



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

**RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE CONCRETOS DE
CIMENTO PORTLAND BRANCO E ELEVADOS
TEORES DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

André Lübeck

Santa Maria, RS, Brasil

2008

**RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE CONCRETOS DE
CIMENTO PORTLAND BRANCO E ELEVADOS TEORES DE
ESCÓRIA DE ALTO FORNO**

por

André Lübeck

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

Orientador: Prof. Dr. Antônio Luiz Guerra Gastaldini

Santa Maria, RS, Brasil

2008

**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 DE CONCRETOS DE CIMENTO
PORTLAND BRANCO E ELEVADOS TEORES DE ESCÓRIA DE ALTO
FORNO**

elaborada por

André Lübeck

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

Comissão examinadora:

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

Tatiana Cureau Cervo, Dr. (UNIPAMPA, RS)

Cláudio de Souza Kazmierczak, Dr. (UNISINOS, RS)

Santa Maria, 03 de março de 2008

Dedico este trabalho aos meus pais Ilva e Valdelírio, minhas irmãs Elisa e Irina, a Maristela e a meus sogros Nelcinda e Paulo. Também aos meus amigos e familiares. Que todos saibam que sempre sou grato por tê-los.

AGRADECIMENTOS

Deixo aqui meus agradecimentos a todas as pessoas e entidades que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho. Seja pelo apoio moral, intelectual e até mesmo financeiro. A todos, muito obrigado.

Ao professor Antônio L. G. Gastaldini, pela dedicada orientação, paciência e amizade. E pela plena consciência de sua importância nesta fase de minha formação.

Ao professor Geraldo C. Isaia pelos sólidos conhecimentos transmitidos ao longo da convivência no curso de pós-graduação.

Ao professor Carlos S. Kazmierczak por aceitar gentilmente fazer parte da banca de avaliação deste trabalho.

A professora Tatiana C. Cervo pela dedicação, apoio e por aceitar fazer parte desta banca.

Aos meus colegas de pós-graduação Henrique C. Siqueira e Daniel S. Barin, pelo companheirismo, amizade e camaradagem.

Aos alunos bolsistas de iniciação científica participantes do Grupo de Pesquisas em Concreto (GEPECON/UFSM), Antônia S. Moro, Dilnei D. Severo, Ivan P. Bolzzon, Karina K. Veiga, Marcelo D. de Oliveira, Marcela K. Engel, Mauren N. Ferrari e Andriago Zanella pela ajuda no preparo dos materiais, moldagens e execução dos ensaios.

Ao Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC/UFSM) pelos equipamentos e instalações cedidos.

As empresas Votorantim Cimentos, Reitex e Cimento Mizzu pelo fornecimento dos materiais que viabilizaram esta pesquisa.

Ao CNPq e a CAPES pelos recursos financeiros.

A Universidade Federal de Santa Maria e ao Centro de Tecnologia que tão bem me acolheram, permitiram minha formação como engenheiro civil e agora propiciam mais esse passo.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil
Universidade Federal de Santa Maria

RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE CONCRETOS DE CIMENTO PORTLAND BRANCO E ELEVADOS TEORES DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO

AUTOR: ANDRÉ LÜBECK
ORIENTADOR: ANTÔNIO LUIZ GUERRA GASTALDINI
Data e Local da Defesa: Santa Maria, 03 de março de 2008.

A resistividade elétrica é uma importante propriedade do concreto por permitir avaliar a facilidade de acesso de agentes agressivos antes de instalado o processo corrosivo e estimar a velocidade do mesmo depois de instalado, sendo conjuntamente com a disponibilidade de oxigênio um dos parâmetros determinantes para a velocidade da corrosão. Este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de concretos de cimento Portland branco com elevados teores de escória de alto forno e ativação química quanto à resistividade elétrica aparente. Foram avaliadas além da resistividade outras grandezas como resistência à compressão, porosidade e condutividade específica da solução dos poros. Foram investigadas quatro misturas, uma de referência contendo apenas cimento, uma segunda com teor de substituição de cimento por escória de 50%, outra com teor de substituição de 70% e uma última contendo 50% de escória e ativador alcalino, Na_2SO_4 , em um teor de 4%. As relações água/aglomerante foram fixadas em 0,30, 0,42 e 0,55 para todas as misturas. A medida da resistividade elétrica foi realizada através do método dos quatro eletrodos (Wenner). A resistividade elétrica se mostrou dependente da idade, relação a/ag e teor de escória, principalmente, em função das alterações que estas proporcionam na estrutura de poros da pasta. A resistividade cresceu proporcionalmente ao aumento do teor de escória. O aumento do teor de escória resultou também em menor condutividade da solução aquosa e refinamento da estrutura de poros da pasta. Por outro lado, a resistência à compressão diminuiu com o crescimento do teor de escória. Os maiores valores de resistividade elétrica foram apresentados pela mistura contendo 70% de escória. Esta mistura se mostrou a de melhor relação custo/benefício quando se fixaram valores de resistência à compressão de 35 e 55 MPa, aos 28 dias, e 60 MPa, aos 91 dias.

Palavras-chave: Concreto; resistividade elétrica; cimento Portland branco; escória de alto forno.

ABSTRACT

Master's Thesis
Civil Engineering Postgraduation Program
Santa Maria's Federal University, RS, Brazil

ELECTRICAL RESISTIVITY OF WHITE PORTLAND CEMENT CONCRETES AND HIGH BLAST FURNACE SLAG CONTENT

AUTHOR: ANDRÉ LÜBECK
THESIS ADVISOR: ANTÔNIO LUIZ GUERRA GASTALDINI
Santa Maria, the 3th of March, 2008.

The electrical resistivity is an important concrete property that allows evaluating the access facility of aggressive agents before the corrosion process begins and estimates the velocity of the same process after it begun. The electrical resistivity and the oxygen availability are the characteristics that control the corrosion velocity. This work aimed to evaluate the performance of white Portland cement concretes with high blast furnace slag content and chemical activation on the electrical resistivity. Other properties were measured, as axial compressive strength, porosity and specific electrical conductivity of pore solution. Four mixtures were tested, a reference one, only with white Portland cement as binder, a second one, with 50% of blast furnace slag in substitution of cement, other with 70% slag content, and the last one, with 50% of slag and alkaline activation, 4% of Na₂SO₄. The water/binder ratios were fixed at 0,30, 0,42 and 0,55 for all samples. The electrical resistivity was measured using the four electrode method (Wenner method). The sample age, water/binder ratio and the slag content have an expressive effect over the electrical resistivity, especially because it results in changes of the pore structure. The electrical resistivity grows as the amount of slag increases. The increase of slag amount also results in smaller specific electrical conductivity of pore solution and pore structure refinement. On the other hand, the axial compressive strength decreases as the slag amount increases. The biggest resistivity results were obtained for the mixture with 70% of slag. This mixture showed the best cost/benefit ratio as compressive strength were fixed at 35 and 55 MPa, at 28 days, and 60 MPa, at 91 days.

Keywords: Concrete; electrical resistivity; white Portland cement; blast furnace slag.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Modelo de vida útil em função da corrosão proposto por Tuutti (1982).....	25
Figura 2.1	Influência do grau de saturação do concreto sobre a relação resistividade versus relação a/ag (GjØrv et al., 1977).....	36
Figura 2.2	Resistividade versus consumo de cimento. (Hughes 1986).....	38
Figura 2.3	Variação da condutividade ao longo do tempo. (Princigallo et al., 2003).....	39
Figura 2.4	Resistividade elétrica de concretos com adições minerais para diferentes prazos de cura. (Wee et al., 2000).....	42
Figura 2.5	Resistividade elétrica versus temperatura. (Hope et al., 1985).....	45
Figura 2.6	Resistividade elétrica em função da umidade e concentração de Cl^- (Saleem et al., 1996).....	49
Figura 2.7	Resistividade elétrica em função da umidade e concentração de Cl^- para um teor de SO_4^{2-} de 7,2 kg/m ³ no concreto (Saleem et al., 1996)..	50
Figura 2.8	Resistividade elétrica versus carbonatação. (Chi et al., 2002).....	51
Figura 2.9	Esquema do método dos quatro eletrodos (Gowers & Millard, 1999).	52
Figura 2.10	Influência das dimensões do corpo-de-prova sobre a resistividade elétrica (Gowers & Millard, 1999).....	53
Figura 2.11	Influência da corrente sobre a resistividade. (Millard et al. 1989).....	55
Figura 2.12	Influência da frequência sobre a resistividade. (Millard et al. 1989)...	55
Figura 3.1	Museu Iberê Camargo.....	58

Figura 3.2	Resultados de taxa de absorção de Kirchheim (2003).....	62
Figura 3.3	Resultados de penetração a cloretos de Mattos & Dal Molin (2003)...	62
Figura 3.4	Tempos de início e fim de pega de Regis et al. (2005).....	63
Figura 3.5	Grau de orientação do CH na interface pasta/agregado, (Bijen, 1996).	69
Figura 3.6	Concentração de cloretos, (Basheer et al., 2002).....	72
Figura 3.7	Difusão de íons cloreto em função do teor de EAF, (Bijen, 1996).....	73
Figura 3.8	Perda de abatimento, (Collins & Sanjayan, 1999).....	79
Figura 3.9	Resistência à compressão, (Collins & Sanjayan, 1999).....	79
Figura 4.1	Granulometria do agregado miúdo.....	86
Figura 4.2	Granulometria do agregado graúdo.....	86
Figura 4.3	Corpos-de-prova prismáticos para ensaio de resistividade elétrica.....	91
Figura 4.4	Esquema do ensaio de resistividade elétrica.....	92
Figura 4.5	Ensaio de resistividade elétrica sendo executado.....	93
Figura 5.1	Resistências à compressão obtidas experimentalmente.....	97
Figura 5.2	Curvas de Abrams para a resistência à compressão das misturas testadas.....	97
Figura 5.3	Crescimento da resistência das diferentes misturas avaliadas.....	98
Figura 5.4	Valores de resistência para as misturas 50E e 50A.....	99
Figura 5.5	Comparação entre as resistências do CBP e CPV ARI.....	101
Figura 5.6	Curvas exponenciais para as misturas testadas.....	104
Figura 5.7	Crescimento dos valores de resistividade a partir das exponenciais.....	104
Figura 5.8	Resultados de condutividade elétrica da solução dos poros.....	110
Figura 5.9	Volume de mercúrio intrudido para a idade de 28 dias.....	112
Figura 5.10	Volume de mercúrio intrudido para a idade de 91 dias.....	112
Figura 5.11	Teor de poros menores que 50 nm.....	113
Figura 5.12	Volumes de intrusão de mercúrio obtidos por Rosa (2005) e nesta pesquisa.....	114
Figura 5.13	Resistividade elétrica versus resistência à compressão aos 91 dias.....	114
Figura 5.14	Resistividade elétrica versus condutividade específica aos 91 dias.....	115
Figura 5.15	Relação entre a resistividade e o volume total de mercúrio intrudido..	116
Figura 5.16	Relação entre a resistividade e o diâmetro crítico.....	116
Figura 5.17	Custo das misturas avaliadas.....	121
Figura 5.18	R\$/m ³ versus resistência à compressão aos 28 dias.....	123

Figura 5.19	R\$/m ³ versus resistência à compressão aos 91 dias.....	123
Figura 5.20	R\$/m ³ versus resistividade aos 28 dias.....	126
Figura 5.21	R\$/m ³ versus resistividade aos 91 dias.....	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Risco de corrosão em função de ρ	34
Tabela 2.2	Relação entre a resistividade elétrica e a probabilidade de corrosão proposta pelo CEB 192.....	34
Tabela 2.3	Misturas testadas por Ramezaniyanpour & Malhotra (1995).....	44
Tabela 3.1	Resultados de resistência à compressão de Kirchheim (2003).....	61
Tabela 3.2	Resultados de resistência à compressão de Rizzon et al. (2006).....	64
Tabela 3.3	Cimentos de alto forno e pozolânico, regulamentação ABNT.....	67
Tabela 3.4	Misturas testadas por Basheer et al. (2002).....	72
Tabela 3.5	Misturas testadas por Collins & Sanjayan (1999).....	78
Tabela 4.1	Propriedades físico-mecânicas do cimento Portland branco.....	84
Tabela 4.2	Composição dos aglomerantes empregados (% em massa).....	84
Tabela 4.3	Proporção entre os aglomerantes testadas (% em massa).....	85
Tabela 4.4	Características físicas dos agregados.....	87
Tabela 4.5	Traços unitários estudados.....	88
Tabela 4.6	Consumo dos materiais em quilos por metro cúbico de concreto.....	89
Tabela 4.7	Condutividade equivalente dos íons em concentração infinita a 25 °C	94
Tabela 5.1	Resultados de resistência à compressão.....	96
Tabela 5.2	Coefficientes da equação de Abrams e coeficientes de determinação...	96
Tabela 5.3	Índices de resistência.....	98
Tabela 5.4	Coefficientes da equação de Abrams e coeficientes de determinação obtidos por Rosa (2005).....	100
Tabela 5.5	Resistências à compressão obtidas por Rosa (2005) e índices de resistências entre o CPB e o CPV.....	101

Tabela 5.6	Resultados de resistividade elétrica aparente medidos.....	103
Tabela 5.7	Coefficientes das equações exponenciais para a resistividade elétrica..	103
Tabela 5.8	Índices de resistividade calculados.....	105
Tabela 5.9	Relação entre as resistividades elétricas das misturas 70E e 50E e misturas 50A e 50E.....	106
Tabela 5.10	Relação entre a resistividade elétrica e a probabilidade de corrosão proposta pelo CEB 192.....	106
Tabela 5.11	Probabilidade de corrosão para as misturas avaliadas segundo o critério do CEB 192.....	107
Tabela 5.12	Resultados de resistividade elétrica aparente obtidos por Rosa (2005)	107
Tabela 5.13	Razão entre as resistividades obtidas nesta pesquisa e os valores de Rosa (2005).....	108
Tabela 5.14	Condutividade elétrica específica calculada para a solução dos poros.	109
Tabela 5.15	Resultados de porosimetria por intrusão de mercúrio.....	111
Tabela 5.16	Coefficientes das equações exponenciais obtidos para a idade de 28 dias.....	118
Tabela 5.17	Coefficientes das equações exponenciais obtidos para a idade de 91 dias.....	118
Tabela 5.18	Relações água/aglomerante e resistividades elétricas obtidas.....	118
Tabela 5.19	Preço dos insumos usados na pesquisa.....	120
Tabela 5.20	Quantidades de materiais para execução das misturas e custo por metro cúbico.....	121
Tabela 5.21	R\$/MPa para as misturas testadas.....	122
Tabela 5.22	R\$/kohm.cm para as misturas testadas.....	125
Tabela 5.23	Análise de custos fixando o valor da resistência à compressão aos 28 dias.....	128
Tabela 5.24	Análise de custos fixando o valor da resistência à compressão aos 91 dias.....	129

LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS

a	Distância média entre os eletrodos no ensaio de resistividade elétrica
a/ag	Relação água/aglomerante em massa
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing Materials
b	Profundidade média dos eletrodos no ensaio de resistividade elétrica
C₃A	Aluminato tricálcico
C₂S	Silicato bicálcico
C₃S	Silicato tricálcico
C₄AF	Ferroaluminato tetracálcico
Ca²⁺	Íon cálcio
CaCl₂	Cloreto de cálcio
CaCO₃	Carbonato de cálcio
CAD	Concreto de alto desempenho
Ca(OH)₂	Hidróxido de cálcio
CCA	Cinza de casca de arroz
CEB	Comitê Europeu do Concreto
CH	Hidróxido de cálcio
Cl⁻	Íon cloreto
Cl⁻/OH⁻	Quociente entre o teor de íons cloreto e hidroxila em massa
CO₂	Dióxido de carbono
CPB	Cimento Portland Branco

CP	Cimento Portland
C/S	Relação entre cal (CaO) e sílica (SiO ₂)
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
CV	Cinza volante
d	Distância média entre os eletrodos no ensaio de resistividade elétrica
d_{max}	Diâmetro máximo do agregado
e⁻	Elétron
EAF	Escória de alto forno
f_c	Resistência à compressão
Fe	Átomo de ferro
Fe⁺²	Íon ferro
Fe(OH)₂	Dióxido de ferro
GEPECON	Grupo de estudos e pesquisa em concreto
H₂O	Molécula de água
H₂S	Gás sulfídrico
Hz	Hertz
i	Corrente elétrica
KOH	Hidróxido de potássio
m	Teor em massa de agregado nas misturas de concreto
NaCl	Cloreto de sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
Na₂SO₄	Sulfato de sódio
NBR	Norma Brasileira
NH⁺⁴	Íon amônio
NO⁻³	Íon nitrito
O₂	Molécula de oxigênio
OH⁻	Íon hidroxila
pH	Potencial de hidrogênio
REA	Resistividade elétrica aparente
R²	Coeficiente de determinação
S⁻¹	Íon sulfeto
SA	Sílica ativa
SO₂	Dióxido de enxofre

SO₃	Trióxido de enxofre
SO₄⁻	Íon sulfato
T	Temperatura
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
U.R.	Umidade relativa
V	Diferença de potencial elétrico (tensão)
μA	Micro-ampére
μm	Micro-metro
Ø	Diâmetro
Ω	Ohm
ρ	Resistividade elétrica aparente
λ	Condutividade elétrica

SUMÁRIO

RESUMO.....	6
ABSTRACT.....	7
LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE TABELAS.....	11
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	13
INTRODUÇÃO.....	19
1. Corrosão das armaduras.....	22
1.1 Considerações iniciais.....	22
1.2. A corrosão das armaduras no concreto.....	23
1.2.1. Período de iniciação.....	25
1.2.1.1. Corrosão generalizada – carbonatação.....	26
1.2.1.2. Corrosão por pites – cloretos.....	26
1.2.2. Período de propagação.....	29
1.3. Efeitos da corrosão.....	30
2. Resistividade Elétrica.....	32
2.1. Considerações iniciais.....	32
2.2. Propriedades do concreto relacionadas à resistividade.....	35
2.2.1. Relação água/aglomerante.....	35
2.2.2. Composição e consumo de cimento.....	36
2.2.3. Tipo e teor de agregados.....	38
2.2.4. Aditivos.....	39
2.2.5. Adições Minerais.....	40
2.3. Efeitos da exposição sobre a resistividade.....	43
2.3.1. Cura.....	43
2.3.2. Temperatura.....	45
2.3.3. Teor de umidade ou grau de saturação.....	46
2.3.4. Agentes agressivos e contaminantes.....	48

2.4. Medida da resistividade.....	51
2.4.1. Geometria do corpo-de-prova.....	52
2.4.2. Contato entre os eletrodos e o concreto.....	54
2.4.3. Tipo de onda, frequência e intensidade da corrente elétrica.....	54
2.4.4. Heterogeneidade do concreto.....	55
2.4.5. Presença de armaduras.....	56
3. O Concreto de Cimento Portland Branco e a Escória de Alto Forno.....	57
3.1. Cimento Portland Branco.....	57
3.2. A escória de alto forno.....	66
4. Metodologia.....	82
4.1. Considerações iniciais.....	82
4.2. Definição das variáveis.....	82
4.3. Caracterização dos materiais.....	83
4.3.1. Cimento.....	83
4.3.2. Escória de Alto forno.....	84
4.3.3. Agregados.....	85
4.3.4. Aditivo.....	87
4.3.5. Água.....	87
4.3.6. Ativador químico.....	87
4.4. Dosagem dos concretos.....	88
4.5. Moldagem, Cura e armazenamento dos corpos-de-prova.....	89
4.5.1. Concreto.....	89
4.5.2. Pasta.....	90
4.6. Ensaio do concreto.....	90
4.6.1. Resistência à compressão.....	90
4.6.2. Resistividade elétrica aparente.....	91
4.7. Ensaio em pasta.....	94
4.7.1. Solução aquosa dos poros.....	94
4.7.2. Ensaio da porosimetria por intrusão de mercúrio.....	95
5. Resultados e discussão.....	96
5.1. Resistência à compressão.....	96
5.2. Resistividade elétrica aparente.....	102
5.3. Condutividade elétrica.....	109

5.4. Porosimetria por intrusão de mercúrio.....	111
5.5. Integração dos resultados.....	114
5.5.1. Resistividade elétrica aparente versus resistência à compressão.....	114
5.5.2. Resistividade versus condutividade elétrica específica da solução dos poros.....	115
5.5.3. Resistividade versus volume de intrusão de mercúrio e diâmetro crítico.....	116
5.5.4. Avaliação da resistividade estabelecendo níveis de resistência à compressão.....	117
5.6. Análise de custos.....	120
5.6.1. Análise em igualdade de relação água/aglomerante.....	120
5.6.2. Análise em igualdade de resistência à compressão.....	127
CONCLUSÕES.....	132
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	136

INTRODUÇÃO

A construção civil brasileira passa por uma fase intensa de modernização e equiparação das técnicas e materiais construtivos empregados nos mais desenvolvidos centros mundiais. Dentro deste âmbito de desenvolvimento surge no mercado nacional o emprego do cimento branco estrutural como elemento versátil e de grande apelo arquitetônico por resultar em elementos de concreto de coloração clara ou como base para a produção de concretos coloridos a partir da adição de pigmentos.

O cimento Portland branco é produzido a partir de matérias primas isentas de óxidos de ferro e manganês, usando como combustível gás ou óleo e moído em moinhos com bolas cerâmicas ou seixos. Todo este esmero na produção resulta em um maior custo final quando comparado ao cimento cinza. Mesmo assim, o concreto de cimento branco é empregado na produção de artefatos de concreto, painéis de fechamento, pavimentos e na estrutura de edificações onde a arquitetura toma partido da cor da estrutura.

Segundo Penttala (1997 apud Hoppe 2005) a produção do clínquer que origina o cimento resulta em igual quantidade de dióxido de carbono (CO_2) liberado a atmosfera. Já Mehta & Monteiro (1994) afirmam que o cimento é o segundo material mais consumido no mundo ficando atrás apenas da água.

A substituição do cimento por materiais alternativos na produção do concreto, principalmente subprodutos industriais, resulta em diminuição do impacto ambiental. No Brasil é normalizada a produção de cimentos com adições minerais como a escória de alto forno e a cinza volante. São também largamente empregados a sílica ativa e o metacaulim e em menor escala a cinza de casca de arroz. Destas adições, algumas podem apresentar coloração clara, como a sílica ativa e a escória de alto forno.

Neville (1997) entende que as adições minerais têm seu emprego justificado não apenas no menor impacto ambiental gerado mas também no aprimoramento das propriedades do concreto principalmente quanto a maior durabilidade e menores custos de manutenção.

A corrosão das armaduras aparece como principal processo de deterioração das estruturas de concreto exigindo consideráveis recursos financeiros para recuperação. A corrosão resulta da diminuição da alcalinidade devido a carbonatação ou do ataque de íons cloreto, (ANDRADE, 1992).

Segundo Helene (1993) a corrosão das armaduras no concreto é um processo de natureza eletroquímica e sendo assim comandado pela resistividade elétrica do meio. O estudo

da resistividade elétrica aparente do concreto permite segundo Castellote et al. (2002), avaliar a facilidade de acesso dos íons Cl^- e CO_2 antes de desencadeado o processo corrosivo e estimar a velocidade do mesmo depois de desencadeado.

O estudo da resistividade elétrica de concretos confeccionados com cimento Portland cinza e adições minerais já foi extensamente estudado mas são poucos os trabalhos que abordam o tema para concretos de cimento Portland branco e adições.

Objetivo

O objetivo deste trabalho é avaliar a viabilidade técnica e econômica de concretos de cimento Portland branco com elevados teores de escória de alto forno, principalmente quanto à resistividade elétrica. Para tal estudou-se quatro diferentes misturas, uma com 100% de cimento Portland como aglomerante denominada mistura de referência, uma contendo 50% de escória em substituição ao cimento, outra contendo também 50% de escória mas com ativação alcalina em 4% de Na_2SO_4 e uma última contendo 70% de escória.

Especificamente buscar-se-á responder alguns questionamentos:

- A adição de escória propicia ganhos de resistividade elétrica?
- Qual a influência do teor de substituição sobre a resistividade elétrica, condutividade da solução aquosa dos poros e porosidade da pasta?
- E a relação água/aglomerante e a idade, como influenciam a resistividade, porosidade e condutividade?
- Como se relaciona a resistividade elétrica com a resistência à compressão, porosidade e condutividade elétrica da solução dos poros?
- Levando em consideração que nos projetos estruturais o concreto é especificado em função de sua resistência à compressão (f_{ck}), como se comporta a resistividade das misturas avaliadas quando se fixa um valor de resistência à compressão?
- Levando em consideração a resistividade elétrica e demais propriedades avaliadas qual a mistura de melhor relação custo/benefício?
- Correlacionando com os resultados obtidos por Rosa (2005) para o CPV ARI, comparar as propriedades referentes à durabilidade do CPB.

Estrutura da dissertação

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos. Os três primeiros referentes à revisão bibliográfica, o quarto sobre a metodologia empregada na pesquisa e o quinto de análise e discussão dos resultados.

No primeiro capítulo é apresentado o fenômeno de corrosão das armaduras com suas características, fatores que desencadeiam ou controlam o processo e efeitos do mesmo sobre a estrutura.

O segundo capítulo aborda a resistividade elétrica do concreto. A influência das propriedades do concreto sobre a mesma e a influência desta sobre o processo corrosivo. É apresentado também o método dos quatro eletrodos de medida da resistividade e fatores intervenientes sobre a medida da resistividade.

O cimento Portland branco e a escória de alto forno são tratados no terceiro capítulo. Os dois materiais são descritos e apresentados trabalhos que abordaram a influência de algum ou ambos nas propriedades do concreto.

O quarto capítulo apresenta a metodologia do trabalho, descreve as variáveis envolvidas, materiais empregados e ensaios executados.

No quinto capítulo são apresentados e discutidos os resultados. Estes são comparados a outros trabalhos semelhantes e integrados entre si com o objetivo de avaliar a dependência entre as grandezas testadas. A resistividade elétrica e os custos são avaliados em função da definição de patamares de resistência semelhantemente ao que ocorre no projeto de estruturas de concreto.

A conclusão, por fim, busca responder as perguntas aqui levantadas e resumir os resultados obtidos.

1 CORROSÃO DAS ARMADURAS

1.1 Considerações iniciais

A transformação do minério em metal dá-se através da redução do mesmo, de maneira forçada, pelo intenso fornecimento de energia. Já em metal, é da natureza do material, retornar a seu estado natural, na forma de óxidos metálicos, (GENTIL, 1987).

Entende-se por corrosão, o conjunto de reações que transformam o metal em óxido metálico ou, como define Panossian (1993, apud Cascudo 1997):

“Transformação de um metal em íon metálico pela sua interação química ou eletroquímica com o meio em que se encontra”.

Já Helene (1993) entende a corrosão como o conjunto de reações deletérias de natureza química ou eletroquímica, função da interação com o meio ambiente, que podem estar associadas a ações físicas ou mecânicas de degradação.

Cánovas (1988) afirma que a corrosão pode ser considerada sob dois aspectos em função de sua natureza, o químico e o eletroquímico. A corrosão química ou seca é menos importante em se tratando de concreto armado. É resultado da interação gás/metál, sendo um processo lento e que não provoca maiores danos às superfícies metálicas. O metal reage de forma homogênea ao longo de toda a sua superfície, não ocorrendo reações de oxido-redução e, sendo assim, não havendo corrente elétrica circulante. Já a corrosão eletroquímica ou aquosa é a principal causa de deterioração das armaduras no concreto armado. Ocorre em meio aquoso, com reações de oxido-redução e conseqüente circulação de corrente elétrica, (CASCUDO, 1997; CÁNOVAS, 1988).

Helene (1993) afirma que a corrosão das armaduras no interior do concreto é um processo de natureza eletroquímica, resultando em óxidos e hidróxidos de ferro com volume maior que o do metal de origem e coloração avermelhada, conhecidos popularmente como ferrugem.

O concreto armado tem como principal vantagem com relação aos demais materiais de construção, a capacidade de proteger as armaduras em seu interior, desde que executado adequadamente. A capacidade de proteção deve-se a existência simultânea de dois tipos de atuação, a barreira física proporcionada pela camada de cobrimento e a proteção química dada pela elevada alcalinidade, capaz de passivar as armaduras no interior do concreto, (HELENE, 1993; ANDRADE, 1992; CASCUDO, 1997).

Helene (1993) entende que o cobrimento das armaduras serve, além de barreira aos agentes agressivos, como barreira que dificulta o acesso ao oxigênio e água, necessários à ocorrência do processo corrosivo.

A alcalinidade do concreto é consequência, principalmente, da presença do hidróxido de cálcio (CH), sulfatos e álcalis. O pH resultante situa-se na faixa de 12,6 a 14,0. Este pH elevado combinado com a presença de oxigênio é capaz de formar uma capa de óxidos que torna as armaduras inertes, passivando-as, (ANDRADE, 1992; CÁNOVAS, 1988).

Segundo Cascudo (1997), a alcalinidade da solução aquosa dos poros do concreto é função, nas primeiras idades, da elevada concentração do hidróxido de cálcio (CH) resultante da hidratação do cimento. Para as idades mais avançadas, o elevado pH é garantido pela presença de hidróxidos de sódio (NaOH) e potássio (KOH) provenientes dos álcalis do cimento. Para Helene (1993) em pastas totalmente hidratadas, o teor de CH pode chegar a 25% da massa de cimento.

A alcalinidade acentuada é propícia para tornar o aço inerte, ou seja, passivado. A passivação dá-se pela formação de uma fina película de um filme óxido estável e aderente à superfície do metal tornando-o resistente à corrosão, (HELENE, 1993). Para o autor, o filme seria formado por duas camadas de óxido, a primeira predominando o Fe_3O_4 e a segunda o $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$.

1.2 A corrosão das armaduras no concreto

A corrosão das armaduras no interior do concreto é um caso específico de corrosão em meio aquoso, ou seja, de natureza eletroquímica. Helene (1993) afirma que em toda a célula de corrosão haverá um ânodo, um cátodo, uma diferença de potencial e a circulação de corrente elétrica. Por outro lado, só ocorrerá o processo corrosivo na presença de um eletrólito, diferença de potencial e oxigênio.

Para o autor a água sempre está presente no concreto em quantidade suficiente para servir como eletrólito. A quantidade de eletrólito é maior em regiões expostas a intempéries e climas úmidos.

Qualquer heterogeneidade da estrutura, armaduras ou concreto de entorno das armaduras é suficiente para fornecer a diferença de potencial elétrico capaz de formar a pilha de corrosão. Helene (1993) classifica as células ou pilhas de corrosão em função da origem da formação da diferença de potencial em: células de aeração diferencial, de concentração salina diferencial, de tensão diferencial, de temperatura diferencial e célula imposta. Esta última é

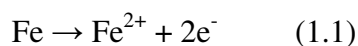
resultado da ação de corrente elétrica externa a estrutura, sejam correntes de fuga ou correntes forçadas para proteção catódica. Cascudo (1997) cita a aeração diferencial como a principal responsável pelo surgimento de diferenças de potencial no interior do concreto. Esta aeração diferencial resulta da falta de homogeneidade entre diferentes regiões do concreto.

Cascudo (1997) afirma que o oxigênio é necessário para a formação dos óxidos e hidróxidos ferrosos (ferrugem). Sendo assim, a disponibilidade de oxigênio regulará a velocidade do processo corrosivo. Helene (1993) entende que a disponibilidade de oxigênio e a magnitude da corrente elétrica circulante definirão a existência ou não da corrosão. Em concretos completamente secos ou totalmente saturados não há corrosão. No primeiro não há quantidade suficiente de eletrólito e no segundo não há a quantidade de oxigênio necessária.

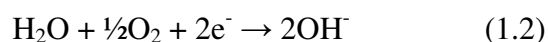
Além do eletrólito, oxigênio e diferença de potencial elétrico, a ocorrência da corrosão pode estar ligada à existência de agentes agressivos, que desencadeiam ou aceleram o processo.

Cascudo (1997) cita como agentes agressivos contidos ou adsorvidos no concreto os íons sulfeto (S^{2-}), cloretos (Cl^-), dióxido de carbono (CO_2), nitritos (NO_2^-), gás sulfídrico (H_2S), amônio (NH_4^+), óxidos de enxofre (SO_2 e SO_3), fuligem, etc. O autor descreve, ainda, as reações simplificadas nos pólos da célula de corrosão como:

- No ânodo ocorrem as reações de dissolução do ferro, corroendo-o:



- No cátodo ocorrem as reações de redução do oxigênio:



A corrente elétrica circulante dá-se pela migração do Fe^{2+} pelo eletrólito em direção ao cátodo enquanto íons OH^- migram pela armadura em direção ao ânodo. Em regiões intermediárias há o encontro dos dois íons circulantes que se combinam precipitando hidróxido ferroso. A reação é a que segue:



Com relação ao processo corrosivo, o modelo mais empregado para a previsão da vida útil das armaduras no interior do concreto é o proposto por Tuutti (1982, apud Andrade 1992) – figura 1.1. Neste modelo pode-se observar um período de iniciação que compreende o acesso do agente agressivo, a transposição da camada de cobrimento, chegada às armaduras e a despassivação das mesmas. O segundo período é o de propagação onde o processo de corrosão está instalado e progredindo aumentando o dano às armaduras. (ANDRADE, 1992)

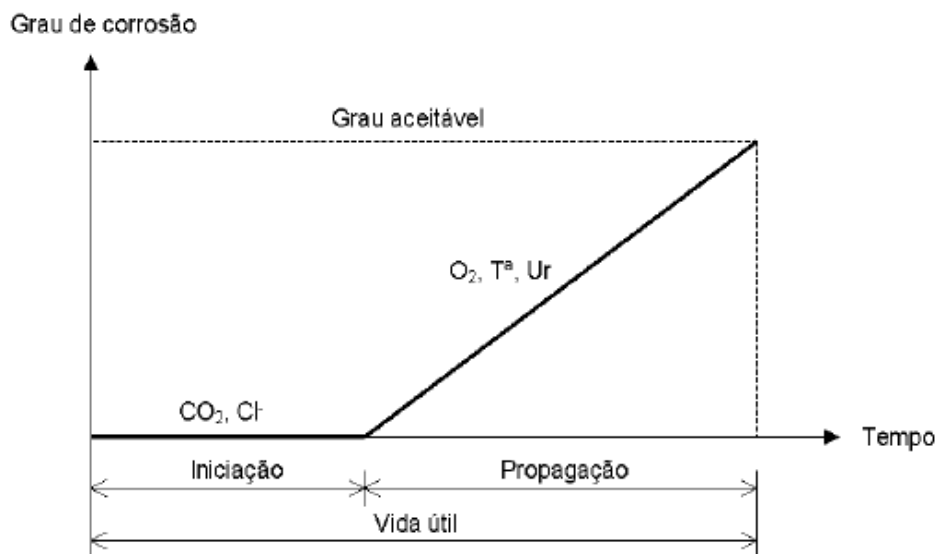


Figura 1.1. Modelo de vida útil em função da corrosão proposto por Tuutti (1982, apud Andrade 1992)

1.2.1 Período de iniciação

A extensão do período de iniciação será função da intensidade do ataque dos agentes agressivos e facilidade com que estes acessam o concreto. Para Andrade (1992) os íons cloreto e a diminuição da alcalinidade do concreto, função da carbonatação ou soluções ácidas, são os principais fatores desencadeantes do processo corrosivo, ou seja, são os principais fatores atuantes no período de iniciação.

Cascudo (1997) afirma que as armaduras encontram-se passivadas ou protegidas no interior do concreto devido à existência de um meio altamente alcalino. Esta película passivadora pode ser perdida, contudo, devido a presença de íons cloreto provenientes do meio externo por difusão ou presentes no interior do concreto devido ao emprego de componentes contaminados ou aditivos baseados em cloreto de cálcio. Outra forma de destruição da película passivadora está na diminuição do pH do concreto em resultado do processo de carbonatação ou ataque por substâncias ácidas.

Cascudo (1997) e Helene (1993) afirmam que o agente agressivo definirá também a morfologia da corrosão, podendo ser generalizada ou localizada (pites). A generalizada ocorre em toda uma região da barra, função normalmente da queda do pH resultado do processo de carbonatação, enquanto a por pites ocorre de maneira localizada, normalmente em função da quebra pontual da passivação do aço pela existência de íons cloreto.

1.2.1.1 Corrosão generalizada – carbonatação

A corrosão generalizada é resultado da diminuição do pH do concreto decorrente de uma lixiviação, seja em função da presença de águas puras ou ácidas, ou da reação dos compostos alcalinos presentes na solução dos poros do concreto, NaOH, KOH e Ca(OH)₂, com componentes ácidos presentes na atmosfera, principalmente, o dióxido de carbono, CO₂, a ação deste último é conhecida como carbonatação.

Andrade (1992) cita que a carbonatação caracteriza-se por formar uma frente de avanço, chamada frente de carbonatação, tal frente separa duas regiões de pH muito distinto, a região já atingida tem seu pH reduzido a valores inferiores a 8,0 enquanto que as regiões ainda não alcançadas possuem pH maior ou igual a 13,0.

A carbonatação consome o hidróxido de cálcio da pasta diminuindo o pH da mesma a valores abaixo do mínimo de 11,8, capaz de manter a passivação das armaduras, (CÁNOVAS, 1988).

Segundo Bakker (1988, apud Cascudo 1997) a velocidade do processo de carbonatação dependerá da estrutura de poros do concreto e de seu teor de umidade. Quando o concreto está seco não há água para ocorrência das reações de carbonatação, por outro lado, no concreto saturado praticamente não há CO₂ para reagir já que sua velocidade de difusão na água é cerca de 10⁴ vezes menor que no ar. Para Neville (1997) a máxima velocidade de carbonatação se dá para um teor de umidade de 50%. O autor afirma, ainda, que a velocidade de acesso do CO₂ é decrescente com o aumento da profundidade do concreto já que as moléculas do gás têm de se difundir através do sistema de poros, atravessando uma região já carbonatada.

Cánovas (1988) afirma que o grau de carbonatação depende da umidade relativa do ar. O autor cita Verbeck onde este diz que a carbonatação é máxima para uma umidade relativa de 60%.

Andrade (1992) afirma que após despassivadas as armaduras, o aço sofrerá um processo corrosivo generalizado, com o agravante de estar confinado no interior do concreto em contato direto com a umidade.

1.2.1.2 Corrosão por pites – cloretos

Andrade (1992) afirma que a corrosão localizada por pites pode ser desencadeada pela presença de íons cloreto, sulfeto ou sulfato. Contudo, o primeiro é mais comum e agressivo às armaduras que os demais.

Os íons cloreto podem estar presentes no concreto através do emprego de aditivos ou água de amassamento contendo cloro e, ainda, devido condições naturais como a presença de água marinha, maresia ou solo contaminado. Estes íons solúveis podem ser absorvidos pela superfície do concreto e, por difusão através dos poros interconectados, podem alcançar o interior do mesmo, (BASHEER et al. 2002).

Os cloretos e demais sais podem adentrar o concreto por difusão iônica, de forma lenta, ou por ação de forças capilares, processo mais rápido e muito comum em atmosferas marinhas, (ANDRADE, 1992).

Helene (1993) afirma que os agentes agressivos penetram no concreto por três mecanismos, principalmente, absorção capilar, mais intenso, difusão e permeabilidade por gradiente de pressão.

O transporte dos íons cloreto no interior do concreto é, principalmente, regido pela absorção capilar e difusão iônica. A absorção acontece na camada superficial do concreto onde ocorrem as seqüentes molhagem e secagem, já no interior do concreto, em meio permanentemente úmido, o transporte se dá basicamente por difusão em meio aquoso. Este fenômeno se dá devido à existência de gradientes de concentração destes íons entre diferentes regiões do concreto. A movimentação dos íons será dependente da interconexão entre os poros e da existência de um eletrólito, não ocorrendo difusão em concretos completamente secos, (CASCUDO, 1997). O autor cita também que os cloretos se apresentam sob três formas no interior do concreto, quimicamente ligados ao C_3A , adsorvidos na superfície dos poros ou livres na forma de íon na solução aquosa, havendo um equilíbrio dinâmico entre as três formas. Andrade (1992) relata que os cloretos combinados às fases alumino-ferríticas do cimento formam cloroaluminatos que ficam incorporados na fase sólida da pasta e que os cloretos perigosos às armaduras são os não combinados, livres na fase aquosa dos poros. Mesmo assim, as normas referem-se normalmente ao teor de cloretos totais, já que os cloretos combinados podem voltar à forma livre por ação da carbonatação. Helene (1993) cita Tuutti (1982) onde este sugere que a relação entre os cloretos livres e os retidos pode ser assumida como 0,7.

Helene (1993) destaca que uma característica importante está na capacidade da pasta em reter os íons cloreto. A capacidade de retenção pode ser em função dos compostos do cimento ou dos produtos de hidratação.

Para Cascudo (1997) é evidente a ação deletéria dos íons cloreto já que além de despassivarem as armaduras, aumentam a condutividade elétrica da solução dos poros e atuam como catalisadores da reação de corrosão.

No interior do concreto, os íons Cl^- são capazes de despassivar as armaduras quando estão presentes no concreto em uma fração do total da massa de cimento que varia segundo o tipo deste (CÁNOVAS, 1988). O autor afirma que 1% da massa de cimento de CaCl_2 é suficiente para despassivar as armaduras. Cita, também, Gouda que diz que a quantidade crítica de íons cloro é aproximadamente de 0,6% do cimento, em peso, no concreto fresco.

A concentração máxima dos íons cloreto, abaixo da qual não ocorreria a despassivação das armaduras não é consenso entre pesquisadores e normas. Segundo Cascudo (1997), o teor de limite de cloretos depende de inúmeras variáveis como o tipo de cimento, teor de pozolanas, relação água/cimento, entre outras. Mesmo assim, várias normas limitam o teor de cloretos com relação à massa de cimento. Para o autor, o limite médio observável entre as diferentes normas é de 0,4%, não sendo, no entanto, um indicativo de segurança já que foram observadas situações de corrosão provocadas por cloretos mesmo com teores da ordem de 0,15%.

Rizzon et al. (2006) cita os limites admissíveis de cloretos no concreto como sendo 0,4% da massa de cimento ou o valor de 0,6 para a relação Cl^-/OH^- . Entre os fatores determinantes na penetração de cloretos no concreto, os autores citam como principal a relação água/cimento que determinará a porosidade do concreto, citam, também, o teor de aluminatos presente no cimento, capazes de reter os íons Cl^- .

Helene (1993) afirma que a maneira mais correta de avaliar o teor de cloretos no concreto é através da relação Cl^-/OH^- , mas que esta não pode ser tomada isolada. É necessário que se avalie a resistividade elétrica, a disponibilidade de oxigênio e o teor de umidade do ambiente em conjunto com o teor de cloretos.

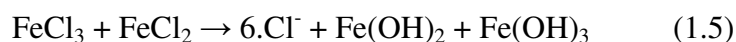
Cascudo (1997) cita como mais correta a proposta de Hausmann (1967) que limita em 0,6 o quociente entre as concentrações de Cl^- e OH^- na solução dos poros. Valores maiores do quociente seriam suficientes para destruir a camada de passivação do aço.

Helene (1993) afirma que não há consenso entre os pesquisadores sobre o mecanismo de destruição da camada de passivação do aço pelos íons cloreto. O autor cita que o ACI 222 (1991) propõe três teorias de ação dos cloretos no aço: teoria do filme óxido, teoria da adsorção e teoria do complexo transitório.

A teoria do filme óxido propõe que os íons cloreto penetram nos defeitos do filme de passivação e se dispersam coloidalmente no filme óxido permitindo o ataque ao aço.

A teoria da adsorção afirma que os íons cloreto são adsorvidos na superfície do aço competindo com as hidroxilas e o oxigênio dissolvido. O cloreto força a hidratação do ferro e viabiliza a dissolução em cátions.

Já a teoria do complexo transitório propõe que os íons cloreto competem com os ânions hidroxila para a produção de compostos ferrosos. Estes compostos, denominados de complexos transitórios, difundem-se do ânodo em direção ao cátodo permitindo que a corrosão continue. As reações simplificadas para a teoria são:



Os cloretos são regenerados ao fim das reações, ficando disponíveis para seguir reagindo com o aço, assim, pequenas quantidades de cloretos podem ser responsáveis por corrosões intensas.

1.2.2 Período de propagação

Após a despassivação das armaduras o aço no interior do concreto estará disponível para a instalação do processo corrosivo e este acontecerá desde que haja um eletrólito, oxigênio e uma diferença de potencial.

Depois de iniciada a corrosão, sua velocidade será comandada pela disponibilidade de oxigênio, teor de umidade do concreto, resistividade elétrica do mesmo e, ainda, pela presença ou não de agentes catalisadores.

Andrade (1992) entende que a velocidade do período de propagação no modelo de Tuutti é determinada pela umidade do concreto e disponibilidade de oxigênio. Para o autor a variável mais influente na velocidade do processo é o teor de umidade do concreto.

Andrade & Alonso (1990, apud Cascudo 1997) afirmam que a velocidade do processo corrosivo será função principalmente do teor de umidade do concreto já que esta determina a disponibilidade de oxigênio para o processo corrosivo além de ser determinante sobre a resistividade elétrica do concreto. Andrade (1992) explica a influência da umidade da seguinte maneira: estando os poros saturados, mesmo que para pequenos valores de resistividade elétrica, não haverá disponibilidade de oxigênio já que sua capacidade de dissolução na água é baixa, já para a situação de umidade muito baixa, com os poros praticamente secos, a resistividade elétrica será elevada. A velocidade do processo corrosivo será máxima para concretos com teor de umidade elevado mas não saturados, facilitando o acesso do oxigênio às armaduras e diminuindo a resistividade elétrica a valores suficientemente baixos. Helene

(1993) entende que os poros capilares com água funcionam como tampões à difusão do oxigênio já que a difusão das moléculas de O₂ na água é muito mais lenta.

Cascudo (1997) cita o teor de umidade, a permeabilidade e a concentração iônica da solução dos poros como os principais fatores influentes sobre a resistividade elétrica do concreto. O mesmo autor afirma que a velocidade do processo de corrosão será máxima quando o teor de umidade for elevado sem, contudo, o concreto se encontrar saturado para não dificultar o acesso de oxigênio.

Helene (1993) afirma que as principais características do concreto relevantes à cinética do processo corrosivo são: a resistividade elétrica, a migração dos íons cloreto e a difusão e dissolução de oxigênio na solução aquosa dos poros.

Cánovas (1988) afirma que a corrosão do aço acontece quando a resistividade elétrica do concreto envolvente é menor do que 5000 a 10000 Ohm/cm e o oxigênio e a água podem difundir-se através do revestimento em quantidade suficiente para formar o óxido ferroso. Tal óxido reage com o oxigênio formando óxido férrico com aumento de volume de 6 a 10 vezes.

A temperatura também tem influência sobre a cinética do processo corrosivo. Andrade (1992) e Cascudo (1997) entendem que a temperatura tem duplo papel sobre a corrosão das armaduras no concreto, por um lado seu aumento acelera o processo corrosivo e a mobilidade dos íons, por outro lado uma diminuição em seu valor pode acarretar em condensação de umidade com possíveis aumentos da mesma.

Cascudo (1997) afirma que os íons cloreto, além de despассивar as armaduras, tem influência na velocidade do processo de propagação da corrosão, atuando como catalisadores das reações que formam os produtos de corrosão, além de contribuírem para o aumento da condutividade elétrica da solução aquosa dos poros do concreto.

1.3 Efeitos da corrosão

Os principais efeitos da corrosão das armaduras no concreto armado são a diminuição da seção resistente destas (perda de massa de aço) e o surgimento de fissuração e deslocamento do concreto de cobrimento além da perda de aderência aço-concreto.

Os produtos da corrosão são de maior volume que o aço original gerando tensões internas que podem provocar fissuração e lascamento do concreto superficial, desprotegendo as armaduras, (ANDRADE, 1992). Mehta & Monteiro (1994) afirmam que a transformação do aço em ferrugem é acompanhada de expansão, que pode chegar até a 600% do volume do

ação original. O grande aumento de volume resulta em tensões de elevada magnitude, impossíveis de serem resistidas pelo concreto de cobrimento que lasca e expõe as armaduras.

2. RESISTIVIDADE ELÉTRICA

2.1 Considerações iniciais

Abreu (1998) apresenta a definição de Barrow (1964) para a resistividade, dizendo que a resistividade elétrica é a propriedade que caracteriza a dificuldade com que os íons se movimentam no concreto, sendo também chamada de resistência específica, definida como a resistência entre faces opostas de um cubo de determinado material, e igual ao inverso da condutividade.

A resistividade elétrica controla o fluxo de íons na solução aquosa dos poros do concreto, sendo muito sensível ao teor de umidade de equilíbrio e a temperatura. Tanto o aumento da umidade quanto o da temperatura resultam em diminuição da resistividade elétrica do concreto (HELENE, 1993). Hunkeler (1996) afirma que a resistividade depende da microestrutura da pasta (volume de poros e distribuição do tamanho dos mesmos), da umidade, concentração dos sais e temperatura.

Cascudo (1997) entende que a resistividade elétrica do concreto, juntamente com a disponibilidade de oxigênio junto às armaduras, rege a velocidade do processo eletroquímico que é a corrosão das armaduras. Já Polder & Peelen (2002) afirmam que após iniciado o processo corrosivo, a resistividade elétrica do concreto controlará a taxa de corrosão, refletindo o teor de umidade do concreto. Para Andrade (1992) a velocidade do processo de corrosão é determinada pelo teor de umidade, já que este comanda a disponibilidade de oxigênio junto às armaduras e a resistividade elétrica do concreto.

Andrade (2005) afirma que a resistividade elétrica do concreto está relacionada à porosidade e conectividade entre os poros do concreto saturado. Em concretos não saturados, a resistividade serve como medida do grau de saturação.

Hope et al. (1985 apud Vieira & Dal Molin, 2005) cita que a resistividade elétrica do concreto é diretamente dependente do concreto estar saturado, semi-saturado ou seco. Hope et al. afirmam, ainda, que para concretos saturados, a resistividade elétrica diminui com o aumento da relação água/aglomerante. Hoppe (2005) entende que a variação do teor de umidade do concreto é a variável que mais influencia a resistividade elétrica. O pesquisador entende que a diminuição da umidade implica em uma diminuição da quantidade de solução dos poros, ou seja, uma diminuição do eletrólito responsável pela transmissão da corrente

elétrica que atravessa o concreto e, conseqüentemente, um aumento na resistividade elétrica do concreto.

Gowers & Millard (1999) entendem que a resistência elétrica do concreto regula o fluxo iônico entre as regiões anódica e catódica da armadura. Quanto maior a resistividade elétrica do concreto, menor a corrente elétrica circulante e menor a velocidade do processo corrosivo. Smith et al. (2004) entendem que quanto maior a resistividade elétrica, maior a dificuldade dos íons em atravessar o concreto, inibindo a corrosão.

Mehta & Monteiro (1994) apontam que uma vez destruída a camada passivadora serão a resistividade elétrica e a disponibilidade de oxigênio que controlarão a taxa de corrosão. Os autores citam que resistividades acima de 50.000 a 70.000 Ω .cm são suficientes para inibir o processo corrosivo.

Polder et al. (1994, apud Abreu 1998) afirmam que as medidas de resistividade elétrica além de serem relevantes devido sua estreita relação com o fenômeno da corrosão servem também para indicar regiões de maior porosidade, passíveis de servir como porta de entrada para os íons cloreto. Castellote et al. (2002) entendem que a resistividade elétrica pode ser usada para caracterizar a conectividade dos poros e dar uma idéia do teor de umidade do concreto. Consideram eles que a resistividade é um parâmetro interessante de estimativa da durabilidade do concreto principalmente sob o aspecto de impedir o transporte de íons. Helene (1993) entende que a porosidade penetrável do concreto tem grande influência sobre sua resistividade.

Hoppe (2005) observou maior influência da porosidade do que da condutividade elétrica específica sobre a resistividade elétrica. Avaliando a resistividade elétrica aparente para concretos com adições minerais, ele constatou que a resistividade decrescia com a diminuição da porosidade mesmo que, antagonicamente, ocorresse aumento na condutividade elétrica específica da solução dos poros, evidenciando a maior influência da primeira.

Castellote et al. (2002) afirmam que a resistividade elétrica permite acompanhar o desempenho do concreto tanto no período de iniciação quanto no de propagação no modelo proposto por Tuutti (1982) para o desenvolvimento do processo corrosivo. No período de iniciação a resistividade permite estimar a facilidade de acesso dos íons cloreto e CO_2 . Já no período de propagação a resistividade fornece uma estimativa da velocidade do processo corrosivo.

Existem diferentes propostas de correlação entre medidas de resistividade elétrica do concreto e probabilidade de corrosão.

Polder (2001) apresenta a tabela 2.1 proposta pelo COST 509 (1997) relacionando os valores de resistividade elétrica e a probabilidade de corrosão.

Tabela 2.1. Risco de corrosão em função de ρ . (COST 509 apud Polder, 2001)

Resistividade elétrica (ohm.m)	Risco de corrosão
< 100	Alta
100 a 500	Moderada
500 a 1000	Baixa
> 1000	Negligenciável

Nota: COST 509, Corrosion and protection of metals in contact with concrete, Final report, In: Cox RN, Cigna R, Vennesland O, Valente T. editors. European Commission, Directorate General Science, Research and Development, Brussels, EUR.

O critério de avaliação proposto pelo CEB 192 e apresentado por Abreu (1998), Hoppe (2005) e Rosa (2005) é dado na tabela 2.2.

Tabela 2.2. Relação entre a resistividade elétrica e a probabilidade de corrosão proposta pelo CEB 192 (Abreu, 1998)

Resistividade elétrica (ohm.m)	Risco de corrosão
> 200	Desprezível
100 a 200	Baixa
50 a 100	Alta
< 50	Muito alta

Alterações em propriedades intrínsecas ou extrínsecas ao concreto resultam em variações na resistividade elétrica do mesmo. Hoppe (2005) destaca a alta sensibilidade da resistividade aos diversos fatores intrínsecos como: relação água/aglomerante, consumo e tipo de cimento, o agregado, adições minerais e aditivos. Tais fatores resultam em alterações no tamanho e distribuição dos poros, teor de umidade interna, pH, sensibilidade à cura, entre outros. Assim, acontecem alterações nas propriedades físico-químicas do concreto, alterando sua condutividade elétrica e, conseqüentemente, resistividade elétrica.

Como fatores extrínsecos podem-se destacar a temperatura e a exposição do concreto a agentes agressivos. Ambos os fatores resultam em alterações na composição aquosa da solução dos poros.

A resistividade elétrica está relacionada à microestrutura da matriz da pasta, estrutura de poros, porosidade e distribuição do tamanho dos mesmos. Está relacionada, também, aos íons presentes na solução aquosa dos poros, sua concentração e mobilidade. A composição química e teor de cimento, relação água/aglomerante, presença de adições minerais, ativadores químicos e aditivos também influenciam a resistividade através de alterações na microestrutura da pasta e água dos poros, (WHITING & NAGI, 2003).

Helene (1993) destaca a importância de definir duas diferentes regiões do concreto, com relação à resistividade elétrica. A camada de revestimento que está sujeita a constantes ciclos de molhagem e secagem, com variações rápidas de umidade, enquanto que as regiões mais internas apresentam teor de umidade pouco variável. A resistividade medida na camada mais superficial é definida como resistividade elétrica aparente enquanto que a das camadas mais internas é chamada de resistividade volumétrica. A resistividade elétrica aparente é a mais relevante, pois é medida em profundidades próximas à colocação das barras no concreto.

2.2 Propriedades do concreto relacionadas à resistividade

2.2.1 Relação água/aglomerante

A relação água/aglomerante controla a maior parte das características do concreto, como a trabalhabilidade no estado fresco e resistência mecânica e permeabilidade no concreto endurecido. Hoppe (2005) entende que a relação água/aglomerante (a/ag) é o principal parâmetro controlador das características do concreto, influenciando sua resistência mecânica e durabilidade. Sobre a resistividade elétrica aparente a relação a/ag tem influência indireta, alterando a estrutura da matriz de poros e a composição da solução aquosa dos mesmos, propriedades determinantes sobre a resistividade elétrica. Os resultados do pesquisador apontaram que a resistividade elétrica tende a cair com o aumento do volume de intrusão de mercúrio. Isto se deve a tendência de queda da resistividade e aumento da porosidade com a elevação da relação a/ag .

A influência da relação a/ag sobre a resistividade elétrica de argamassas ou concretos é distinta, GjØrv et al. (1977) constataram que diminuindo a relação a/ag de uma argamassa de 0,70 para 0,50, a resistividade mais que dobrou. Já para concretos, a mesma diminuição da relação a/ag sofreu uma redução bem menos significativa. Para uma mesma relação a/ag a resistividade medida para a argamassa foi três vezes maior que para o concreto, realçando a influência do agregado graúdo sobre a resistividade elétrica.

Comportamento contrário foi observado por Vieira & Dal Molin (2005) que observaram que a resistividade elétrica em concretos de cimento branco aumentou com o aumento da relação água/aglomerante. Entendem os autores que este desempenho deve-se a umidade intrínseca do concreto. Hope et al. (1985 apud Vieira & Dal Molin, 2005) citam que a resistividade elétrica do concreto é diretamente dependente do concreto estar saturado, semi-saturado ou seco. Hope et al. afirmam, ainda, que para concretos saturados, a resistividade

elétrica diminui com o aumento da relação água/aglomerante. Vieira & Dal Molin (2005) entendem que seus resultados devem-se a maior facilidade com que concretos de maior relação a/ag perdem água, secando sua camada superficial e aumentando a resistividade elétrica aparente medida.

GjØrv et al. (1977) avaliaram a influência da relação água/aglomerante sobre a resistividade elétrica de concretos com diferentes graus de saturação (figura 2.1). Para um concreto com 100% de saturação, a diminuição da relação a/ag de 0,70 para 0,42 resultou em um aumento da resistividade de 1,6 vezes. Já para 60% de saturação, a mesma redução na relação a/ag elevou a resistividade elétrica em 7 vezes. Concluíram os pesquisadores que o grau de saturação do concreto é mais influente sobre a resistividade que a relação a/ag em si.

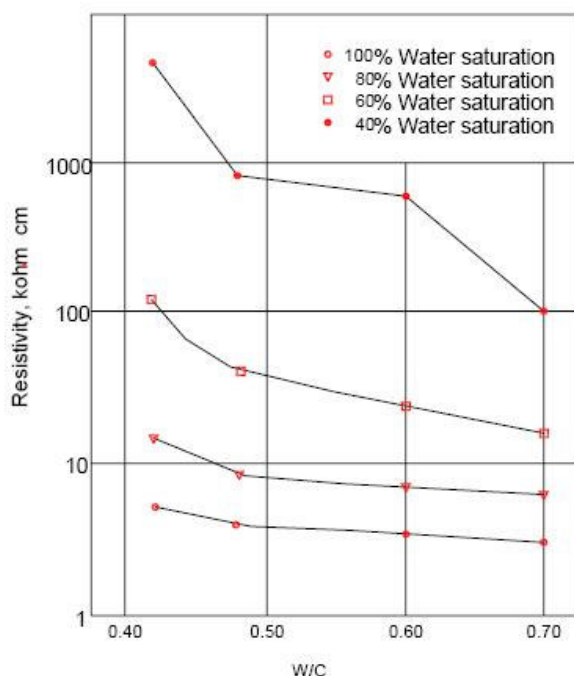


Figura 2.1. Influência do grau de saturação do concreto sobre a relação resistividade versus relação a/ag (GjØrv et al., 1977 apud Whiting & Nagi 2003)

2.2.2 Composição e consumo de cimento

Neville (1997) afirma que o aumento no teor de cimento resulta na diminuição da resistividade, função da maior quantidade de eletrólito e maior concentração de íons na mesma. Já a composição do cimento influi na concentração dos íons da solução aquosa dos poros, também influenciando sobre a resistividade elétrica do concreto.

Com relação ao cimento, Whiting & Nagi (2003) entendem que o consumo do mesmo, teor de álcalis e teor de C_3A são influentes sobre a resistividade elétrica. Os autores citam o estudo de Hammond & Robinson (1955) onde estes compararam a resistividade elétrica do

cimento Portland comum, cimento de alta resistência inicial e cimento com elevado teor de alumina. A resistividade elétrica do concreto moldado com o cimento aluminoso foi maior para todas as idades, alcançando aos 28 dias resistividade 20 vezes maior que a do concreto com cimento Portland comum. A explicação estaria na hidratação do cimento aluminoso que resulta em menor quantidade de íons e menor concentração iônica na solução dos poros do concreto. Monfore (1968 apud Whiting & Nagi, 2003) estudou a influência do teor de álcalis do cimento sobre a resistividade elétrica da pasta. Para avaliar a influencia do teor de álcalis o pesquisador moldou dois traços, um com cimento com baixo teor de K_2O (0,12%) e outro com elevado teor (1,3%). Os valores obtidos para a resistividade elétrica foram pouco maiores para a mistura empregando cimento com elevado teor de álcalis, sem, contudo, obter diferenças significativas. O pesquisador concluiu que o teor de álcalis não tem grande influência sobre a resistividade elétrica. Por fim, Whiting & Nagi (2003) citam Baweja et al. (1996), onde este avaliou as diferenças no emprego de cimentos com alto (9%) ou baixo teor de C_3A (4,9%) sobre a resistividade elétrica do concreto. Os resultados encontrados foram similares para os dois tipos de concreto, não evidenciando influência significativa do teor de C_3A .

Sendo a resistividade elétrica influenciada pela natureza da pasta de cimento, qualquer alteração nesta última resultará em alterações na primeira. Variações no consumo de cimento de um traço resultam em variações no volume total de pasta no concreto, ou seja, alterarão a resistividade elétrica do mesmo (WHITING & NAGI, 2003). Hughes (1986 apud Whiting & Nagi, 2003) avaliou a resistividade elétrica de 12 traços de concreto, para idades de 1, 3, 7, 14, 21 e 28 dias, relações água/aglomerante de 0,50 e 0,55 e consumos de cimento de 300, 350 e 400 kg/m^3 . O pesquisador verificou que com o aumento do consumo de cimento há diminuição da resistividade elétrica do concreto para uma mesma relação a/ag. A figura 2.2 apresenta o resultado do ensaio executado pelo autor para a idade de 28 dias. Creditou ele este comportamento à menor resistividade elétrica da pasta com relação ao agregado, aumentando o volume da mesma na mistura haverá queda da resistividade global do conjunto pasta mais agregado.

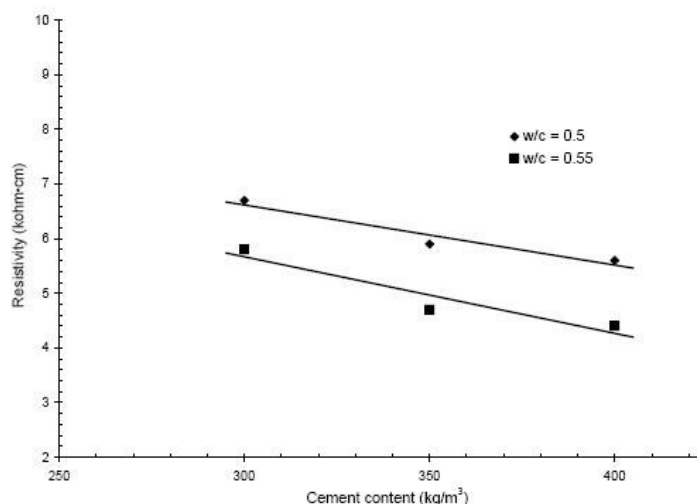


Figura 2.2. Resistividade versus consumo de cimento. (Hughes 1986 apud Whiting & Nagi, 2003)

Comparando a resistividade elétrica do cimento branco com o cimento cinza, Vieira & Dal Molin (2005) afirmaram que o desempenho do primeiro foi superior. Entenderam os autores que este comportamento deveu-se a maior facilidade de ocorrer a carbonatação em cimentos brancos em função da presença de filer calcário.

2.2.3 Tipo e teor de agregados

Whiting & Nagi (2003) afirmam que a resistividade elétrica do concreto é muitas vezes maior que a da pasta de cimento. Citam o estudo de Monfore (1968) onde este mediu a resistividade de diversos agregados grãos naturais empregados no concreto e verificou que a resistividade da maioria deles era praticamente infinita quando comparada à pasta. Mesmo sendo a resistividade do concreto governada pela pasta de cimento, Whiting & Nagi (2003) afirmam que variando o tipo de agregado grão e seu teor na mistura variará a resistividade elétrica do concreto. Afirmam, ainda, que aumentando o teor de agregado na mistura crescerá a resistividade elétrica do concreto.

Shi (2004) entende que a condutividade elétrica do concreto decresce com o aumento do volume de agregados na mistura em função do efeito de diluição dos íons condutivos da solução dos poros e da adsorção de álcalis na superfície dos agregados. Estes íons, no entanto, podem posteriormente ser extraídos e voltarem à solução aumentando a condutividade elétrica do concreto e, conseqüentemente, diminuindo sua resistividade.

Princigallo et al. (2003) estudaram a influência dos agregados sobre a condutividade elétrica do concreto. Os autores variaram a quantidade total de agregados mantendo a relação,

em peso, de 1,2 entre o agregado graúdo e o miúdo. A relação água/aglomerante foi mantida fixa em 0,37. Foi empregada adição de sílica ativa em substituição do cimento.

Os resultados de variação de condutividade elétrica ao longo do tempo em função do teor de agregados apresentados por Princigallo et al. (2003) são dados na figura 2.3.

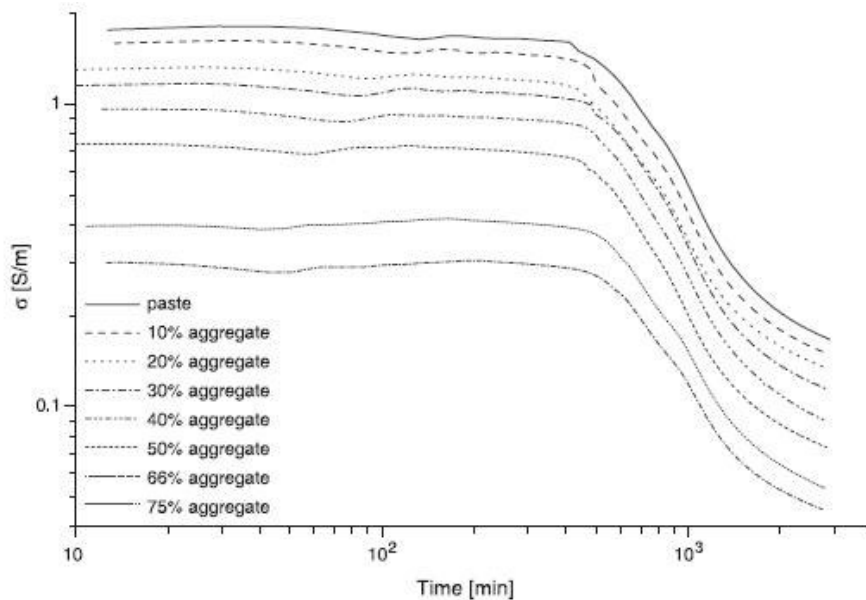


Figura 2.3. Variação da condutividade ao longo do tempo. (Princigallo et al., 2003)

Princigallo et al. (2003) concluíram que a condutividade elétrica do concreto diminuiu com o aumento do teor de agregados na mistura. A evolução da condutividade dos concretos testados apresentou desenvolvimento semelhante a das pastas testadas. Ressaltam os pesquisadores que este comportamento evidencia a dominância da matriz cimentícia sobre a condutividade do concreto.

2.2.4 Aditivos

O emprego de aditivos visa aprimorar as propriedades do concreto fresco ou endurecido, proporcionando maior resistência e durabilidade.

Whiting & Nagi (2003) destacam a pouca ou nenhuma influência direta dos aditivos sobre a resistividade elétrica do concreto. Seu emprego, contudo, pode trazer alterações significativas na microestrutura da pasta e solução aquosa resultando indiretamente em variações na resistividade elétrica do concreto. Por exemplo, o emprego de plastificantes e superplastificantes proporciona reduções na relação água/aglomerante mantendo a mesma trabalhabilidade. A redução na relação a/ag torna o concreto mais denso e menos permeável,

umentando sua resistividade elétrica. Já Neville (1997) afirma que o emprego de aditivos não altera a resistividade elétrica do concreto.

2.2.5 Adições Minerais

As adições minerais são comumente usadas na produção de concretos por proporcionarem aprimoramento de propriedades mecânicas e de durabilidade além de diminuir o impacto ambiental da produção do concreto. Dentre as adições mais usadas destacam-se a escória de alto forno, a cinza volante, a cinza de casca de arroz moída, a sílica ativa e o metacaulim.

A presença de adições minerais, quando corretamente proporcionadas na mistura, é capaz de reduzir significativamente a penetrabilidade e aumentar a resistividade elétrica do concreto, reduzindo a velocidade de corrosão. (NEVILLE, 1997)

O emprego de adições minerais no concreto através de sua ação físico-química altera a microestrutura da pasta - refinando e melhor distribuindo a rede de poros - e a concentração e mobilidade dos íons da solução dos poros, conseqüentemente, diminuindo a condutividade elétrica específica da mesma, ou seja, aumentando sua resistividade elétrica, (HOPPE, 2005).

Hunkeler (1996) observa que a maior resistividade de concretos com adições pozolânicas pode ser explicada pelo aumento da resistividade da solução dos poros e menor fração de fase condutora, ou seja, menor quantidade total de eletrólito. Já McCarter et al. (2000) entendem que o emprego de pozolanas resulta em refinamento e aumento na tortuosidade da rede de poros. Diminuindo a mobilidade iônica e interações entre íons. Por fim, as maiores forças confinantes alteram o comportamento condutivo da solução dos poros.

Polder & Peelen (2002) afirmam que a escória de alto forno e a cinza volante aumentam a resistividade elétrica do concreto quando comparado a concretos de cimento Portland comum, para um mesmo grau de umidade. Afirmam, ainda, que a escória de alto forno é capaz de proporcionar acréscimos de resistividade elétrica para todas as idades. Sendo os ganhos de resistividade acelerados quanto maiores os teores de substituição. O emprego de escória também resulta em menores coeficientes de difusão de cloretos. Para Bijen (1996) a capacidade da escória de diminuir a difusão iônica no concreto influencia grandemente a resistividade elétrica.

Para Neville (1997) a presença de escória de alto forno no concreto resulta em aumento progressivo da resistividade elétrica, chegando a valores uma ordem de grandeza maiores quando comparados a concretos executados exclusivamente com cimento Portland

comum. Smith et al. (2004) também entendem que o emprego de escória de alto forno no concreto resulta em aumentos significativos de resistividade elétrica nas primeiras idades quando comparado ao traço contendo apenas cimento Portland, sendo que a resistividade continua crescendo com o avanço do grau de hidratação.

A escória de alto forno conjuntamente com a cinza volante e sílica ativa, são as adições minerais mais empregadas no concreto com o intuito de aumentar a trabalhabilidade e coesão das misturas fluidas, torna-lo mais durável quanto ao ataque de íons cloreto, sulfatos e menos sujeito a reações álcali-agregado (Whiting et al. 1993 apud Whiting & Nagi, 2003). Contudo, o emprego de adições minerais resulta em refinamento da microestrutura da pasta e alterações na composição da solução dos poros, normalmente diminuindo a concentração iônica da mesma, (WHITING & NAGI, 2003).

Malhotra (1987 apud Whiting & Nagi 2003) afirma que a escória de alto forno quando adicionada ao concreto em teores entre 35 e 65%, resulta em maior trabalhabilidade da mistura fluida, menor permeabilidade e maior resistência ao ataque por sulfatos além de resultar em um refinamento da estrutura de poros. Tal refinamento eleva a resistividade elétrica do concreto.

Citando o trabalho de Hope & Ip (1987), Whiting & Nagi (2003) afirmam que a resistividade elétrica de concretos com escória é mais sensível às condições de armazenamento e cura.

Hope & Ip (1987) avaliaram a resistividade elétrica de concretos moldados com cimento Portland e escória de alto forno. Os teores de substituição avaliados foram 0%, 25% e 50%. Observaram os autores que após sete dias de cura, os concretos contendo escória apresentaram maiores taxas de crescimento da resistividade. Para os 7 dias de idade, o concreto contendo 25% de escória apresentou resistividade 110% maior que o concreto referência, enquanto que o traço contendo 50% de escória apresentou resistividade igual a 75% da do traço referência. Para os 28 dias, estes valores foram iguais a 175% e 300% para os traços contendo 25% e 50% de escória, respectivamente. Os autores atribuíram este comportamento a maior compacidade da estrutura de poros e menor alcalinidade da pasta com relação a uma pasta de cimento Portland puro.

Missau (2004) relata o perceptível aumento da resistividade elétrica aparente com o avanço do grau de hidratação do concreto e também com a substituição do cimento pelas adições. O pesquisador avaliou concreto com diferentes adições, todos com relação a/ag fixada em 0,50, a mistura contendo escória de alto forno (EAF) possuía um teor de

substituição de 50%. O traço contendo EAF apresentou resistividades 122% e 161% maiores que os valores do traço referência, para as idades de 28 e 91 dias, respectivamente.

Wee et al. (2000) estudaram a resistividade elétrica de concretos com teores de substituição de escória de alto forno de 30%, 55% e 70%, em três finuras distintas, 3.000 cm^2/g , 6.000 cm^2/g e 8.000 cm^2/g . Testaram também dois traços com sílica ativa, em teores de 5% e 10%, com finura de 250.000 cm^2/g . O consumo de aglomerante foi fixado para todas as misturas em $370 \text{ kg}/\text{m}^3$ e relação água/aglomerante em 0,50. Diferentes tempos de cura também foram avaliados, os prazos testados foram 3, 7 e 28 dias. A figura 2.4 mostra os resultados obtidos pelos pesquisadores.

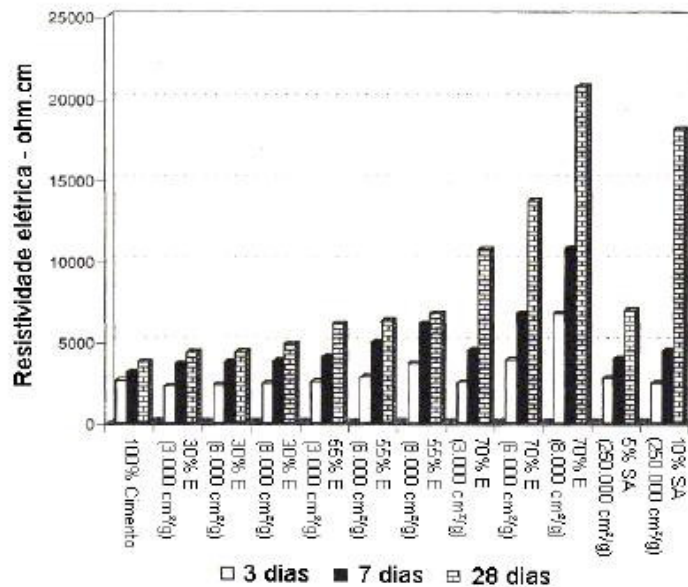


Figura 2.4. Resistividade elétrica de concretos com adições minerais para diferentes prazos de cura. (Wee et al., 2000)

Os resultados apontaram o melhor desempenho da mistura contendo 70% de escória, no maior grau de finura, 8.000 cm^2/g , e prazo de cura de 28 dias. Entenderam os pesquisadores que o melhor desempenho dessa mistura deveu-se a maior densidade da pasta e menor condutividade elétrica da solução dos poros.

2.3 Efeitos da exposição sobre a resistividade

2.3.1 Cura

Mehta & Monteiro (1994) definem a cura do concreto como os procedimentos destinados a promover a hidratação do cimento, consistindo no controle do tempo, temperatura e condições de umidade logo após o lançamento do concreto.

Aïtcin (2000) citando Neville (1995) afirma que em concretos convencionais a cura visa assegurar o mais alto grau de hidratação possível, possibilitando obter maior resistência e menor permeabilidade além de minimizar os efeitos da retração autógena. Aïtcin (2000) conclui, ainda, que a cura em concretos de alto desempenho é ainda mais importante em função da baixa velocidade de exsudação no estado plástico e auto-secagem e gradientes térmicos no concreto endurecido.

Com o avanço do grau de hidratação a resistividade do concreto tende a crescer, desde que corretamente curado (WHITING & NAGI, 2003). McCarter et al. (1981 apud Whiting & Nagi, 2003) observaram, para concretos curados a vapor por pelo menos 120 dias, que a resistividade aumentou de pelo menos 1,5 vezes de 1 para 30 dias de idade. Aos 30 dias a resistividade foi aproximadamente igual a 90% da medida aos 120 dias.

Mehta & Monteiro (1994) ressaltam que a velocidade de hidratação de cimentos com escória de alto forno ou pozolanas é mais lenta que a do cimento Portland comum. Sendo assim o desenvolvimento da estrutura da pasta será mais lento, necessitando de tempos mais prolongados de cura.

O trabalho de Wee et al. (2000) avaliou a influência do prazo de cura sobre a resistividade de concretos com adição de escória. A figura 2.4 evidencia a dependência da resistividade de concretos com escória com relação à cura. Quanto maior o teor de escória na mistura, maior a influência do prazo de cura sobre os resultados. Repetindo o que foi destacado anteriormente, o melhor resultado obtido pelo pesquisador foi para o concreto com 70% de escória de maior finura e prazo de cura de 28 dias.

Ramezianpour & Malhotra (1995) estudaram a influência do tipo de cura em concretos com adições minerais com relação a resistência à compressão, penetração de cloretos pelo método ASTM C1202 e porosimetria por intrusão de mercúrio. As adições testadas foram a escória de alto forno nos teores de substituição de 25% e 50%, a cinza volante nos teores de 25% e 58% e a sílica ativa em um teor de 10%. Os processos de cura testados foram a cura em câmara úmida (tomada como referência), cura ao ar, cura ao ar após

dois dias em câmara úmida e cura em câmara climatizada, com temperatura de 38 °C e U.R. de 65%. As misturas pesquisadas são mostradas na tabela 2.3.

Tabela 2.3. Misturas testadas por Ramezianpour & Malhotra (1995).

Mistura no.	W/C+SCM	Water	Cement	Quantities (kg/m ³)						AEA (l/m ³)
				Slag	Fly ash	Silica fume	CA - SSD	FA - SSD	SP	
RA1	0,50	186	372	-	-	-	1165	655	-	-
RA2	0,50	186	280	92	-	-	1165	655	-	-
RA3	0,50	186	186	186	-	-	1165	655	-	-
RA4	0,50	186	280	-	92	-	1165	655	-	-
RA5	0,35	130	156	-	216	-	1209	681	3,6	0,22
RA6	0,50	186	335	-	-	37,2	1165	655	-	-

Nota: CA = agregado graúdo; FA = cinza volante; SSD = saturado superfície seca; SP = superplastificante; AEA = aditivo incorporador de ar; SCM = material cimentício suplementar.

Os resultados de Ramezianpour & Malhotra (1995) mostraram que concretos com adições minerais são mais sensíveis a procedimentos pobres de cura. As quedas de resistência apresentadas por tais concretos chegaram a 50% quando comparada a cura ao ar com a cura úmida. Na cura em temperatura elevada, a velocidade da reação pozolânica e a hidratação do cimento e da escória foram acelerados. Aos 3 dias de idade, todos concretos apresentaram maior resistência que na cura referência. Já aos 7 dias, as resistências foram menores e seguiram esta tendência para as demais idades. O processo de cura teve grande influência sobre a penetração acelerada de cloretos. Concretos sujeitos a cura úmida apresentaram permeabilidade muito baixa na idade de 180 dias. Quando sujeitos a cura ao ar ou elevada temperatura apresentaram, para a mesma idade de 180 dias, permeabilidades classificadas como muito elevadas. Já a falta de água durante o desenrolar da cura do concreto resultou em maior porosidade. A cura ao ar resultou em porosidades em média 20% maiores para os concretos com adições e 35% para o concreto referência quando comparadas a cura ao ar e a cura úmida.

A partir do estudo de Ramezianpour & Malhotra (1995) e demais estudos citados é possível verificar a influência da cura sobre o desenvolvimento da estrutura de poros do concreto convencionais ou com adição de escória, principalmente sobre a velocidade de desenvolvimento desta estrutura. Com base nos trabalhos citados nas seções anteriores verificou-se a dependência da resistividade elétrica à matriz de poros da pasta e, conseqüentemente, ao processo de cura aplicado.

2.3.2 Temperatura

A resistividade elétrica controla o fluxo de íons na solução aquosa dos poros do concreto, sendo muito sensível ao teor de umidade de equilíbrio e a temperatura do mesmo. Tanto o aumento da umidade quanto o da temperatura resultam em diminuição da resistividade elétrica, (HELENE, 1993; NEVILLE, 1997).

Castellote et al. (2002) afirmam que a resistividade elétrica é o inverso da condutividade específica e, sendo assim, é dependente da temperatura. Um aumento de temperatura comumente resulta em diminuição da resistividade em função da influência da primeira na mobilidade e interação iônicas. Polder (2001) afirma que aumentos de temperatura resultam em menores resistividades em função da maior mobilidade iônica e maior interação íon-íon ou íon-sólido.

Whiting & Nagi (2003) constataam que a dependência da resistividade elétrica do concreto à temperatura deve-se inteiramente a sua influência sobre o eletrólito, ou seja, sobre a solução dos poros. Com o aumento da temperatura diminui a viscosidade da solução, aumentando a mobilidade iônica e, conseqüentemente, a condutividade elétrica.

Os pesquisadores citam os resultados de Hope et al. (1985) expostos na figura 2.5.

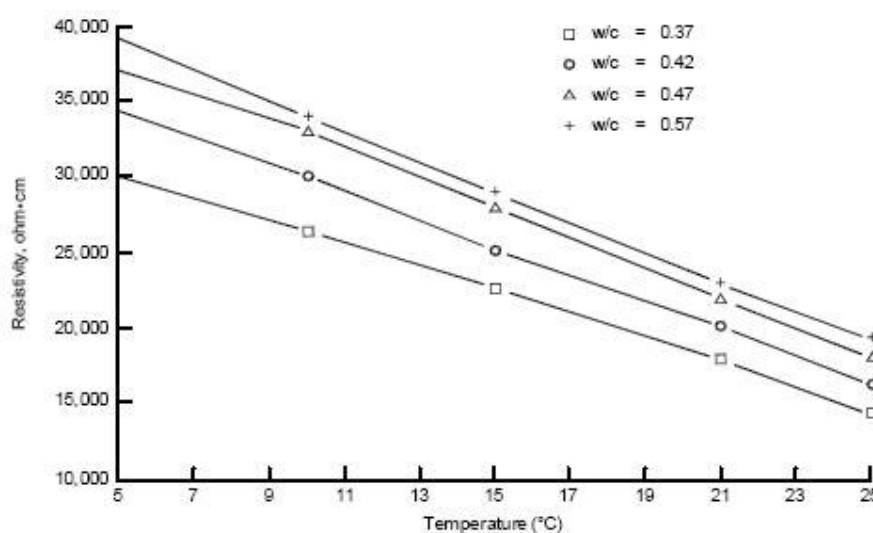


Figura 2.5. Resistividade elétrica versus temperatura. (Hope et al. 1985 apud Whiting & Nagi 2003)

Andrade (2005) afirma que as medidas de resistividade elétrica do concreto podem ser generalizadas desde que padronizadas a temperatura de 25 °C conforme proposto em Castellote et al. (2002). Já Gowers & Millard (1999) propõem um acréscimo de +1000

ohm.cm para cada 3 °C de queda da temperatura ambiente com relação a temperatura tomada como referencial às medidas.

Hoppe (2005) cita Whittington et al. (1981) onde este propõe a lei geral de Hinrichson e Rasch para relacionar resistividade e temperatura.

$$\rho_1 = \rho_2 \cdot e^{A \cdot (1/T_2 - 1/T_1)} \quad (3.1)$$

Onde ρ_1 e ρ_2 são as resistividades para as temperaturas T_1 e T_2 , respectivamente. As temperaturas T_1 e T_2 são dadas em kelvin e A é uma constante.

2.3.3 Teor de umidade ou grau de saturação

Monfore (1968, apud Abreu 1998) afirma que a condutividade elétrica no concreto pode ser entendida como o movimento dos íons na água evaporável da matriz, sendo que qualquer fator que altere a quantidade de líquido ou a sua composição afetará a resistividade elétrica do concreto.

Basheer et al. (2002) afirmam que as mudanças na resistividade elétrica de concretos de cimento Portland são pequenas após 14 dias de idade, após este período as variações de resistência elétrica serão função do grau de saturação da rede de poros capilares e da concentração iônica da solução dos poros.

Hoppe (2005) entende que a variação do teor de umidade do concreto é a variável que mais influencia a resistividade elétrica. O pesquisador entende que a diminuição da umidade implica em uma diminuição da quantidade de solução dos poros, ou seja, uma diminuição do eletrólito responsável pela transmissão da corrente elétrica que atravessa o concreto e consequentemente um aumento na resistividade elétrica.

Hunkeler (1996) afirma que para baixas umidades relativas a densidade de corrente de corrosão é inversamente proporcional à resistência elétrica do eletrólito e resistividade elétrica da pasta, ou seja, diretamente proporcional a condutividade elétrica do concreto.

Smith et al. (2004) estudando a resistividade elétrica de concretos moldados com cimento Portland em misturas binárias e ternárias de sílica ativa, escória de alto forno e cinza volante concluíram que com o aumento do grau de saturação diminui a resistividade elétrica do concreto, por outro lado, com a secagem do mesmo há um aumento da resistividade.

GjØrv et al. (1977) destacam a grande influência que o grau de saturação do concreto exerce sobre a resistividade elétrica. Experimentos realizados pelos pesquisadores, indicaram

que reduzindo o grau de saturação do concreto de 100% para 20%, a resistividade aumentou de 7.10^3 ohm.cm para $6.000.10^3$ ohm.cm.

A fissuração interna do concreto também parece ter influência sobre a resistividade elétrica do concreto, segundo os estudos de GjØrv et al. (1977). Os pesquisadores reduziram o grau de saturação de um concreto de 100% para 40%, forçando a retração da estrutura interna do mesmo e conseqüente fissuração. Após a secagem o concreto foi resaturado a vácuo, atingido graus de saturação maiores que os 100% originais. Mesmo assim, a resistividade elétrica não alcançou mais os valores originais, chegando, no máximo, a 75% do valor inicial.

Hunkeler (1996) avaliou a resistividade elétrica da solução dos poros do concreto e observou que a mesma se aproxima de 15 ± 4 ohm.m para umidade relativa abaixo de 80% e 9 ± 2 ohm.m para U.R. de 100%. O pesquisador explica a diminuição da resistividade da solução dos poros com o aumento da umidade relativa de duas possíveis maneiras. A primeira seria que a água dos grandes capilares, só presente para umidades relativas bastante altas, é de mais fácil locomoção que a dos pequenos capilares. A segunda razão seria que para elevadas umidades praticamente não há carbonatação mantendo elevado o teor de OH^- na solução, aumentando a condutividade da mesma.

Neville (1997) afirma que o concreto úmido se comporta como um eletrólito, ficando sua resistividade elétrica da ordem de 10^4 ohm.m. Já o concreto seco em estufa, comporta-se como um isolante, com resistividade elétrica próxima a 10^9 ohm.m. Esta característica é função da transmissão da corrente elétrica no concreto ser realizada pelos íons presentes na solução dos poros. Quando não há conectividade entre os capilares, a corrente passa a ser transmitida pela água do gel. Entende o autor, que qualquer aumento da umidade ou concentração dos íons na água dos poros resultará na diminuição da resistividade elétrica do concreto.

Whiting & Nagi (2003) entendem o teor de umidade do concreto como a variável mais influente sobre sua resistividade elétrica. Quanto maior a umidade maior a quantidade de solução dos poros para servir como caminho para a corrente elétrica. Hunkeler (1996) observou que a condutividade elétrica do concreto decresce com o a diminuição de umidade do mesmo, chegando a valores próximos a zero para umidade próxima a 42%. A água remanescente no interior de poros do concreto para teores de umidade abaixo de 40% não é condutora por estar fortemente aderida às paredes dos capilares.

2.3.4 Agentes agressivos e contaminantes

A presença de íons agressivos, segundo Hoppe (2005), tende a aumentar a concentração iônica da solução dos poros, elevando sua condutividade específica e, assim, diminuindo sua resistividade elétrica. Polder & Peelen (2002) entendem que a corrente elétrica é conduzida pelos íons da solução, assim, o aumento da concentração destes íons da mesma forma que o aumento do tamanho dos poros resultará em maior condutividade e conseqüente menor resistividade.

Andrade (2005) entende que desde que a alcalinidade do concreto seja mantida, a composição da solução aquosa dos poros não é de grande influência sobre a resistividade elétrica. A carbonatação resulta na diluição da solução com aumento da resistividade desta, tornando-a mais influente. Já a presença de cloretos resulta em pequena diminuição da resistividade elétrica já que a alcalinidade da solução dos poros não é afetada.

Hunkeler (1996) afirma que o aumento da concentração de cloretos na solução dos poros não é de grande influência sobre a resistividade elétrica do concreto. O aumento da concentração de NaCl na solução tende a diminuir o pH da mesma além de diminuir a concentração dos íons Ca^{2+} e OH^- , logo, o aumento de condutividade esperado com o aumento da concentração dos íons Cl^- é contrabalançado pela diminuição de concentração dos outros íons. O autor destaca que a concentração dos íons cloreto é de menor influência que o teor de umidade do concreto.

Os estudos de GjØrv et al. (1977) demonstram resultados antagônicos às conclusões de Hunkeler (1996) e Andrade (2005). GjØrv et al. (1977) estudaram a influência do ingresso de íons cloreto sobre a resistividade elétrica do concreto. Para teores pequenos, até 0,5% da massa de cimento, o ingresso de cloretos resultou em acréscimo de resistividade elétrica. Para teores maiores, a resistividade elétrica apresentou queda de até 50%. O crescimento da resistividade elétrica para baixos teores de cloretos foi entendido como resultado da combinação química dos mesmos com alguns componentes da pasta de cimento, formando cloroaluminatos tricálcicos e cloroferratos tricálcicos, conhecidos como sais de Friedel. Estes sais são altamente solúveis e se precipitam facilmente, preenchendo os poros da pasta e, assim, diminuindo a permeabilidade do concreto. Já o decréscimo da resistividade para teores maiores que 0,5% da massa de cimento foi entendido como resultado do aumento da quantidade de cloretos livres na solução dos poros, aumentando a condutividade da mesma e, conseqüentemente, diminuindo a resistividade elétrica do concreto.

Com relação à presença de cloretos na solução aquosa dos poros sobre a resistividade elétrica, Whiting & Nagi (2003) citam os estudos de Henry (1964) e Monfore (1968) onde estes verificaram decréscimos de resistividade elétrica com o aumento da concentração de cloretos na água dos poros. Em função da tendência de fixação dos íons Cl^- pelas fases aluminosas, cimentos com elevados teores de C_3A ou com adição de escória de alto forno tenderão a ser menos sensíveis à presença de cloretos.

Maslehuddin et al. (1996, apud Saleem et al., 1996) afirmam que a corrosão pode ser acelerada pela presença simultânea de íons cloreto e sulfato no concreto. A presença de ambos os íons resulta em maior concentração de íons cloreto livres na solução dos poros quando comparada a de uma pasta contendo apenas cloreto. Tal fato deve-se a reação simultânea entre os cloretos e sulfatos com o C_3A . A maior presença de cloretos resultará não só na possível despassivação das armaduras mas também na diminuição da resistividade elétrica do concreto.

Saleem et al. (1996) avaliaram a influência do teor de umidade e da concentração de cloretos sobre a resistividade do concreto. A resistividade elétrica diminui com o aumento do teor de umidade e com o aumento da concentração de cloretos. Os pesquisadores atribuem a queda de resistividade a maior condutividade resultante da maior presença de solução e íons livres. A figura 2.6 demonstra este comportamento.

O comportamento da resistividade em concretos com sulfatos foi semelhante ao dos concretos com cloretos.

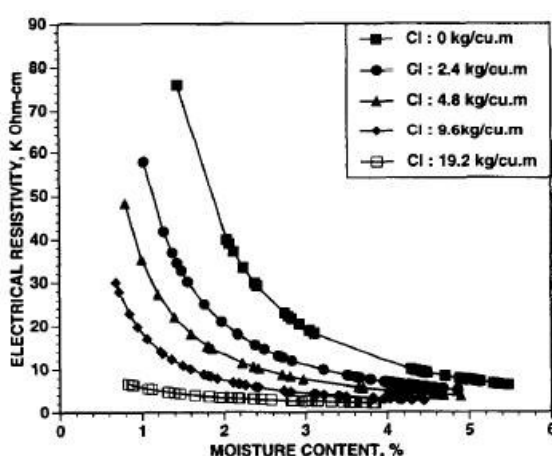


Figura 2.6. Resistividade elétrica em função da umidade e concentração de Cl^- (Saleem et al., 1996)

A presença simultânea de cloretos e sulfatos no concreto resultou em maior queda de resistividade quando comparados os resultados com o das misturas isoladas. A figura 2.7 apresenta os resultados obtidos, (SALEEM et al., 1996).

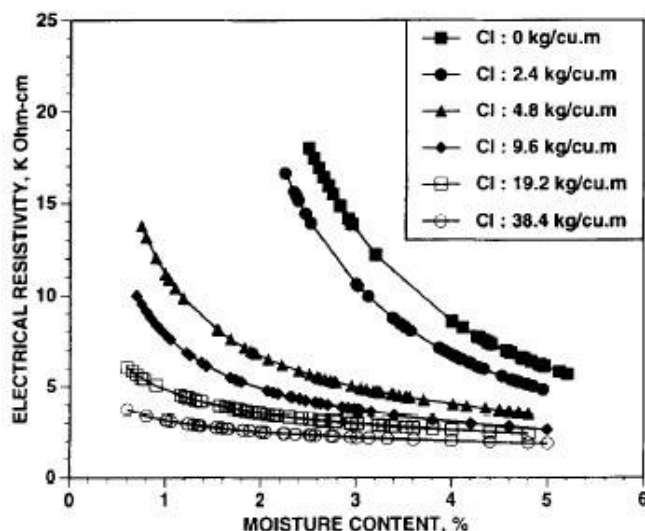


Figura 2.7. Resistividade elétrica em função da umidade e concentração de Cl^- para um teor de SO_4^- de $7,2 \text{ kg/m}^3$ no concreto (Saleem et al., 1996)

Saleem et al. (1996) concluem que para um teor de umidade de 1,5% o concreto é capaz de manter a proteção das armaduras, segundo o critério da resistividade mínima de 10 kohm.cm, para um teor de cloretos de até $19,2 \text{ kg/m}^3$ de concreto. Já na presença simultânea de cloretos e sulfatos, o teor de cloretos admissível cai para $4,8 \text{ kg/m}^3$.

Com relação ao efeito da carbonatação sobre a resistividade elétrica, Neville (1997) cita como efeito positivo da mesma a menor porosidade do concreto resultante em função do maior volume do carbonato de cálcio (CaCO_3) em relação ao hidróxido de cálcio original (Ca(OH)_2) o que acaba por ocupar e preencher os poros do concreto. A menor porosidade diminui a permeabilidade do concreto e a mobilidade da umidade interna do mesmo. Brameshuber et al. (2003) afirmam que a carbonatação eleva a resistividade elétrica do concreto.

Hoppe (2005) cita o estudo de Chi et al. (2002) onde estes avaliaram o efeito da carbonatação sobre a resistividade elétrica do concreto. Estudaram concretos com 100% de cimento Portland com relações a/ag de 0,48 e 0,58 e concretos com teores de escória de 24% e 60% e relação a/ag de 0,36 e 0,40. Os concretos foram submetidos à carbonatação acelerada e paralelamente testou-se sua resistividade elétrica. Os resultados encontrados por Chi et al. (2002) são dados na figura 2.8.

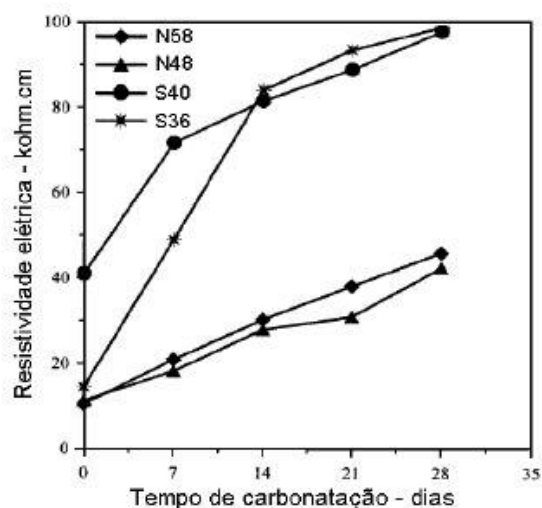


Figura 2.8. Resistividade elétrica versus carbonatação. (Chi et al., 2002 apud Hoppe 2005)

Observaram que com o avanço da carbonatação houve incremento da resistividade elétrica em função da diminuição da porosidade da matriz, contudo, houve incremento na taxa de corrosão das armaduras em função do processo de carbonatação.

2.4 Medida da resistividade

O método mais empregado para medidas da resistividade elétrica aparente do concreto é o método dos quatro eletrodos ou método de Wenner. Este método foi inicialmente desenvolvido para medir a resistividade de solos mas foi adaptado e é amplamente empregado para avaliar a resistividade de concretos.

A medida da resistividade através do método é simples e pode ser realizada através da leitura da corrente elétrica e diferença de potencial entre quatro eletrodos. Morris et al. (1996) afirmam que a resistividade elétrica pode ser medida pelo método de Wenner segundo a equação abaixo:

$$\rho = K \cdot 2 \cdot p \cdot a \cdot V / i \quad (2.2)$$

Onde ρ é a resistividade elétrica, a a distância entre eletrodos, V a diferença de potencial medida e i a corrente elétrica medida. K é um parâmetro de correção, função da distância entre eletrodos e profundidade dos mesmos no concreto.

Abreu (1998) apresenta a equação adaptada por Medeiros Filho (1979):

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

Onde ρ é a resistividade elétrica calculada em ohm.cm; V a diferença de potencial medida em volts entre os eletrodos centrais; i a corrente elétrica em amperes entre os eletrodos extremos; d a distância média entre o eixo dos eletrodos medida em centímetros e b a profundidade de embutimento dos eletrodos no concreto também medida em centímetros.

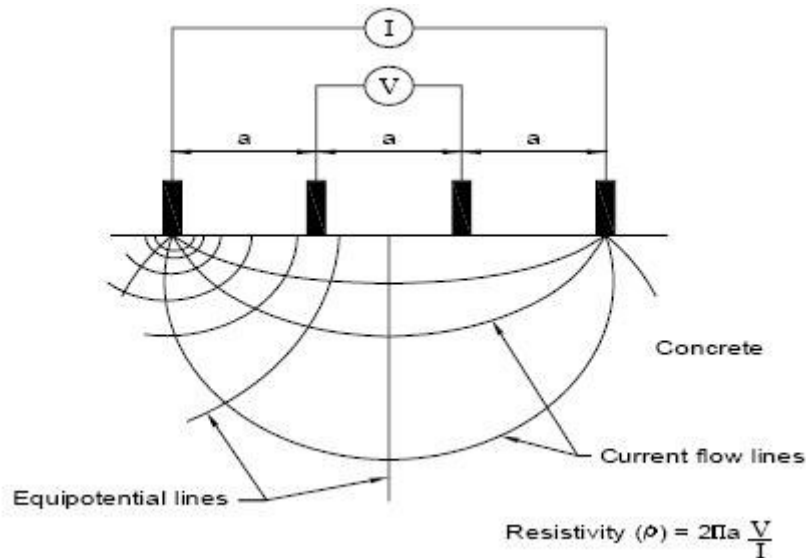


Figura 2.9. Esquema do método dos quatro eletrodos (Gowers & Millard, 1999)

A resistividade elétrica é medida a uma profundidade aproximadamente igual a distância entre eletrodos, cerca de três centímetros no caso da sistemática empregada neste trabalho. Profundidade similar à empregada no cobrimento das armaduras e, sendo assim, significativa na determinação da capacidade do concreto em proteger as armaduras.

O método dos quatro eletrodos apesar de simples pode estar sujeito a erros e distorções em função da geometria do conjunto, características do concreto avaliado ou presença de armaduras. A seguir serão apresentados alguns destes erros baseados principalmente no trabalho de Gowers & Millard (1999). Whiting & Nagi (2003) afirmam que a distância do eletrodo aos extremos do corpo-de-prova, superfície de contato eletrodo-concreto, heterogeneidade do concreto, presença de armaduras e camadas de diferente resistividade são as características que influem sobre o método de Wenner de medida da resistividade elétrica do concreto.

2.4.1 Geometria do corpo-de-prova

Gowers & Millard (1999) afirmam que as medidas de diferença de potencial elétrico e corrente elétrica obtidas pelo método de Wenner, só são corretas quando se pode admitir o

concreto como de volume semi-infinito, onde as dimensões da peça de concreto são grandes em comparação ao espaçamento entre eletrodos (a). Quando as dimensões da peça são relativamente pequenas, a corrente é confinada a percorrer uma região diferente da proposta pelo método resultando em uma resistividade elétrica superestimada. Destacam que podem ocorrer erros na estimativa da resistividade elétrica do concreto quando as medidas são tomadas em espessuras muito delgadas de concreto ou próximas a um extremo da peça. Os autores avaliaram a influência da altura e largura do corpo-de-prova (h e b , respectivamente) relativamente à distância entre eletrodos (a) sobre a resistividade elétrica medida e a real do corpo-de-prova (ρ_{med}/ρ_{real}). Avaliaram, também, a influência da distância dos eletrodos aos extremos do corpo-de-prova (x e y). Com relação à altura e largura do corpo-de-prova, concluem os autores que alturas relativas (h/a) iguais ou maiores que 6, resultam em pouca ou nenhuma influência sobre a resistividade elétrica medida. O mesmo vale para a largura relativa (b/a), valores maiores ou iguais a 6 não resultam em erros significativos. A distância relativa à face da peça de concreto perpendicular ao eixo dos eletrodos (x/a) deve ser maior ou igual a 3, para não influenciar as medidas. Já a distância ao extremo ao longo do eixo dos eletrodos foi pouco influente, segundo os autores. A figura 2.10 apresenta a influência das dimensões sobre a medida da resistividade.

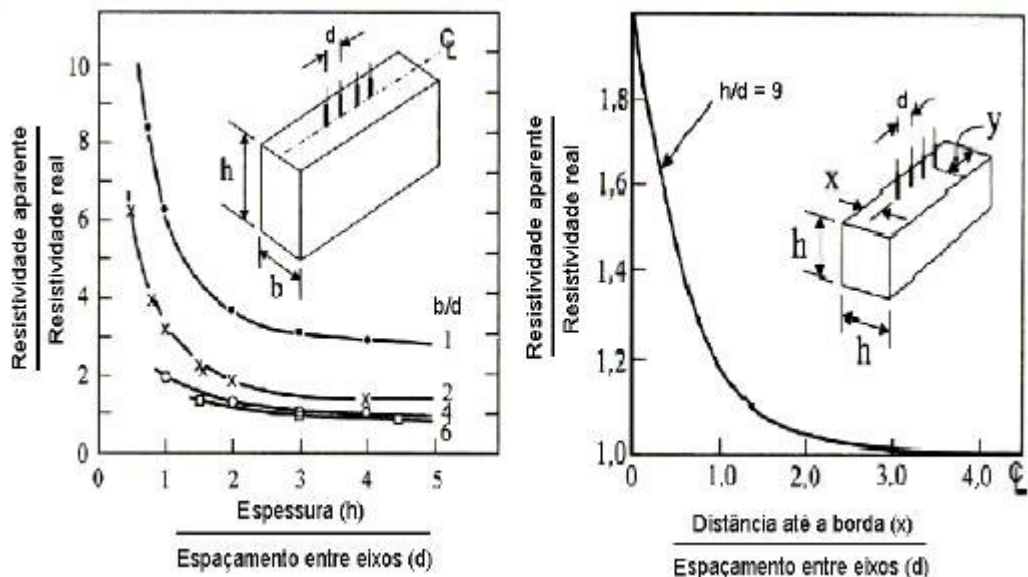


Figura 2.10. Influência das dimensões do corpo-de-prova sobre a resistividade elétrica (Gowers & Millard, 1999).

2.4.2 Contato entre os eletrodos e o concreto

O bom contato entre os eletrodos e o concreto é imprescindível para a obtenção de medidas confiáveis. O mau contato pode resultar em estimativas erradas de resistividade elétrica, principalmente na leitura da diferença de potencial, mais sensível ao contato, (GOWERS & MILLARD, 1999).

A polarização do contato também pode resultar em distorções nas medidas. Whiting & Nagi (2003) afirmam que o emprego de corrente contínua em medidas de resistividade resulta na polarização do contato concreto-eletrodo, distorcendo os resultados. Os pesquisadores afirmam que o emprego de corrente alternada evita tal problema.

Gowers & Millard (1999) também recomendam o emprego de correntes alternadas de baixa frequência para reduzir os efeitos de polarização do contato eletrodo/concreto reduzindo distorções de medida da resistividade elétrica.

2.4.3 Tipo de onda, frequência e intensidade da corrente elétrica

Hoppe (2005) cita o trabalho de Millard et al. (1989) onde estes afirmam que o emprego de corrente de ondas quadradas elimina o efeito capacitivo que eleva a resistividade elétrica com o crescimento da corrente. Contudo, os pesquisadores ponderam que são satisfatórios os resultados obtidos com correntes de onda senoidal, não observando diferenças maiores que 6% entre os dois tipos de onda. Millard et al. (1989) estudaram também a influência da intensidade da corrente (figura 2.11) e frequência da onda (figura 2.12) sobre a resistividade. Concluíram que devem ser evitadas correntes menores que 200 μA mas também valores elevados de corrente introduzem erros devido a resistência de contato entre o eletrodo e o eletrólito.

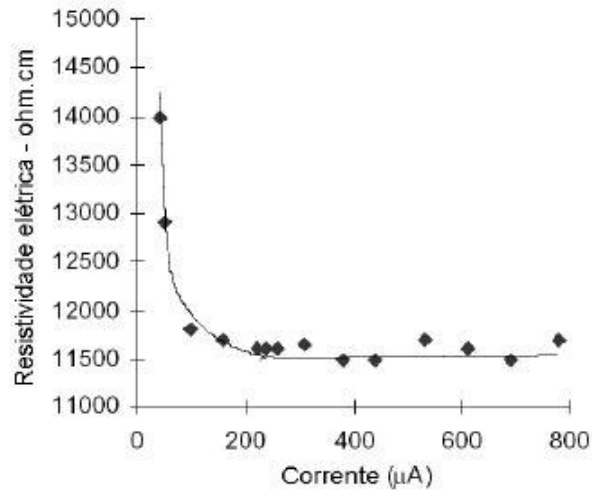


Figura 2.11. Influência da corrente sobre a resistividade. (Millard et al. 1989 apud Hoppe 2005)

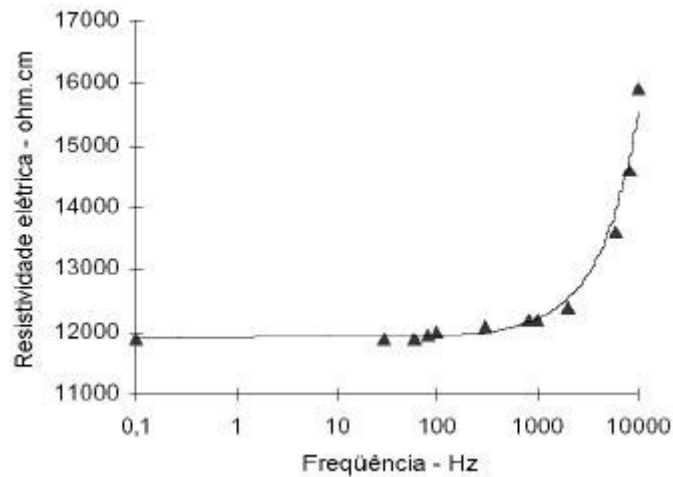


Figura 2.12. Influência da frequência sobre a resistividade. (Millard et al. 1989 apud Hoppe 2005)

2.4.4 Heterogeneidade do concreto

O método dos quatro eletrodos prevê que o material do qual será medida a resistividade elétrica é homogêneo, algo que não é válido para o concreto. A presença do agregado graúdo e camadas de diferentes características influem sobre as medidas. Gowers & Millard (1999) recomendam que a distância entre eletrodos (a) seja maior ou igual a 1,5 vezes a dimensão característica máxima do agregado graúdo (d_{max}).

Gowers & Millard (1999) destacam, também, que as camadas superficiais do concreto podem apresentar resistividade elétrica diferente do restante da peça devido a diferenças de umidade, concentração salina ou, ainda, devido à ocorrência de carbonatação. Os autores

destacam que para evitar a influência das camadas superficiais sobre a resistividade elétrica, a distância entre eletrodos (a) deve ser maior que 8 vezes a espessura (t) da camada superficial.

2.4.5 Presença de armaduras

A presença de armaduras no interior do concreto paralelas ao alinhamento do eixo dos quatro eletrodos resulta em distorção do campo de corrente. A influência das armaduras pode ser minimizada com a medida da resistividade tomada com o eixo dos eletrodos perpendicularmente às armaduras, caso isto não seja possível pode-se manter um afastamento lateral entre o eixo dos eletrodos e as armaduras. Gowers & Millard (1999) concluem que para espessuras de cobrimento (c) maiores que 1,5 vezes a distância entre eletrodos (a) as medidas de resistividade elétrica sofrem pouca influência das barras de aço.

3 O CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND BRANCO E A ESCÓRIA DE ALTO FORNO

3.1 Cimento Portland Branco

O emprego da estrutura da edificação como elemento de apelo arquitetônico, não relegando-a a uma função apenas de sustentação e transmissão de esforços, mas a uma função mais ativa, onde esta é usada como elemento de composição arquitetônica, leva os arquitetos a buscar estruturas de formas e materiais pouco usuais ou inovadores. O emprego do concreto aparente executado com cimento Portland branco estrutural tem crescido sob esta ótica. O cimento Portland branco (CPB) possibilita a obtenção elementos estruturais brancos além de possibilitar o emprego de pigmentos para obtenção de concreto colorido. Passuelo (2004) entende que é possível a produção de concretos coloridos com qualquer tipo de cimento e agregados, contudo, é impossível obter cores claras quando do emprego de cimentos convencionais.

Uma das obras mais marcantes executada em cimento Portland branco no Brasil está situada no Rio Grande do Sul. O museu Iberê Camargo (figura 3.1), projeto do arquiteto português Álvaro Siza, a ser inaugurado no ano de 2008, na cidade de Porto Alegre, empregou 2500m³ de concreto aparente branco, (PASSUELO, 2004). A construção do museu motivou uma série de trabalhos na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), entre eles as dissertações de Kirchheim (2003), Passuelo (2004), Aguiar (2006) e o artigo de Vieira & Dal Molin (2005). Outras obras que merecem destaque pelo pioneirismo no emprego do cimento Portland branco são o prédio da Flextronics, em Sorocaba, São Paulo, e o condomínio Panamerica Park, em São Paulo, capital.



Figura 3.1. Museu Iberê Camargo (site Fundação Iberê Camargo, 2007)

O consumo anual por habitante de cimento Portland branco no Brasil é de apenas 0,5 kg/hab/ano enquanto na Europa ou Estados Unidos, esse valor chega a 4 kg/hab/ano, (CIMENTO CAUE, 2001). A título de comparação, o consumo percapta médio por ano de cimento Portland cinza é de 267 kg/hab/ano, (Roberto, 2001 apud Kirchheim 2003).

A norma brasileira que regulamenta o cimento Portland branco é a NBR 12989 (1993). A norma classifica os cimentos em estruturais e não estruturais. O cimento Portland branco estrutural recebe a mesma classificação de classes de resistência dos cimentos convencionais, 25 MPa, 32 MPa e 40 MPa, e é aplicável nas mesmas situações dos similares cinzas. Já o cimento Portland branco não estrutural não recebe classificação de resistência e é empregado apenas em rejuntamento.

O cimento Portland branco é resultado do emprego de matérias primas contendo baixos teores de óxidos de ferro (abaixo de 0,3% do clínquer) e óxido de manganês. Como combustível da queima emprega-se gás ou óleo para que as cinzas do carvão não contaminem o cimento. O ferro age como fundente na produção de um clínquer convencional, sendo assim, para a produção do clínquer branco necessita-se de temperaturas mais elevadas. A moagem exige o emprego de seixos ou metais claros no lugar das convencionais bolas de aço. As paredes do moinho também precisam ser revestidas, usando-se revestimento de pedras ou cerâmica. O maior custo de moagem somado a necessidade de seleção das matérias primas resulta em um preço do cimento Portland branco cerca de três vezes maior que o convencional cimento cinza, (NEVILLE, 1997; MEHTA & MONTEIRO, 1994).

A composição do cimento Portland branco também é diferenciada. Segundo Mehta & Monteiro (1994) a composição média do clínquer dos cimentos Portland comuns é de 45% a 60% de C_3S (50% em média), 15% a 30% de C_2S (25%), 6% a 12% de C_3A (8%) e 6% a 8% de C_4AF (8%). Kirchheim (2003), através de extensa pesquisa bibliográfica, cita que a composição média de um cimento Portland branco varia de 50% a 72% de C_3S , 15% a 30% de C_2S , 4% a 14% de C_3A e menos de 1% de C_4AF . Destaca a autora o menor teor de C_4AF e o possível maior teor de C_3A .

Hamad (1995) avaliou a composição potencial dos cimentos branco e cinza através das equações de Bogue (1955). Ele observou que o teor de silicatos ($C_3S + C_2S$) do cimento branco tende a ser maior que do cimento cinza, além do teor de C_2S , também maior no cimento branco. O teor de C_3A também foi maior para o cimento branco. O pesquisador destaca que o tempo de pega do cimento Portland branco tende a ser menor em função do maior teor de C_3A , já que este se hidrata mais rapidamente que os demais compostos. O calor de hidratação, a resistência inicial e a perda de trabalhabilidade também tendem a ser maiores pela mesma razão anterior.

Hamad (1995) pondera que a resistência final de um cimento com maior teor de C_2S tende a ser mais elevada que a de um cimento com maior teor de C_3S em função dos teores de C-S-H e CH formados na hidratação de cada um. Segundo o autor, o cálculo estequiométrico mostra que usando uma relação água/aglomerante ótima na hidratação do C_3S , obtém-se 61% de C-S-H e 39% de CH, enquanto que na hidratação do C_2S resultam 82% de silicato de cálcio hidratado e 18% de hidróxido de cálcio.

A NBR 12989 (1993) limita a adição de materiais carbonáticos em 25% da massa total dos componentes. O filer calcário é a principal adição realizada no cimento Portland branco, (MATOS & DAL MOLIN, 2003; RIZZON et al., 2006).

O emprego de cimento Portland branco altera o comportamento do concreto. Diferentes pesquisadores testaram a influência do cimento branco sobre as propriedades do concreto fresco e endurecido além de características de durabilidade do mesmo. Alguns dos estudos serão descritos a seguir.

Barbosa et al. (2005) avaliou a resistência à compressão, absorção capilar e resistência à tração por compressão diametral de três famílias de concreto, uma utilizando CII Z 32 RS (classe 1) e outras duas empregando o CPB 40, sendo que uma recebeu adição de aditivo superplastificante (classe 3) e outra não (classe 2). Cada família foi moldada em três traços diferentes, alterando a proporção cimento/agregados (m), de 1:3, 1:5 e 1:6. O teor de argamassa adotado foi de 47% e o abatimento fixado em 100 ± 10 mm.

A análise dos resultados de resistência à compressão obtidos por Barbosa et al. (2005) mostram o melhor desempenho dos concretos executados com CPB com relação aos concretos executados com CII Z. Cabe destacar o melhor desempenho da mistura contendo superplastificante. Os autores ressaltam, porém, que este melhor desempenho se deve às menores relações água/aglomerante obtidas em função do uso do aditivo. Destacam, também, que as diferenças de resistência entre as misturas diminuem dos 7 para os 28 dias. Creditando estas diferenças às adições pozolânicas presentes no cimento CII Z que retardam o ganho de resistência. Os resultados mostram, também, o pior desempenho da mistura classe 2 (CPB sem aditivo). Creditam este resultado às maiores relações a/ag necessárias para obtenção do abatimento. Quando analisados os resultados das misturas classes 1 e 3, percebe-se comportamento semelhante, o que já era esperado em função do emprego das mesmas relações água/aglomerante. Por fim, observaram o maior custo das misturas executadas com CPB, chegando a valores entre 100% e 123% maiores que os equivalentes alcançados com CII Z.

Hamad (1995) avaliou a influência do emprego do cimento Portland branco sobre as propriedades do concreto fresco e endurecido. Seus resultados mostraram menores tempos de início e fim de pega para o cimento branco quando comparado ao cimento cinza. A justificativa para isso se deveria ao maior teor de C_3A apresentado pelo cimento branco. A trabalhabilidade dos concretos executados com os dois cimentos também foi diferente, em igualdade de resistência, o cimento branco resultou em maior abatimento. O teor de ar incorporado não apresentou variações significativas em função do tipo de cimento.

Os resultados de resistência à compressão apontaram o melhor desempenho do concreto moldado com cimento Portland branco. Aos 28 dias, a resistência do concreto com CPB foi 25% maior. Confirmando a previsão do autor em função do maior teor de C_2S e silicatos totais apresentado por este cimento. A resistência a 1 dia de idade também foi maior para o concreto com CPB, credita Hamad este fato ao maior teor de C_3A apresentado pelo cimento branco. O C_3A é o composto que mais rapidamente se hidrata influenciando a resistência nas primeiras idades.

Mattos & Dal Molin (2003) afirmam que o cimento Portland branco (CPB) possui diferenças em sua composição química quando comparado com o cimento Portland cinza. O CPB possui maiores teores de C_3A e reduzido teor de C_4AF . O maior teor de C_3A resulta em menores tempos de início e fim de pega. Outra característica apontada pelos pesquisadores está na presença de filler calcário adicionado ao CPB em quantidade não especificada pelo fabricante.

Kirchheim (2003) avaliou a resistência à compressão, absorção capilar e carbonatação acelerada para concretos realizados com quatro diferentes tipos de cimento Portland branco, dois nacionais e dois importados, e um concreto referência, executado com CPV ARI. Todos os concretos foram moldados com três diferentes relações água/aglomerante, 0,40, 0,50 e 0,60, teor de argamassa de 53% e abatimento de 70 ± 10 mm. Todos os ensaios foram realizados nas idades de 3, 14 e 28 dias.

Os resultados de resistência à compressão apresentados por Kirchheim (2003) – tabela 3.1 - mostram menores valores de resistência para os concretos executados com CPB quando comparados com o CPV ARI para as idades de 3 e 14 dias. Aos 28 dias há uma aproximação dos resultados dos diferentes concretos com o referência, com exceção de um dos concretos executado com CPB nacional.

A autora não observou uma boa correlação entre os resultados de resistência à compressão e absorção de água (figura 3.2). Entende ela que a resistência à compressão é regida, sobretudo, pela porosidade total do concreto enquanto que a absorção de água é função da estrutura de poros, diâmetro, distribuição e interconectividade.

Tabela 3.1. Resultados de resistência à compressão. (Kirchheim, 2003)

Mistura	a/agl	fc (MPa) - Idade		
		3 dias	14 dias	28 dias
CPV ARI	0,4	38,57	41,12	43,45
	0,5	26,93	33,76	33,84
	0,6	18,99	26,04	27,16
CPB 1	0,4	30,61	37,08	37,97
	0,5	22,27	29,46	32,40
	0,6	14,92	22,50	24,29
CPB 2	0,4	33,04	41,52	45,87
	0,5	23,14	29,51	32,31
	0,6	14,83	23,34	24,44
CPB 3	0,4	35,46	42,84	45,31
	0,5	23,94	32,89	33,25
	0,6	16,34	23,94	26,52
CPB 4	0,4	34,07	45,59	45,22
	0,5	19,89	29,13	33,20
	0,6	14,06	21,30	23,96

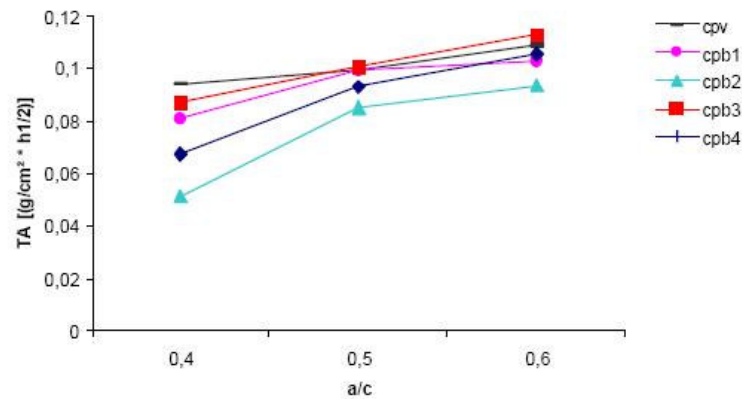


Figura 3.2. Resultados de taxa de absorção. (Kirchheim, 2003)

Mattos & Dal Molin (2003) avaliaram a influência do CPB na resistência à penetração acelerada de cloretos e na absorvidade. As misturas testadas foram realizadas com CPB ou CP I, as relações água/aglomerante avaliadas foram 0,4, 0,5 e 0,6. O teor de argamassa foi fixado em 52%. Os resultados de resistência à compressão demonstram o melhor desempenho do CPB quando comparado ao cimento Portland cinza. Aos 28 dias, as resistências do CPB foram 16% maiores, em média. Entendem os autores que este melhor desempenho se deve à presença do filer calcário que densifica a pasta refinando a estrutura de poros do concreto.

A presença do filer calcário também resultou em melhor desempenho dos concretos moldados com CPB quanto à taxa de absorção. Os autores, contudo, não observaram variações proporcionais entre a resistência à compressão e a taxa de absorção com a diminuição da relação água/aglomerante. Quando a relação a/ag variou de 0,6 para 0,4 houve um aumento em média de 1,5 vezes enquanto a taxa de absorção diminuiu de 1,2 vezes. Entendem os autores que isto exemplifica que a especificação do concreto com base na resistência pode não garantir o bom desempenho quanto à durabilidade.

Os resultados de permeabilidade a cloretos obtidos por Mattos & Dal Molin (2003) são apresentados na figura 3.3.

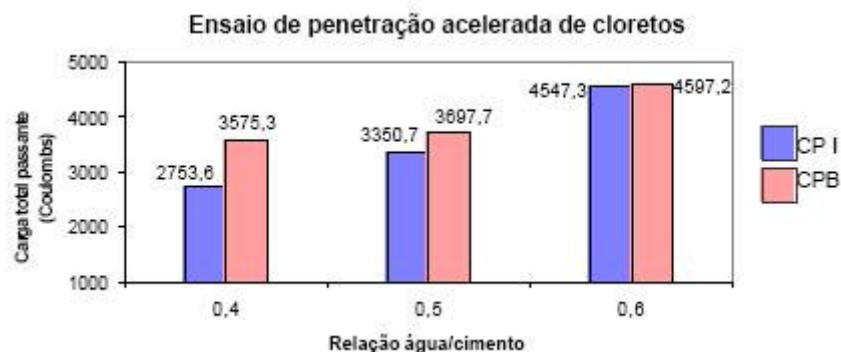


Figura 3.3. Resultados de penetração a cloretos. (Mattos & Dal Molin, 2003)

Observa-se o pior desempenho do cimento Portland branco a penetração acelerada de cloretos quando comparado ao CP I. Entendem os autores que este desempenho se deve à composição química do CPB. A quantidade total de aluminatos disponível não seria suficiente para se combinar quimicamente com os íons cloreto devido à presença do filer calcário. O CaCO_3 presente no filer tende a reagir com o C_3A e o C_4AF do cimento resultando monocarboaluminatos. Outra característica apontada é de que a presença do filer pode proporcionar o efeito diluição onde há menor quantidade de material cimentício para se combinar com íons Cl^- .

Regis et al. (2005) avaliou a influência da composição granulométrica dos agregados sobre traços executados com CP II Z 32 e CPB 40. Os abatimentos foram fixados em 100 ± 10 mm, as proporções de cimento/materiais secos foram, 1:3, 1:5 e 1:6. Em função do abatimento e do teor de materiais secos obtiveram os teores de argamassa e relação água/aglomerante para cada mistura. Avaliaram outro conjunto de misturas também com cimento CPB 40, com as mesmas relações água/aglomerante das misturas executadas com CP II Z 32, teores de argamassa iguais às usadas para o cimento CPB 40 e aditivo superplastificante. Testaram a densidade aparente, teor de ar incorporado e consumo de cimento. Compararam, também, os tempos de início e fim de pega dos cimentos CP II Z 32, CPB 40 e CPB 40 com aditivo. Os resultados demonstraram menores tempos de início e fim de pega para o CPB. Os resultados são apresentados na figura 3.4.

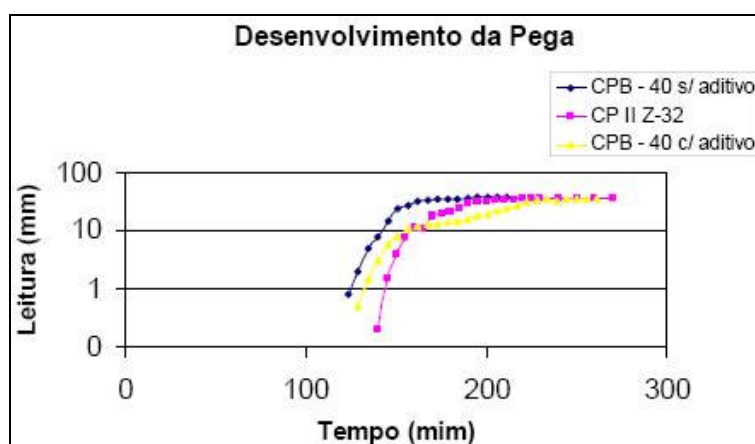


Figura 3.4. Tempos de início e fim de pega. (Regis et al., 2005)

A observação dos resultados demonstra que todos os traços resultaram no mesmo teor de argamassa 40%. Creditam os autores este fato a elevada trabalhabilidade resultante do emprego de uma mistura granulométrica otimizada de agregados. Outro ponto relevante está

no fato dos traços executados com CPB sem aditivo (grupo II) demandarem relações água/aglomerante mais elevadas, entendido como consequência da maior finura apresentada pelo CPB e maior teor de C₃A quando comparado com o CP II Z. Os consumos de cimento não apresentaram diferenças significativas.

Rizzon et al. (2006) estudaram duas misturas, a primeira usando o CP IV 32 e a segunda usando o CPB 40. As relações água/aglomerante testadas foram, 0,4, 0,5 e 0,6. O teor de argamassa adotado foi de 50% e o abatimento fixado em 70 ± 10 mm. Os ensaios realizados foram a resistência à compressão e a penetração de cloretos não acelerada. Os protótipos de 10x20x50cm eram moldados e curados com sacos de estopa umedecidos por 7 dias, posteriormente eram deixados em cura ao ar por mais 21 dias. Completados 28 dias, os protótipos eram mergulhados em solução de NaCl em concentração de 3,5%. O teor de cloretos foi determinado através da extração de pó do protótipo e consequente titulação.

Os resultados de resistência à compressão obtidos por Rizzon et al. (2006) são dados na tabela 3.2. Percebe-se que os traços contendo CPB apresentaram maiores resistências que os executados com o cimento pozolânico, os valores chegaram a ser 23% maiores (relação a/ag igual a 0,4).

Tabela 3.2. Resultados de resistência à compressão. (Rizzon et al., 2006)

Tipo de cimento	Relação água/cimento	Abatimento (cm)	Resistência (MPa)		
			3 dias	7 dias	28 dias
CP IV - 32	0,4	4,0	20,26	23,06	26,50
	0,5	12,5	18,22	21,02	28,79
	0,6	12,0	12,10	16,05	24,59
CP B - 40	0,4	6,0	20,13	28,66	32,66
	0,5	6,7	20,89	23,18	32,36
	0,6	7,8	14,52	19,36	27,26

Os resultados de penetração não acelerada de cloretos apontaram o pior desempenho do CPB com relação ao cimento pozolânico, quando comparados em uma mesma relação a/ag e idade. Os autores creditam este desempenho inferior à menor quantidade de aluminatos em função, principalmente, da presença de filer calcário.

Andrade (2005) avaliou o desempenho de concretos moldados com cimento Portland branco (CPB) quanto à penetração de cloretos em ensaio não acelerado, avaliou, também, a absorção de água por imersão e a resistência à compressão. O pesquisador estudou duas misturas de concreto, uma contendo CPB e outra, referência, contendo CPV ARI. As relações água/aglomerante testadas foram 0,4, 0,5 e 0,6. O teor de argamassa empregado foi de 49% e o abatimento fixado em 80 ± 10 mm.

As vigas protótipos (10x20x50cm) após moldadas, permaneceram por 7 dias em cura cobertas por sacos umedecidos simulando o procedimento normal de obra. Após 28 dias, foram seladas perimetralmente (permitindo apenas o fluxo unidirecional) e imersas em solução salina em concentração de 3,5% de NaCl, permanecendo assim por 6 meses. Em seguida eram retiradas amostras com furadeira de impacto a cada 5 mm da superfície dos corpos-de-prova. O teor de cloretos total foi obtido a partir do pó retirado por titulometria.

O autor observa que o concreto moldado com CPB apresentou maiores resultados de resistência à compressão. Entende ele que este fato se deve a maior porcentual de filer calcário presente no cimento branco, capaz de preencher os poros maiores da pasta, resultando em uma estrutura de poros mais compacta. A presença do filer calcário também foi responsável pela menor absorção de água do concreto com CPB, segundo seu entendimento.

Andrade (2005) destaca que para todas as relações água/aglomerante o teor de cloretos total obtido é maior do que o limite de 0,4%. Destaca, também, que não é possível observar um perfil típico de profundidade de penetração. Como justificativa o autor cita a hipótese do efeito diluição proposta por Mattos e Dal Molin (2003) onde estes afirmam que o alto teor de filer calcário no CPB resulta em uma menor quantidade de material cimentício capaz de combinar-se com os íons cloreto.

Love et al. (2007) estudaram a microestrutura e composição da pasta hidratada de concretos moldados com 80% de cimento Portland branco e 20% de metacaulim ativadas ou não com álcalis. Para a mistura não ativada, a um dia de idade, os pesquisadores observaram que aproximadamente metade do cimento já havia se hidratado e o metacaulim praticamente não havia reagido. Aos 28 dias, na mesma mistura, dois terços do cimento e a maior parte do metacaulim haviam se hidratado. A mistura ativada apresentou para um dia, metade do cimento e um quarto do metacaulim haviam se hidratado. Aos 28 dias, todo o cimento e a maior parte do metacaulim já haviam reagido.

Passuelo et al. (2004) avaliaram a influência de diferentes tipos de agregados sobre a coloração de concretos moldados com cimento Portland branco. Os pesquisadores testaram quatro misturas de CPB mais agregados. A primeira consistiu de agregado graúdo calcário e miúdo de pó calcário, a segunda, de agregado graúdo basáltico e miúdo de pó calcário, a terceira de agregado graúdo calcário e miúdo de areia média natural de rio e, por fim, uma última formada por agregado graúdo basáltico e miúdo por areia média natural de rio. A relação água/aglomerante foi fixada em 0,42 para todas as misturas. A avaliação cromática foi realizada segundo a metodologia CIELAB.

Os pesquisadores citam Kresser & Szadkowski (1999) onde estes afirmam que quando utilizados agregados graúdos escuros deve-se empregar um teor de argamassa maior afim de que aqueles sejam completamente envoltos por esta. Destacam, ainda, que a umidade do concreto tem grande influência sobre sua cor sendo necessário realizar a análise cromática com uniformidade de umidade para todas as misturas.

As conclusões apresentadas por Passuelo et al. (2004) destacam a possibilidade de emprego do basalto como agregado graúdo em concretos executados com cimento Portland branco, por outro lado, o emprego de areia natural de rio alterou significativamente a coloração final do concreto já que os finos tendem a migrar para a superfície externa do mesmo, determinando sua coloração.

Silva Filho et al. (2004) relatam após estudo para viabilização da estrutura em concreto branco do museu Iberê Camargo que o uso de agregado graúdo de coloração escura não é impossibilitado quando se objetiva a obtenção de concreto de coloração clara desde que seja empregado um teor de argamassa capaz de envolver completamente o mesmo. Os autores sugerem teores na ordem de 53%. Relatam, também, que foi necessário o emprego de aditivo retardador de pega em função da alta reatividade do CPB a fim de permitir maior trabalhabilidade inicial. Logo após a desforma e termino da cura o concreto executado com cimento Portland branco apresentou um clareamento devido à perda da umidade interna. Este processo durou em média um ano.

3.2 A escória de alto forno

As adições minerais são empregadas no concreto por possibilitar melhorias em aspectos mecânicos e de durabilidade além de proporcionar um menor consumo de cimento, resultando em ganhos econômicos e ambientais. Dentre as adições mais empregadas pode-se citar a escória de alto forno, a cinza volante, a sílica ativa, a cinza de casca de arroz e o metacaulim. Todas amplamente estudadas como adição ao cimento Portland cinza.

Tanto a escória de alto forno quanto a cinza volante são subprodutos de processos industriais com rigoroso controle tecnológico resultando em composição e características uniformes. A adição de ambas é executada em nível de indústria cimenteira no Brasil, resultando nos cimentos CII E e CII Z, além do CIII e CII V. O CII E e o CIII recebem adição de escória de alto forno enquanto que o CII Z e o CII V recebem adição de pozolana, em especial, cinza volante. A tabela 3.3 trás a norma referente a cada tipo de cimento e o teor de adição permitido.

Tabela 3.3. Cimentos de alto forno e pozolânico, regulamentação ABNT.

Cimento	Norma ABNT	Teor de substituição
CP II E	NBR 11578 (1991)	Até 35%
CP II Z	NBR 11578 (1991)	Até 15%
CP III	NBR 5735 (1991)	Entre 35% e 70%
CP IV	NBR 5736 (1991)	Entre 15% e 50%

Em função da coloração escura, a cinza volante não se presta como adição mineral ao cimento branco, sendo assim, apenas a escória será abordada neste trabalho.

A escória de alto forno é o subproduto gerado na produção do ferro gusa. Neville (1997) afirma que para cada tonelada de ferro gusa produzida, resulta em 300 kg de escória. A escória empregada no cimento é retirada do alto forno pela parte superior e rapidamente resfriada, tornando-se vítrea e de granulometria grosseira. Moída, torna-se propícia para ser misturada ao cimento.

Schneider (2005) cita John (1995) onde este afirma que a reatividade da escória é chave para seu emprego como aglomerante, sendo função de sua composição química e teor amorfo. O segundo cita que a maioria das escórias nacionais possui teor de vidro, ou amorfo, acima de 90%. Os principais componentes da escória são cal, sílica, alumina e magnésio. Em menores quantidades aparecem também sulfeto de enxofre e óxidos de ferro e magnésio. Segundo Liduário et al. (2005) a composição média das escórias brasileiras é: 40% a 45% de CaO, 30% a 36% de SiO₂, 12% a 17% de Al₂O₃ e 2% a 8% de MgO.

Cánovas (1988) afirma que as escórias siderúrgicas aptas para a fabricação de cimentos devem possuir elevado potencial hidráulico e, para tal, sua composição química deve atender a seguinte inequação também presente na NBR 5735 (1991):

$$(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / \text{SiO}_2 > 1 \quad (3.1)$$

A finura de moagem da escória também influi em sua reatividade. Neville (1997) cita que a escória normalmente é moída até a finura Blaine de 350 m²/kg. Gastaldini & Isaia (1998) avaliaram o emprego de escória sobre a durabilidade do concreto frente ao ataque por sulfatos. Os autores entendem como não vantajoso o aumento da finura de 400 para 700 m²/kg. O aumento de custo não seria compensado em ganhos de durabilidade.

A ação da escória no concreto dá-se pelo consumo do hidróxido de cálcio (CH) produzido na hidratação do cimento resultando em silicato de cálcio hidratado (C-S-H), (HOPE & IP, 1987). A diferença da escória para as pozolanas está em sua capacidade cimentante. Mehta & Monteiro (1994) afirmam que a escória finamente moída é capaz de se

hidratar e formar C-S-H sem a necessidade de reagir com o CH, contudo, a presença do hidróxido de cálcio acelera a reação.

Bijen (1996) entende que ao contrário das pozolanas que precisam ser decompostas pela reação com o hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento a escória de alto forno apenas precisa ser ativada. A ativação da escória ocorre com pH relativamente baixo, próximo a 12, enquanto que a cinza volante necessita de pH da ordem de 13, por exemplo.

Saeki & Monteiro (2005) concluíram a partir de seu estudo que a velocidade da reação entre o hidróxido de cálcio (CH) e a escória de alto forno ou cinza volante depende da concentração do CH na pasta. Elevados teores de hidróxido de cálcio resultam em maior velocidade de reação com as adições. Com o avanço da reação há consumo do CH, diminuindo sua concentração e, conseqüentemente, diminuindo a velocidade da mesma. A maior lentidão na hidratação da escória está na dependência da decomposição da fase vítrea da mesma pelos íons hidroxila liberados na hidratação do cimento. A escória acaba por consumir o hidróxido de cálcio de maneira semelhante às pozolanas, (NEVILLE, 1997). Em função da necessidade da elevada alcalinidade para o desenrolar da reação da escória, Collins & Sanjayan (1999) afirmam que o desenvolvimento da resistência da escória pode ser acelerado através do emprego de ativação por álcalis.

A reação da escória resulta em um refinamento da estrutura de poros do concreto e alterações na composição e alcalinidade da solução aquosa dos poros, (MEHTA & MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997).

Neville (1997) resume os benefícios obtidos pelo emprego de escória de alto forno no concreto em: maior trabalhabilidade, desprendimento de calor mais lento, microestrutura mais densa proporcionando resistências maiores nas idades mais avançadas e maior durabilidade. Contudo, o autor destaca que a maior trabalhabilidade pode não ser mensurável pelo abatimento, mas após o início da vibração, a mistura torna-se móvel e facilmente adensável. Função da forma esférica das partículas de escória.

Bijen (1996) afirma que a distribuição do tamanho dos poros de concretos com escória de alto forno é mais fina desde as primeiras idades. Comparando a porosidade com um concreto convencional, não há menor quantidade total de poros mas sim uma porcentagem maior de poros menores. Outra vantagem relatada pelo autor está no aprimoramento na zona de transição pasta/agregado. O autor estudou a zona de transição e concluiu que o emprego de escória de alto forno diminui a espessura desta região e o tamanho das partículas que a formam, aumenta o grau de empacotamento das partículas e diminui a quantidade e grau de orientação do hidróxido de cálcio presente na região. A figura 3.5 demonstra a diminuição do

grau de orientação do CH de um concreto com escória de alto forno (BFSC) em comparação a um concreto convencional (OPC).

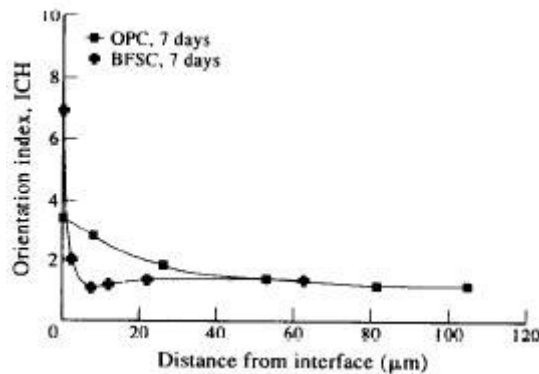


Figura 3.5. Grau de orientação do CH na interface pasta/agregado. (Bijen, 1996)

Gao et al. (2005) estudaram a influência da adição de escória de alto forno (EAF) sobre a zona de transição pasta/agregado do concreto. Os autores testaram duas finuras de escória, 425 e 600 m²/kg. Concluíram que a reação pozolânica da escória começa já nas primeiras idades sendo perceptível com 7 dias de cura. A velocidade da reação foi proporcional à finura da escória, quanto mais fina mais rápida. A EAF foi efetiva em diminuir a quantidade e tamanho das partículas de hidróxido de cálcio na zona de transição, densificando-a. Os pesquisadores observaram tamanhos de cristais de hidróxido de cálcio entre 3 e 4 µm enquanto que a literatura relata valores médios maiores que 10 µm para concretos de cimento Portland puro. Com 40% de substituição do cimento Portland por escória na finura 425 m²/kg a zona de transição mais frágil praticamente desapareceu enquanto que com a finura 600 m²/kg e teor de substituição de 20% a zona de transição frágil não foi mais detectada.

O desenvolvimento da resistência também é alterado em função do teor de substituição do cimento por escória.

Canesso et al. (2005) estudaram a influência da substituição do cimento Portland por escória de alto forno (EAF) sobre a resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico. Os pesquisadores moldaram uma mistura de referência com 100% de cimento CPV ARI e cinco misturas com EAF (Blaine 420 kg/m²), com teores de substituição de 10%, 30%, 50%, 70% e 90%. A relação água/aglomerante (a/ag) usada em todas as misturas foi de 0,50 e a proporção cimento/agregados (m) foi de 1:3. Os pesquisadores optaram por não usar agregado graúdo já que este influencia o módulo de elasticidade do concreto mascarando a influência da EAF. Os ensaios foram executados nas idades de 7, 14, 21, 28 e 90 dias, sendo

os corpos-de-prova retirados da câmara úmida 24 horas antes do ensaio com o intuito de diminuir a influência da umidade sobre os resultados. Os pesquisadores observaram que para um mesmo tempo de cura, o aumento do teor de escória tende a diminuir a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto, mas esta diminuição não foi significativa para teores de até 50%. Para cura de 90 dias, o módulo de elasticidade se manteve próximo à constância para todos os teores de adição. Observando o crescimento da resistência com o avanço da hidratação do concreto, concluíram que o aumento do teor de escória resulta em um crescimento mais lento da resistência. Destacam, ainda, que o comportamento do módulo dinâmico não acompanha de maneira direta o comportamento da resistência à compressão, sendo que o primeiro se manteve constante para teores acima de 50% enquanto a segunda apresentava decréscimo.

Costa Junior et al. (2005) avaliou a influência de elevados teores de escória de alto forno sobre a resistência à compressão, difusão de cloretos e carbonatação acelerada. Foram testadas três misturas, uma contendo 100% de CII E 32 (teor de escória de 30%), outra contendo 100% de CIII 32 (teor de escória de 66%) e uma última contendo 50% de CIII 32 e 50% de escória de alto forno (teor total de escória de 83%). A partir de um estudo de trabalhabilidade foram definidos quatro patamares de resistência para os 28 dias de idade, 20, 30, 35 e 40 MPa. A avaliação em iguais níveis de resistência resulta em uma análise de misturas com diferentes relações a/ag.

Os resultados demonstraram que as misturas executadas com CII E 32 e CIII 32 mais escória demandaram relações água/aglomerante semelhantes para todos os níveis de resistência e abaixo das demandadas pela mistura executada com CIII 32. A mistura executada com CII E 32, com maior teor de clínquer, resultou em resistências maiores na idade de 7 dias. Para a idade de 63 dias o melhor desempenho foi dado pela mistura contendo o maior teor de escória (50% CIII 32 + 50% EAF).

Li et al. (2006) avaliou a relação entre a porosidade e resistência à compressão de concretos moldados com escória de alto forno, escória de aciaria e cinza volante. Os teores de substituição testados foram: 10%, 20%, 30% e 40%. A relação água/aglomerante testada foi de 0,44 para todas as misturas. Concluíram que a escória de alto forno é capaz de diminuir a porosidade do concreto a partir dos 28 dias de idade. Outra característica apontada está na capacidade de preencher os poros maiores. As resistências dos concretos com escória de alto forno foram maiores que a do concreto convencional já para a idade de 28 dias, para todos os teores de substituição.

Rosa (2005) estudou a influência das alterações na relação água/aglomerante (a/ag), teor de substituição de escória de alto forno (EAF) e tempo de cura sobre a resistência à compressão (f_c) e resistividade elétrica aparente (REA). Para tal, o pesquisador testou quatro diferentes misturas, referência (REF) só com cimento CPV ARI, com substituição de 50% do cimento por escória (50E), com substituição de 70% (70E) e substituição de 50% de escória com emprego de ativador químico (50EX), Na_2SO_4 , em um teor de 4%. A resistência à compressão foi testada aos 3, 7, 28 e 91 dias.

Todos os traços apresentaram aumento de resistência com o avanço do grau de hidratação bem como com a redução da relação água/aglomerante (a/ag). O autor criou o índice de resistência à compressão (IRC), que nada mais é que o quociente entre a resistência do traço a ser comparado e o traço referência, para uma mesma idade. As três misturas que levaram EAF apresentaram IRC menores que a unidade, para todas as idades ensaiadas, porém, com o avanço do grau de hidratação observa-se um crescimento do IRC destas misturas, chegando às misturas com 50% de EAF e 50% de EAF mais ativador químico, próximas à unidade.

As duas misturas com EAF, sem ativador, com teores de 50 e 70% de substituição, apresentaram IRC menores que o traço referência para todas as idades. Com o aumento do teor de substituição, houve diminuição do IRC o que aponta a queda da resistência com o crescimento da quantidade de escória.

Comparando-se agora as misturas com teor de 50% de substituição, com e sem ativador químico, observou-se que a mistura com ativador apresentou, para todas as idades ensaiadas, IRC maiores confirmando a capacidade do Na_2SO_4 de catalisar as reações de hidratação da EAF.

Com relação à durabilidade diferentes autores relatam o melhor desempenho de concretos com escória de alto forno frente à difusão de cloretos, menor expansão devido o ataque a sulfatos, maior resistividade elétrica e menor suscetibilidade a reação álcali-agregado. Por outro lado, foi relatado também a diminuição da alcalinidade da solução dos poros e pior desempenho frente à carbonatação. Alguns desses estudos serão apresentados a seguir.

Basheer et al. (2002) testaram misturas binárias e ternárias de cinza volante, escória de alto forno, sílica ativa e metacaulim quanto à resistência elétrica ao acesso de íons cloreto. Todas as misturas foram sujeitas a ciclos de molhagem e secagem em solução de cloreto de sódio em concentração 0,55M. Os corpos-de-prova foram moldados e curados imersos por 14 dias. Após a cura, foram armazenados em câmara de secagem a temperatura de 40 ± 1 °C e

umidade relativa (U.R.) de $20 \pm 2\%$. Os ciclos de ensaio consistiam na permanência do corpo-de-prova na solução por 24 horas, secagem manual e subsequente colocação em câmara climatizada a $20 \pm 1^\circ\text{C}$ e U.R. de $55 \pm 1\%$ por 6 dias, os ciclos semanais foram repetidos por um ano. O traço unitário de todas as misturas foi o mesmo e a relação água/aglomerante adotada foi de 0,52. As misturas testadas por Basheer et al. (2002) são dadas na tabela 3.4.

Tabela 3.4. Misturas testadas por Basheer et al. (2002)

Mix	Composition	Notation
1	100% OPC	OPC
2	70% OPC + 30% PFA	PFA30
3	70% OPC + 30% PFA + 5% MS	PFA-MS5
4	70% OPC + 30% PFA + 5% MK	PFA-MK5
5	50% OPC + 50% GGBS	GGBS50
6	50% OPC + 50% GGBS + 5% MS	GGBS-MS5
7	50% OPC + 50% GGBS + 5% MK	GGBS-MK5
8	90% OPC + 10% MS	MS10
9	90% OPC + 10% MK	MK10
10	80% OPC + 20% MK	MK20

OPC = cimento Portland comum, PFA = cinza volante, GGBS = escória de alto forno, MS = sílica ativa e MK = metacaulim

Os resultados da concentração de cloretos em função da profundidade são apresentados na figura 3.6 para todas as misturas binárias testadas por Basheer et al. (2002). O traço contendo 50% de escória de alto forno (GGBS50) apresentou a segunda menor concentração de cloretos na profundidade de 10mm, ficando atrás apenas do traço com 20% de metacaulim. Para a profundidade de 20mm, o traço com EAF já apresentou grande decréscimo e na profundidade de 30mm a concentração de cloretos já foi negligenciável.

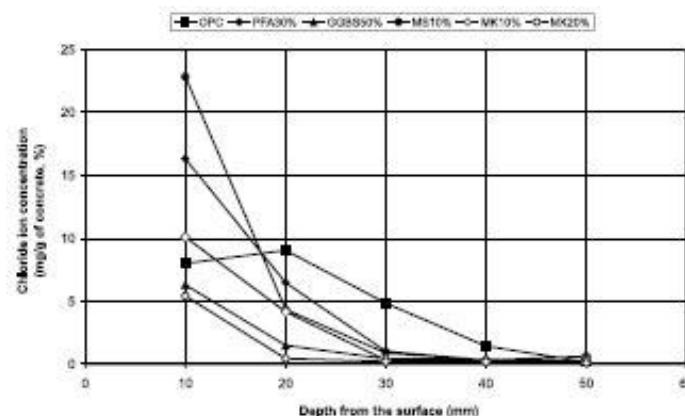


Figura 3.6. Concentração de cloretos. (Basheer et al., 2002)

Os autores afirmam que analisando globalmente o desempenho frente a resistência à compressão, penetração de cloretos e coeficiente de difusão, fica evidenciado o melhor desempenho da mistura contendo 50% de escória de alto forno (GGBS50).

Bijen (1996) afirma que o efeito da escória sobre diminuição da difusão iônica é função do teor de substituição empregado. A figura 3.7 demonstra a influência do teor de escória sobre a difusão de íons cloreto em estudo realizado pelo pesquisador. Segundo o autor, o teor de escória em substituição ao cimento no concreto é mais importante que a relação água/aglomerante no controle da penetração de íons cloreto. Variando a relação a/ag de 0,55 para 0,40 o coeficiente de difusão de cloretos variou de 2 para 3 enquanto que alternando o teor de escória as diferenças chegaram a um fator 25.

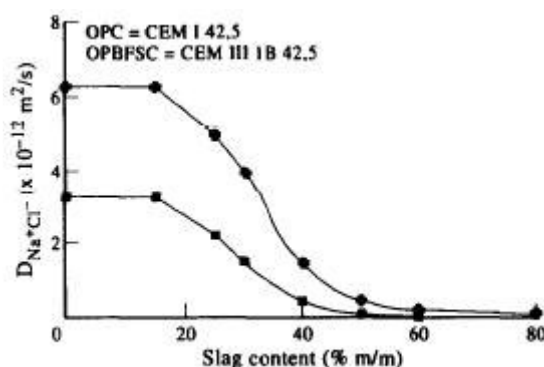


Figura 3.7. Difusão de íons cloreto em função do teor de EAF. (Bijen, 1996)

Cascudo (1997) cita os estudos de Sivasundaram & Malhotra (1992) e Ozyldirim (1994) onde os autores observaram a maior resistência à penetração de íons cloreto em concretos contendo escória de alto forno pelo ensaio da AASHTO T277.

Para Cascudo (1997) além de resultar em menor difusibilidade iônica, menor permeabilidade e maior resistividade elétrica em função das alterações na estrutura de poros do concreto, a escória ainda apresenta a capacidade se combinar com os íons cloreto, formando cloroaluminato de cálcio, diminuindo o teor de cloretos livres para atacar as armaduras. Por outro lado, o autor destaca a piora de desempenho de concretos contendo escória frente à carbonatação.

Hope & Ip (1987) afirmam que os coeficientes de difusão de cloretos de concretos com escória de alto forno são menores quando comparados a concretos apenas de cimento Portland. Entendem os autores que este melhor desempenho dos concretos com escória deve-se a menor permeabilidade dos mesmos além da capacidade do C_3A proveniente da escória em fixar os íons cloreto. A capacidade de fixação do Cl^- será função do teor de C_3A da escória. Seu estudo consistiu em avaliar a influência de ciclos de molhagem e secagem com solução agressiva de 3,5% de NaCl em três tipos de concreto com relação água/aglomerante de 0,45. Os três concretos testados foram o referência, contendo apenas cimento Portland,

outro com substituição de 25% do cimento por escória de alto forno e um terceiro, com substituição de 50% do cimento por escória. Os autores concluíram que a corrosão do aço decresce com o aumento do teor de escória de alto forno, em função das menores taxas de corrosão, da menor taxa de difusão de cloretos e da maior resistividade elétrica.

Missau (2004) testou a penetração de íons cloreto em concretos contendo 50% de EAF, além de uma mistura referência, misturas contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz e uma mistura contendo cinza volante. A penetração foi avaliada através do ensaio acelerado, ASTM C 1202. Os traços contendo escória apresentaram reduções na carga passante com relação aos traços referência. As reduções foram de 47%, 50% e 38% para as relações água/aglomerante de 0,35, 0,50 e 0,65, respectivamente.

O emprego de escória de alto forno resultou em diminuição no teor de cloretos retidos e diminuição na concentração dos íons hidroxila. Já a relação Cl^-/OH^- apresentou reduções para as relações a/ag de 0,35 e 0,50 e aumento para a relação 0,65. Missau (2004) citando Isaia (1992) afirma que a relação Cl^-/OH^- é um ótimo indicativo da possibilidade de corrosão das armaduras.

Yeau & Kim (2005) avaliaram a influência sobre a difusão de cloretos e resistência à compressão da adição de escória de alto forno e diferentes teores de C_3A no cimento. Foram testados quatro teores de substituição de cimento por escória, 0%, 25%, 40% e 55%, além de dois tipos de cimento, ASTM tipo I e V. O cimento tipo I é de teor normal de C_3A (10,22%), já o tipo V possui baixo teor de C_3A (3,42%). Foram executadas 8 misturas, realizando os quatro teores de substituição para os dois tipos de cimento. A relação água/aglomerante (a/ag) foi fixada em 0,418. A profundidade de penetração e o coeficiente de difusão de cloretos diminuíram de valor com a substituição do cimento Portland por escória. Quanto maior o teor de substituição melhor o desempenho do concreto. O teor de C_3A no cimento foi influente sobre a profundidade de penetração e coeficiente de difusão. O cimento de maior teor de C_3A apresentou menor coeficiente de difusão e profundidade de penetração. Os pesquisadores creditam a influência do teor de C_3A à capacidade destes de se combinar com os íons cloreto, aprisionando-os.

Bijen (1996) afirma que o menor teor de hidróxido de cálcio em função da substituição do cimento por escória de alto forno resulta em melhor desempenho frente ao ataque por sulfatos e reação álcali-agregado.

Gastaldini & Isaia (1998) afirmam que a substituição do cimento Portland por adições minerais resulta em melhor desempenho frente ao ataque por sulfatos por resultarem em uma estrutura de pasta menos permeável, com menor teor de C_3A e por consumir o hidróxido de

cálcio remanescente (CH). A pesquisa levada a cabo por Gastaldini & Isaia (1998) consistiu na moldagem de misturas binárias e ternárias de cimento CPV ARI e adições, com conseqüente divisão em dois grupos, o primeiro foi exposto à solução de sulfato de sódio em concentração de 10%, outro foi submetido à solução de água e cal. O traço das argamassas foi moldado numa proporção de 1:3,2 e relação água/aglomerante de 0,6. Os corpos-de-prova foram desenformados 48 horas após a moldagem e submetidos a cura submersa em solução de água e cal por doze dias. As adições minerais testadas foram a cinza volante (CV), cinza de casca de arroz (CCA), sílica ativa (SA) e escória de alto forno (EAF). A escória foi testada em duas finuras Blane, 400 e 700 m²/kg. Os pesquisadores tomaram como referência para análise da resistência aos sulfatos o método proposto por Marciano (1995, apud Gastaldini & Isaia 1998) onde se entende como resistente a sulfatos as misturas que apresentarem expansão menor que 0,03%.

Observando a influência do aumento do teor de escória nas misturas perceberam uma diminuição da expansão quando o teor passou de 50% para 70%, em qualquer uma das finuras testadas. Na mistura de maior finura e com teor de 70% de escória não foi detectada a formação de etringita secundária ou hidróxido de cálcio remanescente em função da reação da escória com o CH.

Osborne (1999) afirma que quando se tratando de concretos de alto forno sujeitos a ataque por sulfatos são importantes os teores de C₃A do cimento e alumina da escória. Cimentos de baixo teor de C₃A quando combinados com escórias de teor moderado de alumina resultam em concretos resistentes a sulfatos. Para teores de substituição de escória elevados, próximo a 70%, não são recomendadas escórias com mais do que 14% de alumina combinadas com cimentos com teores de C₃A maiores que 10%.

Kwon (2005) avaliou o emprego de escória de alto forno em substituição ao cimento para produzir concretos de alto desempenho (CAD) não sujeitos à reação álcali-agregado. O autor observou que os CAD's apresentam maior consumo de aglomerante e com isso maior teor de álcalis sujeitos a reagir com agregados reativos. As finuras de escória testadas foram 400, 600 e 800 m²/kg. Os teores de substituição testados foram 0, 30, 45 e 60%. Concluiu que o aumento no teor de substituição de escória diminuiu o coeficiente de expansão do concreto. Da mesma forma o aumento da finura também tendeu a diminuir o coeficiente de expansão. Entende o autor que a principal razão do efeito inibidor da escória está no fato de haver menor quantidade de clínquer para reagir.

Costa Junior et al. (2005) concluiu que o desempenho das misturas com escória frente à carbonatação foi diretamente dependente do teor de substituição, quanto maior o teor de

substituição maior a profundidade de carbonatação medida. O aumento no grau de hidratação resultou em menores profundidades de carbonatação devido à microestrutura mais densa da pasta.

Bijen (1996) entende que além da menor quantidade de hidróxido de cálcio, o pior desempenho de concretos com escória frente à carbonatação deve-se a manutenção da umidade interna do concreto em função de sua estrutura de poros refinada.

Osborne (1999) relata que estudos preliminares em estruturas executadas com concretos com adição de escória de alto forno em um teor de 50% em substituição ao cimento apresentaram resistência à carbonatação semelhante à apresentada por concretos executados exclusivamente com cimento Portland. Já concretos com elevado teor de substituição, 70% de escória, apresentaram profundidades de carbonatação maiores principalmente quando localizados em locais abrigados ou secos.

Gastaldini et al. (1999) afirmam que as adições de minerais alteram a composição e pH da solução dos poros alterando o comportamento do concreto frente à carbonatação. Os pesquisadores estudaram a influência das adições minerais sobre a solução aquosa dos poros. Moldaram misturas binárias e ternárias de cimento Portland CPV ARI, cinza de casca de arroz (CCA), cinza volante (CV), sílica ativa (SA) e escória de alto forno (EAF), esta em duas finuras, 400 e 700 m²/kg. A solução dos poros foi extraída com auxílio do aparelho proposto por Longuet et al. (1973). As relações água/aglomerante (a/ag) testadas foram 0,4 e 0,6. A extração foi realizada em duas idades, 28 e 91 dias. Observaram que o aumento no teor de adição resultou em diminuição do pH da solução aquosa dos poros, sem, contudo, chegar a valores menores que 12,47, sendo suficiente para garantir a passivação das armaduras. Todas as misturas contendo adições apresentaram diminuição no equivalente alcalino em sódio com o aumento do grau de hidratação. Oliveira (2000) e Isaia (1996) também relataram diminuição do pH de misturas contendo escória, mas sem chegar a valores passíveis de despassivar as armaduras.

Hope & Ip (1987) afirmam que a quantidade de hidróxido de cálcio presente na pasta hidratada de um cimento de alto forno é proporcional ao teor de substituição de cimento por escória mas sempre menor que a quantidade encontrada em um concreto equivalente moldado apenas com cimento Portland. A menor quantidade de hidróxido de cálcio resulta em um pH mais baixo quando comparada a uma pasta de cimento puro. No entanto, os autores afirmam que a concentração de íons hidroxila e o hidróxido de cálcio remanescente são suficientes para manter o pH em níveis suficientes para a manutenção da passivação das armaduras.

Segundo Gastaldini et al. (1999) o aumento da finura da escória não resultou em variações significativas de pH, por outro lado, a maior finura apresentou maior equivalente alcalino em sódio para todas as misturas. O aumento da relação a/ag, nas duas idades testadas, resultou em diminuição do equivalente alcalino. A concentração dos íons OH⁻ decresceu com o aumento do grau de hidratação de 28 para 91 dias. O aumento no teor ou finura da escória resultou na diminuição da concentração do íon Ca²⁺ para todas as misturas investigadas.

A substituição do cimento Portland por adições minerais resultou em menor quantidade de clínquer na mistura e conseqüente menor quantidade de hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento. A hidratação da escória não resulta na formação de CH e, ainda, utiliza o formado na hidratação do cimento como catalisador na reação de formação do C-S-H secundário. O C-S-H formado possui menor relação CaO/SiO₂ (C/S) sendo, portanto, capaz de fixar maior quantidade de álcalis em sua estrutura. Pu (1999) e Duchesne & Bérubét (1995) concordam que o C-S-H secundário formado é de menor relação C/S.

Gastaldini et al. (1999) afirmam que a redução no teor alcalino das misturas com o aumento do teor de adições de 50% para 70% se deve ao efeito de diluição decorrente da substituição do cimento. Já a diminuição do teor alcalino com o aumento da relação a/ag deve-se as melhores condições de hidratação, formando maior quantidade de C-S-H e, conseqüentemente, fixando maiores quantidades de Na⁺ e K⁺. Concluem, ainda, que os cátions alcalinos resultantes da hidratação da escória são mais efetivos no aumento da concentração dos íons OH⁻ que os resultantes da reação das pozolanas.

Observaram, também, boa correlação entre a relação molar CaO/SiO₂ e o equivalente alcalino em sódio para as misturas contendo escória. A diminuição da relação molar corresponde a uma diminuição no equivalente alcalino. Os autores citam Nagataki (1995) que afirma que o silicato da escória pode reagir com os álcalis fixando-os nos hidratos formados e, assim, diminuindo a sua concentração.

Com o intuito de acelerar as reações da escória são adicionados a mistura os chamados ativadores químicos. Os ativadores atuam principalmente elevando o pH da solução, resultando em maior velocidade de dissolução da escória. Shi & Day (1995) afirmam que o pH da solução proporcionado pelo ativador tem importante papel sobre a dissolução da escória, principalmente na formação dos compostos cálcicos resultantes da reação do anion do ativador e o Ca²⁺ retirado da superfície dos grãos de escória. Já nas reações tardias, nas idades mais avançadas, o íon liberado pelo ativador é mais importante que o pH.

O processo de hidratação de um cimento de alto forno com ativador foi descrito por Fu et al. (2000) da seguinte forma: primeiramente o clínquer reage com a água formando C-S-H

gel e etringita, liberando Ca(OH)_2 . O hidróxido de cálcio liberado é o primeiro responsável pela permanência do pH elevado que ativa a escória além de reagir com os íons liberados pela mesma. Os ativadores influenciam de maneiras diferentes a hidratação da escória. Alguns serão responsáveis pela elevação do pH da solução acelerando a despolimerização da escória, enquanto outros aceleram a formação da etringita.

Fu et al. (2000) afirmam, ainda, que alguns ativadores aceleravam o ganho de resistência nas primeiras idades enquanto outros permitiam resistências maiores nas idades mais avançadas.

A influência dos ativadores sobre as propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos executados com escória foram avaliados por diferentes autores. Na UFSM, Schneider (2005), Rosa (2005), Sperb (2004) e Gomes (2003) realizaram pesquisas com ativadores.

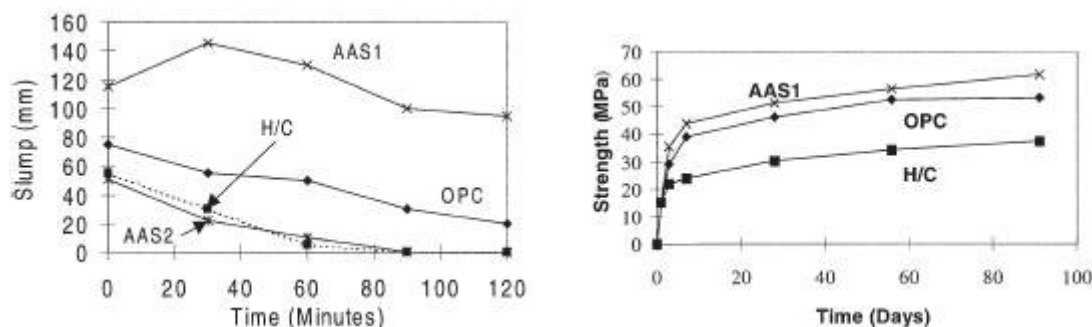
Collins & Sanjayan (1999) investigaram a influência do uso de ativadores químicos sobre as propriedades do concreto com escória de alto forno fresco e endurecido. Foram testados três tipos de ativação, hidróxido de sódio em conjunto com carbonato de sódio e silicato de sódio (em pó ou líquido) conjuntamente com cal hidratada. Os autores investigaram a trabalhabilidade, perda de abatimento com o tempo e teor de ar incorporado do concreto fresco além da resistência à compressão, retração, fluência, resistência à flexão e módulo de elasticidade do concreto endurecido. As misturas testadas pelos autores são dadas na tabela 3.5.

Tabela 3.5. Misturas testadas por Collins & Sanjayan (1999)

Constituents	OPC	H/C	AAS1	AAS2
OPC	360	-	-	-
Slag	-	360	360	360
Free water	180	180	180	180
w/b	0,5	0,5	0,5	0,5
Fine aggregate	830	830	830	830
Coarse aggregate				
14mm	1130	1130	1130	1130
Air content %	0,5	1,2	1,2	1,1

Nota: OPC = cimento Portland comum; Slag = escória de alto forno; free water = água livre; w/b = relação a/ag; fine aggregate = agregado miúdo; coarse aggregate = agregado graúdo; Air content = ar incorporado.

Os resultados de perda de abatimento e resistência à compressão obtidos por Collins & Sanjayan (1999) são dados nas figuras 3.8 e 3.9.



Nota: AAS1 = silicato de sódio em pó e pasta de cal, AAS2 = silicato de sódio líquido e pasta de cal, H/C = hidróxido de sódio e carbonato de sódio, OPC = cimento Portland comum.

Figuras 3.8 e 3.9. Perda de abatimento e resistência à compressão. (Collins & Sanjayan, 1999)

A mistura ativada por silicato de sódio em pó e pasta de cal apresentou melhor trabalhabilidade somada a acréscimos de resistência inicial, superando a mistura referência. Aos 30 minutos a trabalhabilidade da mistura apresentou crescimento com relação à trabalhabilidade inicial função da lenta dissolução do silicato de sódio em pó. As demais misturas ativadas apresentaram menor trabalhabilidade que a mistura referência. A resistência do concreto com escória ativado com hidróxido de sódio e carbonato de sódio foi menor que a mistura referência. Os autores destacam que a mistura AAS1 apresentou resistências maiores que a mistura referência em todas as idades e ao contrário desta seguiu ganhando resistência após os 60 dias de idade.

Sheng et al. (2005) avaliou a influência do teor de ativador químico, adição cimentícia e finura da escória sobre a resistência à compressão e retração autógena de argamassas e pastas empregando a escória como aglomerante principal. O ativador químico testado foi o Na_2SiO_3 , em teores variando de 7% a 10%. As adições cimentícias avaliadas foram o cimento Portland (PC), o cimento aluminato (AC) e o cimento sulfoaluminato (SC). Os teores de substituição de escória pela adição testados foram 10%, 20%, 30% e 100%. Foram avaliadas três finuras, 270 m^2/kg , 310 m^2/kg e 340 m^2/kg . Os maiores resultados foram obtidos pela escória na finura 310 m^2/kg . Com relação à resistência à compressão o cimento Portland no teor de substituição de 10% apresentou o melhor desempenho entre todas as adições e teores.

Shi (1996) avaliou a influência da ativação alcalina por Na_2SiO_3 , NaOH e Na_2CO_3 sobre a resistência, estrutura de poros e permeabilidade a água e cloretos de argamassas de escória de alto forno. A relação água/escória empregada foi de 0,485 e a cura foi realizada em câmara úmida por 28 dias. O autor concluiu que os ativadores foram efetivos em aumentar a resistência, diminuir a porosidade e a permeabilidade das argamassas testadas em comparação a argamassa de referência executada com cimento Portland tipo III ASTM. Com relação à porosidade o pesquisador observou que as argamassas ativadas tenderam a ter uma

distribuição de poros descontínua. Por fim, Shi (1996) concluiu que a composição da solução dos poros foi mais influente que a estrutura de poros sobre o desempenho no ensaio de penetração acelerada de cloretos.

Shi & Day (2000) avaliaram a influência do Na_2SO_4 sobre o pH de uma solução saturada em hidróxido de cálcio (CH). Afirmam os pesquisadores que a adição de 4% do ativador resulta em um crescimento do pH de 12,50 para 12,75. Os pesquisadores concluíram também que o crescimento do pH aumenta a dissolução do SiO_2 .

Gomes (2003) estudou a influência de adições minerais e ativadores químicos sobre a penetração de cloretos. Para tal, o autor testou diferentes misturas de adições e ativadores. Todas as misturas foram executadas em três relações água/aglomerante (a/ag), 0,35, 0,50 e 0,65. O cimento utilizado foi o CPV-ARI, conforme NBR 5733 (1980). A análise do concreto consistiu em avaliar a penetração de cloretos, segundo método ASTM C 1202-97, nas idades de 28 e 91 dias, ruptura à compressão, nas idades de 7, 28 e 91 dias, além de medidas de pH, teor de cloretos retidos e relação Cl^-/OH^- , todas para a idade de 91 dias. O autor observou que para a mistura binária contendo 70% de EAF a ativação com 4% de Na_2SO_4 foi mais efetiva que a com 2% de Al_2SO_4 , para todas as idades e relações a/ag, com exceção a idade de 28 dias e relação 0,35, onde os resultados foram praticamente iguais. O traço contendo 4% de Na_2SO_4 apresentou para todas as idades na relação a/ag 0,65 resistências maiores que o traço referência, já o traço contendo 2% de Al_2SO_4 apresentou resistências maiores que o traço referência apenas nas idades de 28 e 91 dias e relação a/ag de 0,65.

O traço com escória sem ativador apresentou um desenvolvimento de resistência mais lento alcançando aos 91 dias de idade resistências iguais a 69%, 71% e 98% do traço referência para as relações água/aglomerante de 0,35, 0,50 e 0,65, respectivamente.

Gomes (2003) observou também que os ativadores são mais influentes nas primeiras idades, o que foi considerado positivo pelo o autor. As misturas contendo EAF, com ou sem ativador, apresentaram menores valores de carga passante em Coulombs que a mistura referência, para todas as idades e relações a/ag ensaiadas. Quando comparadas às misturas ativadas, observou-se que a mistura contendo 4% de Na_2SO_4 foi mais efetiva na redução da carga passante que a contendo 2% de Al_2SO_4 . Observando, ainda, a influência do grau de hidratação e relação a/ag, percebe-se que a carga passante diminuiu com o avanço do primeiro e aumentou com o crescimento do segundo. As misturas contendo escória de alto forno apresentaram todas, valores de pH maiores que 12,0. A mistura contendo apenas EAF, sem ativador, resultou em valores pH pouco abaixo da mistura referência, semelhantemente, às misturas contendo ativador também apresentaram valores de pH menores que o traço

referência, com exceção à mistura contendo 4% de Na_2SO_4 na relação água/aglomerante de 0,35 que apresentou pH acima do traço referência, 12,84 e 12,76, respectivamente.

A análise de custos realizada por Gomes (2003) apontou o emprego de ativadores químicos em misturas contendo escória como viável já que os custos finais dos traços com EAF, mesmo que contendo ativador, foram menores que os do traço referência.

Sperb et al. (2004) estudaram a influência de ativadores químicos na absorção capilar e resistência à compressão de misturas binárias de CPV ARI, escória de alto forno (EAF) e cinza de casca de arroz (CCA). As relações água/aglomerante testadas foram 0,35, 0,50 e 0,65. O teor de argamassa adotado foi de 51%. Os resultados de resistência à compressão apontaram a influência positiva do emprego de ativadores químicos em misturas contendo 70% de escória de alto forno. Os pesquisadores concluíram que a ativação mais efetiva no incremento da resistência deu-se para a mistura contendo 4% de Na_2SO_4 chegando a valores em média de 93% da resistência do traço referência e 131% da resistência do traço contendo escória sem ativação na relação a/ag de 0,35. Nas relações 0,50 e 0,65 os resultados foram respectivamente de 89% e 131%, para com o traço referência, e para o traço sem ativação, de 118% e 139%. Os autores destacaram a efetividade dos ativadores em incrementar a resistência nas primeiras idades.

Todas as misturas contendo escória de alto forno apresentaram menores valores de absorção capilar que a mistura referência. Analisando a influência dos ativadores observaram que para as relações água/aglomerante de 0,35 e 0,50 os resultados foram muito próximos, para a relação 0,65 a mistura contendo 4% de Na_2SO_4 apresentou absorção 30% menor que a mistura contendo EAF não ativada.

4 METODOLOGIA

4.1 Considerações iniciais

Com o intuito de avaliar a influência do emprego de elevados teores de escória de alto forno em concretos de cimento Portland branco realizaram-se ensaios de resistência à compressão, resistividade elétrica aparente, composição e condutividade elétrica da solução dos poros e porosimetria por intrusão de mercúrio.

Os concretos avaliados foram a mistura referência (REF), tendo como aglomerante apenas o cimento Portland branco (CPB), uma mistura contendo 50% de escória em substituição ao cimento Portland, chamada mistura 50E, outra contendo 70% de escória, chamada 70E, e, por fim, uma mistura contendo 50% de escória com adição de ativador alcalino sulfato de sódio (Na_2SO_4), em um teor de 4%, denominada 50A.

O teor de ativador sulfato de sódio na mistura 50A foi fixado a partir dos resultados de Gomes (2003) e Sperb (2004). Estes concluíram que 4% é o teor ótimo para o Na_2SO_4 em concretos com adição de escória de alto forno. Tal teor permitirá a comparação com os resultados obtidos por Rosa (2005). Este avaliou o emprego desta ativação sobre concretos com os mesmos teores de substituição de escória testados neste trabalho, mas em substituição ao cimento Portland cinza.

4.2 Definição das variáveis

As variáveis envolvidas na pesquisa serão definidas a seguir.

- a) Variáveis independentes: estão ligadas diretamente à constituição do concreto determinando sua compactidade. São elas:
 - a. Relação água/aglomerante (a/ag): proporção em massa entre a quantidade de água e aglomerante na mistura. Como aglomerante entende-se o total de cimento mais a escória. Nesta pesquisa foram fixadas três relações a/ag: 0,30, 0,42 e 0,55.

- b. Idade de ensaio: 3, 7, 28 e 91 para resistência à compressão axial. 3, 7, 14, 28, 56 e 91 dias para resistividade elétrica aparente. 3, 7, 28 e 91 para ensaios de solução dos poros. 28 e 91 para porosimetria por intrusão de mercúrio.

- b) Variáveis intervenientes: alteram as propriedades do material cimentante. Sendo:
 - a. Tipo de adição mineral: Sendo empregada somente a escória de alto forno.
 - b. Teor de substituição: Foram testados dois teores, 50% e 70%.
 - c. Tipo de ativação química: Empregou-se o Na_2SO_4 .
 - d. Teor de ativador: Foi testado apenas no teor de 4%.

- c) Variáveis dependentes: Dependem das demais variáveis. São elas:
 - Para o concreto:
 - a. Resistência à compressão axial (NBR 5738/2003 e NBR 5739/1994).
 - b. Resistividade elétrica aparente (NBR 7117/1981 – Método de Wenner adaptado para uso no concreto).

 - Para a pasta:
 - c. Composição da solução aquosa dos poros (concentração dos íons Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , OH^- , SO_4^{2-}).
 - d. Condutividade elétrica da solução dos poros.
 - e. Porosimetria por intrusão de mercúrio.

4.3 Caracterização dos materiais

Nesta pesquisa foram empregados materiais caracterizados e avaliados laboratorialmente segundo a normalização pertinente a cada um a fim de permitir que os resultados obtidos nesta pesquisa sejam passíveis de repetição em outros trabalhos.

4.3.1 Cimento

Foi empregado cimento Portland branco, CPB 40, de fabricação nacional em conformidade com a NBR 12989 (1993).

As características físico-mecânicas do CPB são dadas na tabela 4.1 enquanto que sua composição química é apresentada na tabela 4.2.

Os ensaios de caracterização físico-mecânica e composição química foram realizados segundo as normas:

Resistência à compressão da argamassa normal – NBR 7215 (1991).

Tempo de pega – NBR 11581 (1991).

Massa específica – NBR 6474 (1984).

Finura na peneira 200 (#0,075mm) – NBR 11579 (1991).

Superfície específica BLAINE – NBR 7224 (1984).

Superfície específica BET – ASTM D 3663 (1992).

Análise química – NBR 5743 (1989), NBR 5744 (1989), NBR 5745 (1989), NBR 5747 (1989), NBR 7227 (1989) e NBR 9203 (1991).

Tabela 4.1. Propriedades físico-mecânicas do cimento Portland branco.

Aglomerante	CPB 40	Escória (EAF)	50% CPB + 50% EAF	30% CPB + 70%EAF
Resistência à compressão 3 dias (MPa)	25,66	-	-	-
Resistência à compressão 7 dias (MPa)	29,45	-	-	-
Resistência à compressão 28 dias (MPa)	42,90	-	-	-
Tempo de início de pega (hora:minuto)	1:40	-	2:00	3:15
Massa específica (kgf/dm ³)	2,97	2,92	-	-
Finura na peneira 200, #0,075mm (%)	0,29	-	-	-
Superfície específica BLAINE (cm ² /g)	5070	4090	-	-

Tabela 4.2. Composição dos aglomerantes empregados (% em massa).

Aglomerante	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	S	Na ₂ O	K ₂ O	Perda ao fogo	RI
CPB	17,95	2,98	0,21	59,40	2,87	3,09	-	0,43	0,36	11,60	1,37
EAF	33,84	10,35	0,67	44,50	7,99	-	0,83	0,20	0,40	0,00	0,23

4.3.2 Escória de Alto forno

A escória de alto forno (EAF) estudada é de procedência da indústria siderúrgica nacional Tubarão/ES (CST) sendo empregada nas condições recebidas.

A composição química da escória é apresentada na tabela 4.2, já as características físicas são dadas na tabela 4.1.

A escória foi empregada em substituição ao cimento branco em dois teores 50% e 70%, resultando em quatro misturas, listadas na tabela 4.3.

Tabela 4.3. Proporção entre os aglomerantes testadas (% em massa).

Mistura	CPB	Escória	Na ₂ SO ₄
REF	100%	-	-
50E	50%	50%	-
70E	30%	70%	-
50A	50%	50%	4%

4.3.3 Agregados

O agregado miúdo empregado nesta pesquisa foi uma areia natural quartzosa, proveniente do município de Santa Maria, RS. A areia foi lavada para retirada de quaisquer impurezas orgânicas, seca em estufa, peneirada na peneira malha 4,8mm e armazenada em caixa com tampa. A análise granulométrica apontou a areia como média (figura 4.1).

O agregado graúdo utilizado consistiu em uma pedra britada diabásica proveniente do município de Itaara, RS. A pedra foi peneirada, utilizando-se a fração passante na peneira malha 19mm e retida na malha 6,3mm. Na seqüência a pedra foi lavada, seca ao ar e armazenada em uma caixa com tampa. A análise granulométrica indicou o agregado como brita 1 (figura 4.2).

As características físicas dos agregados (tabela 4.4) foram obtidas segundo os ensaios normalizados listados abaixo:

Composição granulométrica – NBR 7217 (1987).

Massa específica do agregado miúdo – NBR 9776 (1987).

Massa específica do agregado graúdo – NBR 9937 (1987).

Absorção de água do agregado graúdo – NBR 9937 (1987).

Massa unitária solta – NBR 7251 (1982).

Índice de forma pelo método do paquímetro – NBR 7809 (1983).

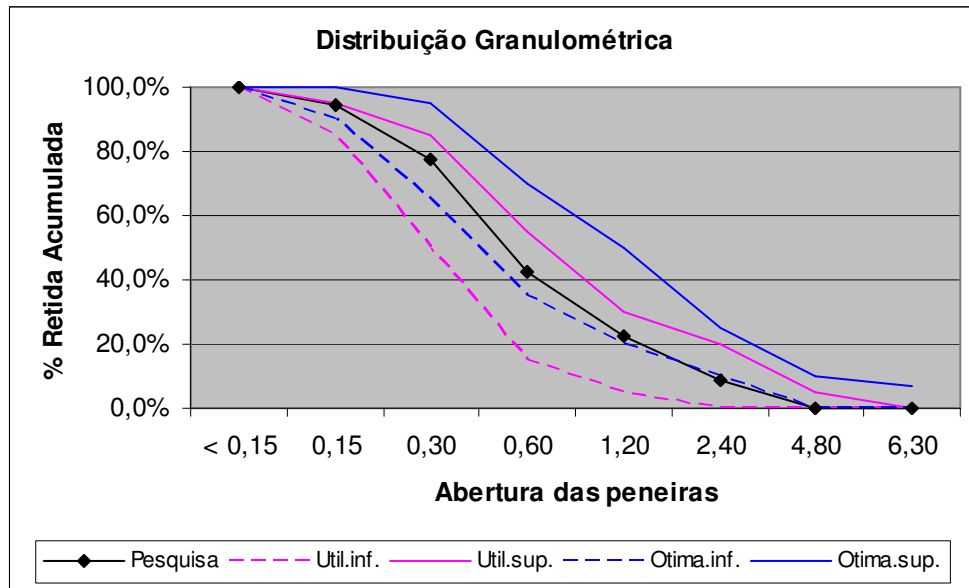


Figura 4.1. Granulometria do agregado miúdo.

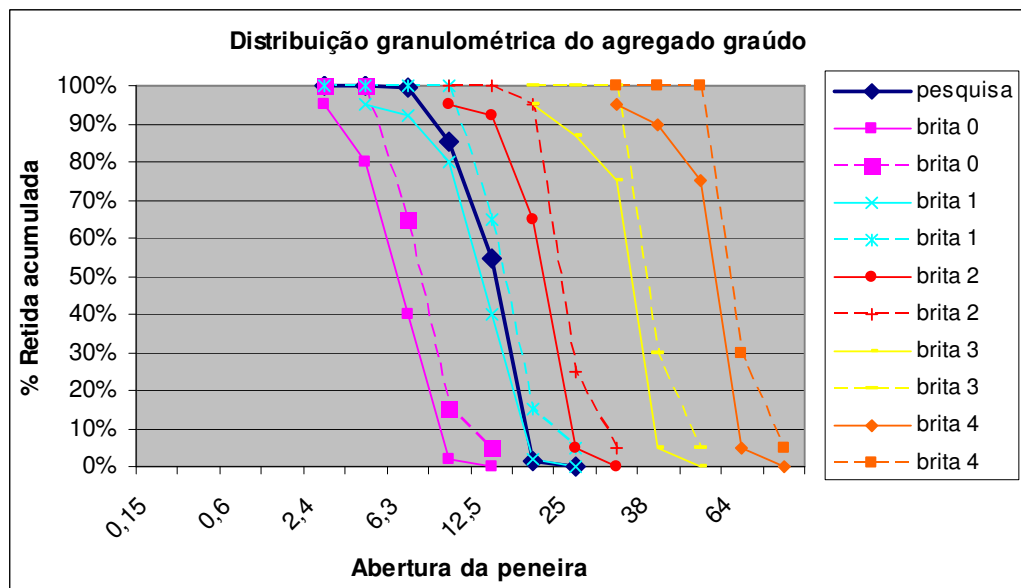


Figura 4.2. Granulometria do agregado graúdo.

Tabela 4.4. Características físicas dos agregados.

# peneiras (mm)	Porcentagens retidas acumuladas (%)	
	Brita	Areia
25,0	0	0
19,0	2	0
12,5	55	0
9,5	85	0
6,3	100	0
4,8	100	0
2,4	100	9
1,2	100	23
0,6	100	42
0,3	100	77
0,15	100	94
Módulo de finura	7	2
Dimensão máxima característica (mm)	19	5
Massa específica (kgf/dm ³)	2	3
Massa unitária solta (kgf/dm ³)	1	2
Absorção de água (%)	3	-
Índice de forma	2	-

4.3.4 Aditivo

A fim de garantir a moldagem de todas as misturas com igual trabalhabilidade foi empregado aditivo superplastificante. O aditivo utilizado é do tipo éter carboxílico modificado, considerado de terceira geração, isento de cloretos e atende as recomendações da norma ASTM C 494 (1992) tipos A e F.

4.3.5 Água

A água empregada para produção dos concretos é proveniente do reservatório da Universidade Federal de Santa Maria, alimentado por poços artesianos. A água abastece a maioria dos pontos de consumo na UFSM, tendo sua potabilidade garantida.

4.3.6 Ativador químico

O ativador químico empregado foi o sulfato de sódio (Na₂SO₄) em um teor de 4% do total de aglomerante em massa. O produto é do tipo comumente encontrado no comércio. O teor de emprego foi obtido a partir de pesquisas anteriores realizadas no GEPECON conforme já citado.

4.4 Dosagem dos concretos

O método de dosagem das misturas empregado foi o proposto por Helene & Terzian (1992). Foram moldadas quatro misturas, uma contendo 100% de cimento, outra substituindo 50% do cimento por escória de alto forno, uma terceira com 70% de escória e uma última com teor de substituição de 50% e ativador químico. A previsão de comportamento de cada mistura se dá através do traçado da curva de Abrams. Para tal necessita-se pelo menos três pontos, sendo assim, utilizaram-se três relações água/aglomerante (a/ag): 0,30, 0,42 e 0,55. As proporções aglomerante/agregado (m) das misturas foram obtidas em ensaios de trabalhabilidade chegando-se a 1:3,3; 1:4,2 e 1:6,1 para as relações a/ag 0,30, 0,42 e 0,55, respectivamente. O volume de argamassa foi mantido constante para todas as misturas necessitando de um ajuste no teor de areia dos traços em função da menor massa específica da escória com relação ao cimento.

O teor de argamassa foi obtido experimentalmente e mantido em 52%, em massa seca, para todos os traços.

O teor de aditivo superplastificante foi definido nos ensaios de trabalhabilidade fixando o abatimento do tronco de cone (NBR NM 67 /1998) para todas as misturas em 90 ± 10 mm. O valor de 90mm para o abatimento foi adotado por ser um valor comum nas obras correntes e por ser semelhante ao adotado por Rosa (2005).

Tabela 4.5. Traços unitários estudados.

Mistura	a/ag	CPB	EAF	Areia	Brita	Ativador	Aditivo
REF	0,30	1	-	1,236	2,064	-	0,33%
	0,42	1	-	1,704	2,496	-	0,08%
	0,55	1	-	2,640	3,360	-	-
50E	0,30	0,5	0,5	1,205	2,064	-	0,28%
	0,42	0,5	0,5	1,673	2,496	-	0,065%
	0,55	0,5	0,5	2,661	3,408	-	-
70E	0,30	0,3	0,7	1,193	2,064	-	0,28%
	0,42	0,3	0,7	1,661	2,496	-	0,074%
	0,55	0,3	0,7	2,649	3,408	-	-
50A	0,30	0,5	0,5	1,205	2,064	4%	1,01%
	0,42	0,5	0,5	1,673	2,496	4%	0,031%
	0,55	0,5	0,5	2,661	3,408	4%	-

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

Mistura	a/ag	Cimento	Escória	Areia	Brita	Água	Ativador	Aditivo
REF	0,30	517	0	639	1066	155	0,00	1,70
	0,42	415	0	708	1037	174	0,00	0,33
	0,55	309	0	815	1037	170	0,00	0,00
50E	0,30	259	259	625	1070	156	0,00	1,45
	0,42	208	208	697	1040	175	0,00	0,27
	0,55	153	153	813	1042	168	0,00	0,00
70E	0,30	156	363	619	1072	156	0,00	1,45
	0,42	125	292	693	1041	175	0,00	0,31
	0,55	92	214	810	1042	168	0,00	0,00
50A	0,30	259	259	625	1070	156	20,74	5,24
	0,42	208	208	697	1040	175	16,67	0,13
	0,55	153	153	813	1042	168	12,23	0,00

4.5 Moldagem, Cura e armazenamento dos corpos-de-prova

4.5.1 Concreto

Para cada mistura e relação água/aglomerante foram moldados 16 corpos-de-prova cilíndricos Ø10x20cm e 5 corpos-de-prova prismáticos 10x10x17cm destinados a resistência à compressão e resistividade elétrica aparente, respectivamente.

Os corpos-de-prova foram moldados segundo as prescrições da NBR 5738 (2003), adensados em mesa vibratória, em duas camadas.

A ordem de colocação dos materiais na betoneira foi a seguinte:

1. 100% do agregado graúdo;
2. 80% da água de amassamento (com o ativador químico devidamente dissolvido na mistura 50A);
3. 100% do aglomerante homogeneizado;
4. Restante da água de amassamento com o aditivo superplastificante diluído.
5. Areia.

A fim de moldar todos os traços com a mesma temperatura do concreto fez-se o controle da temperatura dos materiais antes da mistura e calculou-se a temperatura que deveria estar a massa de água para obtenção do concreto a 19 ± 1 °C. A equação usada foi a apresentada por Neville (1997):

$$T = [0,22.(T_m.M_m + T_c.M_c) + T_a.Ma] / [0,22.(M_m+M_c) + Ma] \quad (4.1)$$

Onde T_i são as temperaturas em °C, M_i as massas dos materiais em Kg e “m”, “c” e “a” referem-se, respectivamente, ao agregado, ao cimento e a água.

Os corpos-de-prova foram desmoldados 24 horas após a moldagem, identificados e colocados na câmara úmida para serem curados em atmosfera saturada de água e a temperatura constante de 23 ± 2 °C até a idade de ensaio.

Na data de ensaio, os corpos-de-prova cilíndricos destinados a resistência à compressão eram retirados da câmara úmida, medidos e capeados com enxofre antes de serem rompidos.

Os corpos-de-prova prismáticos para a resistividade elétrica até a idade de 91 dias eram retirados da câmara úmida no momento do ensaio, testados e recolocados na câmara.

4.5.2 Pasta

Para cada mistura e relação a/ag foram moldados 3 corpos-de-prova cilíndricos Ø4x8cm para o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio e 4 corpos cilíndricos Ø5x10cm para a extração do pó para o ensaio da solução dos poros.

Na mistura das pastas foram adotados os mesmos teores de superplastificante empregados na moldagem dos concretos. Os corpos-de-prova foram adensados em mesa vibratória em uma única camada.

Passadas 24 horas da moldagem, os corpos-de-prova foram desmoldados, identificados e armazenados submersos em água saturada em cal a fim de curarem até a idade de ensaio.

4.6 Ensaio do concreto

4.6.1 Resistência à compressão

A ruptura dos corpos-de-prova realizada a fim de determinar sua resistência à compressão foi realizada segundo a NBR 5739 (2003). Para cada idade de ensaio, 3, 7, 28 e 91 dias, foram rompidos quatro corpos-de-prova.

4.6.2 Resistividade elétrica aparente

O método de medida da resistividade elétrica aparente usado neste trabalho foi o chamado método de Wenner ou método dos quatro eletrodos adaptado para uso em concreto. O método já foi usado em pesquisas anteriores do GEPECON, como os trabalhos de Missau (2004), Hoppe (2005) e Rosa (2005) além de trabalho desenvolvido na UFRGS por Abreu (1998).

Para cada mistura e relação a/ag foram moldados cinco corpos-de-prova prismáticos de 10x10x17cm conforme a figura 4.3.



Figura 4.3. Corpos-de-prova prismáticos para ensaio de resistividade elétrica.

Para as idades de ensaio de 3, 7, 14, 28, 56 e 91 dias os corpos-de-prova eram retirados da câmara úmida e ensaiados imediatamente a fim de garantir 100% de saturação dos mesmos no momento do ensaio.

A ordem de ensaio dos corpos-de-prova foi a mesma da moldagem, iniciava-se o ensaio pela relação a/ag 0,30 seguida da relação 0,42 e terminando com a relação 0,55.

As formas usadas na moldagem dos corpos-de-prova eram metálicas, estanques e com elemento em madeira que garantia a correta posição dos eletrodos no corpo-de-prova.

Os eletrodos consistiam em fio de cobre com diâmetro nominal de 10mm desencapados e lixados nas duas extremidades, uma com 2cm expostos e outra com 1cm

apenas. A extremidade com 2cm expostos ficava mergulhada dentro do concreto e era a responsável pelo contato eletrodo concreto. A outra extremidade é que permitia o acoplamento dos multímetros e fonte geradora no momento do ensaio. O lixamento do eletrodo buscava a retirada do verniz isolante.

O equipamento utilizado no ensaio foi um gerador de funções de corrente alternada e dois multímetros de alta impedância de entrada.

O ensaio propriamente dito consistiu em submeter o corpo-de-prova através dos eletrodos mais externos a passagem de uma corrente elétrica alternada de onda senoidal de frequência de 10 Hz fixada de tal forma que a diferença de potencial entre estes eletrodos fosse de 5 V. O corpo-de-prova era mantido sob estas condições por 10 minutos e após eram feitas duas leituras espaçadas de 1 minuto da corrente elétrica passante entre os eletrodos externos e da diferença de potencial entre os eletrodos internos. A figura 4.4 mostra o esquema do ensaio e a figura 4.5 apresenta o ensaio sendo realizado.

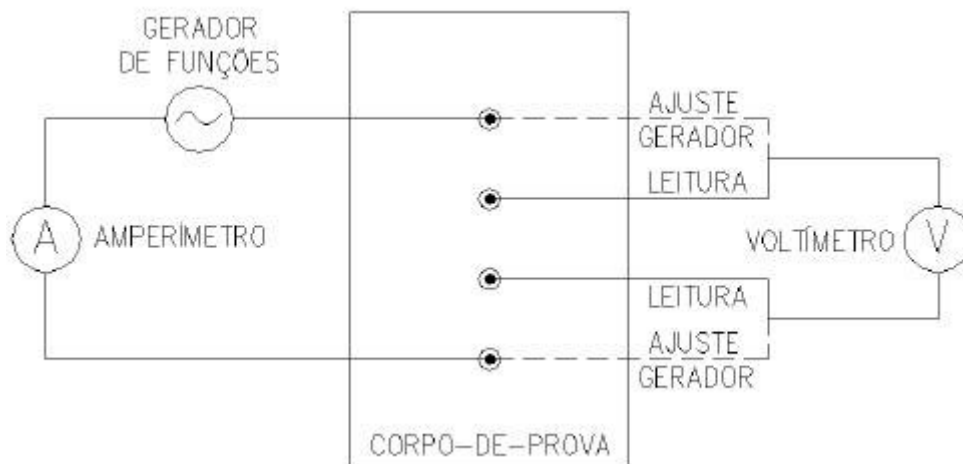


Figura 4.4. Esquema do ensaio de resistividade elétrica (Hoppe, 2005).

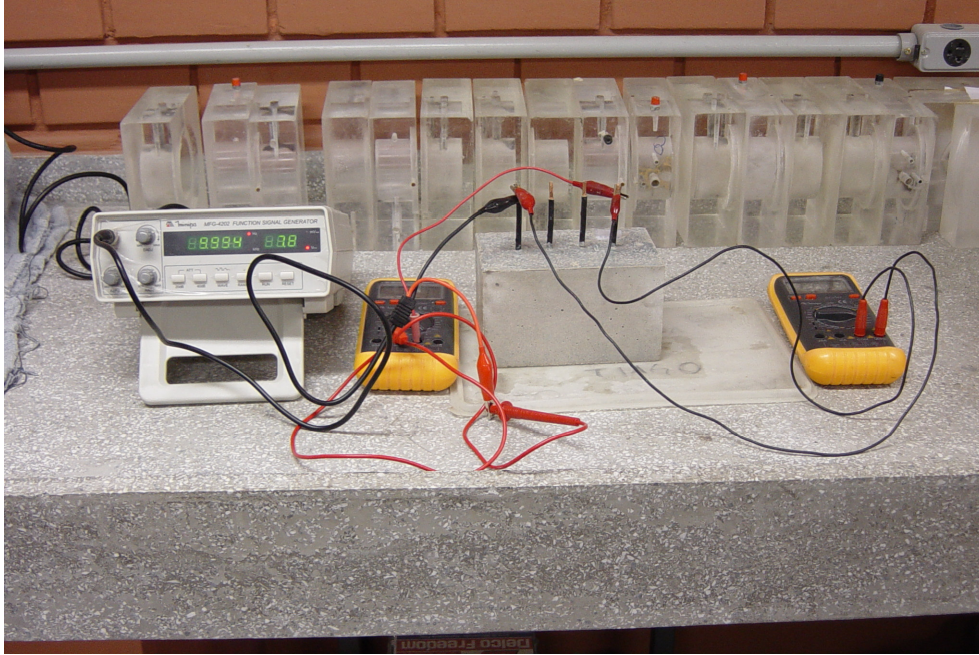


Figura 4.5. Ensaio de resistividade elétrica sendo executado.

Com os valores da diferença de potencial e corrente elétrica medidas entrava-se na equação 4.2 resultando a resistividade elétrica aparente.

$$\rho = (4.\pi.d.V) / i . \{ 1 + [2.d / \sqrt{(d^2 + 4.b^2)}] - [d / \sqrt{(d^2 + .b^2)}] \} \quad (4.2)$$

Onde ρ é a resistividade elétrica aparente em ohm.cm; V a diferença de potencial em volts; i a corrente elétrica em amperes; d a distância média entre o eixo dos eletrodos medida em centímetros e b a profundidade de embutimento dos eletrodos no concreto também em centímetros.

A NBR 7117 (1981) afirma que as medidas da resistividade elétrica obtidas pelo método dos quatro eletrodos apontam a resistividade da camada de profundidade aproximadamente igual a distância entre eletrodos. Considerando a distância média entre eletrodos de 3cm teríamos a resistividade elétrica medida a uma profundidade aproximadamente igual ao cobrimento de armaduras comumente usado nas estruturas de concreto armado convencionais.

4.7 Ensaios em pasta

4.7.1 Solução aquosa dos poros

Na idade de ensaio os corpos-de-prova cilíndricos Ø5x10cm eram retirados das caixas onde eram curados e lavados para retirar a cal depositada sobre a superfície dos mesmos. Após eram levados até uma furadeira de bancada de baixa rotação onde era extraído o pó para obtenção da solução. O pó obtido era peneirado na peneira 100 e a fração passante era misturada em igual quantidade de água deionizada. A mistura então era submetida à homogeneização e estabilização do pH em agitador magnético por 30 minutos. Após homogeneizada a solução era filtrada e armazenada em potes plásticos enviados ao departamento de química da UFSM para obtenção da concentração dos diferentes íons. Os íons avaliados foram Na⁺, K⁺, Ca²⁺, SO₄²⁻ e OH⁻. A concentração dos íons Ca²⁺ foi determinada por titulação complexométrica. Para os íons Na⁺ e K⁺ empregou-se espectrometria de absorção atômica. Para os íons SO₄²⁻ usou-se cromatografia iônica. E os íons OH⁻ empregou-se titulação de neutralização com HCl.

A condutividade elétrica da solução dos poros foi determinada com auxílio das equações de Shi et al. (1998):

$$\rho = \rho_{\text{H}_2\text{O}} + [(\sum C_i \cdot \lambda_i) / 1000] \quad (4.3)$$

$$\lambda_i = \lambda_{i0} - (A_i \sqrt{C_i}) \quad (4.4)$$

$$A_i = 0,2289 \cdot \lambda_{i0} + 60,19 \quad (4.5)$$

Onde ρ é a condutividade elétrica da solução dos poros; $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ é a condutividade elétrica específica da água; C_i é a concentração equivalente do íon i ; λ_i é a condutividade equivalente do íon i e λ_{i0} é a condutividade equivalente à concentração infinita.

A tabela 4.7 apresenta os valores de λ_{i0} dos íons presentes na solução dos poros do concreto, (SHI et al., 1998).

Tabela 4.7. Condutividade equivalente dos íons em concentração infinita a 25 °C (Shi et al., 1998)

Condutividade equivalente	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	SO ₄ ²⁻	OH ⁻	Cl ⁻
m ² .equiv ⁻¹ .ohm ⁻¹	0,00501	0,00735	0,00595	0,00798	0,0198	0,00763

4.7.2 Ensaio da porosimetria por intrusão de mercúrio

Os corpos-de-prova cilíndricos Ø4x8cm eram retirados dos recipientes onde eram curados na idade de ensaio e lavados para tirar restos de cal. Após eram cortados para extração de cubos de arestas entre 6 e 10mm. Os cubos eram então armazenados em banho de álcool isopropílico para paralisar a hidratação. Antes do envio dos exemplares de cada mistura para a ABCP, onde realizou-se o ensaio, os cubos foram gradativamente secos. Para a determinação da porosimetria foi empregado o aparelho Micromeritics, modelo Autopore II 9220.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Resistência à compressão

Os resultados do ensaio de resistência à compressão axial para todas as misturas e idades avaliadas são apresentados na tabela 5.1. Com os resultados obtiveram-se os coeficientes da curva de Abrams de cada uma das misturas e o coeficiente de determinação (R^2) que demonstra a adequação do ajuste estatístico. Os coeficientes são dados na tabela 5.2.

Tabela 5.1 Resultados de resistência à compressão

Mistura	a/ag	f _c (MPa)			
		Idade (dias)			
		3	7	28	91
REF	0,3	53,20	60,74	69,29	71,86
	0,42	34,37	36,39	47,25	58,15
	0,55	24,10	28,10	39,75	44,17
50E	0,3	34,42	48,18	57,12	68,80
	0,42	16,82	28,72	38,24	47,81
	0,55	11,04	17,54	27,65	32,91
50A	0,3	41,35	50,06	60,28	61,37
	0,42	32,15	40,33	50,56	53,25
	0,55	19,30	28,53	37,79	40,38
70E	0,3	23,53	46,31	57,31	61,01
	0,42	10,31	23,90	36,32	40,40
	0,55	6,11	14,37	27,52	33,56

Tabela 5.2 Coeficientes da equação de Abrams e coeficientes de determinação.

Mistura	Constantes da equação de Abrams para a resistência à compressão											
	3 dias			7 dias			28 dias			91 dias		
	A	B	R ²	A	B	R ²	A	B	R ²	A	B	R ²
REF	134,71	23,62	0,99	145,19	21,52	0,96	129,15	9,11	0,94	129,94	7,02	1,00
50E	126,28	92,71	0,97	160,07	56,80	1,00	133,69	18,10	0,99	166,04	19,07	1,00
50A	107,68	21,30	0,97	100,30	9,53	0,99	107,52	6,51	0,99	103,70	5,37	0,97
70E	110,99	216,09	0,98	181,56	106,63	0,99	132,90	18,61	0,97	119,19	10,77	0,94

A figura 5.1 mostra graficamente os resultados de resistência medidos para as misturas nas idades de 3, 7, 28 e 91 dias para as relações a/ag de 0,30, 0,42 e 0,55.

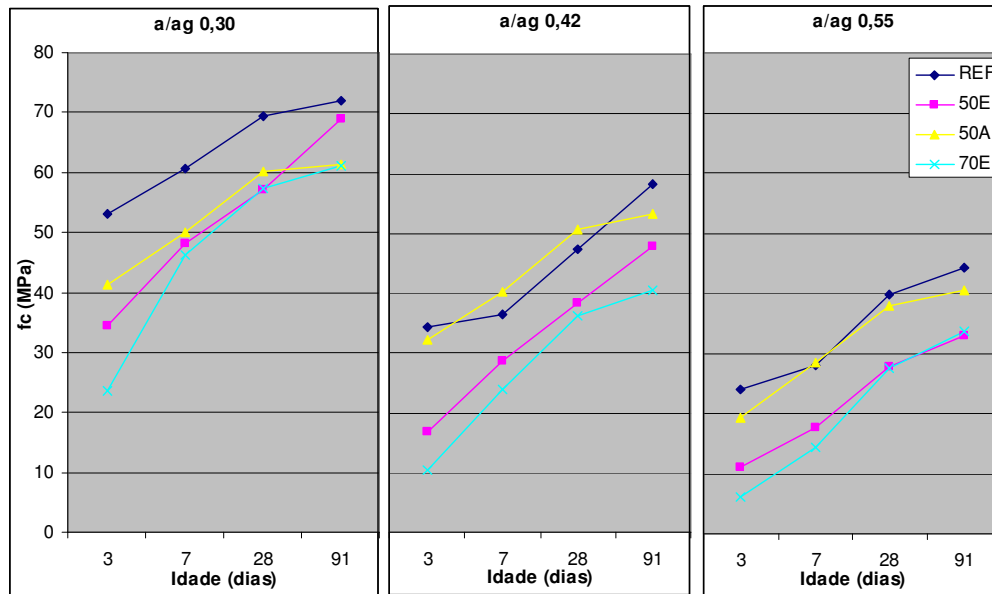


Figura 5.1. Resistências à compressão obtidas experimentalmente.

A figura 5.2 mostra as curvas de Abrams das misturas para as idades testadas. Já a figura 5.3 apresenta o crescimento da resistência, ao longo do tempo, das misturas obtidos a partir do emprego das mesmas equações de Abrams.

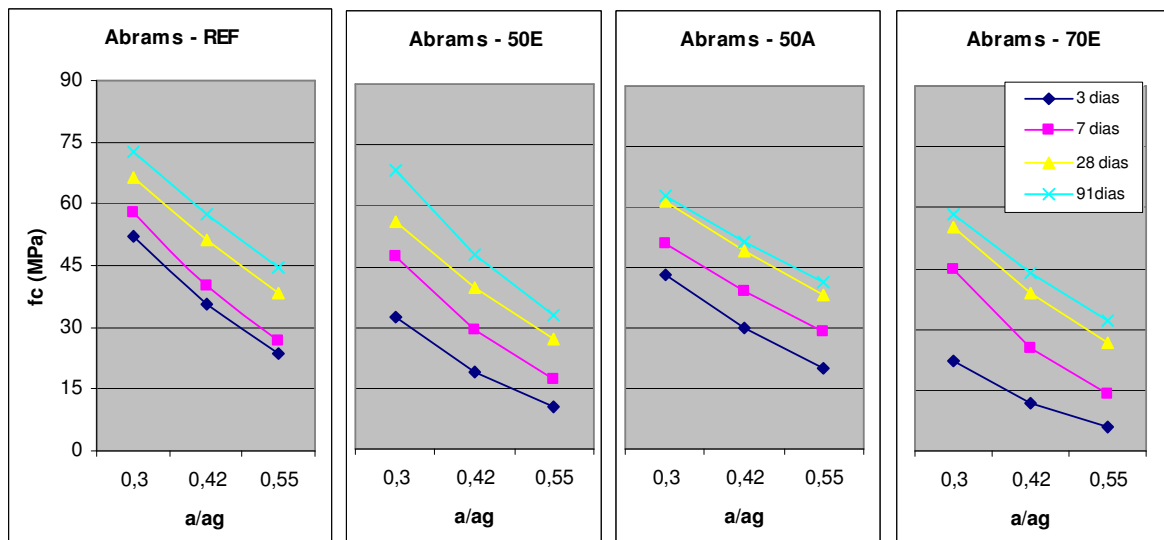


Figura 5.2. Curvas de Abrams para a resistência à compressão das misturas testadas.

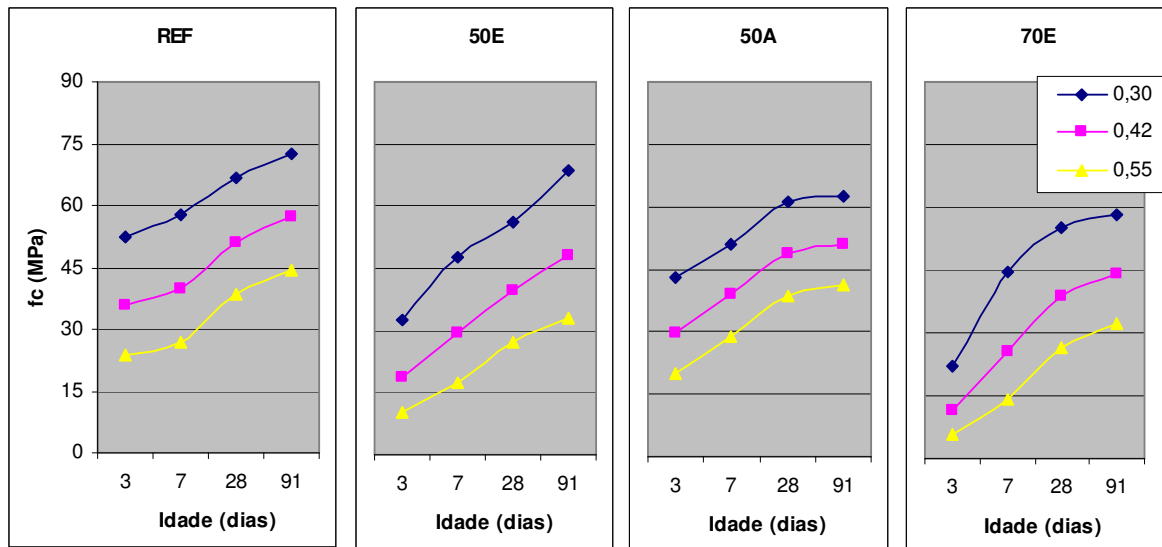


Figura 5.3. Crescimento da resistência das diferentes misturas avaliadas.

Na tabela 5.3 aparece o índice de resistência com relação à mistura referência (if_{REF}) que nada mais é que a razão entre a resistência da mistura com adição mineral e a resistência da mistura referência para a mesma idade e relação a/ag. Outro índice de resistência apresentado na tabela é com relação à resistência de 91 dias (if_{91}). O if_{91} é resultado da divisão entre a resistência do traço na idade j e aos 91 dias para uma mesma relação água/aglomerante.

Tabela 5.3. Índices de resistência.

Mistura	a/ag	$if_c (f_c / f_{c\ ref})$				$if_{91} (f_{c_j} / f_{c_{91}})$			
		Idade (dias)				Idade (dias)			
		3	7	28	91	3	7	28	91
REF	0,3	1,00	1,00	1,00	1,00	0,72	0,80	0,92	1,00
	0,42	1,00	1,00	1,00	1,00	0,62	0,70	0,89	1,00
	0,55	1,00	1,00	1,00	1,00	0,53	0,60	0,86	1,00
50E	0,3	0,62	0,82	0,84	0,95	0,47	0,69	0,82	1,00
	0,42	0,53	0,73	0,78	0,84	0,39	0,61	0,82	1,00
	0,55	0,44	0,65	0,71	0,74	0,32	0,53	0,83	1,00
50A	0,3	0,82	0,88	0,92	0,87	0,69	0,81	0,98	1,00
	0,42	0,83	0,97	0,96	0,89	0,58	0,76	0,96	1,00
	0,55	0,85	1,08	1,00	0,93	0,49	0,71	0,93	1,00
70E	0,3	0,42	0,77	0,83	0,81	0,38	0,77	0,95	1,00
	0,42	0,33	0,64	0,76	0,77	0,26	0,58	0,89	1,00
	0,55	0,24	0,52	0,69	0,72	0,18	0,43	0,83	1,00

Os resultados de resistência à compressão das misturas 50E e 70E demonstram que a adição de escória de alto forno tende a diminuir a resistência do concreto para todas as idades. A queda de resistência foi diretamente proporcional ao teor de substituição de cimento por escória. Contudo, o crescimento da resistência destas misturas foi contínua até a idade de 91 dias. Já a mistura referência apresentou pequeno crescimento entre as idades de 28 e 91 dias.

As resistências medidas para a mistura 50E foram iguais a 62%, 53% e 44% da resistência da mistura referência na idade de 3 dias para as relações a/ag de 0,30, 0,42 e 0,55, respectivamente. Já aos 91 dias, estes valores foram 95%, 84% e 74%. Para a mistura 70E estes índices foram de 42%, 33% e 24% aos três dias, aos 91 dias os valores foram 81%, 77% e 72% para as relações água/aglomerante 0,30, 0,42 e 0,55, respectivamente. Por fim, para a mistura 50A, tais valores foram 82%, 83% e 85% aos 3 dias e 87%, 89% e 93% aos 91 dias.

A mistura alcalinamente ativada apresentou resistências à compressão próximas às da referência, até mesmo superando-as nas idades de 7 e 28 dias para a relação a/ag 0,55. Por outro lado, entre as idades de 28 e 91 dias o crescimento de resistência desta mistura foi insignificante, alcançando aos 28 dias 96%, em média, da resistência aos 91 dias.

Comparando-se as misturas 50E e 50A percebe-se a efetividade do ativador em acelerar o crescimento da resistência do concreto. Para todas as idades avaliadas as resistências da mistura 50A foram maiores que a da 50E, com exceção da relação a/ag 0,30 na idade de 91 dias. Aos 3 dias as resistências da mistura 50A foram iguais a 1,33, 1,58 e 1,91 vezes às da 50E, para as relações a/ag 0,30, 0,42 e 0,55, respectivamente. Para a idade de 7 dias os valores foram 1,07, 1,33 e 1,67, para os 28 dias, 1,09, 1,24 e 1,41 e para os 91 dias, 0,91, 1,06 e 1,25. A figura 5.4 mostra a comparação de resistência entre as duas misturas.

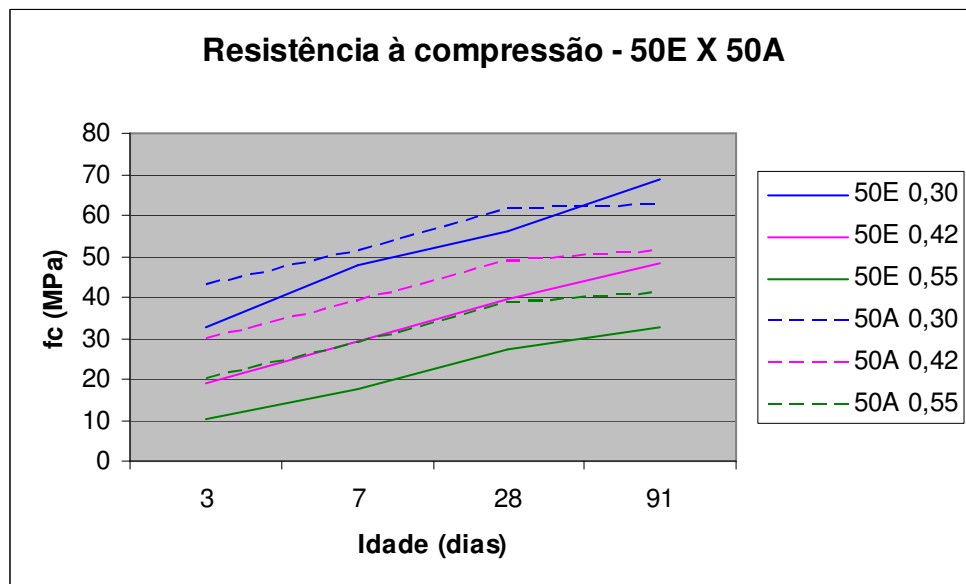


Figura 5.4. Valores de resistência para as misturas 50E e 50A.

A fim de comparar os valores de resistência obtidos para o cimento Portland branco com o cimento Portland cinza serão apresentados a seguir os resultados obtidos por Rosa

(2005) em pesquisa realizada no Laboratório de Materiais e Construção Civil (LMCC) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

Rosa (2005) analisou a influência do emprego de elevados teores de escória sobre concretos executados com cimento CP V ARI. Os teores de escória avaliados foram de 50% e 70% de substituição. O pesquisador executou também uma mistura com 50% de escória ativada alcalinamente por sulfato de sódio em um teor de 4%. O teor de argamassa adotado foi de 52% e as proporções aglomerante/materiais secos foram de 1:3,5, 1:5,1 e 1:6,3 para as relações água/aglomerante de 0,35, 0,50 e 0,65, respectivamente. O abatimento foi fixado em 80 ± 10 mm.

A tabela 5.4 mostra as constantes de Abrams para os resultados de resistência à compressão obtidos por Rosa (2005). A tabela 5.4 apresenta os resultados obtidos lançando os valores de relação água/aglomerante 0,30, 0,42 e 0,55 nas equações de Abrams da tabela 5.3. A tabela 5.5 mostra, também, os índices de resistência para comparação entre a resistência à compressão do cimento Portland branco e o cimento cinza. Os índices foram obtidos dividindo-se a resistência obtida para o CPB em cada idade e relação a/ag e a resistência obtida pelo CPV ARI.

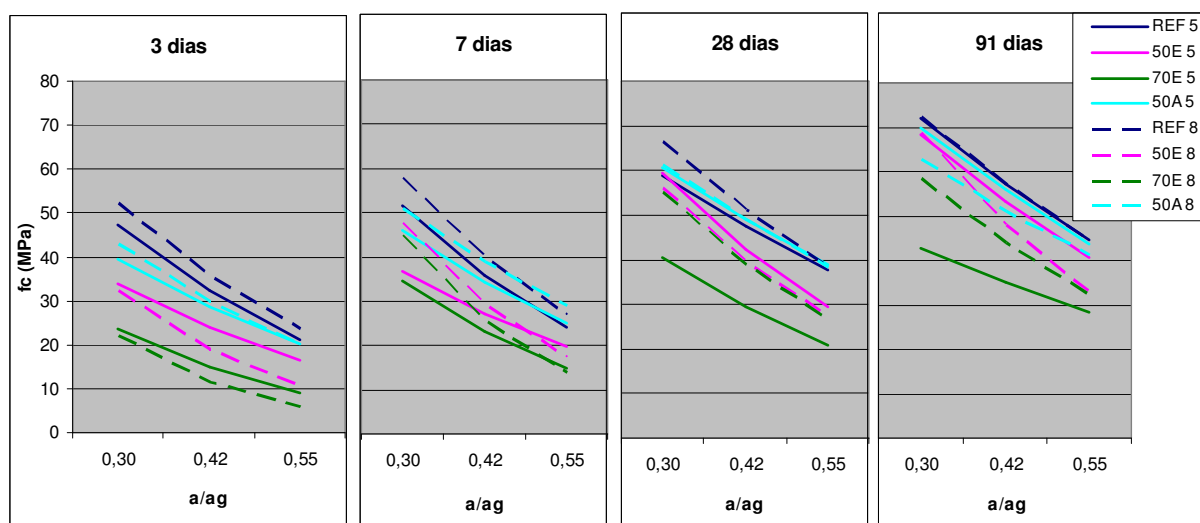
Tabela 5.4 Coeficientes da equação de Abrams e coeficientes de determinação obtidos por Rosa (2005).

Mistura	Constantes da equação de Abrams para a resistência à compressão											
	3 dias			7 dias			28 dias			91 dias		
	A	B	R ²	A	B	R ²	A	B	R ²	A	B	R ²
REF	123,53	24,41	1,00	129,04	21,05	1,00	101,13	6,05	0,95	128,10	6,84	0,99
50E	81,59	18,60	0,99	77,68	12,19	1,00	137,92	16,56	0,99	126,79	7,91	0,97
50A	76,21	49,13	1,00	94,18	28,31	1,00	90,13	14,47	1,00	70,35	5,21	1,00
70E	88,98	14,75	1,00	96,72	11,80	1,00	103,99	6,00	0,99	122,48	6,48	1,00

Tabela 5.5. Resistências à compressão obtidas por Rosa (2005) e índices de resistências entre o CPB e o CPV.

Traço	a/ag	f _c (Mpa)				lfc (f _{CPB} / f _{CPV})			
		Idade (dias)				Idade (dias)			
		3	7	28	91	3	7	28	91
REF	0,30	47,37	51,73	58,93	71,94	1,10	1,12	1,13	1,01
	0,42	32,28	35,89	47,48	57,12	1,11	1,11	1,08	1,00
	0,55	21,31	24,15	37,57	44,48	1,11	1,11	1,02	1,00
50E	0,30	33,95	36,68	59,42	68,17	0,96	1,30	0,94	1,01
	0,42	23,90	27,17	42,43	53,19	0,79	1,08	0,93	0,90
	0,55	16,35	19,63	29,46	40,65	0,64	0,88	0,92	0,81
70E	0,30	23,69	34,54	40,43	42,88	0,93	1,30	1,37	1,36
	0,42	14,85	23,13	29,34	35,18	0,78	1,10	1,33	1,25
	0,55	8,95	14,97	20,73	28,39	0,64	0,93	1,28	1,14
50A	0,30	39,69	46,12	60,74	69,90	1,08	1,11	1,01	0,90
	0,42	28,73	34,30	48,98	55,86	1,04	1,13	1,00	0,92
	0,55	20,25	24,88	38,80	43,81	0,99	1,17	0,99	0,94

A figura 5.5 mostra graficamente a comparação dos valores de resistência entre o CPB e o CPV ARI.



Nota: REF 5, 50E 5, 70E 5 e 50A 5 são os valores de Rosa (2005). REF 8, 50E 8, 70E 8 e 50A 8 são os valores obtidos nesta pesquisa.

Figura 5.5. Comparação entre as resistências do CBP e CPV ARI.

A comparação entre os valores de resistência das misturas executados exclusivamente com cimento Portland demonstra o desenvolvimento mais rápido da resistência do cimento Portland branco, sendo a resistência do CPB maior que a do CPV para todas relações a/ag nas idades de 3, 7 e 28 dias. O valor da resistência do CPB foi em média 10% maior que a do CPV nestas idades. Aos 91 dias, as resistências dos dois cimentos foram praticamente iguais para as três relações a/ag.

A mistura com 50% de escória não ativada e CPB apresentou resistências menores que a equivalente com CPV para todas as idades e relações água/aglomerante, com exceção às relações a/ag 0,30 e 0,42 na idade de 7 dias e relação a/ag 0,30 aos 91 dias. A mistura com CPB e 70% de escória apresentou menores resistências aos 3 dias para todas as relações a/ag e aos 7 dias e relação a/ag 0,55 quando comparada com o CPV. Nas demais relações a/ag aos 7 dias e todas relações a/ag nas idades de 28 e 91 dias foram maiores as resistências da mistura com CPB.

O emprego do ativador alcalino resultou em resistências próximas ou superiores das misturas contendo CPB e escória sobre as misturas de CPV mais escória, nas idades de 3, 7 e 28 dias, os índices variaram de 0,99 a 1,17. Aos 91 dias as resistências das misturas com CPV foram maiores para todas as relações a/ag, sendo as resistências das misturas com CPB em média 8% menores.

Andrade (2005), Kirchheim (2004) e Silva et al. (2005) também compararam as resistências do CPB e o CPV ARI.

Andrade (2005) testou as relações água/aglomerante de 0,40, 0,50 e 0,60. O teor de argamassa adotado foi de 49% e o abatimento fixado em 80 ± 10 mm. Os corpos-de-prova foram ensaiados aos 28 dias. O autor observa que o concreto moldado com CPB apresentou maiores resultados de resistência à compressão. Entende ele que este fato se deve a maior percentual de filer calcário presente no cimento branco, capaz de preencher os poros maiores da pasta, resultando em uma estrutura de poros mais compacta.

Silva et al. (2005) comparou resultados de resistência à compressão aos 28 dias de concretos de três tipos de CPB e um CPV ARI. As relações a/ag adotadas foram 0,40, 0,50 e 0,60. O abatimento foi fixado em 100 ± 20 mm. As resistências à compressão dos concretos com CPB foram menores que as do CPV para todas as relações a/ag. Kirchheim (2004) também observou que a resistência do CPV é maior que a do CPB, contudo, pondera que a diferença de resistência entre os dois cimentos não foi significativa.

5.2 Resistividade elétrica aparente

Os resultados dos ensaios de resistividade elétrica aparente para todos as misturas e idades avaliados são dados na tabela 5.6. Esses resultados se ajustam a uma equação exponencial do tipo A/B^x . Os coeficientes das equações e seus respectivos coeficientes de correlação (R^2) que demonstram a adequação do ajuste estatístico são apresentados na tabela 5.7.

Tabela 5.6. Resultados de resistividade elétrica aparente medidos.

Traço	a/ag	Resistividade elétrica aparente (ohm.cm)					
		Idade (dias)					
		3	7	14	28	56	91
REF	0,3	11134	14769	17772	25175	33039	35287
	0,42	5500	8007	8629	10775	13196	14308
	0,55	4306	6629	7975	9758	11624	12320
50E	0,3	10222	25667	43640	59668	79307	88811
	0,42	6793	16431	29805	44217	62229	68120
	0,55	6136	15022	27360	41018	46127	54923
50A	0,3	15914	47492	62256	67108	82576	83370
	0,42	10306	36769	46565	50510	59994	62142
	0,55	3901	25533	39586	45504	55208	57286
70E	0,3	7891	34340	53538	70246	79474	80446
	0,42	5781	27011	47556	64132	70303	78248
	0,55	4204	18845	39343	56690	64211	73429

A figura 5.6 apresenta graficamente as curvas obtidas. O crescimento dos resultados obtidos a partir das equações exponenciais aparece na figura 5.7.

Tabela 5.7. Coeficientes das equações exponenciais para a resistividade elétrica.

Traço	Coeficientes	Idade (dias)					
		3	7	14	28	56	91
REF	A	31680,1	35428,8	40909,4	67633,7	98850,8	107324,3
	B	43,53	24,04	23,79	42,48	62,42	64,52
	R ²	0,91	0,90	0,80	0,81	0,82	0,84
50E	A	17727,9	45445,1	72004,8	89406,1	152979,8	156044,8
	B	7,57	8,35	6,36	4,42	8,75	6,81
	R ²	0,88	0,86	0,87	0,88	1,00	0,99
50A	A	94188,4	101612,8	104264,7	103085,5	127621,8	125275,8
	B	284,11	12,02	6,07	4,68	4,94	4,43
	R ²	0,96	0,99	0,97	0,92	0,88	0,89
70E	A	16743,0	71845,5	78351,8	91264,1	101866,7	90305,7
	B	12,40	11,08	3,44	2,36	2,34	1,44
	R ²	1,00	0,99	0,99	1,00	0,99	0,96

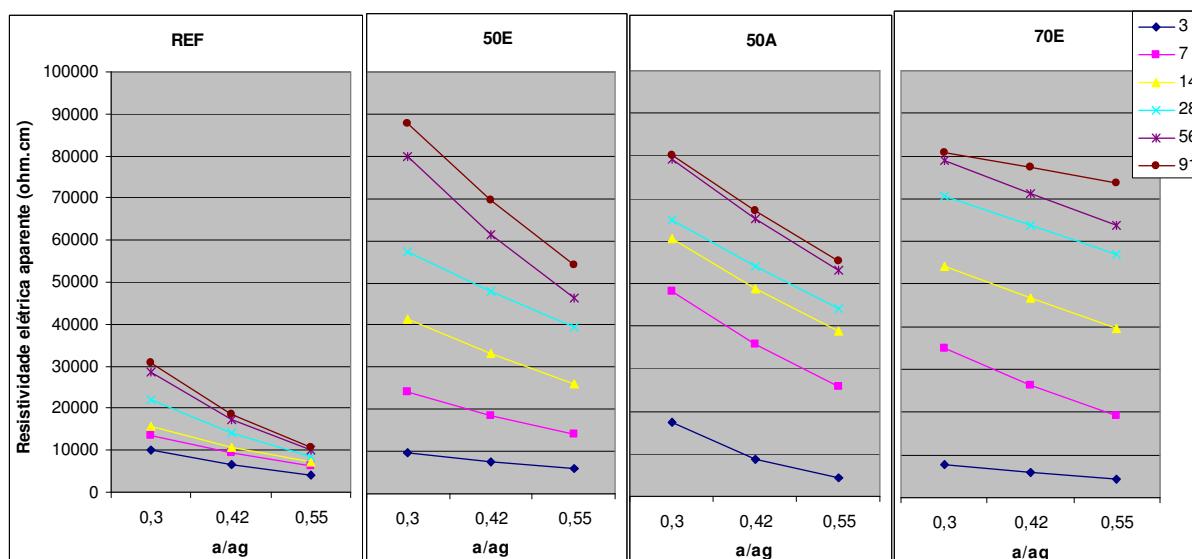


Figura 5.6. Curvas exponenciais para as misturas testadas.

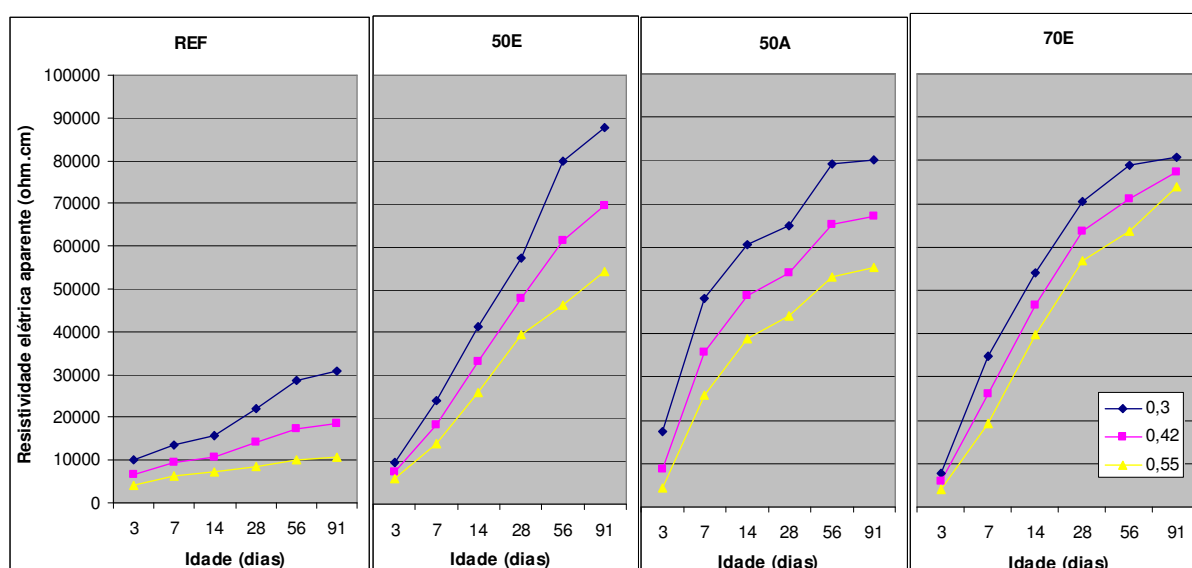


Figura 5.7. Crescimento dos valores de resistividade a partir das exponenciais.

Na tabela 5.8 são dados os índices de resistividade com relação à mistura referência ($i\rho_{REF}$) que são a razão entre a resistividade da mistura com adição mineral e a resistividade da mistura referência para a mesma idade e relação a/ag . Outro índice de resistividade apresentado na tabela é o índice de resistividade de 91 dias ($i\rho_{91}$). O $i\rho_{91}$ é resultado da divisão entre o valor da resistividade elétrica da mistura na idade j e aos 91 dias para uma mesma relação água/aglomerante.

Tabela 5.8. Índices de resistividade calculados.

Traço	a/ag	$i\rho_{REF} (\rho / \rho_{ref})$						$i\rho_{91} (\rho / \rho_{91})$					
		Idade (dias)						Idade (dias)					
		3	7	14	28	56	91	3	7	14	28	56	91
REF	0,3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,33	0,44	0,51	0,71	0,93	1,00
	0,42	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,35	0,50	0,58	0,75	0,93	1,00
	0,55	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,37	0,57	0,66	0,79	0,94	1,00
50E	0,3	0,95	1,76	2,61	2,61	2,79	2,85	0,11	0,27	0,47	0,65	0,91	1,00
	0,42	1,17	2,00	3,06	3,42	3,53	3,74	0,11	0,27	0,47	0,69	0,88	1,00
	0,55	1,46	2,29	3,63	4,59	4,56	5,01	0,11	0,26	0,48	0,73	0,85	1,00
50A	0,3	1,69	3,53	3,84	2,95	2,76	2,61	0,22	0,60	0,76	0,81	0,99	1,00
	0,42	1,35	3,84	4,52	3,85	3,75	3,59	0,13	0,53	0,73	0,80	0,97	1,00
	0,55	1,06	4,20	5,40	5,13	5,21	5,09	0,08	0,47	0,70	0,80	0,96	1,00
70E	0,3	0,77	2,56	3,42	3,21	2,76	2,63	0,10	0,43	0,67	0,87	0,98	1,00
	0,42	0,90	2,81	4,31	4,54	4,09	4,15	0,08	0,34	0,60	0,82	0,92	1,00
	0,55	1,05	3,10	5,55	6,61	6,27	6,80	0,06	0,26	0,54	0,77	0,86	1,00

Os valores do coeficiente de determinação (R^2) obtidos, todos acima de 0,80, demonstram a dependência direta da resistividade elétrica à relação água/aglomerante. O crescimento da segunda acarreta a diminuição da primeira. Tal comportamento já era esperado em função da dependência entre a porosidade da pasta e a resistividade elétrica.

Os resultados apontam que a adição de escória tende a aumentar a resistividade elétrica do concreto a partir dos 7 dias de idade para todas as relações água/aglomerante. Aos três dias de idade, a mistura 50E apresentou resistividade inferior à mistura referência para a relação a/ag 0,30, já a mistura 70E apresentou resistividade menor para as relações a/ag 0,30 e 0,42. Nas outras relações a/ag as resistividades foram maiores que a da mistura referência. A mistura 50A apresentou resistividade elétrica maior que a mistura referência para todas as idades e relações a/ag.

O aumento da resistividade acompanhou o crescimento do teor de adição de escória, comparando as resistividades das misturas 70E e 50E percebe-se que os valores da primeira são sempre maiores que os da segunda a partir dos 7 dias de idade, com exceção da idade de 91 dias e relação a/ag 0,30. Aos três dias as resistividades da mistura 70E foram iguais a 0,81, 0,77 e 0,72 das da mistura 50E para as relações água/aglomerante 0,30, 0,42 e 0,55, respectivamente. A partir dos 7 dias, as resistividades da mistura 70E foram sempre maiores, chegando aos 91 dias a 0,92, 1,11 e 1,36 vezes a resistividade da mistura 50E para as mesmas relações a/ag.

O emprego de ativação alcalina se mostrou efetivo em acelerar o ganho de resistividade elétrica. Comparando-se as misturas 50E e 50A observa-se que até os 28 dias as resistividades da segunda foram maiores que as da primeira, com exceção da relação a/ag 0,55

na idade de 3 dias. Para esta idade as resistividade da mistura 50A foram iguais a 1,79, 1,16 e 0,72 vezes a resistividade da mistura 50E para as relações a/ag 0,30, 0,42 e 0,55, respectivamente. Aos 91 dias as resistividades das duas misturas são bastante próximas sendo as resistividades da mistura 50A iguais a 0,91, 0,96 e 1,02 das da mistura 50E para as mesmas relações a/ag. A tabela 5.9 apresenta as relações entre as resistividades das misturas 70E e 50E e das misturas 50A e 50E.

Tabela 5.9. Relação entre as resistividades elétricas das misturas 70E e 50E e misturas 50A e 50E.

a/ag	ρ_{70E} / ρ_{50E}						ρ_{50A} / ρ_{50E}					
	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias	56 dias	91 dias	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias	56 dias	91 dias
0,30	0,81	1,45	1,31	1,23	0,99	0,92	1,79	2,00	1,47	1,13	0,99	0,91
0,42	0,77	1,40	1,41	1,33	1,16	1,11	1,16	1,92	1,48	1,13	1,06	0,96
0,55	0,72	1,35	1,53	1,44	1,38	1,36	0,72	1,83	1,49	1,12	1,14	1,02

A tabela 5.10 apresenta o risco de corrosão das armaduras em função da resistividade elétrica do concreto segundo os critérios do CEB 192 (apud Abreu 1998). Os riscos de corrosão para as misturas avaliadas nesta pesquisa segundo os critérios do CEB 192 são dados na tabela 5.11.

Tabela 5.10. Relação entre a resistividade elétrica e a probabilidade de corrosão proposta pelo CEB 192 (Abreu, 1998)

Resistividade elétrica (ohm.cm)	Probabilidade de corrosão
> 20.000	Desprezível
10.000 a 20.000	Baixa
5.000 a 10.000	Alta
< 5.000	Muito alta

A tabela 5.11 demonstra a capacidade da escória de diminuir o risco de corrosão das armaduras em função da elevada resistividade elétrica obtida. Aos três dias de idade todas as misturas apresentaram probabilidade de corrosão entre alta e muito alta, com exceção das misturas REF e 50A na relação a/ag 0,30, onde a probabilidade foi classificada como baixa. Aos 7 dias de idade, a mistura 50A em todas relações a/ag, a mistura 70E nas relações a/ag 0,30 e 0,42 e a mistura 50E na relação a/ag 0,30, apresentaram probabilidade de corrosão desprezível. Aos 14 dias, todas as misturas contendo escória em qualquer relação a/ag apresentam risco desprezível de corrosão. A mistura referência só alcançou risco desprezível a partir da idade de 28 dias e na relação a/ag 0,30.

Tabela 5.11. Probabilidade de corrosão para as misturas avaliadas segundo o critério do CEB 192 (apud Abreu 1998)

Traço	a/ag	Idade (dias)					
		3	7	14	28	56	91
REF	0,3	Baixa	Baixa	Baixa	Desprezível	Desprezível	Desprezível
	0,42	Alta	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
	0,55	Muito Alta	Alta	Alta	Alta	Baixa	Baixa
50E	0,3	Alta	Desprezível	Desprezível	Desprezível	Desprezível	Desprezível
	0,42	Alta	Baixa	Desprezível	Desprezível	Desprezível	Desprezível
	0,55	Alta	Baixa	Desprezível	Desprezível	Desprezível	Desprezível
50A	0,3	Baixa	Desprezível	Desprezível	Desprezível	Desprezível	Desprezível
	0,42	Alta	Desprezível	Desprezível	Desprezível	Desprezível	Desprezível
	0,55	Muito Alta	Desprezível	Desprezível	Desprezível	Desprezível	Desprezível
70E	0,3	Alta	Desprezível	Desprezível	Desprezível	Desprezível	Desprezível
	0,42	Alta	Desprezível	Desprezível	Desprezível	Desprezível	Desprezível
	0,55	Muito Alta	Baixa	Desprezível	Desprezível	Desprezível	Desprezível

A fim de comparar o desempenho quanto à resistividade elétrica do cimento Portland branco com o cimento Portland cinza são apresentados os resultados de resistividade elétrica obtidos por Rosa (2005) onde este avaliou os mesmos teores de escória usados nesta pesquisa mas em substituição ao CPV ARI. A tabela 5.12 mostra os valores obtidos por Rosa (2005) para as relações a/ag avaliadas nesta pesquisa.

Tabela 5.12. Resultados de resistividade elétrica aparente obtidos por Rosa (2005)

Traço	a/ag	Resistividade elétrica aparente (ohm.cm)				
		Idade (dias)				
		3	7	28	56	91
REF	0,3	19196	24057	31975	39065	48718
	0,42	14987	18327	23296	28969	35827
	0,55	11462	13649	16530	20954	25680
50E	0,3	13130	20503	45356	57751	61932
	0,42	11671	17939	39146	49947	54267
	0,55	10272	15522	33374	42679	47030
50A	0,3	34216	52818	64921	71655	77745
	0,42	23915	38402	53154	59708	67490
	0,55	16223	27188	42801	49003	57901
70E	0,3	25399	27101	49563	61055	68711
	0,42	22611	24133	42400	56770	62349
	0,55	19934	21284	35803	52466	56120

Para avaliar o desempenho dos dois cimentos adotou-se o índice $i\rho_{CP}$, que é a razão entre a resistividade elétrica da mistura com cimento Portland branco e a mistura com cimento cinza para cada idade e relação água/aglomerante testada. A tabela 5.13 mostra os valores de $i\rho_{CP}$ obtidos.

Tabela 5.13. Razão entre as resistividades obtidas nesta pesquisa e os valores de Rosa (2005)

Traço	a/ag	$i\rho_{CP}$ ($\rho_{2008} / \rho_{2005}$)				
		Idade (dias)				
		3	7	28	56	91
REF	0,3	0,53	0,57	0,69	0,73	0,63
	0,42	0,43	0,51	0,60	0,60	0,52
	0,55	0,35	0,45	0,52	0,49	0,42
50E	0,3	0,74	1,17	1,26	1,38	1,42
	0,42	0,65	1,04	1,22	1,23	1,28
	0,55	0,57	0,91	1,18	1,09	1,15
50A	0,3	0,51	0,91	1,00	1,10	1,03
	0,42	0,37	0,93	1,01	1,09	0,99
	0,55	0,26	0,95	1,03	1,08	0,95
70E	0,3	0,31	1,29	1,42	1,29	1,18
	0,42	0,26	1,08	1,50	1,26	1,24
	0,55	0,21	0,90	1,59	1,22	1,32

Os valores de $i\rho_{CP}$ para as misturas contendo apenas cimento apontam o pior desempenho do CPB em comparação ao CPV ARI. Aos 3 dias, o CPB apresentou resistividades iguais a 0,53, 0,43 e 0,35 das apresentadas pelo CPV para as relações a/ag 0,30, 0,42 e 0,55, respectivamente. Aos 91 dias, estes valores foram 0,63, 0,52 e 0,42 para as mesmas relações a/ag.

A adição da escória à mistura tendeu a ser mais positiva para as misturas com CPB. Tanto a mistura 50E quanto a 70E foram superiores às equivalentes com CPV a partir da idade de 28 dias. Aos 91 dias, a mistura 50E com CPB apresentou resistividades 1,42, 1,28 e 1,15 maiores que às do CPV para as relações a/ag 0,30, 0,42 e 0,55, respectivamente. Já a mistura 70E apresentou para a mesma idade índices 1,18, 1,24 e 1,32. Aos 3 dias, as misturas com CPB apresentaram desempenho inferior, com valores de $i\rho_{CP}$ variando de 0,74 a 0,57 para a mistura 50E e 0,31 a 0,21 para a mistura 70E. Aos 7 dias, as misturas apresentaram índices maiores que a unidade para as relações 0,30 e 0,42 mas inferior para a relação 0,55.

As misturas ativadas alcalinamente apresentaram desempenhos semelhantes a partir da idade de 28 dias. Aos 28 dias, os índices foram superiores ou iguais a 1,0, já aos 91 dias os valores foram próximos da unidade mas com leve vantagem do CPV. Nas primeiras idades a mistura contendo cimento cinza apresentou resistividades mais elevadas. Os índices para a idade de 3 dias foram 0,51, 0,37 e 0,26 para as relações água/aglomerante de 0,30, 0,42 e 0,55, respectivamente. Aos 7 dias os índices foram 0,91, 0,93 e 0,95 para as mesmas relações a/ag.

Vieira & Dal Molin (2005) realizaram estudo comparativo entre o cimento Portland branco e o cimento cinza com o intuito de avaliar a resistividade elétrica de concretos. Seus

resultados apontaram o melhor desempenho do CPB. Constataram, também, que a resistividade elétrica cresceu com o aumento da relação água/cimento, fato contrário ao observado neste trabalho. Os concretos testados por Vieira & Dal Molin (2005) encontravam-se em temperatura próxima a 21 °C e teor de umidade próximo a 75%, parcialmente saturados. Em suas conclusões ponderam que seus resultados são contrários a maioria dos trabalhos publicados e atribuem este fato a não saturação dos corpos-de-prova no momento do ensaio.

Cabe destacar que os corpos-de-prova desta pesquisa eram mantidos em câmara úmida, sujeitos à cura em névoa, ao longo de todo o período de ensaios com intuito de mantê-los saturados.

5.3 Condutividade elétrica

A condutividade elétrica da solução dos poros foi calculada com auxílio das equações 4.3 a 4.5, propostas por Shi et al. (1998). A condutividade é calculada a partir da concentração dos íons Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , SO_4^{2-} e OH^- na solução aquosa dos poros extraída. Os valores das condutividades obtidos para as misturas investigadas são dados na tabela 5.14. Os valores das concentrações iônicas, pH da solução aquosa e seu debate mais detalhado serão objeto de estudo em outra dissertação.

Tabela 5.14. Condutividade elétrica específica calculada para a solução dos poros.

Traço	a/ag	Condutividade elétrica específica (ohm^{-1})			
		Idade (dias)			
		3	7	28	91
REF	0,30	2,453	2,065	1,766	1,481
	0,42	1,350	1,293	1,164	1,034
	0,55	1,016	0,820	0,790	0,723
50E	0,30	2,043	1,594	1,276	1,038
	0,42	0,885	0,714	0,689	0,660
	0,55	0,629	0,553	0,370	0,317
50A	0,30	3,288	2,772	2,536	2,445
	0,42	2,451	2,277	2,243	2,160
	0,55	2,161	1,801	1,436	1,148
70E	0,30	1,078	0,884	0,747	0,734
	0,42	0,741	0,692	0,640	0,607
	0,55	0,596	0,464	0,279	0,250

Os resultados são expressos graficamente na figura 5.8.

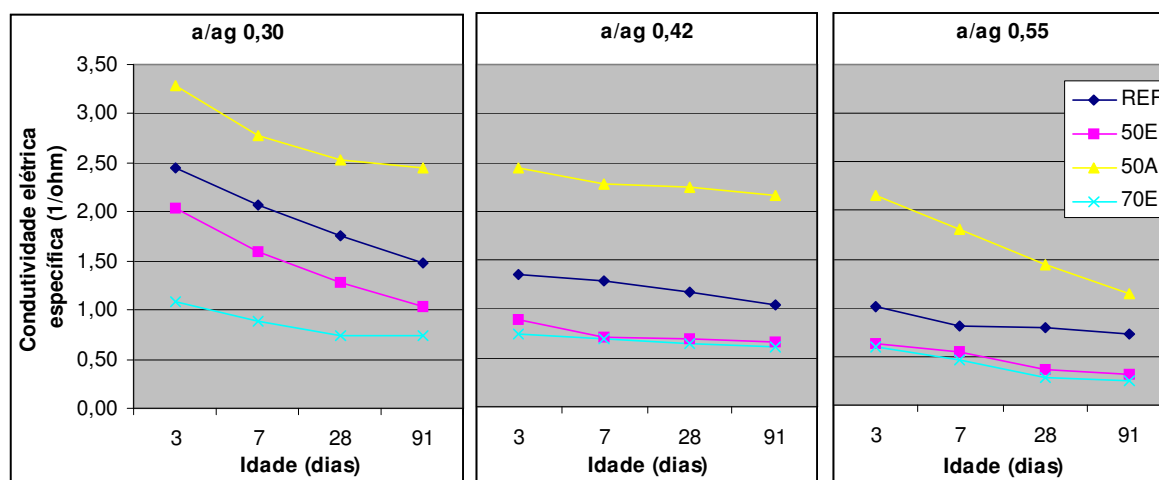


Figura 5.8. Resultados de condutividade elétrica da solução dos poros.

Os resultados mostram que a condutividade elétrica da solução decresce com o avanço da idade da pasta, por outro lado, há um aumento da condutividade com a diminuição da relação água/aglomerante. O aumento da condutividade com a diminuição da relação a/ag está relacionado à maior concentração iônica da solução.

A substituição parcial do cimento por escória resulta em diminuição da condutividade elétrica específica da solução dos poros, mais acentuada quanto maior o teor de substituição. Contudo, a inclusão do ativador alcalino resulta em maiores valores de condutividade elétrica da solução dos poros. Assim, a mistura ativada apresentou os maiores valores de condutividade seguida da mistura referência, da mistura com 50% de escória não ativada e, por fim, com os menores valores de condutividade a mistura com 70% de escória. Tomando os valores de condutividade apresentados pela mistura de referência como parâmetro, temos para a mistura 50A condutividades 34%, 82% e 113% maiores na idade de 3 dias para as relações a/ag 0,30, 0,42 e 0,55, respectivamente. Aos 91 dias os valores foram 65%, 109% e 59% maiores para as mesmas relações a/ag. Já a mistura 50E apresentou aos 3 dias valores 17%, 34% e 38% menores que a mistura referência e aos 91 dias, 30%, 36% e 56% também menores. A mistura 70E, aos 3 dias, apresentou condutividades 56%, 45% e 41% menores, já aos 91 dias os valores foram 50%, 41% e 65% menores para as relações a/ag 0,30, 0,42 e 0,55, respectivamente.

5.4 Porosimetria por intrusão de mercúrio

Os resultados do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio nas idades de 28 e 91 dias são dados na tabela 5.15. A análise mais detalhada dos resultados de porosimetria serão objeto de outra dissertação.

Tabela 5.15. Resultados de porosimetria por intrusão de mercúrio.

Traço	a/ag	Vol. intr.	Øcritico	Vol. intr.	Øcritico	Ø > 50nm	Ø < 50nm	Ø > 50nm	Ø < 50nm
		mL/g	µm	mL/g	µm	28 dias	28 dias	91 dias	91 dias
		28 dias	28 dias	91 dias	91 dias	28 dias	28 dias	91 dias	91 dias
REF	0,30	0,1159	0,0604	0,1035	0,0606	0,0197	0,0962	0,0191	0,0844
	0,42	0,1802	0,0756	0,1673	0,0725	0,0697	0,1105	0,0653	0,1020
	0,55	0,3048	0,2004	0,2852	0,1288	0,1540	0,1508	0,1266	0,1586
50E	0,30	0,1001	0,0604	0,0973	0,0519	0,0071	0,0930	0,0092	0,0881
	0,42	0,1933	0,0722	0,1760	0,0664	0,0268	0,1665	0,0269	0,1491
	0,55	0,2829	0,1009	0,2717	0,0790	0,1020	0,1809	0,0479	0,2238
70E	0,30	0,1224	0,0454	0,1197	0,0363	0,0070	0,1154	0,0019	0,1178
	0,42	0,1998	0,0519	0,1821	0,0452	0,0132	0,1866	0,0114	0,1707
	0,55	0,2839	0,0727	0,2577	0,0603	0,0529	0,2310	0,0178	0,2399
50A	0,30	0,1439	0,0787	0,1057	0,0723	0,0241	0,1198	0,0179	0,0878
	0,42	0,1760	0,1009	0,1617	0,0898	0,0336	0,1424	0,0310	0,1486
	0,55	0,2543	0,1279	0,2432	0,1194	0,0862	0,1681	0,0743	0,1689

Pode-se observar na tabela 5.15 que o volume intrudido aumenta com o crescimento da relação água/aglomerante para todas as misturas o que indica a maior porosidade das relações a/ag maiores. Por outro lado, há diminuição do volume total intrudido comparando as idades de 28 e 91 dias e conseqüente maior compacidade da matriz da pasta.

Os valores de volume de intrusão de mercúrio das misturas avaliadas são apresentados na forma de gráfico nas figuras 5.9 e 5.10 para as idades de 28 e 91 dias, respectivamente.

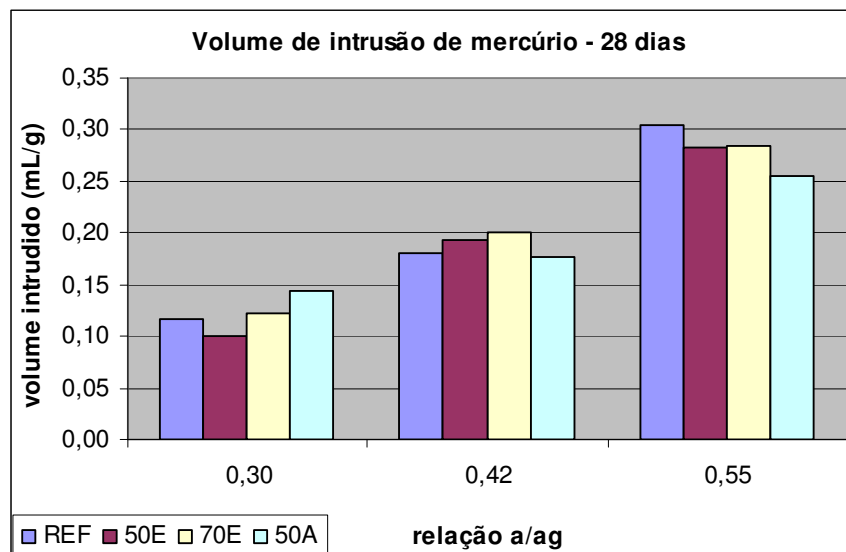


Figura 5.9. Volume de mercúrio intrudido para a idade de 28 dias.

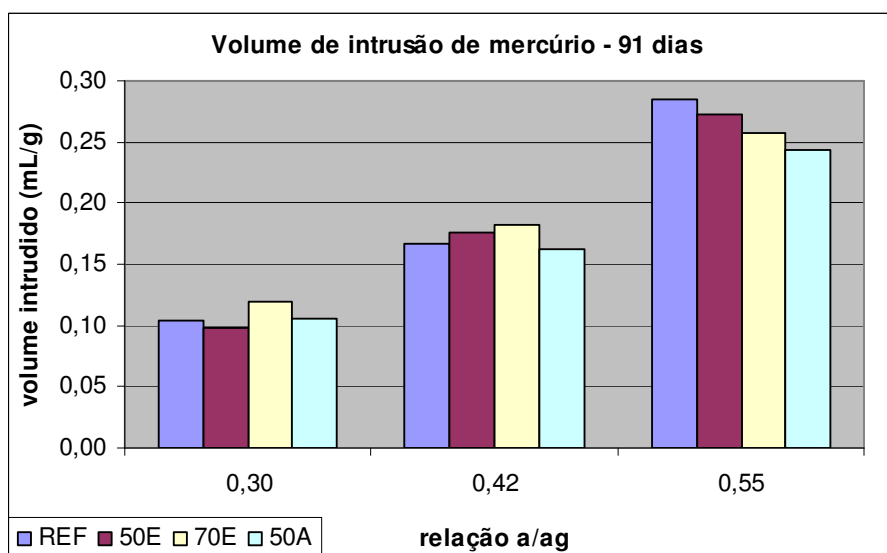


Figura 5.10. Volume de mercúrio intrudido para a idade de 91 dias.

Os valores de volume de mercúrio intrudido demonstram que a adição de escória ao concreto alterou a porosidade da pasta. Para a relação água/aglomerante de 0,30, tanto na idade de 28 dias quanto na de 91, o volume intrudido das misturas com 70% de escória (70E) e 50% de escória ativada (50A) foram maiores que a da mistura de referência (REF), já a mistura com 50% de escória não ativada (50E) apresentou volume intrudido menor. Para a relação a/ag 0,42, em ambas as idades, as misturas 50E e 70E apresentaram maior volume de intrusão que a mistura REF, já a mistura 50A apresentou o menor volume de intrusão. Na relação a/ag 0,55 e idade de 28 dias, a mistura de maior volume intrudido foi a REF seguida

das misturas 70E, 50E e, por fim, a mistura 50A. Na idade de 91 dias o comportamento foi semelhante apenas a mistura 50E apresentando maior volume de intrusão que a mistura 70E.

Analisando conjuntamente os valores de volume de intrusão de mercúrio e o diâmetro crítico percebe-se que misturas com valores semelhantes de diâmetro crítico apresentam volumes de intrusão bastante diferentes.

Hoppe (2005) destaca que a adição de escória tende a refinar a estrutura de poros, aumentando o teor de poros menores que 50nm com relação à mistura contendo apenas cimento, mesmo que o volume total de mercúrio intrudido seja maior. Os resultados aqui apresentados confirmam esta tendência. Apenas a mistura 50E na idade de 28 dias apresenta teor de poros menores que 50nm menor que a mistura REF, para a idade de 91 dias este teor já é maior para a mistura 50E. O teor de poros menores que 50 nm aos 91 dias é apresentado na figura 5.11.

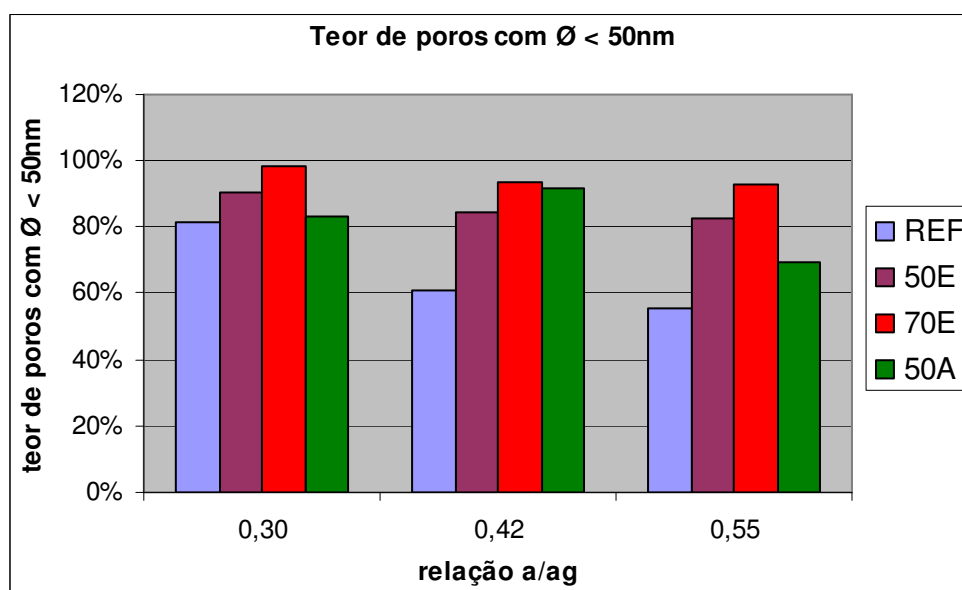


Figura 5.11. Teor de poros menores que 50 nm.

A fim de comparar a porosidade dos concretos de cimento Portland branco e cimento Portland cinza são apresentados na figura 5.12 os valores de volume de intrusão de mercúrio obtidos por Rosa (2005) e os medidos nesta pesquisa, ambos para a idade de 28 dias.

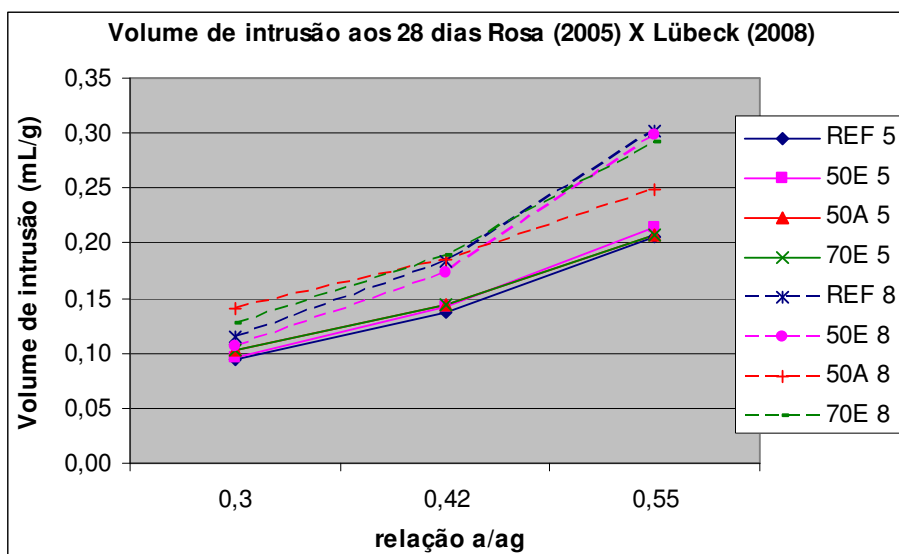


Figura 5.12. Volumes de intrusão de mercúrio obtidos por Rosa (2005) e nesta pesquisa.

A figura 5.12 demonstra o maior volume de intrusão de mercúrio para as misturas com cimento Portland branco para todos os teores de substituição e relações a/ag testados.

5.5 Integração dos resultados

5.5.1 Resistividade elétrica aparente versus resistência à compressão

A figura 5.13 confronta os valores de resistividade elétrica aparente e resistência à compressão aos 91 dias de idade para as misturas investigadas.

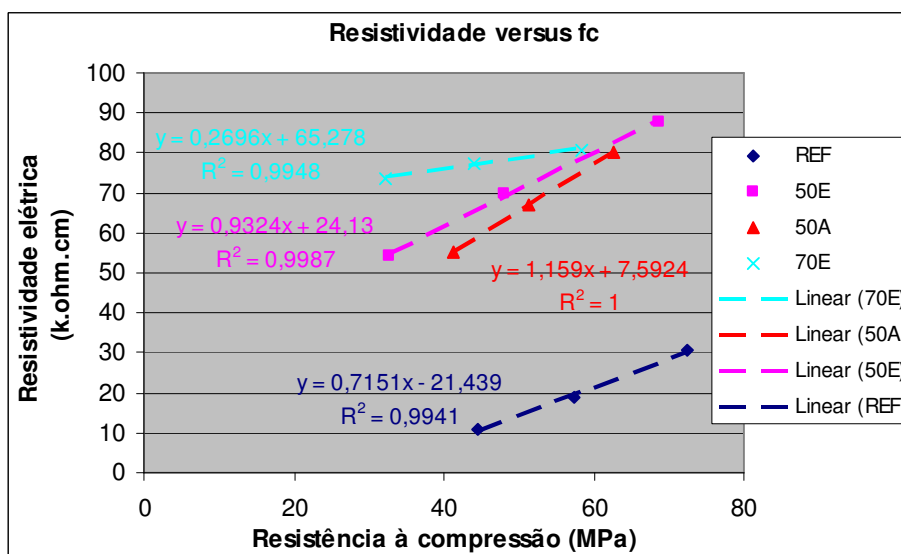


Figura 5.13. Resistividade elétrica versus resistência à compressão aos 91 dias.

A figura mostra a relação direta, aproximadamente linear, entre a resistividade elétrica e a resistência à compressão, crescendo a resistividade há crescimento também da resistência. A explicação para este comportamento está na dependência de ambas as grandezas à relação água/aglomerante e estrutura de poros do concreto. Quanto menor a relação a/ag, mais compacta será a estrutura da pasta resultando em maiores resistividades e resistências à compressão.

Tomando um valor de resistência como referência na figura 5.13 percebe-se que as resistividades obtidas serão diferentes para cada mistura ficando claro que a durabilidade de uma estrutura de concreto não pode ser avaliada simplesmente em função da resistência à compressão.

5.5.2 Resistividade versus condutividade elétrica específica da solução dos poros

A relação entre a resistividade elétrica aparente e a condutividade elétrica específica da solução dos poros é apresentada na figura 5.14.

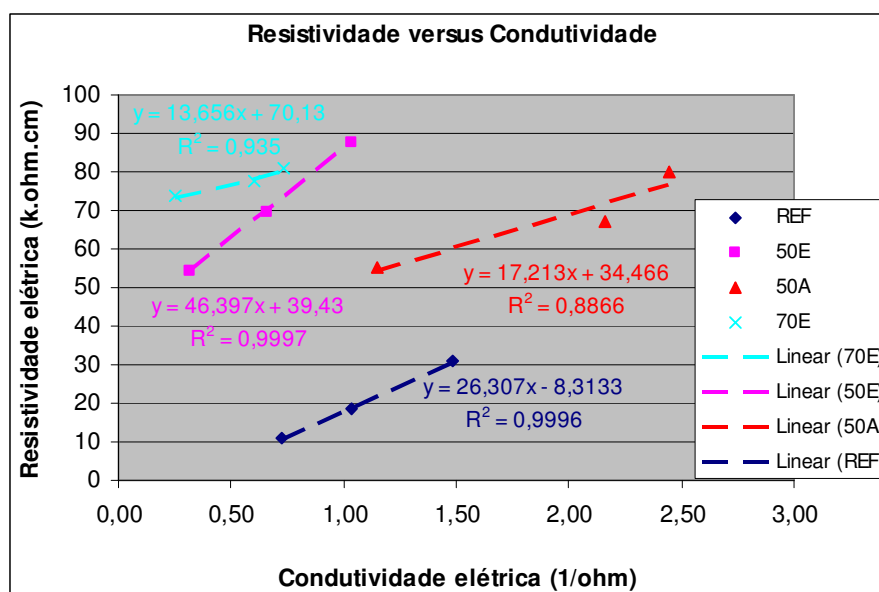


Figura 5.14. Resistividade elétrica versus condutividade específica aos 91 dias.

A figura 5.14 demonstra a relação linear entre a resistividade e a condutividade, com o crescimento de uma sendo acompanhado do também crescimento da outra. Tal comportamento aparentemente contraditório já foi observado por Hoppe (2005) e Rosa (2005). A explicação para este comportamento está no fato da condutividade aumentar com a diminuição da relação água/aglomerante em função da maior concentração iônica, contudo a resistividade cresce com a diminuição da relação a/ag, em função da menor porosidade da

pasta, e o efeito desta se sobrepõe ao da outra. Este efeito é mais acentuado para as misturas com adição de escória, como pode ser observado também na figura 5.14.

5.5.3 Resistividade versus volume de intrusão de mercúrio e diâmetro crítico

Com o intuito de avaliar a relação entre a resistividade e a porosidade da pasta são apresentados os gráficos das figuras 5.15 e 5.16 onde a resistividade é confrontada com o volume intrudido de mercúrio e diâmetro crítico ambos para a idade de 91 dias.

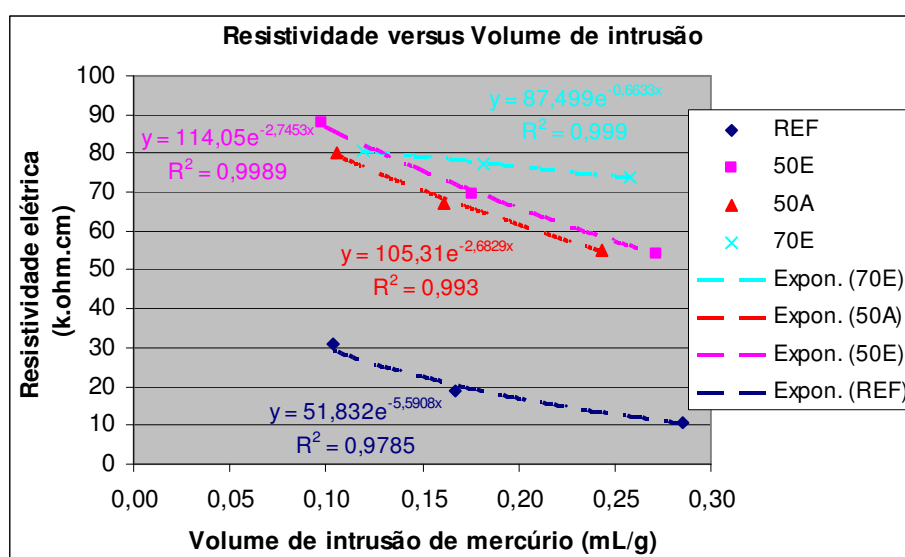


Figura 5.15. Relação entre a resistividade e o volume total de mercúrio intrudido.

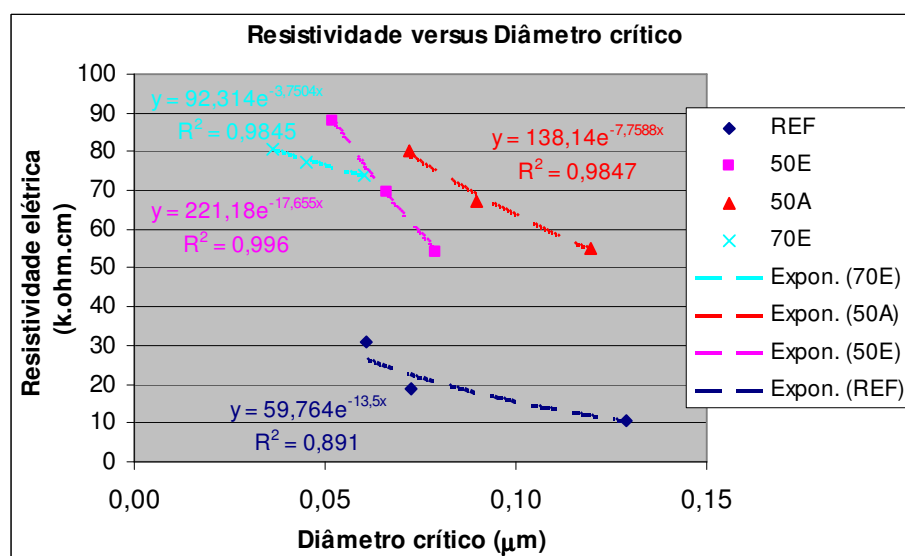


Figura 5.16. Relação entre a resistividade e o diâmetro crítico.

A observação da figura 5.15 demonstra a dependência da resistividade elétrica ao volume total de mercúrio intrudido. O aumento do volume de intrusão resulta na diminuição da resistividade. A relação pode ser aproximada à equação exponencial com coeficiente de determinação mínimo (R^2) igual a 0,98 para a mistura de referência.

Com relação ao diâmetro crítico também foi uma correlação com a resistividade elétrica, o aumento do diâmetro resulta em uma diminuição da resistividade. As curvas da figura 5.16 apresentam uma possível aproximação exponencial sendo o menor coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,89 para a mistura de referência.

As figuras 5.15 e 5.16 demonstram a direta dependência da resistividade à porosidade da matriz da pasta. Observa-se que matrizes mais abertas resultam em concretos menos resistivos.

5.5.4 Avaliação da resistividade estabelecendo níveis de resistência à compressão

Como foi destacado anteriormente, fixar um valor de resistência à compressão no projeto de estruturas de concreto pode não ser suficiente para alcançar os patamares de durabilidade exigidos. Contudo, o emprego de adições minerais como a escória de alto forno permite a obtenção de maior vida útil para as estruturas de concreto armado ou protendido em função da elevada resistividade elétrica alcançada mesmo que com níveis de resistência à compressão mais baixos. Com o intuito de aprofundar esta análise são estabelecidos dois níveis de resistência à compressão aos 28 dias, 35 e 55 MPa, e um aos 91 dias, 60 MPa, e são avaliadas a relação água/aglomerante necessária para a obtenção de tais níveis e a resistividade elétrica correspondente para todas as misturas testadas.

Os coeficientes das equações exponenciais (equações de Abrams) obtidos para resistência à compressão (tabela 5.2) e resistividade elétrica aparente (tabela 5.7) para as idades avaliadas são repetidos nas tabelas 5.16 e 5.17.

Tabela 5.16. Coeficientes das equações exponenciais obtidos para a idade de 28 dias.

Traço	Coeficientes	Resistência à compressão	Resistividade elétrica
REF	A	129,15	67633,7
	B	9,11	42,48
	R ²	0,94	0,81
50E	A	133,69	89406,1
	B	18,10	4,42
	R ²	0,99	0,88
50A	A	107,52	103085,5
	B	6,51	4,68
	R ²	0,99	0,92
70E	A	132,90	91264,1
	B	18,61	2,36
	R ²	0,97	1,00

Tabela 5.17. Coeficientes das equações exponenciais obtidos para a idade de 91 dias.

Traço	Coeficientes	Resistência à compressão	Resistividade elétrica
REF	A	129,94	107324,3
	B	7,02	64,52
	R ²	1,00	0,84
50E	A	166,04	156044,8
	B	19,07	6,81
	R ²	1,00	0,99
50A	A	103,70	125275,8
	B	5,37	4,43
	R ²	0,97	0,89
70E	A	119,19	90305,7
	B	10,77	1,44
	R ²	0,94	0,96

Na tabela 5.18 são dadas as relações água/aglomerante obtidas para os valores de resistência à compressão de 35 e 55 MPa aos 28 dias e 60 MPa aos 91 dias. Na mesma tabela são apresentados os valores de resistividade elétrica correspondentes e o risco de corrosão das armaduras segundo os critérios do CEB 192 apresentados na tabela 5.10.

Tabela 5.18. Relações água/aglomerante e resistividades elétricas obtidas.

Traço	fc = 35 MPa			fc = 55 MPa			fc = 60 MPa		
	a/ag	ρ (Ω .cm)	Risco	a/ag	ρ (Ω .cm)	Risco	a/ag	ρ (Ω .cm)	Risco
REF	0,59	7383	Alto	0,39	15894	Baixo	0,40	20572	Desprezível
50E	0,46	44940	Desprezível	0,31	56674	Desprezível	0,35	80457	Desprezível
50A	0,60	40883	Desprezível	0,36	59333	Desprezível	0,33	77148	Desprezível
70E	0,46	61671	Desprezível	0,30	70428	Desprezível	0,29	81231	Desprezível

A análise das resistividades elétricas obtidas permite identificar que para o nível de resistência à compressão de 35 MPa as misturas REF e 50A atenderiam o limite de 0,60 para a relação água/aglomerante em ambiente urbano (agressividade moderada, CAA II) estabelecidos nas NBR 6118 (2003) e NBR 12655 (2006). Já as misturas 50E e 70E atenderiam o limite de 0,50 para atmosferas marinhas ou industriais (agressividade forte, CAA III). Para os níveis de resistência de 55 MPa e 60 MPa todas as misturas atenderiam o limite para atmosfera industrial e respingos de maré (agressividade muito forte, CAA IV), com relação água/aglomerante máxima igual a 0,45.

Os critérios do CEB 192 indicam que as misturas contendo escória de alto forno resultariam em função de sua resistividade elétrica, risco de corrosão das armaduras desprezível para todos os níveis de resistência. A mistura contendo apenas cimento para os níveis de 35 MPa, 55 MPa e 60 MPa apresenta risco de corrosão alto, baixo e desprezível, respectivamente.

A avaliação a partir do estabelecimento de patamares de resistência resulta em valores de resistividade elétrica bastante variados, para os 35 MPa aos 28 dias as resistividades variaram de 7383 ohm.cm para a mistura REF a 61671 ohm.cm para a mistura 70E, ou seja, o traço com 70% de escória apresentou resistividade 8,35 vezes maior que o traço contendo apenas cimento. Para 55 MPa aos 28 dias, os valores variaram de 15894 ohm.cm a 70428 ohm.cm, também para as misturas REF e 70E. Aos 91 dias e patamar de 60 MPa, a mistura de referência apresentou resistividade de 20572 ohm.cm e a mistura 70E, 81231 ohm.cm. Entre as misturas contendo 50% de escória, 50E e 50A, percebe-se resistividades semelhantes para todos os níveis de resistência, contudo, as relações água/aglomerante necessárias no nível de resistência de 35 MPa foram 0,46 para a mistura 50E e 0,60 para a mistura 50A, significativamente diferentes. Para os outros dois níveis de resistência os valores de a/ag das duas misturas foram mais próximos. Para 55 MPa os valores de a/ag foram 0,31 para a mistura 50E e 0,36 para a mistura 50A. Já para o nível de 60 MPa, estes valores foram 0,35 e 0,33.

5.6 Análise de custos

5.6.1 Análise em igualdade de relação água/aglomerante

As vantagens da adição de escória ao concreto em termos de resistividade elétrica ficaram evidentes ao longo deste trabalho. Com o intuito de avaliar a viabilidade econômica da produção de concretos de cimento Portland branco e escória de alto forno calculou-se os custos das misturas testadas na pesquisa com preços de mercado dos insumos. Os preços dos insumos são dados na tabela 5.19. Na mesma tabela é apresentado o valor do cimento CPV ARI usado por Rosa (2005) com o custo atualizado, também avaliado a título de comparação.

Tabela 5.19. Preço dos insumos usados na pesquisa.

Insumo	Preço (R\$/kg)
CPB	R\$ 0,63 /kg
Escória	R\$ 0,20 /kg
Areia	R\$ 0,02 /kg
Brita	R\$ 0,03 /kg
Ativador	R\$ 2,50 /kg
Aditivo	R\$ 13,62 /kg
CPV ARI	R\$ 0,37 /kg

As quantidades de materiais necessárias para a produção de um metro cúbico de concreto para as misturas pesquisadas são dadas na tabela 5.20, bem como o custo em Reais para a produção do metro cúbico. O custo da água foi desconsiderado devido a pouca influência sobre o valor final do concreto. A figura 5.17 apresenta graficamente os custos das misturas. A mistura denominada CPV é a mistura de referência empregada por Rosa (2005).

Tabela 5.20. Quantidades de materiais para execução das misturas e custo por metro cúbico.

Mistura	a/ag	Cimento	Escória	Areia	Brita	Água	Ativador	Aditivo	Custo (R\$/m ³)
REF	0,30	517	0	639	1066	155	0,00	1,70	R\$ 393,98
	0,42	415	0	708	1037	174	0,00	0,33	R\$ 311,63
	0,55	309	0	815	1037	170	0,00	0,00	R\$ 241,86
50E	0,30	259	259	625	1070	156	0,00	1,45	R\$ 280,02
	0,42	208	208	697	1040	175	0,00	0,27	R\$ 221,84
	0,55	153	153	813	1042	168	0,00	0,00	R\$ 174,36
70E	0,30	156	363	619	1072	156	0,00	1,45	R\$ 235,63
	0,42	125	292	693	1041	175	0,00	0,31	R\$ 186,64
	0,55	92	214	810	1042	168	0,00	0,00	R\$ 148,12
50A	0,30	259	259	625	1070	156	20,74	5,24	R\$ 384,56
	0,42	208	208	697	1040	175	16,67	0,13	R\$ 261,53
	0,55	153	153	813	1042	168	12,23	0,00	R\$ 204,92
CPV	0,35	486	0	652	1051	170	0,00	1,21	R\$ 241,30
	0,50	353	0	766	1035	176,5	0,00	0,00	R\$ 176,98
	0,65	279	0	830	1022	181	0,00	0,00	R\$ 150,49

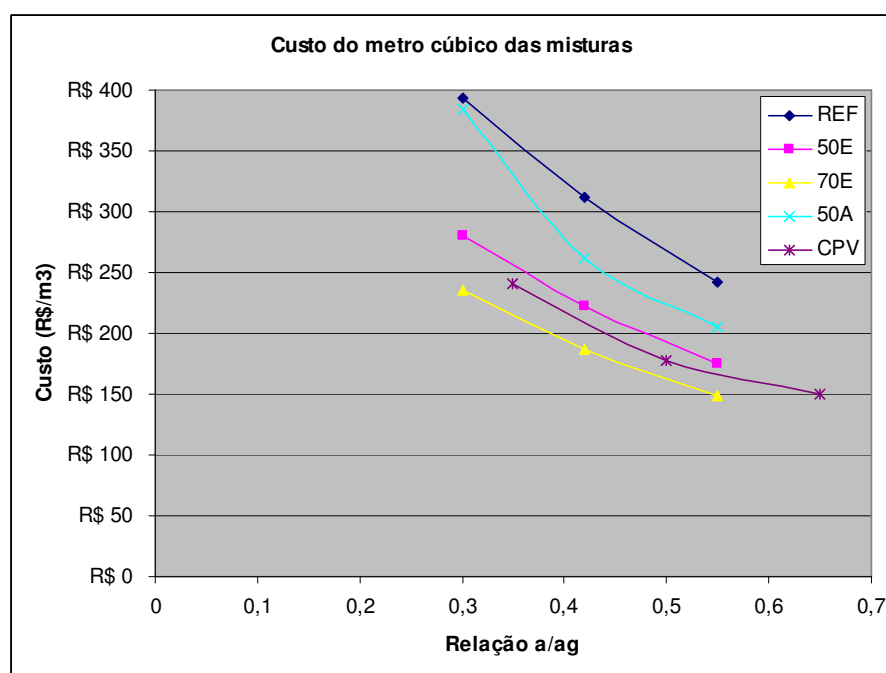


Figura 5.17. Custo das misturas avaliadas.

Para a avaliação comparativa das misturas necessita-se obter a relação valor/resistência que permite avaliar o custo do MPa de resistência à compressão. Na tabela 5.21 são mostrados a resistência de cada mistura e o custo do metro cúbico da mesma com a variação da relação água/aglomerante de 0,30 a 0,60. Tal variação nos permite estabelecer a relação R\$/MPa para o intervalo de validade da relação a/ag estudado nesta pesquisa. Na mesma tabela são calculados os valores de R\$/MPa médios para os 28 e 91 dias.

Tabela 5.21. R\$/MPa para as misturas testadas.

Mistura	a/ag	fc 28 (MPa)	fc 91 (MPa)	Custo (R\$/m ³)	R\$/MPa 28 dias	R\$/MPa 91 dias	R\$/MPa média 28 dias	R\$/MPa média 91 dias
REF	0,30	66,55	72,41	R\$ 393,94	5,92	5,441	6,15	5,44
	0,35	59,59	65,68	R\$ 357,31	6,00	5,440		
	0,40	53,36	59,58	R\$ 324,09	6,07	5,439		
	0,45	47,78	54,05	R\$ 293,96	6,15	5,439		
	0,50	42,78	49,03	R\$ 266,63	6,23	5,438		
	0,55	38,30	44,48	R\$ 241,84	6,31	5,437		
	0,60	34,30	40,35	R\$ 219,35	6,40	5,436		
50E	0,30	56,08	68,56	R\$ 279,48	4,98	4,08	5,82	4,80
	0,35	48,52	59,16	R\$ 254,23	5,24	4,30		
	0,40	41,98	51,06	R\$ 231,25	5,51	4,53		
	0,45	36,32	44,06	R\$ 210,35	5,79	4,77		
	0,50	31,42	38,02	R\$ 191,34	6,09	5,03		
	0,55	27,19	32,81	R\$ 174,05	6,40	5,31		
	0,60	23,52	28,31	R\$ 158,32	6,73	5,59		
50A	0,30	61,30	62,64	R\$ 373,61	6,10	5,96	5,55	5,29
	0,35	55,82	57,59	R\$ 329,56	5,90	5,72		
	0,40	50,82	52,95	R\$ 290,71	5,72	5,49		
	0,45	46,28	48,68	R\$ 256,43	5,54	5,27		
	0,50	42,14	44,76	R\$ 226,20	5,37	5,05		
	0,55	38,37	41,15	R\$ 199,53	5,20	4,85		
	0,60	34,94	37,84	R\$ 176,00	5,04	4,65		
70E	0,30	55,28	58,41	R\$ 234,79	4,25	4,02	5,01	4,35
	0,35	47,77	51,87	R\$ 213,98	4,48	4,13		
	0,40	41,27	46,06	R\$ 195,02	4,73	4,23		
	0,45	35,66	40,89	R\$ 177,74	4,98	4,35		
	0,50	30,81	36,31	R\$ 161,99	5,26	4,46		
	0,55	26,62	32,24	R\$ 147,63	5,55	4,58		
	0,60	23,00	28,63	R\$ 134,55	5,85	4,70		
CPV	0,30	58,93	71,94	R\$ 254,70	4,32	3,54	4,47	3,73
	0,35	53,86	65,35	R\$ 235,43	4,37	3,60		
	0,40	49,22	59,36	R\$ 217,61	4,42	3,67		
	0,45	44,98	53,92	R\$ 201,14	4,47	3,73		
	0,50	41,11	48,97	R\$ 185,92	4,52	3,80		
	0,55	37,57	44,48	R\$ 171,85	4,57	3,86		
	0,60	34,34	40,41	R\$ 158,85	4,63	3,93		

As figuras 5.18 e 5.19 apresentam graficamente a relação R\$/m³ para a faixa de resistências à compressão obtidas para cada mistura.

A observação dos valores dados na tabela 5.21 demonstra o menor custo por MPa das misturas contendo escória de alto forno com relação a mistura com 100% de CPB. A menor relação R\$/MPa foi apresentada pela mistura contendo 70% de escória, com média de R\$5,01/MPa aos 28 dias e R\$4,35/MPa aos 91 dias. A maior relação foi da mistura de referência de CPB com média de R\$6,15/MPa aos 28 dias e R\$5,44/MPa aos 91 dias. A

mistura de CPV apresentou custo inferior a todas as misturas de CPB para ambas as idades. Aos 28 dias o custo unitário médio ficou R\$4,47/MPa e aos 91 dias R\$3,73/MPa.

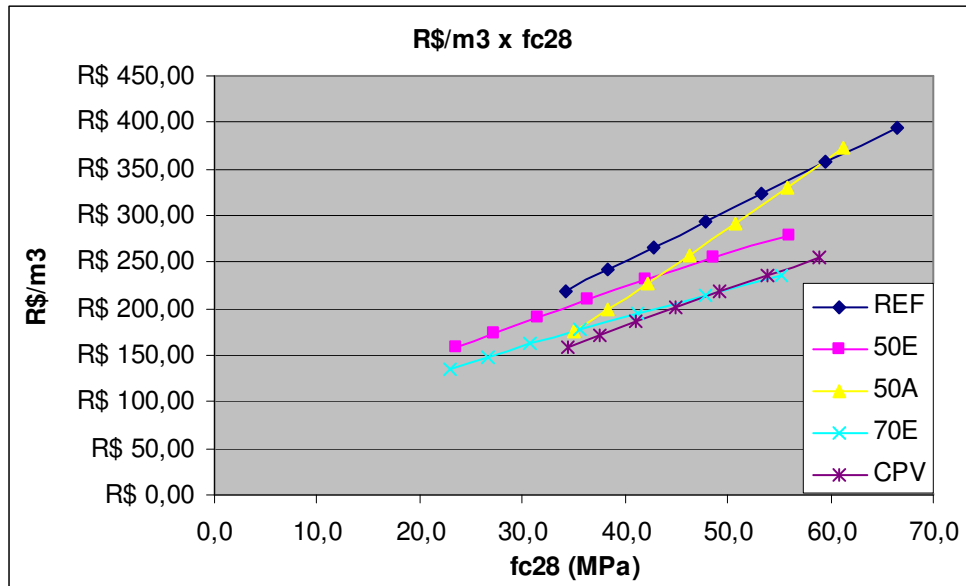


Figura 5.18. R\$/m³ versus resistência à compressão aos 28 dias.

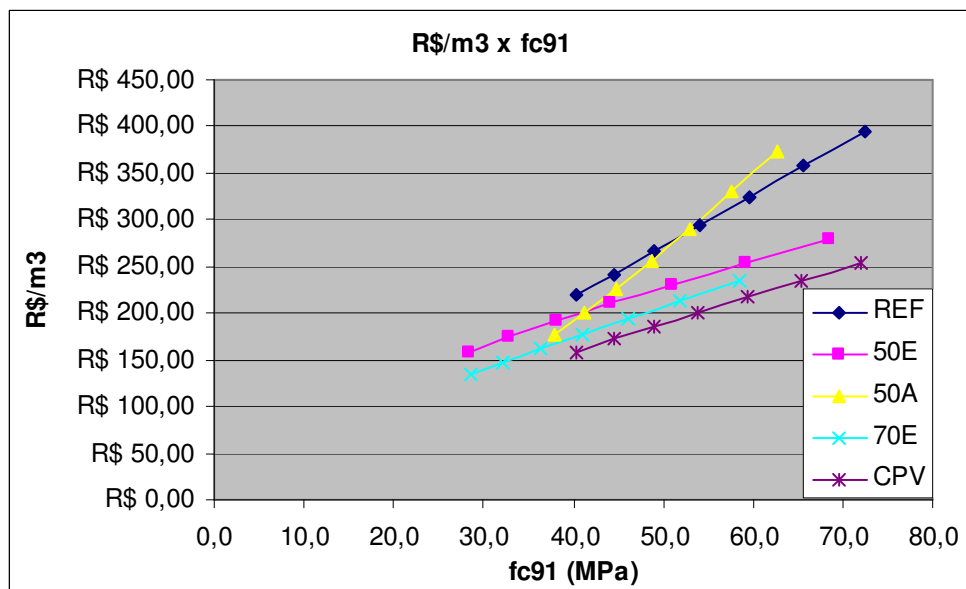


Figura 5.19. R\$/m³ versus resistência à compressão aos 91 dias.

Analisando as misturas de CPB percebe-se que aos 28 dias o maior custo é da mistura de referência para todos os níveis de resistência e o menor custo da mistura 70E. Entre 35 MPa e 44 MPa a mistura 50A apresenta custo menor que a mistura 50E, entre 44 MPa e 58

MPa fica entre as misturas 50E e REF e de 58 MPa a 62 MPa, é a de maior custo. Aos 91 dias, o menor custo é apresentado mais uma vez pela mistura 70E, seguida da mistura 50E e da mistura REF. A mistura 50A tem custo menor que a mistura 50E no intervalo 38 a 42 MPa, entre 42 e 53 MPa fica entre as misturas 50E e REF e entre 53 e 63 MPa o custo da mistura 50A é maior que a mistura REF. A mistura de CPV foi de menor custo que as misturas de CPB até a resistência de 50 MPa aos 28 dias. A partir dos 50 MPa a mistura 70E é a de menor custo. Aos 91 dias, a mistura de CPV apresenta menor custo para todos os níveis de resistência.

A tabela 5.22 apresenta os valores de resistividade elétrica obtidos para o intervalo de relação água/aglomerante de 0,30 a 0,60, novamente os custos das misturas para estas relações a/ag e os valores unitários de R\$/kohm.cm.

Tabela 5.22. R\$/kohm.cm para as misturas testadas.

Mistura	a/ag	ρ 28 (kohm.cm)	ρ 91 (kohm.cm)	Custo (R\$/m ³)	R\$/kohm.cm 28 dias	R\$/kohm.cm 91 dias	Média 28 dias	Média 91 dias
REF	0,30	21,96	30,75	R\$ 393,94	17,94	12,81	23,87	18,30
	0,35	18,21	24,96	R\$ 357,31	19,62	14,31		
	0,40	15,10	20,27	R\$ 324,09	21,47	15,99		
	0,45	12,52	16,46	R\$ 293,96	23,48	17,86		
	0,50	10,38	13,36	R\$ 266,63	25,69	19,95		
	0,55	8,60	10,85	R\$ 241,84	28,11	22,29		
	0,60	7,13	8,81	R\$ 219,35	30,75	24,90		
50E	0,30	57,24	87,75	R\$ 279,48	4,88	3,18	4,60	3,20
	0,35	53,14	79,73	R\$ 254,23	4,78	3,19		
	0,40	49,34	72,43	R\$ 231,25	4,69	3,19		
	0,45	45,80	65,81	R\$ 210,35	4,59	3,20		
	0,50	42,52	59,79	R\$ 191,34	4,50	3,20		
	0,55	39,48	54,32	R\$ 174,05	4,41	3,20		
	0,60	36,65	49,35	R\$ 158,32	4,32	3,21		
50A	0,30	64,88	80,15	R\$ 373,61	5,76	4,66	5,01	4,02
	0,35	60,06	74,40	R\$ 329,56	5,49	4,43		
	0,40	55,60	69,06	R\$ 290,71	5,23	4,21		
	0,45	51,47	64,11	R\$ 256,43	4,98	4,00		
	0,50	47,64	59,51	R\$ 226,20	4,75	3,80		
	0,55	44,10	55,24	R\$ 199,53	4,52	3,61		
	0,60	40,83	51,28	R\$ 176,00	4,31	3,43		
70E	0,30	70,53	80,90	R\$ 234,79	3,33	2,90	2,88	2,35
	0,35	67,57	79,43	R\$ 213,98	3,17	2,69		
	0,40	64,73	77,98	R\$ 195,02	3,01	2,50		
	0,45	62,01	76,57	R\$ 177,74	2,87	2,32		
	0,50	59,40	75,17	R\$ 161,99	2,73	2,15		
	0,55	56,91	73,81	R\$ 147,63	2,59	2,00		
	0,60	54,51	72,47	R\$ 134,55	2,47	1,86		
CPV	0,30	31,98	48,72	R\$ 254,70	7,97	5,23	9,40	6,09
	0,35	28,02	42,86	R\$ 235,43	8,40	5,49		
	0,40	24,56	37,71	R\$ 217,61	8,86	5,77		
	0,45	21,52	33,18	R\$ 201,14	9,35	6,06		
	0,50	18,86	29,19	R\$ 185,92	9,86	6,37		
	0,55	16,53	25,68	R\$ 171,85	10,40	6,69		
	0,60	14,49	22,59	R\$ 158,85	10,97	7,03		

As figuras 5.20 e 5.21 relacionam o custo por metro cúbico das misturas com a resistividade elétrica aparente aos 28 e 91 dias.

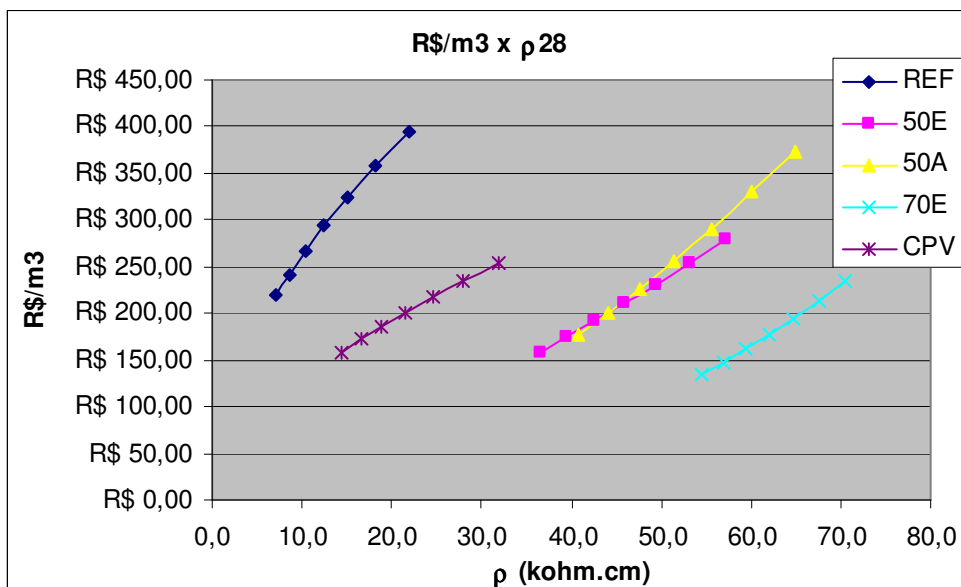


Figura 5.20. R\$/m³ versus resistividade aos 28 dias.

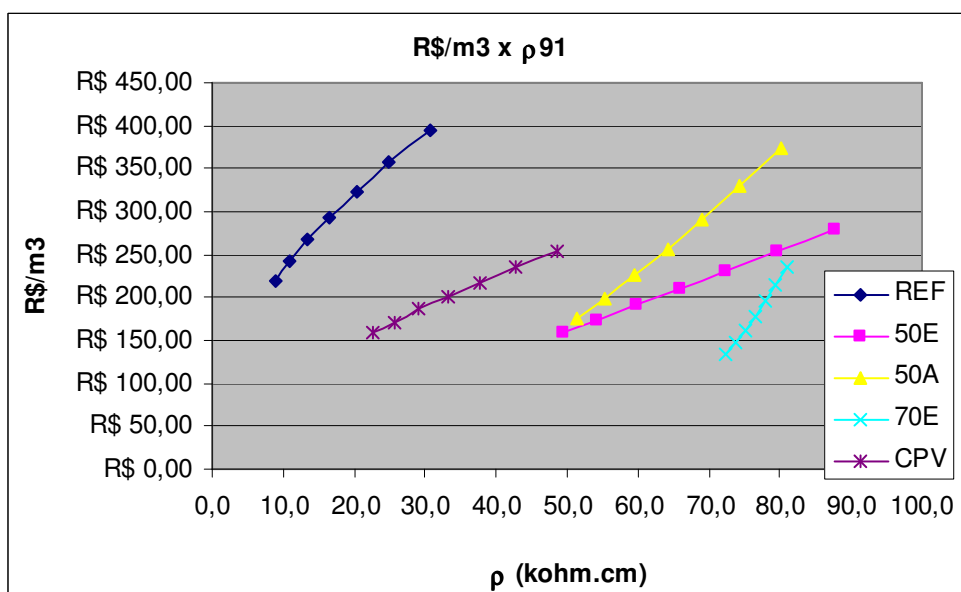


Figura 5.21. R\$/m³ versus resistividade aos 91 dias.

Os resultados apresentados na tabela 5.22 demonstram o pior desempenho da mistura REF quanto ao custo unitário da resistividade elétrica (R\$/kohm.cm). Fica claro na figura 5.19, idade de 28 dias, o menor custo unitário da mistura 70E, já as misturas 50E e 50A tem comportamento muito semelhante. Aos 91 dias percebe-se, ainda, o melhor desempenho da mistura 70E, seguida da mistura 50E, 50A e, por fim, a mistura REF que apresentou o maior custo por kohm.cm para as duas idades avaliadas. A mistura CPV apresentou um

comportamento intermediário, apresentando custo menor que a mistura REF e maior que as misturas contendo escória.

Avaliando as misturas contendo apenas cimento, REF e CPV, fica claro o menor custo da mistura de cimento cinza, aos 28 dias o valor do $k_{ohm.cm}$ fica 9,40 e aos 91 dias, 6,09. A mistura de CPB apresenta os valores de 23,87 e 18,30 para os 28 e 91 dias, respectivamente.

5.6.2 Análise em igualdade de resistência à compressão

A prática do projeto de estruturas de concreto estabelece que primordialmente seja fixado um valor de resistência à compressão (f_{ck}) para a estrutura e a partir daí ajustadas todas as demais propriedades do concreto. Sendo assim, a análise do custo/benefício de um traço depende do estabelecimento de valores de resistência e tecidos daí todos os comparativos. A análise sob esta ótica resulta na comparação de traços com diferentes valores de relação água/aglomerante e, assim sendo, com propriedades de durabilidade, como a resistividade elétrica, bastante diversas.

A tabela 5.23 apresenta os valores de relação água/aglomerante para obtenção de níveis de resistência variando de 30 a 60 MPa aos 28 dias. Para os valores de a/ag encontrados foram calculados, também, a resistividade elétrica e o custo por metro cúbico da mistura. A tabela 5.24 traça os mesmos comparativos, mas para resistências à compressão variando de 40 a 65 MPa, aos 91 dias.

Tabela 5.23. Análise de custos fixando o valor da resistência à compressão aos 28 dias.

Mistura	fc (MPa) 28 dias	a/ag	ρ (kohm.cm) 28 dias	R\$/m ³	R\$/MPa 28 dias	R\$/kohm.cm 28 dias
REF	30	0,66*	5,68	R\$ 194,90	R\$ 6,50	R\$ 34,29
	35	0,59	7,38	R\$ 223,32	R\$ 6,38	R\$ 30,25
	40	0,53	9,26	R\$ 251,27	R\$ 6,28	R\$ 27,14
	45	0,48	11,31	R\$ 278,82	R\$ 6,20	R\$ 24,66
	50	0,43	13,52	R\$ 306,01	R\$ 6,12	R\$ 22,63
	55	0,39	15,89	R\$ 332,88	R\$ 6,05	R\$ 20,94
	60	0,35	18,42	R\$ 359,47	R\$ 5,99	R\$ 19,51
50E	30	0,52	41,52	R\$ 185,62	R\$ 6,19	R\$ 4,47
	35	0,46	44,94	R\$ 205,32	R\$ 5,87	R\$ 4,57
	40	0,42	48,13	R\$ 224,06	R\$ 5,60	R\$ 4,66
	45	0,38	51,13	R\$ 242,01	R\$ 5,38	R\$ 4,73
	50	0,34	53,97	R\$ 259,27	R\$ 5,19	R\$ 4,80
	55	0,31	56,67	R\$ 275,95	R\$ 5,02	R\$ 4,87
	60	0,28	59,26	R\$ 292,12	R\$ 4,87	R\$ 4,93
50A	30	0,68*	36,01	R\$ 143,48	R\$ 4,78	R\$ 3,98
	35	0,60	40,88	R\$ 176,38	R\$ 5,04	R\$ 4,31
	40	0,53	45,64	R\$ 210,93	R\$ 5,27	R\$ 4,62
	45	0,46	50,29	R\$ 246,97	R\$ 5,49	R\$ 4,91
	50	0,41	54,85	R\$ 284,41	R\$ 5,69	R\$ 5,19
	55	0,36	59,33	R\$ 323,13	R\$ 5,88	R\$ 5,45
	60	0,31	63,74	R\$ 363,07	R\$ 6,05	R\$ 5,70
70E	30	0,51	58,94	R\$ 159,28	R\$ 5,31	R\$ 2,70
	35	0,46	61,67	R\$ 175,66	R\$ 5,02	R\$ 2,85
	40	0,41	64,14	R\$ 191,19	R\$ 4,78	R\$ 2,98
	45	0,37	66,40	R\$ 206,03	R\$ 4,58	R\$ 3,10
	50	0,33	68,48	R\$ 220,29	R\$ 4,41	R\$ 3,22
	55	0,30	70,43	R\$ 234,02	R\$ 4,25	R\$ 3,32
	60	0,27	72,25	R\$ 247,31	R\$ 4,12	R\$ 3,42
CPV	30	0,68*	11,88	R\$ 141,16	R\$ 4,71	R\$ 11,88
	35	0,59	14,90	R\$ 161,52	R\$ 4,61	R\$ 10,84
	40	0,52	18,12	R\$ 181,52	R\$ 4,54	R\$ 10,02
	45	0,45	21,53	R\$ 201,21	R\$ 4,47	R\$ 9,34
	50	0,39	25,13	R\$ 220,62	R\$ 4,41	R\$ 8,78
	55	0,34	28,90	R\$ 239,79	R\$ 4,36	R\$ 8,30
	60	0,29	32,83	R\$ 258,74	R\$ 4,31	R\$ 7,88

OBS.: Os valores marcados com * estão fora do intervalo de confiança da relação a/ag.

Tabela 5.24. Análise de custos fixando o valor da resistência à compressão aos 91 dias.

Mistura	fc (MPa) 91 dias	a/ag	ρ (kohm.cm) 91 dias	R\$/m ³	R\$/MPa 91 dias	R\$/kohm.cm 91 dias
REF	40	0,60	8,65	R\$ 217,45	R\$ 5,436	R\$ 25,15
	50	0,49	13,93	R\$ 271,90	R\$ 5,438	R\$ 19,52
	60	0,40	20,57	R\$ 326,36	R\$ 5,439	R\$ 15,86
	65	0,36	24,41	R\$ 353,59	R\$ 5,440	R\$ 14,48
50E	40	0,48	61,80	R\$ 197,69	R\$ 4,94	R\$ 3,199
	50	0,41	71,46	R\$ 228,17	R\$ 4,56	R\$ 3,193
	60	0,35	80,46	R\$ 256,52	R\$ 4,28	R\$ 3,188
	65	0,32	84,76	R\$ 270,06	R\$ 4,15	R\$ 3,186
50A	40	0,57	53,86	R\$ 191,23	R\$ 4,78	R\$ 3,55
	50	0,43	65,64	R\$ 266,85	R\$ 5,34	R\$ 4,07
	60	0,33	77,15	R\$ 350,35	R\$ 5,84	R\$ 4,54
	65	0,28	82,82	R\$ 394,83	R\$ 6,07	R\$ 4,77
70E	40	0,46	76,30	R\$ 174,70	R\$ 4,37	R\$ 2,29
	50	0,37	78,98	R\$ 207,94	R\$ 4,16	R\$ 2,63
	60	0,29	81,23	R\$ 239,75	R\$ 4,00	R\$ 2,95
	65	0,26*	82,24	R\$ 255,21	R\$ 3,93	R\$ 3,10
CPV	40	0,61*	22,29	R\$ 157,54	R\$ 3,94	R\$ 7,07
	50	0,49	30,01	R\$ 189,11	R\$ 3,78	R\$ 6,30
	60	0,39	38,25	R\$ 219,54	R\$ 3,66	R\$ 5,74
	65	0,35	42,56	R\$ 234,40	R\$ 3,61	R\$ 5,51

OBS.: Os valores marcados com * estão fora do intervalo de confiança da relação a/ag.

A comparação de desempenho das misturas com CPB mostra que a mistura com 70% de escória é a mais econômica aos 28 dias na faixa de resistência entre 60 e 35 MPa, resultando em relações água/aglomerante iguais a 0,27 e 0,46, e custo por metro cúbico de R\$247,31 para a 60 MPa e R\$175,66 para 35 MPa. A resistividade elétrica para estes valores de resistência resulta 72,25 kohm.cm para a primeira e 61,67 kohm.cm para a segunda. Comparativamente a mistura referência apresentou para os mesmos valores de resistência à compressão, relações a/ag iguais a 0,35 e 0,59, com custo do metro cúbico de R\$359,47 para 60 MPa e R\$223,32 para 35 MPa. A resistividade elétrica para estes valores de resistência resultou 18,42 kohm.cm e 7,38 kohm.cm. A mistura com 50% de escória não ativada para os mesmos valores de resistência aos 28 dias resultou em relações água/aglomerante iguais a 0,28 e 0,46, respectivamente. O custo do metro cúbico para estes níveis de resistência resulta R\$292,12 e R\$205,32 e as resistividades elétricas 59,26 kohm.cm e 44,94 kohm.cm. Já a mistura ativada alcalinamente resulta em relações a/ag iguais a 0,31 e 0,60 para 60 e 35 MPa, respectivamente. Com valores do metro cúbico iguais a R\$363,07 e R\$176,38 e resistividades elétricas de 63,74 kohm.cm e 40,88 kohm.cm.

Aos 91 dias, a mistura 70E se mostra mais atrativa para os valores de resistência à compressão de 40 a 60 MPa. As relações água/aglomerante resultam 0,46 e 0,29 para estes valores de resistência. As resistividades elétricas resultam 76,30 kohm.cm e 81,23 kohm.cm. Finalmente, o custo resulta R\$174,70 para 40 MPa e R\$239,75 para 60 MPa. As demais misturas apresentam nesta faixa de valores resistência custos unitários do megapascal maiores e menores valores de resistividade elétrica. Sendo justificado seu emprego apenas em situações onde se necessita valores de resistência à compressão mais elevados. Para o valor de 65 MPa aos 91 dias chega-se a valores de relação a/ag iguais a 0,36 para a mistura de referência, 0,32 para a mistura 50E, 0,28 para a mistura 50A e 0,26 para a mistura 70E. O valor de a/ag igual a 0,26 apresentado pela mistura 70E fica fora do intervalo de confiança de 10% da faixa de relações água/aglomerante testadas neste trabalho, sendo assim, a mistura será deixada de fora da comparação. O custo das misturas resulta R\$353,59 para a mistura REF, R\$270,06 para a mistura 50E e R\$394,83 para a 50A. E as resistividades, 24,42 kohm.cm para a REF, 84,76 kohm.cm para 50E e 82,82 kohm.cm para a mistura 50A. Nesta situação de valor de resistência à compressão elevado, 65 MPa tomado como exemplo, a mistura com 50% de escória não ativada resultou 24% mais barata e com resistividade elétrica 3,47 vezes maior que a mistura de referência.

Comparando o desempenho das misturas com escória e a mistura com cimento cinza observamos que para a idade de 28 dias, a mistura contendo CPB e 70% de escória resulta mais barata que a mistura CPV para valores de resistência à compressão entre 50 MPa e 60 MPa. As demais misturas contendo CPB resultam mais caras que a mistura CPV. Aos 91 dias, a mistura com CPV foi a de menor custo para todos os valores de resistência à compressão avaliados. Por outro lado, todas as misturas contendo escória apresentaram valores de resistividade elétrica maiores que a mistura CPV para todos os valores de resistência à compressão e idades avaliados.

A comparação de custos entre as misturas contendo o cimento Portland branco e o cimento Portland cinza levando em consideração apenas o custo por metro cúbico do traço é incompleta por não levar em consideração outros custos que acabam por encarecer estruturas executadas com CPB. Silva Filho et al. (2004) apontou alguns itens que mereceram cuidado na execução da estrutura do Museu Iberê Camargo, em Porto Alegre, Rio Grande do Sul. Entre estes itens pode-se citar a necessidade de emprego de aditivo retardador de pega em dias quentes, formas em compensado de alta qualidade e desmoldantes a base de cera, livres de óleo, agregado miúdo de origem calcária e a galvanização das armaduras para evitar manchas no concreto. Todos esses cuidados resultam em uma estrutura consideravelmente mais cara

que uma equivalente em concreto de cimento cinza, contudo, entende-se que a opção pelo cimento branco resulta de uma escolha arquitetônica onde os custos mais elevados são aceitos em função da valorização da estrutura como elemento do partido arquitetônico.

CONCLUSÕES

O objetivo desta pesquisa foi avaliar a influência da substituição do cimento Portland branco por elevados teores de escória sobre propriedades cruciais à durabilidade do concreto, especialmente a resistividade elétrica aparente.

Os resultados de resistência à compressão indicaram que a substituição de parte do cimento por escória de alto forno tende a diminuir a resistência do concreto, diminuição esta que será mais acentuada quanto maior for o teor de substituição empregado. Por outro lado, a ativação química alcalina mostrou-se eficiente na aceleração do ganho de resistência do concreto com escória. A mistura contendo 50% de escória ativada quimicamente (50A) apresentou aos 3 dias 83%, em média, da resistência da mistura de referência (REF), aos 28 dias este valor foi de 96% e aos 91 dias de 89%.

Conforme já esperado a resistência à compressão foi diretamente influenciada pela relação água/aglomerante seguindo uma lei exponencial, do tipo A/B^x , com coeficiente de determinação não menor que 0,94. Todas as misturas apresentaram crescimento da resistência com o aumento do grau de hidratação. Contudo, a mistura 50A apresentou crescimento pouco significativo entre as idades de 28 e 91 dias. A mistura já apresentava aos 28 dias 96%, em média, de sua resistência aos 91 dias.

A análise de custos fixando valores de resistência à compressão indicou o melhor desempenho das misturas contendo escória, sendo que o melhor resultado foi apresentado pela mistura de maior teor de substituição, 70% de escória, onde entre 30 e 55 MPa aos 28 dias resultou em menor custo. Para 30 MPa o valor da mistura 70E foi 18% menor que o da mistura de referência e para 55 MPa a economia foi de 30%. Aos 91 dias a mistura 70E foi a mais econômica ao longo de toda a faixa de relações água/aglomerante testada.

A resistividade elétrica, por sua vez, apresentou dependência direta ao teor de substituição de escória, mas ao contrário da resistência à compressão, cresceu com o aumento deste. A mistura 70E apresentou já aos 7 dias resistividade 2,56 maior que a da mistura de referência e aos 91 dias este valor chegou até a 6,80 vezes.

Semelhantemente à resistência à compressão, a resistividade foi diretamente dependente da relação água/aglomerante, seguindo com boa aproximação uma lei exponencial. O coeficiente de determinação mínimo (R^2) foi de 0,80. A resistividade também foi dependente da idade crescendo com o avanço da mesma.

O volume de intrusão de mercúrio cresceu com o incremento da relação água/aglomerante indicando a maior porosidade da pasta das misturas de maior relação a/ag. O crescimento da idade também resultou em menor quantidade de mercúrio intrudido. Os resultados apontam também a pouca influência do diâmetro crítico sobre o volume total de intrusão de mercúrio na pasta. Assim, as misturas que apresentaram valores de diâmetro crítico semelhantes resultaram em volumes de intrusão de mercúrio significativamente diferentes. A adição de escória não resultou na direta diminuição do volume total de intrusão de mercúrio, contudo, foi perceptível o aumento da quantidade de poros menores que 50nm apontando o refinamento da estrutura de poros como já descrito na bibliografia consultada.

A condutividade específica da solução dos poros diminuiu com a idade e aumentou com a diminuição da relação a/ag. O crescimento da condutividade com a diminuição da relação água/aglomerante deveu-se a maior concentração iônica resultante. A adição de escória, por sua vez, resultou na diminuição da condutividade. Diminuição maior quanto maior o teor de escória. Já o emprego do ativador alcalino acarretou em significativo acréscimo de condutividade. Possivelmente em função do aumento da concentração dos íons OH^- na solução dos poros conforme descrito por Schneider (2005) e estes serem os de maior condutividade específica.

A integração dos resultados demonstrou o aumento da resistividade elétrica com o crescimento da resistência à compressão. A relação entre as grandezas foi bastante satisfatória, R^2 muito próximo da unidade. Tal relação pode ser explicada pela direta dependência das duas propriedades à relação água/aglomerante e compacidade da matriz de poros da pasta. A observação dos resultados apontou, também, que a resistência à compressão não é parâmetro suficiente para estimar a durabilidade de estruturas de concreto.

A comparação dos valores de resistividade elétrica e volume total de intrusão de mercúrio comprovam a afirmação anterior de que a resistividade elétrica é dependente da quantidade total de poros, comportamento também evidenciado por Hoppe (2005) e Rosa (2005). As análises individuais, para cada mistura investigada, apresentaram coeficientes de determinação elevados, sendo o valor mínimo de 0,97.

O confronto da resistividade elétrica e condutividade específica da solução dos poros resulta em comportamento inicialmente contraditório. Ambas as grandezas crescem com a diminuição da relação a/ag e sendo a resistividade o inverso da condutividade, era esperado a diminuição da primeira com o crescimento da segunda. Tal contradição explica-se na maior influência da porosidade sobre a resistividade sobrepondo-se ao efeito do crescimento da condutividade da solução.

O estabelecimento de patamares de resistência com o intuito de avaliar a resistividade elétrica das diferentes misturas apontou o melhor desempenho das misturas com escória. Fixou-se dois valores de resistência à compressão para os 28 dias de idade, 35 e 55 MPa, e um para os 91 dias, 60 MPa. Para o valor de 35 MPa todas as misturas contendo escória alcançam risco de corrosão desprezível segundo os critérios do CEB 192, já a mistura de referência apresenta risco alto. Como exemplo da magnitude de valores, a resistividade da mistura contendo 70% de escória foi 8,35 maior que a resistividade da mistura de referência. Para 55 MPa, o risco da mistura REF foi classificado como baixo e das demais misturas como desprezível, a resistividade da mistura 70E foi de 70,4 kohm.cm enquanto que a da mistura REF foi de 15,9 kohm.cm. Aos 91 dias, para 60 MPa, todas as misturas apresentaram risco desprezível, mas a resistividade da mistura 70E foi 3,95 vezes maior que a da mistura REF.

A análise de custos e avaliação da relação custo/benefício das misturas foi efetuada a partir dos valores unitários de R\$/MPa e R\$/kohm.cm. Tais índices apontaram a redução do custo de elaboração do concreto com o incremento do teor de escória. Aos 28 dias a mistura 70E apresentou valor de R\$/MPa de 5,01 enquanto que a mistura REF foi a mais cara, com 6,15. Aos 91 dias, a tendência se repetiu, a mistura 70E apresentou 4,35 R\$/MPa e a mistura REF, 5,44. Em termos de custo de resistividade elétrica, aos 28 dias, a mistura REF apresentou valor de R\$/kohm.cm de 23,87 enquanto que a mistura 70E apresentou 2,88. Já aos 91 dias, os valores foram 18,30 para a mistura REF e 2,35 para a 70E. A avaliação de custos a partir da fixação de patamares de resistência confirmou a mistura com maior teor de escória como a mais vantajosa economicamente.

A comparação do desempenho do cimento Portland branco e o cimento Portland cinza, CPV ARI, a partir dos resultados obtidos por Rosa (2005) apontou a maior resistência nas primeiras idades das misturas contendo o CPB. A resistividade elétrica da mistura contendo apenas CPB foi menor que a equivalente com CPV, para as demais misturas contendo escória não houve um comportamento característico capaz de apontar a dependência ao tipo de cimento empregado. A comparação do volume de intrusão de mercúrio apontou a maior porosidade das misturas com CPB.

Sugestão para trabalhos futuros

A presente pesquisa faz parte de um grupo de três estudos que pretende caracterizar o comportamento de concretos de cimento Portland branco com elevados teores de escória quanto a parâmetros de durabilidade. Neste trabalho estudou-se a resistividade elétrica

aparente especificamente. A dissertação de Siqueira (2008) avalia o desempenho quanto ao acesso dos íons cloreto e a dissertação de Barin (2008) estuda a carbonatação acelerada e a absorção de água. Fica como sugestão para trabalhos futuros a avaliação da retração hidráulica, apontada por Neville (1997) como maior em concretos com adição de escória, permeabilidade a oxigênio, relevante na cinética do processo corrosivo e, ainda, avaliação colorimétrica destes concretos quanto à brancura ou quanto à capacidade de servirem como base para a obtenção de concretos coloridos a partir da adição de pigmentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, A. G. **Efeito das Adições Mineraias na Resistividade Elétrica de Concretos Convencionais**. 1998. 129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1998.

AGUIAR, C. A. **Concreto de Cimento Portland Branco Estrutural: Análise da Adição de Pigmentos Quanto à Resistência à Compressão**. 2006. 88p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2006.

AÏTCIN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho**. 2000. 667p. São Paulo. Editora Pini. 2000.

ANDRADE, J. J. O.; NOBRE, T. R. S. Estudo da Penetração de Cloretos em Concretos Moldados com Cimento Portland Branco Através de Ensaio não Acelerado: Resultados Preliminares. In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC2005. 2005. Recife. **Anais eletrônicos...** Recife, PE. 1 CD-ROM.

ANDRADE, C. **Manual para Diagnóstico de Obras Deterioradas por Corrosão de Armaduras**. 1992. 104p. São Paulo. Editora Pini. 1992.

ANDRADE, C. Model for prediction of reinforcement concrete service life base don electrical resistivity. **Revista IBRACON de Materiais**. V.1, No.1, p.01-05, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**. Cimento Portland de Alta Resistência Inicial. ABNT. Rio de Janeiro. 5 p. 1991.

_____. **NBR 5735**. Cimento Portland de Alto Forno. ABNT. Rio de Janeiro. 5 p. 1991.

_____. **NBR 5736**. Cimento Portland de Pozolânico. ABNT. Rio de Janeiro. 5 p. 1991.

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

_____. **NBR 5739**. Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. ABNT. Rio de Janeiro. 9 p. 2007.

_____. **NBR 5743**. Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. ABNT. Rio de Janeiro. 4 p. 2004.

_____. **NBR 6118**. Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. ABNT. Rio de Janeiro. 221 p. 2003.

_____. **NBR 6474**. Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação de massa específica. ABNT. Rio de Janeiro. 5 p. 2001.

_____. **NBR 7117**. Medição da resistividade do solo pelo método dos quatro pontos (wenner). ABNT. Rio de Janeiro. 15 p. 1981.

____. **NBR 7215**. Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. ABNT. Rio de Janeiro. 8 p. 1996.

____. **NBR 7217**. Agregados - Determinação da composição granulométrica. ABNT. Rio de Janeiro. 6 p. 2003.

____. **NBR 7224**. Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). ABNT. Rio de Janeiro. 12 p. 1998.

____. **NBR 7251**. Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária. ABNT. Rio de Janeiro. 3 p. 1982.

____. **NBR 7809**. Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. ABNT. Rio de Janeiro. 3 p. 2006.

____. **NBR 9776**. Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. ABNT. Rio de Janeiro. 6 p. 2003.

____. **NBR 9937**. Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. ABNT. Rio de Janeiro. 8 p. 2003.

____. **NBR 11578**. Cimento Portland Composto. ABNT. Rio de Janeiro. 5 p. 1991.

____. **NBR 11579**. Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 micrômetros (número 200). ABNT. Rio de Janeiro. 3 p. 1991.

____. **NBR 11581**. Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. ABNT. Rio de Janeiro. 4 p. 2003.

____. **NBR 12655**. Concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento - Procedimento. ABNT. Rio de Janeiro. 18 p. 2006.

____. **NBR 12989**. Cimento Portland Branco. ABNT. Rio de Janeiro. 5 p. 1993.

____. **NBR NM 67/1998**. Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. ABNT. Rio de Janeiro. 8 p. 1998.

BARBOSA, F. R. et al. Estudo comparativo entre as propriedades mecânicas de concretos convencionais e com cimento Portland branco. In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC2005. 2005. Recife. **Anais eletrônicos...** Recife, PE. 1 CD-ROM.

BASHEER, P. A. M. et al. Monitoring electrical resistance of concretes containing alternative cementitious materials to assess their resistance to chloride penetration. **Cement and Concrete Composites**. V.24, No.5, p.437-449, 2002.

BIJEN, J. Benefits of slag and fly ash. **Construction and Building Materials**. V.10, No.5, p.309-314, 1996.

BRAMESHUBER, W. et al. Non destructive determination of the water-content in the concrete cover using the multiring-electrode. Part I: Aspects of concrete technology. In: International Symposium – Non-destructive testing in civil engineering. 2003.

CANESSO, F. A. C. et al. Influência da adição de escória granulada de alto forno nas propriedades mecânicas do concreto. In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC2005. 2005. Recife. **Anais eletrônicos...** Recife, PE. 1 CD-ROM.

CÁNOVAS, M. F. **Patologia e terapia do concreto armado**. São Paulo: Pini, 1988. 522p.

CASCUDO, O. **O Controle da Corrosão em Armaduras em Concreto: Inspeção e Técnicas eletroquímicas**. 1997. 221p. São Paulo. Editora Pini. Goiânia, GO. Editora UFG. 1997.

CASTELLOTE, M.; ANDRADE, C.; ALONSO, M. C. Standardization, to a reference of 25 °C, of electrical resistivity for mortars and concretes in saturated or isolated conditions. **ACI Materials Journal**, v.99, No.2, p.385-390, 2002.

COLLINS, F. G.; SANJAYAN, J. G. Workability and mechanical properties of alkali activated slag concrete. **Cement and Concrete Research**. V.29, No.3, p.455-458, 1999.

COSTA JUNIOR, M. P. et al. Concretos com altos teores de escória de alto forno: avaliação da carbonatação e da difusão de íons cloreto. In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC2005. 2005. Recife. **Anais eletrônicos...** Recife, PE. 1 CD-ROM.

DUCHESNE, J.; BÉRUBÉT, M. A. Effect of supplementary cementing materials on the composition of cement hydration products. **Advanced Cement Based Materials**. V.2, No.2, p.43-52, 1995.

FU, X. et al. Studies on Portland cement with large amount of slag. **Cement and Concrete Research**. V.30, No.4, p.645-649, 2000.

FUNDAÇÃO IBERÊ CAMARGO. **Website**. Disponível em: http://www.iberecamargo.org.br/content/novasede/construcao.asp?que_pagina=10. Acesso em: Junho de 2007.

GAO, J. M. et al. ITZ microstructure of concrete containing GGBS. **Cement and Concrete Research**. V.35, No.7, p.1299-1304, 2005.

GASTALDINI, A. L. G.; ISAIA, G. C. Comportamento de argamassas com adições minerais submetidas a ataque de sulfato de sódio. In: VII Encontro Nacional da Tecnologia do Ambiente Construído - ENTAC. 1998. Florianópolis. **Anais eletrônicos...** Florianópolis, SC. 1 CD-ROM.

GASTALDINI, A. L. G., ISAIA, G. C., ZANELLA, R. Composição da solução aquosa de pastas com adições minerais. In: 41º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC1999. 1999. Salvador. **Anais eletrônicos...** Salvador, BA. 1 CD-ROM.

GENTIL, V. **Corrosão**. 2ª ed. Rio de Janeiro. Guanabara. 453p. 1987.

GJØRV, O. E. et al. Electrical resistivity of concrete in the oceans. 9th Annual Offshore Technology Conference. **Anais...** Houston, Texas, p. 581-588, 1977.

GOMES, N. S. **Influência de ativadores químicos e de adições minerais no comportamento de concretos frente a cloretos.** 2003. 182p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2003.

GOWERS, K. R.; MILLARD, S. G. Measurement of concrete resistivity for assessment of corrosion severity of steel using Wenner technique. **ACI Materials Journal.** V.96, No.5, p.536-541, 1999.

HAMAD, B. S. Investigations of chemical and physical properties of white cement concrete. **Advanced Cement Based Materials Journal, Elseviers Science Publishing Company.** V.2, No.4, p.161-167, 1995.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** 1993. 231p. Tese de Livre Docência – Universidade de São Paulo, São Paulo. 1993.

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

HOPE, B. B.; IP, A. K. C. Corrosion of steel in concrete made with slag cement. **ACI Materials Journal.** V.84, No.6, p.525-531, 1987.

HOPPE, T. F. **Resistividade Elétrica de Concretos Contendo Diferentes Teores de Cinza de Casca de Arroz.** 2005. 146p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2005.

HUNKELER, F. The resistivity of pore water solution – a decisive parameter of rebar corrosion and repair methods. **Construction and Building Materials.** V.10, No.5, p.381-389, 1996.

ISAIA, G. C. I. Efeito sinérgico de misturas binárias e ternárias de cinza volante, cinza de casca de arroz e microssílica na durabilidade de concreto de elevado desempenho. In: Proceedings of the International Congress on High-performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures. Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, SC. 1996.

KIRCHHEIM, A. P. **Concreto de Cimento Portland Branco Estrutural: Avaliação da Carbonatação e Absorção Capilar.** 2003. 169p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2003.

KWON, Y. A study on the alkali-aggregate reaction in high-strength concrete with particular respect to the ground granulates blast-furnace slag effect. **Cement and Concrete Research.** V.35, No.7, p.1305-1313, 2005.

LI, Y. X. et al. A study on the relationship between porosity of the cement paste with mineral additives and compressive strength of mortar based on this paste. **Cement and Concrete Research.** V.36, No.9, p.1740-1743, 2006.

LIDUÁRIO, A. S. et al. Utilização da escória de alto forno moída no concreto convencional e compactado com rolo. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**. V.2, No.1, p. 35-39, 2005.

LOVE, C. A.; RICHARDSON, I. G.; BROUGH, A. R. Composition and structure of C-S-H in white Portland cement – 20% matekaolin pastes hydrated at 25 °C. **Cement and Concrete Research**. V.37, No.2, p.109-117, 2007.

MATTOS, L. R. S.; DAL MOLIN, D. C. C. Avaliação da influência do cimento Portland branco estrutural na resistência à penetração acelerada de íons cloreto e na absorvidade de concretos com diferentes relações água/cimento. In: 45º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC2003. 2003. Vitória. **Anais eletrônicos...** Vitória, ES. 1 CD-ROM.

McCARTER, W. J.; STARRS, G.; CHRISP, T. M. Electrical conductivity, dissusion and permeability of portland cement-based mortars. **Cement and Concrete Research**. V.30, No.9, p.1395-1400, 2000.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto. Estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo. PINI. 1994.

MISSAU, F. **Penetração de Cloretos em Concretos Contendo Diferentes Teores de Cinza de Casca de Arroz**. 2004. 129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2004.

MORRIS, W. et al. Practical evaluation of resistivity of concrete in test cylinders using a wenner array probe. **Cement and Concrete Research**. V.26, No.12, p.1779-1787, 1996.

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

OLIVEIRA, Claudia Terezinha de Andrade; **Água do Poro de Pastas de Cimento de Escória**. São Paulo, 2000, 162p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

OSBORNE, G. J. Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete. **Cement and Concrete Composites**. V.21, No.1, p.11-21, 1999.

PASSUELO, A. et al. Análise cromática de concretos produzidos com cimento branco estrutural e diferentes tipos de agregados. In: 46º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC2004. 2004. Florianópolis. **Anais eletrônicos...** Florianópolis, SC. 1 CD-ROM.

POLDER, R. B.; PEELEN, W. H. A. Characterization of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by electrical resistivity. **Cement and Concrete Composites**. V.24, No.5, p.427-435, 2002.

POLDER, R. B. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete – a RILEM TC-154 technical recommendation. **Construction and Building Materials**. V.15, No.2-3, p.125-131, 2001.

PRINCIGALLO, A.; BREUGEL, K. V.; LEVITA, G. Influence of the aggregate on the electrical conductivity of Portland cement concretes. **Cement and Concrete Research**. V.33, No.11, p.1755-1763, 2003.

PU, X. Investigation on pozzolanic effect of mineral additives in cement and concrete by specific strength index. **Cement and Concrete Research**. V.29, No.6, p.951-955, 1999.

RAMEZANIANPOUR, A. A.; MALHOTRA, V. M. Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume. **Cement and Concrete Composites**. V.17, No.2, p.125-133, 1995.

REGIS, P. A., et al. Análise das propriedades de concretos dosados com cimento Portland cinza e cimento branco, aditivo policarboxilato e a fração graúda de uma composição granulométrica ternária. In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC2005. 2005. Recife. **Anais eletrônicos...** Recife, PE. 1 CD-ROM.

RIZZON, A. C., SILVEIRA, B. A., ANDRADE, J. J. O. Determinação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos moldados com cimento Portland branco através de ensaio não acelerado. In: VI Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto. 2006. São Paulo. **Anais eletrônicos...** São Paulo, SP. 1 CD-ROM.

ROSA, D. W. **Resistividade Elétrica de Concretos com Diferentes Teores de Escória de Alto Forno e Ativador Químico**. 2005. 146p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2005.

SAEKI, T.; MONTEIRO, P. J. M. A model to predict the amount of calcium hydroxide in concrete containing mineral admixtures. **Cement and Concrete Research**. V.35, No.10, p.1914-1921, 2005.

SALEEM, M. et al. Effect of moisture, chloride and sulphate contamination on the electrical resistivity of Portland cement concrete. **Construction and Building Materials**. V.10, No.3, p.209-214, 1996.

SCHNEIDER, J. A. **Penetração de Cloretos em Concretos com Escória de Alto Forno e Ativador Químico Submetidos a Diferentes Períodos de Cura**. 2005. 155p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2005.

SHENG, W. F.; LIAN, S. R.; JING, C. Y. Study on modification of the high-strength slag cement material. **Cement and Concrete Research**. V.35, No.7, p.1344-1348, 2005.

SHI, C.; DAY, R. L. A calorimetric study of early hydration of alkali-slag cements. **Cement and Concrete Research**. V.25, No.6, p.1333-1346, 1995.

SHI, C. Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277) results. **Cement and Concrete Research**. V.34, No.3, p.537-545, 2004.

SHI, C.; DAY, R. L. Pozzolanic reaction in the presence of chemical activators. Part II. Reaction products and mechanism. **Cement and Concrete Research**. V.30, No.4, p.607-613, 2000.

SHI, C. Strength, pore structure and permeability of alkali-activated slag mortars. **Cement and Concrete Research**. V.26, No.12, p.1789-1799, 1996.

SHI, C. et al. **Effect of supplementary cementing materials on the specific conductivity of pore solution and its implications on the rapid chloride permeability test (AASHTO T277 and ASTM C1202) results.** ACI MAT. JOURNAL, V.95 n.4, march-april, 1998.

SILVA, L. B. et al. Estudo da absorção capilar em concretos brancos. In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC2005. 2005. Recife. **Anais eletrônicos...** Recife, PE. 1 CD-ROM.

SILVA FILHO, L. C. P. et al. Uso do cimento branco estrutural: Museu Iberê Camargo. In: II Seminário de Patologia das Edificações. 2004. Porto Alegre. **Anais eletrônicos...** Porto Alegre, RS. 1 CD-ROM.

SMITH, K. M.; SCHOKKER, A. J.; TIKALSKY, P. J. Performance of supplementary cementitious materials in concrete resistivity and corrosion monitoring evaluations. **ACI Materials Journal**, v.101, No.5, p.385-390, 2004.

SPERB, J. E. K. et al. Efeito de ativadores químicos na absorção capilar de concretos compostos com escória de alto forno e cinza de casca de arroz. In: X Encontro Nacional da Tecnologia do Ambiente Construído - ENTAC. 2004. São Paulo. **Anais eletrônicos...** São Paulo, SP. 1 CD-ROM.

VIEIRA, G. L., DAL MOLIN, D. C. C. Concretos produzidos com cimentos Portland brancos e cinza: avaliação da resistividade elétrica. In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC2005. 2005. Recife. **Anais eletrônicos...** Recife, PE. 1 CD-ROM.

WEE, T. H.; et al. Evaluation of rapid permeability test (RCPT) results for concrete containing mineral admixtures. **ACI Materials Journal**, v.97, No.2, p.221-232, 2000.

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

YEAU, K. Y.; KIM, E. K. An experimental study on corrosion resistance of concrete with ground granulate blast-furnace slag. **Cement and Concrete Research**. V.35, No.7, p.1391-1399, 2005.