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

Penetração de cloretos em concretos compostos com cimento Portland branco e escória de alto forno, ativados quimicamente

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Henrique Carvalho Siqueira

Santa Maria, RS, Brasil
2008

Penetração de cloretos em concretos compostos com cimento Portland branco e escória de alto forno, ativados quimicamente

por

Henrique Carvalho Siqueira

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

Orientador: Prof. Antônio Luiz Guerra Gastaldini

Santa Maria, RS, Brasil

2008

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

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

PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS COMPOSTOS COM CIMENTO PORTLAND BRANCO E ESCÓRIA DE ALTO FORNO, ATIVADOS QUIMICAMENTE

elaborada por
Henrique Carvalho Siqueira

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

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Antônio Luiz Guerra Gastaldini – UFSM
(Presidente/Orientador)

Prof.ª Dr.ª Tatiana Cureau Cervo - UFSM

Prof. Dr. André Tavares da Cunha Guimarães - FURG

Santa Maria, 12 de fevereiro de 2008

AGRADECIMENTOS

Ao professor Antônio Luiz Guerra Gastaldini, pela dedicada orientação, conhecimentos repassados, e confiança depositada neste trabalho.

Aos familiares, que sempre estiveram presentes, me apoiando e incentivando, durante o transcorrer do curso, e toda a minha vida.

Aos integrantes do grupo de pesquisa GEPECON, pelo companheirismo e auxílio no desempenho de tarefas, contribuindo para um melhor andamento da pesquisa.

Ao Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC/UFSM) pela disponibilidade do espaço e de equipamentos, juntamente com seus funcionários, pela ajuda prestada.

Às empresas Votorantin e Cimento Mizu, pela cessão de materiais para a pesquisa.

À CAPES, CNPq e FAPERGS, pelos recursos financeiros disponibilizados.

À UFSM e ao PPGEC pela oportunidade oferecida.

RESUMO

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

Penetração de cloretos em concretos compostos com cimento Portland branco e escória de alto forno, ativados quimicamente

AUTOR: HENRIQUE CARVALHO SIQUEIRA
ORIENTADOR: ANTÔNIO LUIZ GUERRA GASTALDINI
Data e Local da Defesa: Santa Maria, 12 de fevereiro de 2008.

O consumo do cimento Portland branco (CPB), para uso em concretos estruturais, vem aumentando consideravelmente nos últimos anos. Em vista disso, buscando difundir cada vez mais o seu uso e comprovar sua qualidade e durabilidade como cimento estrutural, este trabalho tem por objetivo investigar o comportamento, frente à ação dos íons cloreto, de concretos compostos por CPB e escória de alto forno, com e sem o uso de ativador químico (Na_2SO_4). Foram analisadas, além da mistura de referência (100% CPB), misturas contendo substituições parciais de CPB por teores de 50% e 70% de escória. A utilização do ativador foi realizada num teor de 4% do total de aglomerante, e este, com teor de 50% de escória. Cada mistura foi composta por relações água/aglomerante (a/ag) de 0,30; 0,42 e 0,55; e submetidas à prazos de cura de 3, 7, 28 e 91 dias. Para analisar a penetração de íons cloretos, foram avaliados os coeficientes de penetração (pelo ensaio de imersão em solução salina), e as cargas passantes (segundo a ASTM C1202/05). Além destes, foram realizados os ensaios de resistência à compressão axial, porosimetria por intrusão de mercúrio e composição da solução dos poros. Os resultados indicaram que a utilização parcial da escória proporciona desempenhos excelentes quanto à penetração dos íons cloretos em todos os prazos de cura estudados e, principalmente, nas misturas de maiores relações a/ag. Quanto a resistência à compressão, apesar de não propiciar resistências equivalentes aos concretos de referência, as misturas com escória apresentaram, exceto aos três dias, bons resultados. Foi comprovada a eficiência do ativador químico para a finalidade de acelerar o aprimoramento das resistências à compressão e penetração de cloretos, nas idades iniciais. Sua utilização mostrou ser mais eficiente, nas misturas com maiores relações a/ag e até prazos de cura de 28 dias. Em relação ao custo, a escória foi altamente benéfica, apresentando os melhores resultados em igualdade de resistência e coeficiente de penetração de cloretos. As correlações entre os ensaios de cloretos, acelerado e de imersão, analisados em conjunto com os demais ensaios realizados, permitem afirmar que os resultados do ensaio descrito pela ASTM C1202/05 não são confiáveis para concretos com adição de escória.

Palavras Chave: concreto; cimento Portland branco; escória; ativador químico; íons cloreto.

ABSTRACT

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

Chloride ion penetration in concretes with white Portland cement and blast furnace slag, chemically activated

AUTHOR: HENRIQUE CARVALHO SIQUEIRA
THESIS ADVISOR: ANTÔNIO LUIZ GUERRA GASTALDINI

The consumption of white Portland cement (WPC), in structural concretes, has been growing lately. Thus, targeting diffuse its use, and confirm its quality and durability as structural cement, this work has the aimed to investigate the effect of concretes compounds with WPC, slag and chemical activator (Na_2SO_4), on its behavior against chloride ion penetration. Besides reference mixture (100% WPC), were analyzed blends containing slag replacements of 50% and 70%. A content of activator was 4% of the binder, in which, 50% were slag. The water/binder (w/b) ratios were 0.30, 0.42 and 0.55, and submitted at ages of cure 3, 7, 28 and 91 days. For analysis of chloride penetration, were evaluated the penetration coefficient (by the immersion test, in chloride solution) and the total charge passed (according ASTM C1202/05). Essays of Compressive strength, mercury intrusion porosimetry and composition of pore solution, also been made. Results showed that replacements of WPC by slag provide excellent performance in chloride penetration tests, in all ages tested, manly, in higher w/b ratios. In spite of, the compressive strength of slag concretes not have been greater than reference mixture, this type of concrete attained good results, excepted for essay with three days. Chemical activator efficiency, to accelerate the improvement of slag concrete properties, at initial ages, were verified. Its efficacy was greater as higher w/b ratio and visible until cure of 28 days. The slag addition was beneficial also for de cost, present best results in uniformity of compressive strength and penetration coefficient. Correlations between immersion test and ASTM's essay, analyzed together other tests, show that results of test described by ASTM C1202/05 aren't trustful for practical in concretes with slag additions.

Keywords: concrete; white Portland cement; blast furnace slag; chemical activator; chloride ions.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Ciclo dos Metais (Fonte: ABRACO) 24
FIGURA 2.2 – Pilha eletroquímica de corrosão no concreto armado (CUNHA e HELENE, 2001) 26
FIGURA 4.1 - Museu Iberê Camargo, Porto Alegre/RS (Fonte: www.vitruvius.com.br) 40
FIGURA 4.2 – Flextronics, Sorocaba/SP (Fonte: http://www.abcp.org.br) 40
FIGURA 4.3 – Auditório de Tenerife, Tenerife/Espanha (Fonte: www.aia.org.br)..... 40
FIGURA 4.4 – Centro Emp. Rio Negro, Barueri/SP (Fonte: www.arcoweb.com.br)..... 40
FIGURA 4.5 – Ponte Irineu Bornhausen, Brusque/SC (Fonte: www.comunidadedaconstrucao.com.br) 40
FIGURA 4.6 – Lótus Temple, Nova Délhi/Índia (Fonte: www.alovelyworld.com)..... 40
FIGURA 4.7 – Pastilhas de metacaulim, sílica ativa e cimento branco, respectivamente, utilizadas para leituras colorimétricas (PASSUELO, 2004)..... 48
FIGURA 5.1 - Comparação das resistências das argamassas normais, compostas por diferentes aglomerantes, em relação ao traço de referência (100% CPB) 57
FIGURA 5.2 – Curva granulométrica do agregado miúdo 59
FIGURA 5.3 – Curva granulométrica do agregado graúdo..... 59
FIGURA 5.4 – Realização do ensaio 65
FIGURA 5.5 – Aspersão de solução de nitrato de prata nos corpos-de-prova após ensaio ASTM C1202/05..... 66
FIGURA 6.1 – Evolução dos índices de resistência, por relação a/ag 72
FIGURA 6.2 – Gráficos comparativos de resistência à compressão axial para cada idade de ensaio 73
FIGURA 6.3 – Evolução de resistência para traços contendo 50% de escória, com e sem ativador..... 74
FIGURA 6.4 – Comparação das cargas passantes com o traço de referência..... 77

FIGURA 6.5 – Evolução das cargas passantes para traços contendo 50% de escória, com e sem ativador 79
FIGURA 6.6 – Correlação entre carga passante e profundidade de penetração de cloretos 81
FIGURA 6.7 – Gráficos para obtenção dos coeficientes k, para o traço referência 83
FIGURA 6.8 – Gráficos para obtenção dos coeficientes k, para o traço 50E 84
FIGURA 6.9 – Gráficos para obtenção dos coeficientes k, para o traço 70E 85
FIGURA 6.10 – Gráficos para obtenção dos coeficientes k, para o traço 50A 86
FIGURA 6.11 – Gráficos comparativos do coeficiente de penetração, para cada idade de cura 87
FIGURA 6.12 – Gráficos para obtenção dos coeficientes k', para o traço referência 91
FIGURA 6.13– Gráficos para obtenção dos coeficientes k', para o traço 50E 92
FIGURA 6.14 – Gráficos para obtenção dos coeficientes k', para o traço 70E 93
FIGURA 6.15 – Gráficos para obtenção dos coeficientes k', para o traço 50A 94
FIGURA 6.16 – Comportamento do coeficiente k', com o aumento da idade de cura 95
FIGURA 6.17 – Comportamento do coeficiente k', com o aumento da relação a/ag 95
FIGURA 6.18 – Comportamento do coeficiente k', com mudança no aglomerante 96
FIGURA 6.19 – Evolução do coeficiente de penetração para misturas contendo 50% de escória, com e sem ativador 99
FIGURA 6.20 – Correlação entre a carga passante e o coeficiente de penetração k', com prazos de cura de 3, 7 e 28 dias 103
FIGURA 6.21 – Correlação entre a carga passante e o volume de intrusão de mercúrio, por tipo de mistura, nas idades de cura de 28 e 91 dias 104
FIGURA 6.22 – Correlação entre a carga passante e o volume de intrusão de mercúrio, por tipo de mistura 105
FIGURA 6.23 – Correlação entre o coeficiente de penetração e o volume de intrusão de mercúrio, um mesmo prazo de cura de 28 dias 106
FIGURA 6.24 – Correlação entre carga passante e condutividade elétrica específica, por mistura e idade de cura 107
FIGURA 6.25 – Variação da carga passante com o volume de intrusão, para a mistura de referência, nas idades de 28 e 91 dias 108
FIGURA 6.26 – Variação da carga passante com o volume de intrusão, para a mistura 50E, nas idades de 28 e 91 dias 109

FIGURA 6.27 – Variação da carga passante com o volume de intrusão, para a mistura 70E, nas idades de 28 e 91 dias 109
FIGURA 6.28 – Variação da carga passante com o volume de intrusão, para a mistura de 50A, nas idades de 28 e 91 dias 109
FIGURA 6.29 – Correlação entre a resistência à compressão axial e o coeficiente de penetração, por tipo de mistura. 111
FIGURA 6.30 – Variação do índice k(mm√semana) com a resistência à compressão... 112
FIGURA 6.31 – Análise do custo/MPa, por idade tipo de mistura, relação a/ag e idade de cura 115

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 – Teores dos componentes dos cimentos Portland brancos.....42
TABELA 4.2 – Exigências químicas do CPB.....42
TABELA 4.3 – Exigências físicas e mecânicas do CPB 42
TABELA 4.4 – Comparação da Resistência à compressão de concretos de cimento cinza e cimento branco.....43
TABELA 4.5 – Resistência à compressão e módulo de elasticidade, aos 28 dias, dos concretos empregados (CPV x CPB) 44
TABELA 4.6 – Valores médios observados na resistência à compressão (CPV x CPB) .45
TABELA 5.1 – Caracterização física do cimento 54
TABELA 5.2 – Análise química do cimento e escória.....55
TABELA 5.3 – Caracterização física da escória.....56
TABELA 5.4 – Caracterização mecânica dos aglomerantes 57
TABELA 5.5 – Caracterização física dos agregados.....58
TABELA 5.6 – Nomenclatura e teores de aglomerantes e ativador químico dos traços estudados 61
TABELA 5.7 – Traços Unitários.....61
TABELA 5.8 – Consumo, por mistura, de materiais por m³ de concreto.....61
TABELA 5.9 – Classificação de concretos quanto ao risco de penetração aos íons cloreto de acordo com a carga passante (ASTM C1202/05).....65
TABELA 5.10 - Condutividade equivalente de íons aquosos, em concentração infinita, a 25ºC.....67
TABELA 6.1 – Resistências médias obtidas no ensaio de compressão axial.....69
TABELA 6.2 – Resistência à compressão: constantes de Abrams, coeficiente de determinação e resistências estimadas.....69
TABELA 6.3 – Índice de resistência das misturas em relação ao concreto de referência 70

TABELA 6.4 – Índice de resistência entre as misturas 50A e 50E 71
TABELA 6.5 – Resultados do ensaio acelerado de penetração de cloretos (ASTM C1202/05) 75
TABELA 6.6 – Avaliação dos resultados do ensaio acelerado de penetração de cloretos, segundo ASTM C1202/05 75
TABELA 6.7 – Coeficientes da equação Q = (A/B^x) e de determinação (r^2), e valores de carga passante (Q) por ela estimada 76
TABELA 6.8 – Índice de carga passante em relação ao concreto de referência 78
TABELA 6.9 – Variações da carga passante de acordo com o avanço da idade de ensaio 78
TABELA 6.10 – Índice de carga passante entre as mistura 50A e 50E 80
TABELA 6.11 – Profundidade de penetração de cloretos, após ensaio acelerado, medido através da aspersão de solução 0,1M de AgNO 80
TABELA 6.12 – Avaliação do risco de penetração dos íons cloreto, com base na carga passante, segundo ASTM C1202, e na profundidade de penetração do íon 81
TABELA 6.13 – Coeficientes de penetração (k) 82
TABELA 6.14 – Índices de penetração (I_k), em relação ao concreto de referência 88
TABELA 6.15 – Valores de k, estimados pela expressão k = A/B^x 89
TABELA 6.16 – Coeficientes de penetração (k') 90
TABELA 6.17 – Valores de k', estimados pela expressão k = A/B^x 90
TABELA 6.18 – Índices de penetração ($I_{k'}$), em relação ao concreto de referência 97
TABELA 6.19 – Variação do índice de penetração, em decorrência da utilização do coeficiente k ou k' 97
TABELA 6.20 - Variações da penetração de acordo com o aumento dos prazos de cura 98
TABELA 6.21 – Índice de penetração entre as misturas 50A e 50E 98
TABELA 6.22 – Resultados obtidos para condutividade elétrica da solução dos poros 100
TABELA 6.23 – Resultados obtidos no ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio 101
TABELA 6.24 – Redução do volume de intrusão de mercúrio e da carga passante entre os ensaios de 28 e 91 dias 105
TABELA 6.25 – Variação ocorrida na carga passante, volume de intrusão de mercúrio e condutividade elétrica específica da solução dos poros entre misturas pré-determinadas 110

TABELA 6.26 – Preços unitários dos materiais 113
TABELA 6.27 – Custo dos materiais por m³ de concreto, para as misturas estudadas 113
TABELA 6.28 – Custo por m³ de concreto, estimado pela expressão $C = A/B^x$ 114
TABELA 6.29 – Relação a/ag, coeficiente k', risco de penetração de cloretos e custo, para um mesmo nível de resistência aos três dias..... 116
TABELA 6.30 – Relação a/ag, coeficiente k', risco de penetração de cloretos e custo, para um mesmo nível de resistência aos sete dias..... 117
TABELA 6.31 – Relação a/ag, coeficiente k', risco de penetração de cloretos e custo, para um mesmo nível de resistência aos 28 dias 118
TABELA 6.32 – Relação a/ag, coeficiente k', risco de penetração de cloretos e custo, para um mesmo nível de resistência aos 91 dias 119
TABELA 6.33 – Relação a/ag, resistência à compressão, risco de penetração de cloretos e custo, para coeficiente de penetração de Cl^-, aos três dias de cura, de 120
TABELA 6.34 – Relação a/ag, resistência à compressão, risco de penetração de cloretos e custo, para coeficiente de penetração de Cl^-, aos sete dias de cura, ... 120
TABELA 6.35 – Relação a/ag, resistência à compressão, risco de penetração de cloretos e custo, para coeficiente de penetração de Cl^-, aos 28 dias de cura, de..... 121
TABELA 6.36 – Relação a/ag, coeficiente k' e custo, para diferentes níveis de resistência, nas misturas compostas por CPV-ARI e escória (Schneider, 2005), e CPB e escória 122
TABELA 6.37 – Comparação de custo e coeficientes de penetração, entre concretos de CPB e CPV-ARI, em mesmos níveis de resistência 123

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/ag – Relação água/aglomerante em massa.

Al_2O_3 – Óxido de alumínio

ACI – American Concrete Institute.

ASTM – American Society for Testing Materials.

C/S – Relação entre cal (CaO) e sílica (SiO_2).

C_2S – Silicato bicálcio.

C_3A – Aluminato tricálcio.

C_3S – Silicato tricálcio.

C_4AF – Ferroaluminato tetracálcio.

$CaSO_4$ – Sulfato de cálcio

$CaCO_3$ - Calcário

CaO – Óxido de cálcio

CH – Hidróxido de cálcio.

Cl^- – Íons cloreto.

CO_2 – Anidrido carbônico ou dióxido de carbono.

CP – Cimento Portland

CPB – Cimento Portland branco.

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado.

E – Escória de alto forno.

e^- - Elétrons

EPCI – Ensaio de penetração de cloretos por imersão

$Fe(OH)_2$ - hidróxido de ferro II

Fe_2O_3 - Óxido de ferro

GEPECON – Grupo de Estudos e Pesquisas em Concreto

H_2O - Água

H_2S – Ácido sulfídrico

NaCl – Cloreto de sódio.

NaOH – Hidróxido de sódio.

Na_2SO_4 – Sulfato de sódio

O_2 - Oxigênio

OH^- - Íons hidroxila

pH – Potencial de hidrogênio ou hidrogeniônico.

R – Coeficiente de correlação.

R^2 – Coeficiente de determinação.

S - Enxofre

SiO_2 – Dióxido de silício

UR – Umidade relativa do ar

SUMÁRIO

RESUMO **5**
ABSTRACT **6**
LISTA DE FIGURAS **7**
LISTA DE TABELAS **10**
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS **13**
1. INTRODUÇÃO **18**
1.1. Justificativa da pesquisa **20**
1.2. Objetivos **22**
1.2.1. Objetivo geral 22
1.2.2. Objetivos específicos 22
1.3. Estrutura da dissertação **23**
2. CORROSÃO DAS ARMADURAS NAS ESTRUTURAS DE CONCRETO **24**
2.1. Introdução **24**
2.2. Corrosão no concreto armado: mecanismo eletroquímico e condições necessárias **25**
2.3. Concreto: mecanismos da proteção do aço **26**
3. AÇÃO DOS ÍONS CLORETO NAS ESTRUTURAS DE CONCRETO **29**
3.1 Importância dos íons cloretos no processo de corrosão **29**
3.2 Teor Limite de cloretos **31**
3.3 Aglomerante x Ação dos Cloretos **32**
3.4 Ensaios de avaliação da resistência do concreto à penetração de cloretos **33**
3.5 Solução dos poros e condutividade elétrica **36**
4. CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND BRANCO ESTRUTURAL **39**
4.1. Introdução **39**
4.2. Concreto de Cimento Portland Branco **41**
4.3. Uso de adições minerais **46**

4.4. Escória granulada de alto-forno **48**
4.5. Ativação química da escória **51**
5. MATERIAIS E MÉTODOS **53**
5.1. Introdução **53**
5.2. Caracterização dos Materiais **54**
5.2.1. Cimento 54
5.2.3. Características mecânicas dos aglomerantes 56
5.2.4. Ativador químico 56
5.2.5. Agregados 57
5.2.6. Aditivo superplastificante 60
5.3. Método de dosagem, moldagem e cura **60**
5.4. Ensaios experimentais **63**
5.4.1. Resistência à compressão axial 63
5.4.2. Ensaio de penetração a cloretos por imersão (EPCI) 63
5.4.3. Ensaio acelerado de penetração à cloretos – ASTM C1202/05 64
5.4.4. Análise da solução aquosa dos poros 66
5.4.5. Ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio 67
6. RESULTADOS, ANÁLISE E DISCUSSÃO **68**
6.1. Introdução **68**
6.2. Resistência à compressão axial **68**
6.3. Método normalizado de indicação elétrica quanto à habilidade do concreto de resistir à penetração do íon cloreto– ASTM C1202/2005 ..... **74**
6.4. Ensaio de penetração de cloretos por imersão (EPCI) **81**
6.5. Condutividade elétrica específica da solução dos poros **99**
6.6. Volume de intrusão de mercúrio **100**
6.7. Integração de resultados **102**
6.7.1. ASTM C1202/05 x EPCI 102
6.7.2. ASTM C1202/05 x porosimetria por intrusão de mercúrio 104
6.7.3. EPCI x porosimetria por intrusão de mercúrio 105
6.7.4. ASTM C1202/05 x condutividade elétrica específica da solução dos poros . 106
6.7.5. Resistência à compressão axial x EPCI 110
6.8. Análise de custos **112**
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS **125**
7.1. Conclusões **125**

7.2. Sugestões para pesquisas futuras 127
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 129

1. INTRODUÇÃO

A grande importância do concreto como material de construção civil é uma questão incontestável, pois dele veio o grande impulso para o desenvolvimento de importantes metodologias construtivas até hoje utilizadas e que, quanto mais aperfeiçoadas, mais dependem de um melhor desempenho deste.

Atualmente, o concreto é o segundo material mais consumido no planeta Terra, ficando atrás apenas da água (MEHTA e MONTEIRO, 1994; WBCSD, 2002), demonstrando assim, o extraordinário uso deste material.

As principais causas para essa grande disseminação mundial são: o baixo preço do produto, quando comparado com outros materiais já difundidos na comunidade da construção, a facilidade de obtenção de seus constituintes, e também, a variabilidade e versatilidade, de formas e arranjos estruturais, que se é conseguida através da sua correta utilização, apresentando também boas características de durabilidade.

Com sua já consolidação no mercado, começaram a surgir idéias para o melhoramento do seu desempenho de uma forma geral, tanto em aspectos de durabilidade, resistência e sustentabilidade, quanto para a sua visão estética.

Em se tratando da questão estética, o emprego do concreto convencional, vem cada vez se tornando mais repudiada, devido, principalmente, à sua coloração normalmente escurecida, a qual, para muitos, é considerada monótona. Buscando uma maior valorização deste produto através do uso, além de como um constituinte estrutural, sendo também o próprio acabamento final desta estrutura, ou seja, utilizando estruturas de concreto aparente, presentemente, está sendo estudada a utilização do cimento Portland branco em substituição do cimento Portland cinza.

O grande diferencial do cimento Portland branco, ou seja, a sua coloração, é conseguida através de matérias primas com baixos teores de óxido de ferro e manganês, além de cuidados essenciais durante os processos de moagem e resfriamento, e também devido ao tipo de combustível utilizado para a fabricação do clínquer (HAMAD, 1995; MEHTA & MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997; PCA, 1999).

A utilização desse material implica, principalmente, na obtenção do concreto de cor branca, ou também, na possibilidade de um maior aproveitamento, fidelidade e confiabilidade

ao uso de corantes, que resultam na aquisição de concretos coloridos (AGUIAR, 2006; MEHTA & MONTEIRO, 1994; PCA, 1999).

Na última década, os estudos sobre os mais diversos comportamentos do concreto armado, como peça estrutural, vêm sendo muito aprofundados. Um dos pontos mais estudados, porém, com muitas questões ainda a serem desvendadas, é a durabilidade frente aos agentes agressivos. O maior problema, quando se trata de durabilidade de estruturas de concreto armado, é referente à corrosão das armaduras.

As duas principais causas que acarretam a corrosão da armadura embutida no concreto são a carbonatação e a ação dos íons cloretos. A carbonatação age no processo de despassivação da armadura, ou seja, destrói a camada de óxidos que protege o aço contra a corrosão, enquanto que os íons cloretos, além de degenerarem esta camada, participam diretamente das reações de corrosão, atuando como catalisadores (NEVILLE, 1997; MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Unindo os conceitos de durabilidade e sustentabilidade à produção do concreto, deve-se ainda, desvendar os aspectos negativos, abrangendo desde o processo de fabricação de seus constituintes até o momento da demolição de estruturas com ele constituídas.

Já é de conhecimento, no campo acadêmico, que parte considerável do CO_2 emitido na atmosfera mundial anualmente é devido à fabricação do cimento Portland. Segundo Isaia (2004), para cada tonelada de cimento Portland produzida é também liberada, aproximadamente, uma tonelada de dióxido de carbono. Esta emissão corresponde entre 5% e 8% do total de dióxido de carbono lançado em todo planeta (WBCSD, 2002; ISAIA, 2004).

Partindo-se deste princípio e aglutinando-o a questões como manutenção de reservas naturais, diminuição dos custos de produção e melhoria no desempenho de características específicas do concreto, surgiu a possibilidade de se adicionar, na sua produção, alguns subprodutos agro-industriais, como sílica ativa, escória de alto-forno, cinza volante e a cinza de casca de arroz, entre outras substituições. Estes materiais, quando adicionados ao concreto, recebem um destino não-poluente, resultam em economia de energia e de custo, e acarretam melhorias quanto a manutenção de trabalhabilidade adequada por períodos mais prolongados (AÏTCIN, 2000; MEHTA e MONTEIRO, 1994). Outra vantagem é a participação em reações com os produtos de hidratação do cimento Portland, causando modificações na estrutura interna do concreto, principalmente, tornando a matriz cimentícia mais densa, causando um refinamento da estrutura de poros e, portanto, melhorando a durabilidade frente a ação de agentes agressivos (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

1.1. Justificativa da pesquisa

A evolução tecnológica exige a busca de elementos inovadores e materiais com bom desempenho técnico e vida útil satisfatória. Estes necessitam provocar uma diferenciação no produto acabado, mantendo suas características essenciais, e propiciando um grande efeito visual e estético. Nesse contexto, busca-se introduzir o cimento Portland branco na produção de concreto, visando sua maior utilização e, por conseqüência, causar a diminuição do seu custo, atualmente elevado, possibilitando a sua eqüidade de preço ao cimento Portland cinza.

Todo novo material, para ter uma utilização correta e duradoura, deve passar por uma fase de pesquisas e estudos, obtendo-se assim, um conhecimento satisfatório de suas características, propriedades e composições mais adequadas para cada ambiente ao qual será inserido.

Com o concreto de cimento Portland branco não pode ser diferente. Apesar de não ser um material novo, pouco se sabe sobre seus desempenhos técnicos, como resistência a agentes agressivos, resistência à compressão, porosidade, entre outras características que influenciarão certamente na vida útil da estrutura. Grande parte dos estudos já realizados com este componente, são referentes a seu comportamento mecânico, como Hamad (1995) e Benitez et al. (2002). Atualmente, algumas pesquisas estão sendo voltadas à questão da durabilidade, como Kirchheim (2003) estudando a carbonatação, Rizzon (2006) com ênfase no ataque por cloretos e Korb (2007) com um aprofundamento na microestrutura. Até o momento, raras são as análises quanto ao uso de adições minerais em conjunto com o cimento Portland branco.

A necessidade de aliar o desempenho da estrutura à sustentabilidade ambiental, leva inevitavelmente, à adição de matérias-primas alternativas, principalmente, resíduos industriais. Com isso, um destino mais adequado será dado aos subprodutos, podendo estes, ocasionar melhorias nas propriedades do concreto.

Dentre os materiais alternativos que apresentam condições de serem adicionados ao concreto de cimento Portland branco, destacam-se a sílica ativa e a escória de alto-forno, devido, principalmente, às suas colorações esbranquiçadas, não havendo grandes prejuízos à cor final da estrutura.

Neste estudo, optou-se pelo uso da escória por ser esta uma adição de custo relativamente baixo quando comparado ao cimento, diferentemente da sílica ativa, além de possibilitar grandes porcentagens de substituição. Com o uso da sílica, tornam-se praticamente inviáveis substituições acima de 20%, sendo o teor ótimo entre 8% e 15%

(TOUTANJI & EL-KORCHI, 1995; SHANNAG, 2000; SONG et al., 2007). A razão, para isso, é que os benefícios da sua atividade químico-física na estrutura passam a não acompanhar o aumento do custo por metro cúbico de concreto, não justificando-se o seu uso. Já com a escória, substituições de até 70% podem gerar, em idades avançadas e dependendo da característica a ser analisada, concretos tão bons, ou até mesmo melhores que os concretos sem adições (BABU & KUMAR, 2000; CHENG et al., 2005; ROSA, 2005; SCHNEIDER, 2005).

Visando acelerar o aparecimento dos resultados benéficos da escória, torna-se também interessante analisar a utilização de ativadores químicos, os quais possibilitem, já nas idades iniciais, grandes taxas de reação da escória. Neste estudo optou-se pela utilização de sulfato de sódio, devido a estudos já realizados (SPERB, 2003; SCHNEIDER, 2005; ROSA, 2005), demonstrando uma boa eficácia deste na ativação da escória.

Quanto à durabilidade, salienta-se o ataque por íons cloretos, por ser um dos maiores responsáveis pela corrosão do concreto armado (AÏTCIN, 2000; BERTOLINI et al., 2007; MEHTA & MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997). Torna-se imprescindível, então, o entendimento de sua forma de atuação e a capacidade dos materiais de impedirem a sua penetração, acarretando um menor índice de corrosão, e, portanto, uma maior vida útil à estrutura.

Em se tratando da ação de cloretos, as adições minerais podem afetar as condições para a penetração destes íons, dependendo esta, do tipo e teor da adição e das condições de cura (AMPADU et al., 1999), das alterações na composição da solução dos poros (SHI et al., 1998), do refinamento dos poros (HOSSAIN & LACHEMI, 2004) e capacidade de combinação dos íons cloretos, resultando em menor teor de cloretos livres (LENG et al., 2000).

Justificam-se, assim, os focos principais desta dissertação.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

O objetivo principal, desta pesquisa, é verificar o desempenho de concretos de cimento Portland branco, com e sem adição de escória de alto-forno, aplicada em substituição ao cimento, nos teores de 50% e 70%, frente à ação de íons cloretos, devido às modificações na sua estrutura interna.

1.2.2. Objetivos específicos

Como objetivos específicos deste trabalho, podem ser citados:

- Verificar a influência da escória de alto-forno no desempenho do concreto, frente à penetração de íons cloreto e à resistência à compressão axial.
- Averiguar a influência das diferentes relações água/aglomerante, tanto na ação dos íons cloretos, quanto na resistência à compressão axial;
- Analisar a influência de ativador químico para a escória, quando esta apresenta-se em substituição parcial de 50% de cimento Portland.
- Verificar a adequação do ensaio ASTM C1202/05 para a avaliação da penetração de íons cloreto em concretos compostos com cimento Portland branco e escória de alto forno, uma vez que, Shi et al. (1998) relatam não ser apropriado em concretos com adições minerais.
- Determinar correlações entre os desempenhos técnicos de cada mistura estudada, podendo-se, a partir de um nível de desempenho desejado, buscar a solução que apresente uma satisfação das propriedades de projeto, com o menor custo possível de execução.
- Comparar o desempenho de concretos de CPB e CPV-ARI, com adições de escória e ativador químico, em mesmos níveis de resistência à compressão axial.

1.3. Estrutura da dissertação

A dissertação está dividida em sete capítulos. No primeiro capítulo fez-se uma introdução ao assunto em questão, relatando a importância da pesquisa, justificando os pontos estudados e definindo os objetivos a serem alcançados.

O segundo capítulo explica o significado e o processo de corrosão ocorrido nas armaduras do concreto. Analisa os mecanismos atuantes, as condições necessárias e formas de minimizar a sua ocorrência.

O terceiro capítulo é específico quanto a corrosão por meio dos íons cloretos. Traz no seu conteúdo a importância da atuação e influência dos teores destes íons no processo de corrosão, mecanismos de fixação dos cloretos. Na seqüência descreve alguns ensaios para verificar capacidade de penetração dos cloretos, além de ensaios correlacionáveis com os procedimentos anteriores.

Questões relativas ao concreto branco, seu uso, suas características e possíveis adições minerais a serem utilizadas, são abordadas no capítulo quarto.

O quinto capítulo refere-se aos materiais utilizados no decorrer da pesquisa, suas caracterizações e métodos de ensaios utilizados.

Resultados e discussões são apresentados no capítulo sexto. Sempre que possível, estabeleceram-se comparações com a bibliografia consultada.

Por fim, o sétimo capítulo relata as principais conclusões, na tentativa de esclarecer os questionamentos pré-estabelecidos no primeiro capítulo, seguido de sugestões para pesquisas futuras.

2. CORROSÃO DAS ARMADURAS NAS ESTRUTURAS DE CONCRETO

2.1. Introdução

O concreto, por si só, como um material de função estrutural, vem sendo cada vez melhor elaborado, principalmente com a utilização, já disseminada, do Concreto de Alto Desempenho (CAD). O problema é que, mesmo melhorando suas características técnicas, ele ainda não consegue, mantendo uma relação custo/benefício adequada, suprir todas as necessidades de um componente estrutural, como por exemplo, possuir uma adequada resistência a esforços de tração. Por isso sua combinação estrutural com o aço (formando o concreto armado), na maioria das vezes, é inevitável.

Quando se fala em concreto armado, deve-se, imediatamente lembrar-se do seu maior problema: a corrosão das armaduras. A corrosão é definida como uma interação destrutiva de um material com o ambiente, seja por reação química, ou eletroquímica (HELENE, 1986; COUTINHO, 1992), aliada ou não a esforços mecânicos (GENTIL, 1987; ABRACO). Quando restringida aos metais, pode-se dizer que é o inverso do processo da metalurgia extrativa, Figura 2.1, na qual o metal é extraído de seu minério e refinado para uso (COUTINHO, 1992). Este processo se dá através da reação destes, com elementos não-metálicos presentes no meio, como O_2, S, H_2S, CO_2 entre outros (ABRACO), geralmente de forma espontânea, transformando constantemente os materiais metálicos, de forma que sua durabilidade e desempenho deixam de satisfazer os fins a que se destinam (GENTIL, 1987).

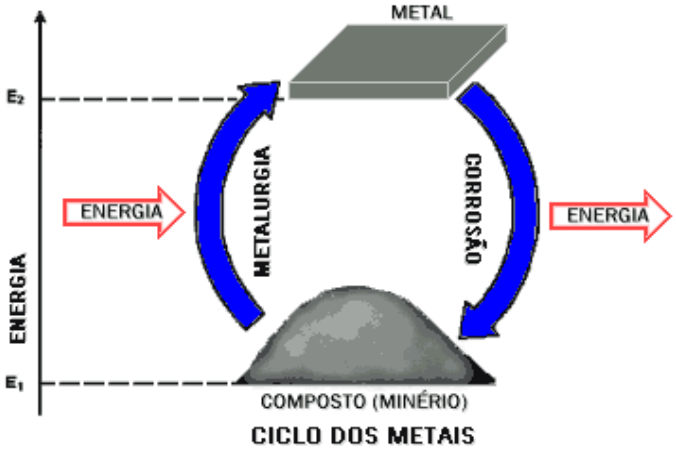

Figura 2.1 – Ciclo dos Metais
Fonte: ABRACO. Disponível em: http://www.abraco.org.br/corros11.htm

2.2. Corrosão no concreto armado: mecanismo eletroquímico e condições necessárias

A degradação das estruturas de concreto, devido à corrosão das armaduras, é um problema crucial, tanto do ponto de vista da segurança, como do econômico (OUGLOVA et al., 2006).

A corrosão das armaduras do concreto é um caso típico de corrosão eletroquímica, causando danos no concreto sob a forma de expansão, fissuração e lascamento da camada de cobrimento (MEHTA & MONTEIRO, 1994), além de, é claro, a perda da seção de aço resistente. Sendo assim, para esta acontecer, faz-se necessário satisfazer três condições essenciais: presença de oxigênio, existência de um eletrólito e ocorrência de uma diferença de potencial, podendo ainda, ser acelerada quando na presença de algum agente agressivo (HELENE, 1986).

O eletrólito presente no concreto é representado, normalmente, pelo conjunto de água, geralmente suficiente para suprir esta função nos concretos em temperatura e umidade ambiente, e produtos de hidratação do cimento solúveis em água, como o hidróxido de cálcio. Este componente torna-se fundamental, pois é o responsável pela condução eletrolítica entre o ânodo e o cátodo (GENTIL, 1987).

Sempre que o aço está imerso em uma solução, há a tendência de que átomos de ferro, de uma porção da barra, se transfiram para a solução na forma de cátions ferro (Fe^{++}), deixando a armadura nesta região, a qual é conhecida por zona anódica ou corroída, com carga negativa (HELENE, 1986). Este fenômeno é denominado oxidação do metal e representado pela equação 2.1.

$$2Fe \longrightarrow 2Fe^{++} + 4e^{-} \qquad \text{(Equação 2.1)}$$

Para ocorrer a oxidação, no entanto, é indispensável que haja, simultaneamente, algumas variáveis no decorrer da barra de aço, como diferenças de concentração salina, umidade, aeração ou tensão, capazes de gerar uma diferença de potencial, além de estarem disponíveis a água e o oxigênio para ocorrer a reação de redução (Equação 2.2). Sendo satisfeitas estas condições, cria-se uma célula de corrosão eletroquímica e, conseqüente, ocorre a formação da ferrugem (Equação 2.3) (HELENE, 1986; GENTIL, 1987).

$$2H_2O + O_2 + 4e^- \longrightarrow 4OH^-$$

(Equação 2.2)

$$4Fe + 3O_2 + 6H_2O \longrightarrow 4Fe(OH)_3$$

(Equação 2.3)

A ilustração abaixo (Figura 2.2) demonstra, de forma simplificada, os elementos fundamentais e o mecanismo de corrosão dentro de uma estrutura de concreto.

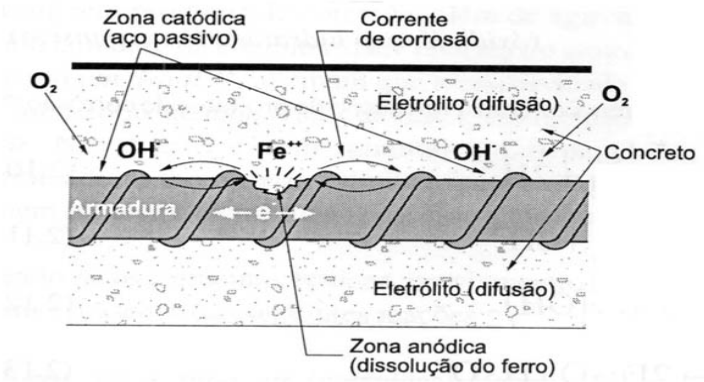

Figura 2.2 – Pilha eletroquímica de corrosão no concreto armado (CUNHA & HELENE, 2001)

Segundo Freire (2005), a corrosão da armadura no concreto pode ser influenciada por diversos fatores, como: mecânicos (vibração e erosão), físicos (variações de temperatura), biológicos (bactérias) e químicos (sais e ácidos). Estes fatores, agindo em conjunto, atuam desde colaborando com a deterioração do concreto de cobrimento, e até mesmo participando do processo de corrosão propriamente dito.

2.3. Concreto: mecanismos da proteção do aço

A armadura contida no concreto é protegida contra a corrosão sob duas formas: a primeira maneira é um mecanismo físico, ou seja, impede, através da camada de cobrimento, que agentes agressivos cheguem até a armadura. A segunda é via uma proteção química, devido à alta alcalinidade da solução dos poros, resultando na camada passivadora do aço (MONTEMOR et al., 2000).

A respeito da proteção física, as características macro e microscópicas relevantes para a durabilidade do concreto armado são resultantes da produção e execução deste, como a porosidade, a capilaridade e a permeabilidade, os quais estabelecem uma maior ou menor facilidade à penetração de agentes agressores, além de é claro, dos aspectos de projeto, como a espessura desta camada protetora.

Ao se restringir às questões de produção e execução, é inconcebível pensar em concreto sem fazer uso, em conjunto, de técnicas de dosagem e controle tecnológico do concreto. Isso pode ser explicado pelo fato de que, a cada ambiente ao qual uma estrutura será inserida, é necessária uma dada característica diferente, seja de fatores ligados ao desempenho do concreto fresco ou do concreto endurecido. No estado fresco o principal item a ser analisado é a trabalhabilidade, onde o seu correto ajuste resulta em uma peça melhor moldada, evitando-se problemas como segregações e altas porosidades. Já no estado endurecido, além das resistências mecânicas, questões referentes à microestrutura, como permeabilidade e capilaridade, devem ser consideradas nos trabalhos de dosagem. Para chegar a estes resultados, com freqüência são feitas alterações de traço e de componentes, como relação água/aglomerante e tipo de cimento, além de valer-se de aditivos químicos e adições minerais. A finalidade de todos estes é tornar a estrutura mais densa e compacta, evitando a entrada de elementos nocivos à estrutura.

A outra forma de proteção, ou seja, a química, é dependente basicamente da alcalinidade da solução dos poros do concreto. Segundo Helene (1986), o $Ca(OH)_2$ resultante das hidratações dos silicatos de cálcio, dissolvem-se na água e preenchem os poros e capilares do concreto, conferindo-lhe um caráter alcalino, e provocando a passivação do aço. Esta película passivante, formada por óxidos duplos de cálcio e ferro ($CaO.Fe_2O_3$) (Equação 2.4), é o resultado da combinação da ferrugem superficial ($Fe(OH)_3$) com o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$).

$$2Fe(OH)_3 + Ca(OH)_2 \longrightarrow CaO.Fe_2O_3 + 4H_2O$$

(Equação 2.4)

A compreensão deste mecanismo de proteção leva à percepção da grave ação de agentes deletérios no processo de corrosão. Estes, atuando sobre os compostos CH atuam como aceleradores do processo. Gentil (1987) relata como principais aceleradores da corrosão no concreto armado a lixiviação de CH e álcalis, verificada em estruturas imersas em águas agressivas; a carbonatação, reação do CH com CO_2 formando o carbonato de cálcio ($CaCO_3$);

e a ação de soluções de ácidos, como o clorídrico e sulfúrico, que também reagem com o CH e ocasionam a diminuição do pH.

Outros fatores que alteram a quantidade de CH presente no concreto modificando, portanto, o pH da solução dos poros, são o tipo de cimento e o uso, ou não, de adições minerais. A variável cimento depende de sua composição química. Segundo Neville (1997) a partir das reações estequiométricas dos compostos, é possível saber que a hidratação do C_3S e do C_2S presentes no cimento Portland resultam em quantidades diferentes de CH, ficando a quantidade deste, dependente da relação dos constituintes do cimento. A influência das adições minerais é justificada pelas reações pozolânicas destes materiais, que consomem o CH disponível. Apesar disso, Isaia (1996) afirma que substituições de até 50% de cimento Portland por pozolanas, em concretos com relação a/ag $\leq$ 0,4, não são prejudiciais à passivação das armaduras.

3. AÇÃO DOS ÍONS CLORETO NAS ESTRUTURAS DE CONCRETO

3.1. Importância dos íons cloretos no processo de corrosão

Uma das mais significativas causas da corrosão das armaduras, nas estruturas de concreto é a despassivação localizada, das barras de aço, devido ao ingresso dos íons cloreto. Segundo Wee et al. (2000), a corrosão das armaduras induzida por íons cloretos é a maior causa de deterioração e degradação prematura de estruturas de concreto construídas em ambientes carregados de sais, sendo, portanto, a penetração aos cloretos reconhecida como uma propriedade intrínseca do concreto.

A presença deste íon pode ser explicada através da utilização de matérias-primas contaminadas durante a mistura do concreto, como agregados, principalmente em regiões litorâneas, águas salobras ou excessivamente cloradas, aditivos aceleradores de endurecimento ou de pega, que possuem cloreto de cálcio ($CaCl_2$) em sua composição, e até mesmo cimentos, pois os cloretos melhoram as resistências iniciais destes (HELENE, 1993). Outra origem pode ser a contaminação externa, sendo decorrente da exposição da estrutura à água ou à atmosfera marinha, ou da utilização de tratamento superficial de limpeza com ácido muriático (ácido clorídrico - HCl, comercial), técnica habitual em países de clima tropical e equatorial (HELENE, 1993; NGUYEN et al., 2007). Uma prática muito comum e necessária em países de clima frio é o uso de sais descongelantes (NaCl, $CaCl_2$ e $MgCl_2$), que também são fontes ricas de íons cloreto (HELENE, 1993; MEHTA & MONTEIRO, 1994; MONTEMOR et al., 2003).

Quando o concreto já se encontra no estado endurecido, ou seja, a contaminação ocorre somente através do ambiente externo, o ingresso de íons cloretos na estrutura só acontece quando este está dissolvido em água. Isto é explicado pelo fato das dimensões dos cristais de cloretos serem usualmente muito maiores que as dimensões da rede de poros do concreto, impossibilitando a sua entrada. Apesar disso, quando no estado sólido, os cristais de cloretos podem depositar-se na superfície da estrutura até que ali haja água suficiente para sua dissolução e ingresso no concreto. Quando dissolvidos, os cloretos infiltram-se no concreto através de mecanismos de penetração de água e transporte de íons, como: absorção (ou sucção

capilar), migração de íons, difusão de íons e permeabilidade (HELENE, 1993; SCHNEIDER, 2006; SILVA, 2006;).

Conhecendo as prováveis formas de contaminação dos concretos por íons cloretos e os mecanismos de transporte destes íons através da rede de poros, o segundo passo é entender como estes atuam nos processos de despassivação e corrosão das armaduras inseridas no concreto. Segundo o ACI 222R-01, existem três teorias que explicariam o fenômeno de despassivação e corrosão das armaduras por meio dos íons cloretos, são elas;

- Teoria do filme de óxido: os íons cloretos penetram muito mais facilmente nas deformidades da película passivante do que os outros íons agressivos;

- Teoria da Adsorção: os íons cloretos são adsorvidos na superfície do aço, juntamente com hidroxilas e o oxigênio dissolvido, promovendo a hidratação do ferro e viabilizando a sua dissolução em cátions;

- Teoria do complexo transitório: há uma disputa entre íons cloretos e ânions hidroxilas para a produção de compostos de corrosão ferrosos, os quais são denominados complexos transitórios. Estes complexos difundem-se do ânodo em direção ao cátodo permitindo a continuidade do processo corrosivo. Este fenômeno pode ser descrito pelas reações indicadas na equação 3.1.

$$Fe^{3+} + Fe^{2+} + 6Cl^{-} \longrightarrow FeCl_3 + FeCl_2 \text{ (hidrólise) } \longrightarrow 6Cl^{-} + Fe(OH)_2 + Fe(OH)_3$$

(Equação 3.1)

Analisando estas reações, verifica-se o fato destas não consumirem os íons cloretos, tornando-se entendível o porquê, que pequenas quantidades de cloretos podem ser responsáveis por grandes taxas de corrosão (HELENE, 1986). Normalmente, a corrosão por íons cloretos provoca o desenvolvimento de uma rede de microfissuras, as quais facilitam ainda mais a penetração adicional destes íons, culminando no lascamento do recobrimento do concreto, devido a forças expansivas resultantes da formação da ferrugem, expondo ainda mais a estrutura a este agente nocivo (AÏTCIN, 2000).

3.2. Teor Limite de cloretos

Alguns autores (MEHTA & MONTEIRO, 1994; ALONSO et al., 2005; POUPARD et al., 2004) buscam quantificar um teor limite para a presença de cloretos no concreto a fim de não provocarem a corrosão das armaduras, porém não se tem chegado a um consenso. A razão disto é exatamente o grande número de variáveis que atuam no processo de corrosão, e entre elas está a condição em que estes cloretos se encontram nesta estrutura. A partir do momento que os íons cloretos estão introduzidos na massa, eles podem se apresentar sob três situações distintas: quimicamente ligados, geralmente através de combinação com o C_3A, fisicamente adsorvidos na superfície dos poros e sob a forma de íons livres, presentes na solução aquosa dos poros.

Decorrente disso, e sabendo que quem oferece risco imediato de corrosão são os cloretos dissolvidos na solução dos poros, alguns pesquisadores estão tentando explicar os teores limites recorrendo a fatores como relação Cl^-/OH^- e teores de cloretos livres, e não mais à porcentagem de cloretos totais. Porém, Helene (1993) ressalva que, apesar dos cloretos solúveis em água serem os únicos que podem provocar a corrosão, é conveniente determinar os cloretos totais, pois parte dos combinados podem vir a provocar reações deletérias, devido fenômenos tais como carbonatação ou elevação da temperatura.

As principais recomendações de instituições de normalização ainda trazem como valores críticos teores de cloretos em relação à massa de cimento ou concreto, ou seja, em termos dos cloretos totais. O ACI C318-05 recomenda, para concreto armado, a utilização máxima de 0,15% de cloretos em relação à massa de cimento enquanto que o ACI C201-01 delimita, para concreto protendido, teores máximos de 0,08%. No caso das normas brasileiras, a antiga NB-1/1978 trazia como valores limites um total de 500mg de cloretos para cada litro de água de amassamento, enquanto que sua atualização, a NBR 6118/2003, não faz referência a valores limites, mas proíbe o uso de aditivos contendo cloretos na confecção de concretos armados e protendidos.

Apesar disso, Pourbaix (1973 apud ALONSO et al., 2000), afirmam ser a relação Cl^-/OH^- o mais exato parâmetro, a ser levado em conta, quando se fala em corrosão nas armaduras do concreto. Mehta & Monteiro (1994) asseguram que quando as relações molares Cl^-/OH^- são maiores que 0,6, a camada passivadora do aço torna-se permeável ou instável, não protegendo mais contra a corrosão. Já Alonso et al.(2000) relatam que este limite estaria inserido numa relação Cl^-/OH^- entre os valores de 0,66 a 1,45. Devido às dificuldades de

medir a relação Cl^-/OH^- e da dependência de inúmeros fatores para a iniciação da corrosão, não existe um único valor aceitável universalmente (HUSSAIN et al., 1995).

3.3. Aglomerante x Ação dos Cloretos

A busca pelo perfeito entendimento da ação dos cloretos na depredação de estruturas de concreto armado tem levado a grandes esclarecimentos sobre este assunto. Um destes pontos desvendados foi de que a ocorrência da corrosão é dependente basicamente, não do teor total de cloretos presentes no concreto, mas sim da quantidade de cloretos livres remanescentes na solução dos poros (PAGE, 1982 apud XU, 1997).

A partir disso, pode-se compreender como o tipo de aglomerante, utilizado na produção do concreto, pode ser uma importante forma de controle da corrosão das armaduras devido o ataque de íons cloretos. Isto pode ser explicado pela capacidade deste de fixar os íons através da formação dos cloroaluminatos de cálcio hidratados (Sais de Friedel), resultantes da reação do C_3A com os cloretos (MONTEMOR et al., 2003; BROW & BOTHE Jr., 2004; SILVA, 2006). Este tipo de sal, insolúvel quando em soluções básicas (pH>12) (CSIZMADIA et al., 2001), diminui o fluxo de penetração de íons cloretos, devido a redução da concentração de íons livres na solução aquosa dos poros do concreto, e também porque depositam-se nos macro-poros (>= 60 nm de diâmetro), criando um alto grau de constrição, descontinuidade e tortuosidade (WEE et al., 2000).

Além do C_3A, o C_4AF em menor escala também tem capacidade de fixar os cloretos livres, resultando em cloroferratos de cálcio hidratado (BROW & BOTHE Jr., 2004; SILVA, 2006). O C-S-H, por sua vez, também possui esta capacidade, porém ainda não existe um consenso sobre sua extensão e mecanismos de combinação (BROW & BOTHE Jr., 2004).

Alguns fatores relevantes para a fixação de cloretos, segundo Nielsen et al. (2005), são o teor de álcalis e de ferro presentes no aglomerante. A presença de álcalis tem um impacto negativo, pois aumentam a concentração de cloretos na solução. A ausência de ferro, como no caso do cimento Portland branco, é benéfica, pois aumenta o teor de cloretos combinados com o C-S-H, quando comparado com o cimento Portland convencional.

Nos casos em que parte do aglomerante é constituída por adições minerais, como por exemplo, a escória de alto-forno, ocorre inevitavelmente uma diferenciação no grau de fixação. O simples fato de ocorrer substituição de cimento por escória ocasiona um aumento

na taxa de combinação de cloretos (XU, 1997). Esta afirmação é confirmada por Luo et al. (2001), que esclarece que isto se dá devido a uma maior formação de sais de Friedel, resultante do alto teor de alumina presente nesta adição.

Outros fatores intervêm na formação dos sais de Friedel, entre eles, o teor de sulfato presente na mistura. A justificativa disto é a preferência da reação do C_3A do aglomerante com esses, formando a etringita. Segundo Xu (1997), a capacidade de fixação de cloretos pelo cimento decresce rapidamente com o aumento do teor de sulfatos. Esta afirmação torna-se importante, primeiramente, por esclarecer que em locais onde haja altas concentrações de sulfatos, este mecanismo de proteção provavelmente irá falhar, e em segundo lugar, por ressaltar a necessidade de cuidados com a utilização de ativadores químicos, como o $CaSO_4$ e Na_2SO_4.Este mesmo autor afirma que estas substâncias podem prejudicar o processo de combinação dos cloretos.

3.4. Ensaios de avaliação da resistência do concreto à penetração de cloretos

A difusividade dos cloretos é uma importante característica do concreto que afeta a durabilidade da estrutura. Esta propriedade é normalmente determinada através do uso de células de difusão ou pela imersão em soluções salinas (normalmente com concentrações de NaCl semelhantes as encontradas nas águas marinhas). No entanto, estas técnicas demandam muito tempo, meses ou até mesmo anos, para serem concluídas. Dentre os ensaios que fazem uso desta técnica estão:

- **AASHTO T259: Standard Method of Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration (Salt Ponding Test)**: após determinados prazos de cura e pré-condicionamentos, as amostras (>75 mm de espessura) tem uma das suas faces expostas por 90 dias a uma solução de cloreto de 3% de NaCl, e após é medida a concentração de cloretos em cada fatia de 0,5 polegadas (1,27 cm).

- **Bulk Diffusion Test (NordTest NTBuild 443)**: é um ensaio semelhante ao AASHTO T259, com algumas modificações, como por exemplo, antes de ser colocado em contato com a solução, a amostra é saturada com água de cal, segundo Stanish (1997) para evitar uma sorção inicial, além de serem seladas as

laterais e uma das faces, deixando a outra em contato com uma solução 2,8 M NaCl.

- **Soaking Test (EPCI – Ensaio de penetração de cloretos por imersão)**: também é um ensaio baseado na AASHTO T259, relatado por Wee et al. (2000). As amostras são submetidas a determinados tempos de cura, e após, imersas em solução de NaCl (com concentração de Cl^- de 19,38 ppm). Nos prazos determinados (até 90 dias) os corpos-de-prova são retirados do tanque e aspergidos com uma solução de $AgNO_3$, determinando a profundidade de penetração dos íons cloretos.

Em razão dos grandes prazos necessários, devido principalmente a longos tempos de pré-condicionamento e mais um período para execução do ensaio (normalmente 90 dias), pesquisadores desenvolveram métodos acelerados. Como exemplo, pode ser citado o "ASTM C1202-05 – Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Íon Penetration", também conhecido por "The Rapid Chloride Penetration Test – RCPT). O ensaio AASHTO T277, segue a mesma seqüência, com a diferença de que a normalização da ASTM afirma que este ensaio é aplicável apenas para concretos em que correlações, entre ele e o procedimento da AASHTO T259, são estabelecidas. Já o ensaio AASHTO T277 não faz referência ao assunto. Dentre os ensaios acelerados estão:

- **AASHTO T277 ou ASTM C1202: Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration (Rapid Chloride Permeability Test - RCPT)**: amostras, com suas faces expostas, uma a solução de NaCl e a outra a solução de NaOH, são submetidas a uma diferença de potencial de 60V, durante um período de 6 horas, no qual é realizado um monitoramento da corrente passante, em intervalos de 30 minutos. Após é calculado o total de corrente passante.

- **Modificações da ASTM C1202**: alguns pesquisadores, buscando anular alguns efeitos negativos do processo original, como por exemplo, o aumento da temperatura no transcorrer do ensaio, fizeram adaptações na metodologia da ASTM. Entre estes procedimentos podem ser citados Andrade et al. (1999) que diminuíram, em algumas amostras, a diferença de potencial para 12V a partir dos 30 minutos de ensaio.

- **Outros ensaios**: Stanish et al. (1997) faz uma vasta revisão de literatura sobre avaliação da penetração de cloretos, e cita outros ensaios acelerados, como o "Teste de Migração Rápida" [The Rapid Migration Test, proposto por Tang e Nilsson (1991)], ensaios por técnicas de resistividade, penetração por pressão, métodos indiretos (como permeabilidade de líquidos e gases) e absorção.

Em se tratando do método ASTM C1202, apesar da rapidez com que são atingidos os resultados, está gerando algumas dúvidas quanto a sua validade. A principal crítica é de que as severas condições de ensaio podem levar a mudanças físicas e químicas na amostra, resultando em valores irreais (FELDMAN et al, 1999). Outra característica deste ensaio é a de ser, incontestavelmente, uma medida de resistividade elétrica (JULIO-BETANCOURT & HOOTON, 2004). Grace (2006) também salienta o fato do ensaio não medir a resistência à penetração dos íons cloreto, mas sim a resistividade do concreto, além de recordar que não representa uma situação real, pois não há condição em que o concreto seja exposto a uma diferença de potencial de 60V.

Dentro desta mentalidade Shi et al. (1998) afirmam não ser correta a utilização do ensaio de carga passante, especificado pela AASHTO T277 ou ASTM C1202, para avaliar a penetração rápida de cloretos em concretos com uso de materiais cimentícios suplementares. A explicação para este fato seria de que estes materiais causariam reduções na condutividade elétrica em mais de 90%, devido modificações na composição da solução dos poros, fator que tem pouca influencia no transporte de íons cloretos no concreto. Da mesma forma, Wee et al. (2000) demonstram ser irreal a aplicação do RCPT para avaliar a resistência a penetração de cloretos em concretos contendo adições minerais como sílica ativa e escória de alto-forno.

Saciloto (2005), em pesquisa utilizando diferentes adições minerais (cinza volante, cinza de casca de arroz e escória de alto-forno), e comparando resultados do RCPT e EPCI, conclui que o ensaio da ASTM C1202 fornece resultados irreais, quando são analisados concretos com diferentes tipos de aglomerantes. Isto foi comprovado, pois misturas que apresentaram igual coeficiente de difusão, pertenciam a diferentes classes de penetração de cloretos segundo a ASTM C1202.

Outros problemas são relatados quanto ao uso do RPTC. Julio-Betancourt & Hooton (2004) relatam sobre o considerável aumento da temperatura durante o ensaio (Efeito Joule), e suas conseqüências. A elevação da temperatura ocasiona um aumento na mobilidade de todos os íons que transmitem a corrente, os quais, devido a um acréscimo do fluxo de corrente, causam um maior aquecimento, tornando-se assim, um processo cíclico.

Apesar das controvérsias, Shi (2004) conclui que o ASTM C1202 pode ser considerado válido para situações de controle de parâmetros de qualidade quando feito para concretos com mesmos componentes e proporções de mistura.

Nesta pesquisa, para avaliação da penetração dos íons cloretos foram selecionados os ensaios ASTM C1202, utilizando principalmente para fins de comparação entre as diversas misturas, conjuntamente com o Ensaio de Penetração de Cloretos por Imersão (EPCI). A escolha destes experimentos, feita de acordo com facilidades de execução e reprodutibilidade, teve como objetivos correlacionar estas duas metodologias, uma representando uma situação próxima a real e outra de uma previsão acelerada, avaliar as modificações causadas em cada mistura devido aos diferentes prazos de cura, e ajustar equações que possam representar o comportamento de cada mistura estudada. Por essa razão, estes dois procedimentos serão melhor descritos e analisados no **capítulo 5**.

3.5. Solução dos poros e condutividade elétrica

Solução dos poros é a denominação dada à água livre existente no interior das estruturas de concreto. É uma solução rica em íons dissolvidos, sendo seus teores, função do tipo de cimento utilizado, relação a/ag, grau de hidratação do cimento, presença de adições minerais e interações com o meio ambiente.

Um fator extremamente relevante no processo de corrosão das armaduras é a composição da solução dos poros. Isto se explica por esta ter função fundamental nos processos de formação e manutenção da camada passivadora, através de um pH elevado (com valores normalmente entre 12,5 e 13,5), e também, por influenciar diretamente a velocidade das reações de corrosão, por meio da sua condutividade elétrica. Para o melhor entendimento da sua atuação nos processos referentes à durabilidade das estruturas de concreto, torna-se imprescindível conhecer, portanto, os principais íons dissolvidos na solução, o seu pH e sua condutividade específica.

O primeiro passo para a caracterização da solução dos poros de uma amostra é a obtenção desta. Diversas são as formas de extração descritas na literatura, entre elas, as mais difundidas são: através da aplicação de carga, em um corpo-de-prova cilíndrico, confinado em câmara especial (LONGUET et al., 1973), porém em alguns casos, além de exigir-se cargas muito elevadas, o conteúdo de solução é baixo, impossibilitando sua análise (OLIVEIRA,

2000; MISSAU, 2004); um segundo método, chamado "lixiviação *in situ*" ou água de equilíbrio, descrito por Sagüés et al. (1997) e utilizado por Oliveira (2000), consiste em realizar pequenos furos na amostra e introduzir volumes reduzidos de água, deixando-se esta entrar em equilíbrio com a solução dos poros; outro método, descrito por Missau (2004), e semelhante ao utilizado por Xi et al. (1997), compreende a extração de pó de uma amostra, o qual é colocado em suspensão em água deionizada até estabilização do pH, sendo em seguida filtrada e submetida à análise química. O grande problema relatado por Xi et al. (1997), em relação ao último método, é que ocorre o efeito da diluição, dissolução e hidratação dos grãos anidros de cimento expostos durante a moagem.

Analisando a solução aquosa frente à ação dos íons cloretos, percebe-se que, normalmente, a composição desta solução pouco influencia a penetração dos íons no concreto, mas sim, a ocorrência das reações de corrosão. Segundo Shi et al. (1998) o transporte dos íons no concreto endurecido depende basicamente das características da estrutura de poros. Apesar disso, o ensaio descrito pela ASTM C1202-05 é propriamente uma medida de condutividade elétrica, sendo influenciado, também, pela composição da solução dos poros. Wee et al. (2000) relatam que, dependendo do tipo de ensaio, visando a caracterização do concreto frente aos íons cloreto, os resultados são controlados por fatores diferentes, podendo, principalmente no caso do uso de adições minerais, gerar dados não correlacionáveis.

São destacados os casos de utilização de adições minerais, pois estas causam grandes alterações na solução dos poros, influenciando drasticamente os ensaios dependentes da passagem de corrente elétrica. Shi et al. (1998) citam que substituições de 60% a 70% de cimento Portland por escória de alto-forno causam consideráveis reduções no teor de OH^- na solução dos poros, mas não ocasionam grandes modificações no pH. Mencionam também, que a presença da escória aumenta a concentração da Na^+ e decresce o conteúdo de K^+ presente na solução.

As diferenças nas formas de avaliação do concreto na questão dos íons cloreto podem ser claramente observadas quando são feitas comparações entre o ensaio acelerado, descrito pela ASTM C1202-05 (o qual possui forte dependência da microestrutura e da condutividade da solução aquosa) e o ensaio de penetração de cloretos por imersão – EPCI (influenciado pela microestrutura e pela capacidade de fixação dos íons no interior da pasta) (WEE et al., 2000). A divergência entre os resultados destes dois ensaios são observadas por Schneider (2005), pesquisando a substituição de cimento por escória. O autor encontrou forte correlação entre a porosimetria por intrusão de mercúrio e o EPCI, mas relações muito baixas quando

comparados com o ensaio acelerado. Este, no entanto, mostrou-se intimamente relacionado com os resultados de condutividade elétrica. No caso do ensaio acelerado, Feldman et al. (1999), utilizando diferentes combinações de cimento Portland, escória e sílica ativa, reafirma estas conclusões, relatando fortes correlações com a condutividade específica da solução dos poros. Shi (2004) finaliza concluindo que a condutividade elétrica não pode ser utilizada para medir a resistência à penetração dos íons cloreto de um concreto, servindo apenas como um indicador de qualidade, quando moldados concretos com mesmos componentes e proporções de mistura.

4. CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND BRANCO ESTRUTURAL

4.1. Introdução

Um grande apelo estético, principalmente por parte dos arquitetos, está causando variadas transformações na tecnologia da construção. Uma parte destas mudanças está ligada, intimamente, com monotonia clássica do concreto aparente. Sua coloração acinzentada, com forte tendência ao preto, muitas vezes encoberta pelos mais diversos tipos de revestimentos, está sendo substituída pelo colorido, alcançado, normalmente, à base de corantes, e pela alvura do concreto produzido com cimento Portland branco.

Quando o objetivo é obtenção do concreto colorido, existem algumas ressalvas sobre o assunto. Primeiramente, a utilização de pigmentos em concretos com cimentos comuns é limitada a colorações escuras. Em contrapartida, segundo Aguiar (2006), a possibilidade de produção de concretos cromáticos é ampliada com a utilização do cimento Portland Branco (CPB) estrutural, pois com ele, se consegue uma melhor reprodução das cores dos pigmentos (PASSUELO, 2004). Outro aspecto interessante é que o uso de pigmentos normalmente prejudica a trabalhabilidade e também a resistência do concreto, tanto quando utilizado o cimento cinza como o branco (AGUIAR, 2006; ALENCAR, 2005), devendo-se sempre haver correções nos traços originais. Em decorrência das mudanças de traço, incluindo a adição do pigmento e o rigoroso controle tecnológico, buscando além do atendimento em resistência e durabilidade, também colorimétrico, a opção do concreto colorido torna-se expressivamente mais caro que o concreto convencional (PASSUELO, 2004).

O concreto de cimento Portland branco possui algumas particularidades, como por exemplo, necessidade de grandes cuidados com a execução, devido a possibilidade do aparecimento de manchas, decorrentes principalmente de ferrugens, resultado que colocaria em risco todo o aprimoramento estético buscado. O concreto de cimento Portland Branco tem sido utilizado, atualmente, tanto no Brasil como no resto do mundo. Alguns exemplos de obras que fizeram uso deste material são: Museu Iberê Camargo (RS) (Figura 4.1), Prédio da Flextronics (SP) (Figura 4.2), Auditório de Tenerife (Espanha) (Figura 4.3), Centro Empresarial Rio Negro (SP) (Figura 4.4), Ponte Irineu Bornhausen (SC) (Figura 4.5) e o

Lótus Temple (Índia) (Figura 4.6), entre outros tantos que já foram construídos ou estão em fase de projeto ou execução.

Figura 4.1 - Museu Iberê Camargo, Porto Alegre/RS
Fonte: www.vitruvius.com.br

Figura 4.4 – Centro Emp. Rio Negro, Barueri/SP
Fonte: www.arcoweb.com.br

Figura 4.2 – Flextronics, Sorocaba/SP
Fonte: http://www.abcp.org.br

Figura 4.5 – Ponte Irineu Bornhausen, Brusque/SC
Fonte: www.comunidadedaconstrucao.com.br

Figura 4.3 – Auditório de Tenerife, Tenerife/Espanha
Fonte: www.aia.org.br

Figura 4.6 – Lótus Temple, Nova Délhi/Índia
Fonte: www.alovelyworld.com

Ao visualizar estas imagens, podemos entender o porquê, construções de concreto aparente, composto com CPB, estão sendo tão difundidas na comunidade da construção. São estruturas normalmente de audacioso projeto arquitetônico, nas quais a combinação com o concreto branco torna a estrutura distinta e de beleza inigualável.

Em decorrência das suas diferenças com o cimento Portland cinza, tanto de caráter físico quanto químico, e de ser o ponto de interesse desta pesquisa, o CPB terá uma abordagem mais aprofundada a seguir.

4.2. Concreto de Cimento Portland Branco

O cimento Portland branco é considerado um material diferenciado do cimento Portland comum, e devido a isso, dentro da normalização brasileira, é regulamentado separadamente. As normas brasileiras que se referem exclusivamente ao CPB são a NBR 12989/1993- Cimento Portland Branco, e a NBR NM 03/2000- Cimento Portland Branco – Determinação da Brancura. A primeira refere-se a algumas considerações gerais, limitações de componentes, e algumas exigências químicas, físicas e mecânicas. A segunda determina o método para determinação da brancura, através do fator de reflectância luminosa. A NBR12989/1993 define que cimentos Portland brancos são aglomerantes hidráulicos constituídos de clínquer Portland branco, uma ou mais formas de sulfato de cálcio e adições, que são materiais carbonáticos finamente divididos, composto em sua maior parte de carbonato de cálcio e/ou carbonato de cálcio e magnésio.

Uma das características interessantes é que a NBR 12989 permite a presença de um alto grau de materiais carbonáticos (fíler), podendo chegar a um teor de até 25% no cimento branco estrutural (Tabela 4.1). Outras características mínimas requeridas para a classificação dos cimentos Portland Brancos, podem ser ilustradas na Tabela 4.2 e Tabela 4.3.

Tabela 4.1 – Teores dos componentes dos cimentos Portland brancos

Denominação	Classe	Componentes (% em massa)	
		Clínquer Branco + sulfatos de cálcio	Materiais Carbonáticos
Cimento Portland branco estrutural	25 32 40	100 - 75	0 - 25
Cimento Portland branco não-estrutural	-	74 - 50	26 - 50

Fonte: ABNT- NBR 12989/1993

Tabela 4.2 – Exigências químicas do CPB

Determinações químicas	Limites (% em massa)			
	CPB-25	CPB-32	CPB-40	CPB*
Resíduo Insolúvel (RI)	- 3,5			- 7,0
Perda ao Fogo (PF)	- 12,0			- 27,0
Óxido de Magnésio (MgO)	- 6,5			- 10,0
Trióxido de enxofre (SO_3)	- 4,0			- 4,0
Anidrido Carbônico (CO_2)	- 11,0			- 25,0

* CPB não estrutural **Fonte: ABNT- NBR 12989/1993**

Tabela 4.3 – Exigências físicas e mecânicas do CPB

Características e propriedades		Unidade	Limites (% em massa)			
			CPB-25	CPB-32	CPB-40	CPB*
Resíduo na peneira 45 µm		%	- 12,0			-12,0
Tempo de início de pega		h	- 1			- 1
Expansibilidade a quente		mm	- 5			- 5
Resistência à Compressão	3 dias 7 dias 28 dias	MPa	- 8,0 - 15,0 - 25,0	- 10,0 - 20,0 - 32,0	- 15,0 - 25,0 - 40,0	- 5 - 7 - 10
Brancura		%	- 78			- 82

* CPB não estrutural **Fonte: ABNT- NBR 12989/1993**

Quando são feitas comparações entre o CPB e o cimento Portland comum, logo nas características físicas já são encontradas diferenças significantes. O CPB possui, normalmente, maior finura e área específica, que o leva consequentemente a ser mais reativo, e ter um menor tempo de início e fim de pega (FONSECA e NUNES, 1998). Outra significância relatada pelo autor, é que o gesso utilizado na fabricação deste, é necessariamente branco, e quase sempre na forma desidratada, diminuindo sua eficiência como regulador de pega, agravando ainda mais este comportamento. Hamad (1994) ainda cita como fator para um menor tempo de início de pega do cimento branco, a maior porcentagem de C_3A, composto mais reativo do cimento, e menor taxa de C_4AF, composto menos reativo.

A diferença de coloração entre os cimentos é reflexo da sua composição química e das condições de fabricação (PCA, 1999). Em relação à composição química, a alteração é explicada, pois a presença de ferro, ou de pequenas quantidades de manganês, cromo e vanádio causam modificações na cromaticidade final do produto (HAMAD, 1994; PCA, 1999). Macphee et al. (2007) relatam que, normalmente, é a inevitável presença do ferro a responsável pela típica coloração amarelada dos cimentos Portland brancos, e que esta coloração e intensidade irá variar com a quantidade e condição química deste ferro. Na fabricação do CPB deve-se tomar cuidado durante o processo de queima, com o tipo de combustível utilizado, optando sempre por gás ou óleo, ao invés do carvão pulverizado, evitando a contaminação com a cinza do carvão. Já na moagem, a utilização de moinhos especiais de bolas revestidos com cerâmica, e bolas cerâmicas para triturar a mistura de matéria-prima, é indispensável para uma boa qualidade da brancura final (HAMAD, 1994; MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Benitez et al. (2002) em estudo comparativo entre cimentos branco e cinza concluíram que ambos podem ser utilizados em igualdade de condições e que para alcançar um mesmo abatimento, o cimento branco requer uma quantidade menor de água. A Tabela 4.4 demonstra os resultados de resistência à compressão, com as ressalvas dos autores, de que estes valores tornam-se comparáveis, devido que nesta situação a consistência foi ajustada pela quantidade de água e recordando então que, o concreto de cimento branco possui uma relação a/ag sensivelmente menor.

Tabela 4.4 – Comparação da Resistência à compressão de concretos de cimento cinza e cimento branco.

Ensaio		**Concreto de cimento branco**	**Concreto de cimento cinza**
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	45,4 ± 0,1	37,7 ± 0,6
	7 dias	56,0 ± 1,2	47,9 ± 0,6
	28 dias	60,0 ± 3,9	53,4 ± 2,7

Fonte: Benitez et al. (2002)

Em pesquisa comparando os cimentos CPI-32 e CPB-32, Mattos & Dal Molin (2003) concluíram (Tabela 4.5) que a substituição do CPI pelo CPB ocasionou um aumento da resistência à compressão aos 28 dias, além de reduções na taxa de absorção capilar e

resistência à penetração dos íons cloretos. A explicação para estes acontecimentos seria a adição de fíler calcário no CPB. A Tabela 4.5 demonstra os valores obtidos pelos autores nos ensaios de módulo de elasticidade, os quais concluem que o CPB não exerce influência nesta propriedade.

Tabela 4.5 – Resistência à compressão e módulo de elasticidade, aos 28 dias, dos concretos empregados (CPV x CPB)

Relação a/ag	Tipo de cimento	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	
			experimental	segundo a NBR 8522 (1984)
0,40	CP I	42,46	35	31
0,50	CP I	40,70	29	30
0,60	CP I	28,64	25	25
0,40	CPB	50,72	39	36
0,50	CPB	45,71	35	33
0,60	CPB	33,44	37	27

Fonte: Mattos e Dal Molin (2003)

Outra pesquisa comparando taxas de absorção capilar em concretos com CPB e com cimento cinza, sendo testados três tipos de CPB e um CPV-ARI, foi feita por Silva et al. (2005), constatando que para relações a/ag iguais a 0,4 e 0,5, concretos feitos com CPV-ARI apresentaram menores taxas de absorção capilar, e em todas as relações a/ag estudadas (0,4; 0,5 e 0,6) o concreto com cimento cinza obteve maior resultado de resistência à compressão aos 28 dias.

Contrariando os resultados de Silva et al. (2005), Andrade & Nobre (2005), em similar estudo comparativo entre CPB e CPV-ARI, e utilizando as mesmas relações a/ag, obtiveram resultados diferentes, creditado ao concreto produzido com CPB, as menores taxa de absorção capilar e maiores resistências à compressão aos 28 dias. Justificam estes resultados através das adições de fíler calcário no CPB, o qual ocasiona um refinamento e preenchimento dos poros, tornando a pasta de cimento mais densa e homogênea. Kirchheim (2003) compara, da mesma forma, concretos de CPB e CPV, tendo como resultados de compressão (Tabela 4.6) que para a maior parte das misturas e idades de ruptura, exceto para relações a/ag 0,40 e na idade de 28 dias, os concretos compostos com CPV apresentaram valores superiores. Apesar disto o pesquisador afirma que, como as variações são inferiores a 10%, os concretos de CPB possuem comportamentos similares aos concretos de referência (CPV).

Investigação semelhante foi feita por Barbosa et al. (2005), confrontando resultados de concretos compostos com CPII-Z-32-RS e CPB-40. Foi concluído que para altos consumos de cimento (>500 Kg/m³), o tipo de cimento não tem grande influência na resistência à compressão aos 28 dias, mas nas idades iniciais, os resultados para o CPB são significativamente melhores, com ganhos de resistência até 20% superiores. Já para consumos inferiores a 400 Kg/m³, o efeito benéfico do cimento branco é incontestável. No caso da capilaridade por absorção, o cimento cinza teve melhor desempenho.

Tabela 4.6 – Valores médios observados na resistência à compressão (CPV x CPB).

Ensaio	Idade	a/ag	Tipo de Cimento				
			CPV	CPB1	CPB2	CPB3	CPB4
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	0,4	38,57	30,61	33,04	35,46	34,07
		0,5	26,93	22,27	23,14	23,94	19,89
		0,6	18,99	14,92	14,83	16,34	14,06
	14 dias	0,4	41,12	37,08	41,52	42,84	45,59
		0,5	33,76	29,46	29,51	32,89	29,13
		0,6	26,04	22,50	23,34	23,94	21,30
	28 dias	0,4	43,45	37,97	45,87	45,31	45,22
		0,5	33,84	32,40	32,31	33,25	33,20
		0,6	27,16	24,29	24,44	26,52	23,96

Fonte: Kirchheim (2003)

Vieira & Dal Molin (2005), estudando a resistividade elétrica do concreto, desenvolveram a pesquisa comparando cinco tipos de cimento (um CPV-ARI e quatro do tipo CPB). Constataram ao final, que a utilização do CPB ao invés do CPV é benéfica, aumentando a resistividade, e teoricamente, melhorando o desempenho frente à corrosão das armaduras.

Sycheva & Ostapchuk (2003) relatam que um dos problemas do CPB é a alta quantidade de C_3A. Isto porque os compostos hidratados deste, no caso de ambientes que contenham SO_4^{-2}, reagem com os sulfatos e formam quantidades adicionais de etringita, destruindo a estrutura da pasta de cimento e diminuindo a sua resistência (TAYLOR, 1990 apud SYCHEVA & OSTAPCHUK, 2003). Devido a isso, foram produzidos cimentos brancos com baixo teor de C_3A, e comprovadas a possibilidade de sua obtenção e eficiência como cimento estrutural.

A partir das considerações feitas no transcorrer deste capítulo, e devido ao grande número de incógnitas que envolvem o projeto e vida útil das estruturas de concreto, torna-se imprescindível um aprofundamento no estudo, decorrendo numa melhor compreensão do

comportamento químico, físico e mecânico dos materiais compostos por CPB (pastas, argamassas e concretos), e, por conseguinte, seus efeitos frente à ação de agentes agressivos.

4.3. Uso de adições minerais

Sempre que se pensa em estruturas de concreto armado, uma das principais preocupações iniciais é quanto aos aspectos de durabilidade, ou melhor, quanto à sua vida útil. Sendo as ferragens embutidas no concreto um grande alvo da corrosão e por fim responsáveis por inúmeros casos de colapsos de estruturas, cabe aos pesquisadores encontrarem meios de diminuir, ao máximo, os efeitos do meio ambiente sobre esses elementos. Os principais desencadeadores da corrosão das armaduras do concreto são os íons cloreto e a carbonatação, os quais têm sua possibilidade de atuação intimamente ligada à composição química da pasta de cimento, referente à solução aquosa dos poros e aos diferentes compostos formados pela hidratação do aglomerante, além de propriedades como porosidade, compreendendo o número, tamanho e distribuição dos poros, e capilaridade, ou seja, a comunicabilidade dos poros deste concreto.

Uma das ferramentas mais difundidas e pesquisadas, visando melhorar o comportamento do concreto armado, é o uso de adições minerais. Mehta & Monteiro (1994) definem adições minerais como sendo materiais silicosos, finamente moídos, adicionados ao concreto em quantidades relativamente grandes, geralmente na faixa de 20 a 100% da massa de cimento Portland. Estes elementos, também chamados de "Materiais Cimentícios Suplementares", são classificados em pozolânicos, quando não ganham resistência pelo contato com água; cimentícios, que ganham resistência quando misturados com água, e pozolânicos e cimentícios, quando incluem as duas propriedades. (MEHTA & MONTEIRO, 1994; SFA, 2005). O uso de certas adições nas misturas de concreto é comprovadamente favorável ao desenvolvimento da resistência e melhoria da durabilidade (PASSUELO, 2004).

Dentre as diversas adições minerais utilizadas, as mais pesquisadas e usuais são: escória de alto-forno, sílica ativa, metacaulim, cinza de cascas de arroz e cinza volante. Pelo fato de serem resíduos de outras indústrias são adicionadas ao concreto, em substituição ao cimento, com três aspectos distintos: primeiro por causarem, indiscutivelmente uma mudança, normalmente benéfica, nas propriedades físico-químicas da pasta, segundo por estarem intimamente ligadas com a questão de preservação ambiental, seja pelo menor consumo de

cimento, o qual tem em seu processo de fabricação grande fonte de emissão de CO_2 na atmosfera, ou por assim, ser dada uma destinação não-poluente a estes subprodutos, e terceiro, por serem, habitualmente, de menor custo que o cimento Portland, havendo assim, um benefício financeiro.

Analisando a possibilidade do uso de adições em conjunto com o CPB é importante observar a afirmação de Fonseca & Nunes (1998) de que a coloração final do concreto é fortemente correlacionada com fração fina da mistura. Com isso, torna-se imprescindível o cuidado com o tipo de adição utilizada, principalmente no caso dos fíleres.

Em relação à cinza volante, a norma inglesa BS EM 201-1/BS 8500 (BCA, 2000) em capítulo que fala sobre concretos coloridos, proíbe a utilização desta adição, ou de cimentos que a contenham, em concretos com esta designação, a menos que o produtor possa garantir que isso não causará variações na coloração. Isso se explica pelo fato de que qualquer alteração durante o processo de obtenção da cinza pode acarretar um efeito significativo na cor. No caso do concreto branco, além do problema acima citado, existe também o problema da coloração normalmente escurecida desta adição, prejudicando a tonalidade final da peça a ser moldada. Da mesma forma, a cinza de casca de arroz, o qual possui um efeito de escurecimento ainda mais intenso, torna-se inviável para este fim.

Duas opções válidas para o estudo dos concretos brancos são a utilização do metacaulim e da sílica ativa, com a desvantagem de serem adições relativamente caras e com teores ótimos de substituição relativamente baixos, cerca de 15% (COURARD, 2003) a 20% (WILD et al., 1996) para o metacaulim e teores entre 5% e 10% (AÏTCIN, 2000; BHANJA & SENGUPTA, 2005; BEHNOOD & ZIARI, 2007) para a sílica ativa. Além disso, quanto ao metacaulim deve ser levado em conta o processo de sua obtenção, pois dependendo do tipo, pode render coloração diferenciada. Segundo Passuelo (2004), quando a origem é a calcinação da argila caulinítica, a tonalidade do produto final é rosa intenso, porém, quando é oriundo da calcinação de rejeitos da indústria do papel, apresenta tonalidade extremamente clara, sendo mais recomendável. No caso da sílica ativa, existe uma grande variação de tonalidades, que vai do cinza claro ao escuro, dependendo do teor de carbono. Tanto mais escura será, quanto maior o teor de carbono (LARRARD et al., 1992 apud DELLA et al., 2006). Deve-se, portanto, ter muito cuidado no momento da especificação destes materiais.

Passuelo (2004) confeccionou pastilhas colorimétricas prensadas de cimento, sílica ativa e metacaulim, a fim de se ter idéia dos parâmetros cromáticos de cada material. O resultado pode ser visto na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Pastilhas de metacaulim, sílica ativa e cimento branco, respectivamente, utilizadas para leituras colorimétricas (PASSUELO, 2004)

A escória de alto-forno por sua vez torna-se uma alternativa interessante, devido a sua coloração esbranquiçada, o baixo custo e também a possibilidade de grandes taxas de substituição em relação ao cimento, podendo dar assim condições técnico-financeiras altamente favoráveis para uma maior utilização e difusão do concreto de cimento Portland branco.

4.4. Escória granulada de alto-forno

A escória de alto forno é um subproduto da produção do ferro-gusa. Todas as impurezas contidas no minério de ferro e no coque passam para a escória e, devido a utilização de agentes fundentes, a composição química resultante fica bem definida num diagrama de fases SiO_2 – CaO – Al_2O_3. Segundo ACI 233R-03, normalmente, sílica, cálcio, alumínio, magnésio e oxigênio, constituem 95%, ou mais, da escória. Como a massa específica da escória é muito menor que a do ferro-gusa, cerca de, respectivamente, 2,8 g/cm³ e 7,0 g/cm³, a escória derretida flutua no topo do ferro-gusa também derretido, e pode ser drenada separadamente (AÏTCIN, 2000). Quando esta escória líquida é resfriada bruscamente com água, ou uma combinação água-ar, a maior parte da cal, magnésia, sílica, e alumina são mantidas em estado não-cristalino ou vítreo, e estes produtos, quando moídos até finuras de 400 a 500 m²/kg, desenvolvem propriedades cimentantes satisfatórias (MEHTA & MONTEIRO, 1994). Fu et al. (2000) descrevem que a atividade da escória é determinada pela quantidade e propriedades do material vítreo amorfo, além da sua composição química. Uma

característica interessante do ponto de vista químico, é que a escória possui uma composição muito constante, pois qualquer desvio dela, traduz-se em demandas significativas de energia e custos adicionais (AÏTCIN, 2000).

Dentre as diversas adições minerais, a normalização inglesa, BS EN 201-1/BS 8500 (BCA, 2000), recomenda, para a prática do concreto colorido, a utilização da escória de alto forno. Esta, podendo ser misturada diretamente com cimento puro (CEM I, correspondente ao CPI da NBR 5732), ou utilizada por meio de cimentos de escória (CEM III, correspondente ao CPIII, segundo a NBR5735, com a diferença da norma inglesa permitir teores de até 95% de escória). Além da normalização inglesa, o PCA (1999) também aconselha o uso da escória na composição do concreto branco. Apesar disso, poucas pesquisas, que busquem comprovar uma boa relação entre a escória de alto forno e o cimento Portland branco, são encontradas.

Um dos problemas que podem ser mencionados no caso do concreto com escória, principalmente quando em conjunto com o concreto branco, é a presença de uma coloração inicialmente azulada, a qual é explicada por Neville (1997) sendo função das reações do sulfeto de ferro presente na escória. Porém, com o passar do tempo, ocorre a oxidação do sulfeto e o concreto volta a sua cor original.

Gao et al. (2005) relatam que substituição parcial de escória, no lugar do Cimento Portland cinza, pode provocar no concreto uma melhoria na fluidez quando no estado fresco, reduz a exsudação e proporciona maiores tempos de pega. Da mesma forma, Oner & Akyuz (2007) concluem que quando a relação a/ag é levada em conta, com o aumento do conteúdo de escória, ocorre uma diminuição da relação a/ag para se conseguir uma mesma trabalhabilidade, ou seja, o seu uso ocasiona efeitos positivos nesta propriedade. Wainwright & Rey (2000) relatam que adições em níveis de 55% e 85% podem resultar em aumentos de trabalhabilidade que elevem o abatimento de 15 mm (para o concreto sem escória), para valores entre 20 e 40 mm nas misturas com escória. Saeki & Monteiro (2005) citam que, além da melhoria de fluidez do concreto fresco, a escória atua na redução do calor de hidratação e ajuda a controlar a reação álcali-sílica, característica estudada por Kwon (2005) que afirma que substituições de 30% inibem estas reações, devido à redução alcalina.

Lee et al. (2006) analisaram o efeito da escória, em teores de substituição do cimento Portland cinza de 0%, 30% e 50%, em concreto com relação a/ag entre 0,27 a 0,42, na questão da retração autógena. Suas conclusões foram que o uso da escória aumenta a taxa de retração autógena, bem como, numa mesma relação a/ag, quanto maior a substituição, também maior a retração. As explicações para isso seriam o aumento da retração química, existência de uma estrutura de poros mais fina e a forma das partículas da escória. FHWA (1999) alerta que

devido ao aumento do tempo de pega e a reduzida taxa de ganho de resistência, concretos contendo escória são mais susceptíveis à fissuração causada pela retração por secagem, devendo-se ter maiores cuidados com a cura. O ACI 233R-03 relata que de uma forma geral, as informações publicadas sugerem que, a retração por secagem é similar em concretos de cimento Portland puro e com adição de escória.

Segundo Gao et al. (2005) a reação pozolânica da escória começa nas idades iniciais, tornando-se mais discernível nas idades de cura entre 7 e 28 dias, sendo que, a velocidade das reações é diretamente proporcional a superfície específica da escória. Este mesmo autor afirma que o uso deste material provoca uma diminuição no tamanho dos cristais de $Ca(OH)_2$ presentes na zona de transição pasta-agregado, tornando a microestrutura desta região mais densa, possibilitando assim, realizar concretos de altas resistências com uma quantidade ótima de escória em substituição ao cimento.

Neste mesmo contexto, Oner & Akyuz (2007) concluem que as resistências iniciais de concretos com escória são menores do que as dos concretos de referência (contendo apenas CPI, e com mesma quantidade de aglomerante). Entretanto, como o período de cura é estendido, o aumento de resistência passa a ser maior para os concretos com esta adição. A razão para isso é que a reação pozolânica é lenta e a formação do hidróxido de cálcio requer tempo. Yeau & Kim (2005), estudando concretos com teores de substituição de 0%, 25%, 40% e 55%, também concluíram que quando a escória é adicionada, as resistências iniciais de compressão são menores, mas que após os 28 dias, todos os concretos com escória obtiveram resistências superiores aos de referência. Khatib & Hibbert (2005) estudaram substituições de 0%, 40%, 60% e 80% de escória, descrevendo uma diminuição sistemática da resistência inicial à compressão, de acordo com o aumento do conteúdo da adição. A partir dos 28, até os 91 dias de cura, a presença da escória foi benéfica nos teores de 40% e 60%, provocando resistências superiores ao concreto controle (sem adição), sendo reportada as menores resistências, em todas as idades, para substituições de 80%.

Em contrapartida Schneider (2005), em pesquisa utilizando substituições do CPV-ARI por 50% e 70% de escória, em relações a/ag de 0,35, 0,50 e 0,65, e com idades de ruptura de 3, 7, 28 e 91 dias, apesar das diferenças reduzirem de acordo com a elevação da idade, o concreto de referência (composto com 100% de CPV) obteve sempre resultados superiores. Outra observação que o autor faz é que, teores de 70% de substituição, não produziram concretos com resistência superior a 67% do concreto de referência em nenhuma das idades. Estes dados reforçariam a idéia de que quando utilizada, e visando maximizar a resistência, o teor ótimo de escória é cerca de 55% a 59% do total de aglomerante. Acima destes valores,

devido ao excesso do material, a escória pode não entrar em reação e se comportar como um inerte (ONER & AKYUZ, 2007).

Quando o assunto em questão é a agressividade dos íons cloreto, os resultados obtidos com esta adição normalmente são excelentes. Dhir et al. (2006) comentam sobre a capacidade de combinação dos íons cloreto em concretos contendo escória. Segundo os autores, pastas constituídas parcialmente por escórias, têm maior capacidade de fixação de cloretos do que pastas de cimento Portland puro e, de acordo com aumento do teor de escória, eleva-se também a taxa de combinação. Costa (2001) conclui que a utilização da escória ocasiona redução na penetração de cloretos, entretanto, quanto maior a finura desta, maior também será a corrente passante (ASTM C1202). O mesmo autor afirma que a alteração do teor de substituição de 35% para 70%, utilizando escórias de mesma finura, apesar de diminuir a resistência à compressão, diminui também a taxa de penetração de cloretos

Schneider (2005) conclui que concretos contendo apenas cimento Portland como aglomerante, apesar de atingirem resistências relativamente altas em todas as idades, necessitam de custo elevado (baixas relações a/ag) para atingirem resistência à penetração de cloretos, no máximo, comparáveis aos concretos com escória.

4.5. Ativação química da escória

Um dos fatores negativos, mais relevantes, nos concretos com grandes quantidades de escória de alto-forno é, certamente, ter uma evolução mais lenta de suas propriedades físicas quando comparados com concretos de cimento portland sem adição. Uma solução para este problema é a utilização de compostos alcalinos, normalmente com base em álcalis e sulfatos, como ativadores químicos. Sperb (2003) cita que estes ativadores têm o objetivo de acelerar as reações pozolânicas de forma a compensar as perdas iniciais de resistência e o aumento do tempo de pega nos concretos com adições minerais, sendo uma alternativa ao emprego de curas térmicas e do aumento da finura das adições, com a vantagem de não necessitar de equipamentos especiais e de maior dispêndio com recursos humanos.

John (1995) descreve como ativação da escória a aceleração do processo de dissolução desta, seguida da precipitação dos produtos hidratados. Dentre os diversos compostos que podem ser testados como ativadores da escória, alguns dos mais utilizados são cal hidratada ($Ca(OH)_2$), sulfato de sódio anidro (Na_2SO_4), sulfato de alumínio e potássio dodecaidratado

($KAl(SO_4)_2.12H_2O$), silicato de sódio ($NaSiO_3$, também conhecido por "waterglass"), hidróxido de sódio (NaOH), carbonato de sódio (Na_2CO_3), entre outros.

Brough & Atkinson (2002), em suas pesquisas, concluíram que a resistência de concretos com escória desenvolve-se rapidamente com a ativação por uma solução 1,5M de silicato de sódio, enquanto que, a utilização de KOH, em seu lugar, resulta em uma microestrutura mais heterogênea, com lento desenvolvimento de resistência e maior porosidade, tanto na pasta, como na zona interfacial.

Wu et al. (1990) pesquisaram o uso de sulfato de sódio e sulfato de alumínio e potássio, entendendo que, com o uso destes, as resistências iniciais à compressão são melhoradas, além de ocasionarem diminuição no tempo de pega. Os autores ressaltam que o uso em conjunto dos dois ativadores leva a resultados ainda melhores do que quando utilizados separadamente.

Dentre as diversas misturas estudadas por Sperb (2003) estavam uma de referência (100% CPV-ARI), e três contendo 70% de escória (uma sem uso de ativador, outra com 4% de Na_2SO_4, e finalizando, uma com 2% de Al_2SO_4). Nas suas conclusões ele destacou o Na_2SO_4 como sendo o ativador mais efetivo, tendo como resistência à compressão aos 7 dias valor 51% maior que o concreto com escória e sem ativador, e valores praticamente iguais ao concreto de referência.

Schneider (2005) analisando concretos com CPV-ARI, escória e ativador químico (Na_2SO_4), destaca a mistura contendo 50% de escória e 4% de ativador, indicando a grande potencialização da escória, na proteção contra a penetração de cloretos. Destacou também o efeito da ativação, quanto à resistência à compressão, relatando comportamento bastante similar à mistura utilizando CPV-ARI, sem adições.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. Introdução

Esta dissertação tem por objetivo avaliar o comportamento, frente à penetração de cloretos, de concretos compostos com grandes teores de escória de alto forno, utilizadas em substituição parcial do cimento Portland branco. Com esta finalidade foram realizados ensaios laboratoriais que, apesar de não representarem com fidelidade as condições de exposição e o comportamento reais das estruturas, indicam, de forma qualitativa, comparações entre as diferentes metodologias construtivas adotadas.

Para os diversos ensaios realizados foram testados 12 misturas diferentes de concretos. Primeiramente a mistura de referência, constituída de 100% de CPB como aglomerante, outras duas com substituições de 50% e 70% do total de CPB por escória, e por último uma mistura com substituição de 50% de escória e uma adição de 4% de ativador químico (Na_2SO_4). Cada mistura descrita acima foi subdividida em três, perfazendo três relações a/ag (0,30; 0,42; 0,55).

Com a função de analisar a penetração de cloretos, foram realizados dois ensaios. Um deles é o ensaio descrito pela normalização americana ASTM C1202/05 (também referenciado pela AASHTO T277). O outro, aqui denominado de EPCI, que tem por objetivo monitorar as profundidades de penetração dos íons cloreto em amostras com diferentes condições de cura e tempos de imersão em solução salina.

Além dos experimentos supracitados, foram também realizados ensaios de resistência à compressão, composição da solução aquosa dos poros, porosimetria e caracterização dos materiais. Este capítulo tem, portanto, como propósito, apresentar os materiais utilizados, através de composições químicas, físicas e granulométricas, expor os processos de fabricação, moldagem e cura do concreto, e sucintamente, descrever as metodologias dos ensaios adotados.

5.2. Caracterização dos Materiais

5.2.1.Cimento

O cimento utilizado foi o cimento Portland branco (CPB-40), de fabricação nacional e de acordo com a normalização referente, NBR 12989/1993. As caracterizações, física e química, do cimento são apresentada nas Tabelas 5.1 e 5.2, respectivamente.

Os ensaios foram realizados segundo as seguintes normalizações:

- NBR NM 23/01 – Cimento Portland – Determinação da massa específica;
- NBR NM 76/98 – Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método Blaine);
- NBR 11579/91 – Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 micrômetros (número 200);
- Análise química – NBR NM 10/04, 11-1/04, 11-2/04, 12/04, 13/04, 14/04, 15/2004, 16/04, 17/04, 18/04, 19/04, 21/04;
- NBR NM 43/2003 – Cimento Portland – Determinação da água da pasta de consistência normal;
- NBR NM 65/2003 – Cimento Portland – determinação do tempo de pega;

Tabela 5.1 – Caracterização física do cimento

Material	Massa específica (g/cm^3)	Área específica (Blaine)(cm^2/g)	Finura # 0,075 mm (%)
Cimento Portland branco	2,97	5070	0,29

Tabela 5.2 – Análise química do cimento e escória

Ensaio	Resultado (% em massa)	
	Cimento	Escória
Tempo de Início de Pega	1,4 hrs	-
Perda ao fogo - PF	11,60	0,00
Dióxido de silício – SiO_2	17,95	33,84
Òxido de alumínio – Al_2O_3	2,98	10,35
Óxido de ferro – Fe_2O_3	0,21	0,67
Óxido de cálcio - CaO	59,40	44,50
Óxido de magnésio - MgO	2,87	7,99
Anidrido sulfúrico – SO_3	3,09	-
Sulfeto - S	-	0,83
Óxido de sódio – Na_2O	0,43	0,20
Óxido de potássio – K_2O	0,36	0,40
Óxido de titânio – TiO_2	0,12	-
Pentóxido de fósforo – P_2O_5	0,14	-
Óxido de manganês – Mn_2O_3	0,02	-
Óxido de estrôncio - SrO	0,20	-

5.2.2.Escória granulada de alto forno

Foi utilizada escória de alto-forno, proveniente da indústria siderúrgica nacional, e moída unicamente pela própria empresa, sendo assim entregue e utilizada para este experimento. As caracterizações, química e física da escória, são apresentadas nas Tabelas 5.2 e 5.3, respectivamente.

Os ensaios foram realizados segundo as seguintes normalizações:

- NBR NM 23/01 – Cimento Portland – Determinação da massa específica;
- NBR NM 76/98 – Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método Blaine);

Tabela 5.3 – Caracterização física da escória

Material	Massa específica (g/cm³)	Área específica(Blaine) (cm²/g)
Escória de alto-forno	2,92	4090

5.2.3.Ativador químico

O ativador químico utilizado foi o sulfato de sódio (Na_2SO_4) em teor de 4% sobre a massa de aglomerante. Sua escolha foi baseada principalmente em trabalhos conduzidos pelo GEPECON/UFSM (Grupo de Estudos e Pesquisas em Concreto), onde Gomes (2003) e Sperb (2003) utilizaram, além de outras misturas e ativadores, a ativação química em concretos com escória (70%) e Na_2SO_4 (4%) encontrando bons resultados de resistência mecânica e durabilidade.

Utilizou-se sulfato de sódio comercial, ao invés do puro, por razões econômicas.

5.2.4. Características mecânicas dos aglomerantes

Foram utilizadas quatro composições básicas de aglomerantes. São elas:

- 100% cimento Portland branco;
- 50% cimento Portland branco + 50% escória de alto-forno;
- 50% cimento Portland branco + 50% escória de alto-forno + adição de 4% de Na_2SO_4;
- 30% cimento Portland branco + 70% escória de alto-forno.

Para cada mistura realizou-se a caracterização mecânica, em argamassa normal, de acordo com a NBR 7215. Os resultados podem ser observados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Caracterização mecânica dos aglomerantes

Idade de ensaio	Composição dos aglomerantes			
	100% CPB	50%CPB + 50% E	50%CPB + 50% E + 4% NaSO4	30%CPB + 70% E
3 dias	25,66 MPa	15,53 MPa	19,34 MPa	11,21 MPa
7 dias	29,45 MPa	24,59 MPa	32,47 MPa	20,29 MPa
28dias	42,90 MPa	35,13 MPa	45,08 MPa	30,39 MPa

Com o objetivo de melhor observar o comportamento das misturas com substituição de escória, a Figura 5.1 faz uma análise comparativa, tendo como base, a amostra com composição do aglomerante igual a 100% de cimento Portland branco.

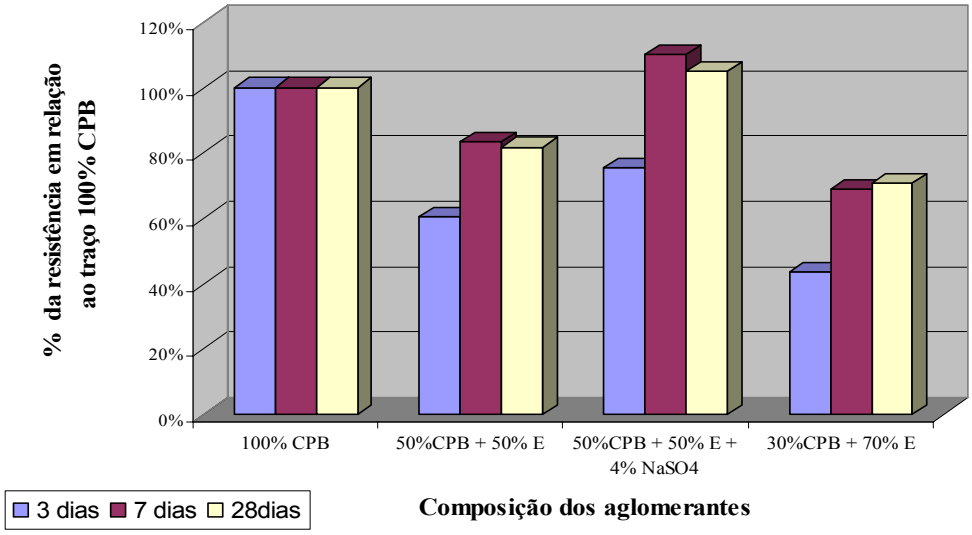

Figura 5.1 - Comparação das resistências das argamassas normais, compostas por diferentes aglomerantes, em relação à mistura de referência (100% CPB)

5.2.5. Agregados

Foi empregado como agregado miúdo areia natural, de origem quatzosa, proveniente do município de Santa Maria/RS. Esta areia foi previamente lavada, para remoção de possíveis contaminações de matéria orgânica e demais impurezas que interfiram do desempenho do concreto, seca em estufa a 105ºC para remoção da umidade, e peneirada na

peneira # 6,3 mm. As características físicas e granulométricas são apresentadas na Tabela 5.5 e Figura 5.2, respectivamente.

O agregado graúdo foi pedra britada, oriunda de rocha de origem diabásica, procedente do município de Itaara/RS. Realizou-se a lavagem deste material, para remoção de materiais que possam vir alterar o desempenho do concreto, e posterior secagem em estufa a 105ºC para remoção da umidade. Foi efetuado peneiramento e utilizado o material passante na peneira # 19 mm e retida na peneira # 6,3 mm. As características físicas e granulométricas são apresentadas na Tabela 5.5 e Figura 5.3, respectivamente.

Os ensaios foram realizados segundo as seguintes normalizações:

- NBR NM 26/2001: Agregados – Amostragem;
- NBR NM 52/03: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente;
- NBR NM 53/03: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água;
- NBR NM 248/03: Agregados - Determinação da composição granulométrica;
- NBR 7251/82 - Massa unitária solta;
- NBR 7809/06 - Índice de forma pelo método do paquímetro.

Tabela 5.5 – Caracterização física dos agregados

Propriedade	Agregado Graúdo	Agregado miúdo
Módulo de Finura	6,87	2,45
Dimensão máxima característica (mm)	19,0	4,75
Massa específica (kg/dm³)	2,63	2,63
Massa unitária (kg/dm³)	1,4	1,66
Índice de forma	2,41	-
Absorção de água (%)	2,7	-

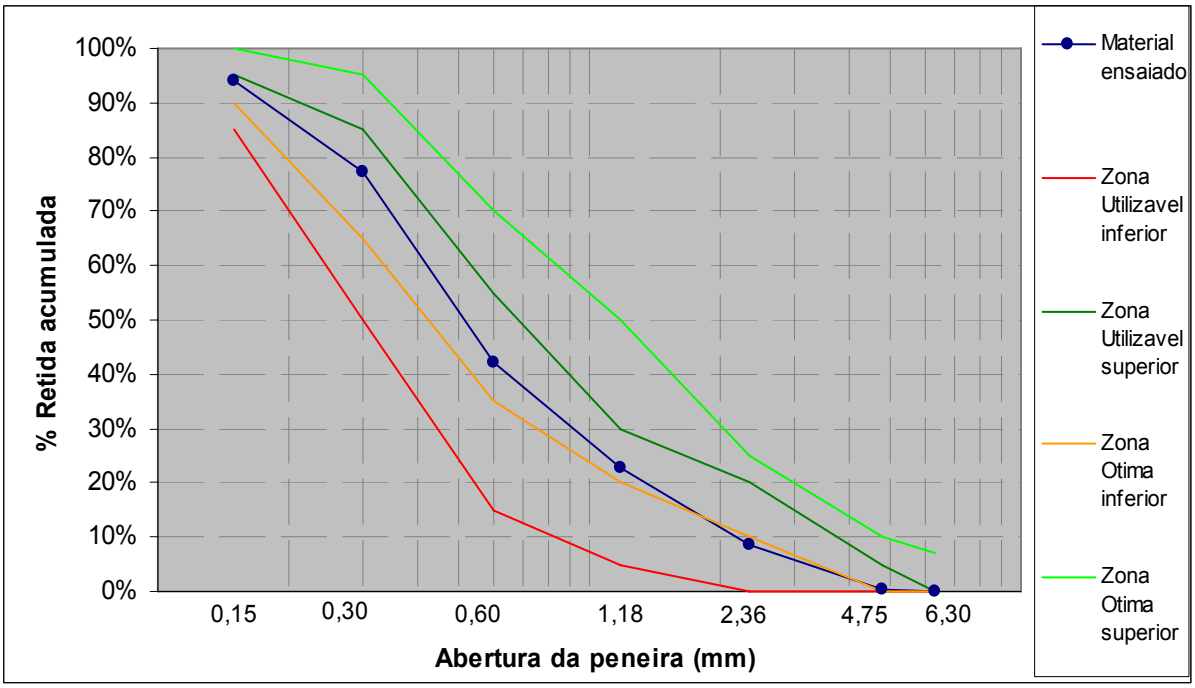

Figura 5.2 – Curva granulométrica do agregado miúdo

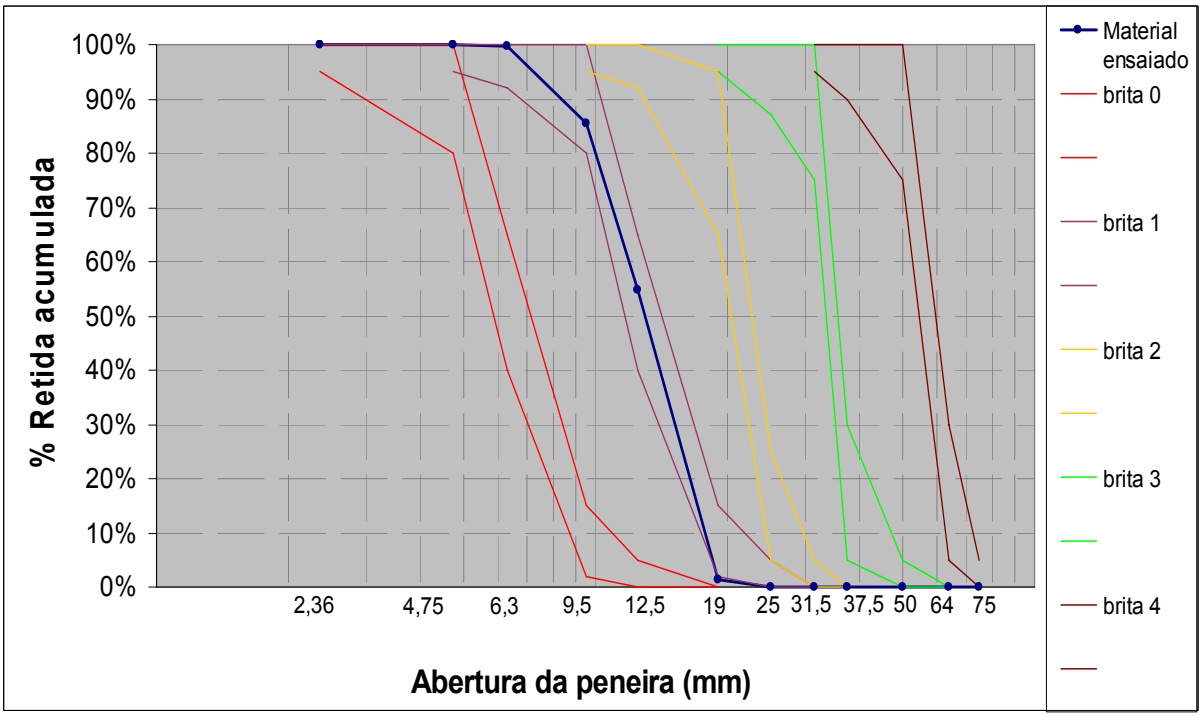

Figura 5.3 – Curva granulométrica do agregado graúdo

5.2.6. Aditivo superplastificante

A fim de manter níveis de trabalhabilidade constantes entre as diversas misturas, foi empregado aditivo superplastificante de 3ª geração, à base de éter policarboxílico.

5.3. Método de dosagem, moldagem e cura

A dosagem do concreto tem como objetivo a obtenção de uma mistura que apresente as condições desejáveis, tanto para o concreto no estado fresco (trabalhabilidade), como endurecido (resistência e durabilidade). Assim, foram adotados como base da dosagem os procedimentos propostos por Helene & Terzian (1992). A partir desta metodologia, chegou-se a conclusão que o teor de argamassa ideal seria 52%. Quando se substitui, parcialmente, o cimento por um material de menor massa específica, acontece um aumento no volume de pasta. Dessa forma, para manter o mesmo volume de argamassa da mistura de referência (100% CPB como aglomerante), nos concretos contendo escória foi necessário corrigir o volume de areia a ser adicionado na mistura. A adição de Na_2SO_4, quando utilizado, este foi realizada em relação à massa total do aglomerante.

Foram testadas quatro composições de aglomerante (Tabela 5.6), cada uma com três relações a/ag (0,30; 0,42 e 0,55). Todos os concretos moldados tiveram como resultado de consistência no tronco de cone, valores de abatimento dentro do limite 90 ± 10 mm. Para as relações a/ag mais baixas (0,42 e 0,30), isso só se tornou possível com a utilização de aditivo superplastificante. Este ensaio foi realizado de acordo com a NBR NM 67/98. As Tabelas 5.7 e 5.8 apresentam, respectivamente, os traços unitários e o consumo de material por m³ de concreto.

Tabela 5.6 – Nomenclatura e teores de aglomerantes e ativador químico das misturas estudadas

Nome da mistura	Cimento (CPB-40) (%)	Escória de alto-forno (%)	Ativador químico Na_2SO_4 (%)
REF	100 %	-	-
50E	50 %	50 %	-
70E	30 %	70 %	-
50A	50 %	50 %	4 %

Tabela 5.7 – Traços Unitários

Mistura	Relação a/ag	Materiais					
		Cimento	Escória	Areia	Brita	Aditivo Superplastificante *	Ativador (Na_2SO_4)
REF	0,30	1	-	1,24	2,06	0,49%	-
	0,42	1	-	1,70	2,50	0,08%	-
	0,55	1	-	2,64	3,36	-	-
50E	0,30	0,5	0,5	1,22	2,06	0,38%	-
	0,42	0,5	0,5	1,69	2,50	0,07%	-
	0,55	0,5	0,5	2,68	3,40	-	-
70E	0,30	0,3	0,7	1,22	2,06	0,30%	-
	0,42	0,3	0,7	1,69	2,50	0,07%	-
	0,55	0,3	0,7	2,68	3,40	-	-
50A	0,30	0,5	0,5	1,22	2,06	2,14%	4,00%
	0,42	0,5	0,5	1,69	2,50	0,03%	4,00%
	0,55	0,5	0,5	2,68	3,40	-	4,00%

* Valor correspondente à massa total do aditivo (fase sólida + fase líquida).

Tabela 5.8 – Consumo, por mistura, de materiais por m³ de concreto

Mistura	Relação a/ag	Materiais (kg/m³ de concreto)						
		Cimento	Escória	Areia	Brita	Aditivo Superplastificante *	Ativador (Na2SO4)	Água
REF	0,30	514	-	635	1060	2,527	-	154
	0,42	414	-	705	1033	0,344	-	174
	0,55	308	-	812	1034	-	-	169
50E	0,30	257	257	629	1061	1,953	-	154
	0,42	207	207	700	1033	0,277	-	174
	0,55	152	152	815	1036	-	-	167
70E	0,30	154	360	627	1061	1,542	-	154
	0,42	124	290	699	1033	0,290	-	174
	0,55	91	213	813	1036	-	-	167
50A	0,30	255	255	623	1051	10,882	20,369	153
	0,42	207	207	700	1033	0,141	16,559	174
	0,55	152	152	815	1036	-	12,157	167

* Valor correspondente à massa total do aditivo (fase sólida + fase líquida).

Alguns cuidados foram tomados durante o processo de moldagem, visando minimizar o número de variáveis do processo. Foram elas:

- Nas misturas em que houve substituição parcial do cimento por escória, antes do aglomerante ser adicionado à betoneira, este foi previamente homogeneizado;
- Quando utilizado o ativador químico, este foi primeiramente dissolvido na água de amassamento, para posteriormente, ser adicionado à mistura;
- Foi realizado controle de temperatura do concreto fresco, esta sendo mantida na faixa de 19 ± 1ºC. Este recurso tornou-se possível com a utilização da equação 4.1 proposta por Mehta e Monteiro (1994), com a qual, possuindo o peso e temperatura dos materiais secos, estima-se a temperatura em que certo volume de água (podendo ser aquecido ou resfriado) deve estar para que a temperatura desejada para o concreto seja alcançada.

$$T = \frac{0{,}22.(Tm.Mm + Tc.Mc) + Ta.Ma}{0{,}22.(Mm + Mc)} \qquad \text{(Equação 4.1)}$$

Onde:

* T - temperatura do concreto fresco (ºF);
* Tm, Tc, Ta- temperatura dos agregados, cimento e água, respectivamente (ºF);
* Mm, Mc, Ma – massa dos agregados, cimento e água, respectivamente (kg).

Sendo tomados estes cuidados, as moldagens dos corpos-de-prova 10 x 20 cm eram feitas de acordo com a norma NBR 5738/03, em duas camadas adensadas em mesa vibratória. Decorridas 24 horas após a moldagem, os corpos-de-prova eram desformados e colocados em câmara úmida, em temperatura de 23 ± 2ºC e umidade de 95%, e mantidos até suas datas inicias de pré-condicionamento e ensaio.

5.4. Ensaios experimentais

5.4.1. Resistência à compressão axial

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados de acordo com a NBR 5739/07. Para cada uma das 12 misturas investigadas foram moldados 4 corpos-de-prova cilíndricos (10 x 20 cm) por idade de cura pré-determinada (3, 7, 28 e 91 dias). Para melhor regularizar as extremidades dos corpos-de-prova, permitindo uma distribuição de carga mais uniforme em toda a área do cilindro, foi realizado capeamento à base de enxofre.

5.4.2. Ensaio de penetração a cloretos por imersão (EPCI)

A metodologia deste ensaio consiste em, depois de transcorrido os períodos de cura em câmara úmida (3, 7 e 28 dias), os corpos-de-prova (Ø 10 x 20 cm) são cortados em 2 partes (cilindros Ø 10 x 10 cm), tendo posteriormente suas faces paralelas seladas com verniz poliuretânico e, após secagem deste material, submersos em um tanque contendo solução salina de NaCl (19,380 ppm Cl^-).

Para cada mistura e idade de cura foram moldados 6 corpos-de-prova, gerando 12 metades. Nos prazos de submersão (0, 7, 14, 28, 56 e 91 dias) retiravam-se do tanque duas amostras, as quais eram rompidas diametralmente e submetidas à aspersão de solução de nitrato de prata (0,10N em água deionizada) e, de acordo com a variação de coloração, determinava-se as profundidades médias de penetração de cloretos. Segundo Otsuki et al. (1992) a profundidade é claramente indicada por um limite de mudança de cor. Nos locais onde a concentração de cloretos livres é superior a 0,15% do peso de cimento, a coloração é branca, no restante, a solução reage com os hidróxidos, e realça uma coloração marrom. A profundidade média era resultante de diversas medidas, espaçadas de 1 mm, com auxílio de programa computacional, e excluídos os valores discrepantes, com coeficiente de variação superiores a 10% .

Com a profundidade média estabelecida para cada prazo de submersão, os valores separados por tipo de mistura, e idade de cura, foram analisados em função de regressões, resultando equações do tipo Equação 5.3, e delas retiradas o coeficiente de penetração "k".

$$X = a + k\,(t)^{1/2} \qquad \text{(Equação 5.3)}$$

Onde:

X – profundidade de penetração (mm);

k – coeficiente de penetração;

t – tempo (semanas)

5.4.3. Ensaio acelerado de penetração à cloretos – ASTM C1202/05

O ensaio descrito pela norma ASTM C1205/05 tem objetivo medir a carga passante em uma amostra de concreto (Ø 10,0 x 5,1 cm), submetido a uma tensão de 60,0 ± 0,1 V, durante um período de 6 horas. As faces do cilindro são expostas uma à solução de cloreto de sódio (3% em água destilada) e a outra à solução de hidróxido de sódio (0,3N em água destilada), nas quais são submersos eletrodos de cobre conectados em uma fonte de corrente contínua, permitindo a diferença de potencial no concreto.

Foi realizada a moldagem de um corpo-de-prova (Ø 10 x 20 cm) por mistura, para cada uma das idades de ensaio determinadas (3, 7, 28, e 91 dias), e dele retirado duas amostras (Ø 10,0 x 5,1 cm), em serra de disco diamantado, as quais são sujeitas ao ensaio (Figura 5.4). No dia anterior ao ensaio, os corpos-de-prova eram retirados da câmara úmida, cortados, selados e submetidos ao processo de vácuo (3h seco e 1h submerso), e após 18± 2h, dava-se início ao ensaio.

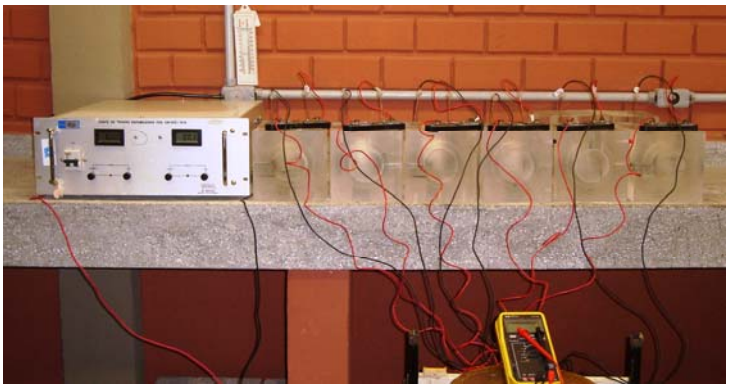

Figura 5.4 – Realização do ensaio

Com finalização do ensaio (6h), é então calculada a carga total passante, verificando-se a classificação do concreto, quanto ao risco de penetração dos íons cloreto, de acordo com norma ASTM C1202/05 (Tabela 5.9)

$$Q = 900.(I_0 + 2.I_{30} + 2.I_{60} + ... + 2.I_{330} + I_{360}) \qquad \textbf{(Equação 5.2)}$$

Onde:

Q – carga total passante (Coulombs);

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

Tabela 5.9 – Classificação de concretos quanto ao risco de penetração aos íons cloreto de acordo com a carga passante (ASTM C1202/05)

Carga passante	Risco de penetração de íons cloreto
> 4000	Alto
2000 a 4000	Moderado
1000 a 2000	Baixo
100 a 1000	Muito baixo
< 100	Desprezível

Por fim, cada amostra é rompida ao meio, para aspersão de solução de nitrato de prata (0,10N em água deionizada), e verificada a profundidade de penetração dos íons cloreto (Figura 5.5).

Figura 5.5 – Aspersão de solução de nitrato de prata nos corpos-de-prova após ensaio ASTM C1202/05

5.4.4. Análise da solução aquosa dos poros

Para realização deste ensaio foram moldados corpos-de-prova cilíndricos Ø 5 x 10 cm, compostos por pasta de aglomerantes, nas mesmas relações de materiais das misturas em concretos (proporção CPB/escória, a/ag e teores de superplastificante e ativador químico). Completados os períodos de cura (3, 7, 28 e 91 dias), realizava-se a extração de pó das amostras, sendo este pó misturado na proporção 1:1 com água deionizada, e esta solução então submetida à homogeneização, em agitador magnético, até estabilização do pH. Na seqüência, era feita filtragem deste material, e assim, obtida a solução final para ser analisada. Foram determinadas as concentrações de Na^+ e K^+ (por espectrometria de absorção atômica), Ca^{2+} (titulação complexométrica), OH^- (titulação de neutralização por HCl) e SO_4^{2-} (através de cromatografia iônica).

A partir dos dados obtidos foi possível calcular a condutividade elétrica da solução aquosa, sendo utilizada para isso as equações propostas por Shi et al. (1998) (Equações 5.3, 5.4 e 5.5).

$$\rho = \rho_a + \sum C_i.\lambda_i/1000 \qquad \text{(Equação 5.3)}$$

$$\lambda_i = \lambda_{i,0} - A_i.\sqrt{C_i} \qquad \text{(Equação 5.4)}$$

$$A_i = 0{,}2289.\lambda_{i,0} + 60{,}19 \qquad \text{(Equação 5.5)}$$

Onde:

ρ - condutividade específica da solução aquosa;

ρ_a - condutividade específica da água;

C_i – concentração equivalente do íon "i";

λ_i – condutividade equivalente do íon "i";

$\lambda_{i,0}$ – condutividade equivalente para concentração infinita do íon "i" (Tabela 5.10);

A_i – constante determinada teoricamente.

Tabela 5.10 - Condutividade equivalente de íons aquosos, em concentração infinita, a 25ºC

Íon	Na^+	K^+	Ca^{2+}	SO_4^{2-}	OH^-
Condutividade equivalente $\lambda_{i,0}$ ($m^2.equiv^{-1}.ohm^{-1}$)	0,00501	0,00735	0,00595	0,00798	0,00763

5.4.5. Ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio

Foram moldadas amostras (5 x 10 cm) de pastas de aglomerante, nas mesmas proporções de materiais utilizados nas misturas dos concretos referentes (relação a/ag e quantidade de superplastificante). Completados os períodos de cura de 28 e 91 dias, extraía-se das amostras cubos de aproximadamente 6 mm de aresta. A seguir, os cubos eram mantidos em álcool iso-propílico, visando paralisar a hidratação, secos em estufa, de forma gradativa, e após submetidos ao ensaio. Deve-se salientar que o comportamento deste ensaio é diferente em concretos e pastas (principalmente pela mudança da relação a/ag, pois os agregados absorvem parte da água, além da existência da zona de transição entre pasta e agregado no concreto), porém, o uso de pastas é válido para fim comparativo entre as diversas composições de aglomerantes.

6. RESULTADOS, ANÁLISE E DISCUSSÃO

6.1. Introdução

Tendo além do objetivo de apresentar os resultados obtidos durante a pesquisa, este capítulo visa analisá-los e compará-los à bibliografia disponível, buscando esclarecer características do concreto branco com substituição parcial de escória, principalmente quanto à penetração de íons cloreto. Para isso, será feita uma exposição dos resultados de resistência a compressão axial, penetração de cloretos (ASTM C1202/05), penetração de cloretos por imersão (EPCI), solução aquosa dos poros e porosimetria por intrusão de mercúrio, seguindo com um confronto entre eles. Ao final, é apresentado também, um estudo técnico-econômico de cada mistura estudada.

6.2. Resistência à compressão axial

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão axial, para todas as misturas e idades de ensaio, são expostos na Tabela 6.1. A seguir, na Tabela 6.2, são apresentadas as constantes (A e B) da equação de Abrams (Equação 6.1), juntamente com o coeficiente de determinação (r^2) de cada equação de regressão, além dos valores estimados, correspondente as idades de ensaio. Nesta equação, "fc" representa a resistência à compressão e "x" a relação a/ag.

$$fc = A/B^x \qquad \text{(Equação 6.1)}$$

Para facilitar a análise do comportamento da adição mineral e do ativador químico, em mesma relação a/ag e idade de ensaio, a Tabela 6.3 apresenta índices (%) demonstrando o grau de eficiência da escória à mistura de referência.

Tabela 6.1 – Resistências médias obtidas no ensaio de compressão axial

Mistura	A/AG	Resistência à compressão (MPa)			
		Idade			
		3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
REF	0,30	53,2	60,7	67,6	71,9
	0,42	34,4	36,4	47,2	58,2
	0,55	24,4	28,1	39,7	44,2
50E	0,30	34,4	48,2	57,1	68,8
	0,42	16,8	28,7	38,3	47,8
	0,55	11,0	17,5	27,7	32,9
70E	0,30	23,5	46,3	57,3	62,2
	0,42	10,3	23,9	36,3	41,0
	0,55	6,1	14,3	27,5	33,1
50A	0,30	41,3	50,1	60,3	61,4
	0,42	32,1	40,3	49,6	53,3
	0,55	19,3	28,5	37,8	40,4

Tabela 6.2 – Resistência à compressão: constantes de Abrams, coeficiente de determinação e resistências estimadas

Mistura	Cura	Coeficientes			Fc (Mpa) estimado para a/ag		
		A	B	r^2	0,30	0,42	0,55
REF	3 dias	132,58	22,56	0,99	52,1	35,8	23,9
	7 dias	144,93	21,45	0,96	57,8	40,0	26,8
	28 dias	123,12	8,31	0,95	65,2	50,6	38,4
	91 dias	126,41	6,65	1,00	71,6	57,0	44,6
50E	3 dias	126,60	93,36	0,97	32,5	18,8	10,4
	7 dias	159,91	56,67	1,00	47,6	29,3	17,4
	28 dias	133,52	18,04	0,99	56,1	39,6	27,2
	91 dias	166,04	19,07	1,00	68,6	48,1	32,8
70E	3 dias	110,47	213,48	0,98	22,1	11,6	5,8
	7 dias	182,25	107,98	0,99	44,7	25,5	13,9
	28 dias	132,87	18,60	0,97	55,3	38,9	26,6
	91 dias	127,04	12,32	0,96	59,8	44,2	31,9
50A	3 dias	107,65	21,31	0,97	43,0	29,8	20,0
	7 dias	100,30	9,53	0,99	51,0	38,9	29,0
	28 dias	106,72	6,50	0,99	60,9	48,6	38,1
	91 dias	109,86	6,36	0,96	63,1	50,5	39,7

Tabela 6.3 – Índice de resistência das misturas em relação ao concreto de referência

Mistura	A/AG	Índice de resistência $fc_{mistura}/fc_{referência}$ (%)			
		Idade			
		3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
REF	0,30	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
	0,42	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
	0,55	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
50E	0,30	64,7%	79,4%	84,4%	97,1%
	0,42	49,0%	78,9%	81,0%	82,2%
	0,55	45,2%	62,4%	69,6%	74,5%
70E	0,30	44,2%	76,3%	84,7%	87,8%
	0,42	30,0%	65,6%	76,9%	70,6%
	0,55	25,1%	51,0%	69,3%	74,9%
50A	0,30	77,7%	82,5%	89,1%	86,6%
	0,42	93,5%	110,9%	105,0%	91,6%
	0,55	79,2%	101,5%	95,1%	87,7%

Ao se analisar individualmente, a adição da escória de alto-forno, em substituição ao cimento Portland branco, frente à resistência à compressão, pode-se observar que sua utilização é danosa, tanto no teor de 50% quanto 70% (misturas 50E e 70E, respectivamente) até a idade pesquisada (91 dias). Além disso, como é relatado pela bibliografia, principalmente pelo fato da reação pozolânica ser lenta e altamente dependente da formação do hidróxido de cálcio (GAO et al., 2005; ONER & AKYUZ, 2007), torna-se ainda mais prejudicial nas primeiras idades. Para a mistura 50E, aos três dias, foi alcançada uma resistência máxima de 64,7% da mistura de referência. Com o passar do tempo, principalmente aos 91 dias, a escória já produziu resultados interessantes, chegando a índices de 97,1% (50E a/ag 0,30). Os resultados tornam-se mais desfavoráveis quando aumentado o valor de substituição para um teor de 70%. Para a mistura 70E, conseguiu-se um índice máximo de 44,2% aos três dias, alcançando, aos 91 dias, índice máximo de 87,8% (ambos na relação a/ag 0,30).

Na mistura com utilização de ativador químico, ocorreu uma grande melhoria nas idades iniciais (três dias), chegando a um índice de 93,5% de resistência na relação a/ag 0,42. Aos sete e 28 dias até mesmo supera a mistura de referência (a/ag 0,42 [sete e 28 dias]e a/ag 0,55 [sete dias]). Já nos 91 dias, seu desempenho diminuiu, e a mistura 50A apresentou índices que não ultrapassaram 91,6% da mistura de referência.

A Figura 6.1 exibe gráficos, individualizados por relação a/ag, demonstrando a taxa de reação, para cada mistura, permitindo comparar o grau de evolução das resistências entre as idades de ensaio. A partir da sua análise, consegue-se concluir que entre as idades de três e sete dias, as reações ocorridas nos concretos contendo escória são altamente aceleradas, acarretando um grande salto de resistência, fato também descrito por Oner & Akyuz (2007). Nos concretos contendo adição apenas de escória, o incremento de resistência, entre as sucessivas idades de ensaio, foi maior do que no concreto de referência até os 91 dias (excetuando-se o 70E com relação a/ag 0,42, no qual isto ocorreu até os 28 dias).

Quando se inseriu, além da escória, o ativador químico, este apresentou resultado impressionante de ganho de resistência até os sete dias, nas relações a/ag 0,42 e 0,55, e até os 28 dias na relação a/ag 0,30, chegando até mesmo a superar as resistências obtidas para a mistura de referência. A partir destas datas, os ganhos de resistência tornaram-se bastante inferiores, finalizando, aos 91 dias, com resistências representativamente menores que as do concreto referência.

Na Figura 6.2 são apresentados gráficos comparativos, para cada idade de ensaio, para melhor ilustrar o comportamento de cada mistura frente as demais. Nela, percebe-se o melhor desempenho do concreto de referência em praticamente todas a idades e relações a/ag, sendo superado apenas pela mistura 50A, na idade de sete dias (nas relações a/ag 0,42 e 0,55) e na idade de 28 dias na relação a/ag 0,42.

A Figura 6.3 é comparativa das duas misturas com substituição de 50% de escória, com e sem ativador químico, demonstrando a eficiência do $NaSO_4$ nas primeiras idades. Comprovadamente, como descrito por Schneider (2005), as resistências até os 28 dias são visivelmente aprimoradas, tendo o menor efeito na mistura com menor relação a/ag. Analisando a Tabela 6.4, vê-se o surpreendente benefício do ativador nos concretos de maiores relações a/ag, chegando a acréscimos de até 91% de resistência, e onde, exceto aos três dias, os melhores desempenhos foram encontrados na relação a/ag 0,55. Outro ponto interessante é a baixa influência do ativador nas resistências aos 91 dias, apresentado, na relação a/ag 0,30, valores inferiores à mistura 50E.

Tabela 6.4 – Índice de resistência entre as misturas 50A e 50E

A/AG	Índice de resistência (fc_{50A}/fc_{50E})			
	Idade			
	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
0,30	120%	104%	106%	89%
0,42	191%	141%	130%	111%
0,55	175%	163%	137%	118%

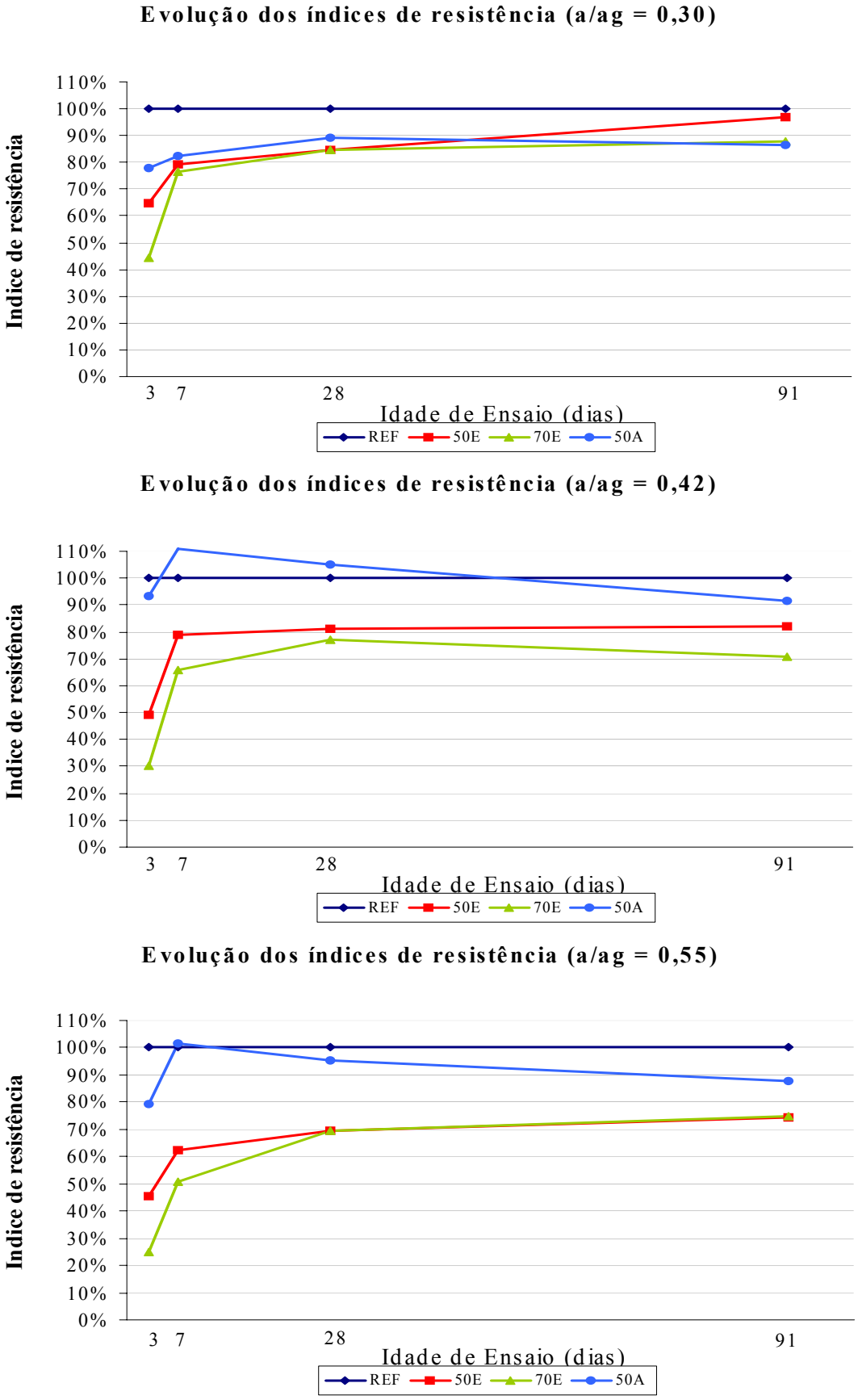

Figura 6.1 – Evolução dos índices de resistência, por relação a/ag

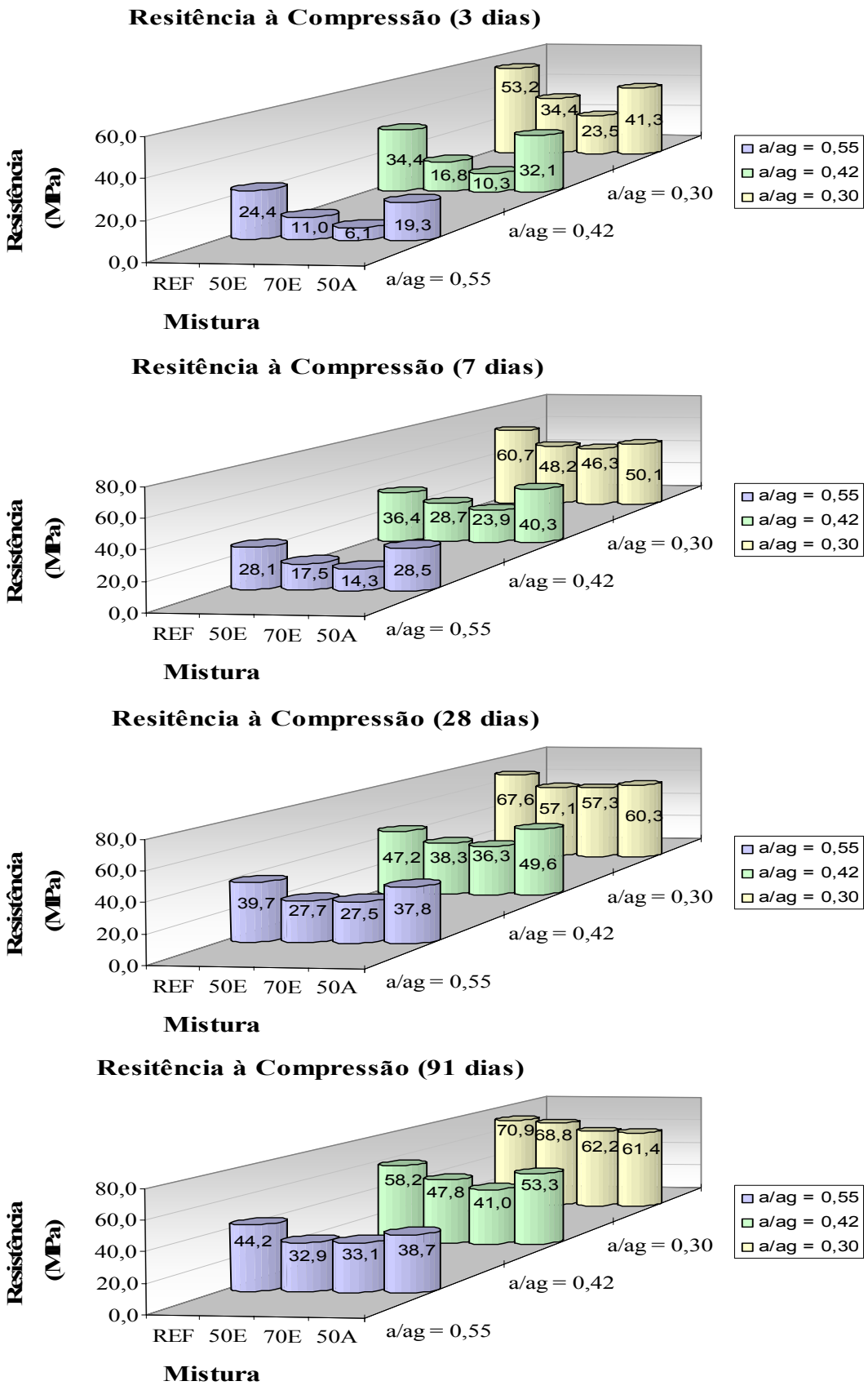

Figura 6.2 – Gráficos comparativos de resistência à compressão axial para cada idade de ensaio

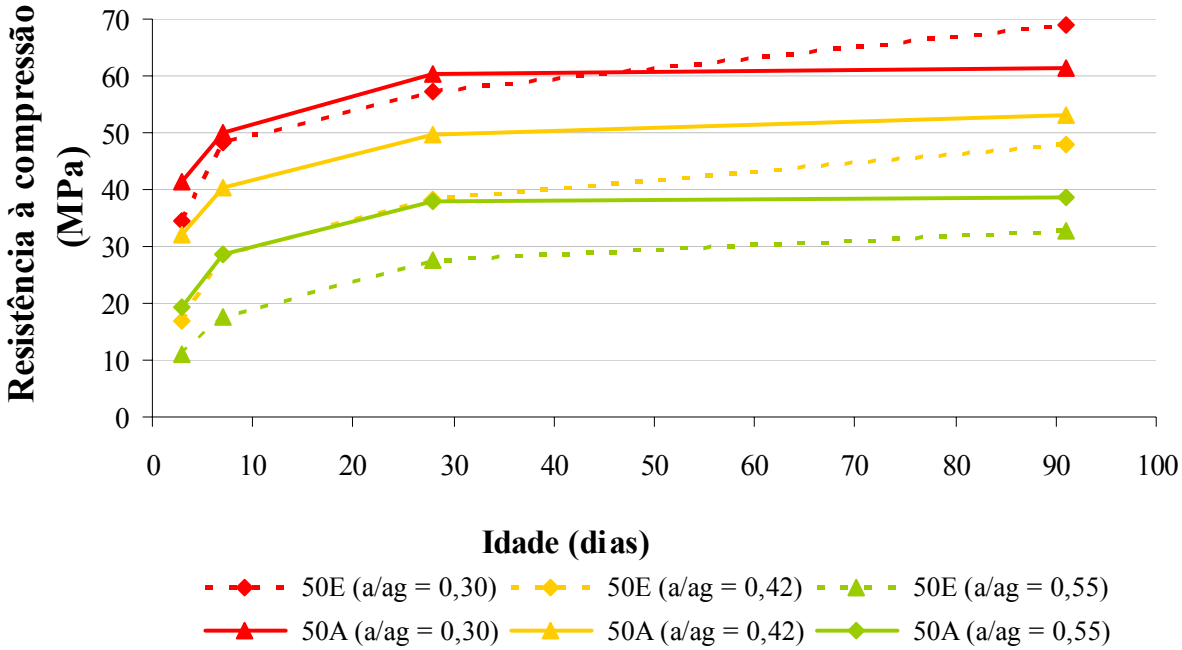

Figura 6.3 – Evolução de resistência para misturas contendo 50% de escória, com e sem ativador

6.3. Método normalizado de indicação elétrica quanto à habilidade do concreto de resistir à penetração do íon cloreto– ASTM C1202/2005

Os resultados obtidos no ensaio descrito pela normalização ASTM C1202/05 são apresentados na Tabela 6.5. A seguir, na Tabela 6.6, é feita a classificação das misturas estudadas, segundo a especificação da ASTM C1202/05, relacionando a carga passante com a probabilidade de penetração dos íons cloretos. Com base nesta classificação é possível avaliar a magnitude da eficiência da escória neste ensaio de penetração acelerada de cloretos, proporcionando, já aos sete dias, riscos de penetração classificados no mínimo como baixos, chegando as ser muito baixo para os concretos 70E (a/ag 0,30) e 50A (a/ag 0,30 e 0,42), o que na mistura de referência só é alcançada na relação a/ag 0,30, aos 91 dias. Estes resultados estão de acordo com os mencionados por Schneider (2005), o qual fez pesquisa semelhante, porém utilizando CPV no lugar do CPB, e diferentes relações a/ag. Os desempenhos para o CPB, projetando-se os resultados para mesmas relações a/ag, foram um pouco inferiores aos 3 dias, e superiores a partir dos 7 dias.

Tabela 6.5 – Resultados do ensaio acelerado de penetração de cloretos (ASTM C1202/05)

Mistura	A/AG	Carga passante (C)			
		Idade			
		3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
REF	0,30	4139	3063	2287	1444
	0,42	7011	4356	3026	2346
	0,55	8594	6473	4162	3034
50E	0,30	3455	1197	747	611
	0,42	4324	1529	828	634
	0,55	5475	1959	924	653
70E	0,30	3229	987	501	359
	0,42	4735	1239	550	376
	0,55	7075	1572	602	391
50A	0,30	1788	887	674	572
	0,42	2659	993	763	602
	0,55	4107	1136	815	634

Tabela 6.6 – Avaliação dos resultados do ensaio acelerado de penetração de cloretos, segundo ASTM C1202/05

Mistura	A/AG	Risco de penetração, segundo ASTM C1202/05			
		Idade			
		3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
REF	0,30	Alto	Moderado	Moderado	Baixo
	0,42	Alto	Alto	Moderado	Moderado
	0,55	Alto	Alto	Alto	Moderado
50E	0,30	Moderado	Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo
	0,42	Alto	Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo
	0,55	Alto	Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo
70E	0,30	Moderado	Muito Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo
	0,42	Alto	Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo
	0,55	Alto	Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo
50A	0,30	Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo
	0,42	Moderado	Muito Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo
	0,55	Alto	Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo

A Tabela 6.7 apresenta as constantes, o coeficiente de determinação e as estimativas da equação exponencial, do tipo $Q = A/B^x$, utilizada para o melhor ajuste dos resultados (onde: Q = carga passante; A e B = constantes; x = relação a/ag). A indicação dos altos coeficientes de determinação ($r^2 \approx 1$) nela descritos, representam a forte dependência dos resultados deste ensaio com a relação a/ag.

Uma forma interessante de verificar as influências positivas da escória e do Na_2SO_4 no concreto branco, frente à penetração de cloretos, é comparar os resultados destas misturas (50E, 70E e 50A) com o concreto de referência (Tabela 6.8). Rapidamente é possível visualizar o efeito altamente benéfico da adição mineral, em todas as misturas e idades de ensaio, também ilustrado na Figura 6.4. Analisando conjuntamente a alteração na relação a/ag, a idade de ensaio e a utilização da escória, percebe-se que, apesar de nos três dias não ser demonstrado, o que pode ser explicado pela baixa velocidade de reação da escória, o incremento no teor de escoria de 50% para 70% resulta em um melhor comportamento frente à penetração acelerada de cloretos, tornando-se ainda mais efetivo, quanto maior a relação a/ag. Outro aspecto a ser observado, é que o uso do ativador químico é altamente satisfatório, causando aceleração das propriedades da escória, principalmente até os sete dias (idade em que possui os menores valores de carga passante para as três relações a/ag), a partir do qual os ganhos de resistência à penetração acelerada de cloretos passam a ser menores do que do na mistura de referência (o que pode ser visto também na Tabela 6.9).

Tabela 6.7 – Coeficientes da equação $Q = (A/B^x)$ e de determinação (r^2), e valores de carga passante (Q) por ela estimada

Mistura	Cura	Coeficientes			Carga passante (C) estimada para a/ag		
		A	B	r^2	0,3	0,42	0,55
REF	3 dias	1841,22	0,05	0,93	4400	6234	9092
	7 dias	1244,64	0,05	1,00	3056	4376	6459
	28 dias	1111,92	0,09	1,00	2281	3041	4152
	91 dias	622,27	0,05	0,96	1510	2153	3161
50E	3 dias	1991,31	0,16	1,00	3459	4314	5481
	7 dias	665,11	0,14	1,00	1201	1521	1964
	28 dias	578,50	0,43	1,00	747	828	925
	91 dias	564,96	0,77	0,99	612	632	654
70E	3 dias	1262,43	0,04	1,00	3236	4715	7090
	7 dias	565,46	0,16	1,00	989	1236	1574
	28 dias	402,65	0,48	1,00	502	548	603
	91 dias	324,51	0,71	1,00	360	375	392
50A	3 dias	658,52	0,04	1,00	1786	2663	4104
	7 dias	657,62	0,37	1,00	885	997	1134
	28 dias	543,47	0,47	0,96	682	747	824
	91 dias	505,88	0,66	1,00	572	601	634

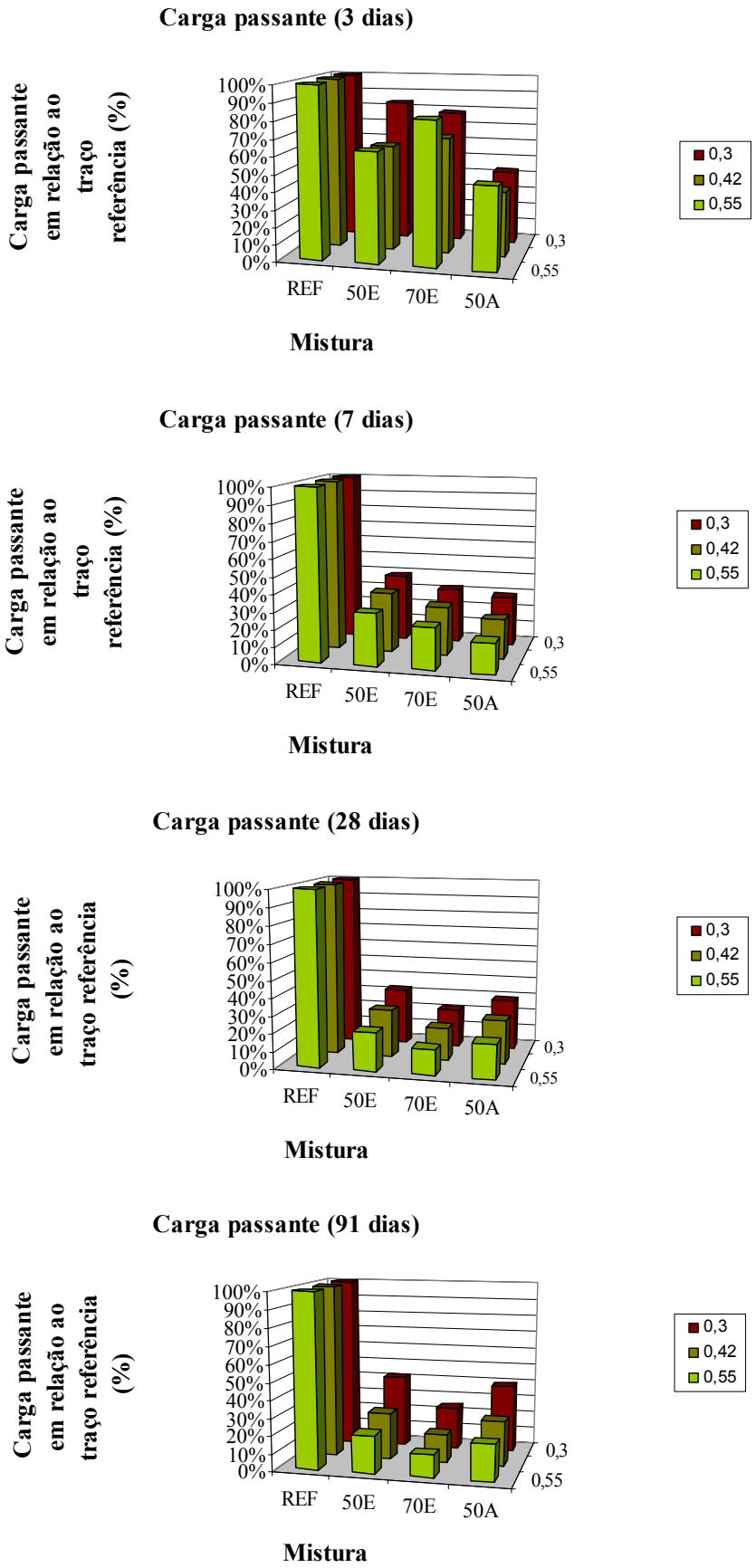

Figura 6.4 – Comparação das cargas passantes com a mistura de referência

Tabela 6.8 – Índice de carga passante em relação ao concreto de referência

Mistura	A/AG	Índice de carga passante $C_{mistura}/C_{referência}$ (%)			
		Idade			
		3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
REF	0,30	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
	0,42	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
	0,55	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
50E	0,30	83,5%	39,1%	32,7%	42,3%
	0,42	61,7%	35,1%	27,4%	27,0%
	0,55	63,7%	30,3%	22,2%	21,5%
70E	0,30	78,0%	32,2%	21,9%	24,9%
	0,42	67,5%	28,4%	18,2%	16,0%
	0,55	82,3%	24,3%	14,5%	12,9%
50A	0,30	43,2%	28,9%	29,5%	39,6%
	0,42	37,9%	22,8%	25,2%	25,7%
	0,55	47,8%	17,5%	19,6%	20,9%

Tabela 6.9 – Variações da carga passante de acordo com o avanço da idade de ensaio

Mistura	A/AG	Redução da carga passante (%)		
		Idade		
		3 para 7 dias	7 para 28 dias	28 para 91 dias
REF	0,30	26,0%	25,3%	36,9%
	0,42	37,9%	30,5%	22,5%
	0,55	24,7%	35,7%	27,1%
50E	0,30	65,3%	37,6%	18,2%
	0,42	64,6%	45,9%	23,5%
	0,55	64,2%	52,8%	29,3%
70E	0,30	69,4%	49,2%	28,4%
	0,42	73,8%	55,6%	31,7%
	0,55	77,8%	61,7%	35,1%
50A	0,30	50,4%	24,0%	15,1%
	0,42	62,7%	23,1%	21,1%
	0,55	72,3%	28,2%	22,2%

A análise da Tabela 6.9 descreve um comportamento distinto entre compostos com escória e a mistura de referência. A diferença entre eles é que, no caso da mistura de referência, as reduções das cargas entre as idades de ensaio são praticamente homogêneas (variando entre 22% e 36%), enquanto que nos concretos com escória, ocorre uma grande redução inicial (entre 50% e 77% nas primeiras idades), seguida de reduções decrescentes

com o passar do tempo (chegando a reduções de 23,1% e 61,7% entre sete e 28 dias, e 15% a 35% entre as idades de 28 e 91 dias). Isto pode ser explicado pelo fato de que a taxa de consumo de CH pelas adições ser maior quanto menor o grau de hidratação da adição (SAEKI & MONTEIRO, 2005), portanto a taxa de diminuição do pH (e conseqüente diminuição da condutividade elétrica específica da solução dos poros) nas idades iniciais é superior às idades avançadas, influenciando da mesma forma no ensaio da ASTM C1202/05. Da mesma forma, quanto maior o consumo de CH, maior será a influência da reação pozolânica na microestrutura do concreto.

A Figura 6.5 ilustra a comparação de desempenho das misturas 50E e 50A, analisando a evolução em decorrência da idade de ensaio. Observa-se claramente a eficiência do ativador químico nas primeiras idades (três e sete dias), resultando em cargas passantes menores. Apesar disso, a partir dos 28 dias, as diferenças diminuem bastante, proporcionando, aos 91 dias, resultados muito semelhantes (máximo de 6,4% de diferença entre as cargas passantes no 50E e 50A) (Tabela 6.10). A aceleração causada por ativadores químicos também foi estudada por Saeki & Monteiro (2005) e Wu et al. (1990), comprovando suas eficiências até os sete dias de idade.

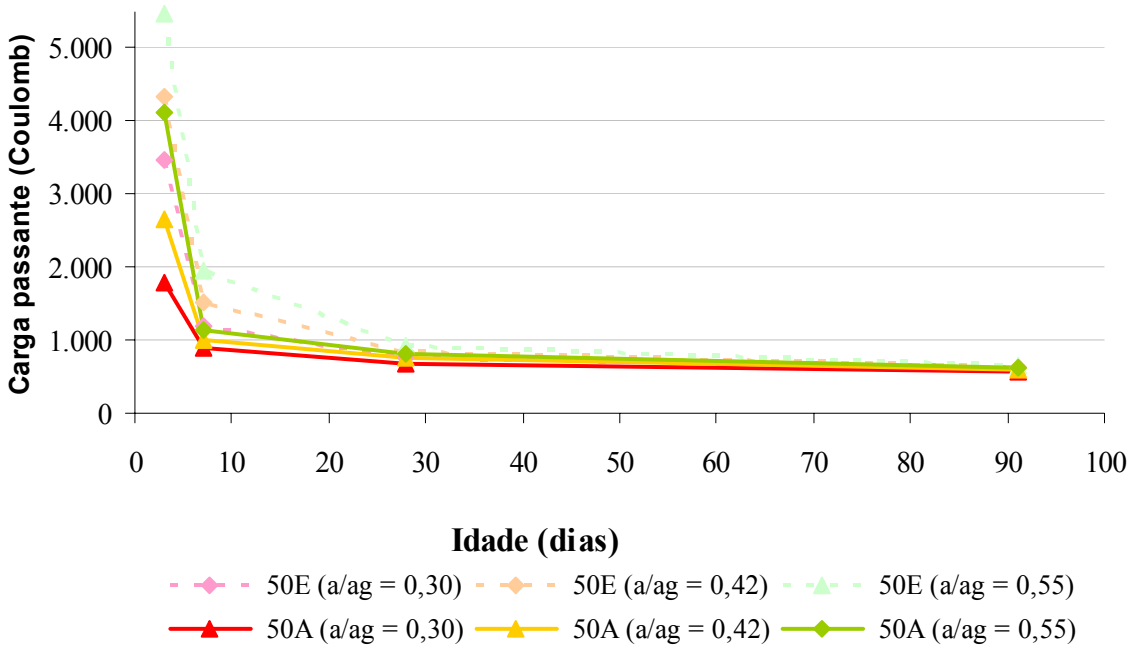

Figura 6.5 – Evolução das cargas passantes para misturas contendo 50% de escória, com e sem ativador

Tabela 6.10 – Índice de carga passante entre as mistura 50A e 50E

	Índice de carga passante (C_{50A}/C_{50E})			
	Idade			
A/AG	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
0,3	51,7%	74,1%	90,3%	93,6%
0,42	61,5%	64,9%	92,2%	95,0%
0,55	75,0%	58,0%	88,2%	97,1%

Uma forma possível de se avaliar o comportamento do concreto frente à ação dos íons cloreto é observando a profundidade de penetração dos íons ocorrida após o ensaio da ASTM C1202/05, através da aspersão de solução 0,1M de $AgNO_3$ e análise colorimétrica. Para confirmar a validade disto, foi realizado este procedimento nas amostras submetidas ao ensaio acelerado (resultados apresentados na Tabela 6.11), e após, comparados os resultados com a carga passante no ensaio da ASTM (Figura 6.6).

Tabela 6.11 – Profundidade de penetração de cloretos, após ensaio acelerado, medido através da aspersão de solução 0,1M de $AgNO_3$

Mistura		Profundidade de penetração (mm)			
		Idade			
	A/AG	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
REF	**0,30**	21,28	16,60	11,78	5,32
	0,42	> 50	30,19	17,26	10,95
	0,55	>50	>50	31,45	20,27
50E	**0,30**	22,08	5,58	2,28	1,44
	0,42	37,09	7,47	4,40	2,14
	0,55	43,66	13,09	5,36	2,61
70E	**0,30**	19,51	2,77	2,76	1,22
	0,42	>50	5,34	2,88	1,49
	0,55	>50	9,09	2,94	1,80
50A	**0,30**	7,88	4,85	1,92	0,89
	0,42	9,82	7,48	1,71	1,39
	0,55	23,06	8,25	2,08	1,84

Analisando o alto coeficiente de determinação (r^2 = 0,93) resultante da análise de regressão, apresentada na Figura 6.6, é possível afirmar que existe uma boa correlação entre estes dois procedimentos, sendo possível, analisar o comportamento, também, através da profundidade de penetração dos íons cloreto (Tabela 6.12). Deve ser excluído deste procedimento a classificação de risco de penetração "desprezível", pois teoricamente, decorrem em valores negativos. Este dado vem a corroborar com os resultados obtidos por

Schneider (2005) e Andrade et al. (1999), confirmando assim, a correlação existente entre o comportamento dos íons cloreto no interior do concreto, durante o ensaio acelerado, e a carga passante obtida.

Tabela 6.12 – Avaliação do risco de penetração dos íons cloreto, com base na carga passante, segundo ASTM C1202, e na profundidade de penetração do íon

Carga passante (C)	Risco de penetração de íons cloreto	Profundidade de penetração (mm)
> 4000	Alto	> 27,7
2000 a 4000	Moderado	12,0 a 27,7
1000 a 2000	Baixo	4,1 a 12,0
100 a 1000	Muito baixo	< 4,1

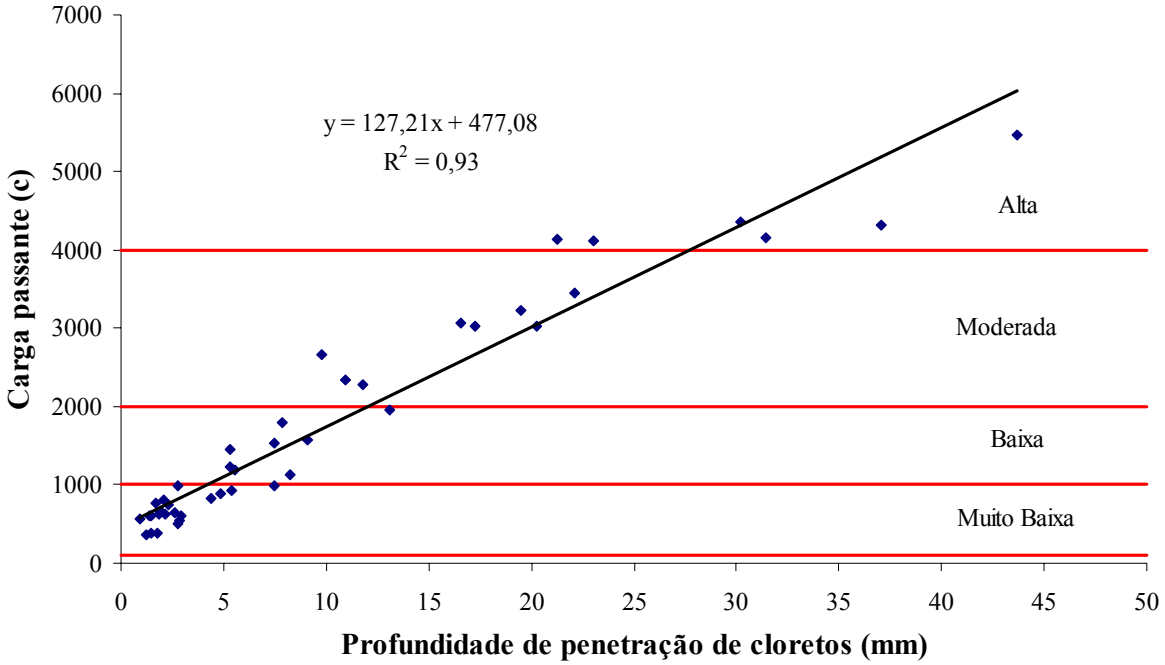

Figura 6.6 – Correlação entre carga passante e profundidade de penetração de cloretos

6.4. Ensaio de penetração de cloretos por imersão (EPCI)

A análise inicial dos dados, quanto ao ensaio de penetração de cloretos por imersão, é realizada com base no coeficiente angular das equações de regressões lineares, propostas por Bakker et al. (1988) e Wee et al. (2000), chamado coeficiente de penetração. A partir dos

gráficos (profundidade de penetração x √tempo), ilustrados nas Figuras 6.7, 6.8, 6.9 e 6.10 foram obtidas equações de regressão (Equação 6.2), de acordo com Bakker et al. (1988), descrevendo retas que interceptam a origem (a = 0), das quais são retirados os coeficientes de penetração (k) e seus coeficientes de determinação (r^2). Estes valores são apresentados na Tabela 6.13 e ilustrados, para efeito de comparação, na Figura 6.11.

$$y = a + k.(\sqrt{\text{semana}}) \qquad \textbf{(Equação 6.2)}$$

Conforme a Tabela 6.14 é possível comprovar, novamente, a atividade benéfica da adição de escória quanto à ação dos íons cloreto. Neste caso, excetuando-se a relação a/ag 0,30 com cura de 28 dias, todas as demais misturas contendo escória, resultaram em melhores comportamentos que a mistura de referência, em igualdade de cura e relação a/ag. Isto se deve, possivelmente, pela sua maior capacidade de fixação dos íons cloretos (XU, 1997; LUO et al , 2001) e mecanismos de refinamento da estrutura dos poros (GAO et al., 2005).

No prazo de cura de 28 dias e relação a/ag 0,30, verifica-se um salto no desempenho da mistura de referência. Uma das hipóteses, que pode explicar tal acontecimento, é a insuficiência inicial de água para a hidratação do conteúdo total de cimento, ficando este como inerte, a qual é compensada pelo período prolongado de cura, promovendo uma grande taxa de hidratação no período de 7 a 28 dias.

Tabela 6.13 – Coeficientes de penetração (k)

MISTURA	A/AG	k (mm/ √ semana)			Coef. de determinação (r^2)		
		Cura de			Cura de		
		3 dias	7 dias	28 dias	3 dias	7 dias	28 dias
REF	**0,30**	2,15	1,81	0,40	0,99	0,98	0,92
	0,42	4,00	2,83	1,68	0,95	0,99	0,98
	0,55	6,39	5,37	3,41	0,94	0,97	0,99
50E	**0,30**	1,41	0,88	0,42	0,82	0,86	0,86
	0,42	2,08	1,31	0,80	0,83	0,81	0,87
	0,55	2,75	1,76	1,06	0,84	0,88	0,86
70E	**0,30**	0,97	0,82	0,59	0,92	0,98	0,99
	0,42	1,51	1,07	0,98	0,83	0,94	0,99
	0,55	1,79	1,40	1,12	0,83	0,93	0,96
50A	**0,30**	0,99	0,87	0,63	0,92	0,97	0,96
	0,42	1,08	1,02	0,85	0,84	0,88	0,95
	0,55	1,61	1,41	1,20	0,88	0,88	0,98

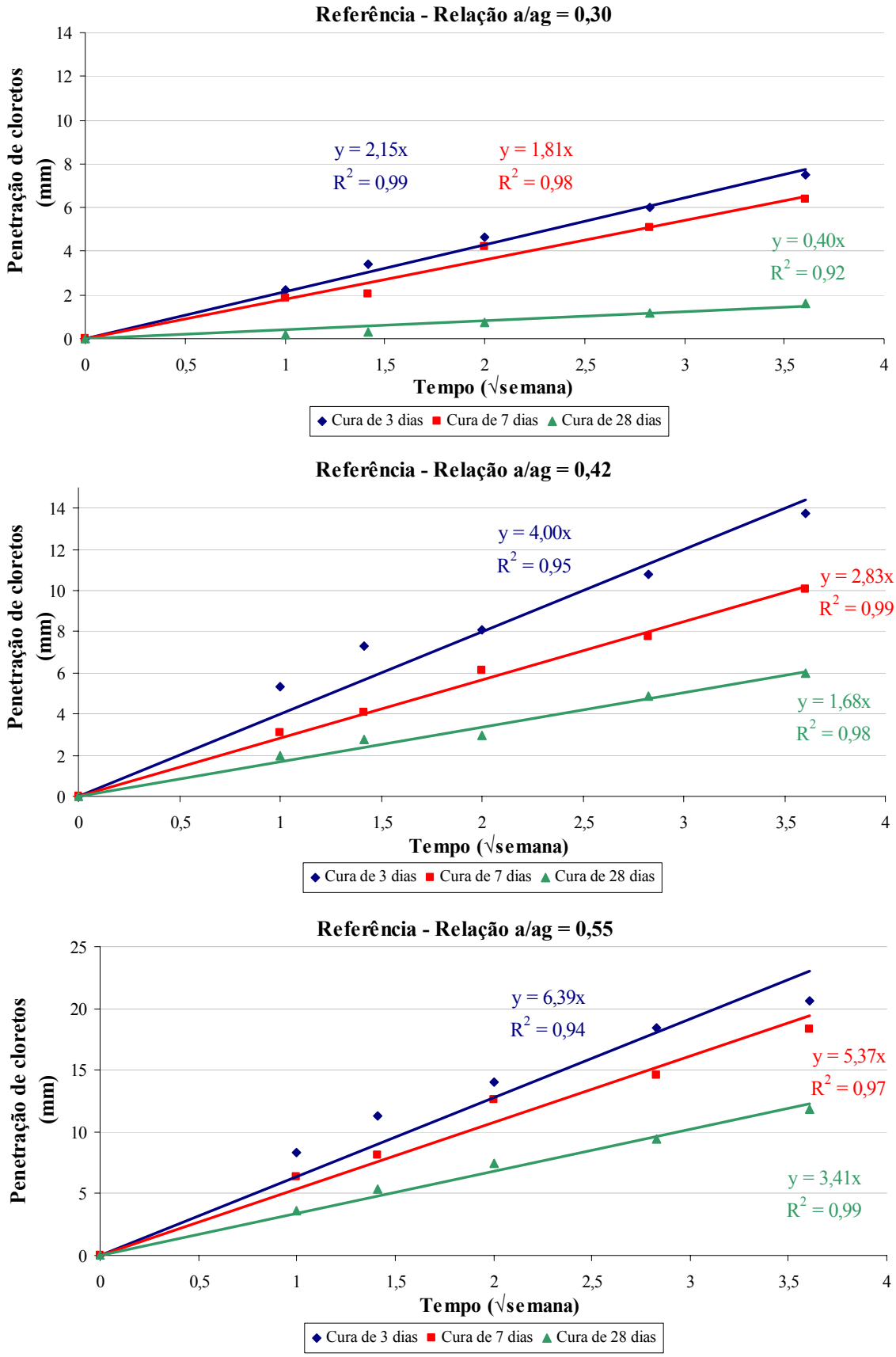

Figura 6.7 – Gráficos para obtenção dos coeficientes k, para a mistura referência

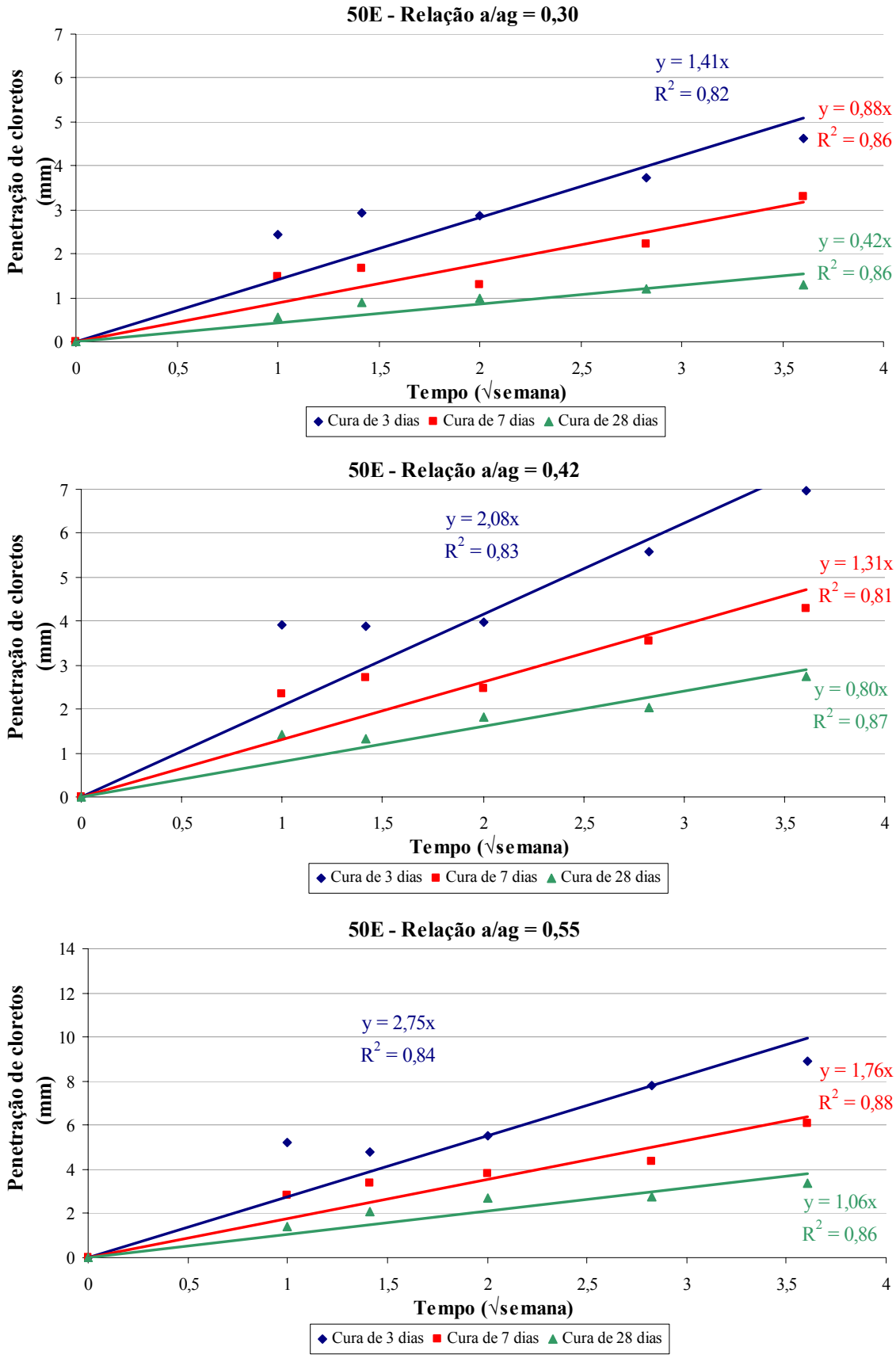

Figura 6.8 – Gráficos para obtenção dos coeficientes k, para a mistura 50E

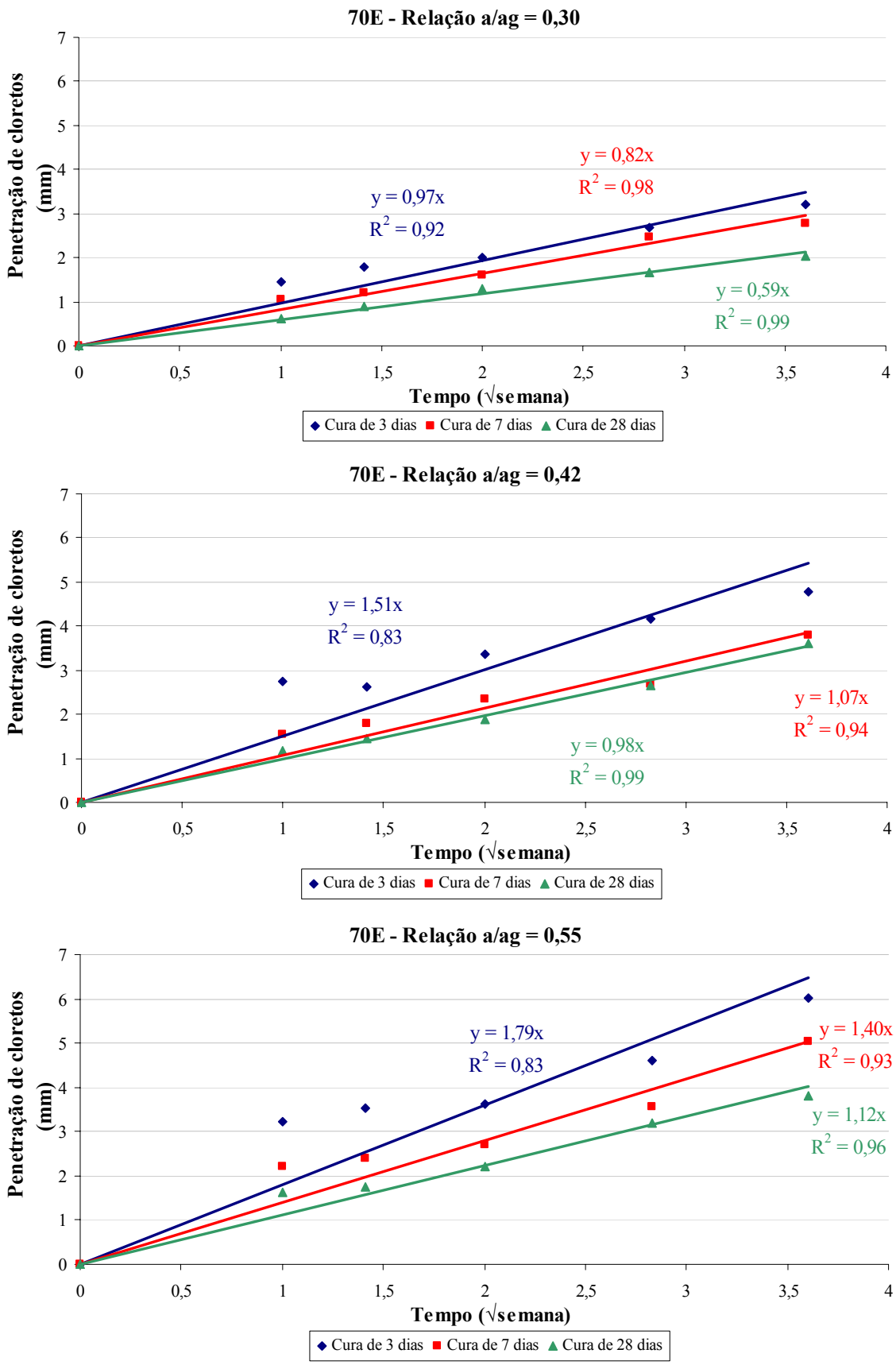

Figura 6.9 – Gráficos para obtenção dos coeficientes k, para a mistura 70E

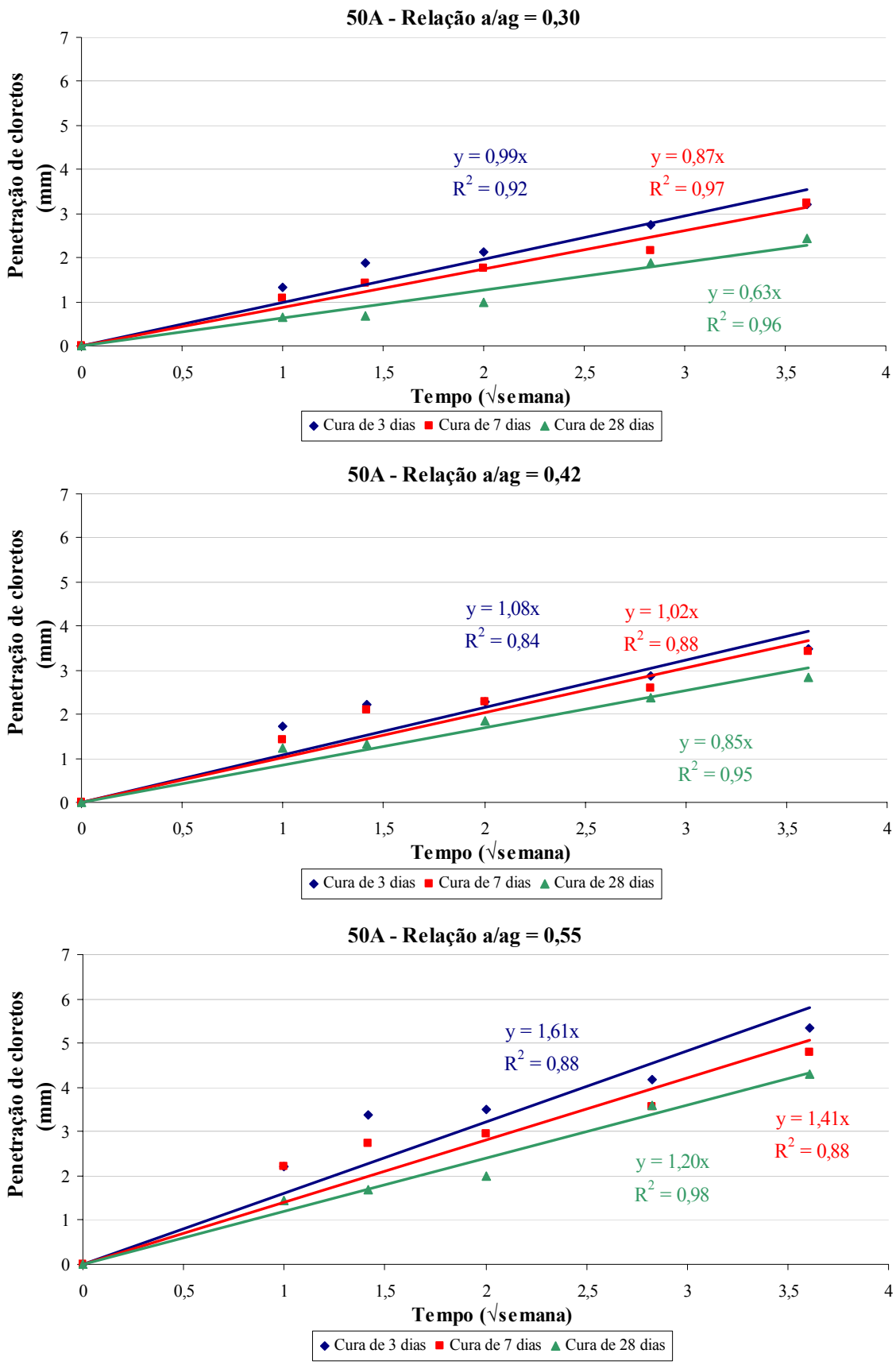

Figura 6.10 – Gráficos para obtenção dos coeficientes k, para a mistura 50A

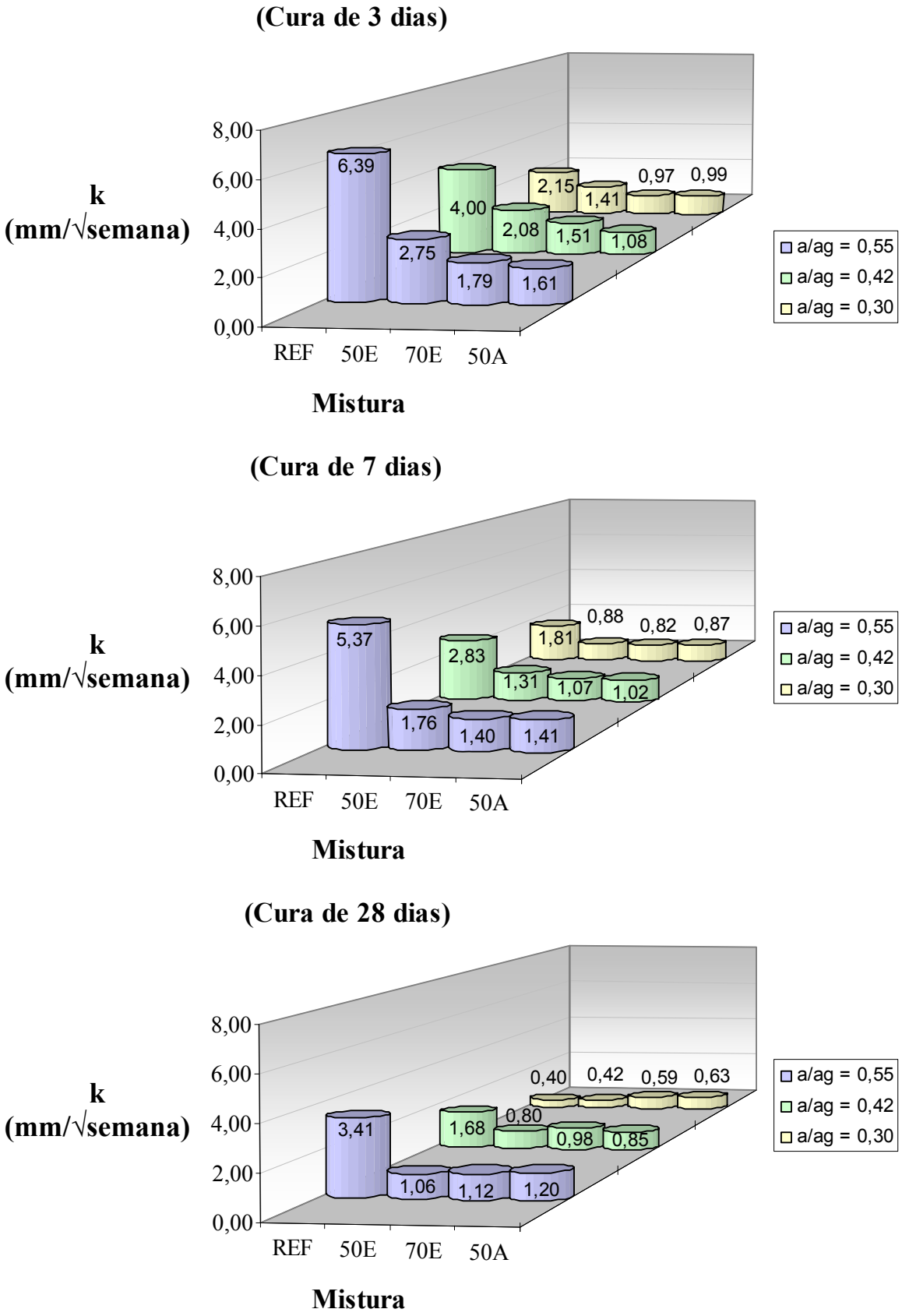

Figura 6.11 – Gráficos comparativos do coeficiente de penetração, para cada idade de cura

Um aspecto interessante, salientado por Schneider (2005) e ocorrido também nesta pesquisa (Tabela 6.14), é que os índices de penetração (I_k), comparando misturas que possuem adições minerais com a mistura de referência, em igualdade de relação a/ag e idade de cura, são menores, quanto maior a relação a/ag. Isto demonstra que a eficiência da escória (tanto com ativador químico, quanto sem), é intensificada, para esta propriedade, nos concretos de maiores relações a/ag.

Tabela 6.14 – Índices de penetração (I_k), em relação ao concreto de referência

MISTURA	A/AG	Índice de penetração $I_k = k_{mistura}/k_{referência}$ (%)		
		Cura de		
		3 dias	7 dias	28 dias
REF	0,30	100,0%	100,0%	100,0%
	0,42	100,0%	100,0%	100,0%
	0,55	100,0%	100,0%	100,0%
50E	0,30	65,7%	48,5%	104,9%
	0,42	52,0%	46,1%	47,9%
	0,55	43,1%	32,8%	31,0%
70E	0,30	44,9%	45,4%	145,8%
	0,42	37,7%	37,7%	58,3%
	0,55	28,1%	26,0%	32,7%
50A	0,30	45,8%	48,3%	156,0%
	0,42	27,0%	36,0%	50,4%
	0,55	25,2%	26,2%	35,1%

A Tabela 6.15 apresenta as constantes, o coeficiente de determinação e as estimativas da equação exponencial, do tipo $k = A/B^x$ (onde: k = coeficiente de penetração; A e B = constantes; e x = relação a/ag) utilizada para o ajuste dos dados. A obtenção de altos coeficientes de determinação ($r^2 \geq 0,88$) nela descritos, indica a dependência, dos resultados deste ensaio, com a relação a/ag.

Tabela 6.15 – Valores de k, estimados pela expressão $k = A/B^x$

MISTURA	Cura	Coeficientes			k' para a/ag		
		A	B	r^2	0,3	0,42	0,55
REF	3 dias	0,6046	0,0130	**0,99**	2,22	3,75	6,59
	7 dias	0,4758	0,0127	**0,99**	1,76	2,98	5,25
	28 dias	0,0363	0,0002	**0,95**	0,46	1,29	3,88
50E	3 dias	0,6507	0,0698	**0,99**	1,45	1,99	2,81
	7 dias	0,3892	0,0618	**0,99**	0,90	1,25	1,80
	28 dias	0,1522	0,0261	**0,94**	0,45	0,70	1,13
70E	3 dias	0,4851	0,0850	**0,93**	1,02	1,37	1,88
	7 dias	0,4341	0,1187	**1,00**	0,82	1,06	1,40
	28 dias	0,2951	0,0790	**0,88**	0,63	0,86	1,19
50A	3 dias	0,5164	0,1375	**0,90**	0,94	1,19	1,54
	7 dias	0,4803	0,1480	**0,97**	0,85	1,07	1,37
	28 dias	0,2904	0,0766	**1,00**	0,63	0,85	1,19

Uma outra forma de se obter o coeficiente de penetração é, também, adotando-se a Equação 6.2, mas desta vez, permitindo que a constante "a" seja diferente de zero, como propõem Wee et al (2000). Contudo, os autores afirmam que esta constante é um artefato para o melhor ajuste da curva, e não um indicador de propriedades da mistura. Para diferenciar as formas de obtenção, neste segundo método, o coeficiente de penetração será designado k'.

Os gráficos ilustrados nas Figuras 6.12, 6.13, 6.14 e 6.15, representam os resultados dos ensaios, e descrevem os respectivos coeficientes de penetração (k') e coeficientes de determinação (r^2), apresentados na Tabela 6.16. Visando melhor ilustrar o comportamento das misturas estudadas, comparando-se com a relação a/ag, idade de cura e tipo de aglomerante, respectivamente, faz-se uso das Figuras 6.16, 6.17 e 6.18.

A Tabela 6.17 apresenta as constantes, o coeficiente de determinação e as estimativas da equação exponencial, do tipo $k = A/B^x$ (onde: k = coeficiente de penetração; A e B = constantes; e x = relação a/ag) utilizada para o ajuste dos dados. Como ocorrido para o coeficiente k, foram encontrados altos coeficientes de determinação ($r^2 \geq 0,88$), demonstrando a correlação entre a penetração de cloretos e a relação a/ag.

Tabela 6.16 – Coeficientes de penetração (k')

MISTURA	A/AG	k' (mm/ √ semana)			Coef. de determinação (r^2)		
		Cura de			Cura de		
		3 dias	7 dias	28 dias	3 dias	7 dias	28 dias
REF	**0,30**	2,06	1,81	0,48	0,99	0,98	0,95
	0,42	3,59	2,75	1,62	0,97	1,00	0,98
	0,55	5,64	4,99	3,26	0,96	0,98	0,99
50E	**0,30**	1,14	0,79	0,35	0,89	0,87	0,91
	0,42	1,70	1,05	0,68	0,89	0,88	0,92
	0,55	2,26	1,49	0,89	0,90	0,92	0,91
70E	**0,30**	0,97	0,82	0,59	0,95	0,97	0,97
	0,42	1,51	0,99	0,98	0,91	0,92	0,99
	0,55	1,79	1,40	1,12	0,92	0,93	0,98
50A	**0,30**	0,99	0,87	0,63	0,95	0,99	0,99
	0,42	1,08	1,02	0,99	0,90	0,93	0,99
	0,55	1,61	1,41	1,20	0,89	0,95	0,97

Tabela 6.17 – Valores de k', estimados pela expressão $k = A/B^x$

Traço	Cura	Coeficientes			k' para a/ag		
		A	B	r^2	0,3	0,42	0,55
REF	**3 dias**	0,6332	0,0180	**0,99**	2,11	3,42	5,77
	7 dias	0,5222	0,0172	**0,99**	1,77	2,88	4,88
	28 dias	0,0528	0,0005	**0,97**	0,53	1,32	3,59
50E	**3 dias**	0,5166	0,0656	**0,98**	1,17	1,62	2,31
	7 dias	0,3650	0,0785	**1,00**	0,78	1,06	1,48
	28 dias	0,1272	0,0259	**0,93**	0,38	0,59	0,95
70E	**3 dias**	0,4851	0,0850	**0,93**	1,02	1,37	1,88
	7 dias	0,4215	0,1177	**0,98**	0,80	1,04	1,37
	28 dias	0,2951	0,0790	**0,88**	0,63	0,86	1,19
50A	**3 dias**	0,5164	0,1375	**0,90**	0,94	1,19	1,54
	7 dias	0,4803	0,1480	**0,97**	0,85	1,07	1,37
	28 dias	0,3076	0,0779	**0,94**	0,66	0,90	1,25

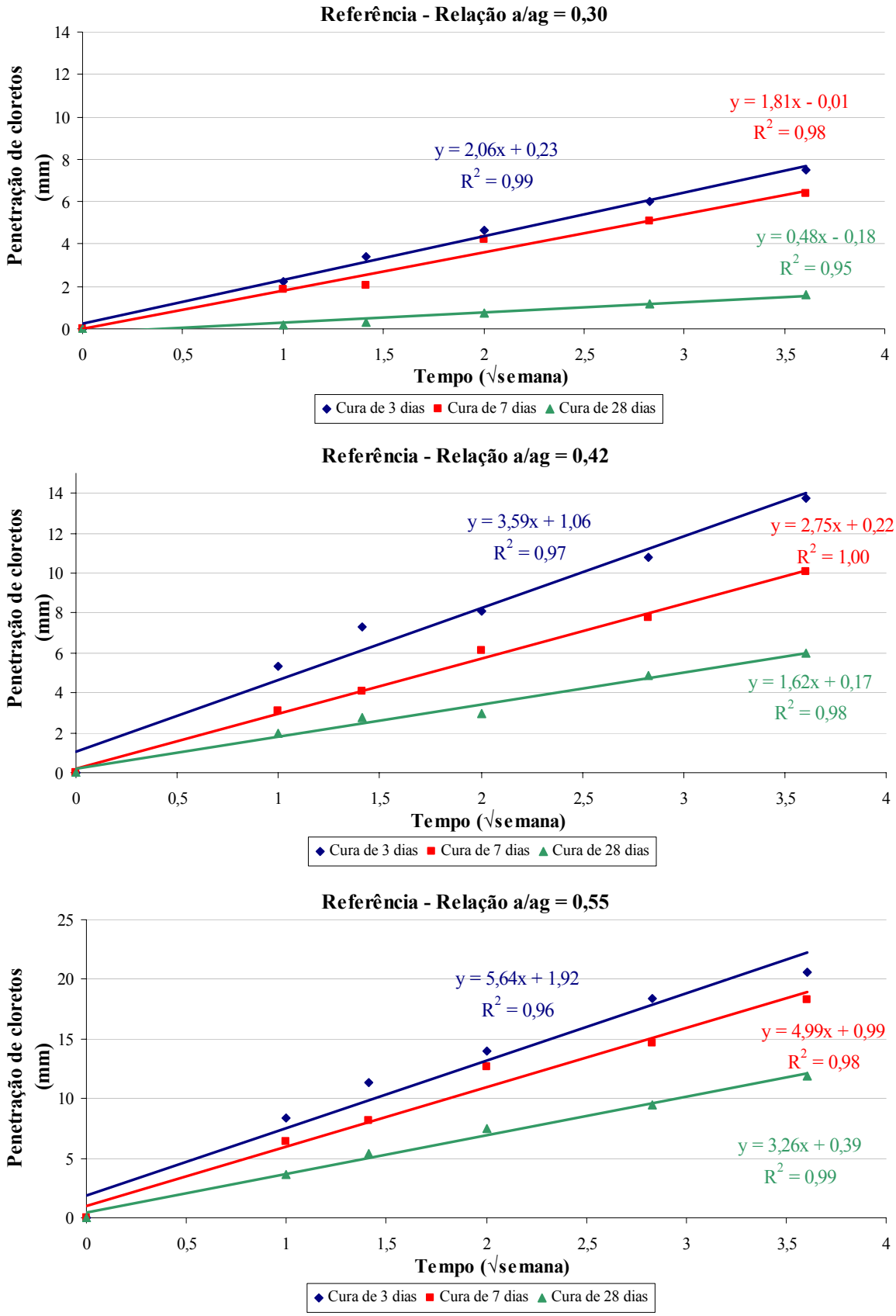

Figura 6.12 – Gráficos para obtenção dos coeficientes k', para a mistura referência

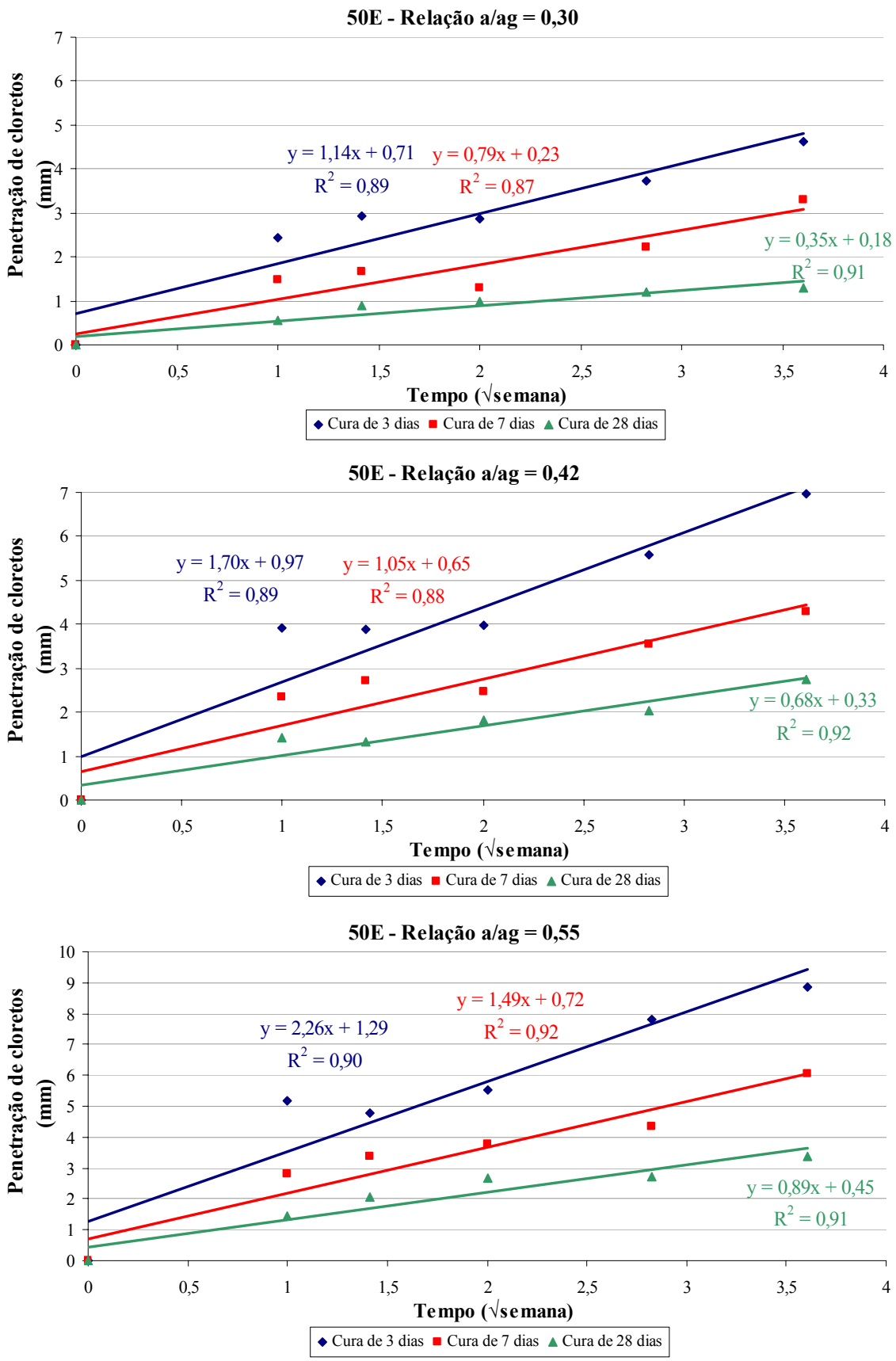

Figura 6.13– Gráficos para obtenção dos coeficientes k', para a mistura 50E

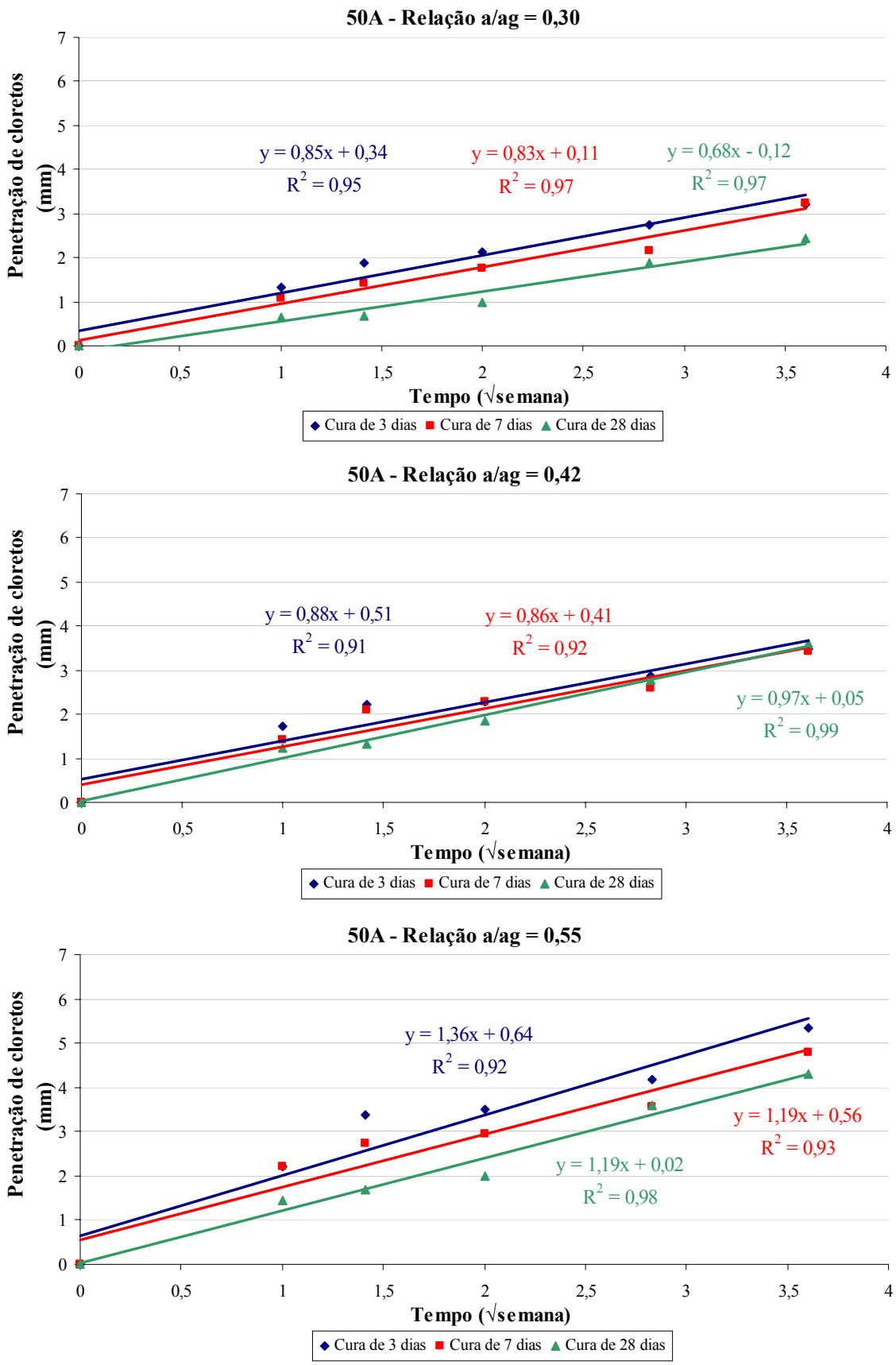

Figura 6.14 – Gráficos para obtenção dos coeficientes k', para a mistura 70E

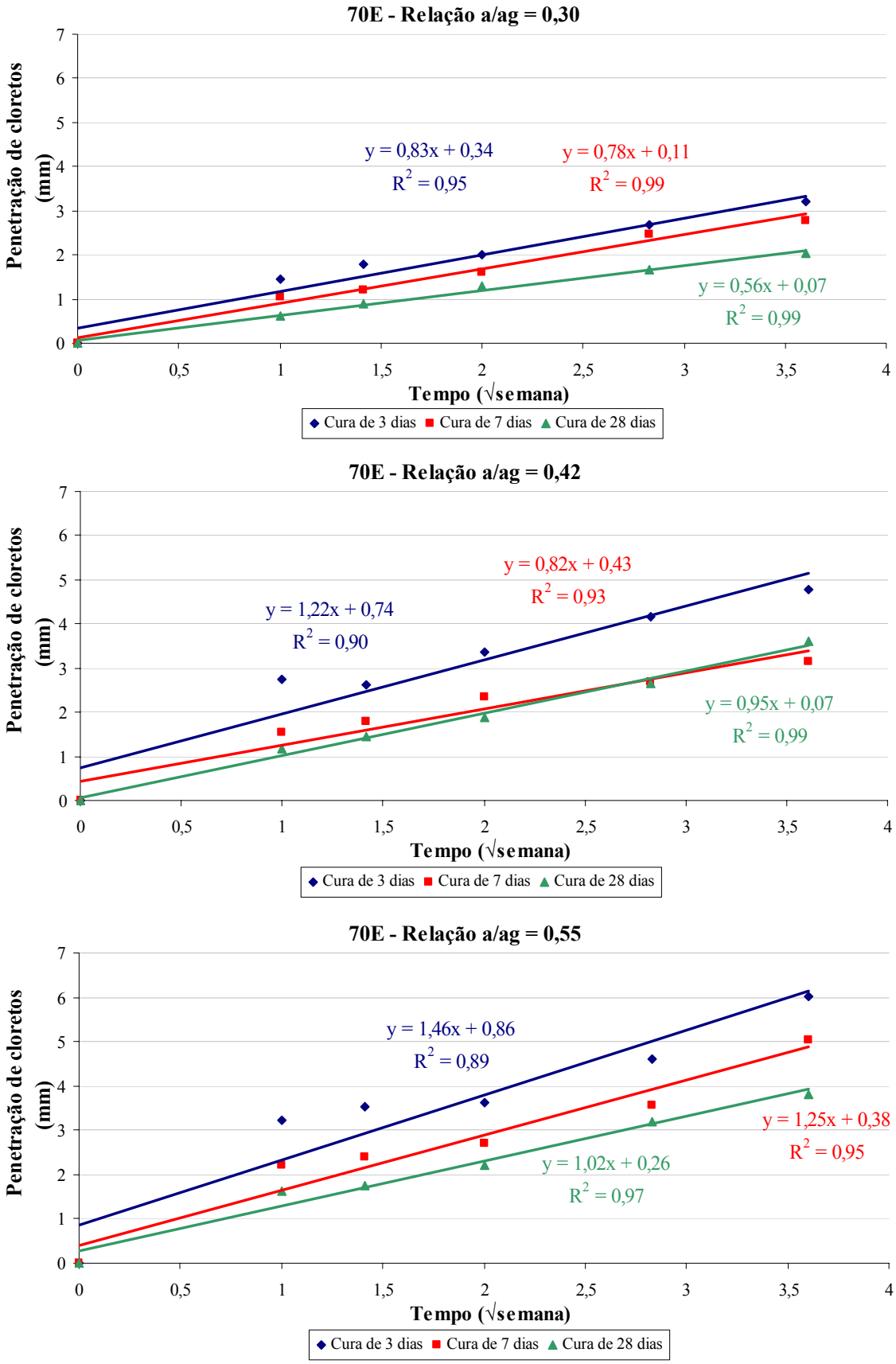

Figura 6.15 – Gráficos para obtenção dos coeficientes k', para a mistura 50A

A Figura 6.16 elucida a evolução do coeficiente k', de acordo com a variação das idades de cura. O primeiro aspecto a ser evidenciado é a diferença de comportamento entre as misturas com e sem escória. Na mistura de referência ocorre uma grande redução nos resultados de três para 28 dias de cura, enquanto que nas demais, contendo escória, a redução entre estas duas idades de cura é diminuída drasticamente.

A Figura 6.17 demonstra um ponto de vista diferente, esclarecendo as diferenças entre as relações a/ag. Da mesma forma, ocorre comportamento diferencial entre a mistura de referência e as demais. No concreto de referência, os resultados para as diferentes relações a/ag, numa mesma mistura, apresentam grande desigualdades, enquanto que a adição de escória causou uma grande aproximação dos mesmos. A mistura 50A foi a que mais homogeneizou os desempenhos.

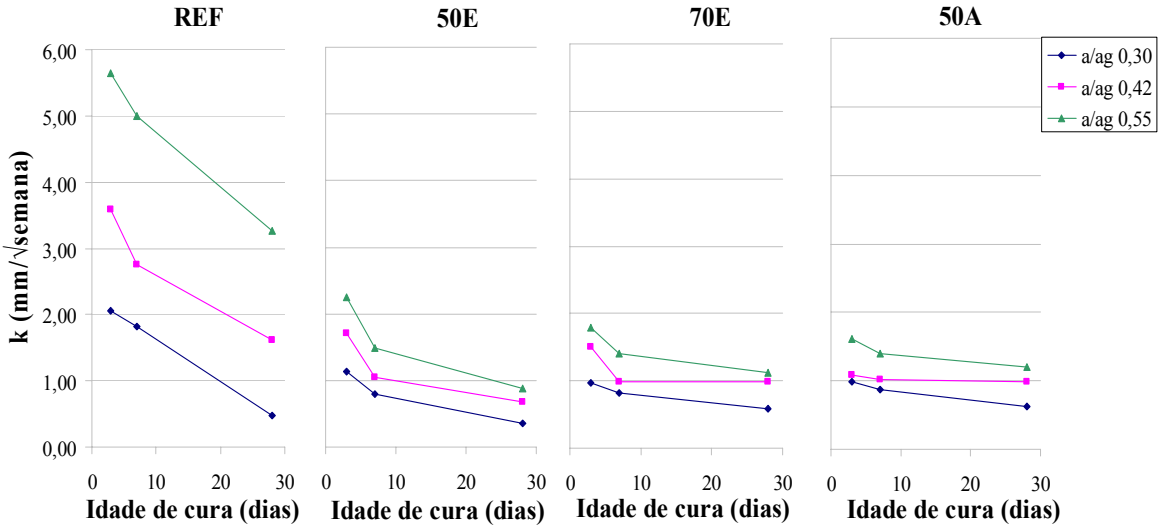

Figura 6.16 – Comportamento do coeficiente k', com o aumento da idade de cura

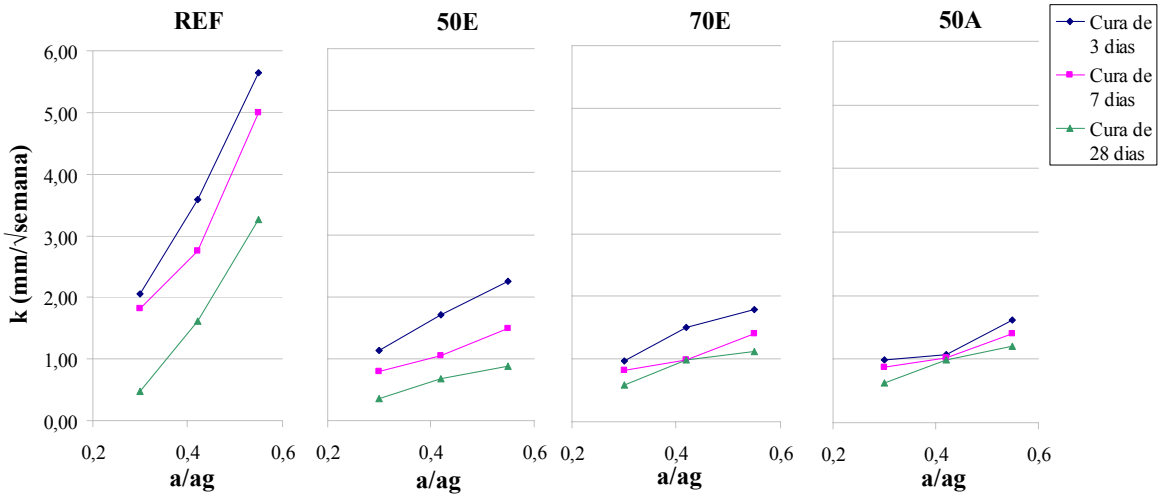

Figura 6.17 – Comportamento do coeficiente k', com o aumento da relação a/ag

O objetivo da Figura 6.18 é representar a variação ocorrida pela mudança na composição do aglomerante. Nas misturas de relação a/ag 0,30, ocorreu um comportamento diferenciado no período de cura de 28 dias, onde os resultados de todas as misturas foram bastante homogêneos, sendo a única em que a mistura de referência implicou em menor coeficiente de penetração do que os concretos contendo escória (no caso, menor que o 70E e o 50A). Fato destacável ocorreu nos concretos de relação a/ag 0,42, onde a mudança de prazo de cura de sete para 28 dias foi indiferente para as misturas 70E e 50A. Nas misturas de relação a/ag 0,55, destacaram-se as melhorias quanto a adição de escória. Ressalta-se, outra vez, a maior eficiência da escória, quanto maior a relação a/ag.

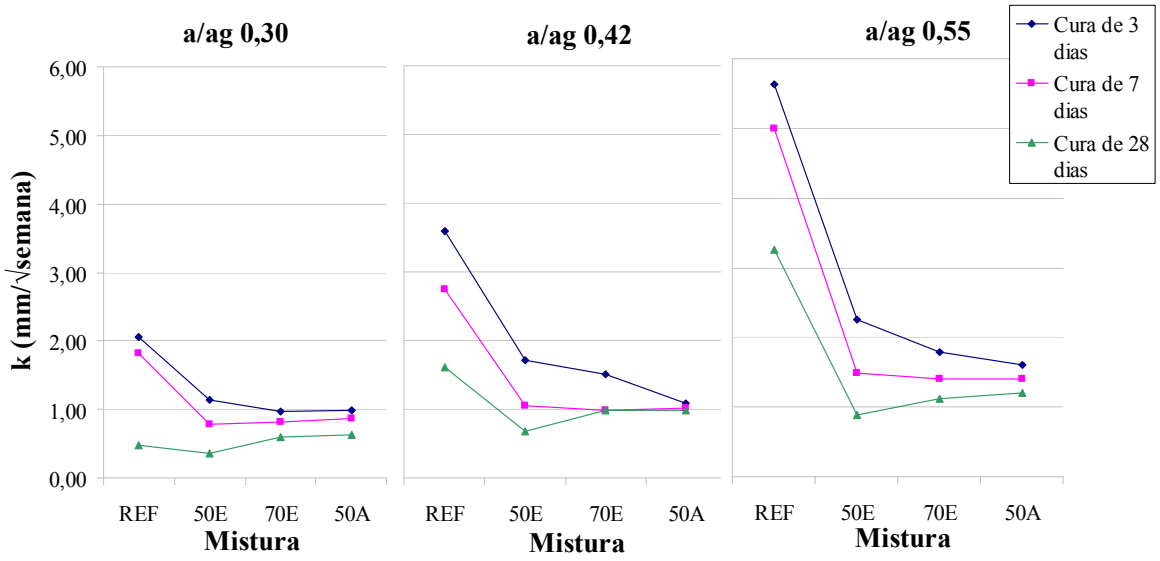

Figura 6.18 – Comportamento do coeficiente k', com mudança no aglomerante

Os dados apresentados na Tabela 6.18, são referentes aos índices de penetração (relação $k'_{mistura}/k'_{referência}$). Dentre as alterações decorrentes da substituição do coeficiente k pelo k', ocorreu uma grande diminuição dos índices de penetração em todas as misturas com 28 dias de cura e relação a/ag 0,30 (Tabela 6.19), resultando na mistura 50E valores menores do que os de referência (diferentemente de quando utilizado o coeficiente k). As demais mudanças relevantes foram ocasionadas na mistura 50E (até 10,44%), e na relação a/ag 0,42 e cura de 28 dias da mistura 50A (10,72%). No restante, a alteração foi no máximo de 4,31%. O ativador demonstrou maior eficiência que os demais, apenas no prazo de cura de 3 dias.

Tabela 6.18 – Índices de penetração ($I_{k'}$), em relação ao concreto de referência

Mistura	A/AG	Índice de penetração $I_{k'} = k'_{mistura}/k'_{referência}$ (%) Cura de		
		3 dias	7 dias	28 dias
REF	**0,30**	100,0%	100,0%	100,0%
	0,42	100,0%	100,0%	100,0%
	0,55	100,0%	100,0%	100,0%
50E	**0,30**	55,3%	43,4%	74,4%
	0,42	47,5%	38,3%	42,0%
	0,55	40,0%	29,8%	27,2%
70E	**0,30**	46,8%	45,3%	123,9%
	0,42	42,0%	36,0%	60,7%
	0,55	31,8%	28,0%	34,2%
50A	**0,30**	47,8%	48,2%	132,5%
	0,42	30,1%	37,2%	61,1%
	0,55	28,6%	28,2%	36,7%

Tabela 6.19 – Variação do índice de penetração, em decorrência da utilização do coeficiente k ou k'

Mistura	A/AG	Variação do índice de penetração ($I_{k'}$ -I_k)(%) Cura de		
		3 dias	7 dias	28 dias
50E	**0,30**	-10,44	-5,05	-30,47
	0,42	-4,50	-7,76	-5,90
	0,55	-3,10	-3,04	-3,82
70E	**0,30**	1,91	-0,08	-21,91
	0,42	4,31	-1,74	2,42
	0,55	3,72	2,01	1,53
50A	**0,30**	1,97	-0,06	-23,50
	0,42	3,05	1,17	10,72
	0,55	3,37	1,95	1,58

Nos dados apresentados na Tabela 6.20 é notável que a diferença de cura, de três para sete dias é mais eficiente na mistura 50E, causando as maiores reduções (31% a 38%), de forma homogênea em todas as relações a/ag. Considerando a eficiência da mudança no prazo de cura de sete para 28 dias, os melhores resultados nas relações a/ag 0,30 e 0,42 foram encontrados na mistura de referência, (74% e 41%, respectivamente) e, para a relação a/ag 0,55 na mistura 50E (40%).

Tabela 6.20 - Variações da penetração de acordo com o aumento dos prazos de cura

Mistura	A/AG	Redução do coeficiente k' (%) Prazos de Cura de 3 para 7 dias	7 para 28 dias
REF	**0,30**	12	74
	0,42	23	41
	0,55	11	35
50E	**0,30**	31	55
	0,42	38	36
	0,55	34	40
70E	**0,30**	15	28
	0,42	34	01
	0,55	22	20
50A	**0,30**	11	28
	0,42	05	03
	0,55	13	15

A Tabela 6.21 apresenta os índices de penetração, comparando as misturas 50A e 50E, e a Figura 6.19, ilustra o comportamento dos coeficientes k' de cada mistura em relação aos prazos de cura. Em ambos percebe-se que o ativador exerce influência benéfica quando aplicados prazos de cura de até sete dias, exceto na relação a/ag 0,30, onde isto é verificado somente com cura de três dias. Estendendo-se a cura até 28 dias, os melhores desempenhos são do concreto sem ativador. Mais uma vez, comprova-se a atuação eficiente do ativador químico até a idade de sete dias.

Tabela 6.21 – Índice de penetração entre as misturas 50A e 50E

A/AG	Índice de penetração (k'_{50A}/k'_{50E}) Cura de 3 dias	7 dias	28 dias
0,30	0,86	1,11	1,78
0,42	0,63	0,97	1,46
0,55	0,71	0,95	1,35

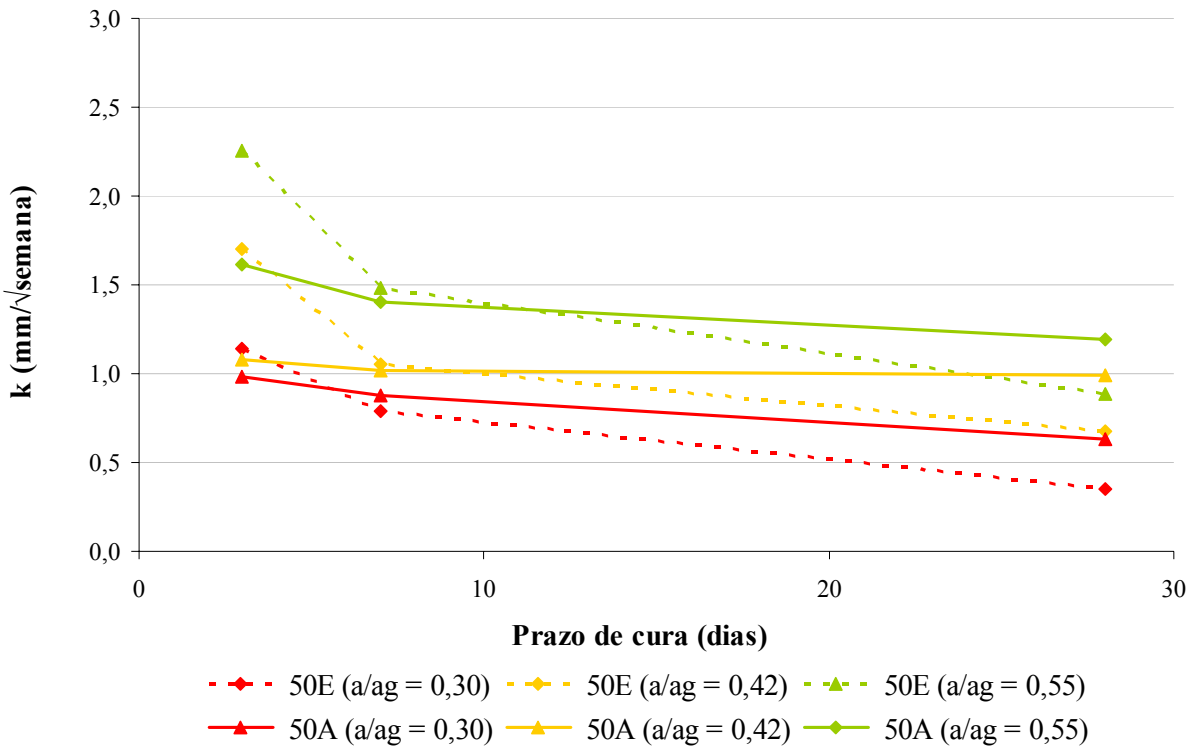

Figura 6.19 – Evolução do coeficiente de penetração para misturas contendo 50% de escória, com e sem ativador

Analisando as gráficos de obtenção dos coeficientes de penetração (k e k') é possível afirmar que a equação proposta por Wee et al. (2000), simbolizada por k', ajustou-se de maneira mais adequada aos resultados obtidos no ensaio de penetração de cloretos por imersão (maiores coeficientes de determinação). Em razão disso, optou-se por fazer uso dos coeficientes k', para representação do desempenho dos concretos analisados quanto à penetração de cloretos neste ensaio.

6.5. Condutividade elétrica específica da solução dos poros

Na Tabela 6.22 são apresentados os resultados de condutividade elétrica específica da solução dos poros, obtidas de amostras de pastas das misturas aglomerantes investigadas, nas três relações a/ag e nas idades de 3, 7, 28 e 91 dias. As análises mais detalhadas sobre sua composição serão objeto de discussão em outra dissertação. Os resultados apresentados servirão para confronto com os resultados obtidos no presente trabalho.

No entanto, vale citar que ocorre diminuição do seu valor, para todas as relações a/ag e misturas investigadas, com aumento no prazo de cura. Isso é devido principalmente à redução no pH, uma vez que as hidroxilas são os íons mais condutores, e a provável incorporação de parte dos álcalis (Na, K) pelos produtos de hidratação.

A redução da condutividade elétrica específica devido à incorporação de escória deve-se, principalmente, pela diminuição no teor de cimento e conseqüente redução no teor de hidroxilas, sendo mais acentuada com o aumento no teor de substituição, 50% para 70%.

Nas misturas em que foi utilizado o ativador químico, Na_2SO_4, observa-se aumento na condutividade elétrica específica, devido ao aumento no pH proporcionado pelo ativador.

Tabela 6.22 – Resultados obtidos para condutividade elétrica da solução dos poros

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

6.6. Volume de intrusão de mercúrio

Na Tabela 6.23 são apresentados os resultados dos ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio, para todas as misturas aglomerantes investigadas e relações a/ag adotadas, 0,30, 0,42 e 0,55, nas idades de 28 e 91 dias. Os ensaios foram realizados em aparelho da marca MICROPORE, com capacidade para determinação de diâmetro de poro de até 3nm em amostras de pastas com material aglomerante e quantidade de aditivo semelhantes aos do concreto correspondente. Nesta tabela são apresentados o volume de intrusão de

mercúrio, o diâmetro crítico, bem como o volume de intrusão de mercúrio para diâmetro de poro menor do que 50nm e maior do que 50nm. As análises mais detalhadas serão objeto de discussão em outra dissertação. Os resultados apresentados servirão para confronto com os resultados obtidos no presente trabalho. O diâmetro crítico tem como definição ser a menor dimensão de poros acima da qual se estabelece uma trajetória de poros conectados (BRIZOLA, 2007). É considerado o ponto de mudança brusca da curva (volume intrudido x Ø dos poros), onde ocorre grande aumento de pressão e pouca diminuição do diâmetro dos poros.

Vale citar, entretanto, a redução no volume de intrusão de mercúrio com a diminuição na relação a/ag e no aumento no prazo de cura para todas as misturas investigadas. Assim como o aumento na proporção de poros menores do que 50nm das misturas em que parte do cimento foi substituída por escória, característica do refinamento dos poros proporcionada por essa adição mineral.

Tabela 6.23 – Resultados obtidos no ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio

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

6.7. Integração de resultados

O objetivo da integração dos resultados dos ensaios é melhor esclarecer as alterações ocorridas nos concretos estudados, resultantes da substituição parcial do CPB por escória e da adição do ativador químico, e suas conseqüências nos ensaios, de penetração de cloretos, realizados durante a pesquisa. Com esta finalidade, serão correlacionados os resultados dos dois ensaios de penetração de cloretos, além de analisá-los frente ao volume total de intrusão de mercúrio, à condutividade específica da solução dos poros e à resistência à compressão.

6.7.1. ASTM C1202/05 x EPCI

Esta primeira análise tem por finalidade comparar dois procedimentos reconhecidos mundialmente para caracterização de concretos quanto à agressividade dos íons cloretos. Apesar disso, Wee et al. (2000) afirmam que o coeficiente k e a carga passante são controlados por fatores diferentes. Enquanto o ensaio acelerado é influenciado pela porosidade e pela condutividade elétrica específica da solução dos poros, o EPCI é controlado pela estrutura de poros e pela capacidade de fixação e restrição à mobilidade dos íons cloreto.

Pesquisadores como Shi et al. (1998) e Wee et al. (2000) relatam que a utilização do ensaio descrito pela ASTM não é apropriado para concretos contendo adições minerais. Sendo o ensaio EPCI bastante realístico, pois representa o comportamento de um material submerso sem influência de mecanismos externos (como no caso do ensaio acelerado que, a penetração é forçada por uma diferença de potencial), ele pode ser tomado como base para esta comparação.

Examinando a Figura 6.20 é possível observar que à medida que são acrescidas a escória e o ativador, o coeficiente de determinação entre os dois ensaios decresce de maneira expressiva (REF = 0,87; 50E = 0,82; 70E = 0,66; 50A = 0,43). Shi et al. (1998) explicam que isso ocorre devido às grandes alterações na solução dos poros, afetando portanto, a condutividade específica destas misturas. Outro motivo seria de que, a capacidade de fixação dos íons cloreto é diferenciada nos dois ensaios, pois no ensaio segundo a ASTM C12020/05, existe uma grande força resultante da cinética dos íons, não permitindo ocorrer a combinação pela interação química (WEE et al., 2000), A combinação dos cloretos, com compostos como

C_3A e C_4AF, além de impedir a passagem dos íons por combinação, resultam também na obstrução dos poros. A adição de escória no concreto possibilita uma maior taxa de combinação de cloretos (DHIR et al., 2006), sendo assim, esta também é uma das explicações do porque que em concretos que a contenham, a correlação entre os dois ensaios seja baixa, e diminua ainda mais, com o aumento do seu teor (o aumento de 50% para 70%, diminui o coeficiente de determinação de 0,82 para 0,66)(Figura 6.20).

Outro aspecto que pode ser discutido é a diferença de comportamento dos índices de carga passante e penetração (Tabelas 6.8 e 6.18), que comparam a eficiência das misturas com escória, com o concreto de referência. Comparando as duas Tabelas é possível verificar que, com prazo de cura de 3 dias, a adição de escória ocasiona os melhores efeitos no ensaio por imersão. A partir dos sete dias de cura, a sua eficiência passa a ser maior no ensaio da ASTM C1202/05.

A reta descrita em vermelho na Figura 6.20 é uma regressão realizada entre todos os dados inter-relacionados por prazos de cura e relação a/ag. O coeficiente de regressão baixo (r^2 = 0,69) condiz com a idéia de que os ensaios possuem particularidades e não podem ser correlacionados quando utilizados diferentes tipos de aglomerantes. Buscando elucidar as características que influenciam cada ensaio, serão apresentadas a seguir as relações destes ensaios com os ensaios de porosimetria e condutividade elétrica da solução dos poros.

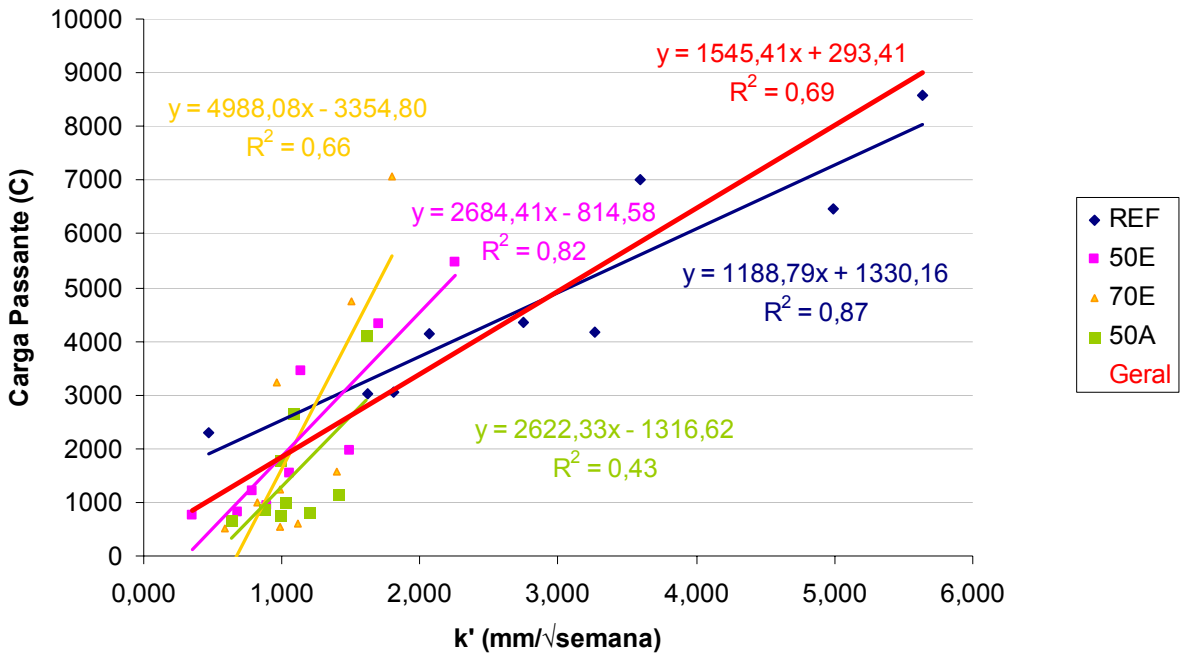

Figura 6.20 – Correlação entre a carga passante e o coeficiente de penetração k', com prazos de cura de 3, 7 e 28 dias

6.7.2. ASTM C1202/05 x porosimetria por intrusão de mercúrio

Na tentativa de explicar os pontos diferenciais de cada ensaio, a análise da Figura 6.21 mostra uma comparação detalhada por idade de cura. Desta maneira, é possível observar a ocorrência de uma projeção linear, com altos coeficientes de determinação ($r^2 \geq 0,86$) de acordo com o tipo de mistura (entre as três relações a/ag). Porém, não se pode afirmar que a carga passante é função exclusiva da porosidade total, por dois fatores: primeiramente por cada tipo de mistura possuir um comportamento diferenciado; segundo, por nem mesmo em concretos com mesma mistura, mas com diferentes prazos de cura, ocorrem boas correlações (Figura 6.22).

As Figuras 6.21 e 6.22 indicam claramente que a alteração do tempo de cura de 28 para 91 dias causa efeitos diferenciados em cada ensaio, comprovando uma maior alteração, devido mudança de tempo de cura, nas propriedades de carga passante do que no volume de poros (Tabela 6.24).

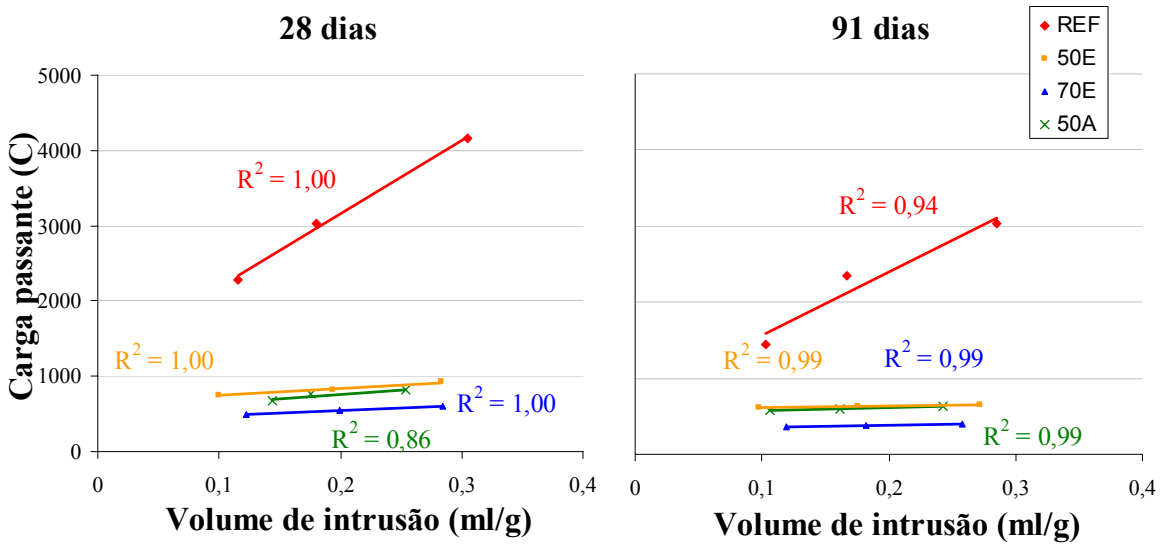

Figura 6.21 – Correlação entre a carga passante e o volume de intrusão de mercúrio, por tipo de mistura, nas idades de cura de 28 e 91 dias

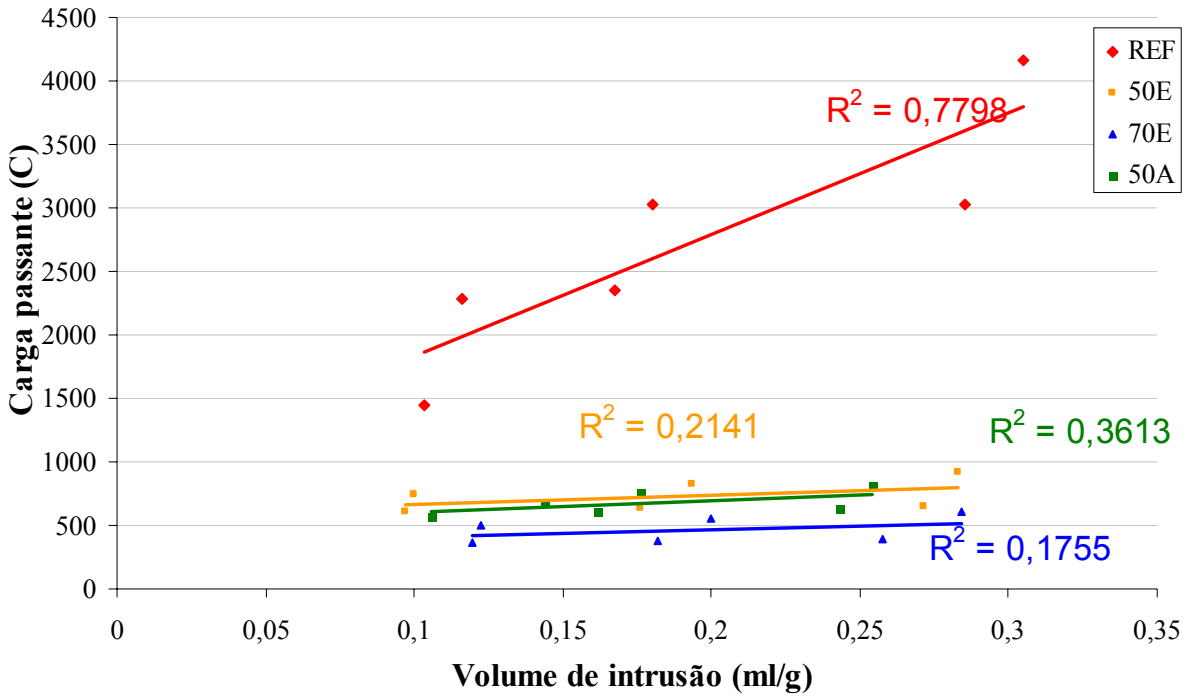

Figura 6.22 – Correlação entre a carga passante e o volume de intrusão de mercúrio, por tipo de mistura

Tabela 6.24 – Redução do volume de intrusão de mercúrio e da carga passante entre os ensaios de 28 e 91 dias

Propriedade	Redução da propriedade ocorrida entre os ensaios de 28 e 91 dias (%)											
	REF			50E			70E			50A		
	a/ag			a/ag			a/ag			a/ag		
	0,30	0,42	0,55	0,30	0,42	0,55	0,30	0,42	0,55	0,30	0,42	0,55
Volume de intrusão	11%	7%	6%	3%	9%	4%	2%	9%	9%	27%	8%	4%
Carga passante	37%	22%	27%	18%	23%	29%	28%	32%	35%	15%	21%	22%

6.7.3. EPCI x porosimetria por intrusão de mercúrio

Os dados de porosimetria foram também analisados em integração com o coeficiente de penetração (Figura 6.23). Como o esperado, os resultados foram bem correlacionáveis, com coeficientes de determinação igual ou superior a 0,86 ($r^2 \geq 0,86$), porém com desempenhos diferentes por tipo de misturas. Todas as misturas contendo escória, mesmo nas relações a/ag mais altas, que resultam em altos volumes de intrusão de mercúrio, ficaram

sujeitas a baixos coeficientes k'. Isto ocorre, possivelmente, pelo aumento da capacidade de fixação dos íons cloretos, nas misturas contendo escória.

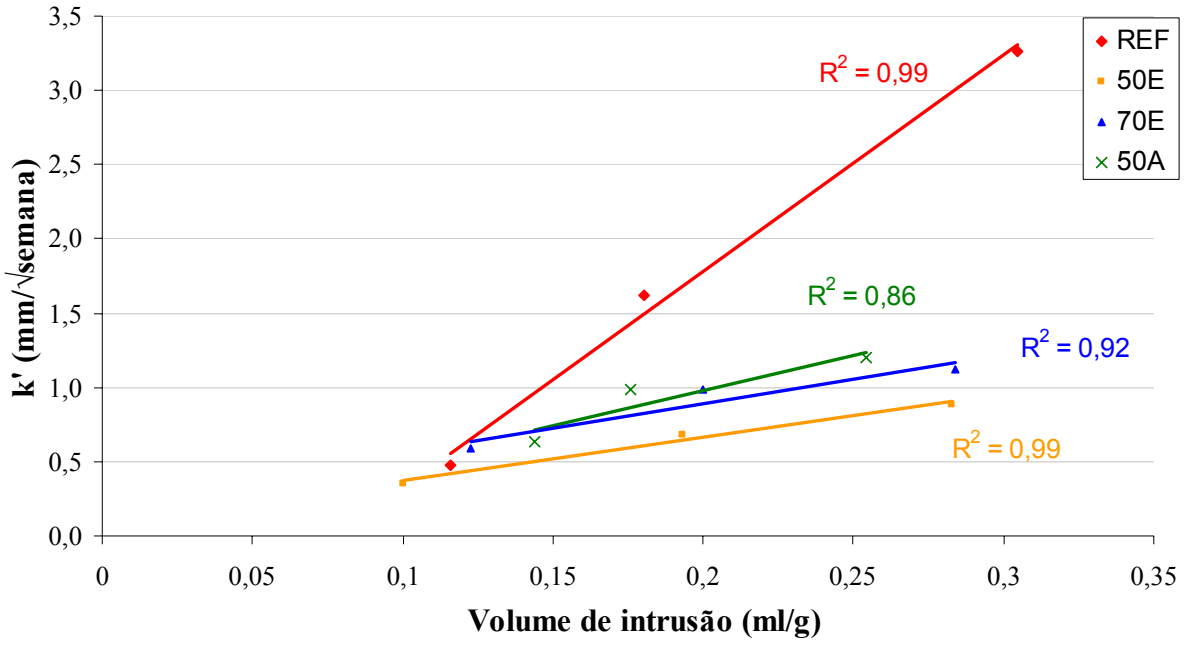

Figura 6.23 – Correlação entre o coeficiente de penetração e o volume de intrusão de mercúrio, para um mesmo prazo de cura de 28 dias

Como os ensaios foram realizados em materiais diferentes (porosimetria em pasta de cimento e EPCI em concreto) outro fator pode ter influenciado este resultado. Em concretos, existe uma zona de alta porosidade e fragilidade, composta por grandes, e orientados, cristais de CH, situada na superfície entre pasta e o agregado graúdo, chamada de zona de transição (GAO et al. 2005). Entretanto, quando a escória é adicionada na produção do concreto, ela é responsável por uma grande densificação e desorientação dos cristais de CH desta zona, diminuindo consideravelmente a penetração dos íons cloreto no material.

6.7.4. ASTM C1202/05 x condutividade elétrica específica da solução dos poros

A integração dos resultados do ensaio descrito pela ASTM C1202/05 e os de condutividade elétrica da solução dos poros são de difícil correlação. O principal motivo é que concretos com menores relações a/ag, produzem soluções dos poros com maiores

condutividades elétricas específicas, em virtude da maior concentração iônica e, portanto, deveriam permitir maior passagem de corrente elétrica quando submetidos à mesma diferença de potencial (como no caso do ensaio acelerado de penetração de cloretos). Porém Hoppe (2005), estudando a resistividade elétrica de concretos, explica que isto não acontece devido ao efeito de compacidade do concreto ser mais expressivo que a variação na condutividade elétrica. Então, apesar de parecer contraditório, o autor afirma que, analisando-se uma mesma mistura, de acordo com a variação da relação a/ag, o aumento da resistividade elétrica do concreto é acompanhado pelo aumento da condutividade elétrica da solução dos poros.

Este resultado se confirma e pode ser visualizado na Figura 6.24. Nesta Figura é possível perceber que, com exceção da mistura 50A com 28 dias de cura (r^2 = 0,70) os resultados do ensaio descrito pela ASTM C1202/05 e a condutividade elétrica foram bem correlacionados ($r^2 \geq 0,81$), de forma inversamente proporcional, ou seja, com o aumento da carga passante, obtém-se a diminuição da condutividade elétrica específica.

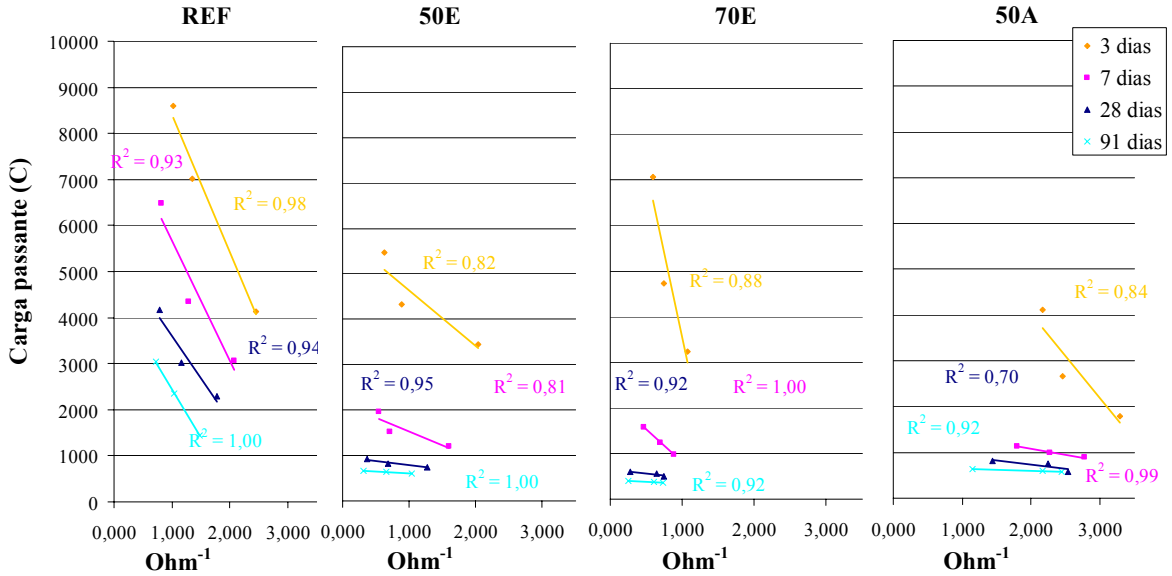

Figura 6.24 – Correlação entre carga passante e condutividade elétrica específica, por mistura e idade de cura

A partir destes resultados foi necessário buscar uma forma diferenciada para analisar o relacionamento entre a penetração acelerada de cloretos e a condutividade elétrica. O método que será utilizado a seguir foi mencionado por Schneider (2005). Como as duas principais propriedades que influenciam no processo de transporte de íons no interior do concreto, submetido a uma diferença de potencial, são a porosidade e a condutividade elétrica, estas

propriedades serão correlacionadas à carga passante e comprovando que o ensaio da ASTM C1202/05 é dependente da condutividade elétrica da solução dos poros, como descrito na literatura (Wee et al., 2000; Shi et al., 1998; Schneider, 2005).

As Figuras 6.25, 6.26, 6.27 e 6.28 ilustram a correlação por tipo de mistura, entre os valores de carga passante e volume de intrusão de mercúrio, para mesmas relações a/ag e idade de cura. Por não ficarem definidas boas correlações entre os resultados na análise tradicional, ou seja, entre mesmas misturas e idades de ensaio, foram comparadas misturas com diferentes prazos de cura e relações a/ag. Nestas figuras, existem setas indicando a variação entre as misturas com relação a/ag 0,30 (cura de 28 dias) e a/ag 0,42 (cura de 91 dias), além das ocorrida entre relações a/ag 0,42 (cura de 28 dias) e a/ag 0,55 (cura de 91 dias). A análise destas variações indica que, mesmo com aumentos dos volumes de intrusão de mercúrio, a carga passante quase não se alterou no concreto de referência, além de ter diminuído expressivamente nos concretos contendo escória. Com isso, pode-se concluir que outras variáveis, além do volume de mercúrio intrudido, contribuem para a variação da carga passante, entre elas, a condutividade elétrica.

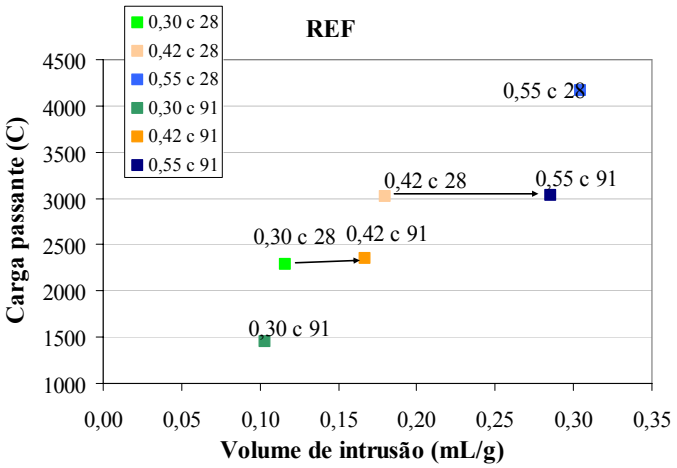

Figura 6.25 – Variação da carga passante com o volume de intrusão, para a mistura de referência, nas idades de 28 e 91 dias

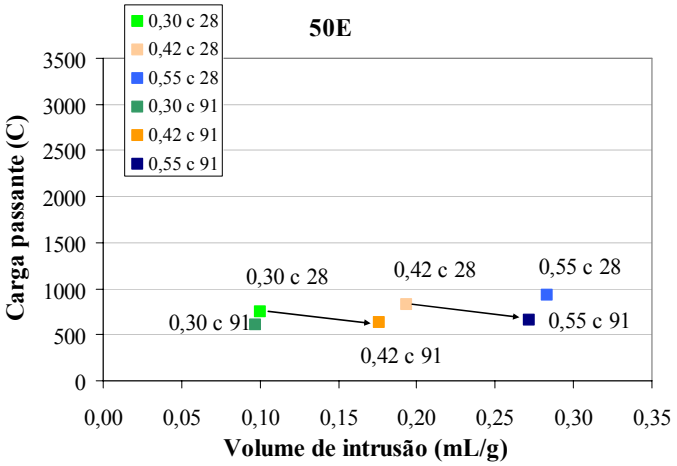

Figura 6.26 – Variação da carga passante com o volume de intrusão, para a mistura 50E, nas idades de 28 e 91 dias

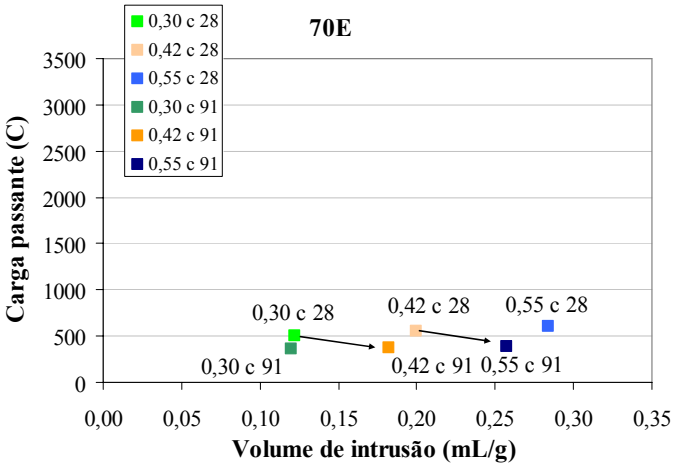

Figura 6.27 – Variação da carga passante com o volume de intrusão, para a mistura 70E, nas idades de 28 e 91 dias

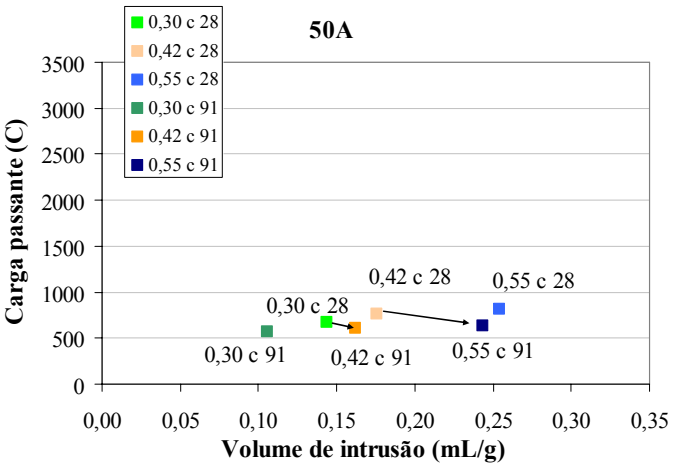

Figura 6.28 – Variação da carga passante com o volume de intrusão, para a mistura de 50A, nas idades de 28 e 91 dias

A Tabela 6.25 confirma as expectativas anteriores, também comprovadas por Schneider (2005), demonstrando que as alterações ocorridas na estrutura de poros foram menos influenciáveis, na carga passante, do que as variações na condutividade elétrica. Nos concretos contendo escória, aumentos do volume de intrusão, foram acompanhados de reduções de carga passante e diminuição da condutividade elétrica. Já no concreto de referência a condutividade elétrica parece não ter tido tanta influência, e seus efeitos, junto com os causados pelo aumento do volume de intrusão, contrabalancearam-se, não causando alterações significativas na carga passante (0% a 3%), corroborando, novamente com os dados de Schneider (2005).

Tabela 6.25 – Variação ocorrida na carga passante, volume de intrusão de mercúrio e condutividade elétrica específica da solução dos poros entre misturas pré-determinadas

Aglomerante	Mistura 1	Mistura 2	Variação de (%)		
			Carga passante	Volume de intrusão	Condutividade elétrica
			$Q_{mistura2}/Q_{mistura1}$	$V_{mistura2}/V_{mistura1}$	$O_{mistura2}/O_{mistura1}$
REF	a/ag 0,30 cura 28 dias	a/ag 0,42 cura 91 dias	3%	44%	-41%
	a/ag 0,42 cura 28 dias	a/ag 0,55 cura 91 dias	0%	58%	-38%
50E	a/ag 0,30 cura 28 dias	a/ag 0,42 cura 91 dias	-15%	76%	-48%
	a/ag 0,42 cura 28 dias	a/ag 0,55 cura 91 dias	-21%	41%	-54%
70E	a/ag 0,30 cura 28 dias	a/ag 0,42 cura 91 dias	-25%	49%	-19%
	a/ag 0,42 cura 28 dias	a/ag 0,55 cura 91 dias	-29%	29%	-61%
50A	a/ag 0,30 cura 28 dias	a/ag 0,42 cura 91 dias	-11%	12%	-15%
	a/ag 0,42 cura 28 dias	a/ag 0,55 cura 91 dias	-17%	38%	-49%

6.7.5. Resistência à compressão axial x EPCI

Considerando os resultados do EPCI mais adequados, que os do ensaio acelerado, para representar a resistência do concreto frente à penetração dos íons cloretos, escolheu-se estes para confrontar com os resultados de resistência à compressão (Figura 6.26).

A análise da Figura 6.29 indica uma boa correlação entre os dois ensaios, baseada em coeficientes de determinação maiores ou iguais a 0,82 ($r^2 \geq 0,82$). As misturas compostas por escória apresentaram desempenhos diferentes da mistura de referência. Avaliando os concretos, de acordo com o aumento da resistência à compressão, percebe-se uma diminuição da influência da escória na penetração de cloretos. Isto está de acordo com o descrito por Schneider (2005), que afirma que a necessidade do uso de escória, para elevar o desempenho frente à penetração de cloretos, é maior quanto menor a resistência à compressão.

A Figura 6.30 ilustra o comportamento encontrado por Schneider (2005), nesta mesma interação, porem utilizando, no lugar do CPB, o CPV-ARI, com relações a/ag 0,35; 0,50; e 0,65. Comprando as Figuras 6.26 e 6.27, pode-se afirmar que a alteração do tipo de cimento utilizado, causa pouca influências obre as relações k' e Fc.

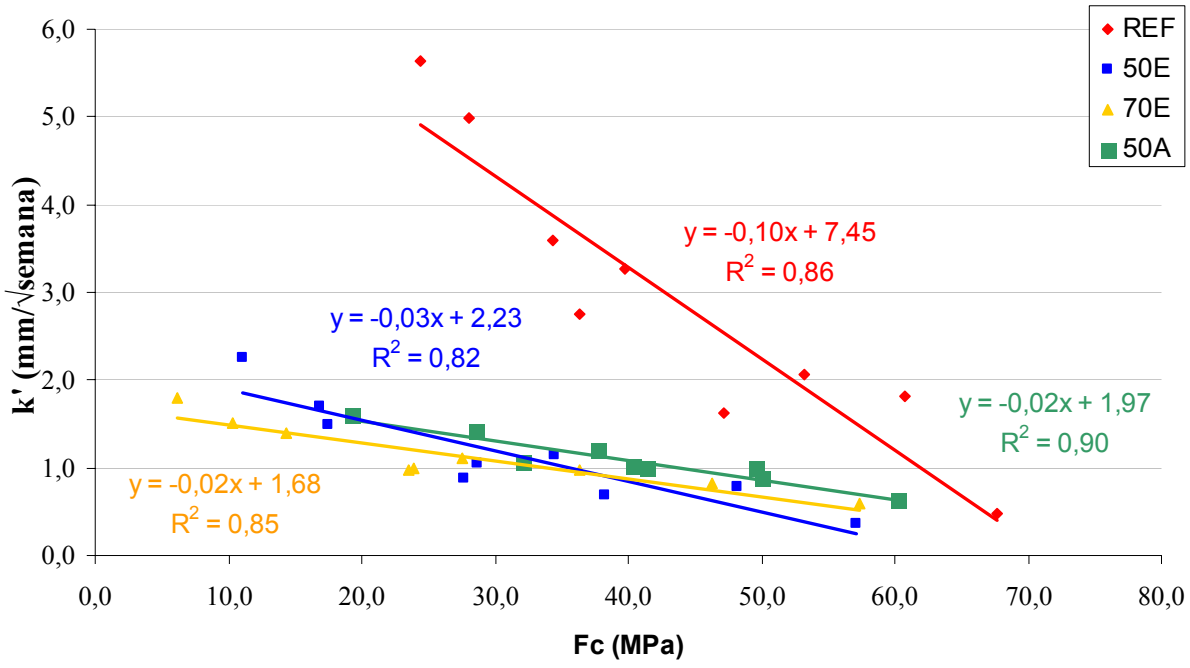

Figura 6.29 – Correlação entre a resistência à compressão axial e o coeficiente de penetração, por tipo de mistura.

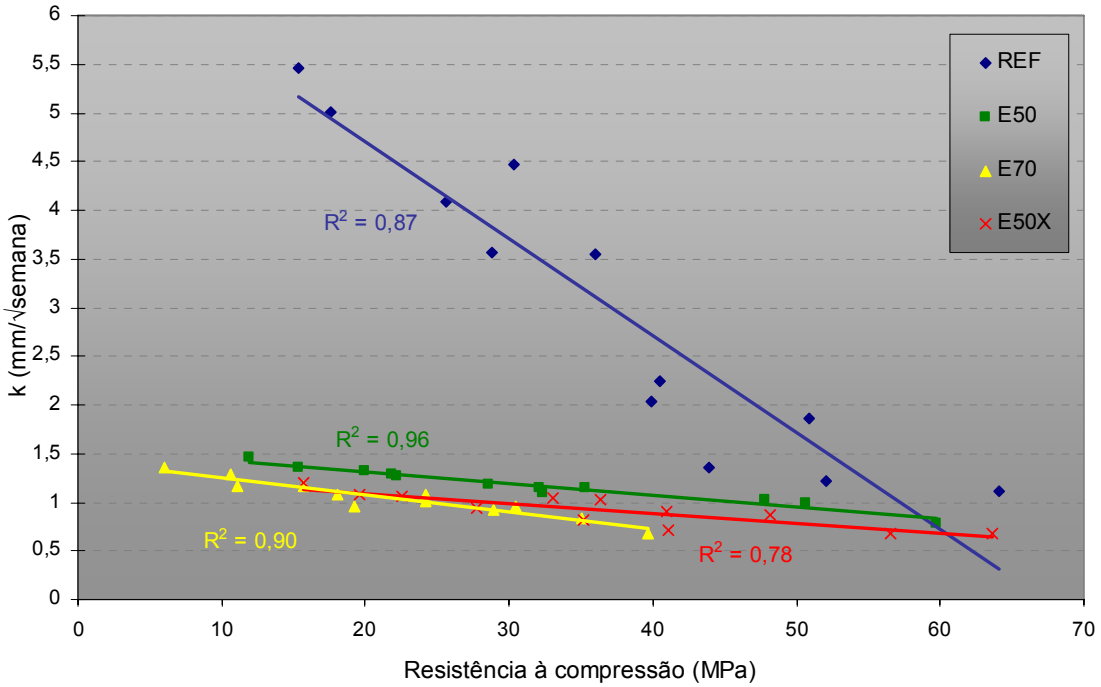

Figura 6.30 – Variação do índice k(mm√semana) com a resistência à compressão (Schneider, 2005)

O esclarecimento desta correlação torna-se fundamental quando planejadas estruturas sujeitas ao ataque por íons cloretos. Isto se justifica, pois com a utilização da escória, mesmo para formulação de concretos com resistências à compressão mais baixas, consegue-se moldar peças suscetíveis às baixas penetrações de íons cloretos, o que não é possível quando utilizado como aglomerante, unicamente o cimento Portland.

6.8. Análise de custos

Sempre que se busca uma qualidade específica para concreto, seja resistência à compressão, ataque por íons cloretos, ou alguma outra característica, é fundamental buscar diversas maneiras de alcançá-la, possibilitando a escolha da alternativa mais viável técnica e economicamente. O objetivo deste item é demonstrar qual dos quatro tipos de misturas utilizadas nesta pesquisa é a mais adequada para cada propriedade analisada. Inicialmente, serão apresentados na Tabela 6.26 os custos por quilo dos materiais, e na Tabela 6.27 os preços por materiais e total por m³ de cada mistura.

Tabela 6.26 – Preços unitários dos materiais

Material	Preço (R$/kg)
Cimento Portland Branco Estrutural	0,63
Escória de Alto Forno	0,20
Ag. Miúdo	0,02
Ag. Graúdo	0,03
Aditivo Superplastificante	13,92
Ativador Químico (Na_2SO_4)	2,50

A Tabela 6.27 apresenta uma estimativa de preços, comparando concretos unicamente pela relação a/ag. Pensando apenas no volume de material, nota-se que, excluindo a mistura 50A, com relação a/ag 0,30, todas as demais misturas contendo escória tornaram-se mais baratas que o concreto de referência, demonstrando a importância do uso da adição mineral, no custo final do concreto.

Tabela 6.27 – Custo dos materiais por m³ de concreto, para as misturas estudadas

Mistura	a/ag	Custo (R$)						
		Cimento Portland Branco Estrutural	Escória de Alto Forno	Ag. Miúdo	Ag. Graúdo	Aditivo	Ativador Químico (Na_2SO_4)	Total R$/m³
REF	0,30	323,54	-	12,70	31,80	35,17	-	403,21
	0,42	260,77	-	14,11	30,99	4,78	-	310,65
	0,55	193,80	-	16,24	31,01	0,00	-	241,05
50E	0,30	161,85	51,38	12,58	31,82	27,18	-	284,81
	0,42	130,39	41,39	14,01	30,99	3,86	-	220,64
	0,55	95,74	30,39	16,29	31,07	0,00	-	173,50
70E	0,30	97,14	71,95	12,54	31,82	21,46	-	234,91
	0,42	78,22	57,94	13,97	30,99	4,03	-	185,15
	0,55	57,44	42,55	16,27	31,07	0,00	-	147,32
50A	0,30	160,40	50,92	12,47	31,53	151,48	50,92	457,72
	0,42	130,40	41,40	14,01	31,00	1,96	41,40	260,16
	0,55	95,74	30,39	16,29	31,07	0,00	30,39	203,89

Da mesma forma realizada com os demais resultados, o custo relaciona-se fortemente com a relação a/ag, por meio de equações exponenciais, do tipo $\mathbf{C = A/B^x}$ (onde: C = custo; A

e B = constantes; e x = a/ag), apresentadas na Tabela 6.28. Valores de $r^2 \approx 1$, confirmam uma ótima correlação.

Tabela 6.28 – Custo por m³ de concreto, estimado pela expressão $C = A/B^x$

Mistura	Coeficientes			Custo (R$/m³)		
	A	B	r^2	0,3	0,42	0,55
REF	743,639	7,817	1,00	401	314	240
50E	512,870	7,248	1,00	283	223	173
70E	409,041	6,455	1,00	234	187	147
50A	1129,749	24,924	0,94	431	293	193

Analisando o custo em relação ao desempenho dos concretos na resistência à compressão axial, dá-se origem à Figura 6.31, a qual ilustra o custo para obtenção de cada unidade de resistência (1 MPa). Nitidamente vê-se que, na busca de resistências à compressão aos três dias, a utilização da escória, apesar de individualmente ter custo muito inferior ao cimento, não consegue atingir resistências comparáveis à mistura de referência, tornando a relação R$/MPa elevada. Isto se deve ao fato da escória reagir lentamente, e começar a demonstrar suas ações benéficas a partir do sétimo dia.

Observando ainda a Figura 6.31, nota-se, já aos sete dias, um panorama completamente diferente, apresentando certa homogeneidade de valores, onde a adição de escória resulta em concretos de menor custo/MPa, quando comparados ao de referência, em todas as misturas de relação a/ag 0,42, além do 70E, a/ag 0,30, e 50A a/ag 0,55. Aos 28 dias, o uso da escória é benéfico para a relação R$/MPa em todas as misturas e relações a/ag estudados, destacando-se a mistura 70E, por possuir os melhores resultados em todas as relações a/ag. Na idade de 91 dias, os concretos de referência e 50A tornam-se bastante similares, enquanto o 50E e o 70E repercutem em um custo consideravelmente mais baixo. Estes resultados são semelhantes aos encontrados por Schneider (2005), exceto para a mistura 70E, na qual o autor relata desempenhos inferiores.

A comparação dos dados será feita, utilizando-se o recurso das equações exponenciais, demonstradas em cada análise individual dos ensaios, relacionando cada propriedade a uma certa relação a/ag. Comparações das misturas, em igualdade de desempenhos, frente à resistência à compressão podem ser visualizadas nas Tabelas 6.29, 6.30, 6.31 e 6.32. Para a determinação dos níveis de resistência foram escolhidos valores variando de 10 em 10 MPa,

sendo seus extremos, de no máximo 10% dos limites das relações a/ag estudadas (0,27 a 0,61).

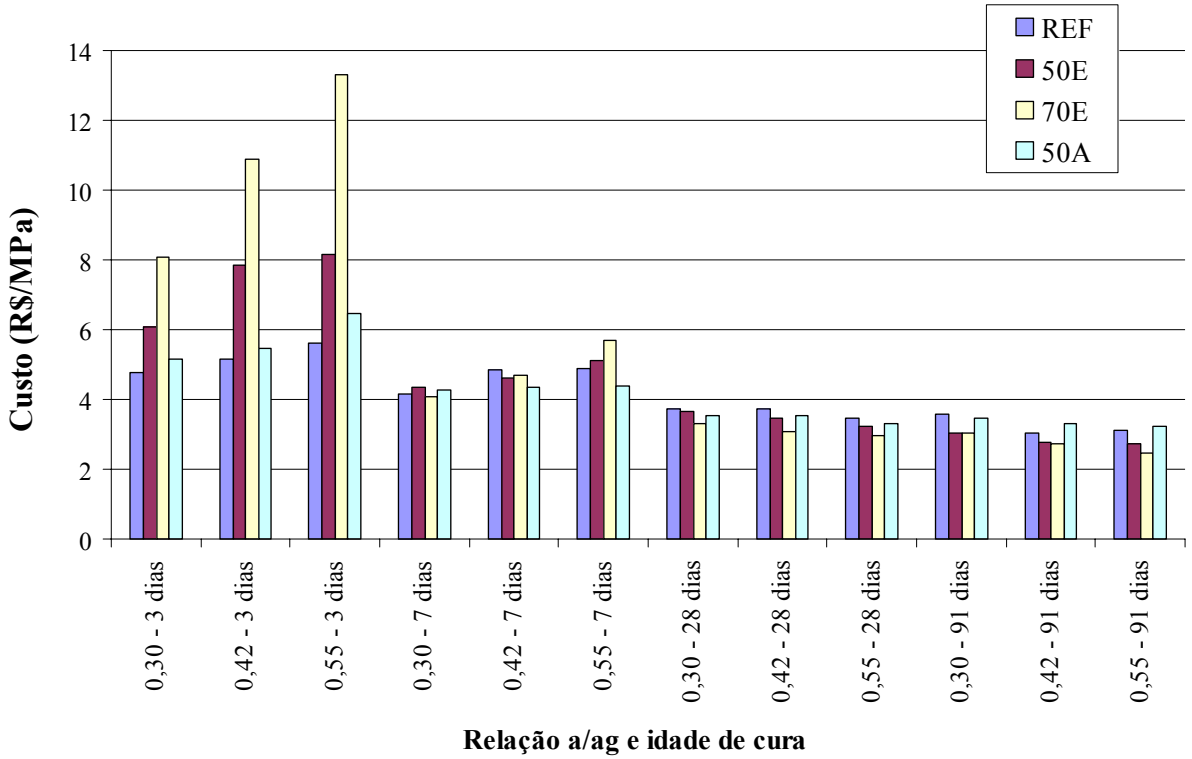

Figura 6.31 – Análise do custo/MPa, por idade tipo de mistura, relação a/ag e idade de cura

Na Tabela 6.29 são apresentadas as características de cada mistura (relação a/ag, penetração de cloretos segundo ECPI e ASTM C 1202/05, e custo/m^3) considerando tempo de cura de 3 dias para os níveis de resistência de 10 MPa a 40 MPa. Para o nível de 10 MPa não puderam ser consideradas as misturas REF e 50A, em 30 MPa foi descartada a 70E e a 40 MPa foram excluídas as misturas 50E e 70E, por ficarem fora dos limites de relação a/ag. No nível de 10 MPa, as misturas 50E e 70E obtiveram desempenhos semelhantes, porém, tendo o 70E um k' relativamente menor. Para 20 MPa, o menor custo foi da mistura 50A, e o menor coeficiente k' no 70E, sendo o único considerado com risco moderado de penetração aos íons cloreto. Para o nível de resistência de 30 MPa, o menor custo foi o da mistura 50E, apresentando um k' semelhante à mistura contendo ativador. Atingindo o nível de 40 MPa, apesar do risco de penetração de cloretos e o coeficiente k' serem menores na mistura 50A, o menor custo foi no concreto referência.

Tabela 6.29 – Relação a/ag, coeficiente k', risco de penetração de cloretos e custo, para um mesmo nível de resistência aos três dias

Nível de resistência	Mistura	a/ag	k' (mm/√semana)	Risco de penetração de Cl^- (ASTM C1202/05)*	Custo (R$/m³)
10 MPa	REF	n/c	-	-	-
	50E	0,56	2,37	Alto	R$ 169,16
	70E	0,45	1,47	Alto	R$ 176,73
	50A	n/c	-	-	-
20 MPa	REF	0,61	7,25	Alto	R$ 212,13
	50E	0,41	1,56	Alto	R$ 227,68
	70E	0,32	1,06	Moderado	R$ 225,21
	50A	0,55	1,54	Alto	R$ 192,68
30 MPa	REF	0,48	4,30	Alto	R$ 278,93
	50E	0,32	1,23	Moderado	R$ 273,51
	70E	n/c	-	-	-
	50A	0,42	1,18	Moderado	R$ 294,94
40 MPa	REF	0,38	2,97	Alto	R$ 337,24
	50E	n/c	-	-	-
	70E	n/c	-	-	-
	50A	0,32	0,98	Baixo	R$ 399,08

Nota: n/c – não consta. Resultado fora dos limites.
***Segundo Shi et al (1998) não é o mais adequado para penetração de cloretos em concretos com adições minerais.**

Na Tabela 6.30 são apresentados os custos/m^3 dos concretos curados por 7 dias, para os níveis de resistência de 20 MPa a 50 MPa. Observa-se que no nível de 20 MPa, as misturas referência e 50A não puderam ser consideradas. Com exceção da classificação quanto a ASTM C1202/05, no nível de resistência 40 MPa, em que o melhor desempenho foi da mistura 50A, as demais propriedades foram aprimoradas na mistura 70E. Nos concretos com sete dias de cura, as misturas contendo escória demonstraram-se mais baratas que a de referência em quase todos os níveis de resistência, exceto no nível de resistência de 50 MPa, em que a mistura 50A tornou-se mais cara que a de referência.

Na Tabela 6.31 são apresentados os custos/m^3, relações a/ag e penetração de cloretos, considerando níveis de resistência entre 30 MPa e 60 MPa para concretos submetidos à cura de 28 dias. Observa-se que os resultados são bastante semelhantes aos de sete dias, sendo apresentados pela mistura 70E os melhores desempenhos na maioria das propriedades, com custos nitidamente mais baixos. Esta mistura, só é superada pela 50E, a qual resulta em menores coeficientes k', em níveis de 50 MPa e 60 MPa.

Tabela 6.30 – Relação a/ag, coeficiente k', risco de penetração de cloretos e custo, para um mesmo nível de resistência aos sete dias

Nível de resistência	Mistura	a/ag	k' (mm/√semana)	Risco de penetração de Cl^- (ASTM C1202/05)*	Custo (R$/m³)
20 MPa	REF	n/c	-	-	-
	50E	0,51	1,35	Baixo	R$ 184,96
	70E	0,47	1,16	Baixo	R$ 169,64
	50A	n/c	-	-	-
30 MPa	REF	0,51	4,21	Alto	R$ 258,53
	50E	0,41	1,05	Baixo	R$ 225,66
	70E	0,39	0,96	Baixo	R$ 199,38
	50A	0,54	1,34	Baixo	R$ 201,99
40 MPa	REF	0,42	2,88	Alto	R$ 313,55
	50E	0,34	0,87	Baixo	R$ 259,87
	70E	0,32	0,84	Baixo	R$ 223,58
	50A	0,41	1,05	Muito Baixo	R$ 304,47
50 MPa	REF	0,35	2,14	Moderado	R$ 364,18
	50E	0,29	0,76	Baixo	R$ 289,94
	70E	0,28	0,76	Muito Baixo	R$ 244,36
	50A	0,31	0,87	Muito Baixo	R$ 418,57

Nota: n/c – não consta. Resultado fora dos limites.
***Segundo Shi et al (1998) não é o mais adequado para penetração de cloretos em concretos com adições minerais.**

Para os 91 dias, os níveis de resistência foram ampliados a valores entre 30 MPa e 70 MPa (Tabela 6.32). Devido não ter sido realizado o ensaio de penetração por imersão aos 91 dias de cura, não serão apresentadas projeções dos valores de k' para esta idade. Mais uma vez, as misturas contendo escória superaram o concreto de referência. O melhor desempenho, analisando conjuntamente o custo e o risco de penetração dos íons cloretos, foi o da mistura 70E. No entanto, não foi possível estabelecer relações para concretos com este teor de escória e resistência à compressão de 70 MPa, sendo o melhor resultado obtido no concreto com 50% de escória.

Assim, observa-se que até mesmo para a idade de cura de 3 dias os melhores desempenhos, considerando custo/m^3 e a penetração de íons cloretos, foram os das misturas compostas com escória de alto forno.

Constata-se que, para os níveis mais elevados de resistência mecânica o uso do ativador químico resulta em maiores custos/m^3. Isso é devido ao fato de que a demanda de aditivo superplastificante aumenta quanto menor for a relação a/ag, e este é um componente

que apresenta custo elevado (Tabela 6.25). Exemplo disto é a mistura 50A, a/ag 0,30, a qual possui um custo de R$457,72, superando o concreto de referência em cerca de14%.

Tabela 6.31 – Relação a/ag, coeficiente k', risco de penetração de cloretos e custo, para um mesmo nível de resistência aos 28 dias

Nível de resistência	Mistura	a/ag	k' (mm/√semana)	Risco de penetração de Cl^- (ASTM C1202/05)*	Custo (R$/m³)
30 MPa	REF	n/c			-
	50E	0,52	0,84	Muito Baixo	R$ 183,10
	70E	0,51	1,07	Muito Baixo	R$ 158,02
	50A	n/c	-	-	-
40 MPa	REF	0,53	3,10	Moderado	R$ 250,06
	50E	0,42	0,58	Muito Baixo	R$ 223,21
	70E	0,41	0,84	Muito Baixo	R$ 190,42
	50A	0,52	1,17	Muito Baixo	R$ 212,20
50 MPa	REF	0,43	1,38	Moderado	R$ 307,15
	50E	0,34	0,44	Muito Baixo	R$ 261,54
	70E	0,33	0,69	Muito Baixo	R$ 221,05
	50A	0,41	0,87	Muito Baixo	R$ 302,25
60 MPa	REF	0,34	0,71	Moderado	R$ 369,59
	50E	0,28	0,35	Muito Baixo	R$ 294,54
	70E	0,27	0,59	Muito Baixo	R$ 247,22
	50A	0,31	0,67	Muito Baixo	R$ 416,90

Nota: n/c – não consta. Resultado fora dos limites.
***Segundo Shi et al (1998) não é o mais adequado para penetração de cloretos em concretos com adições minerais.**

A mesma análise realizada anteriormente, com fixação de um nível de resistência à compressão, será feita nas Tabelas 6.33, 6.34 e 6.35, porém definindo valores para o coeficiente k'. Imaginando que determinada estrutura estivesse sujeita a uma solução com mesma concentração do ensaio, fixando os coeficientes k' em 0,6, 1,0 e 1,5, e teorizando que o material não sofrerá alterações com o tempo e, portanto, manterá fixo este valor, corresponderia dizer que em 50 anos, as profundidades de penetração seriam aproximadamente de 30 mm, 51 mm e 77 mm, respectivamente.

Da análise das Tabelas 6.33, 6.34 e 6.35, constata-se que para utilização em ambientes contaminados por cloretos é preferível o uso de concretos compostos com escória de alto forno. Além de apresentarem menor custo/m^3, a penetração de cloretos é reduzida significativamente. Prova disto, é que com o concreto de referência, não foi possível alcançar os coeficientes de penetração especificados, para os períodos de cura de três e sete dias.

Quanto ao uso de ativador químico, foi demonstrada uma boa relação, entre a eficiência à penetração de cloretos e o custo, apenas para os três dias, e índice k' =1,5. A vantagem do seu uso é nas primeiras idades, pois auxilia bastante no aumento das resistências à compressão, sendo estas, superiores às demais misturas contendo escória, com mesmo coeficiente k'. A análise das Tabelas 6.31, 6.32 e 6.33, permite afirmar que, os melhores custos-benefícios, em relação à penetração dos íons cloreto, são obtidos para a mistura 70E.

Tabela 6.32 – Relação a/ag, coeficiente k', risco de penetração de cloretos e custo, para um mesmo nível de resistência aos 91 dias

Nível de resistência	Mistura	a/ag	k' (mm/√semana)	Risco de penetração de Cl^- (ASTM C1202/05)*	Custo (R$/m³)
30 MPa	REF	n/c	-	-	-
	50E	0,58	n/c	Muito Baixo	R$ 162,59
	70E	0,57	n/c	Muito Baixo	R$ 141,29
	50A	n/c	-	-	-
40 MPa	REF	0,61	n/c	Moderado	R$ 212,13
	50E	0,48	n/c	Muito Baixo	R$ 198,20
	70E	0,46	n/c	Muito Baixo	R$ 173,46
	50A	0,55	n/c	Muito Baixo	R$ 192,68
50 MPa	REF	0,49	n/c	Moderado	R$ 271,49
	50E	0,41	n/c	Muito Baixo	R$ 227,68
	70E	0,37	n/c	Muito Baixo	R$ 205,16
	50A	0,43	n/c	Muito Baixo	R$ 283,42
60 MPa	REF	0,39	n/c	Baixo	R$ 333,48
	50E	0,35	n/c	Muito Baixo	R$ 256,41
	70E	0,30	n/c	Muito Baixo	R$ 233,77
	50A	0,33	n/c	Muito Baixo	R$ 390,93
70 MPa	REF	0,31	n/c	Baixo	R$ 393,11
	50E	0,29	n/c	Muito Baixo	R$ 288,76
	70E	n/c	-	-	-
	50A	n/c	-	-	-

Nota: n/c – não consta. Resultado fora dos limites.
***Segundo Shi et al (1998) não é o mais adequado para penetração de cloretos em concretos com adições minerais.**

Tabela 6.33 – Relação a/ag, resistência à compressão, risco de penetração de cloretos e custo, para coeficiente de penetração de Cl^-, aos três dias de cura, de 1,0 e 1,5 (mm/√semana)

Valor k'	Mistura	a/ag	Fc (MPa)	Risco de penetração de Cl^- (ASTM C1202/05)*	Custo (R$/m³)
1,0 (mm/√semana)	REF	n/c	-	-	-
	50E	n/c	-	-	-
	70E	0,29	23	Moderado	R$ 238,17
	50A	0,33	39	Baixo	R$ 390,93
1,5 (mm/√semana)	REF	n/c	-	-	-
	50E	0,39	22	Alto	R$ 236,88
	70E	0,46	9	Alto	R$ 173,46
	50A	0,54	21	Moderado	R$ 198,98

Nota: n/c – não consta. Resultado fora dos limites.
***Segundo Shi et al (1998) não é o mais adequado para penetração de cloretos em concretos com adições minerais.**

Tabela 6.34 – Relação a/ag, resistência à compressão, risco de penetração de cloretos e custo, para coeficiente de penetração de Cl^-, aos sete dias de cura, de 1,0 e 1,5 (mm/√semana)

Valor k'	Mistura	a/ag	Fc (Mpa)	Risco de penetração de Cl^- (ASTM C1202/05)*	Custo (R$/m³)
1,0 (mm/√semana)	REF	n/c	-	-	-
	50E	0,40	32	Baixo	R$ 232,23
	70E	0,40	28	Baixo	R$ 194,00
	50A	0,38	42	Muito Baixo	R$ 332,87
1,5 (mm/√semana)	REF	n/c	-	-	-
	50E	0,56	17	Baixo	R$ 169,16
	70E	0,59	11	Baixo	R$ 136,12
	50A	0,60	26	Baixo	R$ 164,06

Nota: n/c – não consta. Resultado fora dos limites.
***Segundo Shi et al (1998) não é o mais adequado para penetração de cloretos em concretos com adições minerais.**

A Tabela 6.36 apresenta as misturas analisadas por Schneider (2005), utilizando os mesmos materiais desta pesquisa, porém com a utilização do CPV-ARI, ao invés do CPB, comparando-as em igualdade de níveis de resistência, para as idades de 3, 7, 28 e 91 dias. Para efeito de melhor comparação, foram feitas as atualizações monetárias dos materiais, com custo do CPV-ARI igual a R$ 0,37/kg, e reapresentados valores das Tabelas 6.29, 6.30, 6.31 e 6.32, referentes ao desempenho de concretos com CPB e escória. Os valores foram delimitados por relações a/ag entre 0,32 e 0,61, por estarem dentro de no máximo 10% dos limites utilizados nas duas pesquisas.

Tabela 6.35 – Relação a/ag, resistência à compressão, risco de penetração de cloretos e custo, para coeficiente de penetração de Cl^-, aos 28 dias de cura, de 0,6, 1,0 e 1,5 (mm/√semana)

Valor k'	Mistura	a/ag	Fc (Mpa)	Risco de penetração de Cl^- (ASTM C1202/05)*	Custo (R$/m³)
0,6 (mm/√semana)	REF	0,32	63	Moderado	R$ 385,11
	50E	0,42	39	Muito Baixo	R$ 223,21
	70E	0,28	59	Muito Baixo	R$ 242,66
	50A	n/c	-	-	-
1 (mm/√semana)	REF	0,38	55	Moderado	R$ 340,41
	50E	0,56	26	Muito Baixo	R$ 169,16
	70E	0,48	33	Muito Baixo	R$ 167,11
	50A	0,46	45	Muito Baixo	R$ 257,36
1,5 (mm/√semana)	REF	0,44	49	Moderado	R$ 300,89
	50E	n/c	-	-	-
	70E	n/c	-	-	-
	50A	n/c	-	-	-

Nota: n/c – não consta. Resultado fora dos limites.
***Segundo Shi et al (1998) não é o mais adequado para penetração de cloretos em concretos com adições minerais.**

Para um mesmo nível de resistência à compressão os concretos compostos com CPV apresentam menores custos de elaboração quando comparados àqueles com CPB. Contudo, com a utilização de altos teores de escória esses custos tendem a se tornar bastante similares. Assim, para um nível de resistência de 30 MPa aos 28 dias, em misturas compostas com 70% de escória, a diferença de custo pela alteração de cimento é pequena. Acresce a isto a melhoria estética proporcionada pelo concreto branco.

Comparando-se concretos com mesmos níveis de resistência, prazos de cura e tipos de aglomerantes (mesmos teores de escória e ativador químico), as relações de custo ($CUSTO_{CPB}/CUSTO_{CPV}$) são:

- Mistura REF: 1,28 a 1,58;
- Mistura 50E: 1,28 a 1,49;
- Mistura 70E: 1,03 a 1,35;
- Mistura 50A: 1,21 a 2,08;

Isto demonstra que traços com mesmos teores aglomerantes proporcionam desde custos muito semelhantes na mistura 70E (relação 1,03) e até grandes variações na mistura 50A (relação 2,08).

Tabela 6.36 – Relação a/ag, coeficiente k' e custo, para diferentes níveis de resistência, nas misturas compostas por CPV-ARI e escória (Schneider, 2005), e CPB e escória

Prazo de cura	Nível de Resistência	Mistura	CPB			CPV-ARI			k' CPB/CPV	Custo CPB/CPV	a/ag CPB/CPV
			a/ag	k'	custo/m³	a/ag	k'	custo/m³			
3 dias	20 MPa	REF	0,61	7,25	R$ 212,13	0,57	4,49	R$ 165,60	1,61	1,28	1,07
		50E	0,41	1,56	R$ 227,68	0,48	1,30	R$ 154,55	1,20	1,47	0,85
		70E	0,32	1,06	R$ 225,21	0,34	0,96	R$ 167,31	1,11	1,35	0,93
		50A	0,55	1,54	R$ 192,68	0,55	1,09	R$ 151,60	1,42	1,27	0,99
	30 MPa	REF	0,48	4,30	R$ 278,93	0,44	2,96	R$ 197,37	1,45	1,41	1,08
		50E	0,32	1,23	R$ 273,51	0,34	1,18	R$ 184,09	1,04	1,49	0,92
		70E	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		50A	0,42	1,18	R$ 294,94	0,40	0,90	R$ 182,96	1,32	1,61	1,03
	40 MPa	REF	0,38	2,97	R$ 337,24	0,35	2,20	R$ 223,55	1,35	1,51	1,09
		50E	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		70E	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		50A	0,32	0,98	R$ 399,08	-	-	-	-	-	-
7 dias	20 MPa	REF	-	-	-	0,61	4,72	R$ 156,26	-	-	-
		50E	0,51	1,35	R$ 184,96	0,54	1,27	R$ 143,23	1,06	1,29	0,95
		70E	0,47	1,16	R$ 169,64	0,46	1,05	R$ 144,76	1,11	1,17	1,02
		50A	-	-	-	0,64	1,16	R$ 136,52	-	-	-
	30 MPa	REF	0,51	4,21	R$ 258,53	0,48	2,64	R$ 187,83	1,60	1,38	1,07
		50E	0,41	1,05	R$ 225,66	0,38	1,14	R$ 175,72	0,92	1,28	1,09
		70E	0,39	0,96	R$ 199,38	0,34	0,92	R$ 167,57	1,05	1,19	1,13
		50A	0,54	1,34	R$ 201,99	0,47	0,93	R$ 167,59	1,44	1,21	1,13
	40 MPa	REF	0,42	2,88	R$ 313,55	0,38	1,75	R$ 214,03	1,65	1,47	1,09
		50E	0,34	0,87	R$ 259,87	-	-	-	-	-	-
		70E	0,32	0,84	R$ 223,58	-	-	-	-	-	-
		50A	0,41	1,05	R$ 304,47	0,36	0,79	R$ 193,83	1,32	1,57	1,14
28 dias	30 MPa	REF	-	-	-	0,66	4,59	R$ 146,34	-	-	-
		50E	0,52	0,84	R$ 183,10	0,54	1,18	R$ 143,08	0,71	1,28	0,96
		70E	0,51	1,07	R$ 158,02	0,41	0,90	R$ 154,09	1,18	1,03	1,24
		50A	-	-	-	0,69	1,14	R$ 127,43	-	-	-
	40 MPa	REF	0,53	3,10	R$ 250,06	0,50	2,30	R$ 182,53	1,35	1,37	1,06
		50E	0,42	0,58	R$ 223,21	0,44	1,08	R$ 162,82	0,54	1,37	0,95
		70E	0,41	0,84	R$ 190,42	0,30	0,80	R$ 175,47	1,05	1,09	1,35
		50A	0,52	1,17	R$ 212,20	0,53	0,91	R$ 155,70	1,29	1,36	0,98
	50 MPa	REF	0,43	1,38	R$ 307,15	0,38	1,35	R$ 216,66	1,03	1,42	1,15
		50E	0,34	0,44	R$ 261,54	0,36	1,02	R$ 179,98	0,43	1,45	0,94
		70E	0,33	0,69	R$ 221,05	-	-	-	-	-	-
		50A	0,41	0,87	R$ 302,25	0,41	0,76	R$ 181,89	1,15	1,66	1,00
91 dias	40 MPa	REF	0,61	-	R$ 212,13	0,61	2,91	R$ 157,68	-	1,35	1,01
		50E	0,48	-	R$ 198,20	0,56	1,05	R$ 140,51	-	1,41	0,86
		70E	0,46	-	R$ 173,46	0,34	0,69	R$ 167,60	-	1,03	1,34
		50A	0,55	-	R$ 192,68	0,60	0,97	R$ 143,46	-	1,34	0,92
	50 MPa	REF	0,49	-	R$ 271,49	0,49	1,87	R$ 185,13	-	1,47	1,00
		50E	0,41	-	R$ 227,68	0,45	0,92	R$ 160,99	-	1,41	0,91
		70E	0,37	-	R$ 205,16	-	-	-	-	-	-
		50A	0,43	-	R$ 283,42	0,48	0,82	R$ 166,52	-	1,70	0,90
	60 MPa	REF	0,39	-	R$ 333,48	0,39	1,30	R$ 211,07	-	1,58	0,99
		50E	0,35	-	R$ 256,41	0,36	0,82	R$ 179,91	-	1,43	0,97
		70E	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		50A	0,33	-	R$ 390,93	0,38	0,71	R$ 188,08	-	2,08	0,86

Quando é analisado o índice de penetração (k'_{CPB}/ k'_{CPV}), nestes mesmos parâmetros acima, porém até o prazo de cura de 28 dias, observa-se variações de:

- Mistura REF: 1,03 a 1,61;
- Mistura 50E: 0,43 a 1,20;
- Mistura 70E: 1,05 a 1,11;
- Mistura 50A: 1,15 a 1,44;

Verifica-se, assim, que para os níveis de resistência analisados, considerando prazo de cura superior a sete dias, nível de resistência acima de 20 MPa e teor de escória de 50%, que o melhor desempenho com relação ao coeficiente de penetração de cloretos é obtido nos concretos compostos por CPB.

Na Tabela 6.37 é possível comparar os concretos com mesmo nível de resistência, independentemente do tipo de aglomerante utilizado, sendo adotada a mistura de menor custo por prazo de cura. Um dos aspectos a ser analisado é o diferente comportamento das misturas com CPB ou CPV-ARI. Enquanto que no concreto branco, os melhores custos-benefício são obtidos no traço 70E, nos concretos com cimento cinza destacam-se as misturas 50A e 50E. As relações $CUSTO_{CPB}/CUSTO_{CPV}$ variam de 1,15 a 1,51, já as relações entre k'_{CPB}/k'_{CPV} variam de 0,68 a 1,48.

Tabela 6.37 – Comparação de custo e coeficientes de penetração, entre concretos de CPB e CPV-ARI, em mesmos níveis de resistência

Nível de resistência	Prazo de cura	Menor custo CPB			Menor custo CPV-ARI			Custo	k'
		Mistura	Custo/m³	k'	Mistura	Custo/m³	k'	CPB/CPV	CPB/CPV
20 MPa	3 dias	50A	R$ 192,68	1,54	50A	R$ 151,60	1,09	1,27	1,42
30 MPa	3 dias	50E	R$ 273,51	1,23	50A	R$ 182,96	0,90	1,49	1,37
40 MPa	3 dias	REF	R$ 337,24	2,97	REF	R$ 223,55	2,20	1,51	1,35
20 MPa	7 dias	70E	R$ 169,64	1,16	50A	R$ 136,52	1,16	1,24	1,00
30 MPa	7 dias	70E	R$ 199,38	0,96	70E	R$ 167,57	0,92	1,19	1,05
40 MPa	7 dias	70E	R$ 223,58	0,84	50A	R$ 193,83	0,79	1,15	1,06
30 MPa	28 dias	70E	R$ 158,02	1,07	50A	R$ 127,43	1,14	1,24	0,94
40 MPa	28 dias	70E	R$ 190,42	0,84	50A	R$ 155,70	0,91	1,22	0,93
50 MPa	28 dias	70E	R$ 221,05	0,69	50E	R$ 179,98	1,02	1,23	0,68
40 MPa	91 dias	70E	R$ 173,46	-	50E	R$ 140,51	1,05	1,23	-
50 MPa	91 dias	70E	R$ 205,16	-	50E	R$ 160,99	0,92	1,27	-
60 MPa	91 dias	70E	R$ 233,77	-	50E	R$ 179,91	0,82	1,30	-

É perceptível, portanto, que o aumento dos prazos de cura, em concretos com mesmo desempenho quanto à resistência à compressão, não ocasionam grandes alterações quanto à relação de custo ($CUSTO_{CPB}/CUSTO_{CPV}$) resultando em valores entre 1,27 a 1,51 aos 3 dias, e de 1,23 a 1,30 aos 91 dias. Porém, diminuem a relação dos coeficientes de penetração (k'_{CPB}/k'_{CPV}) de valores entre 1,35 e 1,42 aos 3 dias, para 0,68 e 0,94 aos 28 dias, demonstrando uma maior eficiência do aumento dos prazos de cura, frente à penetração dos íons cloreto, para concretos compostos por CPB e escória.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1. Conclusões

Esta pesquisa teve como objetivo, analisar a influência causada pela substituição parcial do cimento Portland branco (CPB) pela escória de alto-forno, em fatores como a penetração de cloretos, a resistência à compressão axial e o custo de elaboração por metro cúbico de concreto. Outra característica estudada foi a intensificação das reações de hidratação, do CPB e da escória, por meio de um ativador químico (Na_2SO_4), em busca de uma solução para o efeito nocivos causados pela utilização de grandes teores de escória, nas características dos concretos nas primeiras idades.

Apesar de não ser prioridade na pesquisa, é observada, nos corpos-de-prova moldados com pasta de aglomerante, uma pequena mudança de coloração entre as diferentes misturas, sendo considerada apropriada a utilização da escória, principalmente, para a obtenção de concretos coloridos.

A substituição parcial do cimento branco por escória resulta em menores valores de resistência à compressão axial quando comparado ao concreto de referência, 100% CPB. Esse efeito é mais pronunciado com o aumento no teor de substituição, de 50% para 70%, e idades iniciais, três e sete dias.

A ativação química mostra-se eficiente no incremento dos valores de resistência à compressão nas primeiras idades. A comparação entre os resultados da mistura composta com 50% de escória ativada quimicamente (50A), com a mesma mistura sem ativador químico (50E), demonstra os efeitos benéficos do ativador químico, elevando de forma acentuada as resistências à compressão aos três, sete e 28 dias. Em alguns casos, observam-se níveis de resistência superiores aos da mistura de referência. Aos três dias, a mistura 50A alcança, respectivamente, resistências de 20%, 91% e 75% maiores que o 50E, nas relações a/ag 0,30; 0,42 e 0,55. Destaca-se sua maior influência sobre os concretos de maiores relações a/ag, além da diminuição significativa do seu efeito com o passar do tempo, tornando-se até mesmo prejudicial para a resistência aos 91 dias, na relação a/ag 0,30.

De forma adversa ao ocorrido para resistência à compressão, o uso da escória resulta em grandes melhorias quanto à penetração de íons cloreto. A primeira análise, feita com base nos resultados dos ensaios acelerados de penetração de íons cloretos (segundo a normalização

ASTM C1202/05), evidencia o benefício que esta adição proporciona ao concreto exposto a ação desses íons. Isto é demonstrado pela classificação dada pela norma, enquadrando a mistura 70E, já aos sete dias, como concreto com "Muito Baixo" risco de penetração de cloretos. Aos 28 dias todos os concretos contendo escória foram classificados nesta mesma categoria, enquanto a mistura de referência, não atinge esta condição, nem mesmo aos 91 dias.

A profundidade de penetração de cloretos determinada a partir da aspersão de solução 0,1M de $AgNO_3$, nos corpos-de-prova submetidos ao ensaio preconizado pela ASTM C1202/05, apresenta uma boa correlação com a carga passante, $r^2 = 0,93$. Esta análise confirma a dependência ocorrida entre o comportamento dos íons cloreto durante o ensaio, e o resultado de carga passante.

A utilização do ensaio de penetração de cloretos por imersão (EPCI), por ser um ensaio mais condizente com as situações reais de penetração dos íons cloreto, possibilita uma confiabilidade ainda maior ao desempenho dos concretos contendo escória. Em comparação com a mistura de referência, a adição de escória causa reduções do coeficiente de penetração k', de até 72%, aos 28 dias de cura, obtendo seus melhores desempenhos nas maiores relações a/ag.

O uso do ativador químico (Na_2SO_4), em relação ao coeficiente k', proporciona maior eficiência da mistura 50A, quando comparada com a mesma mistura sem ativador (50E), apenas na idade de três dias. Aos sete dias, os resultados de k' são similares. Aos 28 dias, o desempenho da mistura ativada (50A) fica aquém da mistura 50E, principalmente na relação a/ag 0,30, alcançando um valor de k' 78% maior e, possibilitando assim, uma maior penetração dos íons cloreto. Desta forma, confirma-se que as acelerações das reações ocorridas na escória, juntamente com o CPB, são satisfatórias até os prazos de cura entre três e sete dias. A partir deste momento, a influência decresce expressivamente, podendo até mesmo, ser prejudicial ao comportamento nas idades mais avançadas, quando comparado a mesma mistura sem ativador químico.

As correlações entre k' e a carga passante não são satisfatórias, principalmente nas misturas contendo escória. O coeficiente de determinação encontrado entre estas duas propriedades decresceu de acordo com o aumento de teor de escória, e sofre redução ainda maior, quando adicionado o ativador químico. Estas informações vêm a corroborar com a tese de que os ensaios são dependentes de fatores diferentes. O confronto destes, com os resultados do volume de intrusão de mercúrio, determinam boas correlações quando a

integração dos dados é realizada dentro de mesmas misturas e prazos de cura, alterando-se a relação a/ag.

As baixas correlações encontradas entre o ensaio segundo a ASTM C1202/05 e o volume de intrusão, em uma mesma mistura, porém, variando também o prazo de cura, exprimem que o ensaio de penetração acelerada de cloretos depende de outras variáveis. Uma delas é a condutividade elétrica, com a qual, apesar de existir certa dependência, é uma relação de difícil quantificação. Como não são claros os fatores intervenientes no ensaio de penetração acelerada de cloretos, e não foram obtidas correlações adequadas com coeficiente k' quando utilizada a escória, evidencia-se que este ensaio não é o mais adequado para concretos contendo adições minerais, devendo-se ter cuidado na análise de seus resultados.

Em prazos de cura superiores a sete dias, o uso de escória proporciona níveis de resistências à compressão similares ao concreto REF, maiores resistências à penetração de cloretos, à custos relativamente mais baixos. Destaque para a mistura 70E.

Na busca de altas resistências à compressão aos três dias, concretos REF foram os mais viáveis, porém, com baixas resistências à penetração de cloretos (k')

Destaca-se, para a obtenção de altos desempenhos nas primeiras idades, a utilização em conjunto da escória de alto forno e do ativador químico.

Justifica-se o uso de altos teores de escória em conjunto com o CPB e maiores prazos de cura, ao invés de concretos com CPV-ARI, pois quando comparados em mesmo nível de resistência à compressão, apesar de resultarem em concretos com custo relativamente mais altos, proporcionam uma maior resistência à penetração de cloretos, além do requintado apelo estético.

Comprova-se a eficiência do uso da substituição parcial de CPB por escória de alto forno, na obtenção de concretos brancos, frente às resistências à compressão axial e à penetração dos íons cloreto, além de ser uma excelente forma de contribuir para sustentabilidade e preservação do meio ambiente.

7.2. Sugestões para pesquisas futuras

- Analisar a influência de teores diferentes de escória, permitindo uma análise mais abrangente e buscando o teor ideal de substituição do cimento Portland branco pela escória de alto-forno;

- Avaliar a utilização da escória, em conjunto com o cimento Portland branco, frente a outros agentes agressivos, como ataque por sulfatos, ou às diferentes propriedades do concreto, como a retração e resistência à tração, relatando suas influencias em questões importantes como a fissuração;
- Examinar a influência da escória quanto aos fatores colorimétricos, verificando a real alteração na brancura final do concreto, quando comparada à utilização do cimento Portland branco sem adições minerais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, C.A. **Concreto de Cimento Portland Branco Estrutural: Análise da adição de pigmentos quanto à resistência à compressão**. 2006. 87p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2006.

AÏTCIN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho**. São Paulo, Editora Pini, 2000. 666p.

ALENCAR, R.S.A. de; BASTOS, S.R.B.; HENDGES D.F. A influência da adição de pigmentos na resistência à compressão e durabilidade de concretos com cimento branco e cinza. In: Congresso Brasileiro de Concreto, 47, 2005, Recife-PE. **Anais**...Instituto Brasileiro de Concreto – IBRACON, 2005. CD-ROM.

ALONSO, C.; ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M.; CASTRO P. Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n.7, p.1047-1055. 2000.

AMPADU, K.O.; TORII, K.; KAWAMURA, M. Beneficial effect of fly ash on chloride diffusivity of hardened cement paste. **Cement and Concrete Research**, v.29, n.4, p.585-590, 1999.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 259:** Standard Method of Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration, Washington. D. C, 2006.

____. **AASHTO T-277**: Standard Method of Test for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. Washington D. C., 2007.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI Committee 201.2R-01**: Guide to durable concrete, 2000.

____. **ACI Committee 222R-01**: Corrosion of Metals in Concrete, 2001.

____. **ACI Committee 233R-03**: Slag Cement in Concrete and Mortar, 2003.

____. **ACI Committee 318-05**: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C1202-05**: Standard Test Method for Electrical Indication of concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. Philadelphia, 2005.

ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M.; ALONSO, C.; GONZÁLEZ, C. Relation between colourimetric chloride penetration depth and charge passed in migration tests of the type of standard ASTM C1202-91. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n.3, p.417-421, 1999.

ANDRADE, J. J. de O.; NOBRE, T. R. S. Estudo da penetração de cloretos em concretos moldados com cimento portland branco através de ensaio não acelerado: resultados preliminares. In: Congresso Brasileiro de Concreto, 47, 2005, Recife-PE. **Anais**... Instituto Brasileiro de Concreto – IBRACON, 2005. CD-ROM.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CORROSÃO – ABRACO. **O que é corrosão**. Disponível em: <http://www.abraco.org.br/corrosi0.htm>. Acesso em: 12/03/2007

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NB-1 1978**: Projeto e execução de obras de concreto armado. Rio de Janeiro, **1978**.

____. **NBR 5732**: Cimento Portland comum. Rio de Janeiro, 1991.

____. **NBR 5735**: Cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro, 1991.

____. **NBR 5738**: Moldagem e cura de corpos-de-prova de concreto cilíndricos ou prismáticos. Rio de Janeiro, 2003.

____. **NBR 5739**: Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto. Rio de Janeiro, 2007.

____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

____. **NBR 7215**: Cimento Portland: determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

____. **NBR 7251**: Agregados em estado solto: determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

____. **NBR 7809**: Agregado graúdo: determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006.

____. **NBR 11579**: Cimento Portland: determinação da finura por meio da peneira 75µm (n° 200). Rio de Janeiro, 1991.

____. **NBR 12989**: Cimento Portland Branco. Rio de Janeiro, 1993.

___. **NBR NM 03**: Cimento Portland Branco – Determinação da brancura. Rio de Janeiro, 2000.

____. **NBR NM 10**: Cimento Portland - Análise química – Disposições gerais. Rio de Janeiro, 2004.

____. **NBR NM 11-1**: Cimento Portland - Análise química - Método optativo para determinação de óxidos principais por complexometria - Parte 1: Método ISO. Rio de Janeiro, 1991.

____. **NBR NM 11-2**: Cimento Portland - Análise química - Método optativo para determinação de óxidos principais por complexometria - Parte 2: Método ABNT. Rio de Janeiro, 1991.

____. **NBR NM 12**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxido de cálcio livre. Rio de Janeiro, 2004.

____. **NBR NM 13**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol. Rio de Janeiro, 2004.

____. **NBR NM 14**: Cimento Portland - Análise química - Método de arbitragem para determinação de dióxido de silício, óxido férrico, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio. Rio de Janeiro, 2004.

____. **NBR NM 15**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 2004.

____. **NBR NM 16**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 2004.

____. **NBR NM 17**: Cimento Portland - Análise química - Método de arbitragem para a determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama. Rio de Janeiro, 2004.

____. **NBR NM 18**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2004.

____. **NBR NM 19**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de enxofre na forma de sulfeto. Rio de Janeiro, 2004.

____. **NBR NM 21**: Cimento Portland - Análise química - Método optativo para a determinação de dióxido de silício, óxido de alumínio, óxido férrico, óxido de cálcio e óxido de magnésio. Rio de Janeiro, 2004.

____. **NBR NM 23**: Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação de massa específica. Rio de Janeiro, 2004.

____. **NBR NM 26**: Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro, 2001.

____. **NBR NM 43**: Cimento portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2003.

____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.

____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.

____. **NBR NM 65**: Cimento portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.

____. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

____. **NBR NM 76**: Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

____. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

BABU, K.G.; KUMAR, V.S.R. Efficiency of ggbs in concrete. **Cement and Concrete Research**, v.30, n.7, p.1031-1036. 2000.

BARBOSA, F.R. et al. Estudo comparativo entre as propriedades mecânicas de concretos convencionais e com cimento portland branco. In: Congresso Brasileiro de Concreto, 47. 2005, Recife-PE. **Anais**... Instituto Brasileiro de Concreto – IBRACON, 2005. CD-ROM.

BEHNOOD, A.; ZIARI, H. Effects of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high-strength concrete after exposure to high temperatures. **Cement and Concrete Composites**, In Press, Corrected Proof, Available online 10 July 2007.

BENITEZ, A.; BALZAMO, H.; MIGOYA, E. Hormigones de alta prestación elaborados com cemento gris y cemento blanco. In: 4º Jornadas de desarrollo e innovación, noviembre, 2002. Disponível em: http://www4.inti.gov.ar/GD/4jornadas2002/pdf/cecon-058.pdf . Acesso em: 27/11/2007.

BERTOLINI, L.; CARSANA, M.; PEDEFERRI, P. Corrosion behaviour of steel in concrete in the presence of stray current. **Corrosion Science**, v.49, n.3, p.1056-1068, mar. 2007.

BHANJA, S.; SENGUPTA, B. Influence of silica fume on the tensile strength of concrete. **Cement and Concrete Research**, v.35, n.4, p.743-747, 2005.

BRITISH CEMENT ASSOCIATION (BCA). **BS EN 206-1/BS 8500:** cements. British Cement Association (BCA), 2000. Disponível em: <http://www.bca.org.uk>. Acesso em: 28/11/2007.

____. **BS EN 206-1/BS 8500:** coloured concrete. British Cement Association (BCA), 2000. Disponível em: <http://www.bca.org.uk>. Acesso em: 28/11/2007.

BRIZOLA, R.M. **Microestrutura do cobrimento de concretos com altos teores de escória e cinza volante ativadas por cimento Portland e cal hidratada**. 2007. 179p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2007.

BROUGH, A. R.; ATKINSON, A. Sodium silicate-based, alkali-activated slag mortars: Part I. Strength, hydration and microstructure. **Cement and Concrete Research**, v.32, n.6, p.865-879, 2002.

BROWN, P.; BOTHE Jr., J. The system $CaO-Al_2O_3-CaCl_2-H_2O$ at 23±2 °C and the mechanisms of chloride binding in concrete. **Cement and Concrete Research**, v.34, n.9, p.1549-1553, 2004.

CHENG, A.; HUANG, R.; WU, J-K.; CHEN, C-H. Influence of GGBS on durability and corrosion behavior of reinforced concrete. **Materials Chemistry and Physics**, v.93, n.2-3, p.404-411, out. 2005.

COSTA, P.E.F. **Influência da finura e teor de escória na penetração de cloretos no concreto**. 2001. 143p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2001.

COURARD, L. et al. Durability of mortars modified with metakaolin. **Cement and Concrete Research**, v.33, n.9, p.1473-1479, 2003.

COUTINHO, C.B. **Materiais metálicos para engenharia**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1992. 405p.

CSIZMADIA, J.; BALÁZS G.; TAMÁS, F.D. Chloride ion binding capacity of aluminoferrites. **Cement and Concrete Research**, v.31, n.4, p.577-588, 2001.

CUNHA, A.C.Q. da; HELENE, P.R.L. **Despassivação das armaduras de concreto por ação da carbonatação**. São Paulo: EPUSP, 2001. 17p.

DELLA, V.P.; HOTZA, D.; JUNKES, J.A.; OLIVEIRA, A.P.N. de. Comparative study of silica obtained from acid leaching of rice husk and the silica obtained by thermal treatment of rice husk ash. Química Nova, São Paulo, v. 29, n. 6, 2006.

DHIR, R.K.; EL-MOHR, M.A.K.; DYER, T.D. Chloride binding in GGBS concrete **Cement and Concrete Research**, v.26, n.12, p.1767-1773. 1996.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). Ground Granulated Blast-Furnace Slag**. United States Department of Transportation, FHWA,** 14 junho, 1999. Disponível em: http://www.fhwa.dot.gov/infrastructure/materialsgrp/ggbfs.htm. Acesso em: 05/12/07.

FELDMAN, R.; PRUDENCIO JR., L.R.; CHAN, G. Rapid chloride permeability test on blended cement and other concretes correlations between charge, initial current and conductivity. **Construction and Building Materials**, v.13 , n.3, p.149-154. 1999.

FONSECA, A.A. da, NUNES, A. **Betão branco: fabrico, características e utilização estrutural**. In: Jornadas de Estruturas de Betão. 2., 1998. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal. Disponível em: www.afaconsultores.pt/download.php?fich=2296_1.pdf. Acesso em: 09/11/2007

FREIRE, K.R.R. **Avaliação do desempenho de inibidores de corrosão em armaduras de concreto**. 2005. 210p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

FU, X.; HOU, W.; YANG, C.; LI, D.; WU, X. Studies on Portland cement with large amount of slag**. Cement and Concrete Research**, v.30, n.4, p.645-649. 2000.

GAO, J.M.; QIAN, C.X.; LIU, H.F.; WANG, B.; LI, L. ITZ microstructure of concrete containing GGBS. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n.7, p. 1299-1304. 2005.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1987. 453p.

GOMES, N. S. **Influência de ativadores químicos na penetração de cloretos em concretos de misturas binárias e ternárias**. 2003, 170f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

GRACE CONSTRUCTION PRODUCTS. **Technical Bulletin TB-0100: understanding aashto t277 and ASTM C1202 Rapid Chloride Permeability Test**. Cambridge, Canadá, 2006. Disponível em: < www.na.graceconstruction.com/custom/concrete/downloads/TB_0100B.pdf>. Acesso em: 01/11/2007.

HAMAD, B. S. Investigations of chemical and physical properties of white cement concrete. **Advanced Cement Based Materials**. v.2, n.4, p.161-167. 1995.

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

HELENE, P.R.L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: Pini: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1986. 46p. Disponível em: <http://publicacoes.pcc.usp.br/PDF/BTCAP283.pdf>. Acesso em: 21 mar. 2007.

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

HOPPE, T.F. **Resistividade elétrica de concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz**. 2005. 146p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

HOSSAIN, K.M.A.; LACHEMI, M. Corrosion resistance and chloride diffusivity of volcanic ash blended cement mortar. **Cement and Concrete Research**, v.34, n.4, p. 695-702. 2004.

HUSSAIN, S. E.; RASHEEDUZZAFAR, A.; AL-MUSALLAM, A.; AL-GAHTANI, A. S. Factors affecting threshold chloride for reinforcement corrosion in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 7, p. 1543-1555. 1995.

ISAIA, G.C. **Efeito sinérgico de misturas ternárias de cinza volante, cinza de casca de arroz e microssílica na durabilidade do concreto de elevado desempenho**. Brasil - Florianópolis, SC. 1996. p. 578-589. In: Proccedings of the International Congress on High-performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures, Florianópolis. Artigo técnico.

ISAIA, G.C.; GASTALDINI, A.L.G. **Concreto "verde" com teores muito elevados de adições minerais: um estudo de sustentabilidade** . Brasil - São Paulo, SP. 2004. 15 p. CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10., 2004, São Paulo, SP.

JOHN, V. M. **Cimentos de escória ativada com silicato de sódio**. 1995. 190f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

JULIO-BETANCOURT, G.A.; HOOTON, R.D. Study of the Joule effect on rapid chloride permeability values and evaluation of related electrical properties of concretes. **Cement and Concrete Research**, v.34, n.6, p.1007-1015. 2004.

KHATIB, J.M.; HIBBERT, J.J.Selected engineering properties of concrete incorporating slag **and** metakaolin**. Construction and Building Materials**, v.19, n.6, p.460-472. 2005.

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

KWON, Y-J. A study on the alkali-aggregate reaction in high-strength concrete with particular respect to the ground granulated blast-furnace slag effect. **Cement and Concrete Research**, v.35, n.7, p.1305-1313. 2005.

KORB, J-P. Microstructure and texture of cementitious porous materials. **Magnetic Resonance Imaging**, v.25, n.4, p. 466-469. 2007.

LEE, K.M., LEE, H.K., LEE S.H., KIM, G.Y. Autogenous shrinkage of concrete containing granulated blast-furnace slag. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 7, p.1279-1285. 2006.

LENG, F.; FENG, N.; LU, X. An experimental study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete. **Cement and Concrete Research**, v.30, n.6, p.989-992. 2000.

LONGUET, P.; BURGLEN, L. M.; ZELWER, A. La phase liquide du ciment hidraté. Revue du Materiaux de Construcion, n. 767, p. 34-41. 1973.

LUO, R.; CAI, Y.; WANG, C.; HUANG X. Study of chloride binding and diffusion in GGBS concrete. **Cement and Concrete Research**, v.33, n.1, p.1-7. 2003.

MACPHEE, D.E.; DUFFY, J.A.; HERFORT, D. Factors influencing colour in white Portland cements. In: International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC), 12., 2007, Montreal, Canada. **Proceedings**… Cement Association of Canada, 2007. CD-ROM.

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

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

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

MONTEMOR, M.F.; SIMÕES, A.M.P.; FERREIRA, M.G.S. Chloride-induced corrosion on reinforcing steel: from the fundamentals to the monitoring techniques. **Cement and Concrete Composites**, v.25, n.4-5, p.491-502. 2003.

MONTEMOR, M.F.; SIMÕES, A.M.P.; SALTA, M.M. Effect of fly ash on concrete reinforcement corrosion studied by EIS. **Cement and Concrete Composites**, v. 22, n. 1, p. 175-185, 2000.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do Concreto**. 2ª ed. São Paulo: Pini, 1997.

NGUYEN, T.Q.; DANGLA, P.; BAROGHEL-BOUNY, V.; PETIT, L. An approach for the physicochemical modeling of chloride ingress into cementitious materials. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 12., 2007, Montréal, Canada. **Anais eletrônicos**… Montréal: ICCC, 2007.

NIELSEN, E.P.; HERFORT, D.;. GEIKER M.R. Binding of chloride and alkalis in Portland cement systems. **Cement and Concrete Research**, v.35 n.1, p.117-123. 2005.

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

ONER, A.; E AKYUZ, S. An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete. **Cement and Concrete Composites**, v.29, n.6, p.505-514. 2007.

OTSUKI, N.; NAGATAKI, S.; NAKASHITA, K. Evaluation of AgNO3 solution spray Method for measurement of chloride penetration into hardener cementitious matrix materials. **ACI Materials Journal**, v. 89, n.6, 1992.

OUGLOVA, A.; BERTHAUD, Y.; FRANÇOIS, M.; FOCT, F. Mechanical properties of an iron oxide formed by corrosion in reinforced concrete structures. **Corrosion Science**, v. 48, n.12, p.3988-4000. 2006.

PASSUELO, A. **Análise de Parâmetros Influentes na Cromaticidade e no Comportamento Mecânico de Concretos à Base de Cimento Branco**. 2004. 175p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2004.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA). What is White Cement? **In: CONCRETE TECHNOLOGY TODAY**. Illinois: Portland Cement Association, v.20, n.1, 1999. Disponível em: http://www.cement.org. Acesso em: 30 de Novembro de 2006.

POUPARD, O.; AÏT-MOKHTAR, A.; DUMARGUE, P. Corrosion by chlorides in reinforced concrete: Determination of chloride concentration threshold by impedance spectroscopy. **Cement and Concrete Research**, v.34, n.6, p.991-1000, 2004.

RIZZON, A.C. **Determinação do coeficiente de difusão de cloretos e da vida útil de projeto de concretos moldados com cimento Portland branco**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Luterana do Brasil, Canoas. 2006.

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

SACILOTO, A.P. **Comportamento Frente à Ação de Cloretos de Concretos Compostos com Adições Minerais Submetidos a Diferentes Períodos de Cura**. 2005. 179p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2005.

SAEKI, T.; MONTEIRO, P.J.M. A model to predict the amount of calcium hydroxide in concrete containing mineral admixtures. **Cement and Concrete Research**, v.35, n.10, p.1914-1921. 2005.

SAGÜÉS, A. A.; MORENO, E. I.; ANDRADE, C. Evolution of pH during in-situ leaching in small concrete cavities. **Cement and Concrete Research**, v.27, p.1747-59, 1997.

SCHNEIDER, J. A. **Penetração de cloretos em concretos com escoria de alto forno e ativador químico submetidos a diferentes períodos de cura**. 2005. 154p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2005.

SHANNAG, M. J. High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume. **Cement and Concrete Composites**, v.22, n.6, p.399-406, 2000.

SHI, C. Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277) results. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 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 C1202) Results. **ACI Materials Journal**, v.95, n.4, p.221-232, July-August, 1998.

SILICA FUME ASSOCIATION (SFA). **Sílica Fume User's Manual.** Lovettsville, abr. 2005. 194p. Disponível em: http://www.silicafume.org/concrete-manual.html . Acesso em: 04 de Novembro de 2006.

SILVA, F.G. da. **Estudos de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos**. 2006. 236p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

SILVA, L. B. da; VENQUIARUTO, S.; DAL MOLIN, D.;ABREU, A. G. de. Estudo da absorção capilar em concretos brancos. In: Congresso Brasileiro de Concreto, 47, 2005, Recife-PE. **Anais**...Instituto Brasileiro de Concreto – IBRACON, 2005. CD-ROM.

SONG, H-W.; JANG, J-C.; SARASWATHY, V.; BYUN, K-J. An estimation of the diffusivity of silica fume concrete. **Building and Environment**, v.42, n.3 , p.1358-1367. 2007.

SPERB, J. E. L. **Carbonatação e absorção capilar de concretos com adições minerais e ativadores químicos**. 2003. 108p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

STANISH, K. D.; HOOTON, R. D.; THOMAS, M. D. A. **Testing the chloride penetration resistance of concrete: a literature review**. FHWA Contract DTFH61- 97-R-00022, University of Toronto, Canadá, 1997, 31p.

SYCHEVA, L.I.; OSTAPCHUK, O.V. Properties of white cement with reduced content of tricalcium aluminate. In: International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC), 11., 2003, Durban, South Africa. **Proceedings**…Cement and Concrete Institute of South África, 2003. CD-ROM.

TOUTANJI, H.A.; EL-KORCHI, T. The influence of silica fume on the compressive strength of cement paste and mortar. **Cement and Concrete Research**, v.25, n.7, p.1591-1602. 1995.

VIEIRA, G. L.; DAL MOLIN, D. C. Concretos produzidos com cimentos portland brancos e cinza: avaliação da resistividade elétrica. In: Congresso Brasileiro de Concreto, 47, 2005, Recife-PE. **Anais**... Instituto Brasileiro de Concreto – IBRACON, 2005. CD-ROM

WAINWRIGHT, P.J.; REY, N. The influence of ground granulated blastfurnace slag (GGBS) additions and time delay on the bleeding of concrete. **Cement and Concrete Composites**, v.22, n.4, 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.2, p.221-232, March-April, 2000.

WILD, S.; KHATIB, J.M; JONES A. Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete. **Cement and Concrete Research**, v.26, n.10, p.1537-1544. 1996.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). **The cement sustainability initiative**: our agenda for action. WBCSD, julho, 2002. 40p. Disponível em: <http://www.wbcsd.org/DocRoot/1IBetslPgkEie83rTa0J/cement-action-plan.pdf >. Acesso em: 22 mar. 2007.

WU, X.; JIANG, W.; ROY, D.M. Early activation and properties of slag cement**. Cement and Concrete Research**, v.20, n.6, p.961-974. 1990.

XI, Y.; SIEMER, D. D.; SCHEETZ, B. E. Strength development, hydration reaction and pore structure of autoclaved slag cemtn with added silica fume. **Cement and Concrete Research**, v.27, n.1, p.75-82, 1997.

XU, Y. The influence of sulphates on chloride binding and pore solution chemistry. **Cement and Concrete Research**, v.27, n.12, p.1841-1850, 1997.

YEAU, K.Y.; KIM, E.K. An experimental study on corrosion resistance of concrete with ground granulate blast-furnace slag. **Cement and Concrete Research**, v.35, n.7, p.1391-1399. 2005.