 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, adições minerais, resistividade elétrica aparente, absorção de água por capilaridade e a resistência à compressão axial.

3.1 Corrosão das armaduras

3.1.1 Considerações iniciais

A degradação do concreto pode ocorrer por várias causas, tais como: problemas no projeto; ação do ambiente sobre a estrutura; execução da estrutura mal realizada; ações mecânicas imprevistas; exposição do material às altas temperaturas; entre outras. Porém, as maiores causas da perda da degradação do concreto armado estão relacionadas com a corrosão das armaduras.

A corrosão das armaduras é um processo físico-químico gerador de óxidos e hidróxidos de ferro, que ocupam um volume significativamente maior que o volume original das barras metálicas. Conforme Gentil (1996), o mecanismo de corrosão nos metais pode ocorrer de duas formas. A primeira é puramente química, chamada de oxidação. Esta ocorre por uma reação gás/sólido na superfície do material, e é caracterizada pela formação de um filme delgado de produtos de corrosão na superfície do metal. A segunda forma de corrosão é chamada de corrosão eletroquímica, a qual é observada nas estruturas de concreto armado. Em ambas as formas de corrosão, podem vir a ocorrer lascamento do revestimento da armadura os quais levam a uma perda de seção transversal e de aderência entre a armadura e o concreto, inabilitando a transferência de tensões entre os materiais, podendo levar o elemento estrutural ao colapso. (TUUTTI, 1982, 2001; HELENE, 1993; MEHTA e MONEITRO, 1994; GONZÁLEZ et al., 1996; CASTRO et al., 1998; AİTCIN, 2000).

O concreto por ser um material de alta alcalinidade acaba por proteger a armadura do processo de corrosão. A alta alcalinidade do concreto acaba formando uma camada de óxidos submicroscópica passivante, compacta e aderente sobre a superfície da armadura onde esta camada faz sua função de proteção desde que as condições de potencial e pH mantenham-se estáveis.

Conforme a Figura 1, a corrosão pode ser generalizada (por carbonatação), localizada por pites (cloretos) ou localizada sob tensão fraturante (sem causa identificada, geralmente encontrada em concretos protendidos).

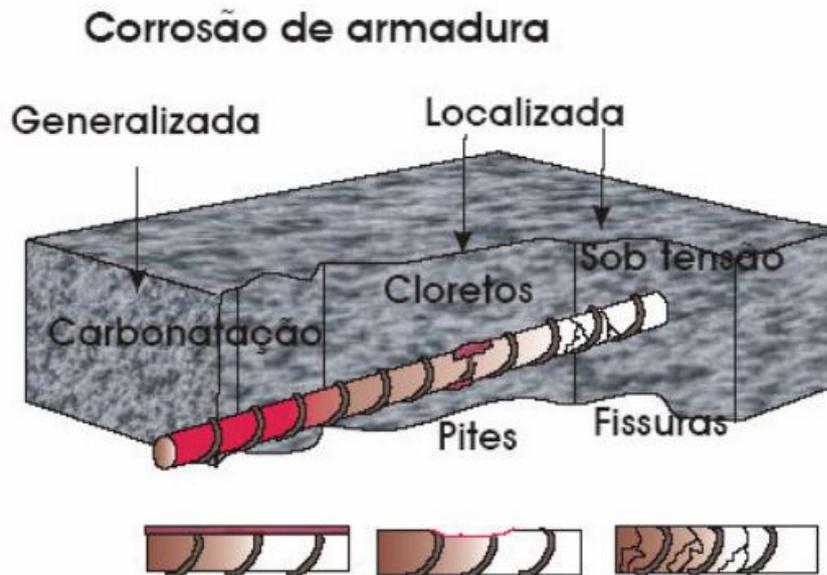


Figura 1 - Tipos de corrosão e fatores determinantes do processo (CASCUDO, 1997, p. 19).

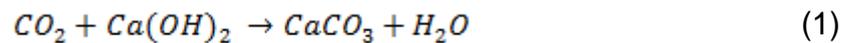
Para a ocorrência de corrosão, é necessária:

- 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 do óxido/hidróxido de ferro, assim como eletrólito e presença de $\text{Ca}(\text{OH})_2$;
- a possibilidade de haver agentes agressivos (íons sulfetos, cloretos, dióxido de carbono, gás sulfídrico, óxidos de enxofre, nitritos entre outros);
- a existência de uma diferença de potencial, que pode ser provocada por presença de umidade, concentração de sais ou tensões no concreto ou na armadura.

Segundo Cascudo (1997), não há corrosão em concreto seco, assim como, não há corrosão de concreto completamente imerso, sendo a umidade relativa ótima para a corrosão entre 70% e 80%.

3.1.2 Corrosão por carbonatação

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 et al, 1993). Ao reagir com a água contida no concreto, o CO_2 acaba formando o ácido carbônico que interagem com o Ca(OH)_2 , produzindo carbonato de cálcio (CaCO_3), o qual diminui o pH da solução aquosa. Esta redução do pH foi observada por Andrade (1988) e Carvajal et al. (2005), os quais obtiveram valores próximos a 9, reduzindo assim as condições de estabilidade química da película passivadora que envolve a armadura. Logo a reação de carbonatação, pode ser resumida pela equação 1:



A carbonatação ocorre na face externa da peça e vai migrando para o interior, conforme Figura 2. Este fenômeno é conhecido como frente de carbonatação e a rapidez desse processo está ligada basicamente a relação a/ag, ao tipo e consumo de cimento, a porosidade, a umidade relativa do ambiente e as concentrações de CO_2 do ambiente. (CASCUDO & CARESEK, 2011)

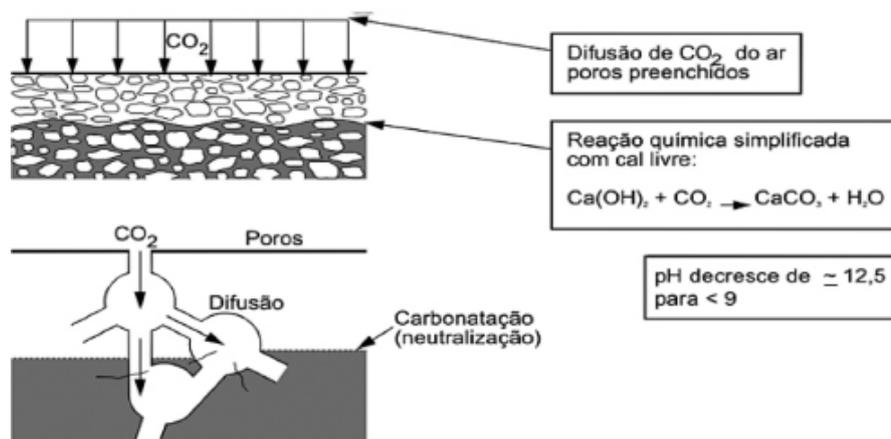


Figura 2 - Representação esquemática de Bakker adaptada. (CASCUDO & CARESEK, 2011).

Um fato salientado por Bertolini (2010) é que a carbonatação pode influenciar a liberação de cloretos fixados na pasta de cimento, aumentando a probabilidade de iniciação do processo corrosivo. 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).

Segundo Neville (1997), a lixiviação ou o uso de pozolanas, pode acarretar no esgotamento do Ca(OH)_2 , iniciando a carbonatação do C-S-H (silicato de cálcio hidratado), o que acarretaria prejuízos à integridade do concreto.

Para V. Baroghel-Bouny et al. (2014), após carbonatação acelerada, a porosidade do concreto diminui. Tal fato ocorre devido os volumes molares dos produtos de reação de carbonatação serem superiores aos dos produtos hidratados a partir dos quais eles se formam. A distribuição dos volumes de poros também é modificada pela carbonatação, isso se correlaciona com a diminuição global da porosidade e da permeabilidade observada após a carbonatação. Entretanto, nota-se que concretos produzidos com cimentos contendo escória de alto forno têm suas características mecânicas prejudicadas após a carbonatação, em razão do aumento da porosidade neste caso particular.

V. Baroghel-Bouny et al. (2014) mencionam, também, que a cura inadequada conduz, por falta de água, a uma hidratação insuficiente da camada superficial de concreto, o que aumenta a porosidade e, conseqüentemente, a sensibilidade dessa camada à carbonatação. Com isso, a redução do tempo de cura pode, ter conseqüências bastante negativas em longo prazo, ao passo que uma cura úmida prolongada limita a profundidade de carbonatação.

3.1.3 Corrosão por cloretos

Dentre os possíveis problemas que podem ocorrer em uma estrutura, a corrosão das armaduras provocada pela ação dos íons cloretos é um dos problemas mais sérios (NEVILLE, 1997). Os íons cloreto podem penetrar no interior do concreto através do emprego de aceleradores de pega que contém CaCl_2 (cloreto de cálcio), contaminação dos materiais constituintes do concreto (água e agregados),

contaminação através da maresia, contato direto com a água do mar e através de determinados processos industriais (HELENE, 1993; HUSSAIN et al, 1995).

Em relação à incorporação de adições minerais nos cimentos, podem-se destacar três consequências relativas à penetração dos cloretos. Primeiramente, a capacidade de fixação dos cloretos é determinada pela concentração de ($C_3A + C_4AF$) do ligante. Segundamente, as adições minerais reduzem o pH da solução intersticial. Essa redução leva a admitir uma concentração limite de cloretos mais baixa, em termos da relação característica Cl^-/OH^- . Por fim, o coeficiente de difusão aparente dos cloretos é dependente das adições minerais (V. BAROGHEL-BOUNY et al, 2014).

A corrosão por pites (cavidades) acontece quando há um rompimento do filme de passividade em um determinado ponto do material passivo. Esta corrosão induzida por cloretos é localizada em um pequeno ânodo, escarificando o aço. Para Bertolini (2010), 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 o aumento no tempo de permanência em contato com o ambiente agressivo.

Para alguns autores como Zarzar Júnior, Oliveira e Bittencourt (2011), conforme a redução da relação a/ag há um aumento no tempo inicial de corrosão por íons cloretos e na vida útil em serviço. Porém, para Miyazato e Otsuki (2010) se o concreto localizar-se em ambientes que contenham íons cloretos e que sejam submetidos a repetidos ciclos seco/úmido, uma baixa relação a/ag não é o suficiente para garantir uma baixa relação de corrosão por cloretos.

3.1.4 Corrosão sob tensão

Outro fator de influência na iniciação da corrosão é a fissuração do concreto. Tais fissuras são um caminho rápido para a penetração dos agentes agressivos até a armadura e facilitam o acesso do oxigênio e da umidade. Esta fissura 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.

De acordo com o tipo de fissuração, as propriedades de transporte e o desenvolvimento da corrosão são modificados de forma diferente. Uma fissuração de origem mecânica acelera a penetração dos agentes agressivos ao nível da fissura em si (abertura e profundidade) e também em zonas vizinhas a essa fissura (devido à microfissuração em torno dela). Logo, o período de incubação diminui, em virtude de processos mais rápidos da carbonatação e da penetração de cloretos (V. BAROGHEL-BOUNY et al, 2014).

3.2 Adições minerais

As adições minerais são classificadas como pozolâncias e/ou cimentantes e são misturadas ao clínquer para a produção dos mais diversos tipos de cimento. Segundo a ABNT NBR 12653:2014, as pozolanas caracterizam-se por ser um material silicoso ou sílico-aluminoso, que possuem pouco ou nenhum poder cimentante, mas quando finamente divididos e em presença de umidade, reagem quimicamente com hidróxidos de cálcio e em temperaturas normais formam compostos que possuem propriedades cimentantes. A ABNT NBR 12653:2014 e Massazza (1993) classificam os materiais pozolânicos em pozolanas naturais e pozolanas artificiais. As pozolanas naturais são derivados de rochas ou minerais vulcânicos e terras diatomáceas e as pozolanas artificiais são subprodutos industriais como as cinzas volante, sílica ativa, cinza de casca de arroz, argilas calcinadas ou termicamente ativadas.

Mehta e Monteiro (1994) classificam as adições minerais para concreto como cimentantes e pozolânicas, pozolanas altamente reativas, pozolanas comuns e pozolanas pouco reativas.

3.2.1 Cinza de lodo de estação de tratamento de água

A água é um elemento essencial à vida. Assim, o acesso a água de boa qualidade e em quantidade adequada está diretamente ligado à saúde da população, contribuindo para reduzir a ocorrência de diversas doenças, (PNSB – IBGE-2010).

Para que a água seja de boa qualidade, as Estações de Tratamento de Água (ETAs) são indispensáveis. Tais ETAs utilizam processos como coagulação, floculação, decantação e filtração, que formam resíduos que serão removidos, principalmente, nos decantadores, denominados lodo de ETA (TSUTIYA; HIRATA, 2001).

Segundo a ABNT NBR 10004 (2004), o lodo de ETA é classificado como resíduo sólido, e também como Resíduo Classe II A – não inertes, devendo ser tratados e dispostos de acordo com os critérios desta norma.

Segundo Richter (2001), os principais componentes do cimento Portland, CaO , SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , também são encontrados nos lodos de ETAs, logo os lodos de ETAs podem substituir em certas proporções, as matérias-primas normalmente utilizadas. Batalha e Rocha (2013), após calcinação do lodo de ETA a 650°C , encontraram através de análise química Al_2O_3 , SiO_2 e Fe_2O_3 , nas quantidades 54,9%, 27,5% e 12,3%, respectivamente. Indicando ser possível a substituição de parte do cimento em produtos de argamassa por lodo calcinado.

Ao avaliar concretos com percentuais de 3%, 5% e 7% de lodo de ETA em relação ao peso do agregado miúdo, Batalha et al. (2009), obteve resistências a compressão axial de 27,51 MPa, 26,82 MPa e 30,95 MPa, respectivamente.

Logo, o emprego de Cinza de Lodo de Estação de Tratamento de Água (CLETA) em concretos tem sido justificado pelos benefícios ambientais da utilização deste resíduo, embora este tipo de cinza modificar a coloração do concreto dando um tom ocre ao concreto.

3.2.1.1 Características da cinza de lodo de estação de tratamento de água

Visando a reutilização do resíduo gerado pelas ETAs, Batalha e Rocha (2013), através de difração de raios X encontraram mineral argiloso, metacaulinita e quartzo. Pela análise de termogravimetria (TG), ocorreu perda de massa de 9,3% e na análise termogravimétrica diferencial (DTG) com temperatura de 800,82 °C ocorreu a quebra da metacaulinita pela formação da mulita primária. Logo os autores concluíram que os componentes do lodo calcinado a 650°C fazem parte da composição do cimento Portland.

Contudo Batalha e Rocha (2014) classificaram a CLETA como material de enchimento (filer) segundo a ABNT NBR 12653 (2014). Com os estudos feitos em argamassa os mesmos afirmam que o uso da CLETA é viável tecnicamente pois a resistências à compressão das argamassas com teor de 5% e 15% de cinza, substituindo o cimento, apresentaram, aos 28 dias, resultados estatisticamente iguais em comparação à argamassa de referência, sem adição de CLETA. O ensaio de porosimetria mostrou que a cinza além de proporcionar redução no consumo de cimento na mistura, atuou no refinamento da estrutura de poros da argamassa, reduzindo 15,64% os macroporos e aumentando em 4% os mesoporos em relação à argamassa de referência, quando empregada 5% de CLETA. No ensaio de absorção por capilaridade, as argamassas apresentaram taxas menores em relação à argamassa de referência, comprovando o efeito fíler da CLETA na matriz.

Hengen (2014), a partir do método Chapelle modificado e do índice de desempenho com cimento Portland constatou que a melhor temperatura de queima do lodo de ETA é de 600°C por 1 hora, seguido de duas horas de moagem em moinho de bolas de aço. Nos valores de resistência à compressão axial quando comparado ao concreto de referência, sem adição de CLETA, aos 7 e 28 dias de idade, obteve acréscimos de resistência que variaram de 3% a 30%, conforme a relação a/ag e o teor de substituição. Com isso, a mesma concluiu que o uso de CLETA proporciona vantagem econômica quanto substituída em parte pelo cimento Portland.

3.2.2 Escória de alto forno

A escória de alto forno é um resíduo siderúrgico não-metálico proveniente das indústrias de ferro, produzido durante a fabricação do ferro gusa em alto-forno, onde a fusão da ganga (minério de ferro+impurezas) e dos fundentes (calcário e dolomita) geram por meio de reações químicas a escória. Pela ABNT NBR 5735:1991, a escória granulada de alto-forno é definida como subproduto do tratamento do minério de ferro em alto-forno, obtido sob forma granulada por resfriamento brusco, constituído em sua maior parte de silicatos e aluminosilicatos de cálcio.

Segundo Jacomino et al (2002), para que a escória possua atividade hidráulica, ela deve apresenta-se no estado amorfo. Esta disposição química é obtida por um resfriamento rápido, na qual a escória líquida a 1500°C atinge a temperatura de 200°C evitando associações dos átomos segundo as próprias afinidades. Tal resfriamento é denominado de granulação conforme Figura 3, onde a escória em fusão cai sobre uma roda dentada que projeta pequenos grãos, resfriada através de jato d'água.

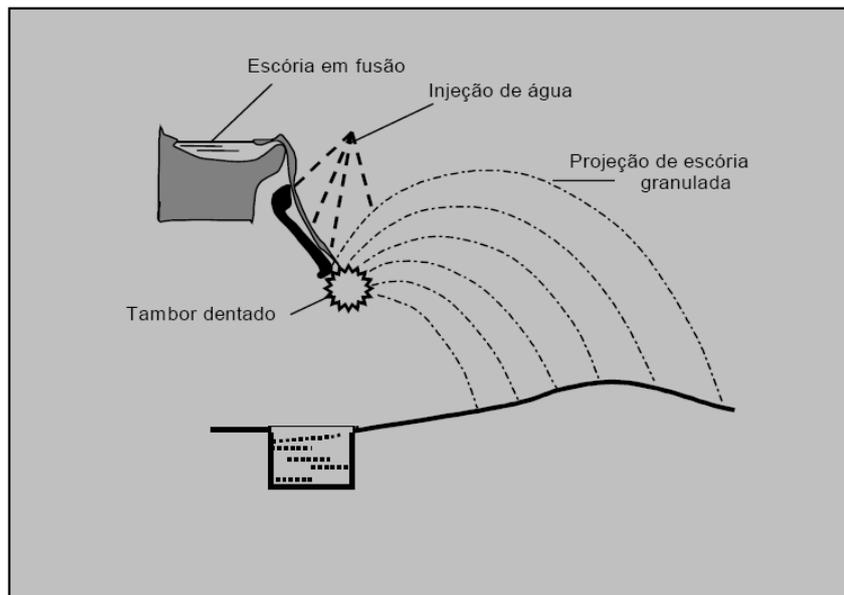


Figura 3 - Granulação da escória (JACOMINO et al., 2002)

Para que a escória de alto-forno seja utilizada como adição mineral no cimento, ela necessita passar por processo de secagem e após ser moída até se

atingir um nível desejável de tamanho das partículas ou de área superficial. Após estes processos a mesma pode ser utilizada como adição ou substituto parcial do cimento Portland, dando origem aos cimentos já conhecidos como cimento Portland de alto-forno (CP III) e cimento Portland composto de escória (CP II E).

3.2.2.1 Características da escória de alto forno

A escória de alto forno, diferentemente das pozolanas, após finamente moída tem propriedades auto-cimentantes, ou seja, não necessita de hidróxido de cálcio para formar produtos cimentantes com o C-S-H. Porém quando hidratada ela não produz a quantidade suficiente de produtos cimentantes para a aplicação do material com fins estruturais, sendo necessária a combinação com o cimento Portland para que sua hidratação seja acelerada pela presença do hidróxido de cálcio e gipsita, presentes no cimento, podendo assim ser utilizada para fins estruturais (FONSECA, 2010).

Alguns fatores que afetam a hidráulica das escórias de alto forno são o grau de vitrificação, composição química, composição mineralógica e finura (FONSECA, 2010). Mineralogicamente, quase 70% da escória é vidro, sendo o restante composto por minerais como merrwinita (C_3MS_2), hematite (C_2MS_2) e quartzo (SiO_2) (COSTA, 2001).

Segundo V. Baroghel-Bouny et al. (2014), a hidratação da escória de alto forno, não leva à formação de portlandita. Então, espera-se uma leve diminuição do pH do líquido intersticial, sabendo-se, no entanto, que são os álcalis que se tornam preponderantes depois de algumas horas.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), as partículas de escória menores que 10 μm contribuem para a resistência inicial do concreto, até 28 dias. Já as partículas de 10 μm a 45 μm contribuem para a resistência das idades mais avançadas e partículas maiores que 45 μm são de difícil hidratação.

Costa (2001) utilizou três diferentes finuras Blaine, 300m²/kg, 500m²/kg e 700m²/kg, em percentagens de substituição em massa de cimento de 35% e 70%. Constatou que o aumento na finura da escória aumentou a resistência à compressão e aumentou a penetração total de cloretos, enquanto que o aumento no teor de

substituição resultou em redução da resistência à compressão, na penetração de cloretos e na condutividade elétrica.

Rosa (2005) utilizou substituições de 50% e 70% de escória de alto forno em relação ao cimento e constatou um aumento na resistividade elétrica do concreto com o aumento no grau de hidratação e do teor de escória. Logo, concluiu que este comportamento está relacionado à menor condutividade elétrica específica da solução dos poros e ao refinamento dos poros comprovado pela boa correlação entre esses dois fatores.

Mizumoto e Salles (2012) ao utilizar escória de alto forno com finuras Blaine de 2410 cm²/g, 3389 cm²/g, 4306 cm²/g e 5374 cm²/g concluíram que o teor mínimo de 40% de adição é capaz de inibir a reação álcali-agregado. Em seus estudos obtiveram melhor viabilidade de utilização na escória com finura Blaine de 4306 cm²/g, em virtude do tempo de moagem e desempenho atingido nos testes.

2.4.3 Cinza de casca de arroz

O arroz é um dos alimentos mais consumidos em quase todo o mundo e com o passar dos anos sua demanda é cada vez maior. Porém, este aumento de produção acaba gerando problemas com a produção de resíduos, no caso a casca de arroz. A casca de arroz é um resíduo agroindustrial e devido ao seu alto poder calorífico, constitui uma fonte alternativa para a produção de energia. Após a queima da casca de arroz origina-se a Cinza da Casca de Arroz (CCA) que é estudada por vários autores como adição mineral em cimentos.

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 de 1980, 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.

2.4.3.1 Características da cinza de casca de arroz

Tendo em vista a sustentabilidade, o aproveitamento de subprodutos de processos industriais e agroindustriais, a redução na emissão de poluentes na atmosfera e aliar o desempenho tecnológico ao concreto. A utilização de adições minerais ao concreto, como a cinza de casca de arroz é de grande valia.

De acordo com as pesquisas realizadas, o emprego da CCA tende a promover melhorias nas propriedades mecânicas e na durabilidade de concretos, além de reduzir a temperatura de hidratação (CORDEIRO et al., 2009). Essas melhoras se devem ao fato de que são formados produtos cimentantes caracterizados com o gel do tipo C-S-H e pela liberação de aproximadamente 20% de hidróxido de cálcio que acabam por reagir com a pozolana para formar novos produtos cimentantes, diferenciados apenas pela relação Si/Ca (TASHIMA et al., 2011), tendo como resultado a produção de fases químicas com maior estabilidade e poder aglomerante.

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) 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.

A formação de silicato de cálcio hidratado gel ao redor das partículas de cimento, a alta densidade e menor porosidade são fatores analisados por Bakar, Putrajaya e Abdulaziz (2010) e que devido à adição de CCA acabam por contribuir para o aumento da resistência nas idades iniciais.

Porém para que a adição em questão apresente uma alta reatividade, é necessário principalmente que a CCA tenha uma elevada finura, grandes quantidades de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ em sua composição, e uma mineralogia amorfa

(TASHIMA et al., 2011), sendo estas características determinadas por fatores associados à queima da casca de arroz, como a temperatura, taxa de aquecimento, tempo de exposição e ambiente, que definem também a quantidade de impurezas na pozolana (CORDEIRO et al., 2009). Logo quando se fala em temperatura ideal de queima da CCA há um consenso entre 600°C a 700°C, pois a mesma é discutida por Boateng e Skeete (1990), Isaia (1995), Ferreira (1996), Prudêncio, Santos e Dafico (2003), Zain et al. (2011) entre outros.

Todavia, um fator importante observado no acréscimo de resistência a compressão do concreto são as diferentes porcentagens utilizadas de CCA em substituição ao cimento. 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.

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.

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.

Mostardeiro Neto (2011) comparou dois tipos de CCA, um com alto teor de carbono grafítico (CCAE) e outro com baixo teor de carbono grafítico (CCAC) e observou que ao substituir 10%, 20% e 30% de cimento por CCA, obteve, de modo geral, acréscimo na resistência à compressão, redução na absorção de água por capilaridade e contribuição da CCAC quanto à resistividade elétrica aparente.

Sokolovicz et al (2014) analisaram a microestrutura e propriedades mecânicas de concretos estruturais, com substituição parcial de cimento por CCA residual e natural, sem beneficiamento prévio, nos teores de 0%, 15% e 25% até 540 dias. Os resultados demonstraram que a resistência à compressão axial aos 540 dias atingiu os maiores valores para as misturas com CCA residual. As maiores quantidades de poros de gel e mesoporos foram encontradas nas misturas com CCA moída, onde observou o refinamento dos poros dos 91 dias para os 540 dias, reduzindo assim a

porosidade destas misturas. Os resultados mostram a viabilidade técnica da CCA natural nos teores de 15% de substituição ao cimento.

3.3 Resistividade elétrica aparente do concreto

3.3.1 Considerações iniciais

A resistividade elétrica é uma importante propriedade do concreto que caracteriza a sua capacidade de resistir à passagem da corrente elétrica. Esta propriedade é fundamentalmente relacionada à permeabilidade de fluidos e à difusividade de íons através dos poros do material e, no caso do concreto, está intimamente relacionada à velocidade do processo de corrosão das armaduras sendo assim, interferindo diretamente na durabilidade de estruturas de concreto armado (RIBEIRO, 2014). Usualmente sua unidade de medida é o Ohm x metro ($\Omega.m$).

Esbach (1975 apud WHITING & NAGI, 2003), define-a como a resistência elétrica de um condutor de volume unitário e seção transversal constante no qual a corrente é uniforme e continuamente distribuída, ou seja, é a resistência elétrica entre faces opostas de um volume unitário de material.

3.3.2 Fatores que influenciam na resistividade elétrica

A resistividade elétrica no concreto é uma propriedade sensível às características do mesmo, sejam elas físicas ou químicas. O concreto pode ser considerado como um sistema compósito, com vários tamanhos de agregados e partículas dispersas em uma matriz de pasta de cimento. A resistividade do compósito dependerá da resistividade das partículas, da resistividade da matriz e do volume relativo dos dois materiais (MONFORE, 1968).

A resistividade elétrica do concreto é relacionada com a microestrutura da matriz de cimento, bem como com o arranjo e a distribuição do tamanho dos poros. De acordo com Hunkeler (1996) e Bürchler et al. (1996), esse parâmetro também relaciona a concentração de íons e a sua mobilidade na solução dos poros.

Diversos fatores podem alterar a resistividade elétrica do concreto, tais como: composição química do cimento; adições minerais; relação a/c; consumo de cimento no concreto; dentre outras (WHITING e NAGI, 2003; PRESUEL-MORENO et al, 2013; MEDEIROS JUNIOR, 2014).

A relação a/ag desempenha um papel fundamental nas características físicas do concreto. Influi na permeabilidade e capacidade de absorção de água pelo concreto (HELENE, 1986 apud ABREU 1998). Quanto maior a relação a/ag, maior será a porosidade e permeabilidade de um concreto e menor será sua resistividade elétrica.

Segundo Laksminarayanan *et al.* (1992), a variação do valor de resistividade no concreto com o tempo está relacionada com a hidratação da pasta de cimento e é um indicativo da taxa na qual as relações químicas ocorrem dentro da pasta.

3.3.3 Efeitos das adições minerais na resistividade elétrica do concreto

Uma das formas de obtenção de cimentos diferenciados é através das adições minerais, que misturadas ao clínquer por ocasião da fabricação do cimento ou por ocasião da execução do concreto, contribuem para as alterações de propriedade químicas e físicas do concreto. Outra forma de obtenção de cimentos diferenciados seria através da alteração dos teores dos seus compostos principais (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

O uso de adições minerais no concreto comumente traz consigo uma redução do tamanho dos poros do material, apresentando uma importante influência na resistividade elétrica. Logo os resultados dependem de algumas variáveis, como o teor, a granulometria e a composição química das adições minerais utilizadas.

Rosa (2005) investigou misturas com 50% e 70% de EAF em substituição parcial ao cimento de referência, sem adição mineral, nas idades de 3, 7, 28, 56 e 91 dias de cura. A partir de 28 dias, todas as misturas com 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).

Já Hoppe (2005) e Mostardeiro Neto (2011), observaram o comportamento da REA de concretos contendo CCA, nas relações a/ag de 0,35, 0,50 e 0,65. As porcentagens de substituição foram as mesmas, 10, 20 e 30%. Porém Hoppe (2005) ainda fez substituições com 50% de EAF e 35% de cinza volante (CV). Já Mostardeiro Neto (2011) utilizou dois tipos de CCA, uma clara e outra escura sendo diferenciadas no teor de carbono grafítico e ambos utilizaram um concreto sem adições minerais como referência. Hoppe (2005) obteve melhor desempenho para as misturas com EAF e CV em relação ao concreto referência, no mesmo período de cura. Em relação a CCA, ambos obtiveram os melhores valores com 30% de CCA, porém Mostardeiro Neto (2011) obteve seus melhores valores com a CCA clara.

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 constatou um melhor desempenho nos valores da REA em relação à mistura referência, sem EAF. O aumento no teor de escória também elevou a REA estudada.

Gastaldini et al. (2009), utilizaram misturas com CCA, CV e EAF, em diferentes teores e relações a/ag. Estes observaram uma relação entre a REA e o teor de adições minerais, onde conforme o aumento do teor de adições minerais, maior era o valor de REA, porém estes resultados só foram observados a partir dos 14 dias de cura, devido às alterações na microestrutura do material.

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

A relação entre os valores de resistividade elétrica do concreto e o risco de corrosão das armaduras é estudada por vários autores. Porém o *Comité Euro-International Du Béton* (CEB 192), atualmente *Fédération Internationale Du Béton* (FIB), apresenta critérios de avaliação da resistividade, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Critérios de avaliação da resistividade elétrica – CEB 192 (1989).

Resistividade do concreto (Ω.cm)	Indicação de probabilidade de corrosão
< 5000	Muito Alta
5000 a 10000	Alta
10000 a 20000	Baixa
> 20000	Desprezível

Andrade (2004) apresenta valores para a resistividade do concreto e atesta sobre o risco de corrosão, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Valores indicativos de resistividade e riscos associados (Andrade, 2004).

Resistividade do concreto ($k\Omega$.cm)	Risco de corrosão
> 100	Desprezível
50 a 100	Baixo
10 a 50	Moderado
< 10	Forte

3.3.5 Medidas de resistividade elétrica

3.3.5.1 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, onde r é

a resistividade elétrica em Ohm.m, R a resistência em Ohm e D o diâmetro do disco metálico em metros.

$$r = 2 \cdot R \cdot D \quad (2)$$

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.

3.3.5.2 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. Este método apresenta algumas desvantagens, pois 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.

3.3.5.3 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 ABNT NBR 7117:2012 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 4 apresenta um esquema do ensaio de resistividade elétrica do concreto.

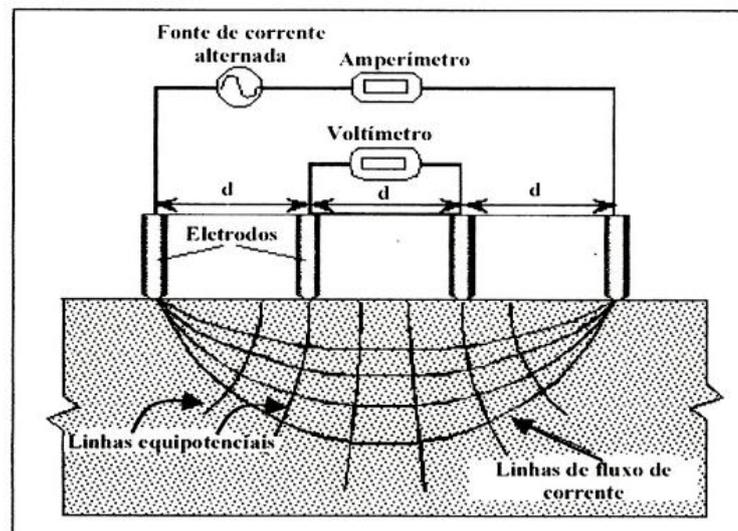


Figura 4 - Método dos quatro eletrodos para medir a resistividade elétrica do concreto (CARINO, 1988 apud HOPPE, 2005, p. 64).

A equação 3 a seguir, adaptada por Medeiros Filho (1979), foi proposta para medir a resistividade elétrica pelo método dos quatro eletrodos.

$$\rho = (4 \cdot \pi \cdot d \cdot V) / i \cdot \{ 1 + [2 \cdot d / \sqrt{(d^2 + 4 \cdot b^2)}] - [d / \sqrt{(d^2 + b^2)}] \} \quad (3)$$

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 ponta do eletrodo. Também evita a influência do agregado, quando o espaço no interior dos eletrodos internos excede ao tamanho da largura 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.

Outros fatores intervenientes na utilização do método dos quatro eletrodos são os efeitos devidos à polarização, problemas de contato, efeito da intensidade de corrente, da frequência e o efeito de camadas superficiais sobre a resistividade. Todos estes fatores foram estudados por Monfore (1968), Ewins (1990), Millard et al (1989), entre outros autores.

3.3.5.4 Método da resistividade elétrica volumétrica

O método da resistividade elétrica volumétrica é descrito na ABNT NBR 9204:2012, conforme Figura 5. Para este método, utilizam-se corpos-de-prova cilíndricos, de dimensões 15 x 15 cm, extraídos de estruturas ou moldados de

acordo com a ABNT NBR 5738:2003. Segundo Palermo (1982 apud ABREU 1998), a colocação do terceiro eletrodo serve para eliminar erros causados por efeitos de superfície.

Durante a execução deste ensaio, a umidade de cada corpo-de-prova é monitorada. São feitas medidas de 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 equação 4:

$$\rho_v = \frac{V \cdot A}{i \cdot h} \quad (4)$$

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 = área do eletrodo principal o 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.

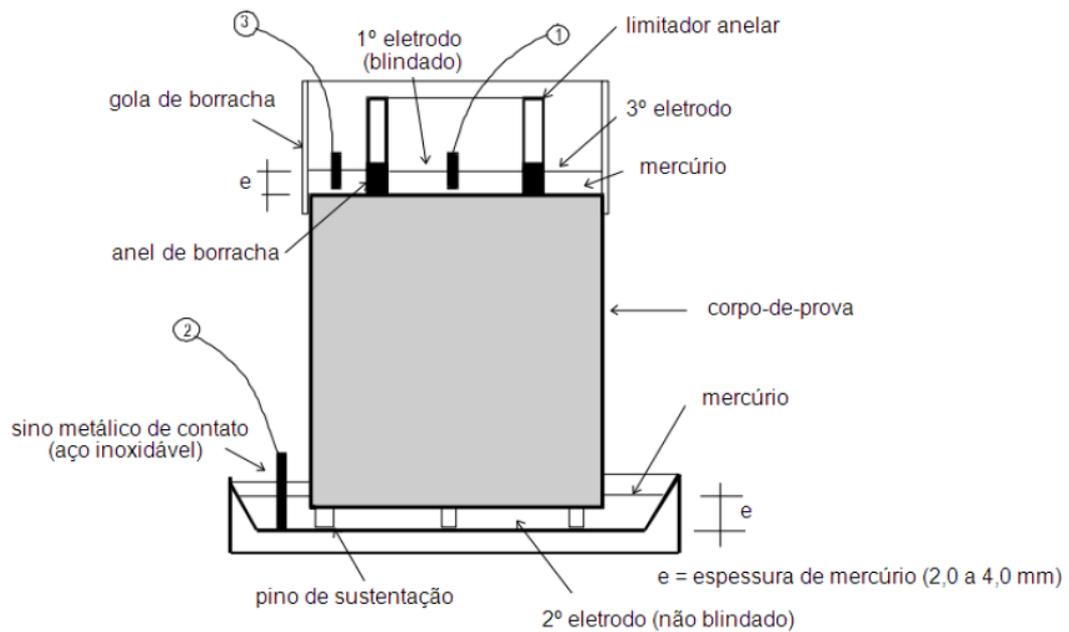


Figura 5 - Esquema de montagem do corpo-de-prova para o ensaio de resistividade elétrica volumétrica, segundo ABNT NBR 9204:2012.

3.4 Absorção capilar do concreto

3.4.1 Considerações iniciais

O concreto apresenta poros de diferentes tipos e tamanhos, distribuídos aleatoriamente na microestrutura. Esta porosidade tem implicação nas propriedades mecânicas e possibilita o ingresso de fluidos capazes de provocar a degradação do concreto e da armadura. Logo a facilidade que um fluido tem em penetrar e se deslocar no interior do concreto influi na sua durabilidade.

A absorção capilar é definida como o fluxo de um fluido devido a um gradiente de umidade, ocorrendo quando a entrada de líquidos no concreto acontece devido à tensão superficial atuante nos poros. Porém, segundo Helene (1993), necessita que os poros do material estejam secos ou parcialmente secos para que ocorra.

3.4.2 Fatores que influenciam na absorção capilar

Segundo Neville (1997), este mecanismo é influenciado pelas características do líquido (viscosidade, densidade e tensão superficial), pelas características dos sólidos (estrutura dos poros – raio, tortuosidade e continuidade dos capilares), pela energia superficial e teor de umidade. A estrutura, tamanho e interconexão de poros são determinantes nos mecanismos da absorção capilar. 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).

Outro fator de grande importância é a saturação dos poros. Segundo Helene (1993), não pode haver absorção capilar em concretos saturados, sendo importante verificar o grau de saturação do concreto. Porém o fenômeno da absorção capilar pode ser controlado 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.

3.4.3 Efeitos das adições minerais na absorção capilar do concreto

O uso de adições minerais no concreto tem uma grande influência na absorção capilar, pois reduzem significativamente sua porosidade e absorção capilar. Mehta e Aïtcin (1990) 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.

Segundo Isaia (1995), a contribuição para a redução da absorção de água pelo concreto proporcionada pelo uso de adições minerais é muito mais relevante do que um eventual aumento de resistência obtido. Altos teores de cinza volante reduziram muito a absorção de água, mas decresceram até 20% a resistência à compressão do concreto. Em um estudo mais recente, Isaia e Gastaldini (2005)

salientaram que as adições mineiras resultam em refinamento dos poros do concreto, com desconexão de poros capilares e redução da permeabilidade do material.

Lopes et al. (1999), realizaram pesquisas com concretos com a mesma relação a/ag e mesma resistência à compressão, porém ao comparar um concreto sem adições minerais e um com 8% de sílica ativa, observou que o concreto com sílica ativa teve sua absorção capilar reduzida quase que pela metade.

Regattueri et al. (1996) observaram que a absorção capilar para concretos com 10% de sílica ativa, aos 63 dias de idade, pode reduzir até 40% em relação a concretos sem adição, dependendo do fator a/ag.

Bakar, Putrajaya e Abdulaziz (2010), analisaram o efeito de “empacotamento” no emprego de cinza de casca de arroz no concreto e viram que esta substituição reduziu o volume dos poros do material e a absorção capilar.

Ao substituir parte do cimento por escória de alto forno, Barin (2008) e Veiga et al. (2008), observaram que a absorção capilar diminui com a redução da relação a/ag e aumento no teor de adição de escória, consequência do refinamento dos poros.

Batalha e Rocha (2014) analisaram o uso de cinza de lodo de estação de tratamento de água em argamassas e concluíram que em substituições de 10 e 15% ocorreu uma redução significativa nos valores de absorção capilar em relação à argamassa de referência.

Sendo assim, pode-se dizer que o incremento de adições minerais provoca alterações na estrutura dos poros e porosidade da pasta, podendo tornar o concreto menos suscetível à percolação de agentes agressivos em seu interior. Porém o tipo e teor de adição mineral devem ser cuidadosamente estudados devido as suas diferentes características em relação ao cimento.

3.4.4 Medidas de absorção capilar

3.4.4.1 Determinação da absorção capilar pelo método da ABNT NBR 9779:2012

A absorção capilar é medida através da diferença de massa de corpos-de-prova (cp's) cilíndricos, submetidos a um nível de água de 5 ± 1 mm acima de sua face inferior, no qual os cp's são pesados num período de 3 horas, 6 horas, 24 horas, 48 horas e 72 horas em relação à sua massa inicial, de acordo com a ABNT NBR 9779:2012, 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, logo é feita a leitura do nível de ascensão capilar, em cm. A absorção de água por capilaridade é calculada de acordo com a equação 5 e sua unidade é dada em g/cm^2 .

$$C = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{S} \quad (5)$$

Onde:

C - absorção de água por capilaridade, expressa em gramas por centímetro quadrado (g/cm^2);

m_{sat} - massa saturada do corpo de prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante um período de tempo especificado, expressa em gramas (g);

m_s - massa do corpo de prova seco, assim que este atingir a temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$, expressa em gramas (g);

S - área da seção transversal, expressa em centímetros quadrados (cm^2).

3.4.4.2 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 6 observa-se o esquema de realização do ensaio de absorção capilar pelo método do RILEM TC 116-PCD (1999), conforme Figura 6.

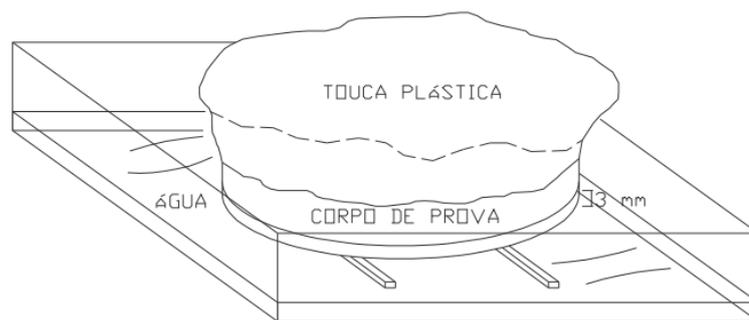


Figura 6 - Esquema de realização do ensaio de absorção capilar pelo método do RILEM TC 116-PCD 1999 (BARIN, 2008, p. 100).

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 .

3.5 Resistência à compressão axial

3.5.1 Considerações iniciais

Mehta e Monteiro (2008) consideram a resistência como sendo “a propriedade mais valorizada por projetistas e engenheiros de controle de qualidade” e a definem como “a capacidade para resistir à tensão sem se romper”. Segundo Andrade e Tutikian (2011), a resistência mecânica do concreto, historicamente, é o parâmetro mais empregado para se avaliar a qualidade do material.

3.5.2 Fatores que influenciam na resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial é influenciada por vários fatores. Alguns deles são as propriedades dos componentes do concreto, cimento, agregados, aditivos químicos e adições minerais, pelas proporções dos componentes, relação água/aglomerante e relação agregado/cimento, pelas condições de cura e idade, parâmetros do corpo de prova (dimensões, geometria e estado de umidade), parâmetros de carregamento (tipo de tensão e velocidade de aplicação da tensão) (MEHTA E MONTEIRO, 2008, NEVILLE, 1997)

3.5.3 Efeitos das adições minerais na resistência à compressão axial

Segundo Andrade e Tutikian (2014), a incorporação das adições minerais atua modificando a estrutura interna da pasta de cimento hidratado. Essas modificações podem ocorrer devido a efeitos físico ou químico (pozolânico). O efeito físico consiste basicamente no aumento da densidade do concreto em função do preenchimento dos vazios pelas partículas das adições, que normalmente apresentam uma elevada finura, refinando a estrutura de poros do concreto.

Os mesmo pesquisadores dizem que o efeito pozolânico está relacionado com a reação das adições com o hidróxido de cálcio oriundo do processo de hidratação do cimento, formando o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional, que é o principal componente responsável pela resistência das pastas de cimento hidratadas. Ambos os efeitos podem atuar de forma separada ou em conjunto para uma melhora na resistência à compressão dos concretos.

Isaia et al. (2010), utilizaram cinza de casca de arroz natural e residual, queimada sem controle de temperatura e sem moagem, em substituição ao cimento. Como resultados, em relação à resistência à compressão, mostraram a viabilidade do emprego de tal material na fabricação de concreto estrutural.

Kelm et al. (2014), substituíram parte do cimento por microssílica da cinza de casca de arroz (MCCA). Com os resultados obtidos, verificaram que na idade de 7 dias todos os traços com MCCA apresentaram menor resistência que o concreto referência moldado somente com cimento. Porém, com um tempo de cura maior, 28 dias de idade, destacou-se o avanço das reações de hidratação dos componentes do cimento e também do processo das reações pozolânicas dos traços com MCCA, resultando valores superiores as idades iniciais, 7 dias.

3.5.4 Medidas de resistência à compressão axial

Segundo a ABNT NBR 5738:2008, os corpos-de-prova utilizados para ensaios de resistência à compressão, são corpos-de-prova de formato cilíndrico, com altura igual ao dobro do diâmetro. O diâmetro pode ser de 100mm, 150mm, 200mm,

250mm, 300mm, 350mm, 400mm e 450mm. Porém geralmente são utilizados moldes com 100mm x 200mm para a confecção dos corpos-de-prova.

Geralmente para a regularização da face superior e inferior dos corpos-de-prova é utilizado enxofre, a fim de permitir a transferência de carga através de toda a superfície do exemplar. Porém para concretos com resistência muito elevada a regularização pode ser feita com argamassa de regularização ou as bases são retificadas mecanicamente por abrasão.

A resistência à compressão do concreto é calculada através da equação 6.

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (6)$$

Onde:

f_c = resistência à compressão (kgf/cm²);

F = carga máxima aplicada (kgf);

A = área da seção do corpo-de-prova (cm²)

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Introdução

Com o intuito de buscar respostas às questões norteadoras deste trabalho, foi realizada uma pesquisa quantitativa, exploratória e 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 (ABNT NBR 5738:2003 e ABNT NBR 5739:2007);
- Absorção de água por capilaridade (ABNT NBR 9779:2012); e,
- Resistividade elétrica aparente (método de Wenner, adaptado para o uso em concretos – ABNT NBR 7117:2012).

Para verificar a influência do teor da Cinza de Lodo de Estação de Tratamento de Água (CLETA), Cinza de Casca de Arroz (CCA) e Escória de Alto Forno (EAF) nas propriedades do concreto relacionadas a este estudo, foram utilizadas misturas com teores variados de CLETA, CCA e EAF, em substituição parcial ao cimento de referência (REF), cimento Portalnd CPV-ARI, onde, 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: 7, 28 e 91 dias;
Absorção de água por capilaridade: 28 e 91 dias;
Resistividade elétrica aparente: 7, 14, 28, 56, 91 dias.
- Tempo de cura: 3, 7, 28 e 91 dias.
- Tipo de adição mineral: cinza de lodo de estação de tratamento de água, cinza de casca de arroz escura e escória de alto forno.
- Teor de substituição da adição mineral, em relação à massa de cimento:
100% cimento Portland CP V – ARI, para REF;
5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%, para CLETA;
5% de EAF e 20% de CLETA;
10% de EAF e 20% de CLETA;
5% de CCA, 5% de EAF e 15% de CLETA.

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 Caracterizações dos materiais

3.3.1 Aglomerantes

Foi utilizado cimento Portland de alta resistência inicial, CPV-ARI, fabricado nacionalmente, em conformidade com a norma ABNT NBR 5733:1991. O lodo de estação de tratamento de água é proveniente de Venâncio Aires e é um resíduo proveniente da Estação de Tratamento de Água (ETA) da mesma cidade (Hengen, 2014). Depois de calcinado a 600°C por 1 hora e moído por 2 horas em moinho de esferas de aço o lodo de ETA é transformado em cinza de lodo de ETA e está pronto para ser usado em substituição ao cimento. A cinza de casca de arroz empregada é proveniente de geradora de energia elétrica, localizada no estado do Rio Grande do Sul, cuja finalidade principal da casca de arroz é de gerar energia. A cinza de casca de arroz foi moída na indústria de origem segundo Mostardeiro Neto (2011). A escória de alto forno provem da Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST), Tubarão – ES, utilizada nas condições recebidas, conforme Veiga (2011).

Quanto a distribuição de tamanho das partículas do cimento Portland - CPV. Os resultados da análise de tamanho de partículas constata-se que $d(0,1) = 3,672 \mu\text{m}$, $d(0,5) = 14,103 \mu\text{m}$ e $d(0,9) = 38,812 \mu\text{m}$, ou seja, 10%, 50% e 90% das partículas apresentam diâmetro de partículas inferiores a $3,672 \mu\text{m}$, $14,103 \mu\text{m}$ e $38,812 \mu\text{m}$ respectivamente.

Na Tabela 3 são apresentadas as características físico-químicas dos aglomerantes, segundo Hengen (2014), Mostardeiro Neto (2011) e Veiga (2011), empregados neste trabalho.

Tabela 3 - Características físico-químicas dos aglomerantes. (HENGGEN, 2014; MOSTARDEIRO NETO, 2011; VEIGA, 2011).

Composição química	Porcentagem em massa dos materiais (%)			
	CPV-ARI	CLETA	CCA	EAF
CaO	62,9	0,57	0,83	44,50
SiO ₂	20,4	66,2	88,12	33,84
Al ₂ O ₃	4,37	17,7	0,56	10,35
Fe ₂ O ₃	2,64	8,76	0,15	0,67

SO₃	2,20	-	0,10	-
MgO	2,70	0,96	0,49	7,99
K₂O	0,95	1,16	1,60	0,40
MnO	< 0,10	0,13	-	-
Na₂O	0,13	0,32	0,21	0,20
TiO₂	0,29	0,86	-	-
P₂O₅	< 0,10	0,33	-	-
Carbono grafítico	-	-	3,69	-
Perda ao fogo	3,16	3,37	5,88	0,00
Massa específica (kg/dm³)	3,13	2,56	2,13	2,92
Área específica BET (m²/g)	1,14	-	-	-
Finura #0,075 mm	0,82	-	-	-

3.3.2 Agregados

O agregado miúdo utilizado nesta pesquisa, é 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 4 são apresentadas as características físicas dos agregados e, nas Figuras 7 e 8, observam-se as distribuições granulométricas do agregado miúdo e graúdo, respectivamente.

Tabela 4 - Características físicas dos agregados.

Grandeza física	Agregado miúdo	Agregado graúdo
Módulo de finura	1,85	6,92
Dimensão máxima característica (mm)	1,2	19,0
Massa específica (kg/dm ³)	2,65	2,48
Massa unitária solta (kg/dm ³)	1,62	1,38
Absorção de água (%)	-	2,01
Índice de forma	-	2,23

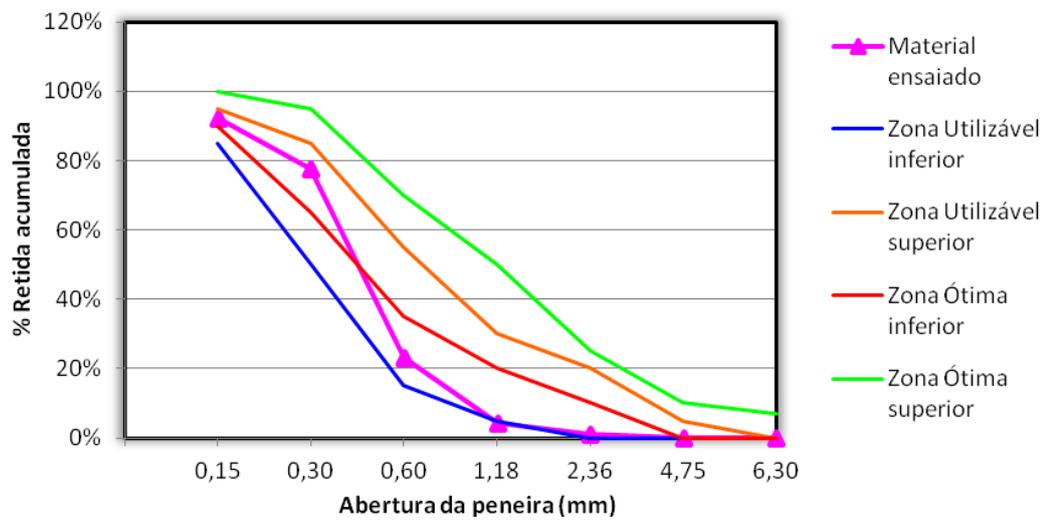


Figura 7 - Curva granulométrica do agregado miúdo.

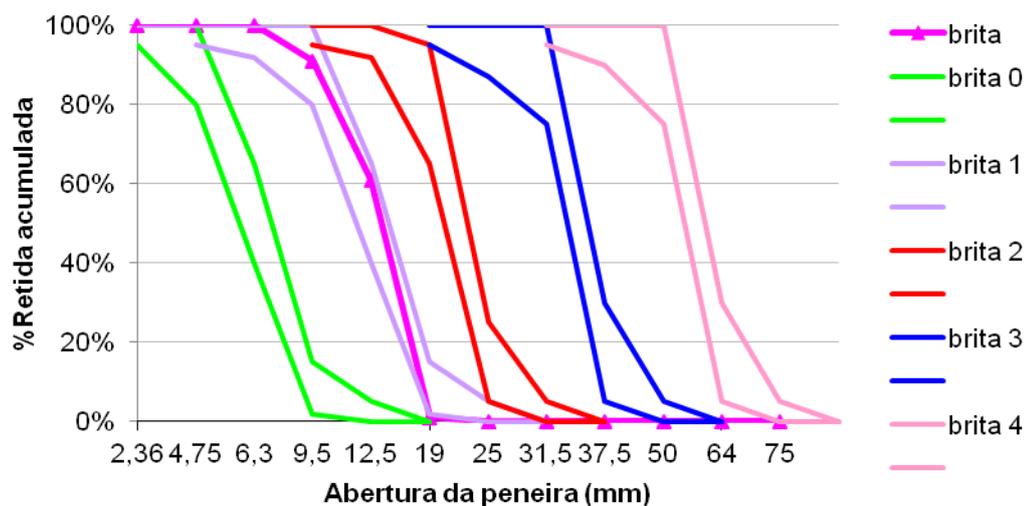


Figura 8 - Curva granulométrica do agregado graúdo.

3.3.3 Aditivos

De modo a se obter a consistência desejada nas misturas investigadas, 100 ± 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, Muraplast FK 100, livre de cloretos. O aditivo superplastificante empregado foi à base de policarboxilatos, com teor de cloretos $< 0,1\%$. Antes do início da moldagem, foram realizadas pré-moldagens com o objetivo de verificar os teores de aditivos 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 dez misturas, sendo uma composta apenas por cimento e outras nove com teores de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% de substituição parcial de cimento por CLETA, além de misturas compostas com 5% de EAF e 20% de CLETA, 10% de EAF e 20% de CLETA e 5% de CCA, 5% de EAF e 15% de CLETA em substituição parcial do cimento, conforme nomenclatura abaixo:

- REF (100% de cimento);

- 5 L, 10 L, 15 L, 20 L, 25 L, 30 L (5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% de cinza de lodo de estação de tratamento de água);
- 5 EAF (5% de escória de alto forno mais 20% de cinza de lodo de estação de tratamento de água);
- 10 EAF (10% de escória de alto forno mais 20% de cinza de lodo de estação de tratamento de água); e,
- 5 CCA (5% de cinza de casca de arroz, 5% de escória de alto forno e 15% de cinza de lodo de estação de tratamento de água).

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 67:1998 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 da CLETA, CCA e EAF, em relação ao cimento, e conseqüente, aumento no volume de pasta quando o cimento é substituído por estes materiais para que o teor de argamassa fosse mantido em 51%, em massa seca, conforme obtido experimentalmente.

Os teores de aditivo utilizado, definido no ensaio de consistência, assim como o consumo de materiais dos experimentos deste trabalho apresentam-se na Tabela 5.

Tabela 5 - Consumo dos materiais por metro cúbico de concreto.

Mistura	Relação a/ag	Ag	Cim	CLETA	CCA	EAF	Areia	Brita	Água	Adit. Plast.	Adit. Superp.
REF	0,35	488	488	-	-	-	634	1077	171	1,46	-
	0,50	359	359	-	-	-	740	1057	180	-	-
	0,65	284	284	-	-	-	804	1045	185	-	-
5 L	0,35	488	464	24	-	-	625	1080	171	1,95	-
	0,50	359	341	18	-	-	737	1057	180	-	-
	0,65	284	270	14	-	-	799	1046	185	-	-
10 L	0,35	486	439	49	-	-	624	1078	171	4,88	1,46
	0,50	359	324	36	-	-	733	1057	180	-	-
	0,65	284	256	28	-	-	798	1045	185	-	-
15 L	0,35	488	415	73	-	-	619	1078	171	4,88	1,95
	0,50	359	306	54	-	-	730	1057	180	0,36	-
	0,65	284	241	43	-	-	795	1045	185	-	-
20 L	0,35	488	390	98	-	-	615	1078	171	4,88	2,19
	0,50	359	287	72	-	-	729	1056	180	1,08	-
	0,65	284	227	57	-	-	795	1044	184	-	-
25 L	0,35	488	366	122	-	-	610	1078	171	4,88	2,44
	0,50	359	269	90	-	-	725	1056	180	1,44	-
	0,65	284	213	71	-	-	792	1044	184	-	-
30 L	0,35	487	341	146	-	-	609	1076	170	4,87	3,17
	0,50	359	251	108	-	-	722	1056	180	3,23	-
	0,65	284	199	85	-	-	789	1044	184	0,71	-
5 EAF	0,35	487	366	97	24	-	614	1077	171	4,87	2,92
	0,50	359	269	72	18	-	728	1055	179	3,23	-
	0,65	284	213	57	14	-	794	1044	184	1,7	-
10 EAF	0,35	487	341	97	49	-	614	1076	170	4,87	2,44
	0,50	359	251	72	36	-	728	1055	179	2,87	-
	0,65	284	199	57	28	-	794	1043	184	1,42	-
5 CCA	0,35	487	366	73	24	24	609	1077	171	4,87	2,19
	0,50	359	269	54	18	18	725	1055	179	3,23	-
	0,65	284	213	43	14	14	791	1044	184	1,13	-

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 ABNT NBR 5738:2003, conforme apresentado na Tabela 6. Para os ensaios de resistência à compressão axial, resistividade elétrica aparente e absorção de água por capilaridade, moldaram-se quatro, quatro e três corpos-de-prova, respectivamente, para cada idade de ensaio e relação a/ag investigada.

Tabela 6 – Tipo de cura, idade de ensaio, dimensão dos corpos-de-prova e número de camadas (adensamento)

Ensaio	Tipo de cura	Idade de ensaio (dias)	Dimensão dos cp's (cm)	Vibração (camadas)
Resistência à compressão	Úmida	7, 28 e 91	Ø 10x20	2
	3 e 7 dias	28 e 91		
Resistividade elétrica	Úmida	7, 14, 28, 56 e 91	10x10x17	2
Absorção capilar	3 e 7 dias	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, 100 ± 10 mm, realizou-se através do ensaio de abatimento do tronco de cone, segundo a ABNT NBR NM 67:1998, em que se verificaram os valores pré-determinados.

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 Mehta e Monteiro (1994), equação 6, que considera a massa e a temperatura de todos os elementos constituintes da mistura (aglomerantes, agregados e água):

$$T = \frac{0,22.(T_m.M_n + T_c.M_c) + T_a.M_a}{0,22.(M_m + M_c) + M_a} \quad (6)$$

Onde:

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

T_m = Temperatura dos agregados (°F);

T_c = Temperatura do aglomerante ($^{\circ}\text{F}$);

T_a = Temperatura da água ($^{\circ}\text{F}$);

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 equação 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 inverno, houve necessidade de aquecimento 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.

Os corpos-de-prova destinados ao ensaio 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. Já os corpos-de-prova referentes ao ensaio de resistência à compressão receberam três tipos de cura, em câmara úmida em períodos de três e sete dias permanecendo em ambiente de laboratório até a data dos ensaios e câmara úmida em períodos de 7, 28 e 91 dias até a data dos ensaios.

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 ABNT NBR 5738:2003 e ABNT NBR 5739:2007. Foram moldados 20 corpos-de-prova cilíndricos $\varnothing 10 \times 20$ cm para cada mistura e relação a/ag. Os corpos-de-prova foram curados em câmara úmida por 3, 7, 28 e 91 dias. Os corpos-de-prova como período de cura de três e sete dias foram retirados da cura após este período e conservados em ambiente de laboratório até as idades de ensaio, 28 e 91 dias. Os corpos-de-prova de 7, 28 e 91 dias foram mantidos em cura úmida até as idades de ensaios. Antes do ensaio, houve capeamento dos corpos-de-prova com enxofre, com posterior rompimento dos mesmos em prensa hidráulica.

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, 3 e 7 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 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa $50 \pm 2\%$, até a data dos ensaios, 28 e 91 dias.

O ensaio seguiu as determinações da norma ABNT NBR 9779:2012. 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 inferior, 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.

Nas datas de ensaios de 28 e 91 dias, 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).

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 e 91

dias), foram moldados quatro corpos-de-prova prismáticos, conforme ilustrado na Figura 9.

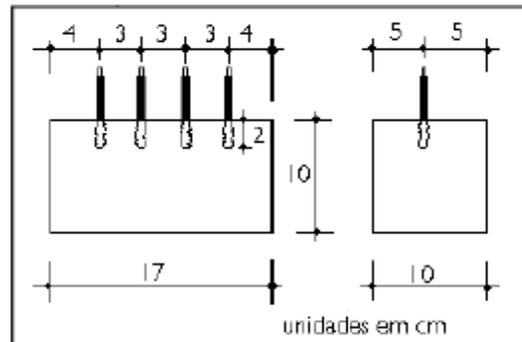


Figura 9 - Esquema dos corpos-de-prova utilizados no ensaio de resistividade elétrica aparente, pelo método de Wenner (ABREU, 1998, p. 52).

O ensaio de REA foi realizado de maneira não destrutiva, 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).

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), Cezar (2011) e Mostardeiro Neto (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.

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.

O valor da Resistividade Elétrica Aparente pelo método de Wenner foi obtido pela equação de Medeiros Filho (1979):

$$\rho = R \cdot K \quad (7)$$

$$K = \frac{4 \cdot \pi \cdot a}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}} \quad (8)$$

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;

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 7, 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, seguindo o mesmo parâmetro adotado para os valores de resistência à compressão axial.

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 7 são apresentados dados informativos do ensaio de resistividade elétrica aparente.

Tabela 7 - Dados informativos do ensaio de resistividade elétrica aparente.

Mistura	Relação a/ag	Total de cp's confeccionados em cada relação a/ag	Idades ensaiadas (dias)	Total de ensaios em cada idade	Total de ensaios por mistura
REF	0,35	04	7, 14, 28, 56 e 91	12	60
	0,50	04			
	0,65	04			
5 L	0,35	04	7, 14, 28, 56 e 91	12	60
	0,50	04			
	0,65	04			
10 L	0,35	04	7, 14, 28, 56 e 91	12	60
	0,50	04			
	0,65	04			
15 L	0,35	04	7, 14, 28, 56 e 91	12	60
	0,50	04			
	0,65	04			
20 L	0,35	04	7, 14, 28, 56 e 91	12	60
	0,50	04			
	0,65	04			
25 L	0,35	04	7, 14, 28, 56 e 91	12	60
	0,50	04			
	0,65	04			
30 L	0,35	04	7, 14, 28, 56 e 91	12	60
	0,50	04			
	0,65	04			
5 EAF	0,35	04	7, 14, 28, 56 e 91	12	60
	0,50	04			
	0,65	04			
10 EAF	0,35	04	7, 14, 28, 56 e 91	12	60
	0,50	04			
	0,65	04			
5 CCA	0,35	04	7, 14, 28, 56 e 91	12	60
	0,50	04			
	0,65	04			
Total de ensaios					600

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

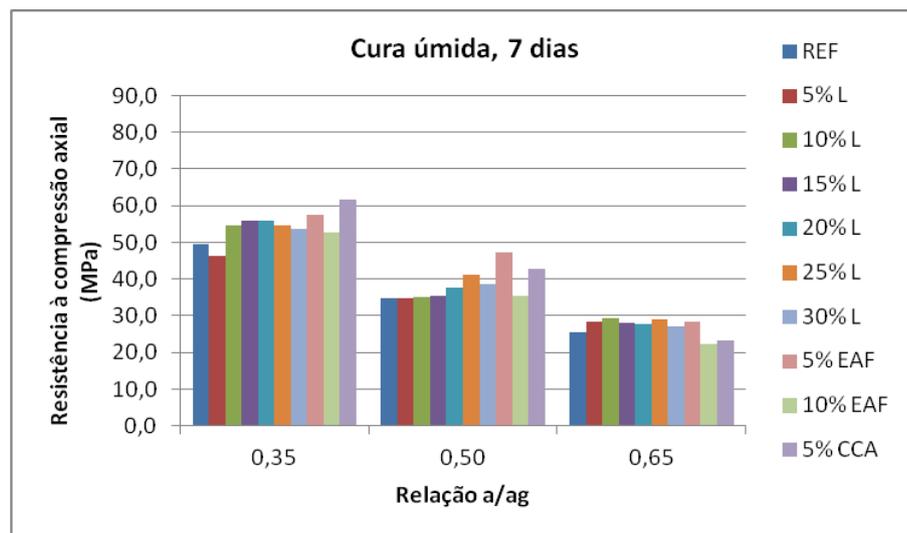
Os resultados do ensaio de resistência à compressão axial para todas as misturas, idades e curas investigadas, são apresentados na Tabela 8 e Figura 10.

Tabela 8 - Resultados do ensaio de resistência à compressão axial.

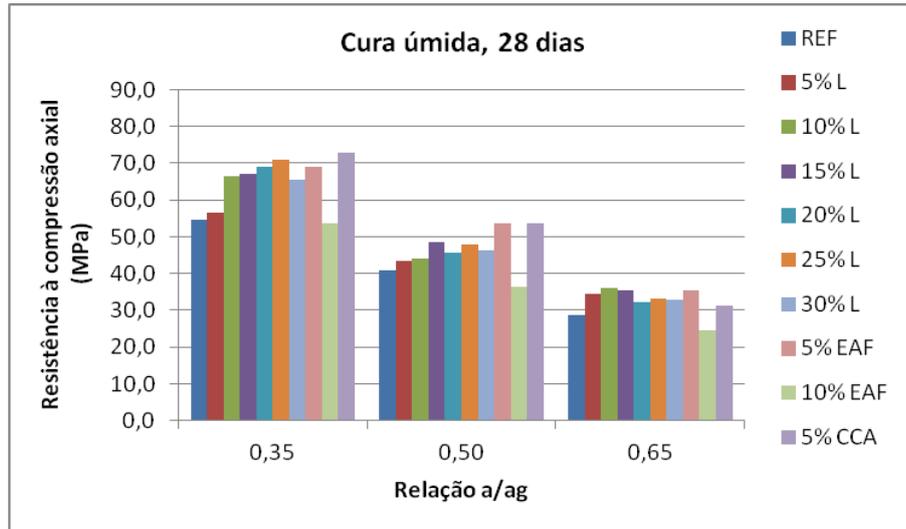
Mistura	Relação a/ag	Resistência à compressão axial (MPa)						
		7 dias cura úmida	cura úmida	28 dias cura 3 dias	cura 7 dias	cura úmida	91 dias cura 3 dias	cura 7 dias
REF	0,35	49,5	54,7	49,8	56,4	59,6	53,9	58,5
	0,50	34,8	40,7	40,6	44,8	43,0	41,9	45,6
	0,65	25,4	28,8	33,2	33,4	33,2	34,8	35,9
5 L	0,35	46,3	56,5	53,0	73,2	65,0	59,4	74,3
	0,50	34,7	43,5	41,7	52,6	52,7	48,9	53,5
	0,65	28,4	34,5	32,7	37,8	38,7	40,2	38,5
10 L	0,35	54,8	66,5	72,2	68,8	67,8	73,0	69,3
	0,50	35,0	44,0	55,5	52,3	55,6	55,6	52,8
	0,65	29,4	36,0	38,7	40,0	42,0	41,0	40,6
15 L	0,35	55,8	67,0	76,1	75,5	68,2	81,0	76,3
	0,50	35,3	48,5	50,8	52,5	53,7	52,2	52,8
	0,65	28,0	35,5	31,7	39,2	36,2	33,4	39,9
20 L	0,35	55,8	69,0	75,5	74,8	75,3	76,0	75,2
	0,50	37,5	45,6	48,7	46,0	52,5	49,3	56,3
	0,65	27,8	32,3	40,8	42,6	32,4	41,6	43,1

25 L	0,35	54,5	71,0	66,8	88,7	78,8	71,7	89,0
	0,50	41,3	47,8	54,4	63,7	52,8	55,2	58,3
	0,65	29,0	33,3	40,6	42,0	34,4	41,0	41,4
30 L	0,35	53,5	65,3	46,5	57,9	71,8	71,5	74,4
	0,50	38,5	46,3	32,3	35,8	45,3	50,1	54,3
	0,65	27,2	33,0	35,2	34,2	34,1	36,2	34,4
5 EAF	0,35	57,6	69,1	78,5	82,4	80,7	80,2	83,0
	0,50	47,3	53,5	54,0	54,3	63,5	55,2	58,3
	0,65	28,4	35,6	35,9	39,0	38,1	36,3	38,3
10 EAF	0,35	52,6	53,8	63,1	65,0	76,8	65,5	67,7
	0,50	35,4	36,3	46,5	54,4	51,6	48,1	55,3
	0,65	22,3	24,7	32,0	32,2	37,4	32,8	36,1
5 CCA	0,35	61,6	72,9	63,9	78,5	73,1	69,3	81,6
	0,50	42,6	53,7	51,2	55,3	54,0	51,7	56,7
	0,65	23,1	31,4	34,5	38,8	33,8	34,8	39,0

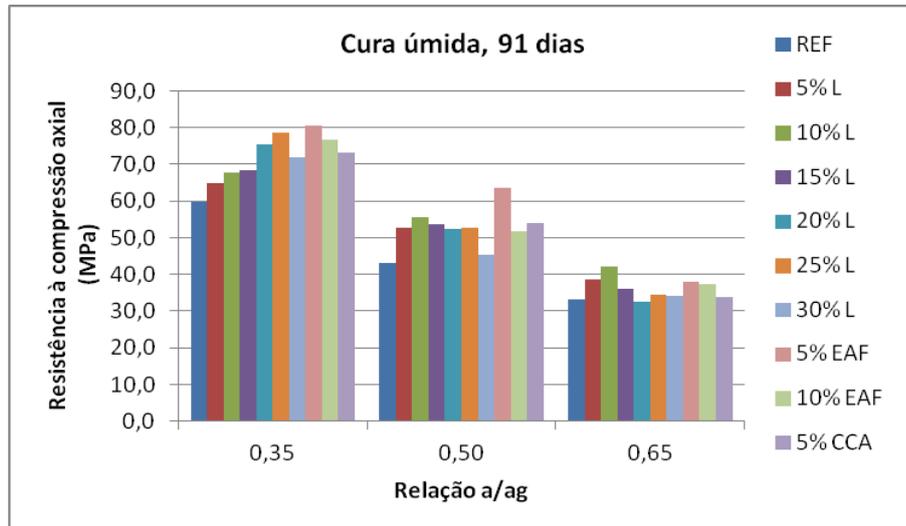
a)



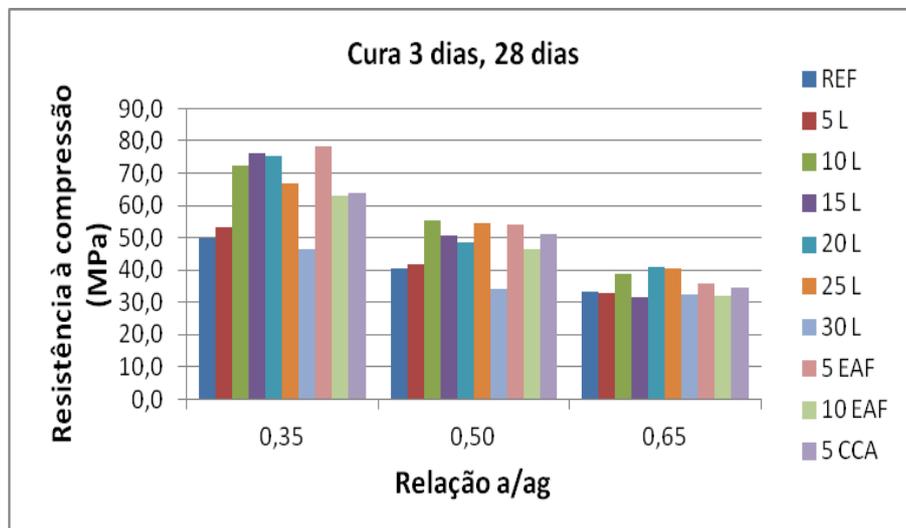
b)



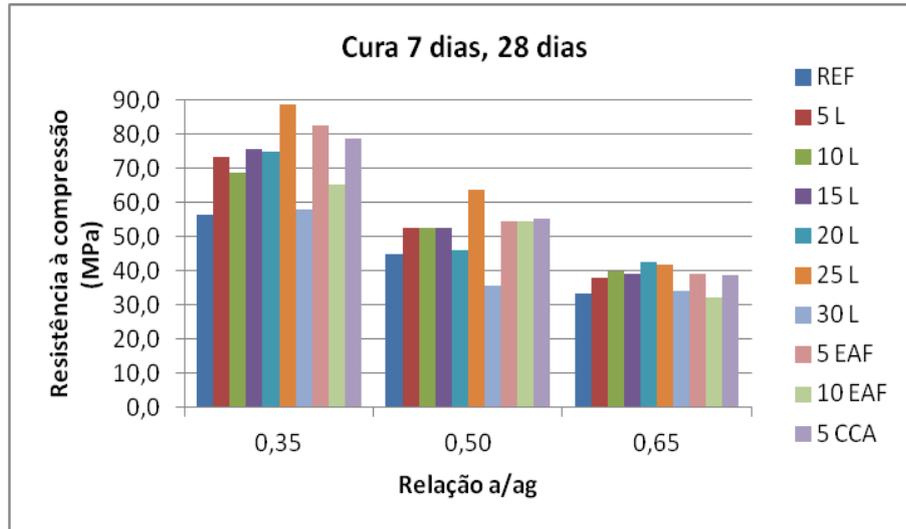
c)



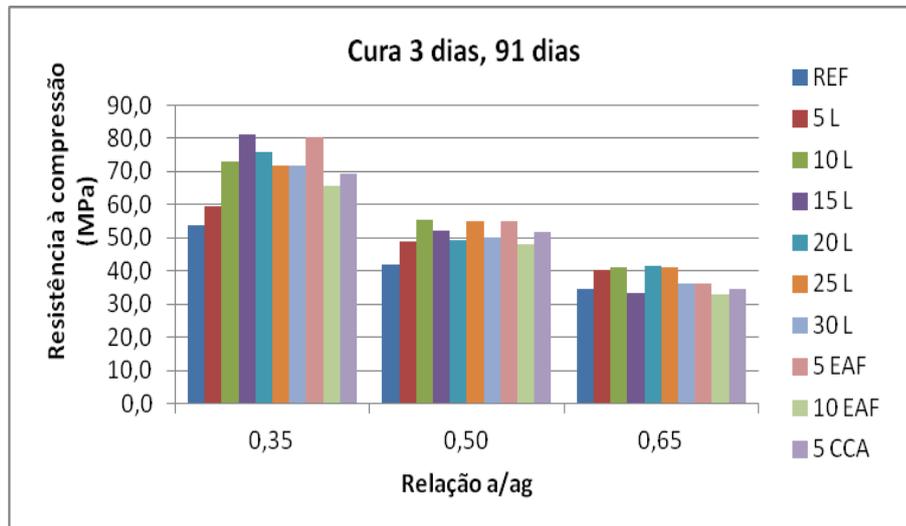
d)



e)



f)



g)

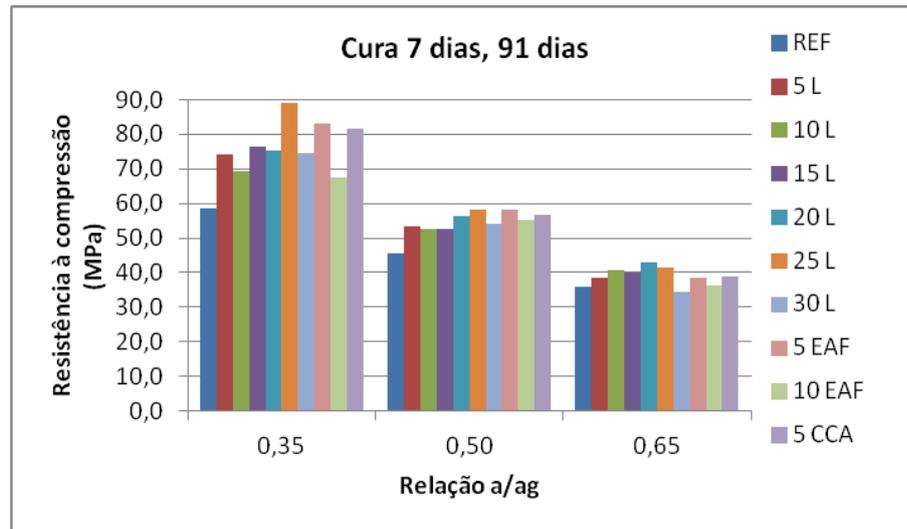


Figura 10 - Resistência à compressão versus relação a/ag: a) cura úmida de 7 dias; b) cura úmida de 28 dias; c) cura úmida de 91 dias; d) 28 dias com 3 dias de cura; e) 28 dias com 7 dias de cura; f) 91 dias com 3 dias de cura e g) 91 dias com 7 dias de cura.

A partir da Tabela 8 e Figura 10 a, b e c, cura úmida, ensaiados aos 7, 28 e 91 dias a partir da data de moldagem. Constata-se que em sua maioria, as misturas com adições mineiras apresentaram valores superiores de resistência à compressão axial em relação à mistura referência. As exceções são aos 7 dias, mistura 5 L, relação a/ag 0,35 e 0,50; 10 EAF e 5 CCA, relação a/ag 0,65; aos 28 dias, mistura 10 EAF, todas as relações a/ag e aos 91 dias na mistura 20 L, relação a/ag 0,65.

Também, são apresentados os valores médios de resistência à compressão axial em função da relação a/ag para cada tipo de mistura, com três e sete dias de cura, ensaiados aos 28 e 91 dias a partir da data de moldagem. Constata-se que em sua maioria, as misturas com adições mineiras apresentaram valores superiores de resistência à compressão em relação à mistura referência. As exceções foram, aos 91 dias de ensaio, da mistura 5 CCA, relação a/ag 0,65 e três dias de cura, na qual não houve modificação; já para as misturas 5 L, 15 L e 10 EAF, relação a/ag 0,65 e 30 L, relações a/ag 0,35 e 0,50, cura de três dias, aos 28 dias de ensaio; 30 L, relação a/ag 0,50 e 10 EAF, relação a/ag 0,65, sete dias de cura e 28 dias de ensaio; 15 L e 10 EAF, relação a/ag 0,65 e três dias de cura, aos 91 dias de ensaios; e 30 L, relação a/ag 0,65, sete dias de cura, aos 91 dias de ensaio, a resistência à compressão axial foi inferior à mistura REF, conforme Tabela 9.

Tabela 9 - Valores de resistência à compressão axial, em relação à mistura de referência.

Mistura	Relação a/ag	Elevação da resistência à compressão axial (%)						
		7 dias		28 dias			91 dias	
		cura úmida	cura úmida	cura 3 dias	cura 7 dias	cura úmida	cura 3 dias	cura 7 dias
5 L	0,35	-3,2	1,8	6,6	29,9	5,4	10,3	27,0
	0,50	-0,1	2,8	2,6	17,6	9,6	16,5	17,2
	0,65	3,0	5,8	-1,4	13,4	5,5	15,6	7,3
10 L	0,35	5,3	11,8	45,1	22,1	8,2	35,4	18,5
	0,50	0,3	3,3	36,7	16,9	12,5	32,6	15,6
	0,65	4,0	7,3	16,7	19,7	8,8	17,9	13,1
15 L	0,35	6,3	12,3	52,8	33,9	8,7	50,3	30,5
	0,50	0,5	7,8	25,2	17,3	10,6	24,5	15,7
	0,65	2,6	6,8	-4,5	17,5	3,0	-3,9	11,0
20 L	0,35	6,3	14,3	51,6	32,7	15,8	41,0	28,5
	0,50	2,8	4,9	20,0	2,8	9,4	17,5	23,3
	0,65	2,4	3,5	22,9	27,8	-0,8	19,7	19,9
25 L	0,35	5,0	16,3	34,2	57,4	19,2	33,1	52,3
	0,50	6,5	7,1	34,0	42,3	9,8	31,5	27,8
	0,65	3,6	4,5	22,2	25,8	1,2	18,0	15,2
30 L	0,35	4,0	10,7	-6,6	2,8	12,2	32,7	27,2
	0,50	3,8	5,6	-20,4	-20,0	2,3	19,5	18,9
	0,65	1,8	4,3	6,1	2,5	0,9	4,0	-4,2
5 EAF	0,35	8,1	14,4	57,6	46,1	21,1	48,8	41,9
	0,50	12,6	12,8	33,0	21,4	20,5	31,7	27,8
	0,65	3,0	6,8	8,2	16,8	4,9	4,5	6,8
10 EAF	0,35	3,1	-0,9	26,9	15,4	17,3	21,5	15,7
	0,50	0,6	-4,4	14,5	21,6	8,5	14,8	21,1
	0,65	-3,1	-4,1	-3,5	-3,4	4,2	-5,7	0,6
5 CCA	0,35	12,1	18,3	28,3	39,2	13,5	28,5	39,6
	0,50	7,9	13,0	26,0	23,6	10,9	23,2	24,2
	0,65	-2,3	2,6	3,8	16,3	0,6	0,0	8,6

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

Os maiores valores de resistência à compressão encontrados aos 28 dias, foram nas misturas 5 EAF, relação a/ag 0,35; 10 L, relação a/ag 0,50; e 20 L, relação a/ag 0,65, para três dias de cura e 25 L, relação a/ag 0,35 e 0,50; e 20 L, relação a/ag 0,65, aos sete dias de cura. Aos 91 dias de ensaios, os maiores valores foram identificados nos concretos 15 L, relação a/ag 0,35; 10 L, relação a/ag 0,50; e 20 L, relação a/ag 0,65, todos com três dias de cura. Para a cura de sete dias, os maiores valores encontrados foram em 25 L, relação a/ag 0,35 e 0,50, este com

valores iguais aos encontrados em 5 EAF, relação a/ag 0,50; e 20 L, relação a/ag 0,65. Nos ensaios de cura úmida, os maiores valores foram aos 7 dias nas misturas 5 CCA, relação a/ag 0,35, 5 EAF, relação a/ag 0,50 e 10 L, relação a/ag 0,65. Aos 28 dias foram 5 CCA, relações a/ag 0,35 e 0,50; e 10 L, relação a/ag 0,65. Aos 91 dias foram as misturas 5 EAF, relações a/ag 0,35 e 0,50; e 10 L, relação a/ag 0,65.

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 Tabela 10 e Tabela 11 e nas Tabela 12 e Tabela 13, aos 91 dias, nos mesmos períodos de cura.

Tabela 10 - Resultados de absorção capilar aos 28 dias, cura de 3 dias.

Mistura	Relação a/ag	Absorção por capilaridade (g/cm ²)				
		3h	6h	24h	48h	72h
REF	0,35	0,198	0,227	0,330	0,415	0,453
	0,50	0,283	0,330	0,538	0,680	0,783
	0,65	0,293	0,368	0,576	0,746	0,859
5 L	0,35	0,047	0,066	0,076	0,085	0,094
	0,50	0,076	0,085	0,132	0,151	0,170
	0,65	0,085	0,113	0,179	0,217	0,245
10 L	0,35	0,047	0,047	0,076	0,076	0,076
	0,50	0,057	0,066	0,094	0,123	0,123
	0,65	0,085	0,104	0,160	0,170	0,198
15 L	0,35	0,028	0,028	0,028	0,038	0,038
	0,50	0,028	0,028	0,057	0,066	0,085
	0,65	0,028	0,038	0,094	0,104	0,132
20 L	0,35	0,038	0,047	0,047	0,047	0,057
	0,50	0,076	0,085	0,094	0,104	0,123
	0,65	0,094	0,123	0,170	0,217	0,255
25 L	0,35	0,047	0,047	0,076	0,076	0,076
	0,50	0,076	0,104	0,151	0,170	0,198
	0,65	0,113	0,142	0,236	0,302	0,359
30 L	0,35	0,028	0,038	0,038	0,047	0,047
	0,50	0,057	0,066	0,085	0,104	0,113
	0,65	0,085	0,104	0,142	0,179	0,208

	0,35	0,028	0,038	0,047	0,057	0,057
5 EAF	0,50	0,047	0,057	0,076	0,094	0,094
	0,65	0,047	0,066	0,104	0,113	0,123
10 EAF	0,35	0,047	0,076	0,076	0,076	0,076
	0,50	0,066	0,094	0,123	0,123	0,142
	0,65	0,113	0,142	0,227	0,264	0,311
5 CCA	0,35	0,028	0,047	0,047	0,057	0,057
	0,50	0,047	0,066	0,094	0,104	0,123
	0,65	0,094	0,123	0,179	0,236	0,283

Tabela 11 - Resultado de absorção capilar aos 28 dias, cura de 7 dias.

Mistura	Relação a/ag	Absorção por capilaridade (g/cm ²)				
		3h	6h	24h	48h	72h
REF	0,35	0,208	0,255	0,387	0,491	0,547
	0,50	0,283	0,330	0,538	0,680	0,783
	0,65	0,293	0,368	0,576	0,746	0,859
5 L	0,35	0,028	0,028	0,028	0,028	0,047
	0,50	0,028	0,038	0,047	0,047	0,047
	0,65	0,047	0,047	0,076	0,076	0,094
10 L	0,35	0,009	0,009	0,009	0,019	0,028
	0,50	0,038	0,038	0,038	0,038	0,057
	0,65	0,047	0,057	0,085	0,085	0,113
15 L	0,35	0,038	0,057	0,057	0,066	0,076
	0,50	0,047	0,057	0,057	0,066	0,076
	0,65	0,066	0,076	0,104	0,113	0,132
20 L	0,35	0,057	0,057	0,057	0,085	0,085
	0,50	0,057	0,066	0,085	0,104	0,104
	0,65	0,085	0,113	0,132	0,170	0,189
25 L	0,35	0,047	0,028	0,038	0,038	0,038
	0,50	0,028	0,047	0,057	0,066	0,066
	0,65	0,057	0,057	0,094	0,123	0,123
30 L	0,35	0,047	0,057	0,066	0,094	0,094
	0,50	0,066	0,076	0,094	0,142	0,151
	0,65	0,085	0,113	0,170	0,208	0,255
5 EAF	0,35	0,000	0,000	0,019	0,019	0,019
	0,50	0,028	0,028	0,038	0,038	0,047
	0,65	0,028	0,038	0,066	0,104	0,104
10 EAF	0,35	0,028	0,028	0,028	0,057	0,057
	0,50	0,057	0,057	0,066	0,085	0,085
	0,65	0,085	0,094	0,123	0,179	0,189
5 CCA	0,35	0,028	0,057	0,057	0,057	0,066
	0,50	0,057	0,076	0,085	0,094	0,104

0,65	0,076	0,094	0,123	0,132	0,151
------	-------	-------	-------	-------	-------

Tabela 12 - Resultados de absorção capilar aos 91 dias, cura de 3 dias.

Mistura	Relação a/ag	Absorção por capilaridade (g/cm ²)				
		3h	6h	24h	48h	72h
REF	0,35	0,198	0,236	0,368	0,462	0,529
	0,50	0,274	0,321	0,529	0,698	0,802
	0,65	0,283	0,340	0,557	0,727	0,849
5 L	0,35	0,047	0,057	0,076	0,076	0,104
	0,50	0,066	0,094	0,151	0,160	0,189
	0,65	0,094	0,123	0,179	0,217	0,264
10 L	0,35	0,066	0,076	0,085	0,113	0,113
	0,50	0,085	0,104	0,151	0,198	0,217
	0,65	0,113	0,142	0,217	0,293	0,330
15 L	0,35	0,028	0,028	0,047	0,047	0,047
	0,50	0,038	0,038	0,057	0,057	0,076
	0,65	0,019	0,038	0,085	0,094	0,104
20 L	0,35	0,019	0,019	0,038	0,038	0,038
	0,50	0,028	0,057	0,085	0,113	0,132
	0,65	0,076	0,085	0,151	0,217	0,255
25 L	0,35	0,047	0,047	0,057	0,066	0,076
	0,50	0,057	0,085	0,113	0,142	0,170
	0,65	0,113	0,151	0,255	0,321	0,387
30 L	0,35	0,028	0,057	0,057	0,057	0,076
	0,50	0,057	0,085	0,123	0,151	0,179
	0,65	0,094	0,132	0,217	0,274	0,321
5 EAF	0,35	0,028	0,123	0,057	0,057	0,066
	0,50	0,047	0,066	0,094	0,104	0,132
	0,65	0,085	0,264	0,142	0,189	0,217
10EAF	0,35	0,028	0,123	0,057	0,057	0,066
	0,50	0,047	0,066	0,094	0,104	0,132
	0,65	0,085	0,264	0,142	0,189	0,217
5 CCA	0,35	0,028	0,123	0,057	0,057	0,066
	0,50	0,047	0,066	0,094	0,104	0,132
	0,65	0,085	0,264	0,142	0,189	0,217

Tabela 13 - Resultados de absorção capilar aos 91 dias, cura de 7 dias.

Mistura	Relação a/ag	Absorção por capilaridade (g/cm ²)				
		3h	6h	24h	48h	72h
REF	0,35	0,198	0,236	0,368	0,462	0,529
	0,50	0,274	0,321	0,529	0,698	0,802
	0,65	0,283	0,340	0,557	0,727	0,849
5 L	0,35	0,038	0,038	0,038	0,038	0,066
	0,50	0,019	0,028	0,028	0,038	0,057
	0,65	0,028	0,047	0,076	0,076	0,094
10 L	0,35	0,019	0,019	0,019	0,019	0,028
	0,50	0,038	0,047	0,057	0,066	0,076
	0,65	0,047	0,057	0,066	0,085	0,113
15 L	0,35	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028
	0,50	0,047	0,047	0,057	0,057	0,066
	0,65	0,047	0,047	0,076	0,094	0,113
20 L	0,35	0,009	0,038	0,038	0,047	0,057
	0,50	0,057	0,066	0,085	0,094	0,113
	0,65	0,076	0,094	0,160	0,208	0,255
25 L	0,35	0,028	0,038	0,038	0,057	0,057
	0,50	0,047	0,066	0,076	0,094	0,104
	0,65	0,094	0,123	0,179	0,227	0,264
30 L	0,35	0,047	0,047	0,057	0,076	0,094
	0,50	0,057	0,066	0,113	0,151	0,179
	0,65	0,104	0,123	0,217	0,302	0,359
5 EAF	0,35	0,028	0,028	0,038	0,047	0,057
	0,50	0,028	0,038	0,057	0,057	0,076
	0,65	0,066	0,076	0,104	0,151	0,189
10 EAF	0,35	0,047	0,047	0,057	0,057	0,057
	0,50	0,047	0,047	0,076	0,076	0,085
	0,65	0,085	0,094	0,151	0,170	0,217
5 CCA	0,35	1,642	0,028	0,057	0,057	0,057
	0,50	0,038	0,057	0,104	0,104	0,104
	0,65	0,066	0,094	0,151	0,179	0,217

Pela análise das Tabela 10, Tabela 11, Tabela 12 e Tabela 13, observa-se que as misturas com adições minerais apresentaram valores de absorção capilar inferiores aos encontrados na mistura de referência, em ambos os períodos de cura apresentando um maior refinamento dos poros dos concretos com adições minerais, fato também observado por Isaia e Gastaldini (2005).

Nas Figura 11 e Figura 12 são mostrados os valores 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 dias a partir da data de moldagem. Os mesmos

resultados de absorção capilar em função da relação a/ag, porém às misturas com 91 dias, são visualizados nas Figura 13 e Figura 14, referente aos prazos de cura três e sete dias, respectivamente.

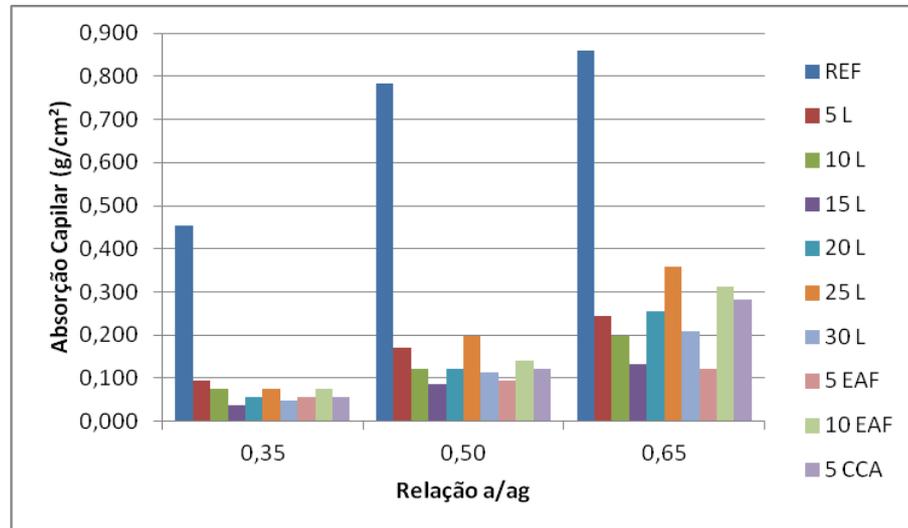


Figura 11 - Valores médios de absorção capilar para cada mistura, em função da relação a/ag, aos 28 dias de moldagem, cura 3 dias, 72 horas.

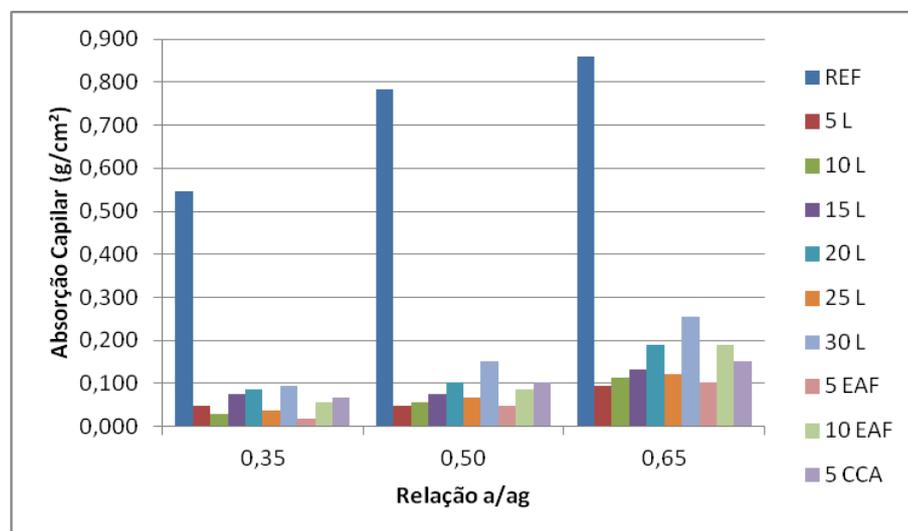


Figura 12 - Valores médios de absorção capilar para cada mistura, em função da relação a/ag, aos 28 dias de moldagem, cura 7 dias, 72 horas.

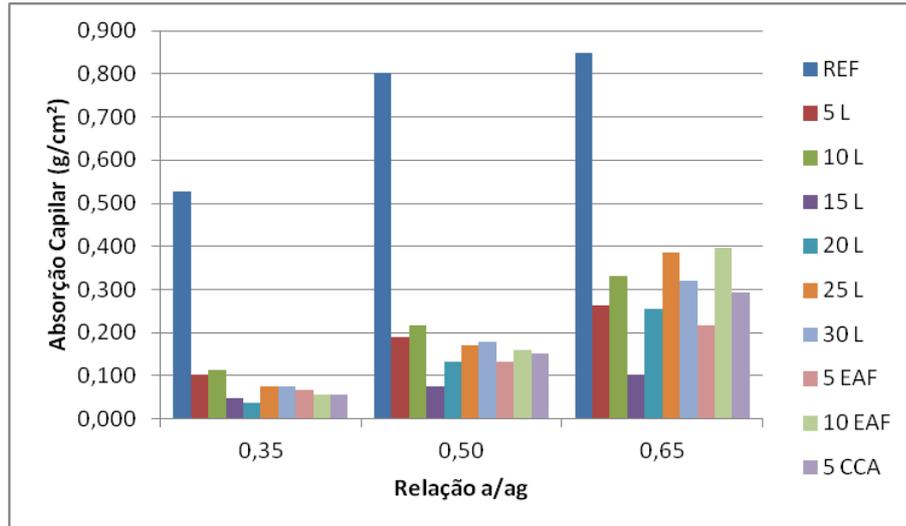


Figura 13 - Valores médios de absorção capilar para cada mistura, em função da relação a/ag, aos 91 dias de moldagem, cura 3 dias, 72 horas

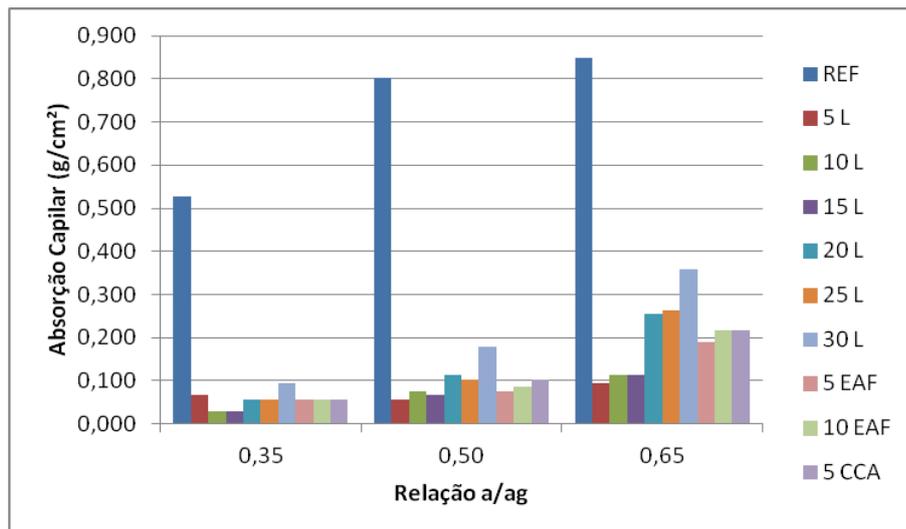


Figura 14 - Valores médios de absorção capilar para cada mistura, em função da relação a/ag, aos 91 dias de moldagem, cura 7 dias, 72 horas.

Pela análise das Figura 11, Figura 12, Figura 13 e Figura 14, observa-se que a absorção capilar, diminui com a redução da relação a/ag, para todas as misturas investigadas, tanto aos 28 dias como aos 91 dias de ensaio.

Em todas as misturas estudadas, o acréscimo no período de cura, de três para sete dias, resultou em redução na absorção de água por capilaridade. Esta melhora também foi observada, com o aumento no grau de hidratação das amostras.

Em relação à mistura REF, as misturas com adições minerais apresentaram redução na absorção de água por capilaridade, conforme a Tabela 14.

Tabela 14 - Redução da absorção capilar em relação à mistura de referência ensaiados aos 28 e 91 dias, nos períodos de cura de 3 e 7 dias.

Mistura	Relação a/ag	Redução da absorção capilar em relação à mistura REF (%)			
		28 dias		91 dias	
		3 dias	7 dias	3 dias	7 dias
5 L	0,35	21	9	20	13
	0,50	22	6	24	7
	0,65	29	11	31	11
10 L	0,35	17	5	21	5
	0,50	16	7	27	9
	0,65	23	13	39	13
15 L	0,35	8	14	9	5
	0,50	11	10	9	8
	0,65	15	15	12	13
20 L	0,35	12	16	7	11
	0,50	16	13	16	14
	0,65	30	22	30	30
25 L	0,35	17	7	14	11
	0,50	25	8	21	13
	0,65	42	14	46	31
30 L	0,35	10	17	14	18
	0,50	14	19	22	22
	0,65	24	30	38	42
5 EAF	0,35	13	3	12	11
	0,50	12	6	16	9
	0,65	14	12	26	22
10 EAF	0,35	17	10	11	11
	0,50	18	11	20	11
	0,65	36	22	47	26
5 CCA	0,35	13	12	11	11
	0,50	16	13	19	13
	0,65	33	18	34	26

Sendo assim, a redução da absorção capilar com a utilização das adições minerais em substituição ao cimento reflete as modificações ocorridas na estrutura dos poros das amostras investigadas (intercomunicabilidade, distribuição, diâmetro, entre outros). Porém, 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.

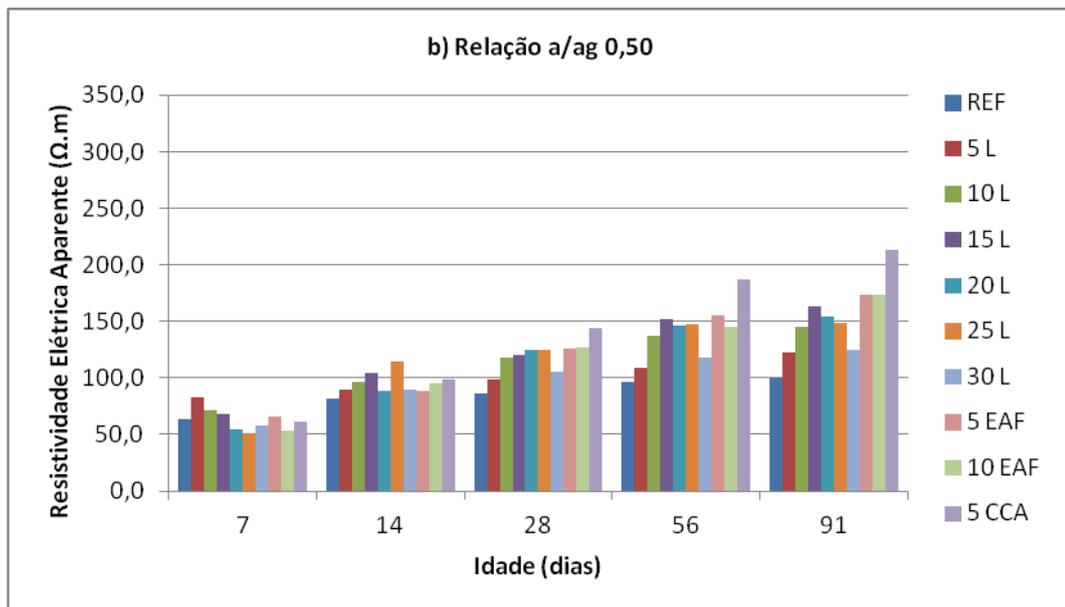
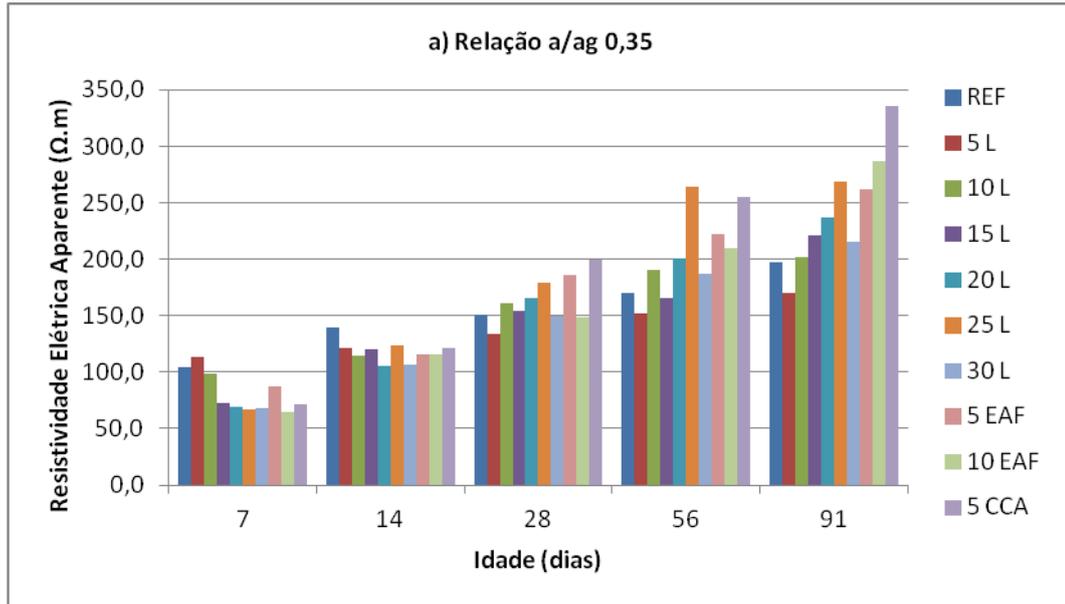
4.4 Análise dos resultados de resistividade elétrica aparente

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 15 e Figura 15.

Tabela 15 - Resultados do ensaio de resistividade elétrica aparente.

Mistura	Relação a/ag	Resistividade elétrica aparente ($\Omega.m$)				
		Idade (dias)				
		7	14	28	56	91
REF	0,35	104,6	139,6	151,1	170,6	197,2
	0,50	63,9	82,1	86,0	96,5	100,3
	0,65	53,5	65,7	65,9	76,3	80,9
5 L	0,35	112,9	120,9	133,4	151,8	170,0
	0,50	83,0	89,1	99,2	108,5	122,4
	0,65	61,0	65,7	73,8	77,6	88,0
10 L	0,35	98,5	114,8	161,0	190,2	201,7
	0,50	71,6	96,9	118,3	136,8	144,7
	0,65	58,5	69,5	92,5	101,9	113,2
15 L	0,35	73,2	119,9	154,4	165,9	220,8
	0,50	68,3	104,0	120,1	152,4	163,2
	0,65	51,5	82,1	96,3	102,7	122,4
20 L	0,35	69,5	105,9	165,3	200,9	237,5
	0,50	54,7	89,0	124,9	146,8	153,7
	0,65	55,5	75,3	108,0	118,4	120,8
25 L	0,35	66,7	123,5	178,9	264,5	269,1
	0,50	51,2	114,7	124,2	146,9	148,1
	0,65	50,9	98,0	102,1	109,9	110,4

	0,35	68,3	106,1	149,7	187,1	215,2
30 L	0,50	58,4	89,6	106,0	117,7	125,2
	0,65	56,1	74,6	82,8	88,1	89,1
	0,35	87,7	116,0	186,5	222,6	261,7
5 EAF	0,50	65,7	88,6	126,5	155,3	173,5
	0,65	68,8	92,4	112,1	117,8	120,6
	0,35	65,1	115,2	148,2	209,9	286,4
10 EAF	0,50	52,9	95,2	126,5	145,4	173,7
	0,65	61,6	108,2	126,0	137,6	158,1
	0,35	71,8	121,7	199,2	254,6	335,8
5 CCA	0,50	61,2	98,1	144,3	187,4	213,2
	0,65	70,8	109,7	158,6	171,4	180,9



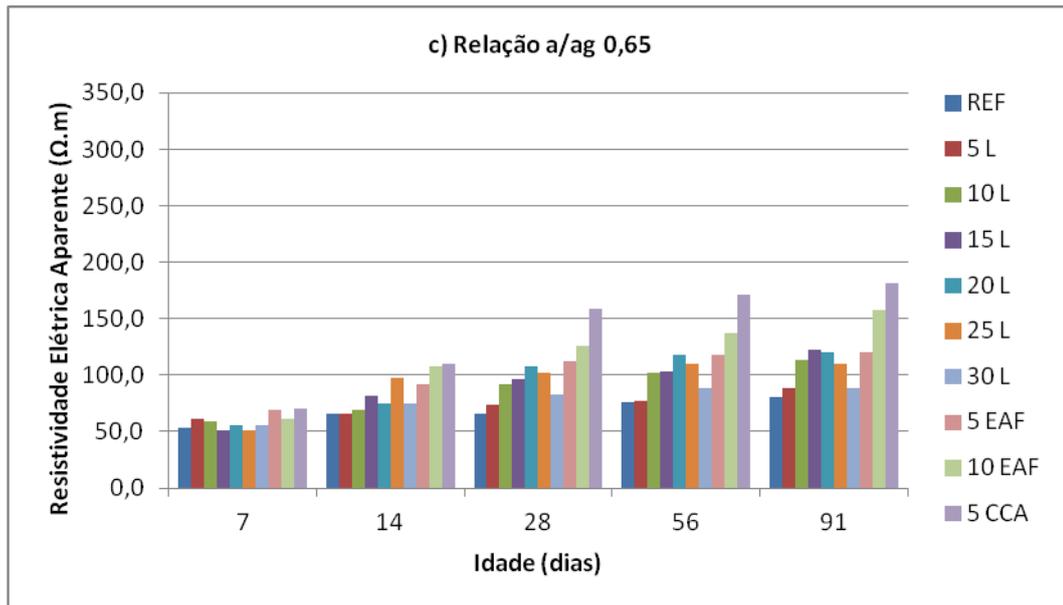


Figura 15 - Resistividade elétrica aparente versus idade: a) relação a/ag = 0,35, b) relação a/ag = 0,50 e c) relação a/ag = 0,65

Igualmente ao ensaio de resistência à compressão axial, percebe-se, que em todas as misturas, a resistividade elétrica aparente aumenta com a redução da relação a/ag e aumento no grau de hidratação, conforme Tabela 15 e Figura 15.

Pela análise da Tabela 15, constata-se que na relação a/ag 0,35 aos sete dias somente a mistura 5 L, obteve resultado superior ao concreto referência. Aos 14 dias, nenhuma mistura obteve resultados superiores a mistura referência. Aos 28 dias, as misturas 5 L, 30 L e 10 EAF, não obtiveram resultados melhores que REF. Porém, aos 56 e 91 dias, somente 5 L não apresentou resultados superiores a REF.

Ainda de acordo com a Tabela 17, na relação a/ag 0,50, somente na idade de sete dias foram encontrados valores inferiores a mistura referência, sendo elas nas misturas 20 L, 25 L, 30 L, 10 EAF e 5 CCA. Na relação a/ag 0,65, foram encontrados valores inferiores a REF nas misturas 15 L e 25 L, somente na idade de sete dias.

Em relação à Figura 15, os melhores resultados em longo prazo foram obtidos com 5 CCA, pelo fato de esta mistura apresentar valores inferiores a mistura referência aos sete dias, nas relações a/ag 0,35 e 0,50 e aos 14 dias na relação a/ag 0,35, porém aos 91 dias a mistura obteve os melhores resultados dentre todas as misturas, obtendo desempenho 70%, 113% e 124% melhor que a mistura referência nas relações a/ag 0,35, 0,50 e 0,65 respectivamente.

Na Tabela 16 é apresentada a elevação da resistividade elétrica aparente, verificadas de sete para 91 dias, de acordo com o aumento no grau de hidratação das misturas investigadas. O crescimento médio da resistividade elétrica aparente, considerou as três relações a/ag, dos 7 para os 91 dias. Assim, nesse período, observa-se maior crescimento para 5 CCA. 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 16 - Resistividade elétrica aparente, período de 7 para 91 dias.

Mistura	Relação a/ag	Elevação da REA (%) Idade (dias)	
		7 - 91	Média (%)
REF	0,35	89	66
	0,50	57	
	0,65	51	
5 L	0,35	51	47
	0,50	47	
	0,65	44	
10 L	0,35	105	100
	0,50	102	
	0,65	94	
15 L	0,35	202	159
	0,50	139	
	0,65	138	
20 L	0,35	242	180
	0,50	181	
	0,65	118	
25 L	0,35	303	203
	0,50	189	
	0,65	117	
30 L	0,35	215	129
	0,50	114	
	0,65	59	
5 EAF	0,35	198	146
	0,50	164	
	0,65	75	
10 EAF	0,35	340	241
	0,50	228	
	0,65	157	

	0,35	367	
5 CCA	0,50	249	257
	0,65	156	

A Tabela 17 apresenta uma classificação das misturas investigadas neste estudo, frente à probabilidade de ocorrer corrosão, de acordo com os critérios estabelecidos pelo CEB 192 (Tabela 1).

Tabela 17 - Classificação das misturas investigadas quanto à probabilidade de ocorrer corrosão, segundo critérios do CEB 192 (ABREU, 1998).

Mistura	Relação a/ag	Resistividade elétrica aparente ($\Omega.m$) Idade (dias)				
		7	14	28	56	91
REF	0,35	B	B	B	B	B
	0,50	A	A	A	A	B
	0,65	A	A	A	A	A
5 L	0,35	B	B	B	B	B
	0,50	A	A	B	B	B
	0,65	A	A	A	A	A
10 L	0,35	A	B	B	B	D
	0,50	A	A	B	B	B
	0,65	A	A	A	B	B
15 L	0,35	A	B	B	B	D
	0,50	A	B	B	B	B
	0,65	A	A	A	B	B
20 L	0,35	A	B	B	D	D
	0,50	A	A	B	B	B
	0,65	A	A	B	B	B
25 L	0,35	A	B	B	D	D
	0,50	A	B	B	B	B
	0,65	A	A	B	B	B
30 L	0,35	A	B	B	B	D
	0,50	A	A	B	B	B
	0,65	A	A	A	A	A
5 EAF	0,35	A	B	B	D	D
	0,50	A	A	B	B	B
	0,65	A	A	B	B	B
10 EAF	0,35	A	B	B	D	D
	0,50	A	A	B	B	B
	0,65	A	B	B	B	B

	0,35	A	B	B	D	D
5 CCA	0,50	A	A	B	B	D
	0,65	A	B	B	B	B

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

De acordo com a Tabela 17, verifica-se que aos sete dias quase todas as misturas, com exceção das misturas REF e 5 L, relação a/ag 0,35, apresentam alta probabilidade de risco de corrosão (entre 100 – 50 Ω .m). Porém aos 28 dias em sua grande maioria as probabilidades de risco de corrosão são baixas (entre 200 – 100 Ω .m), com exceção das misturas REF, relações a/ag 0,50 e 0,65 e 5 L, 10 L e 30 L, relação a/ag 0,65. Logo, aos 56 dias, são apresentadas as primeiras probabilidades desprezíveis nas misturas 15 L, 20 L, 25 L, 5 EAF, 10 EAF e 5 CCA, na relação a/ag 0,35, não sendo observado na mistura REF aos 91 dias.

Um fato observado foi o surgimento dos primeiros riscos de probabilidade corrosão desprezível, encontrados nas misturas 20 L, 25 L, 5 EAF, 10 EAF e 5 CCA, relação a/ag 0,35, aos 56 dias, porém na relação a/ag 0,50 o único risco desprezível foi obtido em 5 CCA, 91 dias, mostrando assim a forte influência da CCA frente ao risco de corrosão da armadura.

Para os teores de substituição de 10%, 20% e 30% do cimento por CCA clara e escura, Mostardeiro Neto (2011) obteve riscos de corrosão desprezível em todas suas misturas com substituições a partir dos 28 dias, de acordo com a CEB 192. Concluindo que a utilização das adições minerais proporcionaram uma influência muito grande na resistividade elétrica do concreto, contribuindo para a durabilidade do material.

Já Hoppe et al. (2005) ao trabalhar com teores de substituição de 10%, 20% e 30% de cimento por CCA, verificaram, aos 91 dias, um crescimento nos valores de resistividade elétrica, em relação ao concreto de referencia, 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 CCA 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 41%, 121% e 194% maiores que aos 28 dias e, para a relação 0,65, os resultados aos 91 dias foram 45%, 122% e 109% maiores que aos 28 dias, demonstrando a influência do grau de hidratação.

Logo, a idade, a relação a/ag, o teor de adição mineral e o tipo de adição mineral exercem 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.

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 e 91 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.

Na Tabela 18 e Tabela 19 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 18 - 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, 3 dias de cura.

Mistura	Cura (dias)	Relação a/ag			Resistência à compressão axial (MPa)			Coeficientes		
								A	B	R ²
REF	3	0,35	0,50	0,65	49,8	40,6	33,2	79,88	3,86	0,99
5 L	3	0,35	0,50	0,65	53,0	41,7	32,7	93,15	5,00	0,99
10 L	3	0,35	0,50	0,65	72,2	55,5	38,7	151,90	7,99	0,99

15 L	3	0,35	0,50	0,65	76,1	50,8	31,7	213,79	18,52	0,99
20 L	3	0,35	0,50	0,65	75,5	48,7	40,8	148,20	7,78	0,95
25 L	3	0,35	0,50	0,65	66,8	54,4	40,6	121,17	5,26	0,99
30 L	3	0,35	0,50	0,65	46,5	34,1	32,3	68,16	3,37	0,91
5 EAF	3	0,35	0,50	0,65	78,5	54,0	35,9	196,67	13,57	0,99
10 EAF	3	0,35	0,50	0,65	63,1	46,5	32,0	140,93	9,61	0,99
5 CCA	3	0,35	0,50	0,65	63,9	51,2	34,5	135,00	7,80	0,99

Tabela 19 - Coeficientes "A" e "B" da equação $f_c = A/B^{a/ag}$ e coeficientes de determinação, R², das misturas investigadas para a idade de 28 dias, 7 dias de cura.

Mistura	Cura (dias)	Relação a/ag			Resistência à compressão axial (MPa)			Coeficientes		
								A	B	R ²
REF	7	0,35	0,50	0,65	56,4	44,8	33,4	105,03	5,73	0,99
5 L	7	0,35	0,50	0,65	73,2	52,6	37,8	158,23	9,05	0,99
10 L	7	0,35	0,50	0,65	68,8	52,3	40,0	129,40	6,10	0,99
15 L	7	0,35	0,50	0,65	75,5	52,5	39,2	160,29	8,89	0,98
20 L	7	0,35	0,50	0,65	74,8	46,0	42,6	134,74	6,53	0,91
25 L	7	0,35	0,50	0,65	88,7	63,7	42,0	215,23	12,09	0,99
30 L	7	0,35	0,50	0,65	57,9	35,8	34,2	99,53	5,78	0,89
5 EAF	7	0,35	0,50	0,65	82,4	54,3	39,0	194,40	12,10	0,98
10 EAF	7	0,35	0,50	0,65	65,0	54,4	32,2	156,27	10,40	0,97
5 CCA	7	0,35	0,50	0,65	78,5	55,3	38,8	178,73	10,47	0,99

Com os valores de absorção de água por capilaridade, tempo 72 horas, obtidos no ensaio de absorção capilar, aos 28 dias, e suas respectivas relações a/ag, foram calculados os coeficientes da equação $A_c = C/D^{a/ag}$, apresentados na Tabela 20 e Tabela 21, para os prazos de cura dos corpos-de-prova de três e sete dias, respectivamente.

Tabela 20 - Coeficiente "C" e "D" da equação $A_c = C/D^{a/ag}$, para cada mistura investigada, idade de 28 dias, cura de 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	0,453	0,783	0,859	0,231	0,118	0,94
5 L	28	0,35	0,50	0,65	0,094	0,170	0,245	0,031	0,041	0,99
10 L	28	0,35	0,50	0,65	0,076	0,123	0,198	0,024	0,041	0,99
15 L	28	0,35	0,50	0,65	0,038	0,085	0,132	0,009	0,015	1,00
20 L	28	0,35	0,50	0,65	0,057	0,123	0,255	0,010	0,006	0,98
25 L	28	0,35	0,50	0,65	0,076	0,198	0,359	0,013	0,005	0,99
30 L	28	0,35	0,50	0,65	0,047	0,113	0,208	0,008	0,007	0,99
5 EAF	28	0,35	0,50	0,65	0,057	0,094	0,123	0,024	0,077	0,99

10 EAF	28	0,35	0,50	0,65	0,076	0,142	0,311	0,014	0,009	0,96
5 CCA	28	0,35	0,50	0,65	0,057	0,123	0,283	0,008	0,004	0,97

Tabela 21 - Coeficiente "C" e "D" da equação $A_c = C/D^{a/ag}$, para cada mistura investigada, idade de 28 dias, cura de 7 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	0,547	0,783	0,859	0,337	0,222	0,95
5 L	28	0,35	0,50	0,65	0,047	0,047	0,094	0,018	0,099	0,86
10 L	28	0,35	0,50	0,65	0,028	0,057	0,113	0,005	0,009	0,98
15 L	28	0,35	0,50	0,65	0,076	0,076	0,132	0,036	0,158	0,86
20 L	28	0,35	0,50	0,65	0,085	0,104	0,189	0,031	0,069	0,93
25 L	28	0,35	0,50	0,65	0,038	0,066	0,123	0,009	0,019	0,98
30 L	28	0,35	0,50	0,65	0,094	0,151	0,255	0,029	0,035	0,98
5 EAF	28	0,35	0,50	0,65	0,019	0,047	0,104	0,002	0,003	0,98
10 EAF	28	0,35	0,50	0,65	0,057	0,085	0,189	0,013	0,018	0,94
5 CCA	28	0,35	0,50	0,65	0,066	0,104	0,151	0,025	0,063	0,99

Assim, a partir da Tabela 18 e Tabela 19 pode-se determinar as relações a/ag para obtenção dos níveis de resistência à compressão de 36,6 MPa e 56,6 MPa, na idade de 28 dias, que 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. Com essas relações a/ag e a equação $A_c = C/D^{a/ag}$, foi possível definir os valores de absorção capilar para esses níveis de resistência à compressão. Na Tabela 22 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 na Figura 16 e Figura 17, visualiza-se os valores de absorção capilar de cada mistura para esses mesmos níveis de resistência à compressão, aos três e sete dias de cura, respectivamente.

Tabela 22 - 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	0,58	0,60	*	0,35	0,7938	0,8375	0,3990	0,4929
5 L	28	0,58	0,66	*	0,47	0,2037	0,0866	0,0858	0,1417

10 L	28	0,68	*	0,47	0,46	0,2214	0,1423	0,1133	0,1072
15 L	28	0,60	0,68	0,46	0,48	0,1162	0,1263	0,0625	0,0682
20 L	28	0,68	*	0,47	0,46	0,3008	0,1992	0,1041	0,1005
25 L	28	*	*	0,46	0,54	0,5514	0,1543	0,1416	0,2114
30 L	28	0,51	0,57	*	0,32	0,1097	0,1938	0,0185	0,0427
5 EAF	28	0,64	0,67	0,48	0,49	0,1261	0,1185	0,0822	0,0859
10 EAF	28	0,60	0,62	0,40	0,43	0,2347	0,1568	0,0950	0,1097
5 CCA	28	0,64	0,68	0,42	0,49	0,2588	0,1641	0,0833	0,1188

* - fora dos limites de confiabilidade.

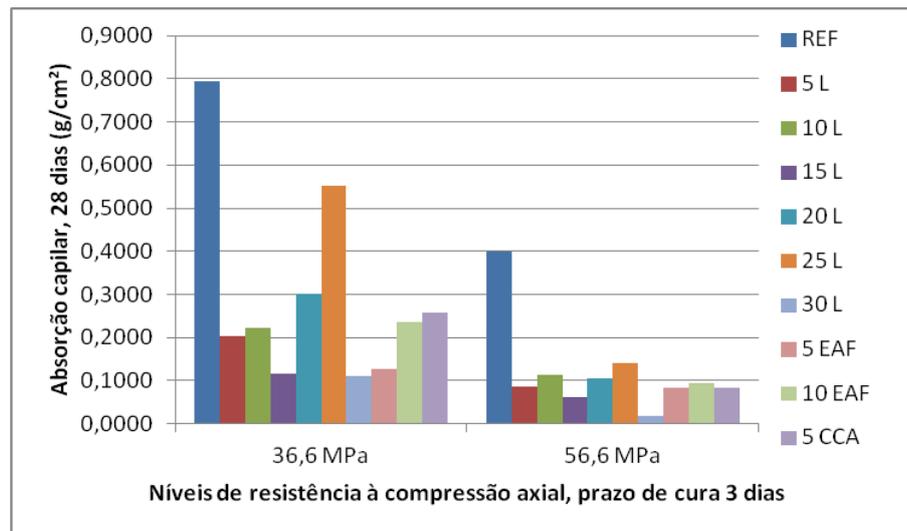


Figura 16 - Absorção capilar correspondente aos níveis de resistência à compressão axial de 36,6 MPa e 56,6 MPa, aos 28 dias, cura de 3 dias.

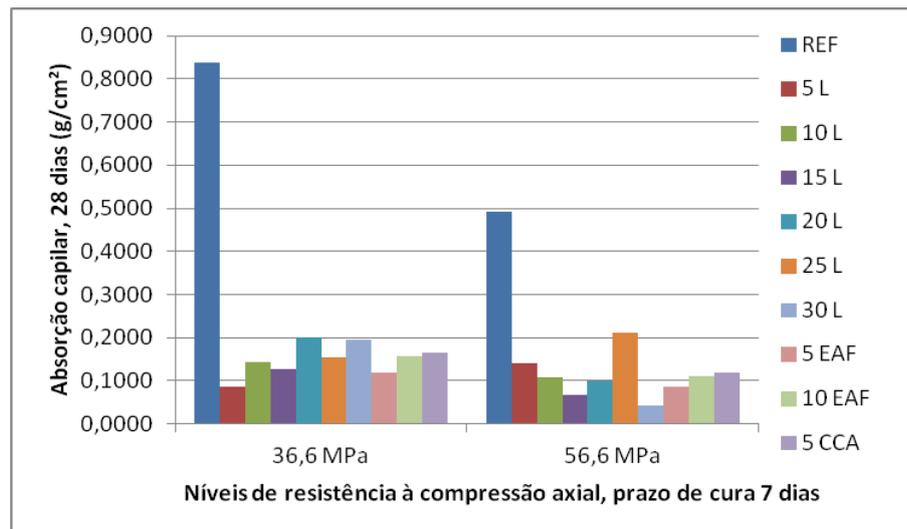


Figura 17 - Absorção capilar correspondente aos níveis de resistência à compressão axial de 36,6 MPa e 56,6 MPa, aos 28 dias, cura de 7 dias.

Conforme apresentado na Tabela 22, Figura 16 e Figura 17, verifica-se, de modo geral, que a substituição parcial de cimento pelas adições minerais, mesmo em diferentes proporções, 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 22, 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 0,51 a 0,68 para o prazo de cura de três dias, e de 0,57 a 0,68 para o prazo de cura de sete dias. Seguindo à exigência da NBR 12655:2006, a respectiva norma fixa valor de relação $a/ag \leq 0,55$, para que o concreto enquadre-se na classe de agressividade III (forte), porém apenas a relação a/ag da mistura 30 L, aos 3 dias de cura, atende à respectiva norma. Entretanto, para o prazo de cura de três dias, os valores de absorção capilar variaram de $0,7938 \text{ g/cm}^3$ (REF, $a/ag = 0,58$) à $0,1097 \text{ g/cm}^3$ (30 L, $a/ag = 0,51$) e, para o prazo de cura de sete dias, os valores de absorção de água por capilaridade variaram de $0,8374 \text{ g/cm}^3$ (REF, $a/ag = 0,60$) à $0,0866 \text{ g/cm}^3$ (5 L, $a/ag = 0,66$). Sendo assim, observa-se que, mesmo para altas relações a/ag , as misturas compostas com CLETA, CCA e EAF apresentaram baixos valores de absorção capilar quando comparadas a mistura referência.

Para o nível de resistência à compressão de 56,6 MPa, as relações a/ag variaram de 0,40 a 0,48, para o prazo de cura de três dias, e de 0,32 a 0,54, para o prazo de cura de sete dias. Assim, constatou-se que a maioria das misturas enquadraram-se no nível de agressividade III (forte), com exceção das misturas 10 EAF e 5 CCA, cura de três dias, e REF, 30 L e 10 EAF, cura de sete dias, que satisfazem as exigências da NBR 12655:2006 para o nível de agressividade IV (muito forte).

Houve redução da absorção capilar das misturas quando a resistência à compressão passou de 36,6 MPa para 56,6 MPa. No prazo de cura de três dias, essa redução foi de 50%, 42%, 51%, 54%, 35%, 26%, 17%, 65%, 40% e 32% para as misturas REF, 5 L, 10 L, 15 L, 20 L, 25 L, 30 L, 5 EAF, 10 EAF e 5 CCA, respectivamente. Para as mesmas misturas e prazo de cura de sete dias a redução foi de 59%, 164%, 75%, 54%, 50%, 137%, 22%, 73%, 70% e 72%, respectivamente. Sendo assim, ao elevar a resistência à compressão de 36,6 MPa para 56,6 MPa, a maior redução na absorção capilar foi verificada nas misturas com cura de sete dias. Este fato pode ser explicado porque os corpos-de-prova com cura de sete dias

terem permanecidos mais tempo em cura úmida, 7 dias, aumentando a hidratação dos concretos nas idades iniciais.

4.5.2 Avaliação da resistividade elétrica, 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, cura úmida, para os níveis de resistência à compressão de 36,6 MPa e 56,6 MPa, tendo como base os valores do respectivo ensaio e coeficientes das equações $f_c = A/B^{a/ag}$ "A", "B" e "R²", conforme Tabela 23, para cura úmida.

Tabela 23 - Coeficientes "A" e "B" da equação $f_c = A/B^{a/ag}$ e coeficientes de determinação, R², das misturas investigadas para a idade de 28 dias, cura úmida.

Mistura	Ensaio (dias)	Relação a/ag			Resistência à compressão axial (MPa)			Coeficientes		
								A	B	R ²
REF	28	0,35	0,50	0,65	54,7	40,7	28,8	116,59	8,48	0,99
5 L	28	0,35	0,50	0,65	56,5	43,5	34,5	99,96	5,18	0,99
10 L	28	0,35	0,50	0,65	66,5	44,0	36,0	131,34	7,73	0,96
15 L	28	0,35	0,50	0,65	67,0	48,5	35,5	140,31	8,31	0,99
20 L	28	0,35	0,50	0,65	69,0	45,6	32,3	165,35	12,56	0,98
25 L	28	0,35	0,50	0,65	71,0	47,8	33,3	170,77	12,48	0,99
30 L	28	0,35	0,50	0,65	65,3	46,3	33,0	144,66	9,73	0,99
5 EAF	28	0,35	0,50	0,65	69,1	53,5	35,6	153,63	9,12	0,99
10 EAF	28	0,35	0,50	0,65	53,8	36,3	24,7	133,23	13,40	0,99
5 CCA	28	0,35	0,50	0,65	72,9	53,7	31,4	202,40	16,57	0,99

Com os valores 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 24.

Tabela 24 - Coeficiente "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 ($\Omega.m$)			Coeficiente		
								E	F	R ²
REF	28	0,35	0,50	0,65	151,1	86,0	65,9	378,60	15,90	0,95
5 L	28	0,35	0,50	0,65	133,4	99,2	73,8	266,12	7,19	0,99

10 L	28	0,35	0,50	0,65	161,0	118,3	92,5	304,18	6,35	0,99
15 L	28	0,35	0,50	0,65	154,4	120,1	96,3	266,47	4,82	0,99
20 L	28	0,35	0,50	0,65	165,3	124,9	108,0	265,56	4,13	0,97
25 L	28	0,35	0,50	0,65	178,9	124,2	102,1	334,63	6,49	0,97
30 L	28	0,35	0,50	0,65	149,7	106,0	82,8	293,88	7,20	0,98
5 EAF	28	0,35	0,50	0,65	186,5	126,5	112,1	323,03	5,46	0,94
10 EAF	28	0,35	0,50	0,65	148,2	126,5	126,0	174,54	1,72	0,87
5 CCA	28	0,35	0,50	0,65	199,2	144,3	158,6	242,44	2,14	0,71

Deste modo, a partir da Tabela 23, 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 91 dias. A partir dessas relações a/ag e a equação $\rho = E/F^{a/ag}$ determinam-se os valores de resistividade elétrica aparente para esses níveis de resistência à compressão. Na Tabela 25 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, na Figura 18, visualizam-se os valores de resistividade elétrica aparente de cada mistura para estes mesmos níveis de resistência à compressão.

Tabela 25 - Relações a/ag e resistividade elétrica aparente (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
REF	28	0,54	0,34	84,7	148,7
5 L	28	0,61	0,35	79,7	134,5
10 L	28	0,62	0,41	95,9	142,2
15 L	28	0,63	0,43	98,1	135,7
20 L	28	0,60	0,42	114,1	145,6
25 L	28	0,61	0,44	106,2	147,5
30 L	28	0,60	0,41	89,2	130,2
5 EAF	28	0,65	0,45	107,5	150,1
10 EAF	28	0,50	0,33	133,3	146,0
5 CCA	28	0,61	0,45	152,6	171,7

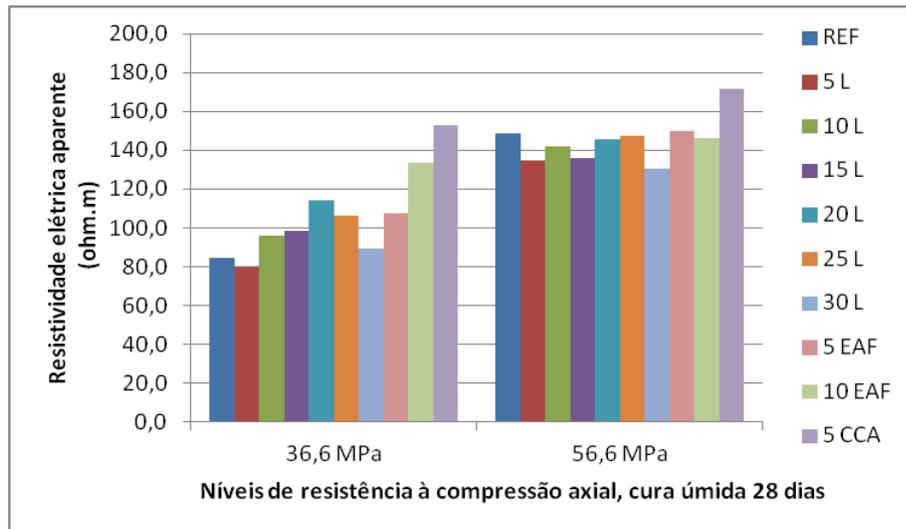


Figura 18 - Resistividade elétrica aparente correspondente aos níveis de resistência à compressão axial de 36,6 MPa e 56,6 MPa, aos 28 dias.

Na Tabela 25, observa-se que para o nível de resistência à compressão de 36,6 MPa, as relações a/ag variam de 0,50 a 0,65. Deste modo, somente REF e 10 EAF enquadram-se na classe de agressividade III (forte), as misturas 20 L e 30 L enquadram-se na classe de agressividade II (moderada) e as demais misturas enquadram-se na classe de agressividade I (fraca), de acordo com a ABNT NBR 12655:2006. Contudo, os valores de resistividade elétrica das misturas variaram de 79,69 $\Omega.m$ (5 L, relação $a/ag = 0,61$) à 152,62 $\Omega.m$ (5 CCA, $a/ag = 0,61$). Assim, observa-se que, as misturas REF, 5L, 10 L, 15 L e 30 L, apresentaram valores de resistividade elétrica que se enquadram com probabilidades de corrosão consideradas altas, de acordo com a Tabela 1. Porém as misturas 20 L, 25 L, 5 EAF, 10 EAF e 5 CCA, apresentam probabilidades de corrosão baixas.

Com a elevação do nível de resistência à compressão de 36,6 MPa para 56,6 MPa, as relações a/ag variam de 0,33 à 0,45. Com isso, todas as misturas satisfizeram as condições de enquadramento ao nível IV (muito forte) de acordo com a ABNT NBR 12655:2006. Porém, os valores de resistividade elétrica das misturas variaram de 130,19 $\Omega.m$ (30 L, relação $a/ag = 0,41$) à 171,71 $\Omega.m$ (5 CCA, relação $a/ag = 0,45$). Logo, observa-se que todas as misturas apresentaram valores de resistividade elétrica com probabilidades de corrosão consideradas baixas, de acordo com a Tabela 1.

Com o aumento da resistência à compressão de 36,6 MPa para 56,6 MPa, ocorreu aumento significativo da resistividade elétrica. Esse aumento foi de 75,6%,

68,7%, 48,3%, 38,3%, 27,6%, 38,9%, 45,9%, 39,7%, 9,5% e 12,5% para as misturas REF, 5 L, 10 L, 15 L, 20 L, 25 L, 30 L, 5 EAF, 10 EAF e 5 CCA, respectivamente. Logo, constatou-se dentro da idade e resistências à compressão especificadas, que todas as misturas tiveram aumento de REA com a diminuição da relação a/ag e o aumento da resistência à compressão, fato também observado por Rosa (2005) e Mostardeiro Neto (2011).

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A fim de atingir os objetivos pré-estabelecidos, foi analisado, nesta pesquisa, a viabilidade de uso da cinza de lodo de ETA no concreto, como substituição parcial ao cimento Portland, em algumas características de durabilidade como a resistividade elétrica e a absorção capilar. As conclusões finais são apresentadas a seguir:

- Foi verificada se a substituição parcial do cimento Portland por diferentes teores de cinza de lodo de ETA confere benefícios ao concreto no que diz respeito à resistividade elétrica e a absorção capilar. Constatou-se que a utilização de cinza de lodo de ETA confere benefícios ao concreto em relação à resistividade elétrica aparente a partir de 10% de substituição e a partir de 5% para a absorção capilar.
- Foi verificado como varia a resistividade elétrica aparente e a absorção capilar com a elevação da relação a/ag e o grau de hidratação. Constatou-se que a resistividade elétrica aparente aumenta com a redução da relação a/ag e aumento no grau de hidratação e a absorção capilar diminui com a redução da relação a/ag e aumenta com o grau de hidratação.
- Foi verificado o comportamento de misturas ternárias e quaternárias (cimento, CLETA e escória de alto forno e cimento, CLETA, cinza de casca de arroz e escória de alto forno) nas propriedades investigadas. Constatou-se que as mesmas apresentam melhores desempenhos quando comparadas as misturas binárias, compostas por CLETA e cimento Portland.
- Foi analisado como se comporta a resistividade elétrica aparente e a absorção capilar das misturas investigadas para um determinado nível de resistência à compressão axial especificada. Verificou-se que de modo geral, a substituição parcial de cimento pelas adições minerais, mesmo em diferentes proporções, proporcionou aumento na resistividade elétrica aparente e redução na absorção capilar das misturas investigadas, para os dois níveis de resistência à compressão estabelecidos, 36,6 MPa e 56,6 MPa.

5.1 Considerações finais

Como continuidade deste trabalho, objetivando analisar a viabilidade técnica do uso da cinza de lodo de ETA bem como as misturas ternárias e quaternárias, sugere-se o estudo de outras propriedades relacionadas à durabilidade do concreto, mencionadas a seguir:

- Penetração de cloretos
- Carbonatação
- Permeabilidade ao oxigênio
- Hidróxido de cálcio remanescente
- Composição da solução dos poros
- Retração por secagem
- Calorimetria de condução
- Porosimetria de mercúrio
- Condutividade elétrica

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.

AÏTCIN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho**. 1ª Ed. PINI. São Paulo, 2000. 667p.

ANDRADE, C. **Manual: Inspección de Obras Dañadas por Corrosión de Armaduras**. Madrid, 1988. 122p.

ANDRADE, C.; ALONSO, C.; GULIKERS, J.; POLDER, R.; CIGNA, R.; O. VENNESLAND; SALTA M.; RAHARINAIVO A.; ELSENER B. **Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method**. Materials and Structures, Nov. 2004, Vol. 37. pp. 623-643.

ANDRADE, J. J. O.; TUTIKIAN, B. F. Resistência Mecânica do Concreto. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 615-651.

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

_____. **NBR 5735**: Cimento Portland de alto-forno. 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 7117**: Medição da Resistividade do Solo pelo Método dos Quatro Pontos (Wenner). Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. **NBR 9204**: Concreto endurecido — Determinação da resistividade elétrica-volumétrica — Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. **NBR 9779:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. **NBR 10004:** Resíduos sólidos-classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 12653:** Materiais Pozolânicos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

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

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.

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.

BATALHA, C. T.; ROCHA, F. S.; REIS, H. C.; VASCONCELOS, R. P.; SÁ, R. J.; VIEIRA, R. Q. **Utilização do lodo de Estação de Tratamento de Água como adição ao concreto de cimento Portland.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 51, 2009, Curitiba - PR. **Anais.** Curitiba: IBRACON, 2009.

BATALHA, C. T.; ROCHA, F. S. **Caracterização do lodo calcinado das estações de tratamento de água da cidade de Manaus.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 55, 2013, Gramado - RS. **Anais.** Gramado: IBRACON, 2013.

BATALHA, C. T.; ROCHA, F. S. **Avaliação das propriedades das argamassas com substituição parcial de cimento por cinza de lodo da estação de tratamento de água da cidade de Manaus.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 56, 2014, Natal – RN. **Anais.** Natal: IBRACON, 2014.

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.

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.

BÜRCHLER, D.; ELSNER, B.; BÖHNI, H. Electrical resistivity and dielectric properties of hardened cement and mortar, **Institute of Materials Chemistry and Corrosion**, Swiss Federal Institute of Technology, ETH Hönggerber, CH-8093 Zurich, Switzerland, 1996.

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.

CASCUDO, O; CARASEK, H. – **Ação da Carbonatação no Concreto – Concreto: Ciência e Tecnologia**, volume I, IBRACON, São Paulo, 2011.

CASTRO, P. et al. **Chloride Penetration Profiles in Marine Environments**. In: II International Congress on High-Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures. Proceedings. Malhotra, Prudêncio, Helene e Dal Molin (Eds.) SP186-22. Gramado, 1999. p. 371-389.

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.

CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **Levantamento dos níveis de produção de aço e ferro-gusa, cenário em 2020 – Ênfase: Usos da energia gerada na combustão dos gases da carbonização**. p. 33. 2014.

CLIFTON, J. R. **Predicting the Service Life of Concrete**. ACI Materials Journal, v. 90, n. 6 p. 611-617, 1993.

Conab – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acomp. safra bras. grãos**, v. 1 - Safra 2013/14, n. 3 - Terceiro Levantamento, Brasília, p. 1-72, dez. 2013

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.

COSTA, P. E. F. **Influencia da finura e teor de escória na penetração de cloretos no concreto**. Santa Maria, 2001, 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.

DI BERNARDO et al. **Métodos e Técnicas de Tratamento e Disposição dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento e Água**. 2012. São Paulo: LDiBe, 2012. 530 p.

EWINS, A. J. Resistivity measurements in concrete. **British Journal of NDT**, v. 32, n. 3, p. 120 – 126, March 1990.

FERREIRA, A. A. **Influência da temperatura de queima da cinza de casca de arroz na pozolanicidade 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.

FONSECA, G. C. **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica**. Belo Horizonte, 2010, 105 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

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.; SACIOTO, 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.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996. 345p.

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.

GONZÁLEZ, J. A. et al. **Some Questions on the Corrosion of Steel in Concrete – Part I: When, How and How Much Steel Corrodes**. *Materials and Structures*. V. 29, 1996. p. 40-46.

HELENE, P. **Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado**. São Paulo, 1993, 271 p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

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

HENGEN, M. F.; **Caracterização de cinza de lodo de ETA para uso no concreto - (resistência à compressão axial)**. Santa Maria, 2014, 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

HOFFMANN, A. T. **Influência da adição de sílica ativa, relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em concretos**. Porto Alegre, 2001, 143 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

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.; SACIOTO, A. P. Influência do teor de cinza de casca de arroz na resistividade elétrica do concreto. In: 47º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO – CBC 2005, 2005. **Anais ...** São Paulo: CBC, 2005. V. 5, trabalho 47CBC0143, p. V933-944.

HUNKELER, F. The Resistivity of Pore Water Solution - A decisive parameter of rebar corrosion and repair methods. **Construction and Building Materials**, v. 10, n. 5, p. 381- 389, 1996.

HUSSAIN, S.; AL-MUSALLAM, A.; AL-GAHTANI, A. **Factors Affecting Threshold Chloride for Reinforcement Corrosion in Concrete**. *Cement and Concrete Research*, v. 25, nº 7, 1995. p. 1543-1555.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Rio de Janeiro. 2010.

ISAIA, G. C. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concretos de elevado desempenho**: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura. São Paulo, 1995. 280p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de 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.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G.; MEIRA, L.; DUART, M.; ZERBINO, R. Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural. Parte I: propriedades mecânicas e microestrutura. **Ambiente construído**, v. 10, n. 1, Porto Alegre, Jan/Mar. 2010.

JACOMINO, V. M. F. *et al.* **Controle ambiental das indústrias de produção de ferro gusa em altos-fornos a carvão vegetal**. Belo Horizonte: Projeto Minas Ambiente, 2002. 302 p. ISBN: 85-88669-0566.

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.

KELM, T. A.; SOKOLOVICZ, B. C.; CANTARELLI, G. M.; **Análise da microestrutura, resistência e durabilidade em concretos com substituição parcial de cimento por microssílica da cinza de casca de arroz**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 56, 2014, Natal - RN. **Anais**. Gramado: IBRACON, 2014.

LAKSHMINARAYANAN, V.; RAMESH, P. S.; RAJAGOPALAN, S. R. A new technique for the measurement of the electrical resistivity of concrete. **Magazine of Concrete Research**. V. 44 n. 158, 47 – 52, mar. 1992.

LIMA, M. S.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. de A.; NASCIMENTO, J. W.B. do; LEAL, A. F. **Utilização do resíduo de caulim em blocos de vedação**. Revista Escola de Minas, v.61, p.285-290, 2008.

LOPES, A. N. M.; SILVA, E. F.; NEPOMUCENO, A. A. Avaliação da durabilidade de concretos com e sem adição de sílica ativa para resistência entre 50 e 60 MPa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 41. São Paulo, 1999. **Anais**. Artigo 3-1-03. São Paulo: IBRACON, 1999.

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.

NUNES, D. G.; GASTALDINI, A. L. G.; ZAMBERLAM, F.; ISAIA, G. C.; ALMEIDA JR, P. O. B.; BATAGLIN, F. S.; NASCIMENTO, B. S.; PAPPIS, F. **Influência da carbonatação acelerada em concretos compostos com cinza de casca de arroz**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 55. Gramado – RS. **Anais...** Gramado: IBRACON, 2013.

MASSAZZA, F. Pozzolanic cements. **Magazine of Concrete Research**. V. 15, p. 185-214, 1993.

MEDEIROS, M. H. F.; ANDRADE, J. J. O.; HELENE, P. Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. In: ISAIA, G. C.; **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo, IBRACON, 2011. 1v.

MEDEIROS FILHO, S. **Fundamentos de medidas elétricas**. 2 ed. Recife: Universitária. Universidade Federal de Pernambuco. 1979. 307p.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A. **Estudo da resistividade do concreto para proposta de modelagem de vida útil – corrosão das armaduras devido à penetração de cloretos**. 2014. Tese (doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica. Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA. São José dos Campos, São Paulo, 2014.

MEHTA, P. K., AİTCIN, P. C. Microstructural basis of selection of materials and mix proportions for high strength concrete. In: HESTER, W. (ed) International Conference on Utilization of High Strength Concrete, 2nd, 1990, Berkeley. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1990a. p. 265-287 (SP-121).

MEHTA. P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1994. 573p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MILLARDS, S. G.; HARRISON, J. A.; EDWARDS, A. J. Measurements of the electrical resistivity of reinforcement concrete structures for the assessment of corrosion risk. **British Journal of NDT**. V. 31, n. 11, p. 617-621, nov. 1989.

MIZUMOTO, C.; SALLES, F. M. Efeitos da aplicação de escória granulada de alto forno em diferentes finuras em composições de argamassa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 54. Maceió – AL. **Anais**. Maceió: IBRACON, 2012.

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**. p. 35 – 49, may 1968.

MOSTARDEIRO NETO, C. Z. **Absorção capilar e resistividade elétrica de concretos compostos com cinza de casca de arroz de diferentes teores de carbono grafítico**. Santa Maria. 2011. 165 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

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

OLIVEIRA, C. T. A. **Água do poro de pastas de cimento de escória**. 2000. 162 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

V. BAROGHEL-BOUNY, B. CAPRA, S. LAURENS. A durabilidade das armaduras e do concreto de cobrimento. In: OLIVIER, J.P; VICHOT, A. **DURABILIDADE DO CONCRETO: bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. Tradução: Oswaldo Cascudo e Helena Carasek – Universidade Federal de Goiás. Ed. IBRACON, 2014. 255-326 p.

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.

PRESUEL-MORENO, F.; WU, Y.-Y.; LIU, Y. Effect of curing regime on concrete resistivity and aging factor over time. **Construction and Building Materials**, v.48, p. 874-882, 2013.

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.

REGATTIERI, C. E. X., SILVA, M. G., HELENE, P. et al. Contribuição ao estudo das propriedades do concreto com vistas à durabilidade. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES. **Anais...** p. 480-491. Florianópolis. 1996.

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: 48º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - IBRACON, 2006, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: - IBRACON, 2006.

RIBEIRO, D.V.; **Corrosão em estruturas de concreto Armado: teoria, controle e métodos de análise**. Rio de Janeiro: Editora Elsevier, 2014.

RICHTER, C.A. **Tratamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água**. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 2001.

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.

SANTOS, S. **Produção e Avaliação do Uso de Pozolana com Baixo Teor de Carbono Obtida da Cinza de Casca de Arroz Residual para Concreto de Alto Desempenho**. 2006. 187 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SOKOLOVICZ, B. C.; ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G.; **Microestrutura e propriedades mecânicas de protótipos de concreto com cinza de casca de arroz com e sem moagem prévia**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 56. Natal – RN. **Anais...** Natal: IBRACON, 2014.

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.

TASHIMA, M. M.; SOUZA, L. C.; AKASAKI, J. L.; SILVA, E. J.; MELGES, J. L. P.; PAYÁ, J. J. B. **Reuse of rice husk ash in building constructions**. *Holos Environment*, v.11, p.81-89, 2011.

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.

TSUTUYA, M. T.; HIRATA, A. Y. Aproveitamento e Disposição Final de Lodos de Estação de Tratamento de Água do Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 2001, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: ABES, 2001.

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.

TUUTTI, K. **Corrosion of Steel in Concrete**. Swedish Cement and Concrete Research Institute. Stockholm, Suecis, 1982. 469p.

VEIGA, K. K.; ZANELLA, A. K.; MORO, A. S.; SEVERO, D. D.; BOLSON, F.; ENGEL, M. K.; GASTALDINI, A. L. G. **Absorção Capilar de Concretos com Cimento Portland Branco e Elevados Teores de Escória de Alto Forno**. In: IX Salão de Iniciação Científica, 2008, Porto Alegre. PUCRS, 2008.

VEIGA, K. K. **Desempenho do cimento Portland branco com escória de alto-forno e ativador químico frente ao ataque por sulfato de sódio**. Santa Maria, 2011, 209 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

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. 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 microssilica sobre a vida útil de componentes de concreto armado atacados por íons cloretos. In: 7º CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS – CINPAR 2011, 2011, Fortaleza. **Anais**. Fortaleza: CINPAR, 2011.