

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



**RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE CONCRETOS  
COM DIFERENTES TEORES DE ESCÓRIA DE  
ALTO FORNO E ATIVADOR QUÍMICO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Dalton Wegner da Rosa**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2005**

**RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE CONCRETOS COM  
DIFERENTES TEORES DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO E  
ATIVADOR QUÍMICO**

**por**

**Dalton Wegner da Rosa**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Materiais de Construção, 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**

**2005**

**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 COM DIFERENTES  
TEORES DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO E ATIVADOR QUÍMICO**

elaborada por  
**Dalton Wegner da Rosa**

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

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

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

---

**Dr. Geraldo Cechella Isaia (UFSM/RS)**

---

**Dr. Ruy Alberto Cremonini (UFRGS/RS)**

Santa Maria, 15 de dezembro de 2005.

*Deus nos concede, a cada dia, uma página  
de vida nova no livro do tempo. Aquilo que  
colocarmos nela, corre por nossa conta.*

*(Chico Xavier)*

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por ter me concedido a graça da vida.

A família em especial aos pais, Arnaldo e Dalva e aos meus irmãos Daniele e Juliano que contribuíram para a realização deste sonho.

Ao professor Antônio Luiz G. Gastaldini, pela sua orientação técnica e pela sua disponibilidade em sanar as dúvidas, assegurando desta forma, uma excelente qualidade técnica necessária para a realização deste trabalho.

Ao professor Gerado Isaia, pelos conhecimentos teóricos e aos materiais disponibilizados, fundamental para as respostas aos questionamentos que surgiram.

Ao meu colega de Pós-Graduação, Jonas André Schneider, pela amizade e companheirismo presentes principalmente ao longo da fase prática da investigação.

Aos amigos da Pós-graduação, Fabiano Missau, Tiago Hoppe, Adriano Sacilotto. Gustavo Cantarelli, Willian Cadore, Cássio e Leandro Zampieri pela amizade e companheirismo.

Aos alunos e amigos bolsistas do Grupo de Pesquisas em Concreto (GEPECON/UFSM), Éder Pedroso, André Lübeck, Henrique C. Siqueira, Irineu Dalla Corte Filho, Leonardo F. S. Tombesi, Rafael D. Dallacort pela ajuda na preparação dos materiais e moldagem dos corpos de prova bem como na realização dos ensaios.

Ao Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMCC/UFSM, pela cessão de seus equipamentos e pela valorosa atenção dos seus funcionários, ao Sr. João, e em especial ao Emerson, grande amigo e companheiro nas horas de confraternização.

Ao CNPq, CAPES, FAPERGS e FIPE, pelos recursos e bolsas concedidas; e as empresas Cimento Mizu e MBT pelos materiais cedidos

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, que proporcionou a realização deste trabalho e também todos os alunos e professores deste curso que me auxiliaram nesta pesquisa.

A Universidade Federal de Santa Maria, por tornar possível a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

A todos aqueles que de uma forma ou outra ajudaram a vencer mais esta fase da vida, a realização profissional e pessoal.

O meu muito obrigado!

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	8
<b>ABSTRACT</b> .....	9
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	10
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	12
<b>LISTA DE REDUÇÕES</b> .....	15
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>CAPÍTULO 1</b>	
<b>CORROSÃO DAS ARMADURAS DE AÇO</b>	
1.1 Introdução.....	20
1.2 Conceito.....	21
1.3 Agentes químicos, pilha e o processo de corrosão eletroquímica.....	22
1.4 Mecanismo de transporte e cinética do processo de corrosão.....	27
1.5 Resistividade elétrica aparente e condutividade elétrica específica.....	28
1.6 Conclusão.....	35
<b>CAPÍTULO 2</b>	
<b>ESCÓRIA DE ALTO FORNO, REAÇÕES DE HIDRATAÇÃO E ATIVADORES QUÍMICOS</b>	
2.1 Introdução.....	36
2.2 Criando novas alternativas.....	37
2.3 A necessidade de redução do impacto ambiental.....	38
2.4 Escória de alto forno.....	41
2.4.1 Conceito.....	41
2.4.2 Reações de hidratação.....	42
2.4.3 O efeito da utilização da escória de alto forno nas propriedades do concreto fresco e endurecido.....	44
2.5 Influência da E.A.F na resistividade elétrica aparente.....	46
2.6 Influência da E.A.F na condutividade elétrica específica (solução dos Poros).....	55
2.7 Ativadores químicos.....	57
2.8 Conclusão.....	60

## **CAPÍTULO 3**

### **INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL**

3.1	Introdução.....	61
3.2	Variáveis envolvidas na pesquisa.....	62
3.2.1	Variáveis independentes.....	62
3.2.2	Variáveis intervenientes.....	62
3.2.3	Variáveis dependentes.....	62
3.3	Metodologia e técnicas utilizadas.....	63
3.4	Ensaio de caracterização dos materiais.....	64
3.4.1	Aglomerantes.....	64
3.4.2	Agregados.....	66
3.4.3	Aditivo.....	69
3.4.4	Ativador químico.....	69
3.5	Dosagem dos concretos.....	69
3.6	Moldagem, cura e preparação dos corpos de prova.....	71
3.7	Ensaio realizados com o concreto.....	72
3.7.1	Resistência à compressão axial.....	72
3.7.2	Ensaio de resistividade elétrica aparente – Método dos quatro eletrodos (Método de Wenner).....	73
3.8	Ensaio realizados com pasta.....	77
3.8.1	Ensaio da solução aquosa dos poros.....	77
3.8.2	Ensaio de porosimetria de mercúrio.....	79

## **CAPÍTULO 4**

### **ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÃO**

4.1	Introdução.....	80
4.2	Análise dos resultados de resistência à compressão axial.....	81
4.3	Análise dos resultados da resistividade elétrica aparente.....	85
4.3.1	Influência da relação água /aglomerante.....	87
4.3.2	Influência do teor de E.A.F.....	90

4.3.3	Influência da idade.....	93
4.3.4	Influência do ativador químico.....	98
4.4	Análise da solução aquosa dos poros (Condutividade elétrica específica).....	100
4.5	Análise do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio.....	104
4.6	Integração dos resultados.....	111
4.6.1	Resistividade elétrica x resistência á compressão.....	111
4.6.2	Resistividade elétrica aparente x Condutividade elétrica específica.....	113
4.6.3	Resistividade elétrica aparente x Concentração de OH <sup>-</sup> .....	115
4.6.4	Resistividade elétrica aparente x Porosimetria por intrusão de mercúrio.....	117
4.7	Análise da resistividade elétrica aparente a partir da especificação da resistência da compressão.....	119
4.8	Análise de custo.....	125
4.9	<b>CONCLUSÃO</b> .....	135
	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	139
	BIBLIOGRAFIA .....	140
	ANEXO A - Coeficientes de Abrams para R.E.A em idades de 3,7,28, 56 e 91 dias.....	146
	ANEXO B – Custos dos materiais das misturas.....	147



## RESUMO

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

### RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE CONCRETOS COM DIFERENTES TEORES DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO E ATIVADOR QUÍMICO

Autor: Dalton Wegner da Rosa  
Orientador: Prof. Dr. Antônio Luiz G. Gastaldini  
Santa Maria, 15 de dezembro de 2005.

A manutenção da integridade das armaduras nas estruturas de concreto é uma consequência da proteção física e química do concreto sobre o aço. A destruição da camada passivadora antecede o processo corrosivo. Uma vez iniciada a corrosão, a velocidade desta dependerá da resistividade elétrica existente entre o ânodo e o cátodo e também pela quantidade de oxigênio presentes junto ao cátodo. A resistividade do concreto caracteriza-se por ser uma propriedade ligada tanto a características físicas como químicas do mesmo. Neste trabalho objetivou-se estudar o comportamento da adição de escória de alto forno na resistividade elétrica aparente dos concretos, assim como correlacionar com a resistência à compressão e as alterações químicas na fase aquosa bem como na estrutura dos poros. Foram realizadas investigações em misturas com relação a/agl 0,35, 0,50 e 0,65 com teores de substituição em massa de 0, 50 e 70% de EAF. Investigou-se também os efeitos produzidos pela incorporação de 4% de sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) em misturas contendo 50% de EAF. A resistividade elétrica do concreto foi determinada utilizando o método dos quatro eletrodos (método de Wenner adaptado para uso em concreto). Foram também realizados ensaios de resistência à compressão axial, porosimetria, concentração de íons da fase aquosa e determinada a condutividade elétrica específica da solução dos poros. Constatou-se aumento na resistividade elétrica do concreto com o aumento no grau de hidratação e do teor de escória. Este comportamento está relacionado a menor condutividade elétrica específica da solução dos poros e ao refinamento dos poros comprovado pela boa correlação entre esses dois fatores. A mistura binária composta por 50% de escória (50E) apresentou a melhor relação custo/benefício para os níveis de resistência de 30MPa e 50MPa aos 28 dias e também para o nível de resistência de 50MPa aos 91 dias.

Palavras Chave: concreto, escória de alto forno, resistividade elétrica.

## ABSTRACT

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

### ELECTRICAL RESISTIVITY IN CONCRETE WITH DIFFERENT CONCENTRATIONS OF BLAST FURNACE SLAG AND A CHEMICAL ACTIVATOR

Author: Dalton Wegner da Rosa  
Thesis Advisor: Prof. Antônio Luiz G. Gastaldini, PhD  
Santa Maria, 15<sup>ST</sup> December 2005.

The integrity of the rebars in reinforced concrete structures is related to the chemical and physical protection provided by the concrete layer that covers the steel. The destruction of the passivation layer precedes the onset of corrosion. Once the corrosion process starts, its rate of propagation will depend on the electrical resistivity between cathode and anode and the amount of oxygen available on the cathode. Concrete resistivity is a property linked both to the chemical and physical properties of the concrete. This study investigated the effect of the addition of blast furnace slag (BFS) on the electrical resistivity of concrete and correlated the effects of this addition on the concrete compressive strength as well as on changes in the chemical composition of aqueous phase and pore structure. Test specimens were prepared using different water/binder ratios (0.35, 0.50 and 0.65) and substitutions of 50 and 70% of BFS for cement by weight. A control sample (no BFS) was also prepared. Additionally, the effect of 4% sodium sulfate ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) in samples with 50% BFS was also investigated. The electrical resistivity of concrete was determined using the four-electrode method (Wenner's method adapted for use in concrete). Tests of compressive strength, porosimetry, electrical conductivity in the pore solution and the concentration of ions in the aqueous phase were performed. The tests showed there is an increase in the electrical resistivity of concrete as the degree of hydration and the concentration of BFS increase. This is related to the lower specific conductivity of the pore solution and the reduction in concrete pore size, which is shown by the good correlation between these two factors. The binary mixture with 50% BFS (50E) showed the best cost/benefit ratio for strength levels of 30MPa and 50MPa at 28 days and also for the strength level of 50MPa at 91 days.

Keywords: concrete, blast furnace slag, electrical resistivity.

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1– Composição química dos cimentos utilizados nos trabalhos de GÜNEYISI.....	52
TABELA 2.2 – Quantia de materiais utilizado por GÜNEYISI para a produção de concreto.....	53
TABELA 3.1 – Características físico/mecânicas do cimento.....	64
TABELA 3.2 – Denominação e composição das misturas.....	65
TABELA 3.3 – Características físicas da E.A.F.....	65
TABELA 3.4 – Características químicas do cimento e EAF.....	65
TABELA 3.5 – Características físicas dos agregados.....	67
TABELA 3.6 – Quantidade de materiais utilizados por m <sup>3</sup> de concreto.....	70
TABELA 3.7 – Informações dos ensaios realizados.....	72
TABELA 3.8 – Dados informativos do ensaio de R.E.A.....	75
TABELA 3.9 – Condutividade equivalente de íons aquosos numa concentração infinita em 25°C .....	79
TABELA 4.1 – Resultado dos ensaios de resistência à compressão axial .....	82
TABELA 4.2 – Coeficientes da curva de Abrams para resistência compressão .....	83
TABELA 4.3 – Critério de Avaliação da resistividade elétrica do concreto (CEB 192,1989).....	85
TABELA 4.4 – Resultados dos ensaios de R.E.A.....	86
TABELA 4.5 – Classificação das misturas quanto às probabilidades de ocorrer corrosão.....	89
TABELA 4.6 – Taxa de desempenho da R.E.A das misturas com escória em relação ao traço de referência.....	91
TABELA 4.7 – Taxa de desempenho da resistividade das misturas com 70% escória em relação ao traço 50% escória.....	93
TABELA 4.8 – Taxa de desempenho da idade na R.E.A (TDI).....	94
TABELA 4.9 – Taxa desempenho do ativador na R.E.A ( $TDA_{at}^{\Omega cm}$ ).....	99
TABELA 4.10 – Concentração íons na solução aquosa dos poros (mol/l) relação a/agl 0,35.....	101

<b>TABELA 4.11</b> – Concentração íons na solução aquosa dos poros (mol/l) relação a/agl 0,50.....	102
<b>TABELA 4.12</b> – Concentração íons na solução aquosa dos poros (mol/l) relação a/agl 0,65.....	102
<b>TABELA 4.13</b> – Valores de condutividade elétrica específica.....	103
<b>TABELA 4.14</b> – Resultados dos ensaios de porosimetria de mercúrio.....	106
<b>TABELA 4.15</b> – Valores de resistência e R.E.A para a idade de 28 dias.....	120
<b>TABELA 4.16</b> – Valores de resistência e R.E.A para a idade de 91 dias.....	121
<b>TABELA 4.17</b> – Valores de relação a/agl e de R.E.A aos 28 dias, para a resistência à compressão de 30 e 50MPa.....	122
<b>TABELA 4.18</b> – Valores de relação a/agl e de R.E.A aos 91 dias para a resistência à compressão de 50MPa.....	122
<b>TABELA 4.19</b> – Quantidade de materiais utilizados por m <sup>3</sup> de concreto.....	126
<b>TABELA 4.20</b> – Custo parcial e total das misturas por metro cúbico (m <sup>3</sup> ) de concreto.....	126
<b>TABELA 4.21</b> – Custo por MPa e custo médio por MPa para as misturas investigadas.....	127
<b>TABELA 4.22</b> – Expressões e correlações para o cálculo dos custos das misturas para resistência especificada de 30 e 50MPa .....	128
<b>TABELA 4.23</b> – Custos totais e relativos à resistência à compressão e à R.E.A das misturas para níveis de resistência de 30 e 50MPa aos 28 dias.....	129
<b>TABELA 4.24</b> – Custos totais e relativos à resistência à compressão e à R.E.A das misturas para nível de resistência de 50MPa aos 91 dias.....	131

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1.1</b> – Formas de ocorrência de íons cloreto na estrutura do concreto.....	23
<b>FIGURA 1.2</b> – Modelo de pilha aeração diferencial.....	25
<b>FIGURA 1.3</b> – Pilha eletroquímica de corrosão no concreto armado.....	25
<b>FIGURA 1.4</b> – Volume de alguns dos produtos da corrosão.....	26
<b>FIGURA 1.5</b> – Tipos de corrosão.....	27
<b>FIGURA 1.6</b> – Resistividade elétrica em pastas de diferentes tipos de cimentos, à temperatura de 22°C e umidade relativa de 100%.....	29
<b>FIGURA 1.7</b> – Efeito do alto teor de C <sub>3</sub> A sobre a resistividade elétrica .....	31
<b>FIGURA 1.8</b> – Efeito do baixo teor de C <sub>3</sub> A sobre a resistividade elétrica .....	31
<b>FIGURA 1.9</b> – Relação entre a resistividade elétrica e a relação água/ cimento em concretos de cimento Portland comum aos 28 dias em cura úmida.....	32
<b>FIGURA 1.10</b> – Gráfico de variação da resistividade elétrica de argamassas e concreto versus fração de volume de pasta.....	33
<b>FIGURA 2.1</b> – Gráfico da projeção crescimento populacional e consumo de concreto por ano.....	38
<b>FIGURA 2.2</b> – Representação de um alto forno.....	42
<b>FIGURA 2.3</b> – Velocidade e produtos gerados pelas reações do cimento Portland e cimento Portland com adição mineral.....	43
<b>FIGURA 2.4</b> – Estrutura interna da pasta de cimento Portland puro e em pasta de cimento Portland com adição mineral.....	43
<b>FIGURA 2.5</b> – Imagem estrutura interna concreto com E.A.F.....	45
<b>FIGURA 2.6</b> – Gráfico efeito do teor de E.A.F sobre a resistividade elétrica.....	47
<b>FIGURA 2.7</b> – Gráfico mostrando resistividade elétrica em concreto sem adição de E.A.F.....	48
<b>FIGURA 2.8</b> – Gráfico mostrando resistividade elétrica em concreto com 35% de E.A.F.....	48
<b>FIGURA 2.9</b> – Gráfico mostrando a influência da cura, teor e finura da E.A.F sobre a resistividade elétrica de concreto.....	49

<b>FIGURA 2.10</b> – Gráfico mostrando a influência da relação água/aglomerante e cura sobre a resistividade em concreto com 15% de E.A.F.....	50
<b>FIGURA 2.11</b> – Gráfico mostrando as influências da cura, da relação água/aglomerante e idade sobre a resistividade elétrica de concreto com diferentes tipos de adições minerais.....	54
<b>FIGURA 2.12</b> – Gráfico mostrando a variação da condutividade elétrica específica em concreto com E.A.F em teores de 35 e 50%.....	56
<b>FIGURA 2.13</b> – Gráfico mostrando a variação do pH com o teor de sulfato de sódio.....	58
<b>FIGURA 3.1</b> – Gráfico da granulometria agregado miúdo.....	68
<b>FIGURA 3.2</b> – Gráfico da granulometria agregado graúdo.....	68
<b>FIGURA 3.3</b> – Método dos 4 eletrodos para medida de R.E.A.....	74
<b>FIGURA 3.4</b> – Esquema dos corpos de prova utilizados no ensaio de R.E.A.....	74
<b>FIGURA 3.5</b> – Molde para confecção de cp prismático usado no ensaio de R.E.A.....	76
<b>FIGURA 3.6</b> – Foto do ensaio de R.E.A.....	77
<b>FIGURA 4.1</b> – Gráfico resistência à compressão.....	84
<b>FIGURA 4.2</b> – Gráfico do efeito do sulfato de sódio na resistência à compressão da em concreto com 50% de E.A.F .....	85
<b>FIGURA 4.3</b> – Gráfico R.E.A em função da relação a/agl.....	88
<b>FIGURA 4.4</b> – Gráfico da taxa de desempenho da E.A.F na R.E.A (TDE) .....	92
<b>FIGURA 4.5</b> – Gráfico da taxa desempenho da idade na R.E.A (TDI).....	96
<b>FIGURA 4.6</b> – Gráficos R.E.A em função da idade.....	97
<b>FIGURA 4.7</b> – Gráfico taxa desempenho do ativador na R.E.A.....	100
<b>FIGURA 4.8</b> – Gráfico influência do sulfato de sódio sobre os valores de pH.....	104
<b>FIGURA 4.9</b> – Gráfico resultado ensaio porosimetria por intrusão de mercúrio.....	107
<b>FIGURA 4.10</b> – Distribuição de tamanho de poros das amostras investigadas na relação a/agl 0,35.....	108
<b>FIGURA 4.11</b> – Distribuição de tamanho de poros das amostras investigadas na relação a/agl 0,50.....	109

<b>FIGURA 4.12</b> – Distribuição de tamanho de poros das amostras investigadas na relação a/agl 0,65.....	110
<b>FIGURA 4.13</b> – Gráficos R.E.A x Resistência à compressão.....	112
<b>FIGURA 4.14</b> – Gráficos R.E.A x Condutividade elétrica específica.....	114
<b>FIGURA 4.15</b> – Gráficos R.E.A x Concentração íon OH <sup>-</sup> .....	116
<b>FIGURA 4.16</b> – Gráficos R.E.A x Volume intrusão de mercúrio.....	118
<b>FIGURA 4.17</b> – Gráficos R.E.A das misturas para níveis de resistência à compressão de 30 e 50MPa aos 28 dias e de 50MPa aos 91 dias.....	124
<b>FIGURA 4.18</b> – Gráficos custos totais por metro cúbico , MPa e 1000Ω.cm para níveis de resistência à compressão de 30 e 50MPa aos 28 dias .....	133
<b>FIGURA 4.19</b> – Gráficos custos totais por metro cúbico , MPa e 1000Ω.cm para nível de resistência à compressão de 50MPa aos 28 dias .....	134

## Lista de Reduções

**a/agl** – Relação água/aglomerante, em massa

**cp's** – corpos de prova

**REF** – Concreto de referência, sem adição mineral

**R.E.A** – Resistividade elétrica aparente

**E.A.F** – Escória de alto forno

**Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>** – Sulfato de sódio

**50E** – Mistura composta com 50%de EAF em substituição ao cimento no concreto

**70E** – Mistura composta com 70%de EAF em substituição ao cimento no concreto

**50EX** – Mistura composta com 50% de EAF em substituição ao cimento no concreto e ativada com Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

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

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

**Ca** – Cálcio

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

**CaO** – Óxido de cálcio

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

**CO<sub>2</sub>** – Anidrido carbônico ou dióxido de carbono

**CPV-ARI** – Cimento Portland de alta resistência inicial

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

**Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** – Óxido de ferro III (óxido férrico)

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

**pH** – Potencial de hidrogênio ou hidrogeniônico

**R<sup>2</sup>** – Coeficiente de correlação

**#** – Abertura da malha da peneira

**Ø** – Diâmetro

**fc<sub>3</sub>** – Resistência à compressão aos 3 dias

**fc<sub>7</sub>** – Resistência à compressão aos 7 dias

**fc<sub>28</sub>** – Resistência à compressão aos 28 dias

**fc<sub>91</sub>** – Resistência à compressão aos 91 dias



## Introdução

A previsão feita por MEHTA (1994), acerca da escolha do concreto como principal material de construção ao invés da madeira ou aço, é uma realidade cada vez mais presente em nosso cotidiano. Com relação aos dois outros concorrentes, o autor defende o uso do concreto, por este material proporcionar benefícios técnicos, econômicos e ambientais.

Com relação ao concreto, utilizado nas mais variadas formas, MEHTA (2002), descreve como sendo o maior usuário de recursos naturais do mundo, consumindo aproximadamente 12,6 bilhões de toneladas de matéria prima por ano, dos quais 12% segundo o autor, relacionado ao consumo de cimento.

As indústrias de cimento, o principal constituinte no concreto, destacam-se não só pelos grandes volumes de CO<sub>2</sub> desprendidos na atmosfera, mas também por ser um ramo industrial que consome uma elevada quantia de energia durante o processo de fabricação. Segundo GARCIA (2004) a produção de cada quilo de cimento implica na liberação de 01 quilo (Kg) de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. Considerando-se o consumo de cimento anual estimado por MEHTA (2002) a indústria do cimento emite 1,51 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub>. O autor acrescenta que, nossas escolhas tecnológicas, com relação ao modelo industrial, parecem terem sido equivocadas, pois as mesmas privilegiaram metas de curto prazo e limitadas de um empreendimento ao invés de fundamentarem-se no conjunto das conseqüências do uso desta tecnologia.

Nos dias atuais observam-se segundo dados ABCP (1997) que 80% dos cimentos são adição, sejam estas pozolânicas ou de E.A.F. Esta prática ajuda a minimizar os impactos econômicos e ambientais causados pelo uso do cimento. O processo de fabricação de cimentos compostos com pozolanas ou E.A.F pode segundo JOHN (1995), apresentar uma economia de 80% no consumo de energia, em virtude de não haver necessidade de calcinação das adições minerais. O emprego de algumas adições minerais podem ainda resolver um problema que vem a cada dia, que se passa, tomando dimensões cada vez maiores, ou seja, o da correta destinação de resíduos, provenientes ou não, de processos industriais.

A produção nacional de ferro-gusa em 2004 foi segundo IBS apud DAL MOLIN (2005) de aproximadamente 35 milhões de toneladas. Sendo que para cada tonelada de ferro gusa, conforme dados de CRUZ et al (1999) temos a produção de

300 a 350 quilograma de escória de alto forno, a estimativa média de produção de escória de alto forno no Brasil para o ano de 2004 foi, segundo DAL MOLIN (2005), de 11.375.000 (onze milhões trezentos e setenta e cinco mil toneladas). Estes quantitativos podem, por si só, justificar a incorporação da E.A.F ao concreto. No entanto, a busca por estruturas de concreto armado com maior durabilidade faz com que a escória de alto forno, em combinação ou não com outras adições minerais, tenha um bom desempenho técnico no prolongamento da vida útil das estruturas de forma geral. Entre as ações produzidas pela escória no concreto estão reduções do calor de hidratação e permeabilidade e também os aumentos na resistência a sulfatos (HOPE et al,1998). Uma outra justificativa para o seu emprego é a melhora, produzida por esta, nas propriedades reológicas do concreto fresco, sobretudo na trabalhabilidade das misturas (WAINWRIGHT, 2000).

Com a incumbência de proteger o aço, tanto física como quimicamente (CASCUDO, 1997), o concreto deixa de ser apenas um mero material destinado a resistir cargas e passa também a assumir o papel de obstáculo ao ingresso de agentes agressivos. A destruição da película química (NEVILLE,1997) que envolve o aço antecede o processo de corrosão das armaduras. Após ocorrer a despassivação das armaduras, o fenômeno de corrosão passa segundo, ANDRADE (1992), a ser controlado pela resistividade elétrica e também pela presença de oxigênio junto à superfície da armadura.

Para WHITING (2003), a resistividade é fundamentalmente relacionada pela permeabilidade de fluidos e difusividade de íons através de materiais porosos como no caso do concreto. O autor considera que a resistividade pode ser usada como uma medida indireta da capacidade do concreto em impedir a penetração de soluções de cloreto que podem causar a corrosão das armaduras. Dentre as aplicações práticas da resistividade elétrica no nosso dia a dia, porém restritas a determinadas áreas, está a construção de plataformas de embarque nas estações de metrô que, conforme SIDORIAK *apud* WHITING (2003), exigem concretos com elevada resistividade afim de garantir a proteção dos passageiros contra uma possível descarga elétrica. O autor não mencionou valores de resistividade elétrica requeridos neste caso. CASCUDO (1997) por sua vez, relata que na construção do metrô de São Paulo, foi estabelecido, que a resistividade dos concretos deveria ser de no mínimo 60 K $\Omega$ .cm. Estes valores, segundo pesquisadores, são elevados porém, aplicáveis para o caso em específico.

A estrutura dos poros e a composição iônica da solução aquosa dos mesmos controlam a resistividade elétrica dos concretos. Além disto, a resistividade sofre interferência da temperatura e da umidade do concreto.

O fenômeno do refinamento dos poros pelo uso de adições minerais (MEHTA, 1994) promove uma redistribuição dos poros do concreto. Esta alteração resulta na diminuição da intercomunicação entre estes, responsável não só pela alta resistividade elétrica mas também da sua baixa condutividade elétrica nos concretos.

No Brasil há poucos estudos sobre a influência da adição de escória na resistividade elétrica dos concretos. No entanto MISSAU (2004), em pesquisa realizada na Universidade Federal de Santa Maria, conseguiu comprovar que a adição de 50% de escória de alto forno melhorou a resistividade elétrica aparente em concreto. Internacionalmente, as bibliografias indicam a existência de um grande número de pesquisas sobre a resistividade elétrica de concretos com escória de alto forno dentre as quais a de WEE et al (2000) que investigaram a influência dos teores e das finuras das escórias usadas como adição e também o tempo de cura sobre a resistividade elétrica dos concretos. O trabalho apresentado por GÜNEYISI et al (2005) avaliou os efeitos da relação água/aglomerante, do tipo e a idade de cura sobre a resistividade elétrica do concreto com escória de alto forno.

SPERB (2003) e GOMES (2003) tiveram êxito ao estudarem os efeitos de ativadores químicos na resistência à compressão, carbonatação, entre outras propriedades, em concretos com escória de alto forno. O desconhecimento até então, dos efeitos do sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) sobre a resistividade elétrica aparente faz com que esta investigação se torne uma importante fonte bibliográfica a ser consultada principalmente com relação à realização de futuros trabalhos na resistividade elétrica do concreto.

Assim, este trabalho tem o objetivo de investigar o comportamento da escória de alto forno, em diferentes teores, ativadas quimicamente ou não, na resistência compressão e na resistividade elétrica aparente (R.E.A) do concreto.

De forma a se alcançar o objetivo pré-estabelecido, foram elaborados questionamentos para facilitar a visualização e a compreensão dos efeitos das muitas variáveis analisadas nesta pesquisa. Sendo estas as questões:

- Com relação à resistência à compressão em concreto, quais os efeitos produzidos sobre esta, quando alterados a relação a/agl, os teores de E.A.F

e o tempo de cura? Qual o efeito do sulfato de sódio (ativador químico) na resistência à compressão?

- Qual a influência da relação a/agl, do teor de escória, do tempo da cura (idade) e do uso do sulfato de sódio (ativador químico) na resistividade elétrica aparente (R.E.A) dos concretos investigados?
- Quais mudanças ocorrem na composição da solução aquosa e na estrutura dos poros, quando adicionados ao concreto, diferentes teores de escória de alto forno (E.A.F)? E quando se utiliza ativador químico à base de sulfato?
- Como se comporta a R.E.A das misturas investigadas aos 28 dias, quando a resistência especificada é de 30 e 50MPa? Para 91 dias, quando a resistência é fixada em 50MPa quais os valores de resistividade elétrica?
- Quais as relações existentes entre a R.E.A e as demais propriedades estudadas? Qual, dentre as propriedades investigadas, pode ser considerada como parâmetro controlador da R.E.A?
- Com relação aos custos de produção por metro cúbico, MPa de resistência e de  $1000\Omega\cdot\text{cm}$  ( $\text{K}\Omega\cdot\text{cm}$ ) de resistividade, quais os resultados apresentados pelas misturas estudadas, nos níveis de 30 e 50MPa de resistência aos 28 dias. E para os 91 dias, quais os custos quando a resistência é de 50MPa?
- Na análise geral, qual mistura apresenta o melhor desempenho técnico-econômico, ou seja, a de melhor relação custo/benefício?

Para tanto, esta dissertação encontra-se subdividida em quatro capítulos. Os dois primeiros referem-se à revisão bibliográfica. O primeiro aborda os aspectos gerais da corrosão a resistividade elétrica aparente (R.E.A) do concreto e a condutividade elétrica específica (solução dos poros). O segundo trata dos aspectos ecológicos do uso da E.A.F, suas reações de hidratação e também dos efeitos da sua incorporação sobre a R.E.A e a condutividade elétrica específica. No terceiro capítulo estão descritos os métodos e os ensaios utilizados no processo investigatório e o quarto destina-se à apresentação dos resultados obtidos e suas respectivas discussões.

## CAPÍTULO 1

### CORROSÃO DAS ARMADURAS DE AÇO

#### 1.1 Introdução

A deterioração (corrosão) das armaduras é considerada como a manifestação patológica mais atuante em obras de concreto armado.

Durante muito tempo, o conceito de durabilidade foi associado a estruturas com maior resistência. Recentes estudos comprovaram que este vínculo não é verdadeiro, uma vez que concretos com altas resistências nem sempre implicam em concretos duráveis.

O comitê 201 do ACI define que para um concreto ser durável este deverá conservar a sua forma original e a capacidade de utilização quando exposto em seu meio ambiente, mesmo depois de ataques físicos e químicos (MEHTA,1994). Este conceito pode ser complementado com a análise econômica dos custos necessários para a manutenção da integridade das estruturas (BRYANT, 2004).

Modificações na microestrutura com seus efeitos na permeabilidade, apontada por MEHTA (1994) como a chave para a durabilidade, e na estrutura dos poros permitem alterações na vida útil das estruturas, com relação à corrosão e seus efeitos sobre o conjunto.

Neste capítulo, serão apresentados os aspectos gerais da corrosão, entre eles, alguns dos agentes químicos, a formação da pilha eletroquímica e suas reações além do mecanismo de transporte e a cinética do processo.

Também serão descritos neste capítulo aspectos gerais da R.E.A e condutividade elétrica específica, parâmetros importantes na avaliação do potencial de corrosão eletroquímica, bem como as modificações ocorridas sobre estas, em função do tipo de cimento, relação água/aglomerante, umidade e grau de hidratação.

## 1.2 Conceito

A corrosão pode ser definida como a interação destrutiva ou a interação que implique em inutilização para uso, de um material com o ambiente, seja por reação química ou eletroquímica, sendo este referenciado tanto à deterioração do concreto (físico) como das armaduras de aço nele inseridas (química).

Para BASHEER (2002), a corrosão da armadura do concreto é geralmente decorrente da redução da alcalinidade (carbonatação), da lixiviação dos álcalis ou a presença dos íons cloretos em quantidade significativa.

AİTCIN (2000) considera que mesmo a água pura constitui um ambiente agressivo para qualquer concreto, dissolvendo não apenas os cristais de CH (hidróxido de cálcio) formados durante a hidratação do cimento, mas também o C-S-H, através de lixiviação.

A respeito da deterioração do aço, GENTIL e PANOSSIAN apud CASCUDO (1997) apresentam definições diferenciadas quanto à corrosão. O primeiro a admite em alguns casos como o inverso do processo metalúrgico, cujo objetivo principal é a extração do metal a partir de seus minérios ou de outros compostos, baseando-se nas semelhanças existente entre os produtos da corrosão e o minério dos quais foram extraídos. Este conceito é muito semelhante ao de ANDRADE (1992). O segundo a define de forma genérica, como sendo uma transformação de um íon metálico pela sua interação química ou eletroquímica com o meio em que se encontra.

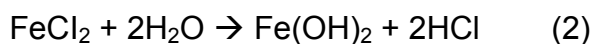
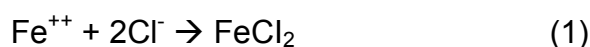
Segundo AİTCIN (2000), a relação água/aglomerante baixa, um bom lançamento e boa cura, é o “Preço” que tem que ser pago para proteger as estruturas de concreto armado contra a corrosão do aço das armaduras.

A medida da R.E.A e o acesso de oxigênio, parâmetros capazes de apontar o potencial de corrosão do aço, serão discutidos posteriormente.

### 1.3 Agentes químicos, a pilha e o processo de corrosão eletroquímico.

No caso específico do concreto, a ocorrência da corrosão eletroquímica deve-se à presença da fase aquosa constituída pelo excesso de água de amassamento (solução dos poros). Esta água poderá ou não conter substâncias químicas nocivas à armadura do concreto. Dentre estas, figuram os sulfatos e os cloretos (mais nocivos ao aço) que, além de estarem presentes nas estruturas da pasta de cimento hidratado, podem ainda migrar (do exterior) por meio da rede de poros até o interior alcançando a armadura. A ação deletéria dos cloretos vai desde a despassivação da armadura até a participação plena no processo corrosivo, aumentando a condutividade elétrica do eletrólito, além de acelerarem o processo e participarem das reações formadoras dos produtos finais de corrosão.

A ativação da superfície do aço pelos cloretos, na qual o próprio aço desempenha a função de ânodo, enquanto a superfície passivada assume a função de cátodo (pilha), pode ser entendida através das reações abaixo.



É importante lembrar que apesar do equilíbrio existente entre as três formas apresentadas por este íon (quimicamente ligado, adsorvido e livre (s) no concreto haverá sempre um teor de cloretos livre (s)) presente na fase aquosa, os quais devem ser tomados como causa de preocupação. A figura 1.1 representa as três formas assumidas pelo cloreto.

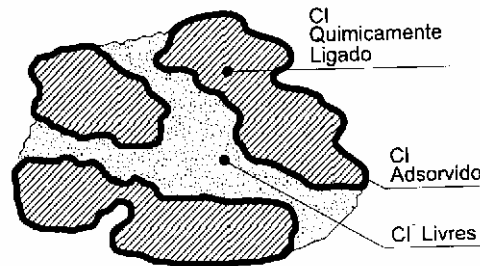
Um elevado teor de cloretos (BASHEER, 2002) bem como a sua mobilidade, atribuídos ao campo eletroquímico gerado pela pilha de corrosão (HELENE, 1993), pode acelerar, de maneira significativa, o processo corrosivo.

A redução do teor de cloretos livres ( $\text{Cl}^-$ ) está condicionada a escolha do tipo de cimento, teor de cimento nas misturas, controle da relação a/agl, quantidade de umidade entre outros. Demais agentes agressivos, como íons sulfetos ( $\text{S}^{2-}$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) entre outros, contribuem sensivelmente para a aceleração da corrosão, aumentando significativamente a condutividade elétrica dos eletrólitos.

O oxigênio ( $\text{O}_2$ ) é o elemento químico indispensável para que ocorram as reações catódicas geradoras dos produtos finais da corrosão (óxido de ferro). Sua

ausência é apontada por CASCUDO (1997) como sendo um obstáculo ao início do processo químico corrosivo. O mesmo autor cita a condição de dissolvido para que seja efetivado o seu consumo.

O acesso bem como as condições para o seu ingresso, será descrito no item mecanismo de transporte e cinética do processo.



**Figura 1.1 – Formas de ocorrência de íons cloreto na estrutura do concreto (CASCUDO,1997)**

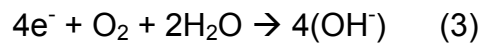
A ocorrência da corrosão eletroquímica está condicionada à formação da pilha eletroquímica. É constituída pelo anodo, onde são processadas as reações anódicas de oxidação, responsável pela formação dos íons metálicos (átomos metálicos) no eletrólito. No cátodo, processam-se as reações catódicas de redução de espécies eletroquímicas ou íons do eletrólito, entre elas, as reduções de oxigênio ou de íons  $H^+$ . A condução da corrente elétrica do ânodo para o cátodo é realizada por um líquido contendo íons denominado de eletrólito.

No processo da corrosão eletroquímica, segundo NEVILLE (1997), acontece uma movimentação dos íons de  $Fe^{++}$  (positivo) do ânodo para a solução, enquanto os elétrons livres,  $e^-$  (negativo) movimentam-se através do aço em direção ao cátodo, onde após a absorção pelos constituintes do eletrólito e a combinação com água e o oxigênio, passam a formar íons de hidroxila ( $OH^-$ ). Estes por sua vez, ao deslocarem-se pelo eletrólito, combinam-se com os íons ferrosos para formarem o hidróxido ferroso que, ao ser submetido à outra reação de oxidação, resulta em hidróxido férrico (ferrugem).

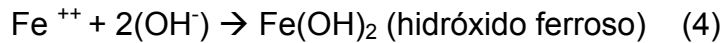
As reações envolvidas no processo que resulta no hidróxido férrico (ferrugem) são as seguintes:



reação catódica:



reações anódicas:



O estabelecimento de uma ligação metálica (armadura), entre o ânodo e o cátodo, permite o escoamento dos elétrons estimulados pela diferença de potencial (ddp). Vários são os fatores geradores das ddp<sub>s</sub>, como a temperatura, o teor de cloretos entre outros. A aeração diferencial é descrita por CASCUDO (1997) como a mais atuante, sendo esta uma consequência das características da estrutura do concreto (Porosidade). As regiões onde o concreto é mais denso desempenham a função de cátodo, enquanto as regiões mais aeradas do concreto (maior porosidade) assumem o papel de ânodo. Na figura 1.2 GENTIL (1996) propõe um modelo de pilha de aeração diferencial. Desta forma verifica-se a forte influência da estrutura dos poros (permeabilidade) sobre o controle do processo de corrosão eletroquímica das armaduras de aço.

A figura 1.3 é uma ilustração da pilha eletroquímica de corrosão do aço em estruturas de concreto armado com seus principais componentes.

ANDRADE (1992) faz considerações importantes com relação às pilhas eletroquímicas, associando seu funcionamento ao de um circuito fechado, de forma que a interrupção em algum dos pontos do circuito (partes integrantes da pilha) traz como consequência a não ocorrência do processo corrosivo.



Figura 1.2 - Modelo de pilha aeração diferencial (GENTIL,1996).

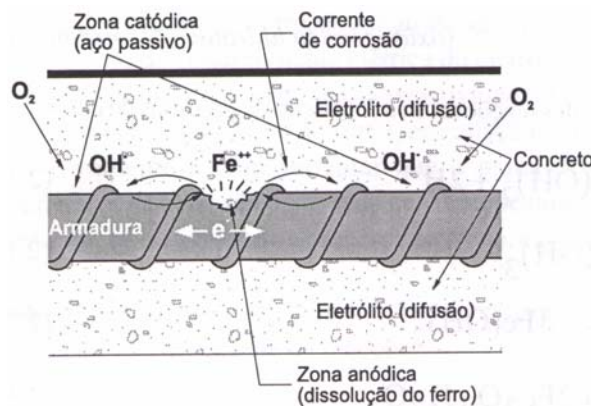


Figura 1.3 - Pilha eletroquímica de corrosão no concreto armado (CASCUDO, 1997)

Dentro da classificação relativa às corrosões, a eletroquímica é a que mais efetivamente traz problemas às obras civis.

Os produtos finais da corrosão, gerados pelas reações de oxidação e redução (ANDRADE,1992), ocupam um volume várias vezes maior do que o aço que lhes deu origem. Segundo, a autora a temperatura e o teor de cloretos são fatores atuantes na formação dos produtos de corrosão. A figura 1.4 ilustra os volumes dos principais produtos presentes na corrosão do ferro de acordo com MEHTA(1994).

Baseados no volume final (ferrugem), a corrosão das armaduras é responsável pela dupla ação destrutiva sobre as estruturas de concreto. Uma delas

relacionada à perda de seção das barras, (escarificação do aço), trazendo como efeito uma redução de sua capacidade de suporte. A outra refere-se ao comportamento mecânico de fissuração do concreto, caracterizado fisicamente pelo desprendimento em lascas ou lâminas, aumentando a facilidade de acesso dos agentes deteriorativos (íons cloretos) ao aço, ocasionando desta maneira um aumento na velocidade da corrosão. Em ambas as situações, a não intervenção poderá levar a um colapso da estrutura.

A figura 1.5 é uma ilustração de ANDRADE (1992) e CASCUDO (1997), demonstrando os tipos de detalhes da morfologia da corrosão.

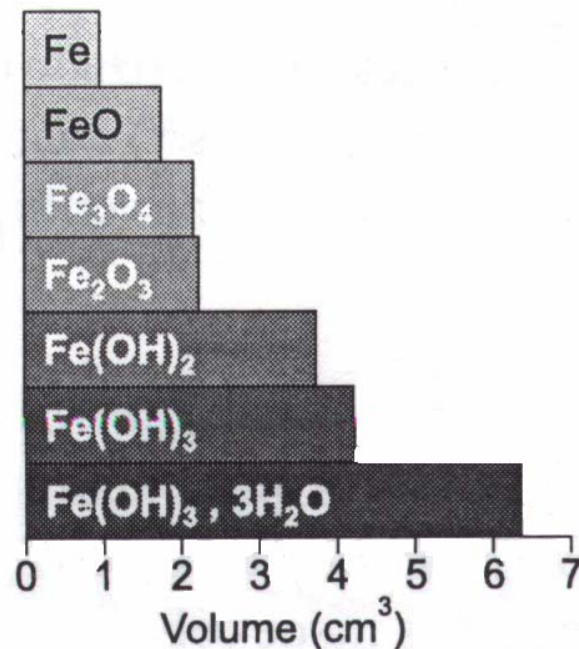
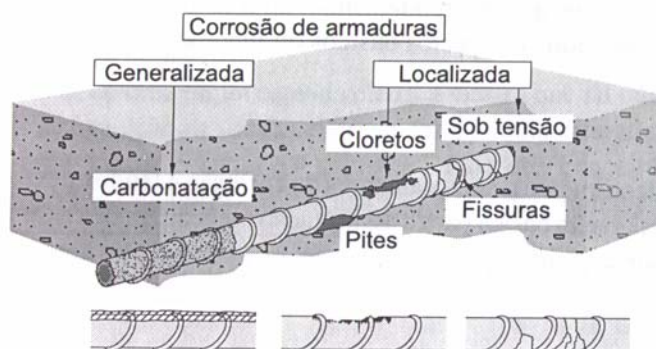


Figura 1.4 - Detalhe demonstrando o volume de alguns dos produtos da corrosão ( MEHTA, 1994)



**Figura 1.5 - Tipos de Corrosão (ANDRADE(1992) e CASCUDO(1997))**

#### **1.4 Mecanismo de transporte e cinética do processo de corrosão**

Neste item serão descritos os mecanismos de transporte dos agentes químicos (oxigênio e cloreto) mais atuantes no processo corrosivo.

A difusão é o processo no qual o movimento de fluidos, gases e íons agressivos é ocasionado por efeito de uma diferença de concentração (NEVILLE,1997), seja entre o meio externo e o interior do concreto, seja dentro do próprio concreto, responsável pelo transporte de cloretos (na forma de íons) e oxigênio, desde que assegurada a interconexão dos capilares e existência de eletrólito (CASCUDO ,1997).

Para NEVILLE (1997) no estado gasoso, a velocidade de difusão (íons) depende do preenchimento do espaço a ser percorrido, sendo mais lento em espaço ocupado por água quando comparado ao ar. O autor relata que a velocidade de difusão do oxigênio é  $10^4$  a  $10^6$  vezes mais lento em fluidos, o que justifica a redução da difusão do oxigênio através do concreto com elevada umidade, tornando mais lento o processo de corrosão em função de seu suprimento. Considerações feitas por NEVILLE (1997) dão conta que as variações das relações água/cimento sobre a difusão, são bem menores do que sobre a permeabilidade. Diversos autores apontam não só cura, mas também a quantia de água presente nos poros como sendo os principais controladores da difusão.

A inexistência da corrosão em concreto seco (baixa umidade) segundo ANDRADE (1992) é atribuída à diminuição de eletrólito, em umidades relativas inferiores a 60%.

Para CASCUDO (1997) a umidade relativa do ar estando entre 70 e 80% é estimulada à ocorrência da corrosão.

Para ANDRADE (1992), o teor de umidade ou a oferta de eletrólito, que por sua vez fixa a disponibilidade de oxigênio nas proximidades da armadura, e a resistividade do concreto são os fatores controladores da cinética da corrosão eletroquímica em meio aquoso.

### **1.5 Resistividade elétrica aparente (R.E.A) e condutividade elétrica específica.**

HELENE (1995) define a resistividade elétrica ( $\rho$ ) como a propriedade elétrica que caracteriza a dificuldade com que os íons se movimentam no concreto, ou seja, controlam o fluxo de íons que difundem no concreto através da solução aquosa presente nos seus poros, sendo altamente sensível ao teor de umidade de equilíbrio e à temperatura do concreto. Resistividade, também chamada resistência específica, é a resistência elétrica de um material homogêneo e isotrópico de seção reta e comprimento unitário.

Dois são as modalidades de resistividade elétrica existentes sendo denominadas de Resistividade Elétrica Aparente e Resistividade Elétrica Volumétrica. Suas diferenças estão baseadas nos locais onde são realizadas as suas medidas. A primeira está ligada à região de cobrimento da armadura (superfície), estando sujeita a ciclos permanentes de molhagem e secagem, e a segunda refere-se à parte interna, onde é identificada uma maior estabilidade no teor de umidade. Entre as duas, HELENE (1993) considera, sob a óptica da corrosão, a resistividade elétrica aparente como sendo a de maior interesse.

LEVY e HELENE (2002) descrevem a resistividade elétrica superficial como uma grandeza que indica maior ou menor probabilidade do início da reação de corrosão da armadura.

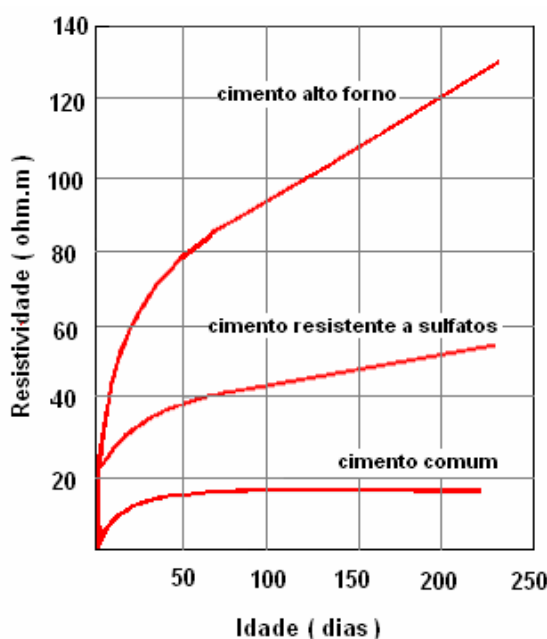
Outros valores de resistividade como os atribuídos às fissuras ou imperfeições do concreto, não serão analisados por serem, segundo ANDRADE (1992), causadores de variações em suas medidas. A autora ainda faz uma associação entre a corrosão e a resistividade, considerando-as como duas grandezas inversamente proporcionais.

ANDRADE (1992) e NEVILLE (1997) relatam à influência da resistividade elétrica sobre a evolução da corrosão do aço. Segundo os autores, as altas taxas de corrosão do aço estão ligadas à queda da resistividade elétrica do concreto.

Para POLDER (2001) a resistividade elétrica do concreto está relacionada à suscetibilidade para a penetração de cloretos. O autor descreve que no interior de uma estrutura os locais com baixa resistividade elétrica indicam onde os cloretos irão penetrar mais rapidamente.

A resistividade elétrica do concreto para WHITING (2003), é um importante componente no controle das células de corrosão do aço. O autor descreve que altas resistividades do eletrólito (no caso do concreto) produzem redução nas correntes e nas taxas de corrosão do aço.

HANSSON e HANSSON (1983) atribuem a resistividade do concreto ao grau de intercomunicação da rede de poros e a elevada concentração de íons  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{OH}^-$  e  $\text{Cl}^-$  na solução dos poros. Os autores, ao estudarem o efeito da composição química do cimento sobre a resistividade elétrica em pasta, constataram que, em pastas de cimento de alto forno, a resistividade era superior à resistividade das pastas com cimento resistente a sulfato e também aos cimentos comuns, figura 1.6.



**Figura 1.6 - Resistividade elétrica de pastas de diferentes tipos de cimentos, à temperatura de 22°C e umidade relativa de 100% (HANSSON & HANSSON,1983).**

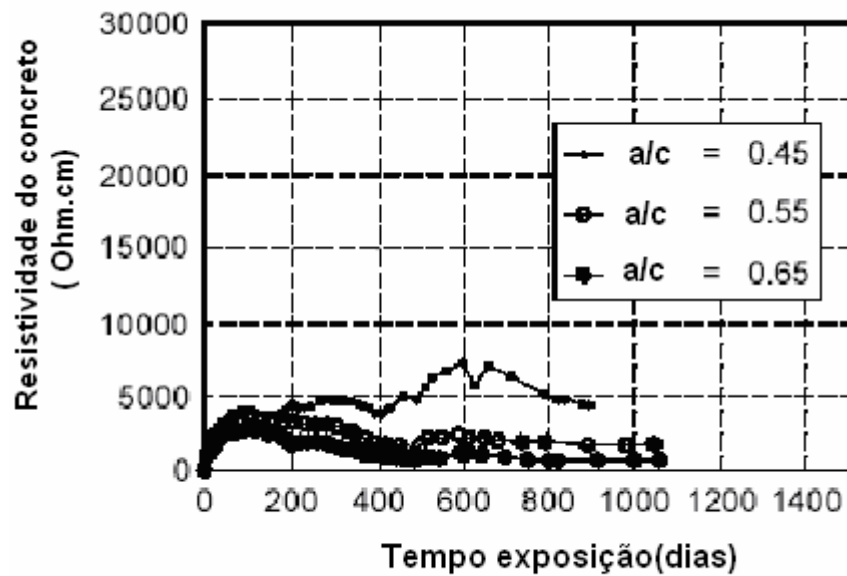
TUMIDAJSKI et al (1996) defendem a natureza da estrutura dos poros, em especial, o tamanho do poro e a tortuosidade da interconexão da rede de poros capilares como fatores influenciadores na resistividade elétrica.

Para NEVILLE (1997), as mudanças na composição química dos cimentos alteram as concentrações dos íons presentes na água evaporável.

Já WHITING (2003) relata que teor de cimento usado no concreto determina o volume de pasta de cimento, e que mudanças no seu teor causarão alterações na resistividade elétrica do concreto. Para o autor o tipo de cimento, o teor de alkalis e de  $C_3A$  são componentes químicos, influentes na resistividade do concreto.

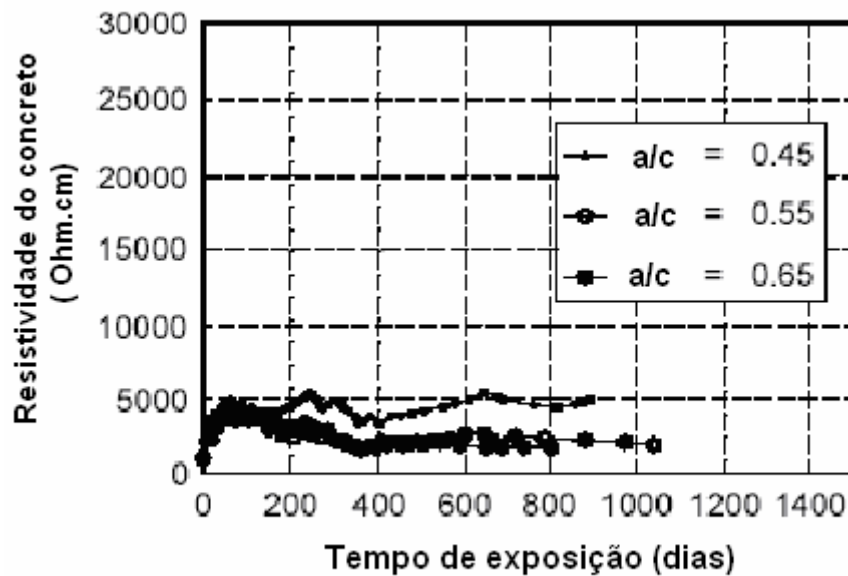
MONFORE (1968) mediu a resistividade elétrica em pasta do  $C_3A$  e do  $C_3S$ . Constatou que a resistividade da pasta de  $C_3A$  era alta especialmente em idade iniciais. O autor atribuiu isto à ausência de hidróxido de cálcio nos produtos de hidratação do  $C_3A$ .

BAWEJA (1996) estudou a influência do teor de  $C_3A$  sobre a resistividade elétrica em concreto com relações  $a/agl$  0,45, 0,55 e 0,65. Para facilitar a análise dos resultados, o autor utilizou na primeira moldagem um cimento Portland com alto teor de  $C_3A$  (9%) e numa segunda etapa um cimento com baixo teor de  $C_3A$  (4,9%). Posteriormente à moldagem, os protótipos foram curados imersos em solução contendo 3% de NaCl ( cloreto de sódio). O autor verificou que em ambas as misturas o comportamento resistivo era o mesmo, destacando que a baixa resistividade das misturas é uma consequência da presença de cloretos no interior das peças e não do teor de  $C_3A$  usado nas misturas. Esta queda na resistividade elétrica pode ser visualizada graficamente através da figura 1.7 e 1.8.



(a) Alto teor de C3A

Figura 1.7 - Efeito do alto teor do  $C_3A$  sobre a resistividade elétrica (BAWEJA et al., 1996).



(b) Baixo teor de C3A

Figura 1.8 - Efeito do baixo teor do  $C_3A$  sobre a resistividade elétrica (BAWEJA et al., 1996).

A penetração de soluções de eletrólitos e gases como o  $O_2$  e o  $CO_2$ , irá ocorrer em regiões mais permeáveis e porosas, tornando a resistividade do concreto baixa. Isto significa dizer que um concreto com alta resistividade elétrica é obtido com baixa porosidade (GENTIL, 1996).

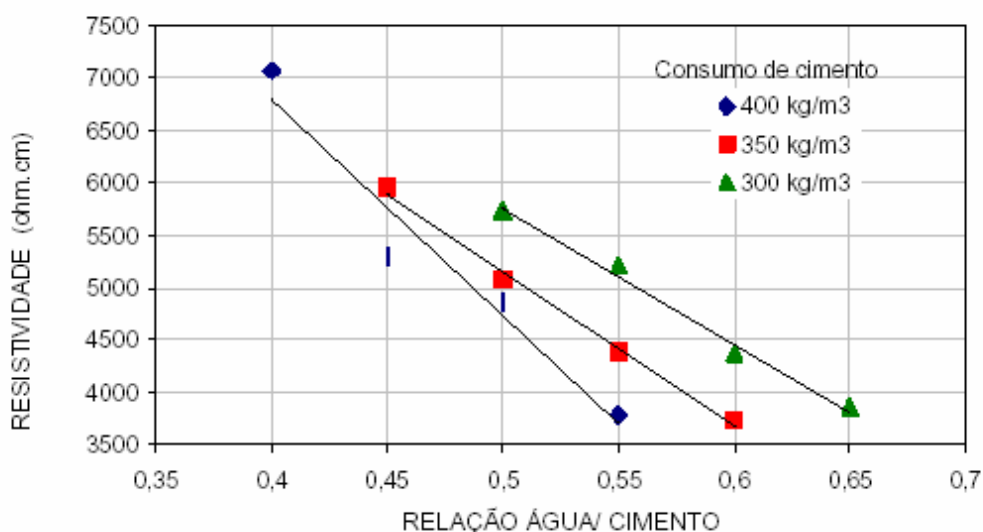


Para CASCUDO (1997), a disponibilidade do oxigênio ( $O_2$ ) nas regiões catódicas é um dos pode ser um obstáculo ao processo de corrosão eletroquímico. A presença de agentes agressivos como os íons cloretos e o dióxido de carbono ( $CO_2$ ) aumentam a condutividade elétrica do eletrólito, contribuindo para acelerar a corrosão. O autor destaca que altas velocidades de corrosão em concretos com elevados teores de umidade (baixa resistividade) é uma consequência da condutividade iônica do eletrólito (fase aquosa).

Para ABREU (1998), a resistividade elétrica do concreto está relacionada à mobilidade dos íons, que poderão circular com maior ou menor facilidade pelo eletrólito a depender do valor da resistividade. A autora ratifica a importância dada por ANDRADE (1992) e CASCUDO (1997) ao oxigênio dentro do processo de corrosão das armaduras de aço, ou seja, quando houver ausência de oxigênio próximo à superfície do aço ocorre uma interrupção do processo de corrosão eletroquímica.

Variações no teor de cimento, relação a/agl, umidade, grau de hidratação são descritas, por NEVILLE (1997), como sendo controladoras da atividade iônica do eletrólito, refletindo-se nas medidas da resistividade elétrica do concreto.

Analisando o efeito da variação da relação água/aglomerante sobre a resistividade, HUGHES et al (1985) constataram que nas misturas com mesmo consumo de cimento uma redução na relação água/cimento causava aumento na resistividade elétrica, figura 1.9.

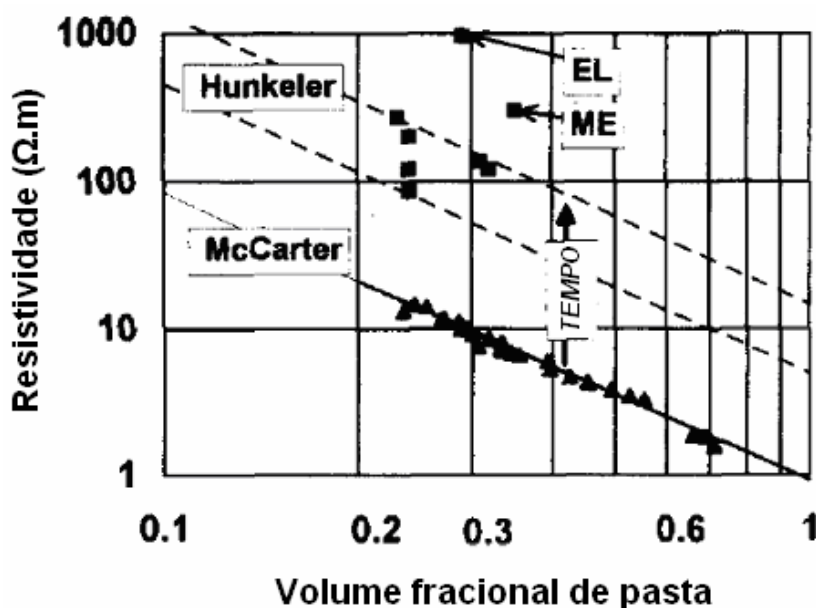


**Figura 1.9 - Relação entre a resistividade elétrica e a relação água/ cimento em concretos de cimento Portland comum aos 28 dias em cura úmida (HUGHES et al 1985).**

Para CASTELLOTE, ANDRADE e ALONSO (2002), o efeito da temperatura sobre o valor da resistividade elétrica do concreto envolve a mobilidade e a interação dos íons na fase sólida. Isto porque em diferentes temperaturas, em condições atmosféricas, o grau de saturação da rede de poros capilares poderá mudar com mudanças na umidade relativa. Outro importante fator é a presença de chuva que em qualquer temperatura pode modificar o teor de umidade do concreto.

Segundo HUNKELER (1996), nem toda a água no concreto ou argamassa é condutora. A água não condutora é a água mantida nos poros do gel ou adsorvida, isto é, fortemente ligada à superfície da pasta de cimento. Assim, para valores de umidade relativa (U.R) de aproximadamente 40% a água existente está adsorvida. Para U.R. maiores do que 40%, a água adicional preenche os vazios capilares. As forças de atração são fracas e essa água é condutora. O autor cita também que o teor de umidade no concreto pode diminuir a resistividade deste, aumentando a taxa de corrosão mais do que o teor de cloretos existente na massa de concreto. LEVY e HELENE (2002) consideram polêmico o descrito pelo autor, pois na prática existem demonstrações de que estruturas a beira mar tem maiores problemas de corrosão do que estruturas construídas em ambientes úmidos.

HUNKELER relata também que a redução no volume da pasta de 1 (pasta pura) para 0,2 a 0,3 nas argamassas e concretos convencionais resulta num aumento na resistividade de aproximadamente 10 a 20 vezes, figura 1.10.



**FIGURA 1.10 - variação da resistividade elétrica em argamassas e concreto versus fração de volume de pasta (HUNKELER ,1996)**

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

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

MONFORE (1968) relata em seu trabalho, a ocorrência de uma redução no volume da água evaporável na pasta em um concreto saturado, passando de 60% no momento da mistura, para 40% após a hidratação completa do cimento. Nesta água, verifica-se a presença dos íons,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{SO}_4^{--}$  e  $\text{OH}^-$ , cujas concentrações variam com o tempo. As concentrações de alguns destes íons apresentam a tendência de aumentar enquanto que a de outros a diminuir. A evolução da hidratação diminui a porosidade e os vazios, que no início eram tomados pelo eletrólito, vão sendo preenchidos pelos compostos que se formam com o transcorrer do tempo, confirmando assim o descrito por CARTER (1981) apud HELENE (1993), ou seja, o aumento da resistividade elétrica por conta do efeito do grau de hidratação da pasta e o tempo de cura.

WEE (2000) cita os íons  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{OH}^-$  presentes na solução dos poros como sendo íons atuantes no aumento e na diminuição da condutividade elétrica específica dependendo apenas de suas concentrações junto a fase aquosa dos poros. O autor descreve ainda em seu trabalho, que embora os íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  possuam alta condutividade, a presença de altas concentrações de íons cloreto de maior condutividade que os anteriores, faz com que aumente bruscamente os valores de condutividade elétrica específica.

A condutividade elétrica do concreto pode ainda, segundo trabalho desenvolvido por PRINCIGALLO et al (2003), ser alterada com modificações no teor de agregados. Os autores, ao estudarem o valor do teor de agregado dentro da faixa entre 10 a 75%, verificou que, à medida que se alterava o teor de agregado (aumento), ocorreu diminuição na condutividade elétrica.

## 1.6 Conclusão

Pesquisadores e estudiosos em corrosão, apresentam conceitos distintos para a corrosão. No entanto, para todos é clara a interligação existente entre a resistividade elétrica e a taxa de corrosão de armadura.

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

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

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

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

## CAPÍTULO 2

### Escória de alto forno, reações de hidratação e ativadores químicos

#### 2.1 Introdução

A fabricação do cimento além de ser um processo produtivo de elevado custo sob o ponto de vista econômico, em função do óleo diesel usado para aquecer os fornos, é prejudicial ao meio ambiente uma vez que a queima deste combustível, por ser de origem fóssil, liberam milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> por ano, na atmosfera. Muitos países em busca da auto-suficiência (equilíbrio oferta-demanda) de combustíveis, promovem ações práticas não só no sentido de descobrir novas jazidas petrolíferas, mas também no que se refere à redução do consumo do próprio combustível. A utilização da escória como constituinte parcial no cimento Portland, é um exemplo a ser citado. Dentro de frações toleráveis, a escória promove um triplo benefício. O primeiro, referindo-se a redução na emissão CO<sub>2</sub> na atmosfera (menor consumo de óleo diesel durante processo fabricação); o segundo refere-se a uma correta destinação sob o aspecto ecológico, de um resíduo e por fim, a mais importante, o aumento da durabilidade das estruturas de concreto armado.

Neste capítulo, serão abordados alguns aspectos ecológicos e energéticos, conceitos, as conseqüências do emprego da escória e o efeito do uso do sulfato de sódio (ativador químico) sobre a resistividade elétrica aparente e condutividade elétrica específica (solução aquosa poros).

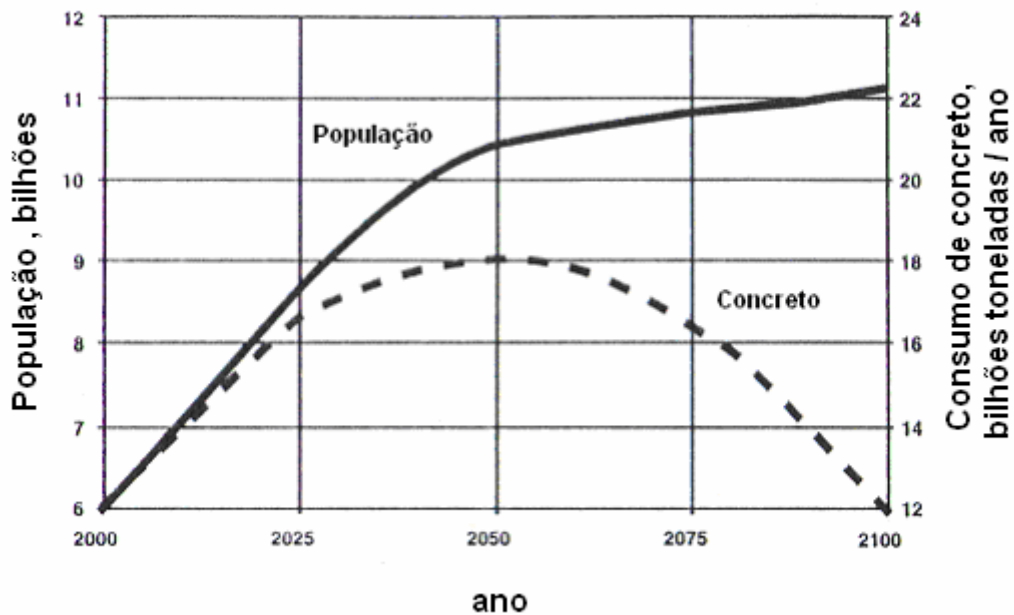
## 2.2 CRIANDO NOVAS ALTERNATIVAS

Nossas escolhas tecnológicas parecem ter sido equivocadas, pois as mesmas privilegiaram metas de curto prazo e limitadas de um empreendimento, ao invés de fundamentarem-se no conjunto das conseqüências do uso desta tecnologia.

De acordo com dados publicados por entidades internacionais, a população cresce a uma taxa considerada por muitos como preocupante. Com o crescimento populacional, em nível mundial, crescem as necessidades de busca por novas tecnologias, a fim de que possam ser atendidas as demandas de consumo. Estatísticas divulgadas recentemente pela Organização das Nações Unidas revelam que o planeta hospeda 19 megalópoles, cada uma delas com aproximadamente 10 milhões de pessoas ou mais, 22 cidades com população entre 5 a 10 milhões de pessoas, 370 cidades com população entre 1 a 5 milhões de habitantes e 430 cidades com população entre 500 mil a 1 milhão de habitantes (MEHTA 2002).

O crescimento populacional e a urbanização contribuíram para a enorme expansão da rede de energia e indústrias, além do setor de transportes durante o século 20.

De acordo com HAWKEN et al (1999) apud MEHTA (2002), somente 6% do consumo total de materiais, aproximadamente uns 500 bilhões de toneladas ao ano, estão de fato terminando em produtos de consumo, enquanto que uma grande quantidade de matéria prima está retornando ao meio ambiente na forma de resíduos sólidos, líquidos e gasosos muito prejudiciais ao nosso clima. O autor faz uma análise comparativa, visualizada na figura 2.1, entre o crescimento da população e do consumo de concreto, e estima uma redução considerável no consumo do concreto no ano de 2050, atribuindo o aumento da durabilidade das estruturas como causa da redução no consumo do concreto.



**Figura 2.1 - Gráfico projeção crescimento populacional e consumo de concreto por ano. (MEHTA, 2002)**

Segundo artigo publicado na revista “CONSELHO EM REVISTA” (CREA/RS, 2004), a importância da conservação ambiental no mundo globalizado alcança patamares cada dia mais elevados nas empresas. A não geração de resíduos e a transparência das ações têm sido exigências cada vez mais frequentes do mercado. Hoje uma indústria precisa investir em melhorias de tecnologia de produção para minimizar a geração de resíduos, e além disto, deve ser transparente em suas ações relativas ao destino desses materiais. Este modelo sugere uma aproximação à lei de 1773 do químico Francês Antoine Lavoisier, onde “Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma”.

### **2.3 A NECESSIDADE DE REDUÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL**

O cimento Portland, principal constituinte do concreto, é o produto de uma indústria que não é só responsável pelo consumo excessivo de energia como também pela emissão de grandes quantidades de CO<sub>2</sub> na atmosfera, promovendo desta forma o aquecimento do planeta através do fenômeno do efeito estufa. Este aumento no efeito estufa foi tema recente abordado por Jefferson Cardia Simões, glaciologista e coordenador do Núcleo de Pesquisas Antárticas e Climáticas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ao apresentar palestra no Seminário

Internacional Protocolo de Kyoto em Porto Alegre. Para SIMÕES (2005) apesar do efeito estufa, ser benéfico no sentido de aprisionar o calor necessário a manutenção da vida na terra, o seu aumento, por conta dos altos patamares de emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera, tem provocado o derretimento de grandes geleiras, fato gerador de preocupação, pois este poderá ser uma ameaça à sobrevivência humana na Terra.

Em uma visão ligada ao aspecto ecológico dentro da indústria do concreto, GARCIA (2004) justifica o uso de escória de alto forno através da sua capacidade de promover no campo ambiental uma redução da emissão de gases poluentes na atmosfera, em valores, a um equivalente de  $75 \times 10^6$  toneladas de CO<sub>2</sub> (considerando-se produção mundial em torno de  $1500 \times 10^6$  toneladas/ano com emissão de aproximadamente 1 kg CO<sub>2</sub>/ kg cimento ). O autor cita que esta redução é uma consequência da substituição relativa a um teor de 5% da massa de cimento Portland, deixando implícito que uma menor emissão de gases poluentes pode ser efetivada á medida que aumentamos os teores de substituição.

Para ROSKOVIĆ (2005) a emissão do CO<sub>2</sub> na fabricação do clínquer pode ser calculada em função da quantidade de CO<sub>2</sub> desprendido. A emissão de CO<sub>2</sub> é segundo o autor, causada pela descarbonização em 71%; à combustão de gás natural contribui com 27% e o consumo de energia elétrica em 2% . O autor ainda afirma que a substituição do clínquer por escória de alto forno em teor de 30% faz com que a taxa de emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera seja reduzida em 29%.

Segundo informações obtidas no site do BNDES, nos últimos anos as empresas têm concentrado investimentos nas áreas de automação industrial e controle de processo, visando reduzir consumos de energia elétrica e combustíveis, além de investimentos em controle de poluição ambiental, bem como a busca de materiais alternativos.

A prática da ecologia industrial tem como objetivos a reciclagem e o reaproveitamento dos produtos desperdiçados por outras indústrias reduzindo assim, o impacto destes sobre o meio ambiente.

A ligação entre o modelo da reciclagem e a indústria do concreto tende a tornar-se cada vez mais fortalecido.

Normalmente o concreto contém aproximadamente 12% de cimento, 8% de água e 80 % de agregado. No total, a indústria do concreto, que usa 12,6 bilhões de toneladas de matéria prima por ano, é o maior usuário de recursos naturais do mundo (MEHTA, 2002).



Existe o consenso de que a redução do impacto causado pela indústria do concreto sobre o meio ambiente pode ser alcançada com duas medidas:

1. Redução do consumo de material (concreto ou cimento);
2. Reciclagem e ou descoberta de novos materiais que possam substituir o cimento.

MEHTA (2002) afirma em seu trabalho, que mais de 1 bilhão de toneladas de resíduos de demolição e construção são gerados todos os anos no mundo.

A existência de tecnologia mais avançada permite a utilização destes resíduos principalmente como substituintes parciais dos agregados em mistura de concreto. Também é possível a utilização de águas provenientes do processo industrial além de águas não potáveis, desde que, comprovado por testes rigorosos, que o seu uso não cause alterações nas características principais do material.

Cimentos Portland compostos com cinza volante (resíduo carvão) e Escória granulada de alto forno (resíduo do ferro gusa) são considerados por muitos como um excelente exemplo de ecologia industrial, porque oferecem uma solução prática para a redução do impacto ambiental de diversas indústrias.

Segundo MEHTA (2002), a indústria da construção já usa misturas de concreto, que contém percentuais de 15 a 20% de cinza volante ou 30 a 40% de escória granulada de alto forno como substituições, em massa, do cimento.

MALHOTRA et al (1994) mostraram que, com materiais convencionais e tecnologia, é possível produzir misturas de concreto de alto desempenho, substituindo-se 50 a 60% de cinza volante em massa do cimento.

Melhoras na eficiência dos recursos da indústria do concreto são possíveis se conseguirmos reduzir as taxas de consumo de concreto através do prolongamento da vida útil de nossas estruturas. Entretanto, isso vai requerer uma reestruturação no setor da construção.

A implementação deste novo modelo carece de um longo tempo, principalmente para que possam ser vencidas algumas barreiras, em especial, às ligadas ao aspecto cultural.

## 2.4 Escória de alto forno

### 2.4.1 Conceito

A escória é o subproduto da indústria siderúrgica e é obtida em estado líquido nos alto-fornos durante a fabricação do ferro gusa podendo, segundo AÏTCIN (2000) ser resfriada lentamente, formando assim cristais de melilita, ou rapidamente, de modo a se solidificar em uma forma vítrea com propriedades cimentícias. Se adequadamente moída e ativada, pode ser incorporada ao concreto em teores, geralmente na faixa de 20 a 100% da massa de cimento Portland (MEHTA, 1994).

A denominação de “Resíduo” que se dá à escória e a outras adições deve ser considerada como circunstancial, pois este termo refere-se a um material sem destino, sendo que a partir do momento em que esse apresente uma aplicação deve ser qualificado como um “subproduto”.  
( BARBOSA, 2004, p.9)

Quanto à característica de seus grãos, o Committee 233 do ACI atribui a predominância do estado vítreo das escórias ao seu rápido resfriamento, uma vez que este atua na diminuição dos cristais, convertendo a escória fundida em partículas finamente divididas. O comportamento cimentício da escória é dependente do seu teor vítreo.

Quimicamente são consideradas por MEHTA E MONTEIRO (1994) como um produto não metálico consistindo essencialmente de silicatos e alumino silicatos de cálcio e outras bases. Sua composição química deve obedecer à relação:

$$\frac{\text{Ca O} + \text{Mg O} + \text{AL}_2\text{O}_3}{\text{Si O}_2} > 1 \quad (6)$$

Para URHAN (1987), uma elevação na relação CaO/SiO<sub>2</sub>, por conta de um menor teor de álcalis, favorece a formação de um gel com baixa capacidade de expansão.

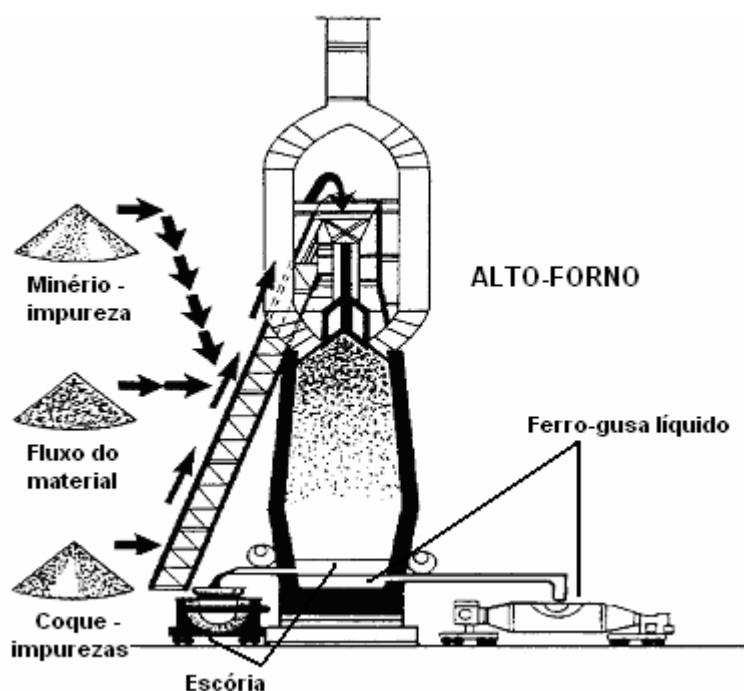
Esta relação permite ainda verificar a reatividade da adição, sendo esta maior quanto maior for este resultado. Lembrando, que a reatividade da Escória de Alto Forno (EAF) está relacionada à sua fase vítrea (amorfa), sendo seu estado (amorfo ou cristalino) uma consequência da história térmica do material.

Sobre a sua incorporação ao concreto, diversas referências bibliográficas as citam como um material de elevado potencial de uso alternativo na indústria do

concreto (MEHTA,1994, NEVILLE,1997), diminuindo assim os impactos ambientais causados pela fabricação do cimento, quer tanto na redução da emissão de gases poluentes ou pela diminuição do consumo de energia nas fábricas de cimento. Vários pesquisadores, dentre os quais alguns brasileiros, confirmam a importância da utilização da escória no campo ambiental e energético.

FIGUEIREDO et al (2002) consideram a adição de escória de alto forno, no campo ambiental, como redutora de poluição, pois a mesma reduz a emissão do CO<sub>2</sub> na atmosfera, durante a etapa de fabricação do cimento e evita a deposição destes subprodutos ou dejetos industriais em aterros.

A figura 2.2 mostra uma representação esquemática de um alto forno, bem como do processo de obtenção da escória de alto forno segundo AÏTCIN (2000).



**Figura 2.2 – Representação de um alto forno (AÏTCIN, 2000 )**

#### **2.4.2 Reações de hidratação**

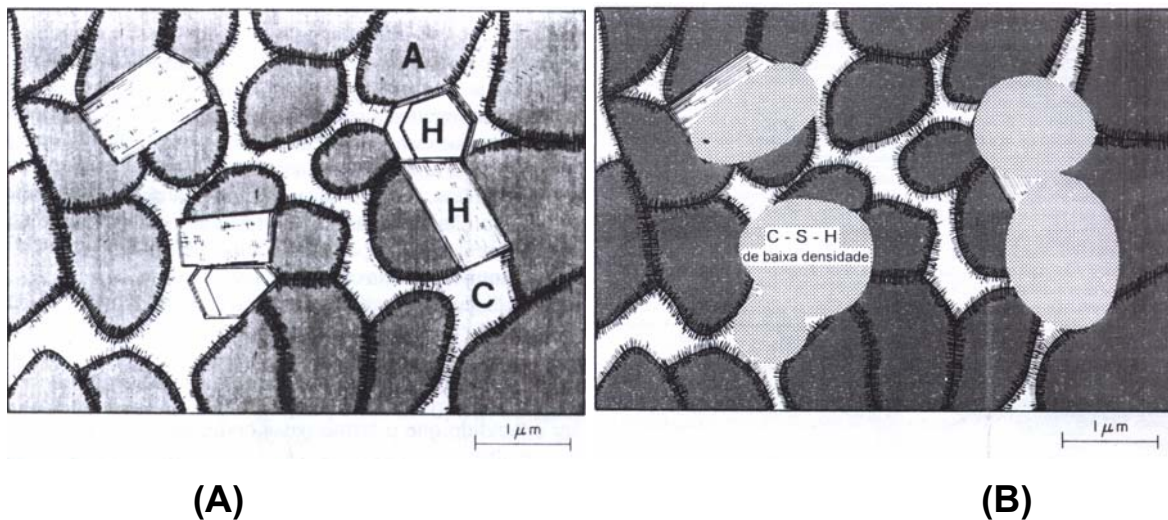
Mesmo sendo caracterizada como de velocidade lenta, as reações envolvendo adições minerais podem ser aceleradas através da sua finura (COSTA, 2001) ou quimicamente, através da utilização de ativadores químicos (SPERB, 2003). Quando usada em combinação com o cimento Portland, tem sua hidratação

acelerada principalmente pela presença do CH e pela Gipsita. Embora classificada como cimentante, as EAF seguem os mecanismos das reações pozolânicas diferenciando-se da hidratação ocorrida com o cimento Portland, quanto à cinética e à formação de estruturas internas finais. As figuras 2.3 e 2.4 proporcionam uma visualização desta distinção.

As reações secundárias são descritas por TAYLOR (1997) como um processo, através do qual forma-se gel de C-S-H pela interação ocorrida entre a adição mineral (EAF) e o CH, liberado durante a hidratação do  $C_2S$  e do  $C_3S$  presentes no cimento.

Reações Químicas	
cimento Portland	$\rightarrow C_3S + H \rightarrow C - S - H + CH$ (reação rápida) $C_2S$
cimento Portland pozolânico	$\rightarrow$ Pozolana + CH + H $\rightarrow$ C - S - H (reação lenta)

**Figura 2.3 – Velocidade e produtos gerados pelas reações do cimento Portland e cimento Portland com adição mineral (MEHTA e MONTEIRO, 1994).**



**Figura 2.4 – Estrutura interna mostrando os produtos de hidratação em pasta de cimento Portland puro (A) e pasta de cimento Portland com adição mineral (MEHTA e MONTEIRO, 1994)**

Para GARCIA (1998), a substituição do cimento Portland por pozolana ou escória promove mudanças notáveis na taxa de hidratação da fase anidro do cimento, bem como no consumo de CH gerado através da hidratação do  $C_2S$ .

A continuidade das reações secundárias depende da quantidade de CH gerada pela reação de hidratação do cimento Portland, de modo que, em elevados teores de substituição do cimento Portland por adições minerais, a quantidade de CH produzida poderá ser insuficiente, que neste caso, ocasionaria, uma interrupção no processo de formação de C-S-H secundário, sob pena de parte da adição mineral, desempenhar apenas o efeito filler (físico) de preenchimento dos espaços vazios.

GARCIA (2004), ao utilizar escória de alto forno em teor de 60% em concreto submetendo-o à cura em temperaturas de 10 e 60°C, verificou que a taxa de consumo da escória depende da temperatura de cura. O autor constatou que na cura a uma temperatura de 10° C, a maior parte dos grãos de escória sofreu pouca hidratação; ao passo que em 60° C, alguns grãos de escória foram totalmente hidratados.

#### **2.4.3 O efeito da utilização da escória de alto forno nas propriedades do concreto fresco e endurecido.**

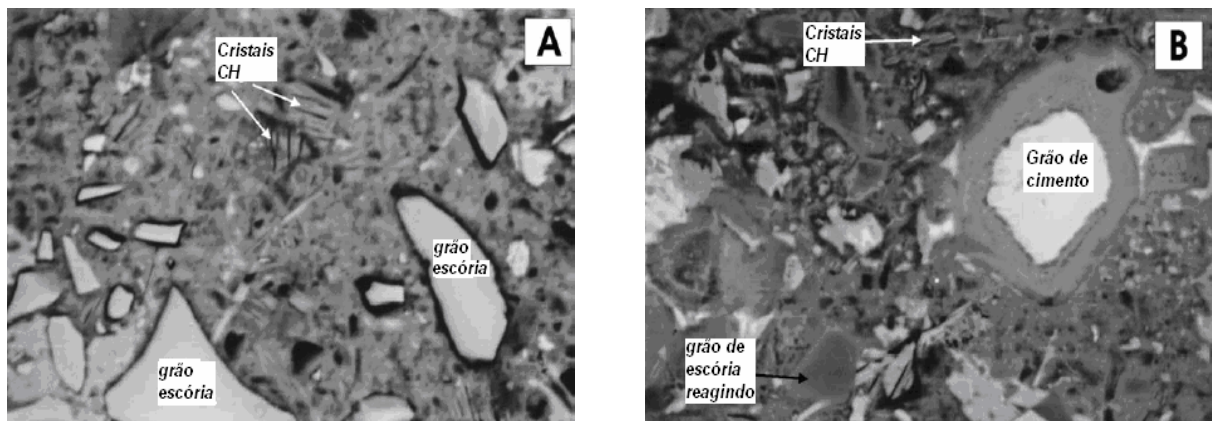
Várias são as vantagens de sua utilização como constituinte nas misturas de concreto. No estado fresco, a utilização da escória melhora a trabalhabilidade por conta do aumento na mobilidade e na coesão das misturas, resultado da maior dispersão das partículas cimentícias.

WAINWRIGHT (2000) comprovou, em seu trabalho, que a substituição parcial do cimento Portland por escória de alto forno em teores de 55 e 85% resultou em misturas com maior abatimento (20 e 40mm) ao passo que no concreto sem adição o abatimento foi pequeno (15mm).

O retardo no tempo de pega depende do seu teor, da relação água/aglomerante e também da temperatura inicial do concreto. A redução do teor de cimento, por conta da sua parcial substituição pela escória, promove no estado endurecido uma maior compacidade da microestrutura (MEHTA e MONTEIRO,

1994), além de diminuição da retração, conseqüência da lenta hidratação da escória (LIM & WEE, 2000).

A mudança na estrutura interna (poros) de misturas que contêm escória depende da temperatura da cura. A figura 2.5 ilustra a constatação deste fato por GARCIA (2004), que analisou as alterações devido à temperatura de cura junto à estrutura interna de misturas contendo 60% de escória de alto forno depois de 1 ano. O autor verificou que mesmo com uma temperatura de cura em 60°C, depois de 1 ano, ainda existem grãos de escória reagindo.



**Figura 2.5 - Imagem ampliada em microscópio eletrônico da estrutura interna depois de 1 ano (A) 10° C (B) 60°C. (GARCIA, 2004)**

Com relação ao calor de hidratação, SCHINDLER (2005) analisou misturas contendo diferentes teores de escória e constatou que todas as misturas apresentaram menor calor de hidratação do que a mistura de referência (0% escória). O autor verificou que quanto maior o teor adicionado à mistura melhor foi o seu comportamento com relação ao calor de hidratação (menor).

Variações na superfície específica (finura) e nos teores de substituição agem de modo a alterar o calor de hidratação e a resistência à compressão das misturas.

SAKAI et al (1992), utilizando escória com diferentes superfícies específicas 300, 400, 500, e 600 m<sup>2</sup>/kg e com teores de substituição de 50, 60, 70, e 80%, constataram que a adição de escória junto ao cimento diminui o calor de hidratação e tem influência sobre a resistência. Verificaram que o aumento da mesma está

relacionado com a sua finura, concluindo desta forma que, a partir do teor e da finura da escória, pode-se fabricar cimentos com menor calor de hidratação que os convencionais.

Ao estudar misturas com EAF em teor de 70%, FELDMAN (1983) verificou um melhor desempenho (resistência mecânica e durabilidade do conjunto) quando comparados aos concretos de cimento Portland. Isto por ocorrer diminuição nas concentrações de CH e no refinamento dos poros resultando em uma microestrutura de baixa permeabilidade.

WEI et al (2004), em seu trabalho com EAF, verificaram um decréscimo na taxa de hidróxido de cálcio (CH), atribuindo este fato ao seu consumo pela adição mineral contida no concreto, em especial com o aumento da idade.

ISAIA e GASTALDINI (2002), em trabalho com adição mineral em misturas de concreto, verificaram modificações na microestrutura, com alteração na distribuição de tamanho dos poros, mudanças no pH, além de alteração no teor de CH remanescente. Este conjunto de modificações é apontado pelos autores, em concordância com MEHTA (1994), como uma consequência dos efeitos químicos (reações de hidratação e pozolânica) e físicos (obstrução e defloculação), ambos dependentes do tipo e da quantidade da adição mineral na mistura.

A idade, a quantidade, a reatividade (XINCHENG,1999 , WEI et al 2004 ) e a cura ( KJELLEN e DETWILLER,1992) das misturas que contém escória são fatores controladores da estrutura dos poros. Se bem determinados, resultam em aumento de compacidade da estrutura interna, proporcionando acréscimos na resistência à compressão ainda em idades iniciais.

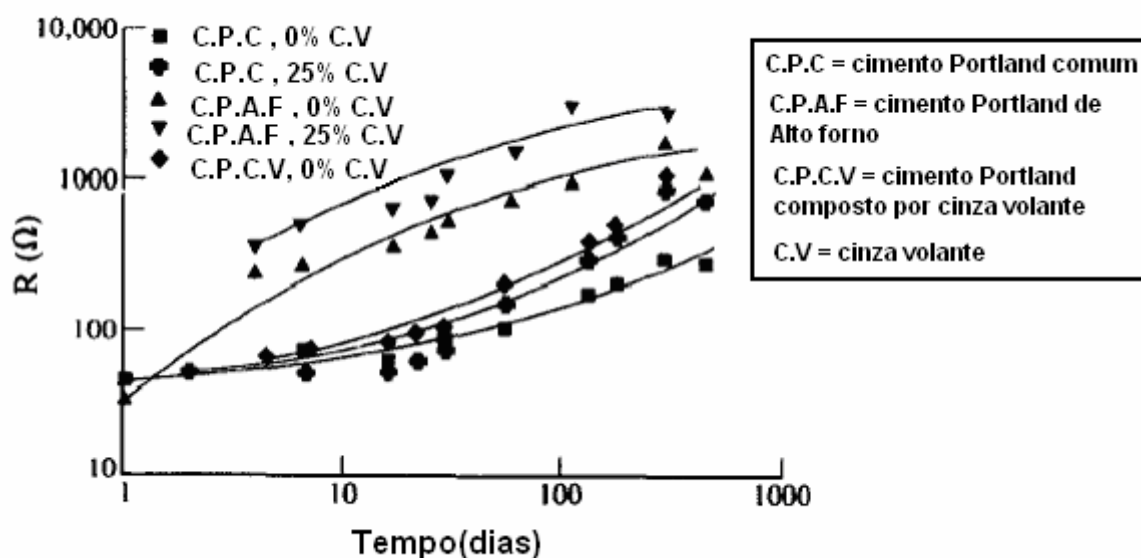
## **2.5 Influência da EAF na resistividade elétrica aparente**

A menor quantia de CH em concretos com adição mineral em relação a concretos sem adição mineral é atribuída por NEVILLE(1997) como uma das causas da elevação da sua resistividade elétrica aparente.

A superioridade da resistividade elétrica de misturas que contém E.A.F com relação a concretos de cimento Portland comum é, segundo MALHOTRA (1987), uma decorrência da ajuda desta, na transformação dos grandes poros da pasta em poros menores.

HOP e IP (1987), apud HELENE (1993) constataram que em concretos com a adição de E.A.F houve um aumento significativo na resistividade elétrica. Quando examinado o desempenho de prismas armados, durante um período de 200 dias, submetidos a diferentes condições de armazenamento e sob ciclos de molhagem em banhos de cloreto de sódio, seguidos de secagem ao ar, os autores constataram que os prismas confeccionados com concreto de cimento Portland comum com a adição de 25% e 50% de EAF apresentaram resistividade elétrica superior a concretos sem E.A.F.

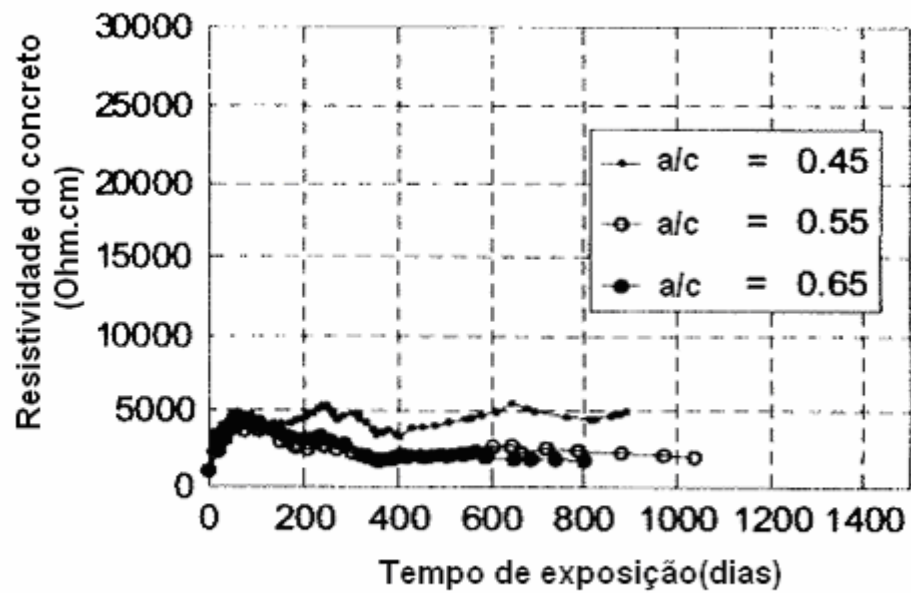
BIJEN (1996) investigou a resistividade elétrica de concretos compostos com cimento Portland comum e de alto forno (CPAF). Observou que aqueles compostos com CPAF apresentaram resistividade elétrica superior àqueles compostos com cimento Portland comum. A adição de 25% de cinza volante ao CPAF(CPAF, 25%CV) resultou em incrementos significativos na resistividade elétrica do concreto, figura 2.6.



**Figura 2.6 - Gráfico efeito do teor de E.A.F e C.V sobre a resistividade elétrica (BIJEN ,1996).**

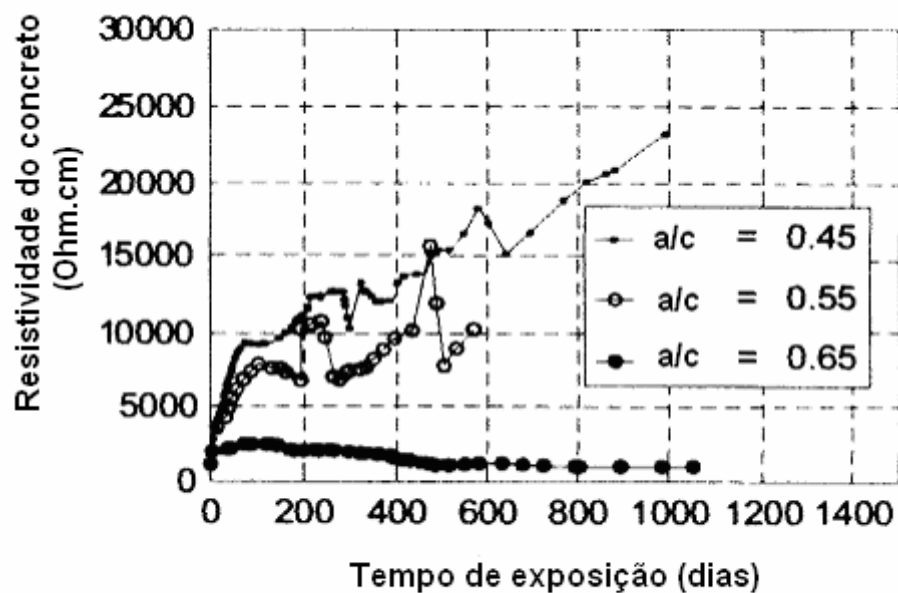
Estudos de BAWEJA et al (1996) em concreto contendo escória de alto forno em teor de 35%(b) mostraram, conforme figura 2.7 e 2.8, uma superioridade da resistividade elétrica desta em relação aos concretos sem adição de E.A.F(a). Estes aumentos são mais significativos em baixas relações água/aglomerante.





(a) concreto de cimento Portland (0% E.A.F)

Figura 2.7 - Concreto sem adição de E.A.F com respectivo reflexo na resistividade elétrica. BAWEJA et al (1996).

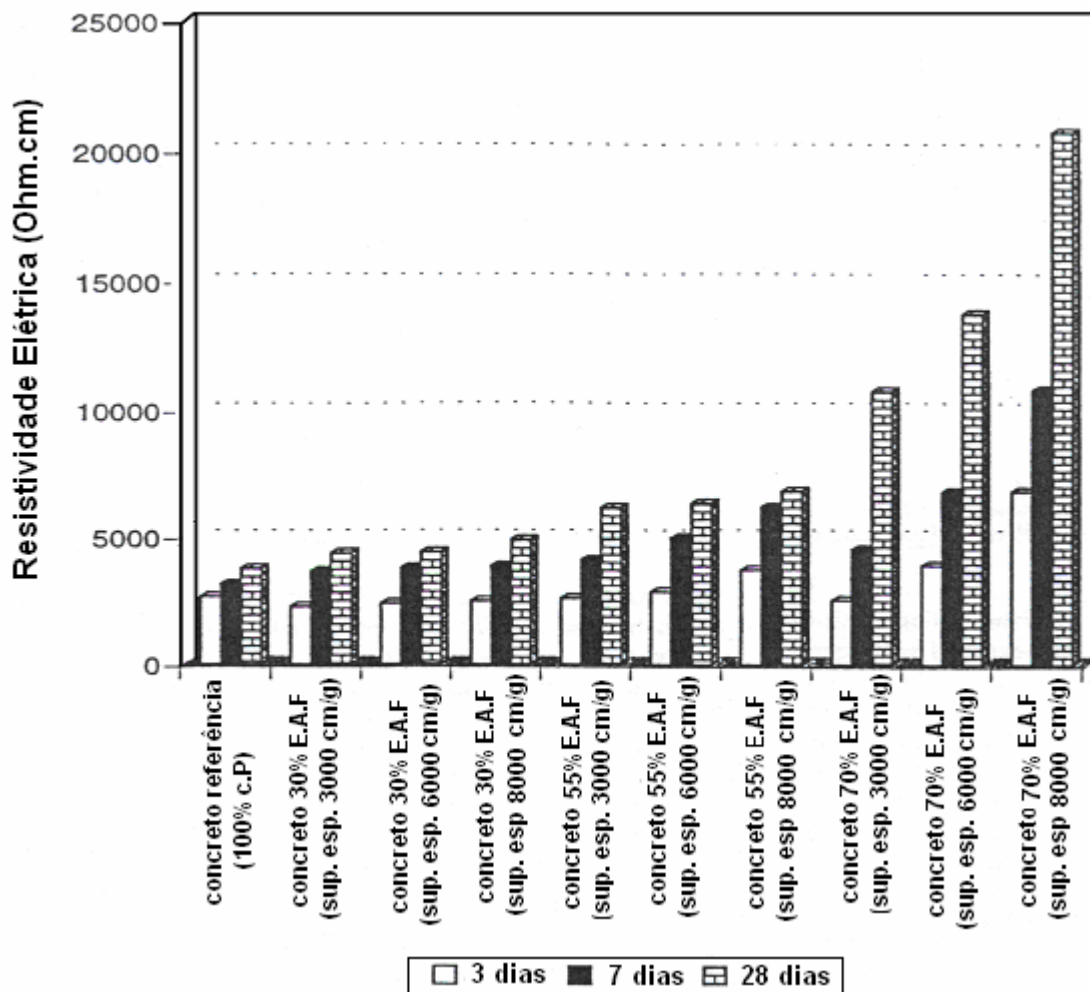


(b) concreto com escória (35% E.A.F)

Figura 2.8 - Concreto com adição de 35% de E.A.F e seu respectivo reflexo na resistividade elétrica. BAWEJA et al (1996).

WEE et al (2000) analisaram a influência do teor, finura e idade de concretos contendo E.A.F sobre a resistividade elétrica. Concluíram que, em igualdade de cura, a resistividade elétrica aumenta com o aumento da finura e do

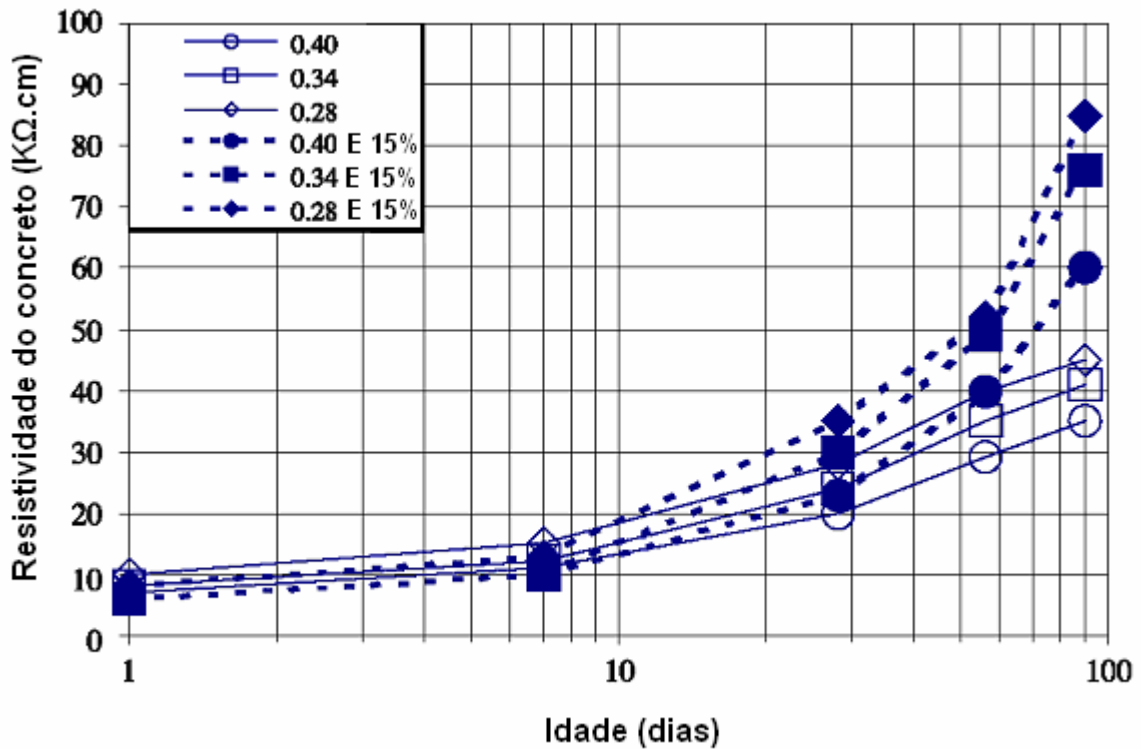
teor de escória nas misturas. Neste trabalho o teor de substituição de 70% apresentou os melhores resultados na resistividade elétrica. Outrossim, constatou que a variação da resistividade em menores teores (até 55%) parecem ser menos sensíveis à variação da finura e idade, isto em igualdade de substituição. A figura 2.9 ajuda na visualização das conclusões do autor.



**Figura 2.9 - Adaptação em gráfico de WEE(2000) demonstrando a influência do período da idade, teor e finura das escórias sobre a resistividade elétrica.**

WEI et al (2004) ao estudarem a resistividade elétrica em concreto com baixas relações água/aglomerante (0,28, 0,34 e 0,40) e com teor de escória de 15% constataram um aumento brusco na resistividade elétrica depois dos 28 dias. Este aumento foi mais acentuado nas menores das relações água/aglomerante usadas nas misturas. Os autores atribuem o aumento da resistividade aos efeitos da

solidificação promovidos pela reação de hidratação da escória. A figura 2.10 permite uma análise mais detalhada das conclusões deste trabalho.



**Figura 2.10 - Resultados da resistividade elétrica segundo WEI(2004).**

SMITH (2004) em estudo para avaliar o efeito de adições minerais (escória, cinza volante e sílica ativa) no comportamento resistivo do concreto, verificou que em mistura binária contendo EAF em teor de 35% a resistividade elétrica do concreto apresentou um valor maior do que a mistura de referência. O autor justifica que o aumento da resistividade em todas as misturas analisadas é uma consequência da maturidade dos concretos (aumento na idade).

A confirmação da variável grau de hidratação (idade), é claramente evidenciada em trabalho realizado por MISSAU (2004), que constatou um aumento da R.E.A de misturas binárias contendo 50% de E.A.F quando comparadas as misturas de referência. O autor descreve acréscimos de 122 e 161% aos 28 e 91 dias, respectivamente.

Recentemente GÜNEYISI et al (2005) utilizaram em misturas de concreto EAF, calcário e pozolana natural. A composição das misturas é visualizada na tabela 2.1. Na tabela 2.2 está o proporcionamento dos materiais por metro cúbico de concreto utilizado nas moldagens. O teor de EAF adicionado foi de 48,3% na mistura B5, conforme tabela 2.1.

Em todas as misturas foram moldadas 02 (duas) séries de concreto com relação água/aglomerante diferenciadas, 0,45 e 0,65 representados por H e B na tabela 2.2.

Para uma melhor avaliação do efeito da cura sobre a resistividade elétrica, após a moldagem os cp's foram submetidos a três distintos modos de cura:

- 1) UC – nesta, não houve nenhuma preocupação com relação ao controle de temperatura e umidade de cura até a idade do ensaio.
- 2) CC – nesta modalidade os cp's foram curados imersos em água com temperatura  $20 \pm 2^\circ \text{C}$  por 7 dias e depois curados ao ar em uma sala a uma temperatura de  $20 \pm 1^\circ \text{C}$  e umidade relativa de  $50 \pm 5 \%$  até a data do ensaio..
- 3) WC – foi realizada uma cura úmida, onde os cp's foram imersos em água com temperatura de  $20 \pm 2^\circ \text{C}$  até a data de ensaio.

A figura 2.11 demonstra graficamente o efeito da relação a/agl, idade e o tipo de cura sobre a resistividade elétrica.

Com os resultados obtidos nesta pesquisa os autores concluíram que o tipo de cimento, a relação água/aglomerante, idade do concreto além das condições de cura tem efeitos significantes na resistividade elétrica do concreto. O comportamento da mistura contendo escória de alto forno foi o que apresentou o melhor desempenho, superando inclusive o apresentado pela mistura B2(cimento+EAF+calcário+pozolana Natural).

Tabela 2.1 – Composição dos cimentos usados por GÜNEYİSİ et al (2005).

Composição dos cimentos (% peso)					
Composição	Fração dos componentes no cimento				
Tipo de cimento & (Turkish EH 197-1)					
PÇ 42.5 & CEM I	PKÇ/A 42.5R & CEM II/A-M	PKÇ/B 42.5 & CEM II/B-M	KZÇ/A 42.5 & CEM V/A	ÇÇ 42.5 & CEM III/A	
Código do Experimento					
	B1	B2	B3	B4	B5
Clinker, K	95.5	78.7	70.5	57.5	46.7
Escória de Alto Forno, S	0	2.0	13.0	21.8	48.3
Calcário, L	0	11.9	0	3.0	0
Pozolana Natural, P	0	3.2	13.0	12.6	0
Gesso	4.5	4.2	3.5	5.1	5.0
Total (%)	100	100	100	100	100

Tabela 2.2 - Quantidade de materiais por m<sup>3</sup> de concretos utilizados por GÜNEYISI et al (2005).

Séries	Código	Constituintes da mistura(Kg/m <sup>3</sup> )							SP*
		a/c	cimento	água	Agregado Graúdo		Agregado Miúdo		
					No. I	No. II	Natural	Artificial	
1	N-B1	0.65	308.1	200.3	558.3	616.0	537.6	191.8	0.77
	N-B2	0.65	302.8	196.8	547.8	604.4	527.5	188.2	0.76
	N-B3	0.65	304.7	198.1	548.6	605.4	528.3	188.5	0.76
	N-B4	0.65	306.5	199.2	552.9	610.1	532.4	189.9	0.77
	N-B5	0.65	306.4	199.2	549.7	606.5	529.3	188.8	0.77
2	H-B1	0.45	405.4	182.4	536.2	591.6	516.3	184.2	3.04
	H-B2	0.45	399.6	179.8	527.5	582.0	507.9	181.2	3.00
	H-B3	0.45	399.5	179.8	523.7	577.9	504.3	179.9	3.00
	H-B4	0.45	400.7	180.3	526.0	580.4	506.5	180.7	4.01
	H-B5	0.45	399.8	179.9	521.0	574.9	501.7	179.0	4.00

\* SP = Superplastificante

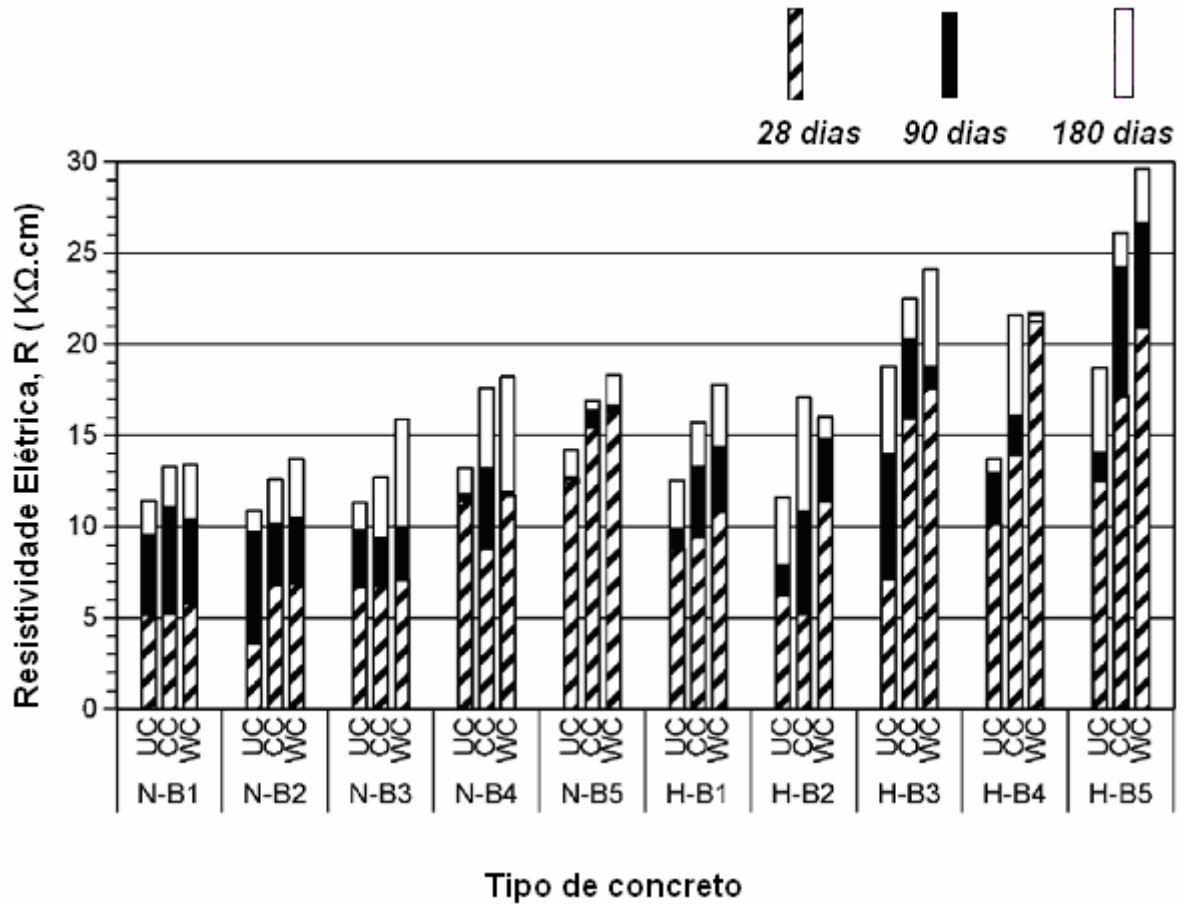


Figura 2.11 - Gráfico de GÜNEYISI et al (2005) demonstrando a influência da cura, relação água/aglomerante e idade sobre a resistividade elétrica em concretos com diferentes tipos de adições minerais.

## 2.6 Influência da E.A.F na condutividade elétrica específica (solução dos Poros)

O uso de adições minerais como a EAF, sílica ativa, cinza volante ou pozolanas naturais são consideradas por DIAMOND (1983) e SHEHATA(1999) como responsáveis pela redução na concentração de íons na solução química dos poros do concreto, dependendo da dosagem e composição química das adições.

SHI, STEGEMANN e CALDWELL (1988) investigaram os efeitos das adições minerais na solução aquosa dos poros em diferentes idades. Observaram no período inicial da hidratação, altas concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{OH}^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  dos componentes do cimento. Logo em seguida observaram uma diminuição nas concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ , resultando em uma solução exclusivamente composta em sua grande parte por hidróxidos alcalinos. Estas alterações aliadas à mudança na condutividade elétrica nas misturas investigadas, fizeram com que os autores comprovassem a influência do teor e do tipo de adição utilizadas nas misturas.

Segundo BIJEN (1996), em geral a solução dos poros de misturas contendo escória e cinza volante é menos alcalina. Entretanto, isto não é devido a menor quantidade de constituintes alcalinos e sim pelo fato do sódio e o potássio estarem ligados às fases hidratadas.

MCCARTER (2000), ao analisar o comportamento das adições minerais ao concreto, verificou que a adição de E.A.F em teor de 50% causou uma redução na concentração dos íons na solução dos poros. Como resultado o autor constatou uma menor condução elétrica aos 100 dias, nesta mistura, quando comparado à mistura de referência (0%E.A.F).

A redução na concentração do íon  $\text{OH}^-$  (íon de maior condutividade elétrica) é apontado por WEE (2000) como o responsável pela diminuição da condutividade elétrica dos concretos contendo escória de alto forno.

A condutividade elétrica em misturas contendo escória é influenciada também pela temperatura de hidratação. Este fato foi constatado por SALEM (2001) que ao estudar o efeito da escória sobre a condutividade elétrica, concluiu que a condutividade aumentou, quando ocorreu aumento na temperatura de hidratação acima de  $50^\circ\text{C}$ , nos períodos iniciais de hidratação.



Recentemente COSTA (2001), GOMES (2003) e MISSAU (2004) constataram em seus experimentos com escória de alto forno uma redução na condutividade elétrica da solução dos poros.

SHI (2004), ao analisar a condutividade elétrica específica em misturas com teores de 35 e 50% de E.A.F, verificou que no teor de 35% houve uma pequena variação na condutividade elétrica com o aumento da idade, o mesmo comportamento não foi válido para a mistura que continha 50% de E.A.F, onde o autor observou as maiores variações na condutividade elétrica específica com o aumento da idade. A figura 2.12 permite a visualização desta conclusão.

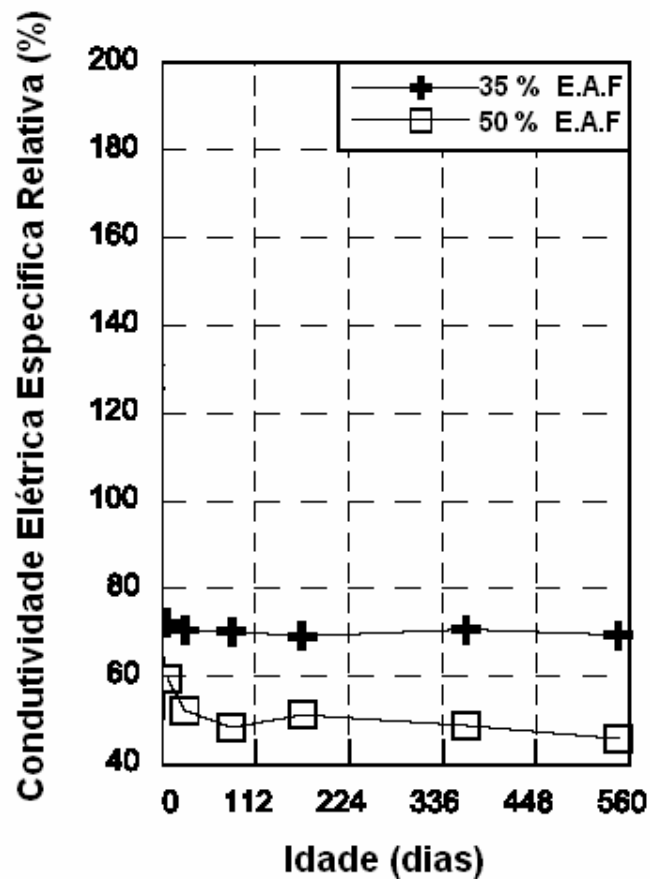


Figura 2.12 - Variação da condutividade elétrica específica em misturas com 35 e 50% de E.A.F. (SHI, 2004).

## 2.7 Ativadores químicos

A escória de alto forno tem seu poder hidráulico em estado latente e a presença de um catalisador acelera as reações de hidratação.

Diversos são os métodos a serem adotados para a ativação da escória de alto forno. Entre estes podemos citar a temperatura, produtos químicos e os próprios compostos do cimento hidratado.

REGOURD (1980) descreve que a ativação da escória pode ser obtida através do aumento da sua temperatura denominado neste caso de ativação térmica, processo destinado à aceleração da cinética da reação de hidratação.

No que se refere à ativação química, é importante deixar esclarecido que a função da utilização do ativador químico é de desempenhar o papel de um catalisador das reações secundárias, atuando exclusivamente sobre a velocidade das reações (aumentando), portanto, sem participação na composição química dos produtos formados.

Segundo JOHN (1995) a aceleração do processo de hidratação das escórias por meio químico se dá pela combinação de dois fatores:

- a) elevação da velocidade de dissolução através da elevação do pH;
- b) antecipação do início de precipitação dos compostos hidratados devido ao aumento da concentração de íons na solução já no início do processo de dissolução ou pela alteração da solubilidade dos compostos da escória.

Sabe-se que o hidróxido de cálcio (CH), liberado pela hidratação do  $C_3S$  e  $C_2S$ , a gipsita, álcalis (NaOH), sulfatos alcalinos ( $Na_2SO_4$  e  $Ca_2SO_4$ ) entre outros são os ativadores químicos mais comumente disponíveis.

A diferença existente entre os sulfatos é descrita pelas alterações produzidas no pH, o sulfato de sódio ( $Na_2SO_4$ ) tende a aumentar o pH, enquanto que o uso do sulfato de cálcio ( $Ca_2SO_4$ ), como ativador químico, não eleva significativamente o pH, por isso é considerado como um complemento químico na ativação da E.A.F (MELLO, 2002).

FERNÁNDEZ et al (1999), ao estudar concreto contendo escória de alto forno verificaram que o desenvolvimento da resistência depende primeiramente da natureza do ativador, seguido de sua concentração, temperatura de cura e superfície específica da E.A.F.

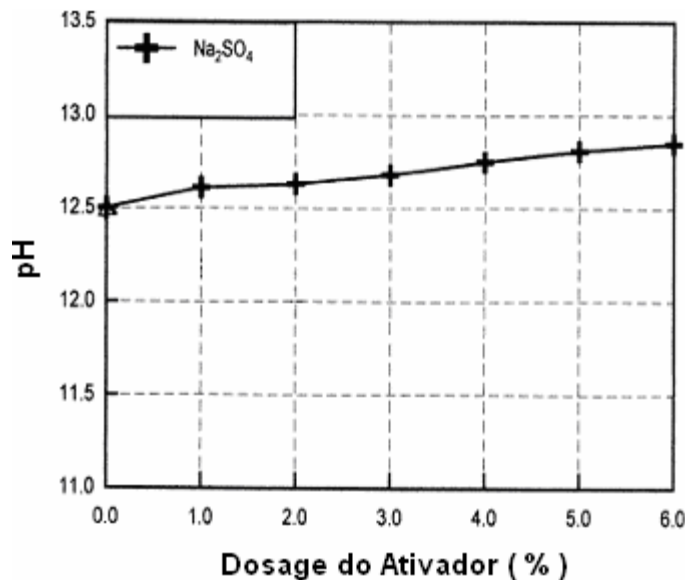
Neste t3pico ser3o abordados aspectos relacionados 3 a utiliza3o do ativador qu3mico sulfato de s3dio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) por ser este o utilizado no trabalho de pesquisa.

A rea3o3o abaixo ocorre logo ap3s o sulfato de s3dio entrar em contato com o CH em presen3a de 3gua



Nesta rea3o3o, o sulfato de s3dio reage com o hidr3xido de c3lcio e a 3gua, resultando em sulfato de c3lcio e hidr3xido de s3dio.

SHI (2000), ao analisar a influ3ncia da utiliza3o do sulfato de s3dio como ativador qu3mico em pastas contendo adic3o3es minerais, verificou um aumento no valor do pH (aumento da alcalinidade) do meio 3 medida, em que se aumentava o teor do ativador. Os valores do pH variaram entre 12,50 e 12,75. Isto permite um acr3scimo na dissolu3o3o das pozolanas al3m de aumentar a velocidade das rea3o3es pozol3nicas nos per3odos iniciais da hidrata3o3o. A figura 2.13, baseada em uma adapta3o3o no gr3fico do autor, demonstra o efeito da varia3o3o do pH com o teor de ativador (sulfato de s3dio).



**Figura 2.13 - Adapta3o3o em gr3fico de SHI (2000) mostrando a varia3o3o do pH com o teor de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .**

Para PUERTAS (2000) a diferença entre o gel de silicato de cálcio hidratado formado após a reação de E.A.F ativadas com álcalis é a menor relação Ca/Si desta, em relação ao do C-S-H da hidratação do cimento. O autor ainda cita que as condições de cura, composição química da E.A.F, bem como o tipo e a quantidade do ativador são responsáveis pela formação de novos produtos durante a hidratação.

SPERB (2003) comprovou, através de pesquisas que a utilização, em teores de 4%, do sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) em misturas binárias com 70% de escória, proporcionou um aumento médio de 51% na resistência aos 7 dias, quando comparadas à mesma mistura sem ativador.

GOMES (2003), ao investigar a condutividade elétrica de concreto contendo escória ativada com sulfato de sódio (4%), constatou na solução dos poros um aumento nas concentrações dos íons  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{OH}^-$ , bem como uma redução dos íons  $\text{K}^+$  e  $\text{Ca}^{2+}$  quando comparados à mistura de referência.

Neste instante, cabe deixar registrado que apesar de inúmeras pesquisas a artigos, livros e outros, não foi possível encontrar bibliografia que abordasse sobre a influência do uso de ativadores químicos sobre a resistividade elétrica do concreto.

## 2.8 Conclusão

O emprego da E.A.F como parte constituinte no cimento é um grande advento na redução do consumo de energia e também para a diminuição da poluição (emissão de gases na atmosfera). Suas características físicas e químicas podem ser decisivas para uma melhor eficácia quando utilizada em concreto. Na resistividade elétrica e na condutividade elétrica específica dos concretos é ocorre uma melhora, principalmente em relação ao melhor controle do processo de corrosão. Mudanças na estrutura interna, tais como redução na conectividade capilar dos poros (refinamento poros) e na concentração iônica da solução dos poros, são os mais freqüentes benefícios proporcionados pelo uso da E.A.F em misturas de concreto.

Embora a E.A.F apresente menor reatividade que o cimento Portland, o emprego do sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), como ativador, age sobre a cinética das reações tornando-as mais velozes. Além de propiciar maior velocidade às reações, o uso do ativador reflete em alterações significativas do pH da estrutura, favorecendo a manutenção da camada passiva (protetora) do aço.

Por fim, a utilização de E.A.F em conjunto com ativadores químicos em concreto, sem quaisquer preocupações com a dosagem, a cura e o próprio teor do ativador, pode gerar resultados nem sempre positivos junto à durabilidade das estruturas.

## CAPÍTULO 3

### INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Introdução

A necessidade de obterem-se estruturas mais duráveis e resistentes tem motivado a realização de inúmeras pesquisas em concreto. Dentro deste novo modelo, parece ser cada vez mais forte a ligação entre tecnologia e o meio ambiente.

O concreto como material protetor que culminará ou não em maior proteção para a as armaduras de aço (corrosão), é nosso principal objeto de estudo. Alterações na estrutura interna por conta de adições minerais, em especial a escória de alto forno, com diferentes teores, nos permitirão analisar a resistência á compressão, a resistividade elétrica aparente e a condutividade elétrica específica, as duas últimas, propriedades ligadas ao mecanismo de deterioração do aço. Dois foram os teores de substituição adotados nesta pesquisa, sendo estes 50 e 70% em relação à massa de cimento Portland.

Foram preparadas quatro misturas, uma de referência (sem adição) e as outras duas contendo teores de 50% e 70% de E.A.F, com três relações água/aglomerante cada uma. Na quarta mistura buscou-se analisar a influência do ativador ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) em teor de 4 % , nas misturas com teor de 50% de E.A.F. O tipo de ativador e o teor utilizado foram definidos a partir de trabalhos já realizados anteriormente a este.

Com relação à resistividade elétrica aparente, os experimentos foram baseados no método Werner dos quatro eletrodos, para o caso específico do concreto. A condutividade elétrica específica foi determinada a partir da concentração dos íons na solução dos poros.

Todas as características dos materiais utilizados neste trabalho, os traços de concreto além dos ensaios de laboratório serão abordadas no decorrer deste capítulo.

## 3.2 Variáveis envolvidas na pesquisa

Na metodologia de uma investigação científica é imprescindível, para se alcançar os objetivos pré-estabelecidos, a definição e a quantificação das variáveis envolvidas, conforme a seguinte relação:

### 3.2.1) Variáveis Independentes

São aquelas que não só determinam à relação sólido/espaco na pasta, mas também o seu grau de compacidade.

3.2.1.1) Relação água / aglomerante (a/agl): é o quociente entre a parte líquida (água+aditivo) e a parte sólida (cimento+adição) das misturas a serem investigadas. Durante o todo processo de investigação foram usadas três relações a/agl sendo elas: 0,35, 050 e 0,65.

Ensaio e idade de realização:

- Resistência à compressão: 03; 07; 28 e 91 dias.
- Resistividade elétrica aparente: 03; 07; 28; 56 e 91 dias.
- Condutividade elétrica específica: 03; 07; 28 e 91 dias.

### 3.2.2) Variáveis Intervenientes

São as responsáveis pela modificação nas propriedades do material aglomerante. Entre estas figuram:

- Tipo de Adição Mineral: Escória de alto forno (E.A.F)
- Teor de Adição Mineral: 50 e 70 % .
- Tipo de Ativador Químico: Sulfato de Sódio (  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  )
- Teor de Ativador Químico: 4%.

### 3.2.3) Variáveis Dependentes

São definidas assim, por serem influenciadas por alguma das variáveis independentes. São consideradas como representativas das próprias características do concreto.

No concreto:

- Resistência a compressão axial.

- Resistividade elétrica aparente.

Em pasta:

- Composição da solução dos poros (concentração dos íons  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ).
- Porosidade;

### 3.3 Metodologia e técnicas utilizadas

A substituição de cimento em massa foi a técnica adotada nesta pesquisa por esta permitir um maior controle sobre as variáveis definidas e quantificadas no tópico anterior.

No preparo das misturas foi utilizado um cimento Portland de Alta Resistência Inicial, CPV – ARI, em conformidade com a EB – NBR 5733. Tal escolha deve-se ao fato de que neste cimento há um maior teor de  $\text{C}_3\text{S}$ , conseqüentemente maior disponibilidade de CH, permitindo assim maiores teores de adições minerais nas misturas de concreto.

Anteriormente à definição dos traços, realizou-se ensaio individual de cada um dos materiais envolvidos na pesquisa, ou seja, agregados (gráúdo e miúdo) e aglomerantes.

Todos os agregados passaram por processo de lavagem e posterior secagem em estufa, com objetivo de serem removidos quaisquer impurezas e umidade. Estes procedimentos preliminares permitem uma maior otimização do seu emprego junto às misturas.

Anteriormente ao início dos trabalhos de moldagem, foram realizados testes em concreto, com a finalidade de se determinar o teor ótimo de argamassa das misturas e o abatimento através do tronco de cone.

Desta forma, foram 4 as misturas investigadas, uma (01) de referência e três (03) com adição de escória de alto forno.



### 3.4 Ensaio de caracterização dos materiais

A seguir são apresentadas em tabelas e gráficos, as características físicas e químicas dos materiais utilizados, seguindo os procedimentos propostos pela ABNT.

#### 3.4.1 Aglomerantes

Neste trabalho foi utilizado escória de alto forno, em substituição parcial ao cimento Portland de Alta Resistência Inicial, CPV – ARI. As características físico-mecânicas do cimento são apresentadas na tabela 3.1.

A escória granulada de alto forno é procedente de siderúrgica nacional e resfriada pelo processo úmido. As condições em que se encontrava a escória, ou seja, umidade e finura admitiam seu uso sem que fossem necessários quaisquer procedimentos prévios de moagem ou secagem da mesma.

Os percentuais de substituição de escória de alto forno nas misturas investigadas bem como a denominação dos traços encontram-se na tabela 3.2.

**Tabela 3.1 – Características físico/mecânicas do cimento**

<b>Características</b>	<b>CPV-ARI</b>
Resistência (MPa) 1 dia	20,1
Resistência (MPa) 3 dias	32,9
Resistência (MPa) 7 dias	39,9
Resistência (MPa) 28 dias	50,9
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	3,06
Finura # 0,075 mm	0,13
Área específica Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	423
Área específica BET (m <sup>2</sup> /kg)	1,48

**TABELA 3.2 – Denominação e composição das misturas**

Mistura	Composição	
	% cimento	% E.A.F
REF	100	-
50E	50	50
50EX (*)	50	50
70E	30	70

(\*) Adição em relação à massa aglomerante de 4% de sulfato de sódio (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

As características físicas dos aglomerantes, com os valores de massa específica e finura, bem como suas composições químicas estão apresentadas nas tabelas 3.3 e 3.4, respectivamente.

**Tabela 3.3 – Características físicas da E.A.F**

Grandeza Física	E.AF
Massa Específica (Kg/dm <sup>3</sup> )	2,89
Área Esp. BET( m <sup>2</sup> /Kg	1,07

**Tabela 3.4 – Características químicas do cimento e E.A.F**

Composição química	Teor em Massa (%)	
	CPV - ARI	E.A.F
SiO <sub>2</sub>	19,59	34,98
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,79	13,06
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,07	1,11
CaO	64,35	42,28
MgO	1,69	6,01
SO <sub>3</sub>	2,75	0,11
Na <sub>2</sub> O	0,07	0,17
K <sub>2</sub> O	0,98	0,40
Perda ao fogo	2,09	0,71
Equivalente alcalino	0,71	0,43

Nesta pesquisa não foram realizados estudos referentes a análises da distribuição granulométrica dos aglomerantes.

Todos os ensaios de caracterização física e química do cimento e das adições da escória foram realizados em conformidade com as normas brasileiras e internacionais:

- Finura # 0,075 mm – NBR 11579.
- Finura # 0,045 mm – NBR 9202.
- Análise química – NBR 5743, 5744, 5745, 5747, 7227 e 9203.
- Análise granulométrica a laser – ABCP.
- Superfície específica – NBR 7224.
- Superfície específica BET – ASTM D – 3663.
- Índice de finura – NBR 6474.

### **3.4.2 Agregados**

O agregado miúdo usado nesta pesquisa foi a areia natural, quartzosa, proveniente do município de Santa Maria. A areia foi submetida a sucessivos processos de lavagem para retirada de eventuais impurezas, sendo posteriormente seca em estufa e peneirada na peneira #6,3 mm e por fim armazenadas em caixas de madeira. O agregado graúdo utilizado foi pedra britada de rocha diabásica proveniente do município de Itaara, sendo peneirada na peneira #19 mm, lavada e seca em estufa antes de ser armazenada para posterior uso.

As características físicas dos agregados são apresentadas na tabela 3.5. As figuras 3.1 e 3.2 mostram as curvas granulométricas para o agregado miúdo e graúdo, respectivamente.

**Tabela 3.5 – Características físicas dos agregados**

Peneiras (mm)	Porcentagens retidas acumuladas	
	Brita	Areia
12,50	58	
9,50	87	
6,30	100	
4,80	100	
2,40	100	0
1,20	100	1
0,60	100	11
0,30	100	63
0,15	100	90
Módulo de Finura	6,87	1,65
Dimensão Máxima Característica - mm	19,00	1,20
Massa Específica - kg/dm <sup>3</sup>	2,49	2,62
Massa Unitária Solta - kg/dm <sup>3</sup>	1,36	1,36
Absorção de Água - %	2,61	0,50
Índice de Forma	3,00	

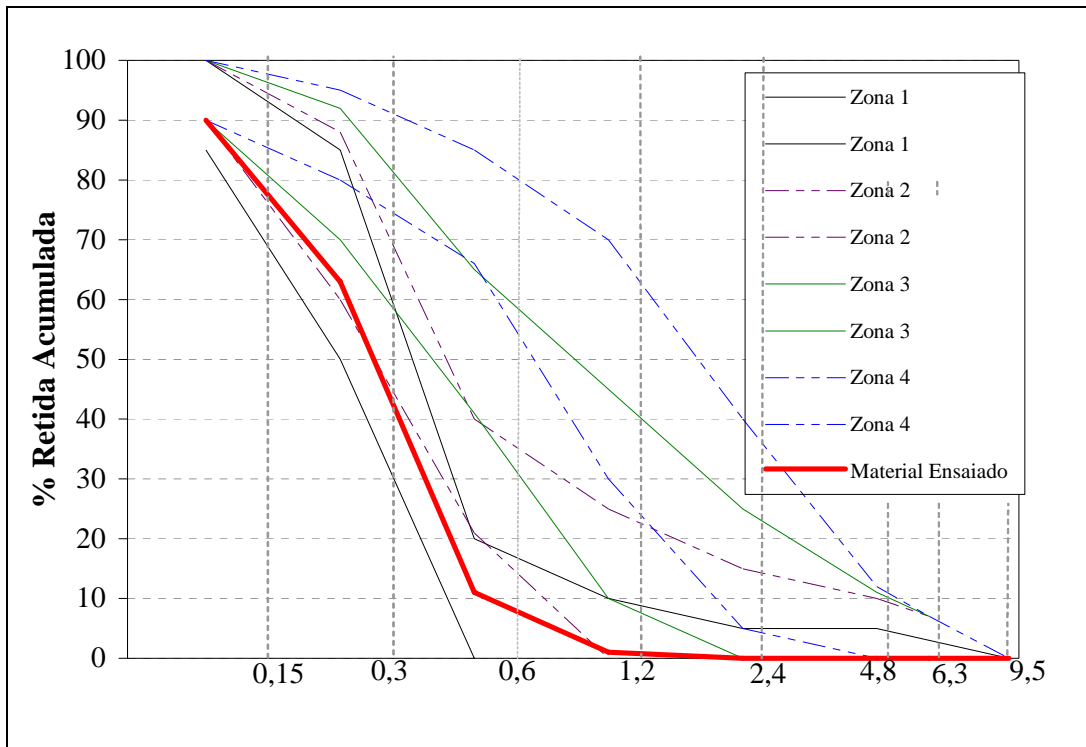


Figura 3.1 – Gráfico da granulometria do agregado miúdo

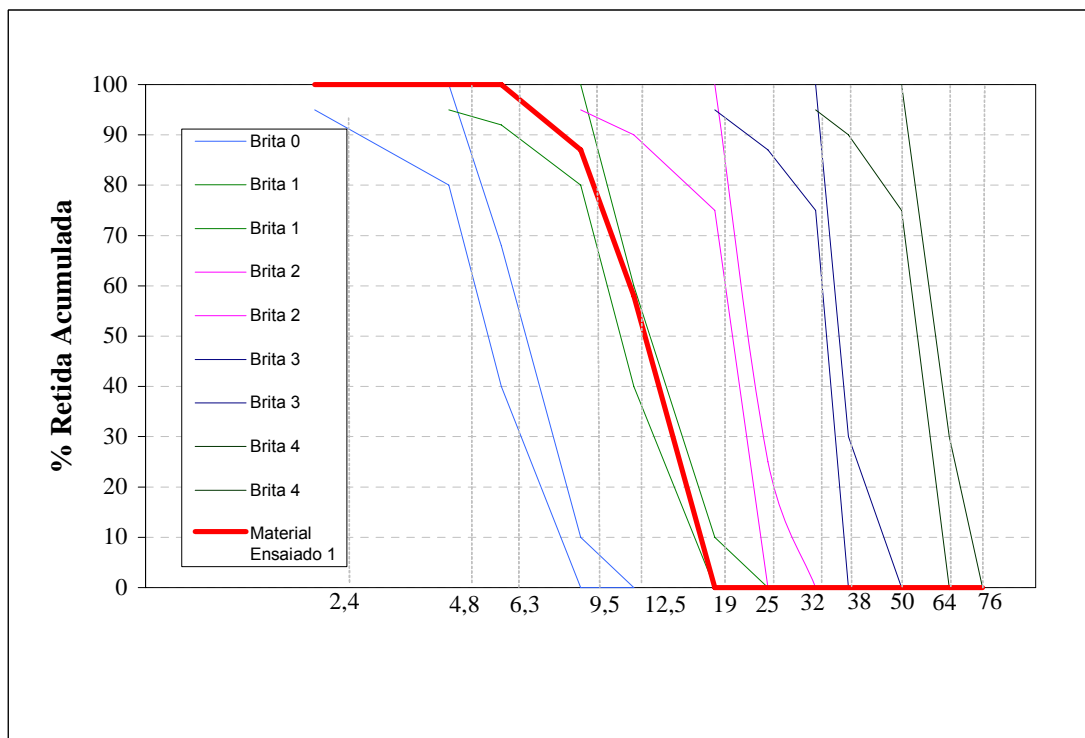


Figura 3.2 – Gráfico da granulométrica do agregado graúdo

### 3.4.3 Aditivo

Para a obtenção da consistência especificada,  $80\text{mm} \pm 10\text{mm}$ , nas misturas com relação a/agl 0,35 foi utilizado um aditivo superplastificante à base de éter carboxílico modificado que atende as prescrições da ASTM C 494.

### 3.4.4 Ativador químico

Para a realização deste trabalho investigativo, utilizou-se um ativador químico a base de sulfato. Foi usado como ativador químico o sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) em percentual de 4% em relação à massa de aglomerante. A escolha do teor bem como do produto é atribuído aos bons desempenhos alcançados por estes no desenvolvimento da resistência à compressão em idades iniciais, conforme dissertações de mestrado defendidas por GOMES (2003) e SPERB (2003) na Universidade Federal de Santa Maria. Optou-se pelo comercial, pois o mesmo apresenta um menor valor em relação ao P.A.

## 3.5 Dosagem dos concretos

Para a realização dos ensaios de resistência à compressão e de resistividade elétrica foi realizada para cada uma das misturas já descritas, uma dosagem pelo método de substituição em massa do cimento por adições minerais. Para obtenção da curva de Abrams, de cada mistura, foi necessário um mínimo de três níveis de resistência. Foram fixadas as relações a/agl em 0,35, 0,50 e 0,65, com proporcionamento aglomerante:agregado de 1:3,5 ; 1:5,1 e 1:6,3 , respectivamente.

O percentual de argamassa, dado em volume de material seco, foi fixado em 52%, por ser o volume ótimo encontrado.

Neste trabalho foram executadas moldagens de 4 (quatro) misturas, cada uma com três relações a/agl, totalizando 12 (doze) traços. Dentre as misturas uma foi moldada com 100% de cimento (REF) servindo esta como um parâmetro comparativo para avaliação dos resultados dos ensaios realizados. As demais misturas foram dosadas com 50 e 70% de escória de alto forno. A tabela 3.6 apresenta as quantidades de materiais por metro cúbico ( $\text{m}^3$ ) utilizados nas misturas de concreto.

Em busca de uma melhor definição das quantidades de materiais contidas na Tabela 3.6, foram utilizados conceitos e métodos práticos determinados por HELENE E TERZIAN (1992).

Para a verificação da consistência de cada uma das misturas em relação à faixa estabelecida na pesquisa,  $80\text{mm} \pm 10\text{ mm}$ , realizaram-se ensaios de consistência pelo abatimento do tronco de cone (NBRNM 67).

**Tabela 3.6 – Quantidade de materiais utilizados por  $\text{m}^3$  de concreto.**

Traço	a/agl	Cimento ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )	Água ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )	E.A.F ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )	A.M ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )	A.G ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )	SP (%)	A.Q (%)
REF	0,35	486	170,10	-	652	1051	0,25	-
	0,50	353	176,50	-	766	1035	-	-
	0,65	279	181,35	-	830	1022	-	-
50E	0,35	243	170,10	243	634	1051	0,175	-
	0,50	177	176,50	177	753	1035	-	-
	0,65	140	181,35	140	819	1022	-	-
50EX	0,35	243	170,10	243	634	1051	0,45	4
	0,50	177	176,50	177	753	1035	-	4
	0,65	140	181,35	140	819	1022	-	4
70E	0,35	146	170,10	341	627	1051	0,15	-
	0,50	106	176,50	247	748	1035	-	-
	0,65	84	181,35	196	815	1022	-	-

EAF = escória alto forno  
SP = superplastificante

A.M = agregado miúdo

A. G = agregado graúdo

A. Q = ativador químico a base de sulfato( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )

### 3.6 Moldagem, cura e preparação dos corpos de prova

Para os ensaios de resistividade elétrica aparente foram moldados, para cada relação água/aglomerante, de cada uma das misturas, 04(quatro) cp's todos prismáticos de dimensões 10cm (compr.) x 10cm (larg.) x 17cm(altura) em um número de 12 por mistura, perfazendo um total de 48 cp's. Para os ensaios de resistência à compressão moldaram-se cp's cilíndricos(10x20cm), 04(quatro) por relação a/agl. Para os ensaios de condutividade elétrica específica e porosimetria por intrusão de mercúrio o número de cp's para cada relação a/agl foi de 02(dois).

As moldagens dos cp's foram realizadas em conformidade com o preconizado pela norma NBR 5738. Todos os trabalhos de moldagem ocorreram durante o verão, fato este que determinou a conveniência do resfriamento da água da mistura. Essa foi resfriada na temperatura necessária de modo que a massa de concreto resultasse em 18°C. Para esse fim, foi utilizada uma expressão (MEHTA & MONTEIRO, 1994) que considera as massas de aglomerante, de agregados e da água, assim como suas temperaturas. As temperaturas foram medidas com termômetro de mercúrio.

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

T – Temperatura da massa de concreto (°F)

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

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

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

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

M<sub>c</sub> – Massa de cimento (Kg)

M<sub>a</sub> – Massa de água (Kg)

A moldagem dos cp's foi efetuada depois de atingidos os valores dentro dos limites pré-fixados para o abatimento do tronco de cone, ou seja, entre 70 e 90mm. O adensamento foi realizado em mesa vibratória, sendo o concreto lançado nos moldes em três camadas sucessivas. Os cp's foram mantidos nos moldes metálicos (resistência à compressão) e de madeira (resistividade elétrica aparente) por 24



horas. Após esse prazo, foram retirados dos moldes, identificados e colocados em câmara climatizada, à temperatura de  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  e à umidade relativa de 95%, onde aguardavam as datas previstas para os respectivos ensaios. A tabela 3.7 apresenta dados referentes aos ensaios realizados.

Para o ensaio de extração água dos poros e porosimetria de mercúrio, as pastas foram moldadas em cp's de dimensões 4 x 8 cm para cada relação a/agl das misturas de REF, 50E, 50EX e 70E.

**Tabela 3.7 – Informações dos ensaios realizados.**

<b>Em concreto</b>		
Dados importantes	Resistência à compressão	Resistividade elétrica aparente
Misturas ensaiadas	REF, 50E, 50EX e 70E	REF, 50E, 50EX e 70E
Relação a/agl	0,35 ; 0,50 e 0,65	0,35 ; 0,50 e 0,65
Idade ensaio (dias)	3 ; 7 ; 28 e 91	3 ; 7 ; 28 ; 56 e 91
Dimensões do cp moldado	10 x 20 cm (cilindro)	10 x 10 x 17 cm (prisma)
Unidades empregadas	MPa	$\Omega$ .cm
<b>Em pasta</b>		
Dados importantes	Extração água dos poros	Porosimetria porosímetro de mercúrio
Misturas ensaiadas	REF, 50E, 50EX e 70E	REF, 50E, 50EX e 70E
Relação a/agl	0,35; 0,50 e 0,65	0,35; 0,50 e 0,65
Idade ensaio (dias)	3 ; 7 ; 28 e 91 dias	3 ; 7 e 28dias
Dimensões do cp moldado	4 x 8 cm (cilindro)	5,5 x 3 cm (cilindro)

### **3.7 Ensaios realizados com o concreto**

#### **3.7.1 Resistência à compressão axial**

Para cada traço, foram moldados cp's cilíndricos com dimensões  $\varnothing 10 \times 20$  cm destinados aos ensaios de resistência à compressão axial, sendo rompidos aos 3

dias (4 cp's), 7 dias (4 cp's), 28 dias (4 cp's) e 91 dias (4 cp's), de acordo com a NBR 5738 e 5739.

### 3.7.2 Ensaio de resistividade elétrica aparente – Método dos quatro eletrodos (Método de Wenner)

O método dos quatro eletrodos é um método normalizado pela ASTM G57. Este método é originalmente desenvolvido para o uso em solos. O seu emprego, em concreto só foi possível graças a adaptações (MÉTODO WENNER) e ao desenvolvimento de equipamentos os quais permitem a realização de medidas de resistividade *in situ*, de forma não destrutiva.

O ensaio é realizado fazendo-se uso de uma fonte de alimentação de corrente alternada. É aplicada corrente entre os eletrodos externos. Entre os eletrodos internos é medida a diferença de potencial. É condição necessária para a obtenção de dados confiáveis que os eletrodos estejam posicionados em linha reta e que apresentem ao longo de sua linearidade eqüidistantes. As figuras 3.3 e 3.4 indicam a disposição dos elementos (eletrodos) para a realização do ensaio da resistividade elétrica.

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

$$\rho = R \cdot k \quad (3.2)$$

$$k = \frac{4 \cdot \pi \cdot a}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}} \quad (3.3)$$

onde:

$\rho$  = resistividade calculada do concreto, em ohm.cm;

R= resistência medida pelo instrumento, em ohm.cm;

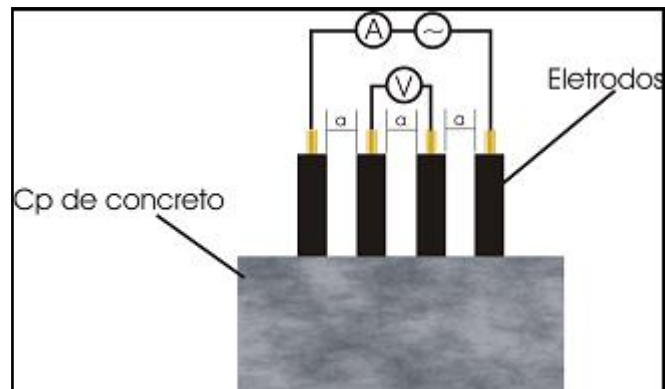
a = distância de separação entre os eletrodos em cm;

b = profundidade de penetração dos eletrodos no corpo de prova, em cm.

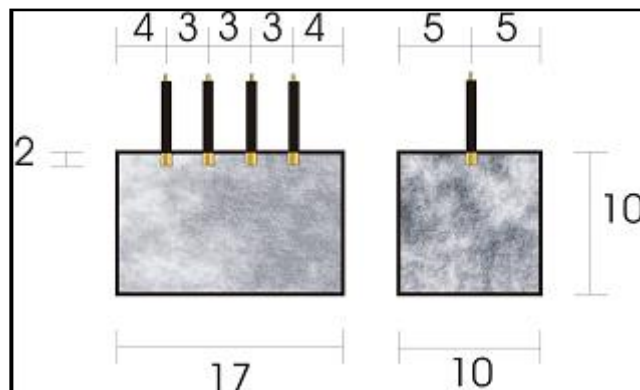
Neste ensaio é indispensável que sejam coletados os dados de corrente elétrica, diferença de potencial, distância e altura dos eletrodos bem como temperatura e umidade relativa do ar. Para cada mistura foram moldados 12 cp's,

sendo 04(quatro) cp's para cada relação a/agl. Cada cp tem a forma de um prisma com dimensões de 10 x 10 x 17 cm.

A tabela 3.8 descreve os dados relativos aos cps utilizados neste ensaio.



**Figura 3.3 – Método dos 4 eletrodos para medição de resistividade elétrica: “A” – Amperímetro, “V” – Voltímetro de alta impedância de entrada, e “a” a distância entre os eletrodos. (ABREU, 1998).**



**Figura 3.4 – Esquema dos corpos de prova utilizados no ensaio de resistividade pelo método dos 4 eletrodos (medidas em cm). ABREU, (1998).**

**Tabela 3.8 – Dados informativos do ensaio de resistividade elétrica aparente.**

Misturas	a/agl	Total de cp ensaiado em cada relação a/agl	Idades ensaiadas(dias)	Total de ensaios em cada idade	Total de ensaios por mistura
REF	0,35	04	3,7,28,56 e 91	12	60
	0,50	04			
	0,65	04			
50E	0,35	04	3,7,28,56 e 91	12	60
	0,50	04			
	0,65	04			
50EX	0,35	04	3,7,28,56 e 91	12	60
	0,50	04			
	0,65	04			
70E	0,35	04	3,7,28,56 e 91	12	60
	0,50	04			
	0,65	04			
<b>Total de ensaios realizados</b>					240

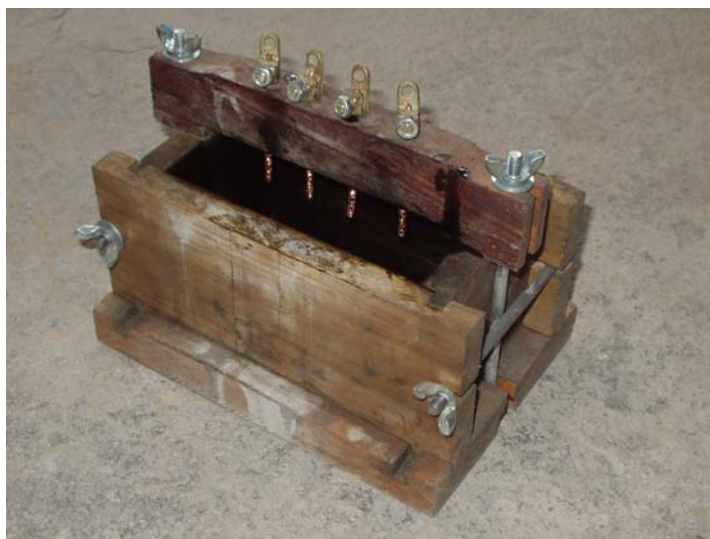
Anteriormente à moldagem dos protótipos utilizados nos ensaios da resistividade procedeu-se o preparo dos eletrodos (fio de cobre com 10 mm<sup>2</sup>) que consistia em:

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

Os procedimentos descritos anteriormente (preparo dos eletrodos) seguiram os modelos já empregados por ABREU (1998), MISSAU (2004) e HOPPE (2005).

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

A figura 3.5 apresenta o molde de madeira usado para confeccionar cp's.



**Figura 3.5 – Detalhe do molde de madeira utilizado para a confecção dos cp's prismáticos usados nos ensaios de resistividade elétrica aparente.**

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

Para a realização do presente ensaio foi montado um circuito conforme exposto na figura 3.6.

Desta forma foram realizadas medidas da diferença de potencial e da corrente que circulava no circuito através de voltímetros e amperímetros previamente instalados. Em cada corpo de prova realizaram-se duas leituras não consecutivas por relação  $a/agl$  e idade, com o objetivo de ratificação dos dados lidos, sendo o resultado adotado como a média entre todas as leituras efetuadas.

O valor da resistividade foi calculado de acordo com a fórmula de Frank Wenner (item 3.7.2). A figura 3.6, apresenta a disposição dos instrumentos e do cp durante a realização do ensaio de resistividade elétrica aparente.

Para a execução dos ensaios de R.E.A foram utilizados os seguintes equipamentos:

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

Após a execução do ensaio foram excluídos os valores que se posicionaram fora do intervalo da média,  $\pm 20\%$  do coeficiente de variação (C.V).

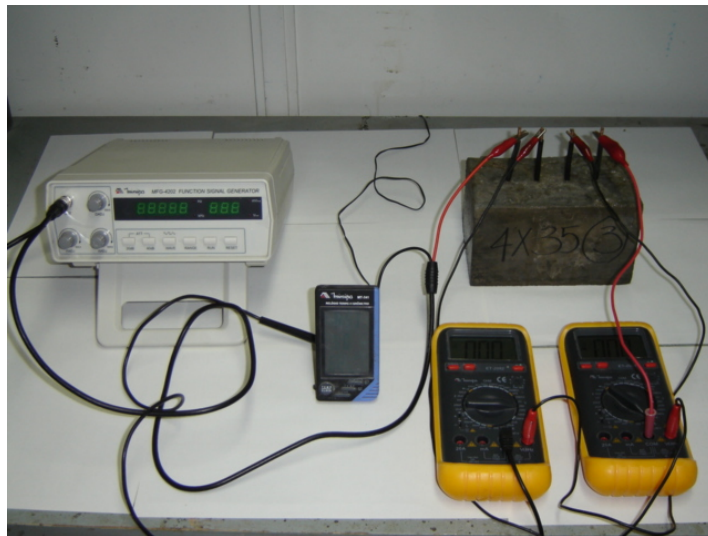


Figura 3.6 - Foto do ensaio de resistividade elétrica aparente

## 3.8 Ensaios realizados com pasta

### 3.8.1 Ensaio da solução aquosa dos poros

Foram moldados pastas em cp's cilíndricos de dimensões  $\phi 4 \times 8$  cm 2 cp's por traço para cada uma das idades de ensaio, ou seja, 3 dias(2cp's), 7 dias(2cp's), 28 dias(2cp's), 91 dias(2cp's). Após 24 horas foi realizada a desforma e os cp's

foram imersos em solução contendo cal, permanecendo até a data do ensaio em câmara climatizada.

Nas respectivas datas de ensaio estes cp's foram lavados para retirar o excesso de cal e após secos foram perfurados (pulverizados) com broca  $\phi$  8,0mm (furadeira de bancada). Deste processo resultou um pó que foi peneirado em peneira #100. Em média a quantia de pó (após peneiramento) para a formação das amostras foi de 85g. Então foi realizada a mistura pó + água deionizada (proporção em massa 1:1). Esta mistura foi agitada magneticamente por 30 minutos. Este tempo é necessário para que o pH se estabilize. Após foi realizada a filtragem (filtro papel) para separar a fase líquida que foi encaminhada para laboratório para a determinação das concentrações dos íons  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{OH}^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ .

Esse procedimento foi adotado devido à impossibilidade de extração, no equipamento proposto por Longuet e colaboradores (1973), da quantidade mínima de solução necessária para a realização dos ensaios nas referidas idades, em especial para a relação água/aglomerante de 0,35.

As concentrações dos íons de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Ca}^{2+}$  foram determinadas através de ensaio de espectroscopia de absorção atômica. A concentração de íons  $\text{OH}^-$  foi obtida através de titulação direta com HCL. Os valores de pH das soluções dos poros, calculados a partir das concentrações de íons hidroxilas. A concentração de íons  $\text{SO}_4^{2-}$ , determinada, indiretamente pela precipitação de  $\text{BaSO}_4$ , em uma solução contendo  $\text{BaCl}_2$  em excesso.

Para o cálculo da condutividade elétrica da solução dos poros do concreto, utilizaram-se as equações propostas por SHI et al (1998):

$$\rho = \rho_{\text{água}} + \sum C_i \lambda_i / 1000 \quad (3.4)$$

onde:

$\rho$  = condutividade elétrica da solução aquosa;

$\rho_{\text{água}}$  = condutividade elétrica da água;

$C_i$  = concentração equivalente do íon i;

$\lambda_i$  = condutividade equivalente do íon i.

sendo que:

$$\lambda_i = \lambda_{i,0} - A_i \sqrt{C_i} \quad (3.5)$$

onde

$\lambda_{i,0}$  é a condutividade equivalente a concentração infinita. A constante,  $A_i$  da equação é determinada através da expressão:

$$A_i = 0,2289 \lambda_{i,0} + 60,12 \quad (3.6)$$

A tabela 3.9 apresenta os valores de  $\lambda_{i,0}$  dos íons presentes na solução dos poros do concreto.

**Tabela 3.9 – Condutividade equivalente de íons aquosos numa concentração infinita em 25°C.**

Íon	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	OH <sup>-</sup>
Condutividade equivalente (M <sup>2</sup> .equiv. <sup>-1</sup> .ohm <sup>-1</sup> )	0,00501	0,00735	0,00595	0,00798	0,0198

### 3.8.2 Ensaio de porosimetria de mercúrio

Para a realização deste ensaio foram usados potes (tipo porta filme fotográfico) de dimensões  $\phi 3 \times 4$  cm para a moldagem das amostras. Na idade do ensaio, os corpos-de-prova cilíndricos  $\phi 3 \times 4$  cm de pastas foram retirados do pote plástico (fôrma) e extraídos deles, com auxílio de serra manual, pequenos cubos (aresta de  $\pm 6$  mm), os quais foram deixados imersos em álcool isopropílico por uma semana, para paralisar o processo de hidratação. Após essa etapa, fez-se a secagem dos cubos em estufa, iniciando com temperatura de 40°C no primeiro dia, 60°C no segundo, 80°C no terceiro e 90°C no quarto dia, retirando-se as amostras no quinto dia e deixando-as esfriar para posterior realização do ensaio. Para cada amostra foram extraídos 6 cubos, suficientes para a realização do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio.



## CAPÍTULO 4

### ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÃO

#### 4.1 Introdução

Este capítulo é dedicado á apresentação dos resultados dos ensaios de resistência à compressão, resistividade elétrica aparente, condutividade elétrica da solução dos poros e porosimetria de mercúrio das quatro misturas investigadas conforme consta no capítulo 3. A primeira mistura denominada de referência (REF), composta somente por cimento puro(sem adição), serve como parâmetro para comparação com as demais misturas das propriedades estudadas.

Em três destes concretos, houve substituição parcial da massa do cimento por escória, sendo que em dois deles, o percentual de escória foi de 50% (50E) e num terceiro o teor de substituição foi de 70% (70E). Em um dos concretos, com 50% de escória, utilizou-se um ativador químico, sulfato de sódio, com finalidade de avaliar a contribuição deste na ativação das reações da escória e seus efeitos nas propriedades investigadas. O teor adotado, 4%, foi objeto de investigação anterior. No preparo dos concretos foram usadas três relações água/aglomerante ( 0,35 ; 0,50 e 0,65) e idades de cura úmida diferenciadas, conforme os ensaios a serem realizados, ou seja, resistividade elétrica aparente (3,7,28,56 e 91 dias), resistência a compressão (3,7,28 e 91 dias) , condutividade elétrica da solução dos poros ( 3,7,28,91 dias) e porosimetria por intrusão de mercúrio (3,7 e 28 dias).

Na primeira etapa são analisados os resultados de resistência à compressão, obtidos a partir de cp's cilíndricos de dimensões 10 x 20 cm. Em seguida são avaliados os resultados de R.E.A , objetivo principal desta investigação, pelo método Wenner dos quatro eletrodos em cp's prismáticos e, na seqüência, os resultados dos ensaios de condutividade elétrica específica e porosimetria por intrusão de mercúrio, realizados em cp's cilíndricos de menor dimensão.

Em um segundo momento buscou-se, pela integração dos resultados, o conhecimento das relações existentes entre todas as propriedades investigadas, sendo esta de grande valia na identificação das variáveis controladoras da resistividade elétrica. Por fim são apresentadas as conclusões, embasadas em melhores resultados técnicos e econômicos.

Para garantir uma melhor interpretação dos resultados alcançados, serão empregados recursos gráficos além de uso de tabelas objetivando uma melhor visualização dos resultados.

## 4.2 Análise dos resultados de resistência à compressão

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial das misturas investigadas, nas idades de 3,7,28 e 91 dias são apresentados na tabela 4.1 e figura 4.1. Constam também desta tabela os índices de resistência à compressão que correspondem ao quociente entre os valores de resistência de uma determinada mistura e o valor correspondente da mistura de referência (REF), I.R.C, bem como, os valores resultantes do quociente entre a resistência da mistura com 50% de escória ativada(50EX) e a mistura de mesmo teor de escória, porém sem ativador (50E), ou seja, o I.R.A., todos a partir da consideração de igualdade de relação a/agl e idade.

Observa-se, como esperado, aumento da resistência à compressão com o aumento do grau de hidratação, bem como redução com o aumento da relação a/agl.

Quando comparada à mistura de referência àquelas compostas com 50% e 70% de escória de alto forno, para todas as relações a/agl e idades de ensaio, apresentaram valores de IRC inferiores, entretanto, no geral, com o aumento da idade essa diferença diminuiu.

Para a mistura contendo 50% de escória de alto forno na relação a/agl 0,35 e idade de 3, 7, 28 e 91 dias, esses índices foram de 0,72, 0,74, 0,97 e 0,93. Para as relações a/agl 0,50 e 0,65, nestas mesmas idades, os índices foram de 0,78, 0,77, 0,77, 0,80 e 0,78, 0,87, 0,54, 0,89 respectivamente.

Com o aumento no teor de escória, 50% para 70%, os índices de resistências à compressão (IRC) foram menores ainda que aqueles da mistura com 50% de escória, devido à diminuição no teor de cimento. Na relação a/agl 0,35 e mesmas idades de ensaio os índices foram de 0,48, 0,66, 0,67 e 0,62. Para as relações a/agl 0,50 e 0,65 foram de 0,43, 0,63, 0,55, 0,60 e 0,39, 0,60, 0,67, 0,67 respectivamente.

O acréscimo do ativador químico à mistura composta com 50% de escória resultou, quando comparada à mistura de referência, aumentos nos índices de

resistência à compressão. Para a relação a/agl 0,65 esses índices foram superiores a unidade, (1,03, 1,11, 1,01 e 1,01) mostrando que com a utilização do ativador químico os valores de resistência foram semelhantes ou um pouco superiores àqueles de referência. Nas demais relações a/agl, 0,50 e 0,65, esses índices foram de 0,98, 0,94, 1,09, 0,99 e 0,88, 0,96, 0,93, 0,95 respectivamente.

Comparando a mistura ativada com a mesma mistura sem ativador verifica-se, para as três relações a/agl, acréscimos no IRC em todas as idades, 3, 7, 28 e 91 dias. Na relação a/agl 0,35 os índices foram de 1,23, 1,27, 1,12 e 1,07. Para as relações a/agl 0,50 e 0,65 os índices foram de 1,13, 1,25, 1,16, 1,01 e 1,32, 1,28, 1,51 e 1,13 respectivamente.

**Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial**

Série	a/agl	Resistência à compressão(MPa)											
		Idade (dias) / índices											
		fc <sub>3</sub>	fc <sub>7</sub>	fc <sub>28</sub>	fc <sub>91</sub>	IRC fc <sub>3</sub>	IRC fc <sub>7</sub>	IRC fc <sub>28</sub>	IRC fc <sub>91</sub>	IRA fc <sub>3</sub>	IRA fc <sub>7</sub>	IRA fc <sub>28</sub>	IRA fc <sub>91</sub>
REF	0,35	39,9	43,9	52,0	64,1	1,00	1,00	1,00	1,00	-	-	-	-
	0,50	25,6	28,8	44,1	50,9	1,00	1,00	1,00	1,00	-	-	-	-
	0,65	15,3	17,6	40,5	36	1,00	1,00	1,00	1,00	-	-	-	-
50E	0,35	28,6	32,4	50,6	59,7	0,72	0,74	0,97	0,93	1,00	1,00	1,00	1,00
	0,50	19,9	22,2	35,3	47,8	0,78	0,77	0,80	0,94	1,00	1,00	1,00	1,00
	0,65	11,9	15,3	21,8	32,1	0,78	0,87	0,54	0,89	1,00	1,00	1,00	1,00
50EX	0,35	35,2	41,1	56,5	63,6	0,88	0,94	1,09	0,99	1,23	1,27	1,12	1,07
	0,50	22,5	27,7	41	48,2	0,88	0,96	0,93	0,95	1,13	1,25	1,16	1,01
	0,65	15,7	19,6	33	36,3	1,03	1,11	1,01	1,01	1,32	1,28	1,51	1,13
70E	0,35	19,3	28,9	35	39,7	0,48	0,66	0,67	0,62	-	-	-	-
	0,50	11,1	18,1	24,2	30,5	0,43	0,63	0,55	0,60	-	-	-	-
	0,65	6,0	10,6	15,7	24,2	0,39	0,60	0,67	0,67	-	-	-	-

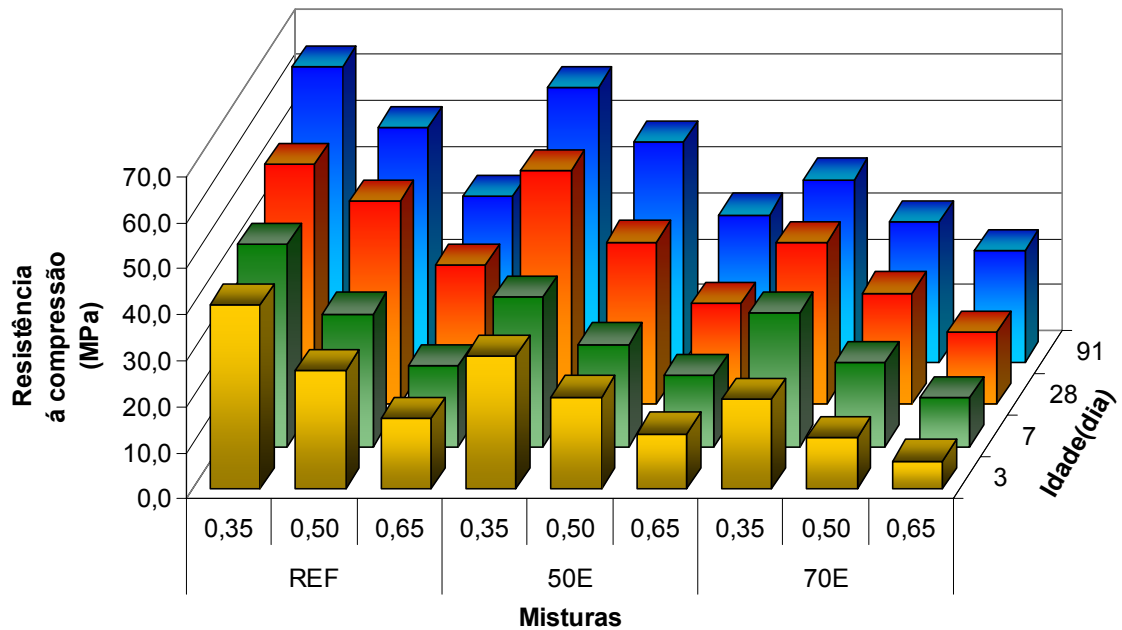
I.R.C : índice de resistência a compressão em relação à mistura de referência.

I.R.A: índice de resistência a compressão em relação à mesma mistura sem ativador.

Na tabela 4.2 são apresentadas as constantes e coeficientes de correlação das equações de Abrams.

**Tabela 4.2 – Coeficientes da curva de Abrams para as idades de 3,7,28 e 91 dias.**

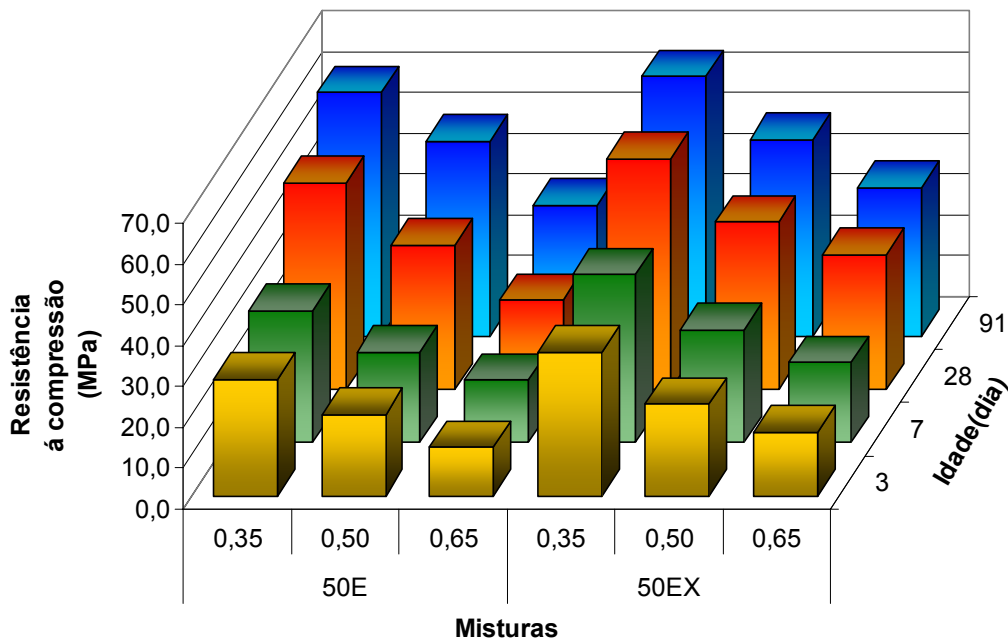
			Coeficientes $f_c = A/B^x$		
			A	B	R <sup>2</sup>
<b>Traço</b>	REF	f <sub>c3</sub>	123,529	24,412	0,99
		f <sub>c7</sub>	129,035	21,046	0,99
		f <sub>c28</sub>	101,133	6,051	0,98
		f <sub>c91</sub>	128,100	6,842	0,99
	50E	f <sub>c3</sub>	81,586	18,595	0,99
		f <sub>c7</sub>	77,675	12,194	0,99
		f <sub>c28</sub>	137,916	16,556	0,99
		f <sub>c91</sub>	126,789	7,910	0,99
	50EX	f <sub>c3</sub>	103,993	6,004	0,98
		f <sub>c7</sub>	96,716	11,801	0,99
		f <sub>c28</sub>	103,993	6,004	0,98
		f <sub>c91</sub>	122,476	6,483	0,99
	70E	f <sub>c3</sub>	76,211	49,130	0,99
		f <sub>c7</sub>	94,177	28,312	0,99
		f <sub>c28</sub>	90,131	14,473	0,99
		f <sub>c91</sub>	70,349	5,206	0,99



**FIGURA 4.1 – Gráfico resistência à compressão**

Da análise da figura 4.1, constata-se que a substituição parcial do cimento por E.A.F resulta em redução nos valores de resistência à compressão, variáveis em função da idade, da relação  $a/agl$  e do teor de substituição. Entretanto, a adição conjunta de ativador químico à mistura contendo 50% de escória de alto forno altera esse comportamento por propiciar maior grau de hidratação e, conseqüentemente, maiores níveis de resistência à compressão.

Na figura 4.2 observa-se o efeito do ativador na resistência à compressão da mistura com 50% de E.A.F.



**FIGURA 4.2 – Gráfico efeito do sulfato de sódio (ativador químico) na resistência à compressão da mistura composta com 50% de E.A.F.**

### 4.3 Análise dos resultados da resistividade elétrica aparente

A tabela 4.3 contém os critérios de avaliação da R.E.A do concreto, descritos de acordo com o (CEB 192, 1989), *apud* BRAUN (2003).

**Tabela 4.3 - Critérios de avaliação da resistividade elétrica do concreto de acordo com o (CEB 192, 1989), *apud* BRAUN (2003).**

Resistividade do concreto	Indicação de probabilidade de corrosão
> 20.000 $\Omega$ .cm	Desprezível
10.000 a 20.000 $\Omega$ .cm	Moderado
5.000 a 10.000 $\Omega$ .cm	Alta
< 5.000 $\Omega$ .cm	Muito Alta

De acordo com o exposto na tabela 4.3 concretos com valores de resistividade elétrica aparente acima de 20.000  $\Omega$ .cm tem uma probabilidade de corrosão do aço desprezível, para valores entre 10.000 e 20.000  $\Omega$ .cm a

probabilidade de corrosão é moderada. Já para os casos em que a resistividade elétrica do concreto assume valores entre 5.000 e 10.000  $\Omega$ .cm a probabilidade de corrosão é alta e para valores abaixo de 5.000  $\Omega$ .cm de resistividade elétrica a probabilidade de que ocorra a corrosão do aço é muito alta.

Na tabela 4.4 são apresentados os resultados de resistividade elétrica aparente e no Anexo A, os coeficientes obtidos através do modelo de Abrams, nas idades de 3, 7, 28, 56 e 91 dias.

Para efeito de análise dos resultados de R.E.A foram consideradas as influências da relação água/aglomerante, do percentual de escória adicionada ao concreto e também da idade dos cp's. Além disto, foi também observado o comportamento da R.E.A das misturas com escória ativada quimicamente. Nas comparações, entre as misturas investigadas, as análises comparativas entre os valores de resistividade elétrica aparente obedeceram a critérios de similaridade tanto para a relação a/agl como para a idade dos cp's.

**Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios de resistividade elétrica aparente**

Traço	a/agl	Resistividade elétrica aparente ( $\Omega$ .cm)				
		Idade (dias)				
		3	7	28	56	91
REF	0,35	17841	22063	29418	34433	43565
	0,50	11968	14488	17115	23812	28254
	0,65	9609	11176	13328	16306	20204
50E	0,35	12445	19639	43368	54046	59680
	0,50	10887	16002	34331	45871	47934
	0,65	9270	14063	30012	37596	42893
50EX	0,35	32843	48337	62678	68046	74397
	0,50	15167	28426	42248	50362	59610
	0,65	13413	21787	38019	43130	52236
70E	0,35	24791	25910	46972	59709	66615
	0,50	19934	22187	37352	53221	57338
	0,65	18537	19389	31794	49777	52250

### 4.3.1 Influência da relação água /aglomerante

Assim como nos ensaios de resistência à compressão todos os concretos contendo ou não adição de escória apresentaram queda de resistividade elétrica com o aumento da relação água/aglomerante utilizada na preparação das misturas. Esta constatação é válida para todos os períodos de cura investigados e esta em concordância com os relatos de HUGHES et al (1985) e também com os resultados apresentados por BAWEJA et al (1996).

Aos 7 dias de cura, a diminuição dos valores R.E.A apresentada pela mistura 50EX com o aumento da relação água/aglomerante de 0,35 para 0,50 e desta para 0,65 foi de 41 % e 23%, respectivamente. Para o concreto de referência (REF) estes decréscimos foram de 34% quando a relação a/agl passou de 0,35 para 0,50 e de 23% quando da passagem desta para a relação a/gl 0,65. Já, nas demais misturas, as medidas de resistividade ficaram em média 16,5% (0,35-0,50) e 21% (0,50-0,65) menores, conforme figura 4.3. Os menores decréscimos de R.E.A devido à passagem da relação a/gl de 0,35 para 0,65 foram verificados nas misturas 50E (50% EAF) e 70E(70% EAF). No entanto a mistura de referência (REF) foi a que registrou maiores quedas de resistividade, sendo estas de 46% (3dias), 49% (7dias), 55%(28 dias) , 53 % (56 dias) e 54% (91 dias).

Assim, constata-se que o aumento da relação água/aglomerante resultou numa menor redução da R.E.A para os traços contendo escória (50E e 70E) do que para o concreto de referência (REF).

Na tabela 4.5 é apresentado uma classificação quanto à probabilidade de ocorrer corrosão de acordo com os critérios do CEB 192(1989).



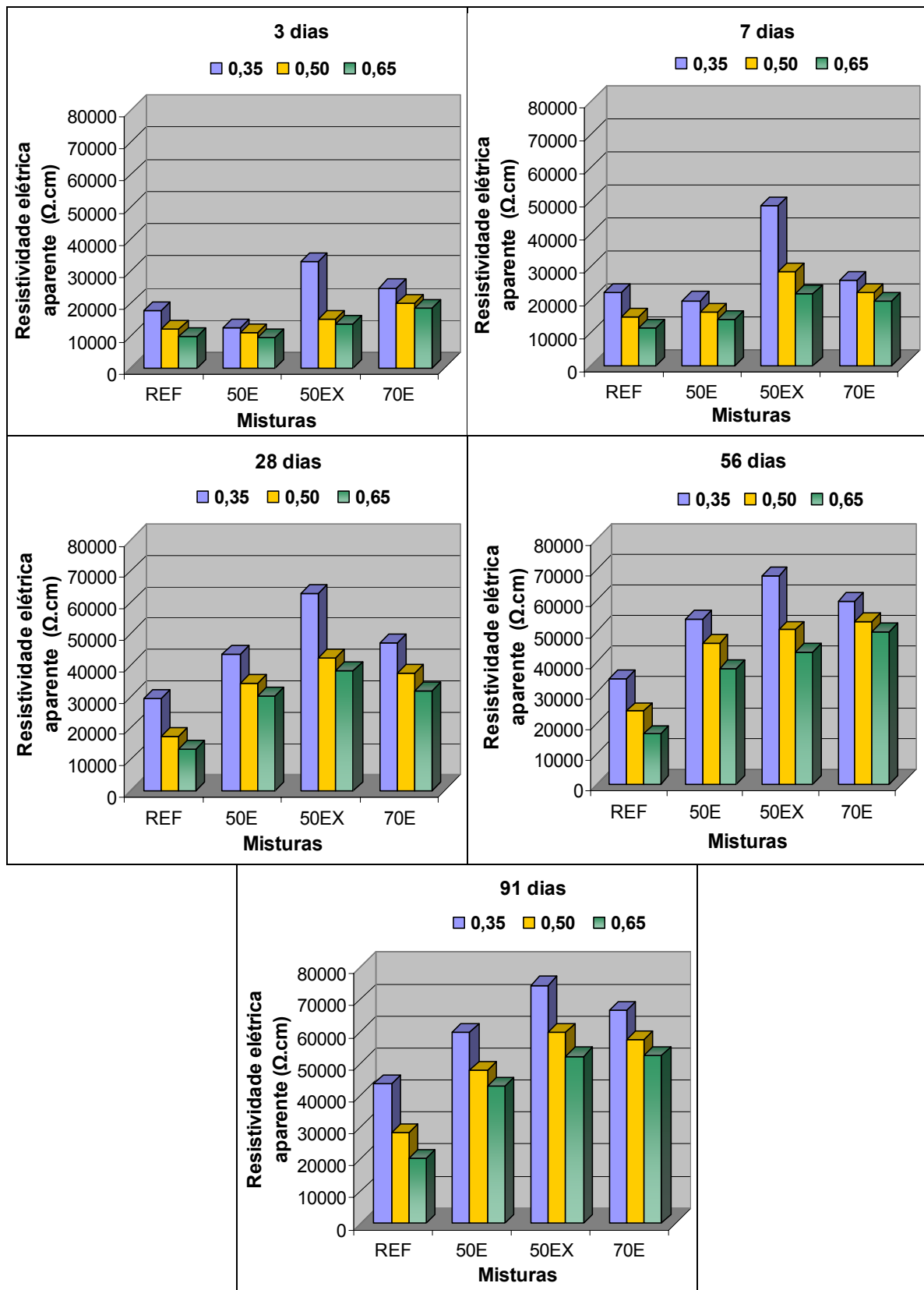


Figura 4.3 – Valores de resistividade elétrica aparente em função da relação a/agl.

**Tabela 4.5 - Classificação das misturas quanto às probabilidades de ocorrer corrosão segundo critérios (CEB 192, 1989), *apud* BRAUN (2003).**

		a/agl	Idade(dias) / Probabilidade corrosão				
			3	7	28	56	91
Concreto	REF	0,35	Moderado	Moderado	Desprezível	Desprezível	Desprezível
		0,50	Moderado	Moderado	Moderado	Desprezível	Desprezível
		0,65	Alto	Moderado	Moderado	Moderado	Desprezível
	50E	0,35	Moderado	Moderado	Desprezível	Desprezível	Desprezível
		0,50	Moderado	Moderado	Desprezível	Desprezível	Desprezível
		0,65	Alto	Moderado	Desprezível	Desprezível	Desprezível
	50EX	0,35	Desprezível	Desprezível	Desprezível	Desprezível	Desprezível
		0,50	Moderado	Desprezível	Desprezível	Desprezível	Desprezível
		0,65	Moderado	Desprezível	Desprezível	Desprezível	Desprezível
	70E	0,35	Desprezível	Desprezível	Desprezível	Desprezível	Desprezível
		0,50	Moderado	Desprezível	Desprezível	Desprezível	Desprezível
		0,65	Moderado	Moderado	Desprezível	Desprezível	Desprezível

Nota-se na tabela acima (tabela 4.5) aos 3 dias, mesmo com relação a/agl 0,35 e 0,50 as misturas REF e 50E apresentaram um risco moderado para a probabilidade de corrosão do aço. Para a relação a/agl 0,65 este risco passa a ser classificado como alto. As misturas 50EX e 70E apresentaram, ainda aos 3 dias, risco desprezível para a relação a/agl 0,35 e moderado para as relações a/agl 0,50 e 0,65.

A partir dos 28 dias todas as relações a/agl investigadas das misturas contendo E.A.F (50E,50EX e 70E) apresentaram riscos desprezíveis para a probabilidade de ocorrência da corrosão. Este comportamento é observado nas misturas REF (0,35, 0,50 e 0,65 ) somente aos 91 dias.

### 4.3.2 Influência do teor de E.A.F

Apesar de muitas pesquisas realizarem experimentos de resistividade elétrica em misturas com escória de alto forno, apenas uma pequena parcela destas, destina-se aos estudos específicos dos efeitos produzidos por variações do teor de escória na resistividade elétrica aparente dos concretos.

Além de análises relativas à presença ou não de E.A.F nos concretos, como nas comparações de valores de R.E.A feitas entre os concretos REF e 50E e também entre REF e 70E foram investigados os efeitos sobre a R.E.A quando os teores de escória variam de uma mistura para outra, como nos casos dos diferentes teores contidos nos traços 50E e 70E especificamente.

Assim como na análise anterior, para melhor compreensão da influência do teor de escória sobre a resistividade elétrica aparente do concreto, foi introduzida uma nova variável chamada Taxa de Desempenho da Escória –  $TDE_t$ .

$$TDE_t(\%) = \left[ \left( \frac{R_{t(x,i)}}{R_{REF(x,i)}} \right) - 1 \right] * 100 \quad (4.1)$$

onde:

$TDE_t(\%)$  = Taxa de desempenho da escória, na idade “t” da resistividade em relação ao concreto de referência (REF), medido em %;

$R_{t(x,i)}$  = Valor da resistividade elétrica do concreto com escória, no teor t, relação a/agl x e idade i, em  $\Omega.cm$ ;

$R_{REF(x,i)}$  = Valor da resistividade elétrica do concreto de referência (REF) na relação a/agl x e idade i, em  $\Omega.cm$ .

A tabela 4.6 apresenta os valores de  $TDE_t$ , calculados para cada teor, relação a/agl e período de cura, sendo esses valores representados graficamente na figura 4.4.

**Tabela 4.6 - Valores de  $TDE_t$  (%) nas idades de 3,7,28,56 e 91 dias, em função da relação a/agl e idade.**

Mistura	a/agl	Idade (dias)/ $TDE_t$ (%)				
		3	7	28	56	91
50E	0,35	- 30	- 11	47	57	37
	0,50	- 9	10	101	93	70
	0,65	- 4	26	125	58	112
70E	0,35	39	17	60	73	53
	0,50	67	53	118	124	103
	0,65	93	74	139	205	159

Para a idade de 3 dias, em todas as relações a/agl e aos 7 dias, na relação a/agl 0,35 a substituição parcial do cimento por escória, 50E, resultou em valores de resistividade elétrica inferiores aqueles da mistura de referência. Essa mistura aos 28 dias, para as três relações a/agl adotadas, apresentou acréscimos de R.E.A que variaram de 47% a 125%. Aos 56 e 91 dias os acréscimos variaram de 57% a 93% e 37% a 112% respectivamente.

A mistura composta com 70% de escoria, 70E, apresentou em todas as relações a/agl e idades de cura valores de resistividade elétrica superiores àqueles da mistura de referência. Esses acréscimos variaram nos intervalos de 39 a 93% (3 dias), de 17 a 74% (7 dias), de 60 a 139% (28 dias), de 73 a 205% (56 dias) e de 53 a 159% (91 dias).

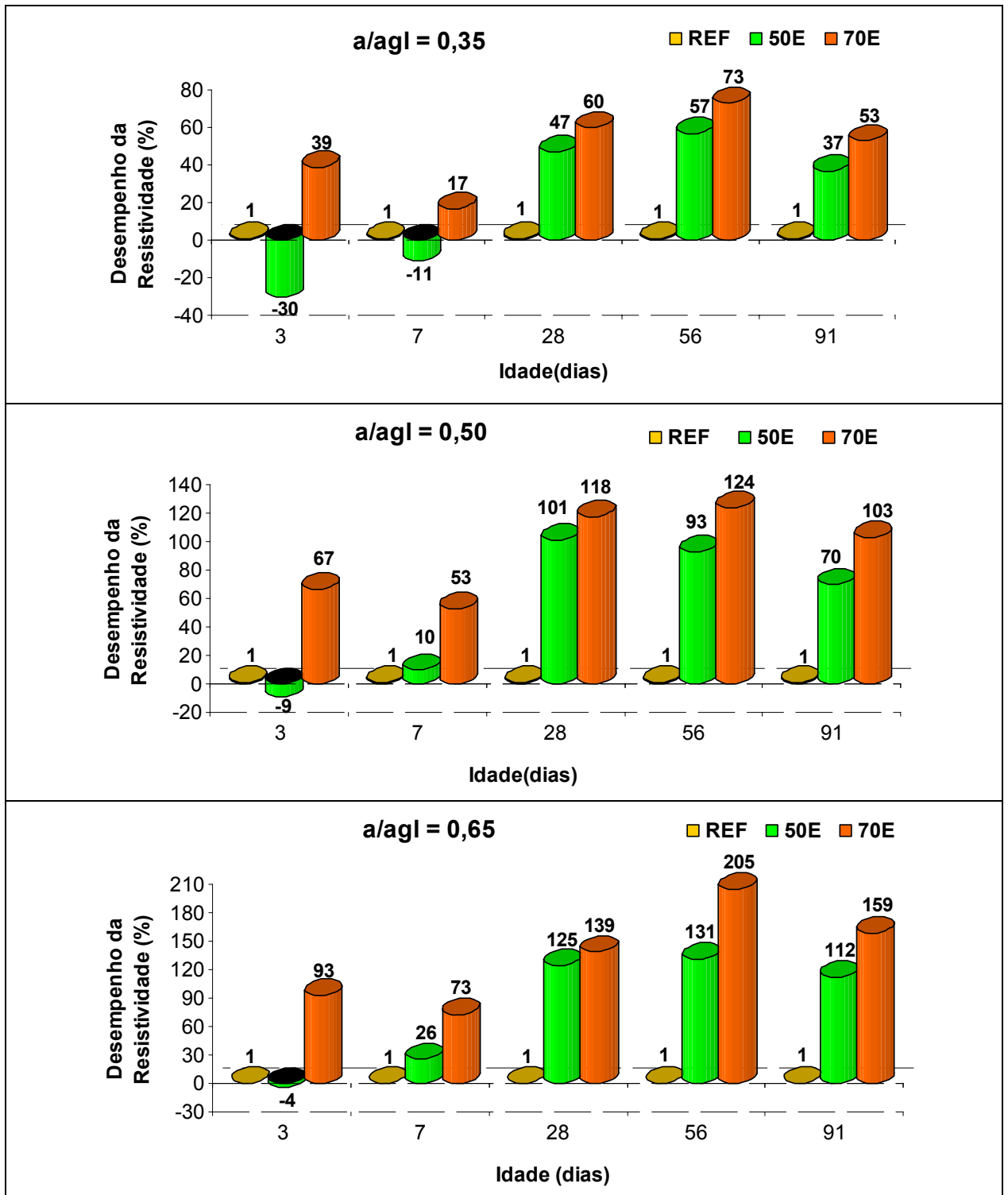


Figura 4.4 – Taxa de desempenho da escória de alto forno na R.E.A.

A tabela 4.7 foi obtida a partir da equação 4.1, considerando como denominador os valores de R.E.A da mistura contendo 70% de escória (70E).

**Tabela 4.7 - Valores de  $TDE_t$  (%) nas idades de 3,7,28,56 e 91 dias, em função da relação a/agl e idade.**

Mistura	a/agl	idade ( dias)/ $TDE_t$ (%)				
		3	7	28	56	91
70Ex50E	0,35	99	32	8	10	12
	0,50	83	39	9	16	20
	0,65	100	93	6	32	22

Da análise da tabela 4.7 verifica-se que o aumento do teor de escória, 50% para 70%, resultou em acréscimos significativos nos valores de resistividade elétrica aos 3 e 7 dias. Nas demais idades observam-se também acréscimos nos valores de resistividade elétrica, porém menos expressivos. Nas idades de 28, 56 e 91 dias os acréscimos foram de 6% a 9%, 10% a 32% e 12% a 22% respectivamente.

De forma geral, os resultados obtidos corroboram aqueles relatados por WEE et al (2000), ou seja, de que quanto maior o teor de escória presente nos concretos, maior a sua resistividade elétrica em relação aos concretos sem escória (REF).

#### 4.3.3 Influência da idade

A literatura descreve que tão importante quanto o tipo de cura a ser empregada é o tempo de atuação desta no concreto.

Neste item, assim como nos anteriores, para uma melhor compreensão da influência da idade cura sobre a resistividade elétrica do concreto foi introduzida uma nova variável chamada de Taxa de Desempenho da Idade –  $TDI$ . A partir desta é possível avaliar o acréscimo de resistividade elétrica aparente de uma dada mistura para diferentes idades, mantidas fixas a relação a/agl e a idade das misturas. A  $TDI$  de cada mistura é obtida pela razão entre a sua R.E.A em dada idade  $i$  pelo valor obtido aos 3 dias subtraído da unidade e multiplicado por 100, de acordo com a expressão a seguir:

$$TDI_{m,x,i}(\%) = \left[ \left( R_{m,x,i} / R_{m,x,i=3\text{dias}} \right) - 1 \right] * 100 \quad (4.2)$$

onde,

$TDI_{m,x,i}$ : taxa de desempenho da idade na R.E.A, para uma dada mistura m com relação a/agl x, na idade i, medido em %;

$R_{m,x,i}$ : valor da resistividade elétrica de uma dada mistura m com relação a/agl x na idade i, medido em  $\Omega$ .cm;

$R_{m,x,i = 3\text{dias}}$ : valor da resistividade elétrica de uma dada mistura m, com relação a/agl x na idade  $i = 3\text{dias}$ , medido em  $\Omega$ .cm.

A tabela 4.8 apresenta os valores de  $TDI_{m,x,i}$  calculados para cada mistura, de acordo com a relação a/agl e idade, sendo esses valores representados graficamente na figura 4.5.

A figura 4.6 apresenta o crescimento da R.E.A com o aumento da idade.

**Tabela 4.8 – Valores de  $TDI_{m,x,i}$  para as misturas investigadas**

Traço	a/agl	Idade (dias) / $TDI_{m,x,i}$ (%)				
		3	7	28	56	91
REF	0,35	-	24	65	93	144
	0,50	-	21	43	99	111
	0,65	-	16	39	70	110
50E	0,35	-	58	248	334	379
	0,50	-	47	215	321	340
	0,65	-	52	224	306	362
50EX	0,35	-	47	91	107	126
	0,50	-	87	179	232	293
	0,65	-	62	183	222	289
70E	0,35	-	4	89	141	169
	0,50	-	11	87	167	188
	0,65	-	5	72	169	182

Da análise desta tabela (4.8) verifica-se, no geral, para uma mesma mistura acréscimos de R.E.A, em termos percentuais, muito diferentes para cada uma das relações a/agl investigada.

O aumento na idade, de 3 para 7 dias, resultou em acréscimos de resistividade elétrica significativos para a mistura 50E(58%, 47% e 52%) e 50EX (47%, 87% e 62%) respectivamente para as relações a/agl 0,35, 0,50 e 0,65. Para essas mesmas relações a/agl a mistura REF apresentou acréscimos de 24%, 21% e 16% e a mistura 70E apresentou acréscimos de 4%, 11% e 5%.

Embora a mistura contendo 70E tenha apresentado pequeno acréscimo de R.E.A com o aumento da idade de 3 para 7 dias, os valores apresentados aos 3 dias são superiores àqueles da mistura REF e a 50E, aos 7 dias de idade.

Das misturas investigadas a 50E foi a que apresentou para, as três relações a/agl, maiores acréscimos percentuais nos valores de R.E.A quando a idade foi aumentada para 28, 56 e 91 dias.



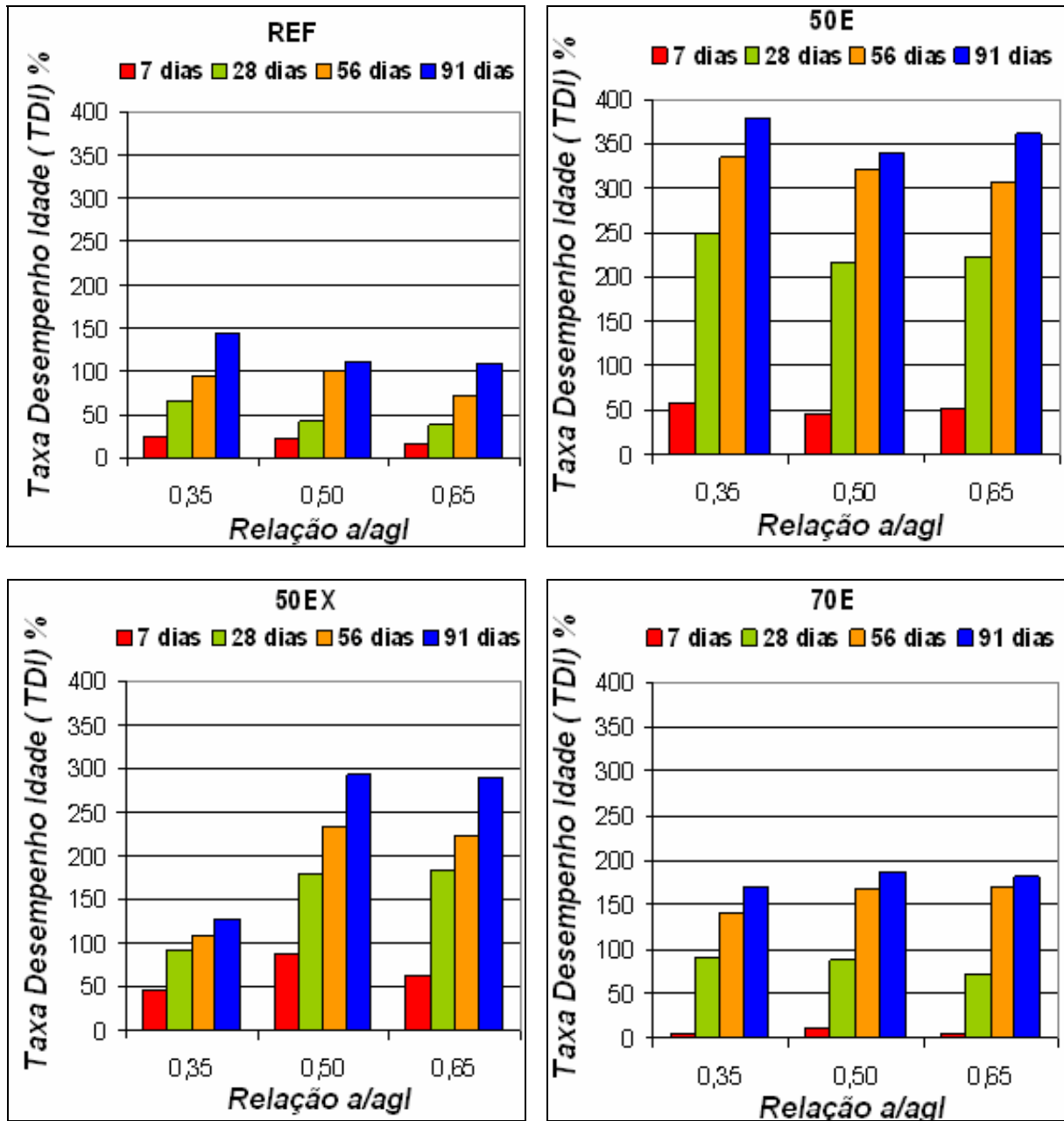


Figura 4.5 – Gráficos taxa desempenho da idade na R.E.A.

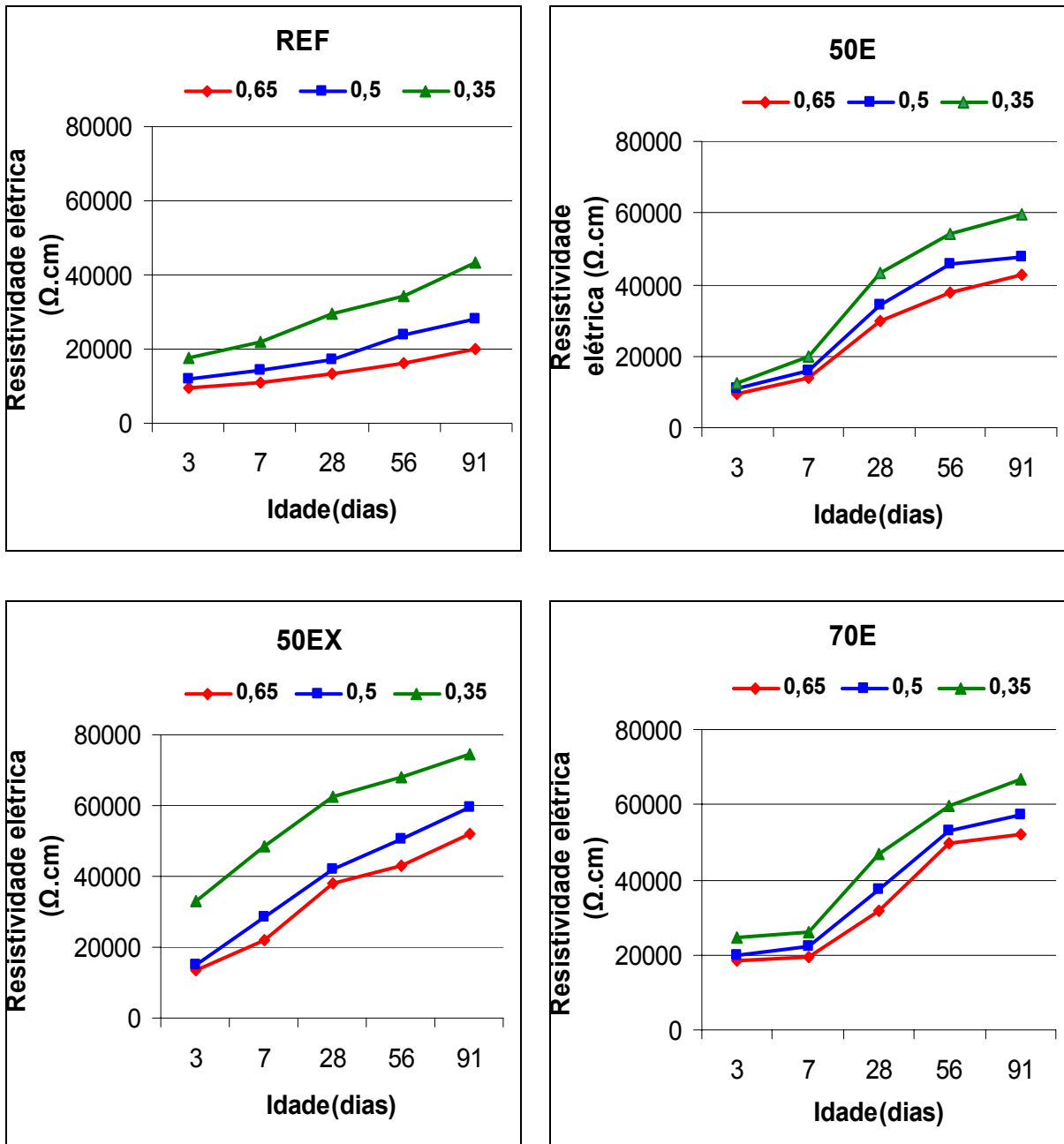


Figura 4.6 – Gráficos valores resistividade elétrica aparente em função da idade.

#### 4.3.4 - Influência do ativador químico

Não foram encontradas bibliografias que tratem sobre a influência de ativadores químicos na resistividade elétrica aparente do concreto. No entanto, alguns trabalhos como os de SPERB (2003) e GOMES (2003) relatam melhorias na resistência à compressão e propriedades ligadas à durabilidade, como penetração de cloretos, absorção capilar, carbonatação e porosidade.

Neste trabalho foi investigada a influência do ativador químico,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , em teor de 4%, na resistividade elétrica aparente de concreto contendo 50% de E.A.F. Dos resultados dos ensaios dessas misturas, sem e com ativador, verificou-se acréscimo de R.E.A, na mistura ativada quimicamente(50EX).

Para facilitar a análise e quantificação da ação do ativador será feito uso da variável Taxa de Desempenho do Ativador -  $\text{TDA}_{\text{at}}^{\Omega\text{cm}}$ . Esta variável traduz matematicamente as variações percentuais da resistividade elétrica devido ao acréscimo de ativador químico, mantendo-se fixos a relação água/aglomerante e o período de cura, de acordo com a expressão abaixo:

$$\text{TDA}_{\text{at}}^{\Omega\text{cm}} (\%) = \left\{ \left[ (R_{50EX}(x, i) - R_{50E}(x, i)) * 100 \right] / R_{50E}(x, i) \right\} \quad (4.3)$$

onde,

$\text{TDA}_{\text{at}}^{\Omega\text{cm}}$  = Taxa de desempenho do ativador na R.E.A , em %;

$R_{50EX}(x, i)$  = Valor da resistividade elétrica aparente do concreto 50EX, na relação a/agl x e idade i em dias, medida em  $\Omega\text{.cm}$ ;

$R_{50E}(x, i)$  = Valor da resistividade elétrica aparente do concreto 50E, na relação a/agl x e idade i em dias, medida em  $\Omega\text{.cm}$ .

A tabela 4.9 apresenta os valores de  $\text{TDA}_{\text{at}}^{\Omega\text{cm}}$  calculados de acordo com as idades de 3, 7, 28, 56 e 91 dias e relação a/agl 0,35, 0,50 e 0,65.

**Tabela 4.9 – Valores percentuais das taxas de aumentos na R.E.A motivadas pelo uso de sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) em concretos com E.A.F ( $\text{TDA}_{\text{at}}^{\Omega_{\text{cm}}}$ )**

Relação a/agl “x”	Idade (dias) / $\text{TDA}_{\text{at}}^{\Omega_{\text{cm}}}$				
	3	7	28	56	91
0,35	164,0	146,0	44,5	26,0	25,0
0,50	39,0	78,0	23,0	10,0	24,0
0,65	45,0	55,0	27,0	15,0	22,0

Da análise da tabela acima, pode-se notar que a influência do ativador químico é mais expressiva nas idades iniciais, ou seja, 3 e 7 dias, e diminuem com o aumento do tempo de cura. Após 91 dias de cura, os percentuais de aumento apresentados pelas três relações a/agl adotadas foram muito semelhantes, registrando-se uma pequena variação destes, ou seja, sendo de 1% quando a relação a/agl passou de 0,35 para 0,50, 2% (050-0,65) e 3%(0,35-0,65).

Aos 3 e 7 dias o aumento da relação a/agl de 0,35 para 0,65 gerou as maiores diferenças entre os percentuais de aumento de R.E.A, dentre as relações investigadas.

Na relação a/agl 0,35, o emprego do ativador químico (sulfato de sódio) nas misturas 50EX, resultou em valores de R.E.A 164%, 146%, 45%, 26% e 25% maiores que os verificados nas idades de 3, 7, 28, 56 e 91 dias do concreto com mesmo teor de escória sem presença de ativador (50E). Para essas mesmas idades e relações a/agl 0,50 e 0,65 os acréscimos de R.E.A foram de 28%, 44%, 19%, 9%, 20% e 31%, 35%, 21%, 13%, 18% respectivamente.

O gráfico da figura 4.7 representa os valores da Taxa de desempenho do ativador na R.EA. ( $TDA_{at}^{\Omega_{cm}}$ ) conforme valores na tabela 4.9.

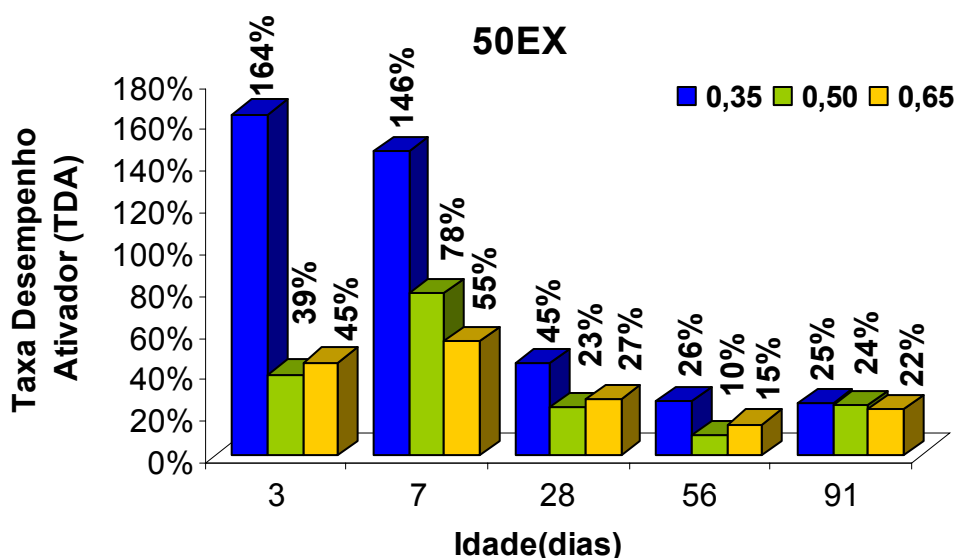


Figura 4.7 – Gráfico Taxa desempenho do ativador na resistividade elétrica aparente do traço 50EX.

#### 4.4 Análise da Solução aquosa dos poros

Os resultados dos ensaios de solução dos poros das misturas investigadas nas idades de 3, 7, 28 e 91 dias são apresentados nas tabelas 4. 10 a 4.12.

Com o aumento do grau de hidratação constata-se diminuição significativa nas concentrações dos íons  $Ca^{2+}$  e  $SO_4^{2-}$ . Este fato está em concordância com o apresentado por SHI (2004) que relata a existência de uma concentração apreciável de íons  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $OH^-$ ,  $Ca^{2+}$  e  $SO_4^{2-}$  logo após o contato do cimento com a água. Entretanto, depois da pega e da hidratação inicial, a concentração dos íons  $Ca^{2+}$  e  $SO_4^{2-}$  diminui a valores negligenciáveis, ficando a solução composta essencialmente por hidróxidos alcalinos.

Constata-se para uma mesma mistura redução na concentração dos íons  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $OH^-$ ,  $Ca^{2+}$  e  $SO_4^{2-}$  com o aumento da relação a/agl.

O aumento no teor de escória, de 50% para 70%, resultou aos 91 dias diminuição na concentração dos íons  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e aumento no teor de  $\text{SO}_4^{2-}$  nas três relações a/agl adotadas.

A adição de ativador químico,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , à mistura 50EX resultou, quando comparada à mesma mistura 50E(sem ativador), acréscimo no teor de  $\text{Na}^+$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ .

Ocorre redução do equivalente alcalino em sódio para uma mesma mistura com o aumento da relação a/agl e com a substituição parcial do cimento por escória. Da mesma forma, para as três relações a/agl adotadas, verifica-se aos 91 dias redução no equivalente alcalino em sódio com o aumento no teor de escória de alto forno, assim como aumento significativo deste na mistura composta com 50% de escória ativada quimicamente, quando comparada à mesma mistura sem ativador.

**TABELA 4.10– Concentração íons da solução aquosa dos poros (mol/l) para relação a/agl 0,35 aos 3, 7, 28 e 91 dias e  $\text{Na}_2\text{O}$  eq.**

Série	Idade (dias)	Concentrações (íons)					
		$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{OH}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Na}_2\text{O}$ eq.
REF	3	0,025	0,01509	0,073	0,103	0,038361	0,034929
	7	0,02346	0,07597	0,0006	0,0966	0,035619	0,073448
	28	0,029385	0,08593	0,00041	0,0938	0,023404	0,085926
	91	0,022368	0,05423	0,0003	0,096	0,018621	0,058051
50E	3	0,01824	0,054105	0,000803	0,0794	0,037377	0,053841
	7	0,01991	0,05142	0,00022	0,076	0,017574	0,053744
	28	0,017772	0,04617	0,0004	0,0738	0,016717	0,048152
	91	0,020175	0,0486	0,0043	0,0736	0,009001	0,052154
50EX	3	0,259649	0,046047	0,044	0,219	0,156194	0,289947
	7	0,259649	0,04796	0,00271	0,1978	0,115988	0,291207
	28	0,258771	0,049501	0,00134	0,18	0,124218	0,291342
	91	0,230263	0,04272	0,00066	0,178	0,128504	0,258372
70E	3	0,02280	0,04247	0,000613	0,0632	0,067351	0,050745
	7	0,021193	0,034791	0,00018	0,0632	0,04478	0,044
	28	0,0193	0,03121	0,000356	0,06	0,040402	0,04
	91	0,0178	0,02872	0,00135	0,058	0,032288	0,037

**TABELA 4.11 – Concentração íons da solução aquosa dos poros (mol/l) para relação a/agl 0,50 aos 3, 7, 28 e 91 dias e Na<sub>2</sub>O eq.**

Série	Idade (dias)	Concentrações (íons)					
		Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	OH <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sub>2</sub> O eq.
REF	3	0,02061	0,01407	0,092	0,092	0,031459	0,029868
	7	0,01803	0,05986	0,0009	0,0876	0,022917	0,057417
	28	0,022149	0,07418	0,00074	0,0818	0,017169	0,070959
	91	0,01842	0,02762	0,00033	0,074	0,0123	0,036593
50E	3	0,01399	0,03146	0,001902	0,061	0,036211	0,034690
	7	0,01877	0,03492	0,002	0,0615	0,01183	0,041747
	28	0,01741	0,0275	0,0004	0,0592	0,013802	0,035505
	91	0,02061	0,0353	0,00028	0,054	0,013288	0,043837
50EX	3	0,212719	0,03875	0,04	0,1838	0,081354	0,23821
	7	0,206578	0,041826	0,00067	0,165	0,086584	0,234099
	28	0,201315	0,04029	0,00065	0,136	0,053322	0,22782
	91	0,193421	0,03555	0,0006	0,1144	0,066352	0,21681
70E	3	0,019736	0,030186	0,00153	0,0572	0,04272	0,039598
	7	0,01973	0,029675	0,00142	0,052	0,030015	0,039256
	28	0,0192	0,02942	0,000386	0,05	0,02772	0,038558
	91	0,016	0,02345	0,0014	0,049	0,01845	0,031430

**TABELA 4.12 – Concentração íons da solução aquosa dos poros (mol/l) para relação a/agl 0,65 aos 3, 7, 28 e 91 dias e Na<sub>2</sub>O eq.**

Série	Idade (dias)	Concentrações (íons)					
		Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	OH <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sub>2</sub> O eq.
REF	3	0,01438	0,009669	0,096	0,054	0,022379	0,020742
	7	0,01425	0,04413	0,00278	0,06	0,018621	0,043287
	28	0,01732	0,04221	0,00194	0,06	0,011787	0,04509
	91	0,01666	0,01867	0,00151	0,049	0,005637	0,028944
50E	3	0,01294	0,026093	0,004851	0,0592	0,025547	0,03109
	7	0,01789	0,02596	0,00363	0,056	0,010716	0,034971
	28	0,01702	0,0266	0,0024	0,0518	0,011059	0,034522
	91	0,01642	0,027	0,002	0,04	0,013459	0,034186
50EX	3	0,145614	0,02417	0,036	0,1416	0,016202	0,16152
	7	0,137938	0,03108	0,00055	0,122	0,035748	0,15839
	28	0,135307	0,025198	0,00052	0,0942	0,014745	0,15189
	91	0,13421	0,02686	0,00045	0,038	0,024175	0,15188
70E	3	0,0193	0,02916	0,003461	0,05	0,042559	0,038487
	7	0,01729	0,0261	0,00249	0,048	0,029548	0,034464
	28	0,0163	0,027388	0,00198	0,045	0,006833	0,034321
	91	0,0145	0,0168	0,00183	0,038	0,016656	0,025554

A concentração de  $\text{OH}^-$  variou muito pouco com o aumento do grau de hidratação, 3 para 91 dias, para cada uma das misturas e relação a/agl investigada. Verificou-se redução no teor deste íon com o aumento da relação a/agl, assim como o acréscimo deste na mistura 50EX(ativada quimicamente), para todas as relações a/agl e idades. A partir das concentrações dos íons apresentadas nas tabelas 4.10 a 4.12 e das equações de SHI et al (1998) foram calculados os valores de condutividade elétrica específica da solução dos poros de cada mistura investigada e relação a/agl adotada. Os resultados são apresentados na tabela 4.13.

**Tabela 4.13 – Resultado dos ensaios de condutividade elétrica**

Série	a/agl	Condutividade Elétrica Específica( $\Omega \cdot \text{cm}^{-1}$ )			
		Idade (dias)			
		3	7	28	91
REF	0,35	2,42	2,32	2,264	2,17
	0,50	2,113	2,022	1,974	1,584
	0,65	1,564	1,489	1,442	1,092
50E	0,35	1,957	1,775	1,704	1,691
	0,50	1,541	1,434	1,358	1,323
	0,65	1,432	1,297	1,225	1,046
50EX	0,35	4,828	4,245	4,048	4,009
	0,50	4,044	3,660	3,093	2,826
	0,65	2,999	2,712	2,143	1,324
70E	0,35	1,822	1,658	1,558	1,467
	0,50	1,529	1,369	1,313	1,202
	0,65	1,415	1,279	1,085	0,968

Da análise desta tabela (4.13) verifica-se em todas as misturas investigadas que o aumento da relação a/agl resultou numa redução nos valores de condutividade elétrica específica e isso se deve à diminuição na concentração dos íons.

Conforme já esperado, a substituição parcial do cimento por E.A.F, misturas 50E e 70E resultou em diminuição nos valores de condutividade elétrica específica em relação ao traço REF. Similar comportamento foi observado para todas as relações a/agl e idades quando aumentado o teor de escória no concreto, ou seja, de 50 para 70% .

Comportamento contrário ocorreu na mistura composta com 50% de escória ativada quimicamente, com acréscimos significativos nos valores de condutividade elétrica específica em todas as idades de ensaio e relações a/agl. Os valores obtidos foram inclusive muito superiores àqueles obtidos no concreto de referência (REF).



A figura 4.8 apresenta a influência do ativador químico sobre os valores de pH da solução dos poros.

A mistura 50EX apresentou valores de pH que superaram os valores encontrados pelas misturas 50E e REF. Este comportamento está em concordância com os resultados apresentados por SHI (2000).

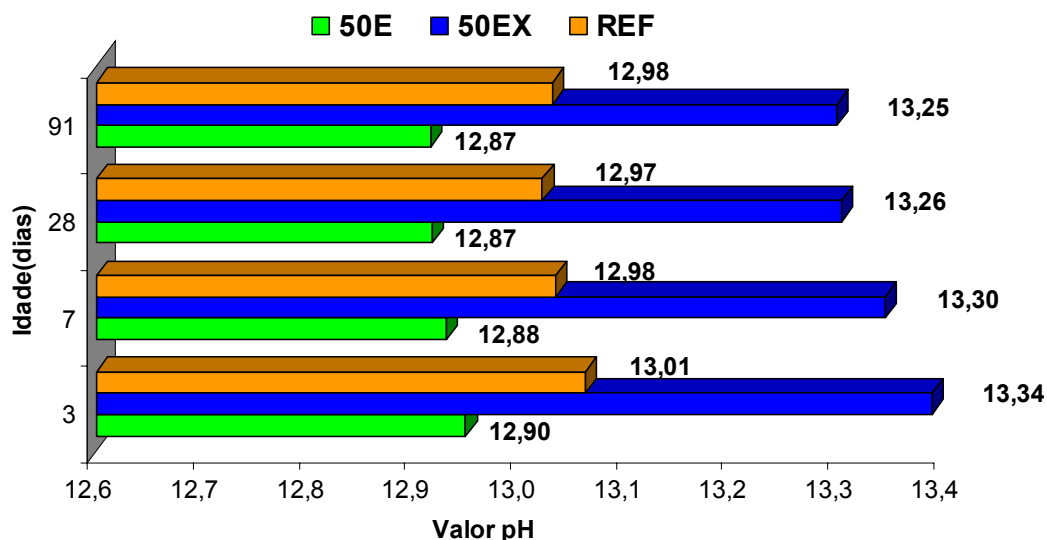


Figura 4.8 – Gráfico da influência do sulfato de sódio sobre os valores de pH .

#### 4.5 Análise do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio

Os resultados dos ensaios de porosimetria de mercúrio são apresentados na tabela 4.14. Com estes resultados, foi possível a determinação do diâmetro crítico, que é definido por SATO (1998) como a menor dimensão de poro acima da qual se estabelece uma trajetória de poros conectados de uma extremidade a outra da amostra.

Dos resultados obtidos verifica-se que o aumento da relação a/agl modificou a estrutura de poros das misturas em pasta investigadas. Observam-se aumentos tanto para os valores do diâmetro crítico como também no volume total de intrusão de mercúrio, conseqüências estas, da modificação na distribuição de tamanho de poros e de sua interconexão.

Quando comparada à mistura de referência (REF) àquelas contendo escória, 50E e 70E mostraram uma alteração na sua estrutura de poros. Assim, para a relação a/agl 0,35 e idade de 28 dias, a mistura 50E teve seu diâmetro crítico reduzido em 28,5% quando comparado ao valor do traço de referência (REF). A mistura com 70% de escória (70E) teve uma redução ainda maior no diâmetro crítico, chegando a 77,27% em relação ao concreto sem adição (REF). Naquela

ativada quimicamente, (50EX), as reduções nos diâmetro críticos ainda em relação à mistura REF foram menos expressivas sendo de 17% (0,35), 21% (0,50) e 38% (0,65). Observou-se que a redução no diâmetro crítico é mais influenciada pelo teor de E.A.F do que pela ativação química desta. A explicação para este comportamento está no fato, de que, o ativador químico age somente como catalisador das reações de hidratação da E.A.F enquanto que os produtos de hidratação da EAF dependem do teor de escória e não da presença do sulfato de sódio.

As reduções no diâmetro crítico foram mais expressivas nas misturas de concreto com maior teor de E.A.F. Esta observação é a mesma relatada por MALHOTRA (1987).

Da análise da tabela 4.14 e figura 4.9 verificam-se para um mesmo valor de diâmetro crítico, distintos valores de volume de intrusão. Assim, a mistura de referência na idade de 3 dias e relação a/agl 0,35 apresentou volume de intrusão de 0,1351 mL/g

e diâmetro crítico de 0,1005  $\mu\text{m}$ . As misturas 50EX, a/agl 0,50 aos 3 dias e esta mesma mistura com relação a/agl 0,65 aos 28 dias apresentaram diâmetros críticos semelhantes ( 0,1006 $\mu\text{m}$  e 0,1007 $\mu\text{m}$ ), porém valores de volume de intrusão de 0,205 mL/g e 0,2676 mL/g respectivamente. Da mesma forma as misturas 50E aos 3 dias e relação a/agl 0,35 apresentou valores de volume de intrusão e diâmetro crítico de 0,1319 mL/g e 0,0726  $\mu\text{m}$ , enquanto a mistura 70E na idade de 7 dias e relação a/agl 0,65 apresentou valores de volume de intrusão de 0,317 mL/g e diâmetro crítico de 0,0723 $\mu\text{m}$ . Situação semelhante verifica-se também para a mistura 50E relação a/agl 0,35 na idade de 7 dias e essa mesma mistura aos 28 dias e relação a/agl 0,5 com valores de diâmetro crítico de 0,0604  $\mu\text{m}$  e 0,0603 $\mu\text{m}$  e volume de intrusão de 0,1176 mL/g e 0,2094 mL/g. Conclui-se que o diâmetro crítico em si não é o melhor parâmetro da estrutura de poros para caracterizar as diferentes misturas investigadas e servir de base para explicação de outros fenômenos que ocorrem no concreto, como por exemplo a resistividade elétrica aparente.

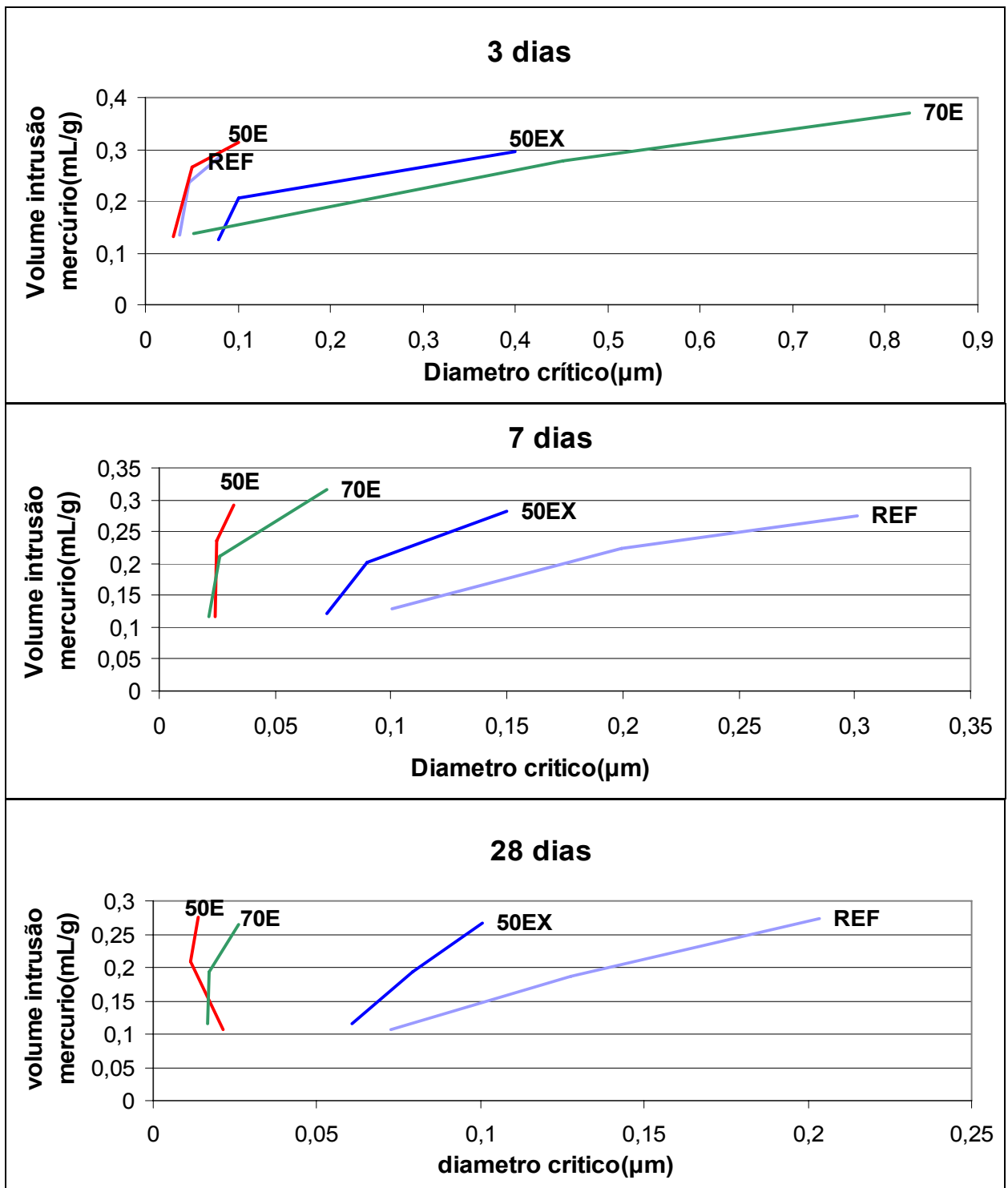
Da figura 4.10 a 4.12 (A,B,C) observa-se para a relação a/agl 0,35 e idades de ensaio de 3, 7 e 28 dias, que as misturas compostas com 50% de escória, sem e com ativador químico, apresentaram curvas de distribuição de tamanho de poros quase que coincidentes e diferente daquela composta com 70% de escória onde se

constata um maior refinamento dos poros. Esse mesmo comportamento é observado para a relação a/agl 0,50 nas idades de 7 e 28 dias e para a relação a/agl 0,65 aos 28 dias.

Na idade de 3 dias e relação a/agl 0,50 e 0,65 a mistura ativada apresenta um maior refinamento dos poros.

**TABELA 4.14 – Resultados dos ensaios de porosimetria de mercúrio**

			Idade (dias)	Volume de intrusão de mercúrio (mL/g)	Ø crítico (µm)
Mistura	REF	a/agl=0,35	3	0,1351	0,1005
			7	0,13	0,1001
			28	0,1061	0,0726
		a/agl=0,50	3	0,236	0,2258
			7	0,2225	0,1274
			28	0,1876	0,0999
		a/agl=0,65	3	0,2837	0,4503
			7	0,2745	0,301
			28	0,2733	0,1634
	50E	a/agl=0,35	3	0,1319	0,0722
			7	0,1176	0,0604
			28	0,1061	0,0519
		a/agl=0,50	3	0,2648	0,3602
			7	0,2367	0,1004
			28	0,2094	0,0603
		a/agl=0,65	3	0,3133	0,721
			7	0,2927	0,1991
			28	0,275	0,0785
	50EX	a/agl=0,35	3	0,1249	0,0789
			7	0,1206	0,0726
			28	0,1153	0,0605
		a/agl=0,50	3	0,2050	0,1006
			7	0,2029	0,0897
			28	0,1923	0,079
a/agl=0,65		3	0,2966	0,3997	
		7	0,2811	0,1497	
		28	0,2676	0,1007	
70E	a/agl=0,35	3	0,1381	0,0519	
		7	0,1165	0,0213	
		28	0,1146	0,0165	
	a/agl=0,50	3	0,2772	0,4522	
		7	0,2108	0,0263	
		28	0,1941	0,0173	
	a/agl=0,65	3	0,3715	0,8257	
		7	0,3170	0,0723	
		28	0,2646	0,0263	



4.9 - Gráfico resultado ensaio porosimetria por intrusão de mercúrio.

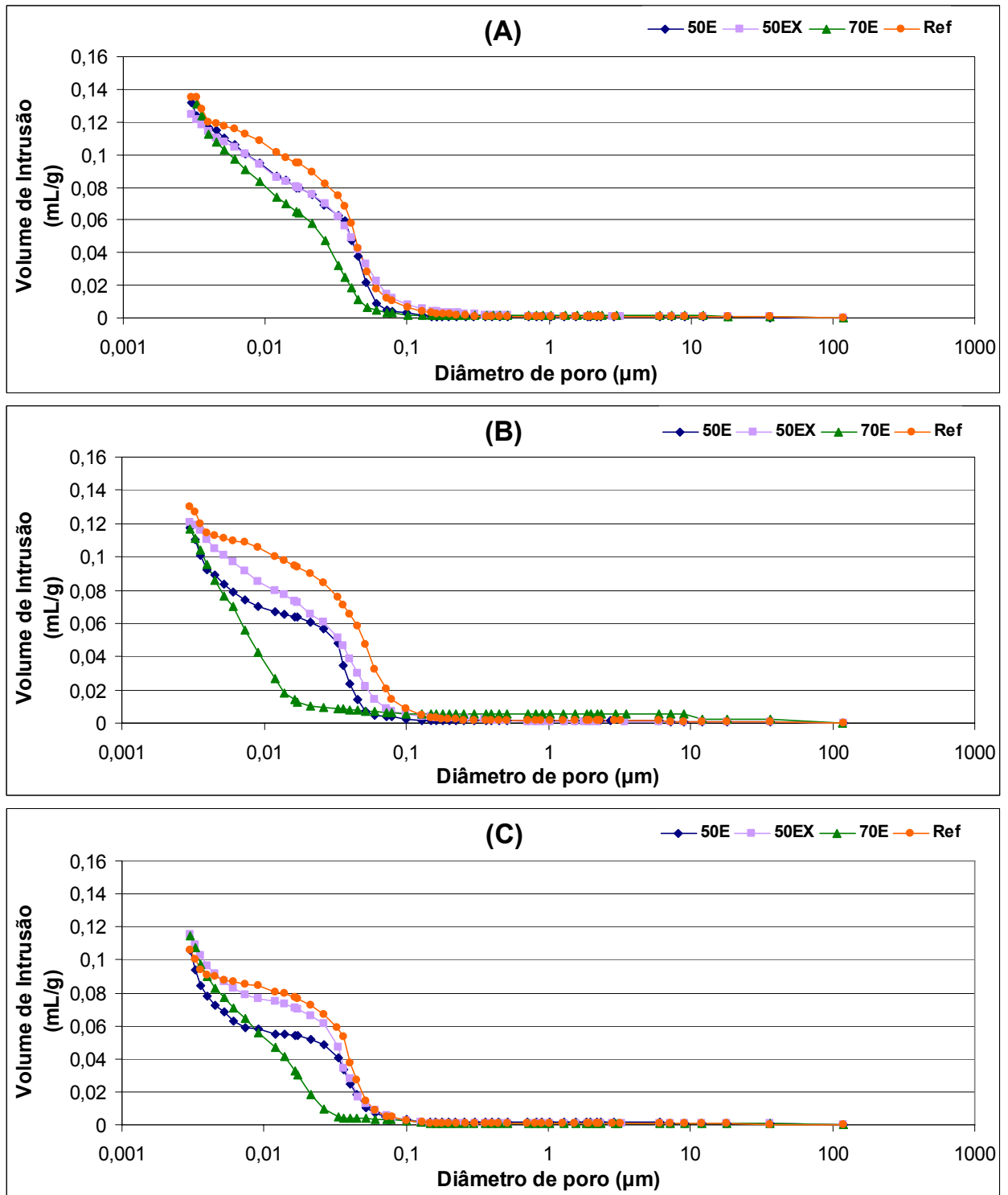


Figura 4.10 – Distribuição de tamanho de poros das amostras investigadas na relação a/agl 0,35 e idades de 3 dias (A), 7 dias (B) e 28 dias (C).

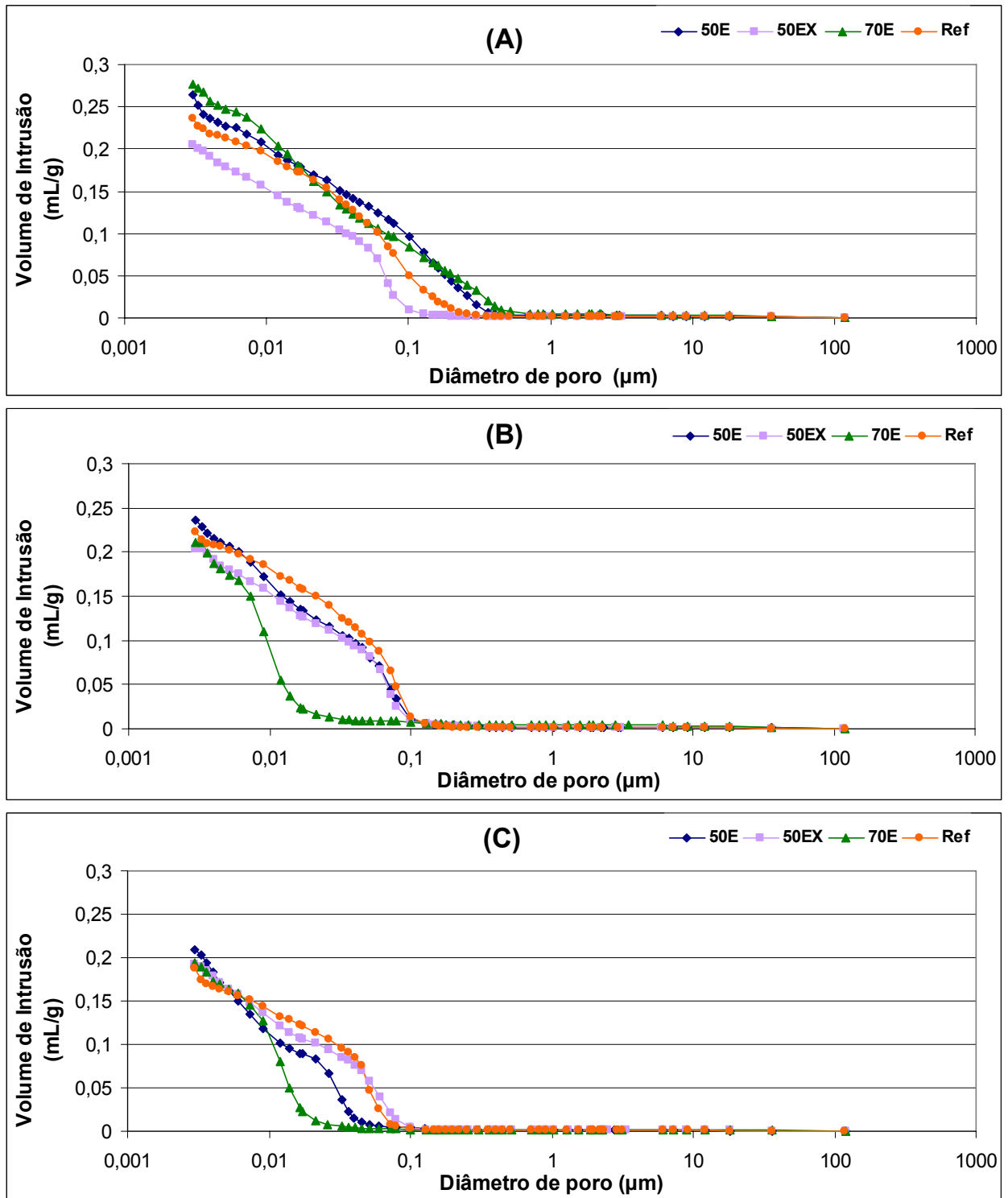


Figura 4.11 – Distribuição de tamanho de poros das amostras investigadas na relação a/agl 0,50 e idades de 3 dias (A), 7 dias (B) e 28 dias (C).

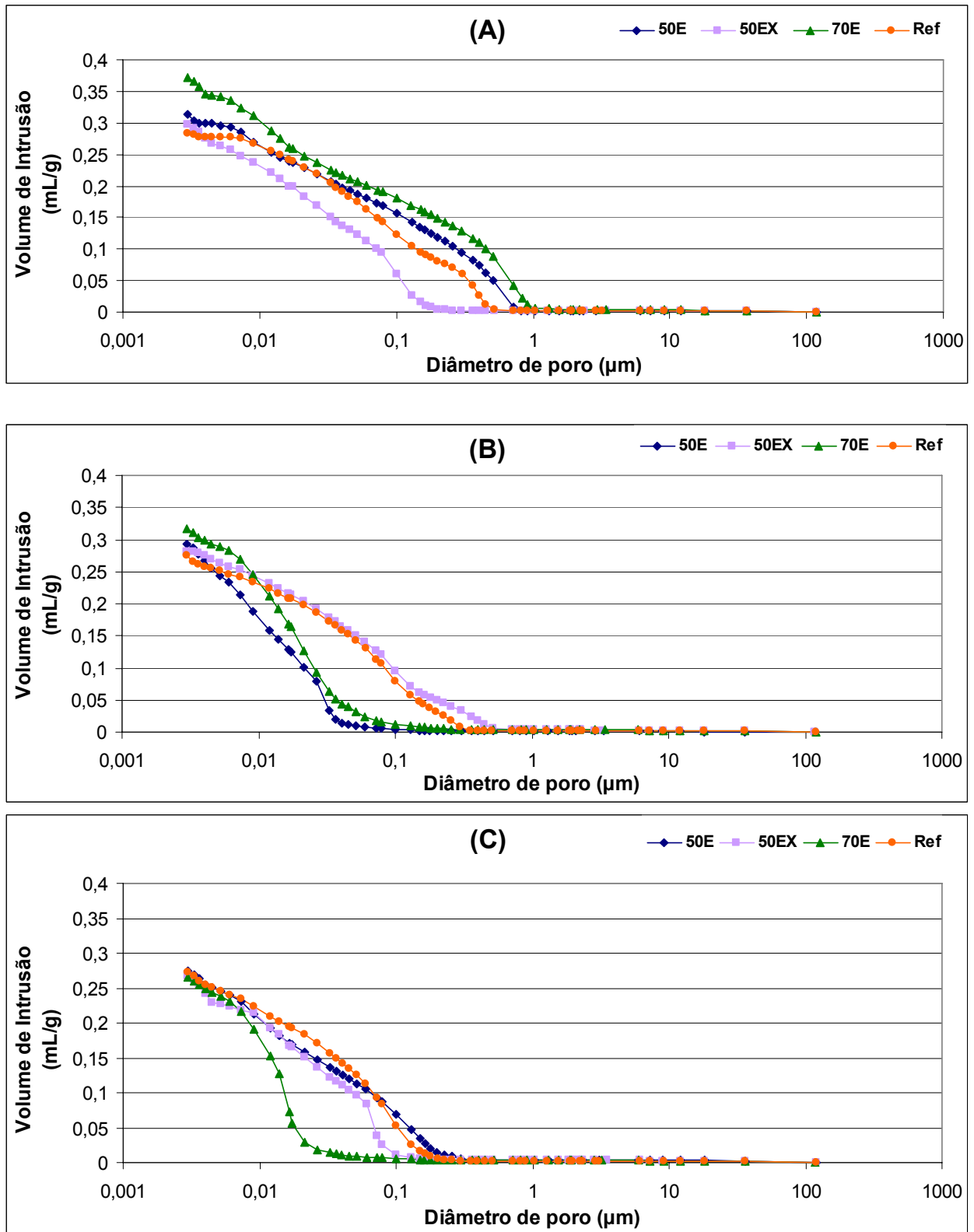


Figura 4.12 – Distribuição de tamanho de poros das amostras investigadas na relação a/agl 0,65 e idades de 3 dias (A), 7 dias (B) e 28 dias (C).

## 4.6 Integração dos resultados

Neste item são analisados os interrelacionamentos existentes entre as variáveis investigadas. Assim, foram estudadas as relações existentes entre as seguintes propriedades:

- Resistividade elétrica aparente x Resistência à compressão
- Resistividade elétrica aparente x Condutividade elétrica específica
- Resistividade elétrica aparente x Concentração de  $\text{OH}^-$
- Resistividade elétrica aparente x Volume de intrusão de mercúrio

### 4.6.1 - Resistividade elétrica aparente versus resistência à compressão

Na figura 4.13 são apresentados os gráficos resultantes da integração realizada entre os resultados de resistividade elétrica aparente e de resistência à compressão axial para as idades de 3, 7, 28 e 91 dias.

Da análise destes verifica-se, em todas as idades, um crescimento dos valores de resistividade elétrica aparente com o aumento da resistência à compressão. Esse comportamento é mais pronunciado nas idades de 28 e 91 dias, do que nas idades iniciais, 3 e 7 dias, ou seja, o aumento de resistência nas idades iniciais resulta em menores acréscimos de resistividade elétrica aparente do que nas demais idades, exceto para a mistura ativada quimicamente (50EX).

Observou-se uma relação muito satisfatória entre estas propriedades, com altos coeficientes de correlação.

Em todas as idades constatou-se que para um mesmo valor de resistência à compressão correspondem diferentes valores de resistividade elétrica aparente, seguindo sempre a mesma tendência, REF, 50E, 50EX e 70E. Comportamento semelhante foi observado por HOPPE (2005) em misturas aglomerantes contendo escória, cinza volante e diferentes teores de cinza de casca de arroz, reforçando-se que no projeto de estruturas não se pode considerar apenas a resistência mecânica mas, também, as demais propriedades que influenciam a sua durabilidade.



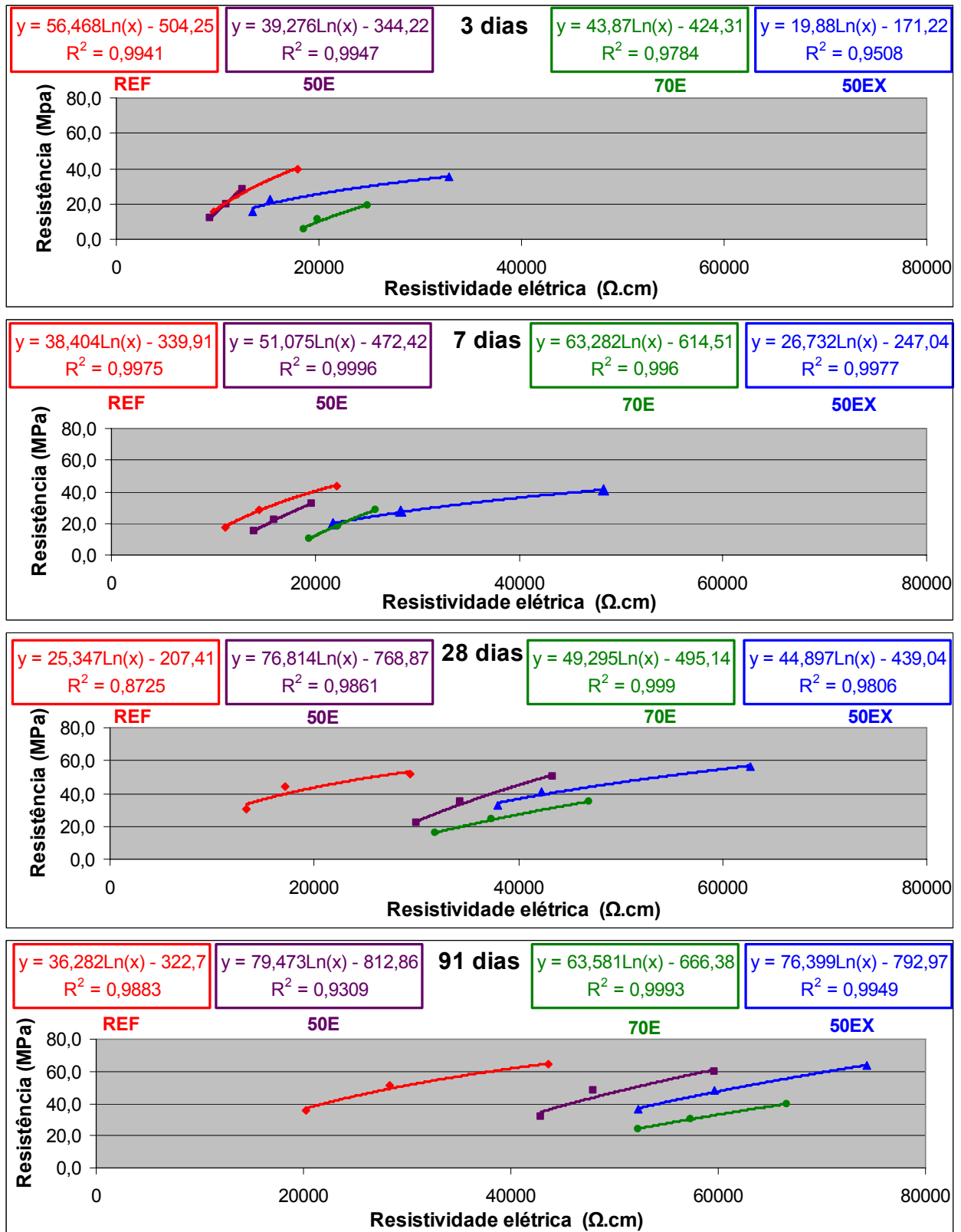


Figura 4.13 – Gráficos resistividade elétrica aparente versus resistência à compressão.

#### 4.6.2 - Resistividade elétrica aparente versus condutividade elétrica específica

Para todas as misturas investigadas independentemente da idade, observa-se um crescimento da condutividade elétrica específica da solução dos poros com o aumento da resistividade elétrica aparente do concreto. As correlações exponenciais foram altas, aproximando-se da unidade, conforme figura 4.14. Isso ocorre devido a grande influência que a relação  $a/agl$  e a composição da solução dos poros exercem nas duas propriedades.

Este comportamento está relacionado tanto a relação  $a/agl$  como ao teor de E.A.F usado nas misturas. Para o caso da condutividade elétrica específica a diminuição da relação  $a/agl$  resulta em elevação de seu valor, já que há uma menor dissolução dos íons na fase aquosa, resultando, assim, em uma maior concentração dos mesmos. Quando há a substituição parcial do cimento pela escória, constata-se uma diminuição da condutividade elétrica específica. Esta redução é maior para os concretos com maior teor de escória.

Para a resistividade elétrica, a redução da relação  $a/agl$  traz como consequência uma elevação na resistividade elétrica pela maior compacidade da estrutura interna do concreto. Este efeito é bem mais expressivo quando se eleva o teor da escória, usada como adição mineral, ao concreto.

As variações na resistividade são maiores que as verificadas na análise da condutividade elétrica específica. Isto justifica as grandes variações na resistividade elétrica por conta de pequenas variações junto à condutividade elétrica específica. Este efeito é mais expressivo no caso dos altos teores de EAF adicionados ao concreto.

O controle da condutividade elétrica específica por si só não garante o aumento da durabilidade das estruturas de concreto. Pois neste caso quanto menor a condutividade elétrica menor a resistividade elétrica do concreto.

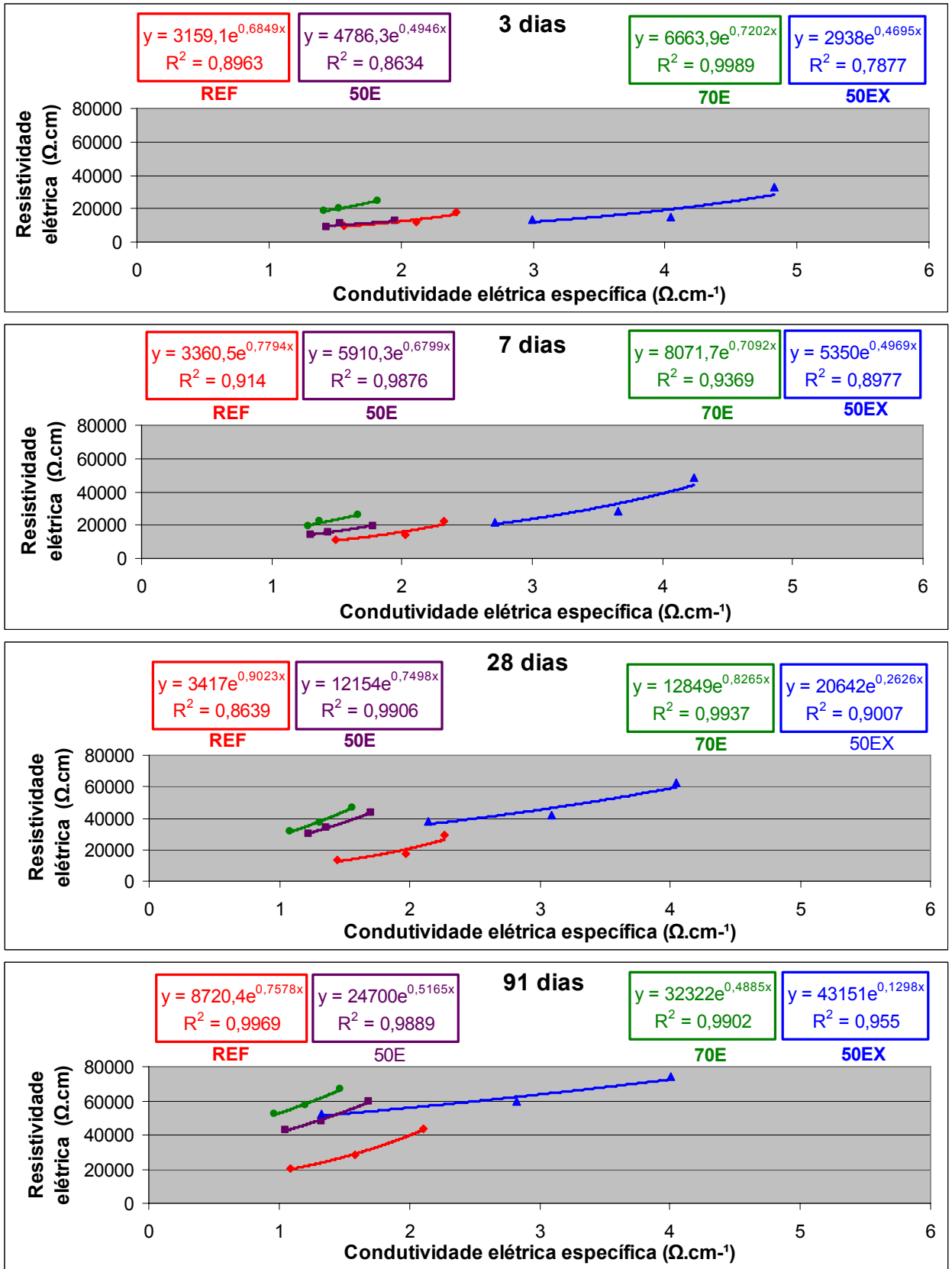


Figura 4.14 – Gráficos R.E.A versus conductivade eléctrica específica

#### 4.6.3 - Resistividade elétrica aparente versus Concentração de OH<sup>-</sup>

A figura 4.15, apresenta o interrelacionamento entre a resistividade elétrica aparente e a concentração de íon OH<sup>-</sup>, presente na solução dos poros. Observa-se nestes, boas correlações exponenciais entre estas duas propriedades analisadas. O comportamento é muito similar ao verificado na integração feita anteriormente entre a resistividade e a condutividade elétrica específica. Esta similaridade é justificada pela argumentação apresentada por WEE et al (2000) que designa o íon OH<sup>-</sup>, como sendo o mais condutivo entre os presentes na fase aquosa dos poros sendo, portanto o maior contribuinte para a condutividade elétrica específica. Similarmente à integração realizada anteriormente a concentração de OH<sup>-</sup>, embora com boas correlações com a resistividade, parece não ser um fator que possa sofrer alterações sem prejudicar o aumento da durabilidade.

As misturas com 50% de escória ativada com sulfato de sódio, destacam-se entre as demais por apresentarem altos valores de resistividade bem como elevados valores nas concentrações do íon OH.

Verificou-se que para uma mesma concentração do íon OH correspondem a diferentes valores de resistividade dependendo este do percentual de escória empregado nas misturas. Seguindo este comportamento, a maior resistividade se deu para as misturas com menores concentrações de OH<sup>-</sup> e com maior teor de escória (70E).

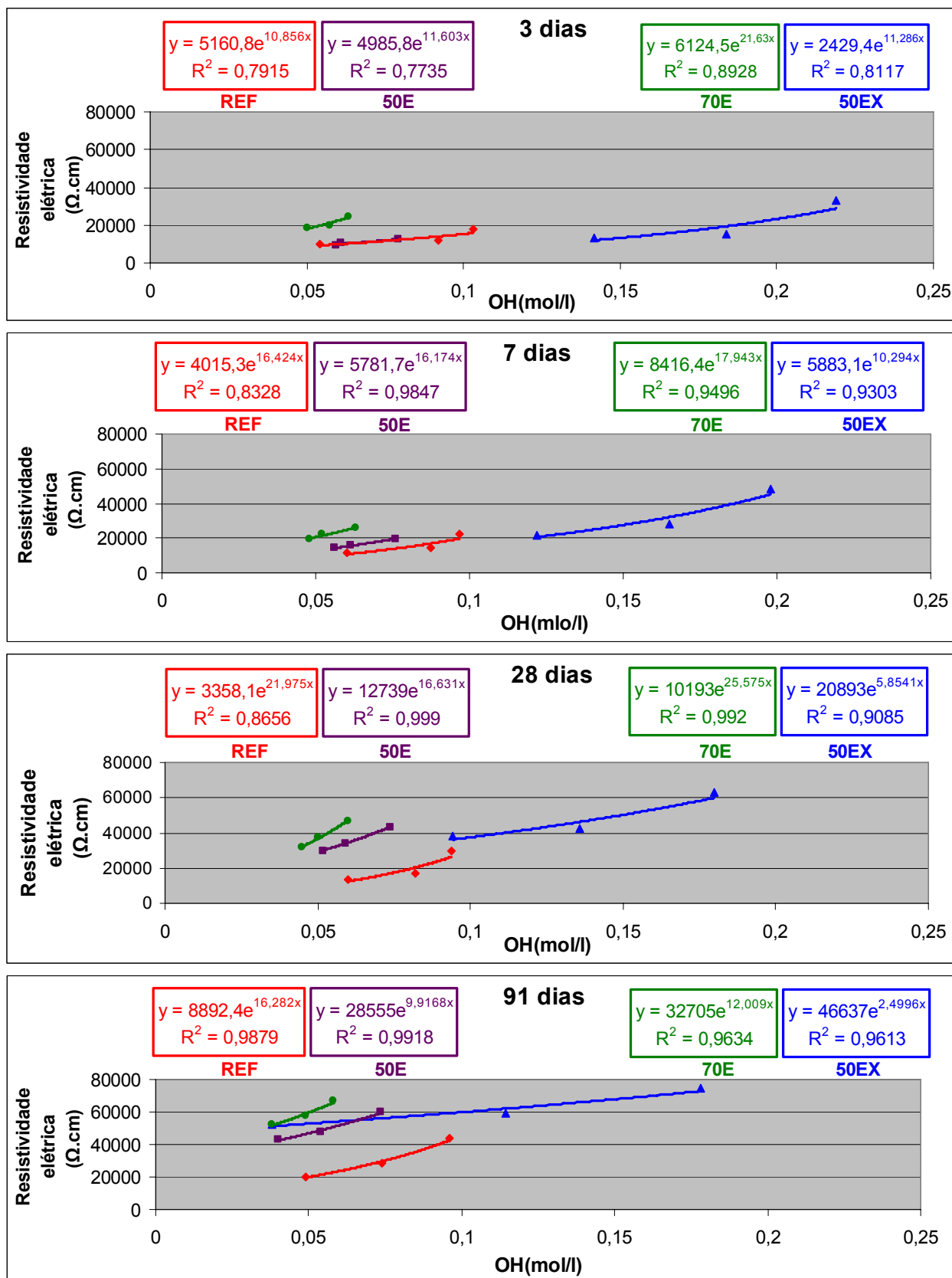


Figura 4.15 – Gráficos resistividade elétrica aparente versus concentração íon OH<sup>-</sup>

#### **4.6.4 - Resistividade elétrica aparente versus Porosimetria intrusão mercúrio**

Do interrelacionamento entre a R.E.A (resistividade elétrica aparente) e o volume de intrusão de mercúrio presentes nos gráficos da figura 4.16, observa-se que pequenas reduções no volume de intrusão de mercúrio geraram aumentos expressivos nos valores da resistividade elétrica das amostras investigadas. Nestes, as correlações logarítmicas entre os resultados dos ensaios são muito altas. A redução da relação  $a/g_l$  promoveu um refinamento dos poros e atuou no sentido de aumentar a R.E.A.

Constata-se assim que a redução no volume de intrusão de mercúrio (eixo da abscissa) das amostras investigadas resultou num aumento na R.E.A (eixo da ordenada). Para as misturas com maior percentual de E.A.F as mudanças na R.E.A são bem mais sensíveis às alterações no volume de mercúrio intrudido do que no concreto onde somente foi usado cimento (REF). Isto porque a ação dos produtos de hidratação da EAF atuou sobre a estrutura dos poros, refinando-os de modo que a promover uma diminuição no volume de mercúrio intrudido e também um aumento no valor da R.E.A. As posições superiores das linhas das misturas com EAF em relação à posição ocupada pela mistura de referência servem para confirmar tal comportamento. Esse comportamento é mais pronunciado na mistura contendo escória e ativador químico (50EX).

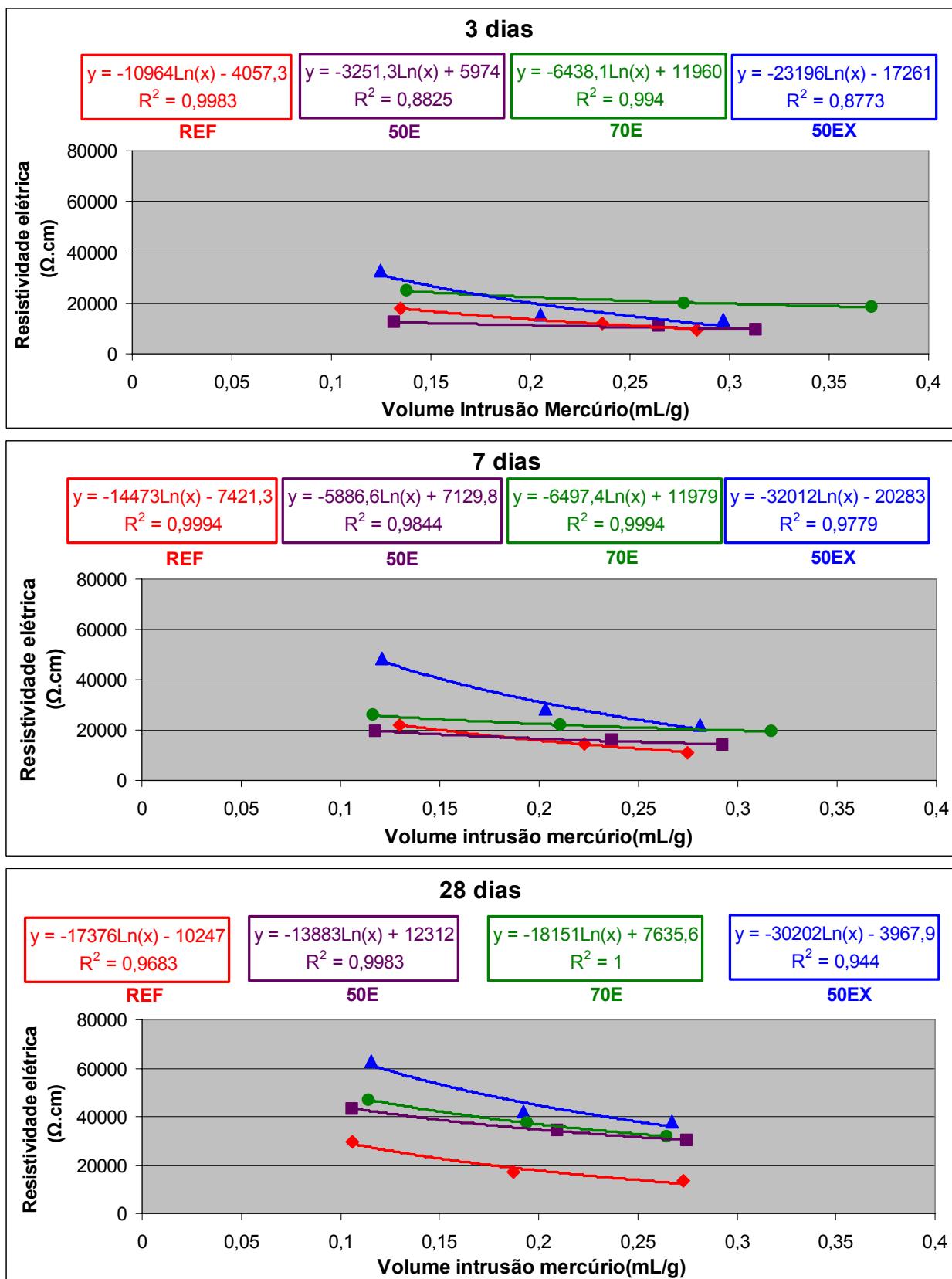


Figura 4.16 – Gráficos R.E.A versus volume intrusão mercúrio.

#### **4.7 Análise da resistividade elétrica das misturas das misturas investigadas, a partir da especificação da resistência à compressão.**

O conjunto cimento - adição mineral tende a melhorar as propriedades ligadas à durabilidade do concreto. Estas, por sua vez, dependerão muito do tipo e do teor de adição, da relação a/agl e principalmente da cura, como já relatado.

Com relação à parte estrutural, os projetistas em especial, preocupam-se em dar estabilidade e segurança às obras. Dentro deste aspecto, o concreto, na sua diversidade de formas, é visto como um material viável e capaz de atender simultaneamente a estas especificações.

As estruturas são projetadas para suportarem grandes solicitações (resistência à compressão) bem como com a capacidade de resistirem à agressividade do meio em que estão inseridas. Assim, o concreto, desempenha dupla função em relação ao aço, ou seja, de proteção física (impactos) bem como a de uma barreira contra a ação deletéria de alguns agentes químicos (agressivos).

Para satisfazer tanto à resistência como aos critérios de durabilidade é necessária a realização de estudos que visem garantir que o concreto possa atender tanto a uma como a outra propriedade. A integração dos resultados realizada no tópico anterior demonstrou que nem sempre a durabilidade está ligada a altas resistências à compressão. Observou-se que para um mesmo valor de resistência corresponderam valores diferenciados de resistividade elétrica aparente. A ligação entre resistência e propriedades ligadas à durabilidade, dentre as quais a resistividade elétrica aparente, foi e continuará sendo tema de diversos trabalhos realizados na área de concreto.

Como a resistência à compressão é o parâmetro usado por projetistas no momento do dimensionamento de estruturas, a seguir será realizada uma análise do comportamento da resistividade elétrica aparente em função da resistência a compressão do concreto.

A norma brasileira NBR 6118/2003 estabelece para o concreto armado uma relação a/agl menor ou igual a 0,60 e resistência à compressão característica igual ou superior a 25 MPa, isto para um ambiente urbano com moderada agressividade (Classe II). De forma a garantir margem para segurança em relação ao estabelecido pela norma, neste estudo fixaram-se duas faixas para a resistência aos 28 dias e uma para os 91 dias. Na primeira idade, os níveis foram de 30MPa e





Tabela 4.16 – Valores de resistência e R.E.A para a idade de 91 dias.

Mistura	a/agl	fc <sub>91</sub> (MPa)	R <sup>2</sup> (Abrams)	ρ (Ω.cm)	R <sup>2</sup> (Abrams)	fc x ρ R <sup>2</sup>
REF	0,35	64,1	1,0 $fc = 128,1 e^{-1,9231x}$	43565	0,9921 $\rho = 105050e^{-2,5612x}$	0,99
	0,50	50,9		28254		
	0,65	36,0		20204		
50E	0,35	59,7	1,0 $fc = 126,79e^{-2,0683x}$	59680	0,9871 $\rho = 86170e^{-1,101x}$	0,96
	0,50	47,8		47934		
	0,65	32,1		42893		
50EX	0,35	63,6	1,0 $fc = 122,48e^{-1,8693x}$	74397	0,9909 $\rho = 110730e^{-1,1788x}$	1,00
	0,50	48,2		59610		
	0,65	36,3		52236		
70E	0,35	39,7	1,0 $fc = 70,349e^{-1,65x}$	66615	0,9930 $\rho = 87601e^{-0,8096x}$	1,00
	0,50	30,5		57338		
	0,65	24,2		52250		

---

fc = Resistência à compressão    ρ = resistividade elétrica aparente  
x = relação a/agl    R<sup>2</sup> = correlação Abrams

---

A partir dos valores de resistência pré-fixados e através das fórmulas presentes nas tabelas 4.15 e 4.16, chegamos aos valores de relação a/agl e de resistividade elétrica presentes nas tabelas 4.17 e 4.18.

**Tabela 4.17 – Valores de relação  $a/agl$  e de resistividade elétrica aparente aos 28 dias, para a resistência à compressão de 30 e 50MPa.**

Mistura	30MPa		50MPa	
	$a/agl$	$\rho$ ( $\Omega.cm$ )	$a/agl$	$\rho$ ( $\Omega.cm$ )
REF	0,67	12042	0,39	25216
50E	0,54	33785	0,36	42136
50EX	0,69	33895	0,41	54048
70E	0,41	42955	-	-

**Tabela 4.18 – Valores de relação  $a/agl$  e de resistividade elétrica aparente aos 91 dias para a resistência à compressão de 50MPa.**

Mistura	50MPa	
	$a/agl$	$\rho$ ( $\Omega.cm$ )
REF	0,49	29947
50E	0,45	52503
50EX	0,48	62882
70E	-	-

Os critérios estabelecidos pelo CEB 192 (1989), *apud* BRAUN (2003), presentes na tabela 4.3, indicam a probabilidade de ocorrência de corrosão do aço, e serão usados para avaliar desempenho técnico das misturas, quanto à resistividade elétrica. Na tabela 4.17, observou-se que a mistura REF para o nível de resistência de 30MPa aos 28 dias não dá garantia de que o aço envolvido por este concreto não venha a sofrer com o passar do tempo um processo de corrosão, isto porque a sua resistividade elétrica ficou na faixa entre 10.000 e 20.000  $\Omega.cm$ , o que

caracteriza a existência de um risco moderado para o fenômeno da corrosão do aço. Nota-se, ainda que os valores de resistividade observados nos concretos 50E e 50EX foram bem próximos, porém com relações a/agl distintas. As maiores relações a/agl foram observadas pelas misturas 50EX e REF, superiores inclusive aos limites estabelecidos pela NBR 6118/2003, para a durabilidade das estruturas de concreto armado. Portanto estas serão desconsideradas na avaliação técnica e também na etapa posterior onde serão realizadas análises econômicas.

Para o nível de resistência de 50 MPa, todas as misturas apresentaram relações de a/agl abaixo de 0,60. Para este nível de resistência, a mistura 70E apresentar uma relação a/agl muito pequena (0,22), fora dos limites de confiabilidade da curva de Abrams sendo, portanto, desconsiderada para efeito de análise. Constatou-se para as demais misturas que a probabilidade de ocorrência de corrosão é desprezível, já que para esses concretos o valor da R.E.A foi bem superior ao mínimo pré-estabelecido para que não ocorra a corrosão (20.000 $\Omega$ .cm).

A mistura com 50% de escória ativada (50EX) apresentou valor de R.E.A 114% acima do observado no concreto de referência (REF).

Para a idade de 91 dias e nível de resistência de 50 MPa (tabela 4.18) a mistura 70E apresentou uma relação a/agl muito baixa (0,20), fora dos limites de confiança da curva de Abrams, fato este que como no nível de 50MPa aos 28 dias, leva a não realização da sua análise tanto para critérios técnicos (resistência e resistividade) como econômicos. A R.E.A apresentada pelo concreto 50EX superou os valores observados nos concretos 50E e REF em 20% e 110%, respectivamente.

De forma geral, constatou-se dentro das idades e resistências especificadas, que todas as misturas tiveram um aumento da R.E.A com a diminuição da relação a/agl e o aumento da resistência à compressão.

A análise de custos a ser realizada no próximo item servirá para apontar qual mistura investigada teve a melhor relação custo / benefício.

Os valores de R.E.A calculados a partir das expressões contidas nas tabelas 4.15 e 4.16 estão representados nos gráficos (A) e (B) da figura 4.17.

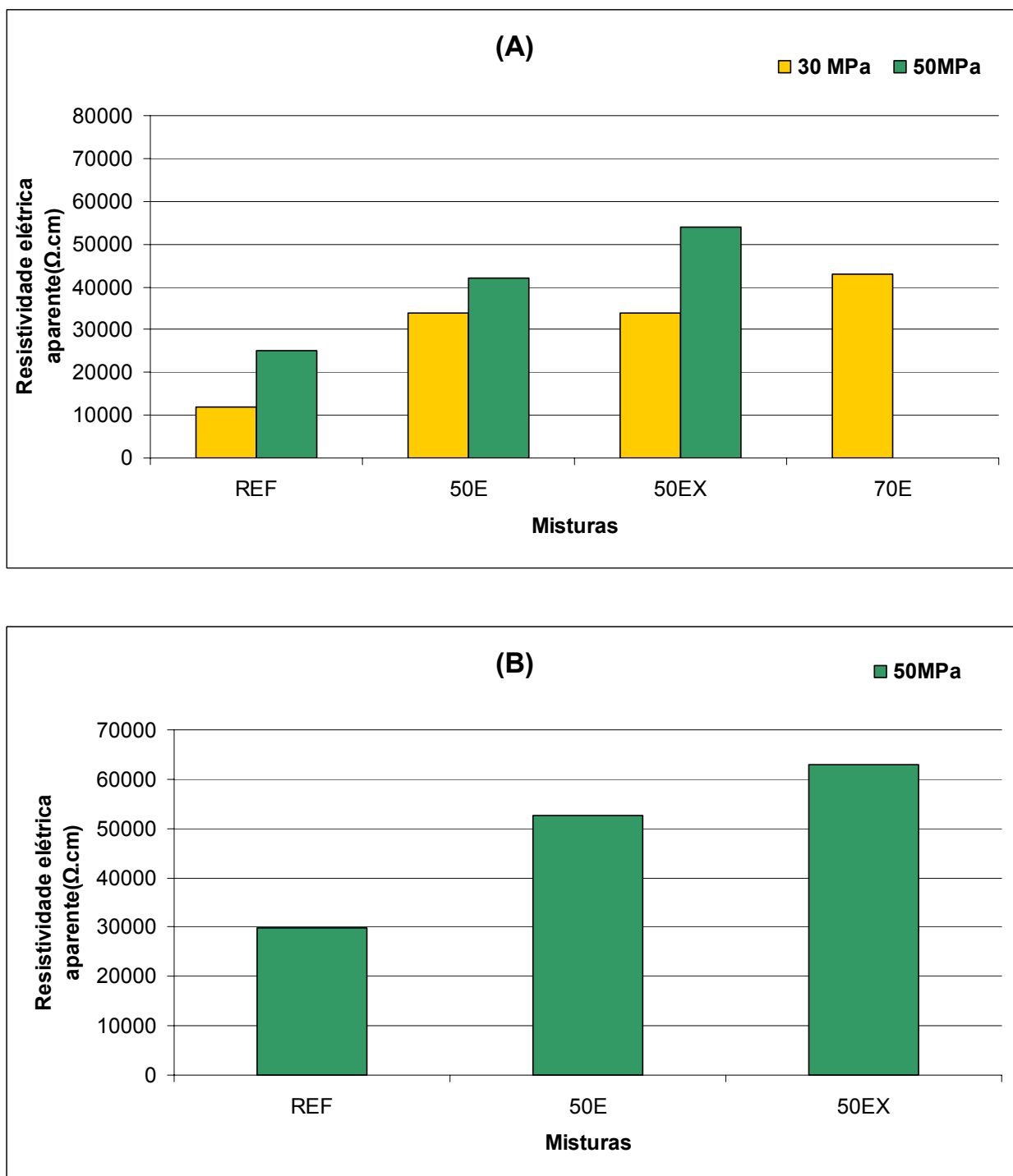


Figura 4.17 – Gráficos da resistividade elétrica aparente das misturas para as resistências de 30 e 50 MPa aos 28 dias (A) e 50 MPa aos 91 dias(B)

## 4.8 Análise de custo

A análise até então dos resultados da investigação apontam para um aumento na resistividade dos concretos com adição de escória de alto forno em relação ao concreto feito com cimento puro (REF). Tal fato aumenta a durabilidade, sobretudo das estruturas de concreto armado, tornando-as menos vulneráveis aos ataques de agentes agressivos (cloretos entre outros). Visando a escolha da mistura de melhor desempenho técnico-econômico, será realizada a partir de agora uma análise no sentido de se verificar qual das misturas investigadas apresenta a melhor relação custo/benefício, ou seja, a que apresenta o melhor desempenho técnico a um menor custo. Para isso serão considerados os resultados apresentados por todas as misturas investigadas, nos níveis de resistência especificados.

As quantidades de materiais usados na produção de um metro cúbico são apresentadas na tabela 4.19.

Na tabela 4.20, estão os custos de produção para cada metro cúbico de concreto das misturas investigadas. Os valores foram obtidos de acordo com os preços vigentes em novembro de 2005, conforme presentes no anexo B, deste trabalho e desconsiderando-se o custo relativo à parcela da água, devido ao fato deste ser bem inferior ao dos outros materiais.

Os custos de cada MPa presentes na tabela 4.21 são resultado, para cada relação  $a/agl$ , do quociente entre custo total pela resistência à compressão aos 91 dias. Esta tabela também apresenta o custo médio por MPa, obtido através da média aritmética entre custos encontrados por MPa nas três relações  $a/agl$ .

Tabela 4.19 – Quantidade de materiais utilizados por m<sup>3</sup> de concreto.

Mistura	a/agl	Cimento (Kg/m <sup>3</sup> )	Água (Kg/m <sup>3</sup> )	E.A.F (Kg/m <sup>3</sup> )	A.M (Kg/m <sup>3</sup> )	A.G (Kg/m <sup>3</sup> )	SP (%)	A.Q (%)
REF	0,35	486	170,10	-	652	1051	0,25	-
	0,50	353	176,50	-	766	1035	-	-
	0,65	279	181,35	-	830	1022	-	-
50E	0,35	243	170,10	243	634	1051	0,175	-
	0,50	177	176,50	177	753	1035	-	-
	0,65	140	181,35	140	819	1022	-	-
50EX	0,35	243	170,10	243	634	1051	0,45	4
	0,50	177	176,50	177	753	1035	-	4
	0,65	140	181,35	140	819	1022	-	4
70E	0,35	146	170,10	341	627	1051	0,15	-
	0,50	106	176,50	247	748	1035	-	-
	0,65	84	181,35	196	815	1022	-	-

Tabela 4.20 - Custo parcial e total das misturas por metro cúbico (m<sup>3</sup>) de concreto.

CUSTOS DAS MISTURAS POR METRO CÚBICO (m <sup>3</sup> )								
Mistura	CUSTO PARCIAL (MATERIAIS)							CUSTO TOTAL
	a/agl	Cimento (R\$/m <sup>3</sup> )	A.M (R\$/m <sup>3</sup> )	A.G (R\$/m <sup>3</sup> )	E.A.F (R\$/m <sup>3</sup> )	SP (R\$/m <sup>3</sup> )	A.Q (R\$/m <sup>3</sup> )	(R\$/m <sup>3</sup> )
REF	0,35	194,26	13,04	31,53	-	15,19	-	254,16
	0,50	141,20	15,32	31,05	-	-	-	187,57
	0,65	111,60	16,60	30,66	-	-	-	158,86
50E	0,35	97,20	12,68	31,53	41,31	10,63	-	193,35
	0,50	70,80	15,06	31,05	30,09	-	-	147,00
	0,65	56,00	16,38	30,66	23,80	-	-	126,84
50EX	0,35	97,20	12,68	31,53	41,31	27,34	48,60	258,66
	0,50	70,80	15,06	31,05	30,09	-	35,44	182,44
	0,65	56,00	16,38	30,66	23,80	-	28,00	154,84
70E	0,35	58,40	12,54	31,53	57,97	9,11	-	169,55
	0,50	42,40	14,96	31,05	41,99	-	-	130,40
	0,65	33,60	16,30	30,66	33,32	-	-	113,88

A.M = agregado miúdo    A.G = agregado graúdo    E.A.F = escória alto forno

SP = superplastificante    A. Q = ativador químico a base de sulfato

**Tabela 4.21 - Custo por MPa e custo médio por MPa para as misturas investigadas**

Mistura	a/agl	Custos Totais (R\$)	$f_{c_{91}}$ (MPa)	R\$/MPa	R\$/MPa Médio
REF	0,35	254,16	64,1	3,96	4,00
	0,50	187,57	50,9	3,68	
	0,65	158,86	36,0	4,41	
50E	0,35	193,35	59,7	3,24	3,42
	0,50	147,00	47,8	3,07	
	0,65	126,84	32,1	3,95	
50EX	0,35	258,66	63,6	4,07	4,04
	0,50	182,44	48,2	3,78	
	0,65	154,84	36,3	4,26	
70E	0,35	169,55	39,7	4,27	4,41
	0,50	130,40	30,5	4,27	
	0,65	113,88	24,2	4,70	

Da tabela 4.21, observa-se que os maiores custos por MPa são os da mistura 70E. Este fato é atribuído, às baixas resistências deste concreto quando comparado aos demais. As misturas com 50% de escória (50E) apresentaram os valores mais baixos por MPa, tanto para cada uma das relações investigadas, como na média geral dos custos. A adição de 4% de sulfato de sódio, para ativar a escória contida na mistura 50EX, elevou o custo do MPa. As participações do ativador nos custos por MPa desta mistura foram de 18,80% (0,35), 19,40% (0,50) e 18,10% (0,65) (tabela 4.20) percentuais, muito próximos entre si, porém, elevados em se tratando de custos.

A seguir, serão analisados os custos das misturas, para os níveis de 30 e 50 MPa aos 28 dias e de 50 MPa para os 91 dias como descritos no item anterior. Serão também analisados os custos por cada 1000  $\Omega$ .cm de R.E.A das misturas



investigadas. A partir dos custos totais (tabela 4.20) e da aplicação do modelo de Abrams, obteve-se as expressões presentes na tabela 4.22, usadas para calcular os custos aproximados das misturas investigadas para resistência em níveis de 30 e 50 MPa. Os valores dos custos aproximados, obtidos a partir das expressões da tabela 4.22, estão presentes na tabela 4.23 e 4.24 e também na forma de gráficos nas figuras 4.18 e 4.19.

A análise da relação custo/benefício será feita com base nos valores de custos totais por metro cúbico (m<sup>3</sup>), custo por MPa e por 1000Ω.cm de R.E.A das misturas investigadas.

**Tabela 4.22 – Expressões e correlações para o cálculo dos custos das misturas para resistência especificada de 30 e 50MPa em idade de 28 dias e de 50MPa para 91 dias.**

Mistura	fc <sub>28</sub> (30MPa)	fc <sub>28</sub> (50MPa)	R <sup>2</sup> (Abrams)	fc <sub>91</sub> (50MPa)
	a/agl	a/agl		a/agl
REF	0,67	0,39	0,986 $C = 429,78 e^{-1,5666x}$	0,49
50E	0,54	0,36	0,985 $C = 309,59 e^{-1,4053x}$	0,45
50EX	0,69	0,41	0,97 $C = 456,37 e^{-1,7104x}$	0,48
70E	0,41	-	0,954 $C = 264,09 e^{-1,3267x}$	-

---

C = custo do concreto (R\$)      x = relação a/agl      R<sup>2</sup> = correlação de Abrams

---

**Tabela 4.23 – Custos totais e relativos à resistência à compressão e à R.E.A das misturas para níveis de resistência de 30 e 50 MPa aos 28 dias.**

Traço		30MPa			50MPa			
REF	a/agl = 0,67	fc (MPa)	R\$/m <sup>3</sup>	ρ (Ω.cm)	a/agl = 0,39	fc (MPa)	R\$/m <sup>3</sup>	ρ (Ω.cm)
		30,0		12042		50,0		25216
		R\$/MPa	-	R\$/1000Ω.cm		R\$/MPa	233,31	R\$/1000Ω.cm
		-				4,66		9,25
50E	a/agl = 0,54	fc (MPa)	R\$/m <sup>3</sup>	ρ (Ω.cm)	a/agl = 0,36	fc (MPa)	R\$/m <sup>3</sup>	ρ (Ω.cm)
		30,0		33785		50,0		42136
		R\$/MPa	144,95	R\$/1000Ω.cm		R\$/MPa	186,67	R\$/1000Ω.cm
		4,83		4,29		3,73		4,43
50EX	a/agl = 0,69	fc (MPa)	R\$/m <sup>3</sup>	ρ (Ω.cm)	a/agl = 0,41	fc (MPa)	R\$/m <sup>3</sup>	ρ (Ω.cm)
		30,0		33895		50,0		54048
		R\$/MPa	-	R\$/1000Ω.cm		R\$/MPa	226,34	R\$/1000Ω.cm
		-		-		4,53		4,19
70E	a/agl = 0,41	fc (MPa)	R\$/m <sup>3</sup>	ρ (Ω.cm)	a/agl = 0,22	fc (MPa)	R\$/m <sup>3</sup>	ρ (Ω.cm)
		30,0		42955		50,0		55010
		R\$/MPa	153,29	R\$/1000Ω.cm		R\$/MPa	-	R\$/1000Ω.cm
		5,11		3,57		-		-

fc = resistência á compressão

ρ = resistividade elétrica aparente

R\$/1000Ω.cm = custo em reais por 1000Ω.cm de resistividade elétrica

R\$/m<sup>3</sup> = custo em reais por metro cúbico de concreto

R\$/MPa = custo em reais por MegaPascal

Para 28 dias e resistência em nível de 30 MPa, observou-se que o custo de produção por metro cúbico de concreto foi maior para a mistura 70E ( $a/agl=0,41$ ), enquanto que a mistura 50E( $a/agl= 0,54$ ) apresentou o menor custo por metro cúbico. Na escolha pela mistura 50E obtém-se uma redução no valor do custo de produção, por metro cúbico de concreto ( $m^3$ ), em relação à 70E de R\$ 8,34.

No que diz respeito aos custos ligados à resistência à compressão, a diferença entre os apresentados pelas misturas 50E e 70E foi de R\$ 0,28 por MPa, favoráveis a mistura 50E. Esta diferença nada mais é do que a economia alcançada por esta mistura para cada MPa alcançado. Este comportamento não é observado para o custo relacionado à R.E.A (cada 1000  $\Omega.cm$ ), onde o menor valor foi observado na mistura 70E.

Para o nível de resistência de 50 MPa, ainda aos 28 dias, constatou-se que o maior e o menor custo, para cada metro cúbico de concreto correspondem respectivamente, aos apresentados pela mistura REF e 50E. A economia neste caso por metro cúbico de concreto produzido (50E) é de R\$ 46,64. Para a resistência à compressão e a R.E.A as reduções de custos da mistura 50E em relação à REF foram de R\$0,93(R\$/MPa) e R\$ 4,81(R\$/1000  $\Omega.cm$ ), respectivamente. Na mistura 50EX, verificou-se valores de custos intermediários aos apresentados pelas misturas REF e 50E, tanto para o preço do concreto por metro cúbico como por MPa . Na R.E.A (R\$/1000  $\Omega.cm$ ), o custo foi o menor entre os apresentados, 5,73% a menos que o observado na mistura 50E e 120% abaixo do calculado para o concreto de referência (REF).

**Tabela 4.24 – Custos totais e relativos à resistência à compressão e à R.E.A das misturas para nível de resistência de 50MPa aos 91 dias.**

Traço		50MPa		
REF	a/agl = 0,49	<b>fc (MPa)</b>	<b>R\$/m<sup>3</sup></b>	<b>ρ (Ω.cm)</b>
		50,0	199,50	29947
		<b>R\$/MPa</b>		<b>R\$/1000Ω.cm</b>
		3,98		6,66
50E	a/agl = 0,45	<b>fc (MPa)</b>	<b>R\$/m<sup>3</sup></b>	<b>ρ (Ω.cm)</b>
		50,0	164,50	52503
		<b>R\$/MPa</b>		<b>R\$/1000 Ω.cm</b>
		3,29		3,13
50EX	a/agl = 0,48	<b>fc (MPa)</b>	<b>R\$/m<sup>3</sup></b>	<b>ρ (Ω.cm)</b>
		50,0	200,80	62882
		<b>R\$/MPa</b>		<b>R\$/1000 Ω.cm</b>
		4,02		3,20
70E	a/agl = 0,20	<b>fc (MPa)</b>	<b>R\$/m<sup>3</sup></b>	<b>ρ (Ω.cm)</b>
		50,0	-	74500
		<b>R\$/MPa</b>		<b>R\$/1000 Ω.cm</b>
		-		-

fc = resistência á compressão

ρ = resistividade elétrica aparente

R\$/1000Ω.cm = custo em reais por 1000Ω.cm de resistividade elétrica

R\$/m<sup>3</sup> = custo em reais por metro cúbico de concreto

R\$/MPa = custo em reais por MegaPascal

Da tabela 4.24 (50 MPa - 91 dias), observa-se que as misturas com ativador (50EX) tiveram os maiores custos por metro cúbico (m<sup>3</sup>) e por MPa. Este fato,

conforme já relatado anteriormente, é atribuído ao custo do sulfato de sódio usado como ativador químico da escória. O maior custo, relacionado à R.E.A (R\$/1000 $\Omega$ .cm), foi observado no concreto de referência (REF), 112,8% a mais que o menor valor encontrado(50E).

Os valores para o metro cúbico de concreto (R\$/m<sup>3</sup>) foram praticamente iguais para as misturas REF e 50EX. No entanto, os diferentes valores de R.E.A apresentados por estas misturas alteraram os custos de cada 1000 $\Omega$ .cm de R.E.A. Assim, observou-se que o custo (R\$/1000 $\Omega$ .cm) apresentado pela mistura REF foi de R\$ 3,46 a mais que o observado na mistura 50EX.

No concreto com teor de 50% de adição de escória (50E), os custos totais por metro cúbico e por MPa foram os menores entre os valores apresentados pelas misturas investigadas. A economia em relação ao traço de referência (REF) foi de R\$35,00 por metro cúbico (m<sup>3</sup>) de concreto, R\$ 0,69 por MPa de resistência e de R\$ 3,03 para cada 1000 $\Omega$ .cm de resistividade elétrica. Quando comparada a mistura de mesmo teor com ativador (50EX), as reduções de custos foram R\$ 36,30(R\$/m<sup>3</sup>), R\$0,73(R\$/MPa) e R\$ 0,07 (R\$/1000 $\Omega$ .cm).

De forma geral as reduções de custos foram favoráveis ao concreto 50E, diferenciando-se em função do nível de resistência adotado.

A mistura 50E, tanto para o nível de resistência de 30 e 50MPa aos 28 dias como para o de 50MPa aos 91dias, foi a que apresentou a melhor relação custo/benefício, pois demonstrou ser a mais viável economicamente além de atender simultaneamente aos critérios CEB (192,1989) e da Norma NBR 6118/2003, conforme valores das tabelas 4.23 e 4.24.

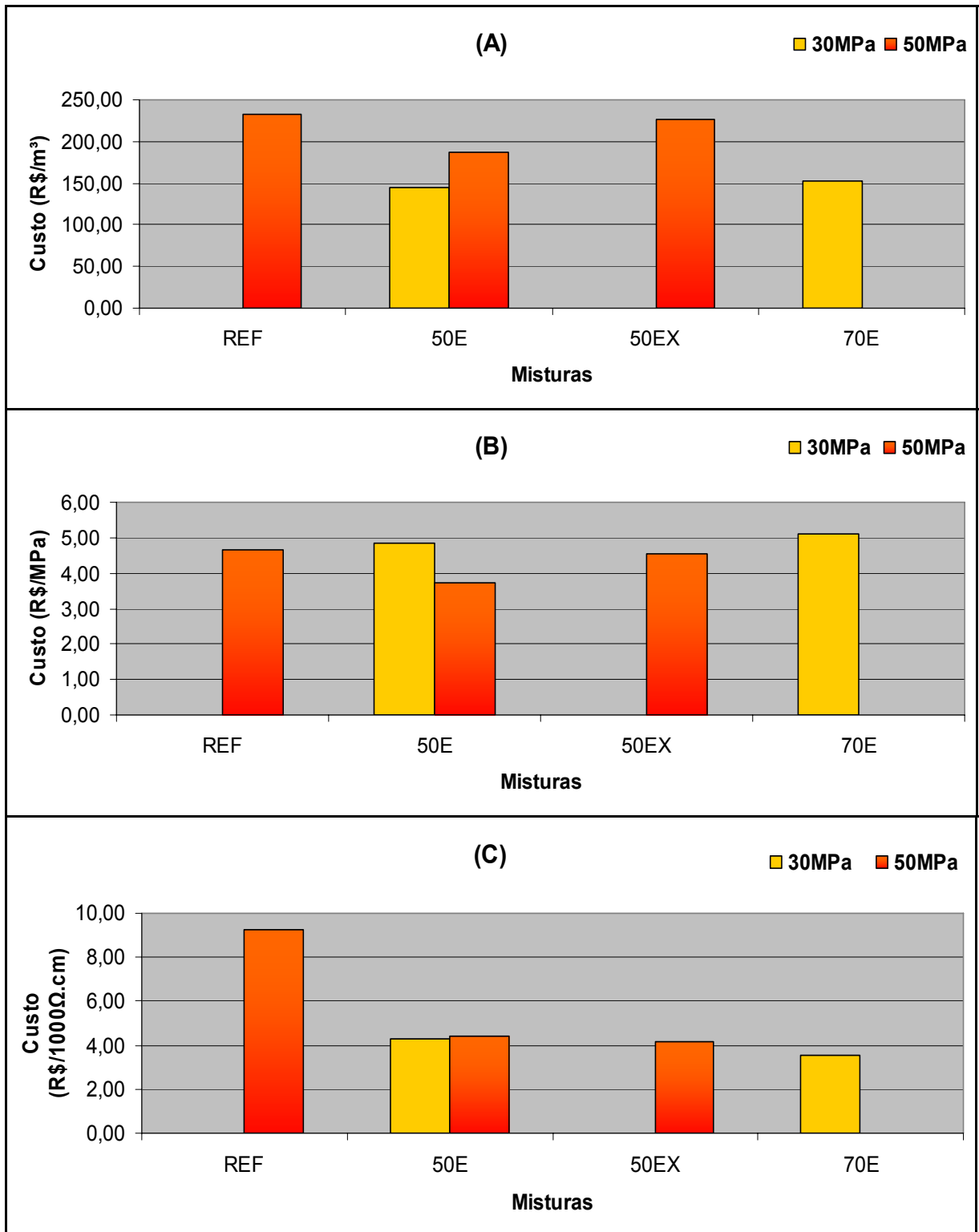


Figura 4.18 – Gráficos custo por m<sup>3</sup>(A), custo por MPa(B) e custo por 1000Ω.cm(C) das misturas investigadas para níveis de resistência de 30 e 50 MPa aos 28 dias.

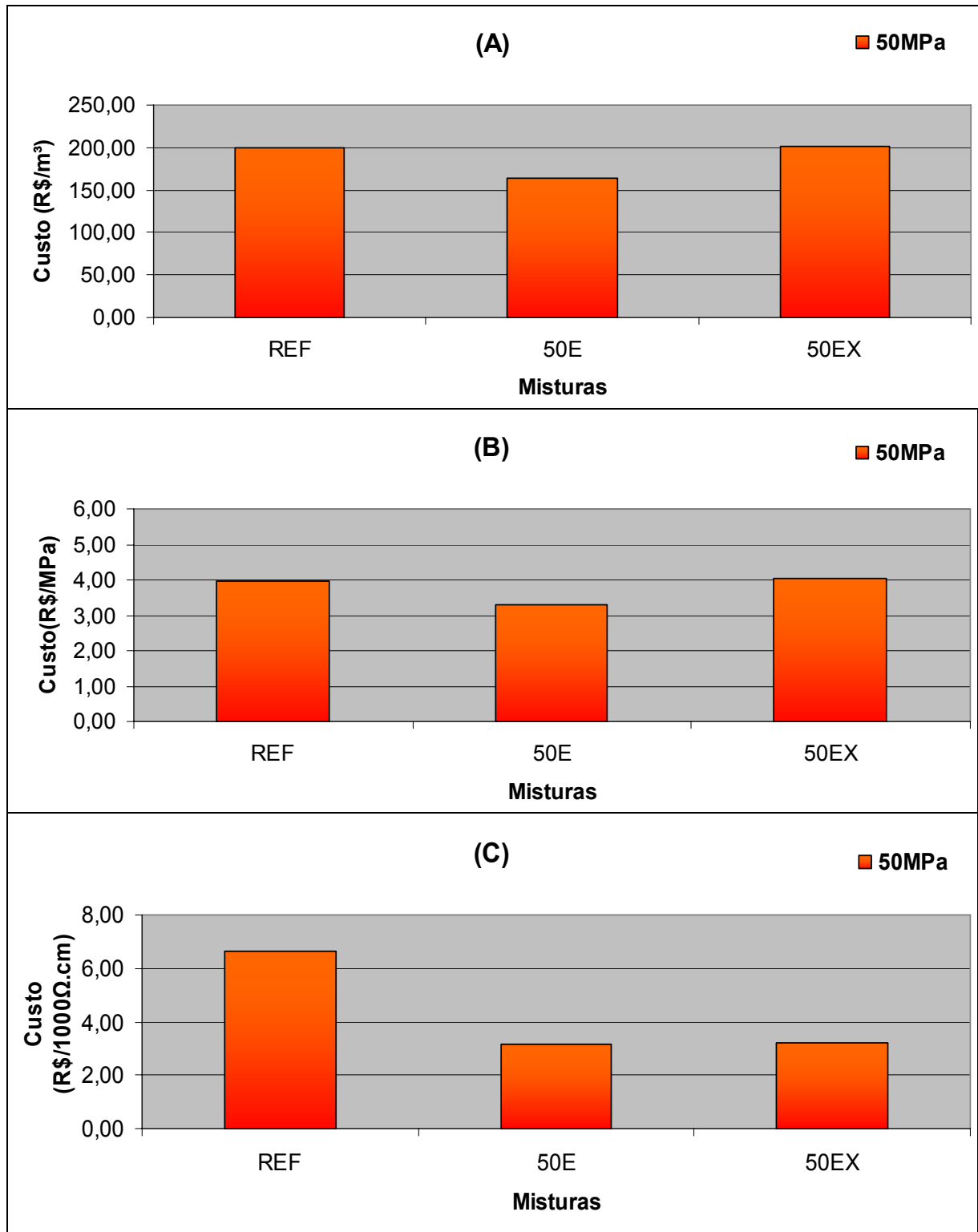


Figura 4.19 – Gráficos custo por m<sup>3</sup>(A), custo por MPa(B) e custo por 1000Ω.cm(C) das misturas investigadas para nível de resistência de 50 MPa aos 91 dias.

## 4.9 Conclusão

Este trabalho objetivou a investigação de aspectos ligados diretamente à durabilidade das estruturas de concreto, sobretudo o estudo do comportamento da resistividade elétrica aparente (R.E.A) em concretos, nos quais foram realizadas substituições parciais da massa de cimento por escória de alto forno (EAF).

Observaram-se os efeitos do teor de adição de escória de alto forno, do emprego do sulfato de sódio, da relação  $a/agl$  e da idade sobre a resistência a compressão em concretos. Os resultados indicam que, para elevados teores de adição de E.A.F (70E) a resistência à compressão em todas as relações  $a/agl$  e idade investigadas, foram bem abaixo das observadas em concretos feitos com cimento puro (REF). As maiores resistências, entre os concretos com adição, foram verificadas na mistura binária composta com 50% de EAF (50E). A relação  $a/agl$  e a idade também foram fatores determinantes para a resistência à compressão das misturas investigadas. A diminuição da quantia de água (relação  $a/agl$ ) bem como o maior tempo de cura (idade) alterou a estrutura interna do concreto, tornando-a mais compacta e resistente. O uso do sulfato de sódio melhorou as condições de hidratação da escória contribuído em todas as relações  $a/agl$  e idades investigadas para o aumento da resistência do concreto 50EX, em relação à mistura de mesmo teor de escória sem a presença de ativador químico (50E).

A literatura consultada, presente na revisão bibliográfica revela a parcela de contribuição das propriedades físicas e químicas do concreto na sua resistividade elétrica. Os resultados demonstraram que os fatores relação  $a/agl$ , teor de escória, tempo de cura e adição de sulfato de sódio tem efeitos na formação da resistividade elétrica aparente dos concretos.

A diminuição da relação  $a/agl$  promoveu, de forma geral, a elevação da resistividade elétrica, uma vez que neste caso, a queda na quantia de eletrólito presente dificultou ainda mais a movimentação interna de corrente elétrica pelo interior do concreto (maior resistividade).

Quando analisado o efeito teor de escória, verificou-se que o maior teor de EAF, ou seja, 70% EAF (70E) teve o melhor desempenho técnico frente à resistividade elétrica aparente, pois, neste caso, os efeitos químicos e físicos da escória foram mais eficientes para a função de restrição da movimentação de íons no interior do concreto.



A cura proporcionou uma hidratação contínua tanto para o cimento como para a escória presente nas misturas binárias. Aos 91 dias, a mistura com 50% de escória destacou-se pela superioridade da resistividade elétrica aparente em relação à observada aos 3 dias de cura. Os acréscimos de resistividade foram de 379% na relação a/agl 0,35, 340%, na 0,50 e 362% para relação 0,65. Este fato demonstra que apesar das misturas com maior teor de escória apresentaram os maiores valores individuais, o aumento da resistividade elétrica em função da idade é mais eficiente para o menor teor de escória adicionado.

Conforme descrito anteriormente, o uso do sulfato de sódio como ativador, melhorou as condições de hidratação da escória, sobretudo no aspecto relacionado à velocidade das reações químicas. Em função disto (ativador químico), as idades iniciais, de 3 e 7 dias, da mistura 50EX registraram os maiores ganhos de resistividade em relação aos valores observados na mistura de igual teor de escória (50E).

Quando estabelecidos patamares de resistência de 30 MPa e 50 MPa para os 28 dias e de 50 MPa para os 91 dias, observou-se que a resistividade das misturas investigadas aumentou, não só pelo aumento da idade e pela redução da relação a/agl, mas também com o aumento da resistência a compressão. Desta maneira, constatou-se que a relação a/agl e a idade de cura são fatores comuns às duas propriedades. Aos 28 dias para 30 MPa de resistência, a mistura 70E foi a que apresentou o maior valor de resistividade elétrica aparente (R.E.A), enquanto que para o nível de 50 MPa de resistência, o maior valor de resistividade foi apresentado pela mistura 50EX. Para 50 MPa, aos 91 dias o maior valor de resistividade elétrica, entre as misturas estudadas, continuou sendo o da mistura 50EX.

A condutividade elétrica específica apresentou variações em função da relação a/agl, do teor de escória, da cura e da presença do sulfato de sódio. Nas menores relações a/agl as concentrações iônicas foram maiores e com isso maior a condutividade elétrica específica. As misturas contendo escória de alto forno apresentaram uma condutividade elétrica específica menor que a apresentada pela mistura de referência. O aumento no teor de escória gerou uma queda na condutividade elétrica da fase aquosa. O uso do sulfato de sódio (ativador) aumentou a concentração de íons, elevando com isso a condutividade elétrica específica das misturas 50EX(50%EAF+ATIVADOR) em relação às demais. O

sulfato de sódio também, foi responsável pelo aumento expressivo do pH da solução dos poros da mistura 50EX.

A microestrutura das pastas com escória apresentou estrutura de poros mais refinada que a pasta com cimento puro (referência). Este comportamento foi mais pronunciado para as misturas com maior teor de escória (70E). Os aumentos do grau de hidratação resultaram em diminuição do volume de mercúrio intrudido. A elevação da relação  $a/agl$  tornou a estrutura mais porosa e com isso verificou-se um maior volume de mercúrio intrudido. As variações no diâmetro crítico em função das diferentes relações  $a/agl$ , idade e teor de escória das misturas foram maiores que os constatados no volume de intrusão de mercúrio.

Pela análise da integração realizada entre os resultados obtidos constatou-se que:

- Apesar das boas correlações entre resistência à compressão e resistividade elétrica e da existência de fatores comuns às duas propriedades, como a relação  $a/agl$  e a estrutura de poros, a primeira não é considerada o parâmetro ideal para o aumento da durabilidade, uma vez que para um mesmo valor de resistência foram observados diferentes valores de resistividade.
- A condutividade elétrica específica e a resistividade elétrica apresentaram boas correlações. No entanto, pode ocorrer uma diminuição na resistividade elétrica aparente quando a condutividade elétrica específica (solução poros) diminuir, o que favorece no aumento da velocidade do processo corrosivo do aço. A alta condutividade elétrica específica verificada na menor das relações  $a/agl$  deve-se ao fato da maior concentração dos íons. A menor quantidade de eletrólito, neste caso, favorece também ao aumento da resistividade elétrica.
- Entre a resistividade elétrica aparente e concentração do íon  $OH$  as correlações obtidas foram altas e satisfatórias. Alterações na concentração podem gerar mudanças indesejáveis na resistividade elétrica (diminuição), fazendo com que as estruturas passem a ter uma vida útil reduzida (menor durabilidade).
- As alterações na estrutura dos poros elevou a resistividade elétrica aparente das misturas investigadas, tanto pela diminuição da relação  $a/agl$  (porosidade)

como pela adição de EAF ao concreto, através do refinamento dos poros. Este efeito é mais expressivo nas misturas em que foram adicionados os maiores teores de EAF.

Da análise da viabilidade econômica das misturas investigadas, constatou-se que para os níveis de resistência de 30 e 50 MPa, aos 28 dias, e de 50 MPa fixados aos 91 dias, a mistura 50E (50% EAF), foi a que apresentou o menor custo de produção por metro cúbico e também por MPa de resistência. Para um nível de resistência de 50 MPa aos 28 dias, a economia alcançada por este concreto, em relação aos custos observados na mistura de referência (REF), foram de R\$ 46,64 para cada metro cúbico de concreto, de R\$ 0,93 para cada megapascal de resistência (MPa) e de R\$ 4,81 para cada 1000  $\Omega$ .cm de resistividade elétrica.

Para os 91 dias de idade e nível de resistência de 50 MPa, o concreto 50E(50% de escória) continua sendo a opção mais econômica, pois a redução nos custos de produção em relação ao concreto de referência (REF), composto só por cimento, chegou a R\$35,00 por metro cúbico de concreto, R\$ 0,69 por MPa de resistência e de R\$ 3,03 para cada 1000 $\Omega$ .cm de resistividade elétrica.

Assim, esta mistura (50E) foi, dentre as investigadas, a com melhor relação custo/benefício, pois proporcionou a maior economia em relação ao concreto de referência (REF), além de apresentar valores de resistência à compressão, relação a/agl e resistividade elétrica aparente dentro dos limites estabelecidos pela Norma NBR 6118/2003 e pelo critério CEB 192(1989).

Por fim, é importante lembrar que os benefícios vão além dos econômicos (energia) e técnicos (resistência e resistividade elétrica aparente), pois ecologicamente a substituição parcial do cimento por escória beneficia o meio ambiente, já que esta prática permite que sejam reduzidas as emissões de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) para a atmosfera.

## SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

- ✓ Estudos que visem identificar a influência dos ativadores químicos na fração de cimento das misturas aglomerantes.
- ✓ Estudos para avaliar o comportamento da resistividade elétrica de concretos quando submetidos a ambientes agressivos, em especial de cloretos e determinar a presença de hidróxido de magnésio e carbonato de cálcio, além de alterações na estrutura de poros e condutividade elétrica específica da solução dos poros.
- ✓ Ampliação do estudo da influência dos diversos tipos e teores de ativadores químicos na resistividade elétrica aparente do concreto, já que não foram encontradas bibliografias sobre o assunto.

## BIBLIOGRAFIA

ABREU, A. GOMES. **Efeito da adições minerais na resistividade elétrica de concretos convencionais**. Porto Alegre, 1998, 129 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ACI Committee 233. Ground Granulated Blast – Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete.

AÏTCIN, P-C. **Concreto de alto desempenho**. 1. ed. São Paulo: Pini, 2000.

ANDRADE, MARIA DEL CARMEM – **Manual para Diagnóstico de Obras Deterioradas por Corrosão de Armaduras**. São Paulo – Pini, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS E NORMAS MERCOSUL

\_\_\_\_\_. **Medição da resistividade do solo pelo método dos quatro pontos: NBR 7117**. Rio de Janeiro, 1981.

\_\_\_\_\_. **Ensaio de compressão de corpos cilíndricos de concreto: NBR 5739**. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. **Cimento e materiais pozolânicos: NBR 12653**. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **Cimento Portland de alta resistência inicial: NBR 5733**. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto – procedimento: NBR 5738**. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **Concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone – método de ensaio: NBR NM67**. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **Agregados – Determinação da massa unitária e dos espaços vazios: NM 45**. Mercosul, 2002.

\_\_\_\_\_. **Agregados – Determinação de massa específica e massa específica aparente de agregado miúdo : NBRNM 52**. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **Agregados – Determinação de massa específica e massa específica aparente e absorção de água : NBRNM 53**. Rio de Janeiro, 2003

\_\_\_\_\_. **Agregados – Determinação da composição granulométrica: NBRNM 248**. Rio de Janeiro, 2003.

BARBOSA, MARIA T. G. – **Análise Crítica de Materiais Alternativos Empregados na Construção Civil** – Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural – Mendoza, Argentina, Maio 2004.

BASHEER, P. M .A. Monitoring electrical resistance of concretes containing alternative cementitious materials to assess their resistance to chloride penetration. **Cement & Concrete Composites**, V.24, p.4371-449, 2002.

BAWEJA, D., Roper, H., and Sirivivatnanon, V., “Corrosion of Steel in Marine Concrete: Long-Term Half-Cell Potential and Resistivity Data,” Proceedings, **Third CANMET/ACI International Conference on Concrete in Marine Environment**, SP-163, pages 89 to 110, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1996.

BIJEN, J. Benefits of slag and Fly ash. **Construction and Building Materials** V. 10 , p. 309-314 , 1996.

BRAUN, VICTOR, **Influência das condições de moldagem e cura nas características da camada de cobrimento do concreto com adições minerais**. In: V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto.São Paulo, Brasil, 2003.

CASCUDO, OSWALDO. – **O controle da Corrosão de Armaduras em Concreto, Inspeção e Técnicas Eletroquímicas** – Pini, 1997.

CASTELLOTE, MARTA., ANDRADE, MARIA C., ALONSO, MARI C. – **Standardization , to a Reference of 25°C , of electrical resistivity for mortars and concretes in saturated or isolated conditions**. ACI Materials Journal , 2002 , March-April, p. 119-128.

CONSELHO EM REVISTA, Área Técnica – Matérias Título: **Reciclagem, uma necessidade nos tempos modernos**. Subtítulo: **O destino dos resíduos industriais e seus custos criam novas alternativas para o lixo industrial** – p. 16-17 CREA RS, Setembro de 2004.

COSTA, PAULO E.F, **Influência da finura e teor de Escória na penetração de cloretos no concreto**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria , 2001.

DAL MOLIN, DENISE C. C. – **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações - Adições minerais para concreto estrutural (capítulo 12)**, IBRACON 2005.

DIAMOND, Effects of microsilica (silica fume) on pore solution chemistry of cement pastes, **J.Am. Ceram. Soc.** 66 (5) (1983) C82-C84.

FELDMAN, R. F. IN: MALHOTRA, V.M. (ed). Significance of porosity measurements on blended cement performance. **International Conference on the use of fly ash , silica fume , slag and other mineral by products in concrete** , 1<sup>st</sup>, Montebello, 1983. Proceedings. Detroit : American Concrete Institute, 1983, pg. 333-347 ( SP 79 ).

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., PALOMO, J.G., PUERTAS, F. - Alkali-activated slag mortars Mechanical strength behaviour - **Cement and Concrete Composites** V. 29 p.1313 – 1321, 1999.

FIGUEIREDO, ANTONIO, DJANIKIAN, JOÃO G., HELENE, PAULO R.L, SELMO, SILVIA M. S. , JOHN , VANDERLEY M. - **Adições e tipos de cimento Portland** – USP 2002.

GARCIA E., J – I., SHARP, J. H. Effect of temperature on the hydration of the main clinker phases in Portland cements: Part II, Blended cements. **Cement and Concrete Research** V. 28, p.1259-1274, 1998.

GARCIA E., J – I., SHARP, J. H. The chemical composition and microstructure of hydration products in blended cements . **Cement and Concrete Composites** V. 26 , p.967-976 , 2004.

GASTALDINI , A. L. G. , ISAIA , GERALDO C. **Efeitos do aumento do nível da resistência à compressão sobre a microestrutura e durabilidade do concreto com Pozolanas** . Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural - Universidade de Brasília – UnB , Maio 2002

GENTIL, VICENTE. **Corrosão** (3ª Edição). Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. (LTC), 1996 .

GOMES, NEWTON S. **Influência de ativadores químicos e de Adições minerais no comportamento de concretos frente a cloretos**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, 2003.

GÜNEYISI, E., ÖZTURAN, T., GESOGLU, M. A study on reinforcement corrosion and related properties of plain and blended cement concretes under different curing conditions. **Cement & Concrete Composites** V. 27, p.449-461, 2005.

HANSSON, I. L. H. e HANSSON, C. M. Electrical resistivity of Portland cement based materials. **Cement and Concrete Research**, v. 13, p. 675-683,1983.

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

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

HOPPE, TIAGO F. **Resistividade elétrica de concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz** – Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, 2005.

HOPE, BRIAN B., IP, ALAN K.C. – **Corrosion of Steel in Concrete Made with slag cement**. ACI Materials Journal, V.84, n°25, September –October, 1988.

HUGHES, B. P.; SOLEIT, A. K. O.; BRIERLY, R. W. **New technique for determining the electrical resistivity of concrete.** Magazine of Concrete Research Research, v. 37, n. 133, p. 243-248, 1985.

HUNKELER, F. The resistivity of pore water solution – a decisive parameter of rebar corrosion and repair methods. **Construction and Building Materials**, V10, 381-389, 1996.

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

KJELLEN, K. O.; DETWILER, R. J. Reaction kinetics of Portland cement mortars hydrated at different temperatures. **Cement and concrete Research** V.22 p. 112 - 120, 1992.

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

LEVY, SALOMON M., HELENE, PAULO R.L. **Influência dos agregados reciclados na resistividade e na absorção de água de concretos.** Trabalho V019 44º Congresso Brasileiro do Concreto, 2002.

LIM, S. N. & WEE, T. H. **Autogenous shrinkage of ground-granulated blast furnace slag concrete.** ACI Materials Journal, 2000, Sept-Oct., p. 587-593

MALHOTRA, V.M., "Durability of Concrete", **Third International Conference**, ed. V.M. Malhotra – Nice, France, 1994.

MALHOTRA, V.M., "Properties of Fresh and Hardened Concrete Incorporating Ground Granulated Blast Furnace Slag," Supplementary Cementing Materials for Concrete, ed. V.M. Malhotra, 291-331, Ottawa: Canadian Government Publishing Centre, 1987.

MATHER, BRYANT. Concrete durability - **Cement & Concrete Composites**, V. 26, pg 3-4, 2004.

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

MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estruturas, Propriedades e Materiais**, São Paulo Pini, 1994.

MEHTA, P.K. **Greening of the concrete Industry for Sustainable Development** Concrete International July 2002, pg 23-28.

MELO, A. A. **Estudo da retração em argamassa com cimento de escória ativada.** Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002.



MISSAU, FABIANO. **Penetração de Cloretos em concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de Arroz** – Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, 2004.

MONFORE G. E. **The electrical resistivity of concrete**. Bulletin 224 - Portland Cement Association, p. 35- 49, may 1968.

NEVILLE, ADAM.M. **Propriedades do Concreto**, São Paulo Pini, 1997.

POLDER , ROB. B. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete – a RILEM TC – 154 technical recommendation. **Construction and Building Materials** V. 15, p 125-131, 2001.

PRINCIGALLO, A. , BREUGEL , K. VAN., LEVITA, GIOVANNI. Influence of the aggregate on the electrical conductivity of Portland cement concretes. **Cement and Concrete Research** v.33 , p. 1755 – 1763 , 2003.

PUERTAS, F., MARTINEZ-RAMIREZ, S., ALONSO, S., VÁSQUEZ, T. Alkali-activated fly ash / slag cement . Strength behaviour and hydration products. **Cement and Concrete Research** , V.30, p 1625-1632, 2000.

REGOURD, M., “Characterization of Thermal Activation of Slag Cements,” **Proceedings, 7th International Congress on the Chemistry of Cements** (Paris), Editions Septima, Paris, V. 2, III-3, 1980, pp. 105-111.

ROSKOVIĆ , R. , BJEGOVIĆ, D. Role of mineral additions in reducing CO<sub>2</sub> emission. **Cement and Concrete Research** V. 35 , pg. 974-978 , 2005

SAKAI , K. **Properties of Granulated Blast Furnace Slag Cement Concrete** (SP-32) – Special Publication - ACI Publications Volume 32 pages 1367-1384 , 1992.

SALEEM, M., SHAMEEM, M., HUSSAIN, S.E., MASLEHUDDIN, M. Effect of moisture, chloride and sulphate contamination on the electrical resistivity of Portland cement concrete. **Construction and Building Materials**, v.10, p. 209-214 , 1996.

SALEM, M., RAGAI, SH.M. – Electrical conductivity of granulated slag cement Kiln dust – silica fume pastes at different porosities – **Cement and Concrete Research** 31 pg 781 – 787 (2001).

SCHINDLER, ANTON, K., FOLLIARD, KEVIN,J. **Heat of Hydration Models for Cementitious Materials**. ACI Materials Journal, V.102 , N° 01 , p 24-33 , 2005.

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

SHI , C. , DAY ROBERT L. , Pozzolanic reaction in the presence of chemical activators Part II. Reaction products and mechanism – **Cement and Concrete Research** V.30 , pg 607-613 , 2000.

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, pg 537-545, 2004.

SHI, C., STEGEMANN, J.A., CALDWELL, R.J. **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 C1020) Results.** ACI Journal, V. 95, n.4, p .389-394, 1998.

SIMÕES, JEFFERSON C., **As evidências do aquecimento Global** – Matéria Técnica publicada no Conselho em Revista do CREA RS, pg 17, Junho de 2005.

SMITH, KEVIN M., SCHOKKER, ANDREA J., TIKALSKY, PAUL J. – **Performance of Supplementary Cementitious Materials in Concrete Resistivity and Corrosion Monitoring Evaluations** . ACI Materials Journal, V 101 , N° 101, p. 385-390 , 2004.

SPERB, J.E.K. **Carbonatação e Absorção Capilar de Concretos com Adições Minerais e Ativadores Químicos** – Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, 2003.

TAYLOR, HFW. **Cement chemistry**. 2nd ed. London: Thomas Telford; 1997.

TUMIDAJSKI, P.J., SCHUMACHER, A.S., PERON, S., GU, P. and BEAUDOIN J.J. On the relationship between porosity and electrical resistivity in cementitious systems. **Cement and Concrete Research** V.26, p. 539-544, 1996.

URHAN, S. Alkali-silica and pozzolanic reactions in concrete. Part 1: interpretation of published results and hypothesis concerning the mechanism. **Cement and Concrete Research**, v.17, n.1, p.141-152,1987.

WAINWRIGHT, P.J., REY, N. The influence of ground blast furnace slag (GGBS) additions and time delay on the bleeding of concrete. **Cement & Concrete Composites** V. 22 , p.253-257 , 2000.

WEE, T.H , SURYAVANSHI,A.K , TIN,S.S – **Evaluation of Rapid Chloride Permeability Test (RCPT) Results for Concrete Containing Mineral Admixtures.** ACI Materials Journal , V.97, n°02 , March –April ,2000.

WEI, H.M, CHANG, P., HWANG, C. A study on anticorrosion effect in high-performance concrete by the pozzolanic reaction of slag. **Cement and Concrete Research** V.34 p.615–622, 2004.

WHITING, DAVID. A., NAGI, MOHAMAD. A. **Electrical Resistivity of Concrete – A Literature Review**, Portland Cement Association R&D Serial No. 2457, 2003.

XINCHENG, PU. Investigation on pozzolanic effect of mineral additives in cement and concrete by specific strength index. **Cement and Concrete Research** V. 29, p.951-955, 1999.

## Anexo A

Coeficientes da curva de Abrams para a resistividade elétrica aparente nas idades de 3,7,28, 56 e 91 dias

3 dias			
Traço	Coeficientes		
	A	B	R <sup>2</sup>
REF	35640,3	7,866	0,97
50E	17627,3	2,669	0,99
50EX	83782	19,787	0,90
70E	33967,8	2,6354	0,95

7 dias			
Traço	Coeficientes		
	A	B	R <sup>2</sup>
REF	47491,6	9,651	0,97
50E	28632,5	3,044	0,98
50EX	117183,9	14,243	0,96
70E	36215,4	2,625	0,99

28 dias			
Traço	Coeficientes		
	A	B	R <sup>2</sup>
REF	70577,3	14,001	0,95
50E	65540,2	3,411	0,97
50EX	107028,2	5,293	0,93
70E	73224,4	3,672	0,98

56 dias			
Traço	Coeficientes		
	A	B	R <sup>2</sup>
REF	82493,3	12,080	0,99
50E	83580,4	3,390	1,00
50EX	113049,0	4,571	0,97
70E	73238,1	1,833	0,98

91 dias			
Traço	Coeficientes		
	A	B	R <sup>2</sup>
REF	10547,5	12,951	0,98
50E	86170,2	3,007	0,97
50EX	110728	3,2505	0,98
70E	87601,2	2,2471	0,98

### Anexo B

#### CUSTOS DOS MATERIAIS DAS MISTURAS (Vigentes Novembro 2005)

MATERIAL	UNIDADE	CUSTO(R\$)
Cimento	Kg	0,40
Areia	Kg	0,02
Brita	Kg	0,03
Escória de alto forno	Kg	0,17
Aditivo Superplastificante	Kg	12,50
Ativador químico (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) (comercial)	Kg	2,50

