

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

**RETRAÇÃO TOTAL E PENETRAÇÃO DE CLORETOS
EM CONCRETOS COM CIMENTO PORTLAND
BRANCO E ESCÓRIA DE ALTO FORNO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Luciano de Medeiros Dellinghausen

Santa Maria, RS, Brasil

2009

**RETRAÇÃO TOTAL E PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM
CONCRETOS COM CIMENTO PORTLAND BRANCO
E ESCÓRIA DE ALTO FORNO**

por

Luciano de Medeiros Dellinghausen

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

2009

**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

**RETRAÇÃO TOTAL E PENETRAÇÃO DE CLORETOS
EM CONCRETOS COM CIMENTO PORTLAND BRANCO
E ESCÓRIA DE ALTO FORNO**

elaborada por
Luciano de Medeiros Dellinghausen

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. Dr. Geraldo Cechella Isaia (UFSM)

Prof. Dr. Antônio Alberto Nepomuceno (UNB)

Santa Maria, 25 de junho de 2009

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, ao meu esforço, dedicação e perseverança, os quais são estimulados por meu Deus interior e pelos valores que me foram ensinados durante minha criação. Em virtude disso é que agradeço aos meus pais pela dedicação continuada. Às minhas irmãs pelo convívio sadio e amigável. À minha namorada, pelo carinho, afeto e companheirismo nestes últimos anos. Aos meus amigos, a cada um deles que considerado como o irmão que não tive, sempre prontos para qualquer situação e eventualidade. Todas estas pessoas foram importantes no meu crescimento e amadurecimento, além de terem proporcionado momentos memoráveis e inesquecíveis.

Agradeço ao Professor Antônio Luiz Guerra Gastaldini pelas orientações e conhecimentos passados, à sua dedicação e prontidão. Ao Professor Geraldo Cechella Isaia pelos ensinamentos, dúvidas sanadas e bibliografias emprestadas. Agradeço também a todos os demais professores do curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, pela parceria e ensinamentos.

Agradeço aos colegas do curso de Pós-Graduação e integrantes do GEPECON, Fábio e Bóris, pelo coleguismo e parceria, além dos ex-mestrandos André, Daniel, Éder e Henrique, pelas dicas, conselhos e auxílios dados. A todos os alunos bolsistas de iniciação científica e voluntários do curso de graduação em Engenharia Civil, participantes do GEPECON, Andriago, Antônia, Dilnei, Fabrício, Felipe, Guilherme, Karina e Marcela, pela amizade e pelos serviços prestados.

Ao Eliomar, Mauro, Paulo, João, Aleise, Vítor, Marialva e a todos os funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) e do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), pela disponibilidade, parceria e auxílios dados durante a pesquisa.

À empresa Camargo Correa, pela cessão de materiais para a pesquisa.

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

À UFSM e ao PPGEC pela oportunidade oferecida.

E por fim, a todos aqueles que, de um modo ou outro, auxiliaram e ajudaram na concretização desta pesquisa.

MUITÍSSIMO OBRIGADO!

RESUMO

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

Retração total e penetração de cloretos em concretos com cimento Portland branco e escória de alto forno

AUTOR: LUCIANO DE MEDEIROS DELLINGHAUSEN
ORIENTADOR: ANTÔNIO LUIZ GUERRA GASTALDINI
Local e data da defesa: Santa Maria, 25 de junho de 2009.

A retração hidráulica é um fenômeno que ocorre no concreto, submetido ou não a carregamento, devido à perda de umidade, uma vez exposto ao meio ambiente e permitida sua secagem. Ela é responsável por praticamente toda a deformação total por retração no concreto. Um elemento de concreto com restrição de deformação por retração pode desenvolver tensões que levam à formação de fissuras, através das quais agentes agressivos podem penetrar e causar algum dano à armadura, reduzindo sua resistência e durabilidade. O agente agressivo mais comum é o íon cloreto, o qual é considerado como a maior causa de corrosão prematura das barras de armaduras das estruturas de concreto, afetando sua estabilidade e vida útil. A corrosão de armaduras devido ao ingresso de íons cloretos da água do mar no concreto é universalmente conhecida como o fator de maior influência nos mecanismos destrutivos de estruturas marinhas. A utilização de adições minerais como a escória de alto forno, o aumento no prazo de cura e a redução na relação água/aglomerante são medidas que podem diminuir a penetração desses íons no concreto. Este trabalho teve por objetivo investigar a influência do teor de escória e do período de cura na retração hidráulica, na penetração de íons cloretos e na resistência à compressão axial de concretos compostos de cimento Portland de alta resistência inicial e cimento Portland branco estrutural. Foram adotadas relações água/aglomerante de 0.30, 0.42 e 0.55, teores de escória, em substituição ao cimento Portland, de 0%, 50% e 70%, além de períodos de cura de 3 e 7 dias. Foi empregada uma mistura composta de 50% de escória em substituição ao cimento Portland branco, ativada quimicamente por sulfato de sódio (4% da massa de aglomerante) para analisar a influência do ativador nas propriedades investigadas. As idades avaliadas para o ensaio de resistência à compressão foram de 3, 7, 28 e 91 dias; para retração hidráulica idades de 7, 14, 21, 28, 35, 56, 91 e 182 dias e, para penetração de íons cloretos (imersão em solução salina) as idades de 7, 14, 28, 56 e 91 dias. Antes de serem imersos em solução salina os corpos-de-prova foram submetidos a um período de secagem de 91 dias. Dos resultados obtidos, constatou-se que o aumento do teor de escória resultou em decréscimo nos valores de resistência à compressão, de retração e de penetração de cloretos para os dois cimentos investigados. A diminuição no período de cura resultou em maiores valores de retração e de penetração de cloretos, tanto no concreto branco quanto no cinza, independentemente do teor de escória utilizado.

Palavras chave: retração; cimento Portland branco; escória de alto forno; cura; cloretos.

ABSTRACT

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

Total shrinkage and chloride penetration in concretes with white Portland cement and blast furnace slag

AUTHOR: LUCIANO DE MEDEIROS DELLINGHAUSEN
THESIS ADVISOR: ANTÔNIO LUIZ GUERRA GASTALDINI
Location and defense's date: Santa Maria, June 25th, 2009.

Drying Shrinkage is a phenomenon that occurs in concrete, subjected or not to a load, due to water loss, once exposed to environment and allowed to dry. It is responsible for almost the entire total shrinkage strain in concrete. A concrete element with restrained shrinkage deformation may develop tensions that cause cracks, allowing the ingress of aggressive agents that may cause some damage to the reinforcement, reducing, consequently, its strength and durability. The most common aggressive agent into concrete is the chloride ion, which is considered the great responsible for the early reinforcement corrosion of concrete structures, affecting its stability and durability. Corrosion of reinforcement bars due to the ingress of salts from sea water into concrete is recognized to be the most influent factor in the destructive mechanisms for marine structures. The use of mineral admixtures such as blast furnace slag, the increase of curing duration and the water/binder ratio reduction are measures that may reduce the chloride ion penetration. The aim of this study was to investigate the influence of the cement replacement content by slag, as well as the duration of curing on drying shrinkage, chloride ion penetration and compressive strength of concretes made with high early age strength cement and white Portland cement. Water-binder ratios of 0.30, 0.42 and 0.55, curing duration of 3 and 7 days, besides the cement replacement contents of 0%, 50% and 70% were investigated. In order to analyze the influence of the alkali activation on the properties investigated, a concrete made with 50% white Portland cement replacement content by slag and activated by sodium sulfate (4% in mass of binder) was used. The compressive strength was evaluated in the ages of 3, 7, 28 and 91 days; the drying shrinkage in the ages of 7, 14, 21, 28, 35, 56, 91 and 182 days, and the chloride ion penetration (immersion test in chloride solution) in the ages of 7, 14, 28, 56 and 91 days. Before being immersed in the chloride solution, the specimens were subjected to a drying period of 91 days. The results obtained revealed that an increase in the slag content decreased the compressive strength and the drying shrinkage values, besides the smaller depths of chloride penetration with both cements used. Reducing the curing duration resulted greater drying shrinkage and depth of chloride penetration for both cements, independently the slag content.

Keywords: shrinkage; white Portland cement; blast furnace slag; curing; chlorides.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 5.1 – Museu Iberê Camargo, Porto Alegre/RS (Fonte: www.iberecamargo.org.br/content/novasede/maquetes.asp).....	52
FIGURA 5.2 – Flextronics, Sorocaba/SP (Fonte: www.abcp.org.br/downloads/cimento_hj/jornal_32/arquitetura.htm).....	52
FIGURA 5.3 – Auditório de Tenerife, Tenerife/Espanha (Fonte: www.auditoriodetenerife.com/index_galeria.php).....	52
FIGURA 5.4 – Centro Administrativo Rio Negro, Barueri/SP (Fonte: www.arcoweb.com.br/arquitetura/ricardo-juliao-arquitetura-e-urbanismo-centro-administrativo-01-03-2009.html).....	53
FIGURA 5.5 – Ponte Irineu Bornhausen, Brusque/SC (Fonte: www.carloscampos.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=6:concretobranco&catid=33:Informa%EF%BF%BD%C3%B5es&Itemid=65).....	53
FIGURA 5.6 – Lótus Temple, Nova Délhi/Índia (Fonte: www.alovelyworld.com/webinde/htmgb/inde070.htm).....	53
FIGURA 5.7 – RSA Tower Montgomery, Alabama/EUA (Fonte: www.castonecorp.com/portfolio/rsa.html).....	54
FIGURA 5.8 – Aeroporto de Dulles, Virgínia/EUA (Fonte: www.greatbuildings.com/buildings/Dulles_Airport.html).....	54
FIGURA 5.9 – Arquidiocese de Los Angeles, Califórnia/EUA (Fonte: veja.abril.com.br/180902/p_067.html).....	55
FIGURA 5.10 – Torre do Tombo, Lisboa/Portugal (Fonte: www.aatt.org).....	55
FIGURA 5.11 – Panamerica Park, São Paulo/SP (Fonte: www.hochtief.com.br/escritorios_panamerica.asp#).....	55
FIGURA 6.1 – Curva granulométrica do agregado miúdo.....	60
FIGURA 6.2 – Curva granulométrica do agregado graúdo.....	60
FIGURA 6.3 – Corpo-de-prova acoplado ao comparador de expansibilidade.....	65
FIGURA 6.4 – Corpo-de-prova após ruptura e aspensão de nitrato de prata.....	67
FIGURA 6.5 – Regiões de penetração e linhas paralelas a cada 1 mm.....	67

FIGURA 7.1 – Retração total dos concretos brancos com 3 dias de cura para as diferentes relações a/agl.....	70
FIGURA 7.2 – Retração total dos concretos brancos com 7 dias de cura para as diferentes relações a/agl.....	71
FIGURA 7.3 – Retração total dos concretos cinzas com 3 dias de cura para as diferentes relações a/agl.....	72
FIGURA 7.4 – Retração total dos concretos cinzas com 7 dias de cura para as diferentes relações a/agl.....	73
FIGURA 7.5 – Gráficos para obtenção dos coeficientes k' , mistura REF CPB.....	81
FIGURA 7.6 – Gráficos para obtenção dos coeficientes k' , mistura 50E CPB.....	82
FIGURA 7.7 – Gráficos para obtenção dos coeficientes k' , mistura 70E CPB.....	83
FIGURA 7.8 – Gráficos para obtenção dos coeficientes k' , mistura 50A CPB.....	84
FIGURA 7.9 – Gráficos para obtenção dos coeficientes k' , mistura REF CPV.....	85
FIGURA 7.10 – Gráficos para obtenção dos coeficientes k' , mistura 50E CPV.....	86
FIGURA 7.11 – Gráficos para obtenção dos coeficientes k' , mistura 70E CPV.....	87

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 – Resultados de retração da pesquisa de Sivasundaram e Malhotra (1992).....	36
TABELA 3.2 – Resumo das condições de ensaio e resultados das principais referências.....	37
TABELA 6.1 – Características físicas dos aglomerantes.....	57
TABELA 6.2 – Composição química dos aglomerantes.....	58
TABELA 6.3 – Características físicas dos agregados.....	59
TABELA 6.4 – Traços unitários para as misturas com CPB e CPV.....	62
TABELA 6.5 – Consumo de materiais por m ³ de concreto.....	63
TABELA 7.1 – Retração final das misturas avaliadas.....	69
TABELA 7.2 – Coeficientes de penetração (k').....	89
TABELA 7.3 – Coeficientes de penetração (k') da pesquisa de Siqueira (2008).....	90
TABELA 7.4 – Aumento de k' em função da cura ao ar de 91 dias.....	91
TABELA 7.5 – Índices de penetração (Ik') em relação ao concreto REF CPB.....	92
TABELA 7.6 – Índices de penetração (Ik') em relação ao concreto REF CPV.....	92
TABELA 7.7 – Reduções de penetração com o aumento do prazo de cura.....	93
TABELA 7.8 – Resistências médias obtidas no ensaio de compressão axial.....	95
TABELA 7.9 – Índices de resistência das misturas em relação ao concreto de referência branco.....	97
TABELA 7.10 – Índices de resistência das misturas em relação ao concreto de referência cinza.....	97

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
Abatim	Abatimento
AgNO₃	Nitrato de prata
Al₂O₃	Óxido de alumínio
a/agl	Relação água/aglomerante em massa
agl	Aglomerante
°C	Graus Celsius
CO₂	Dióxido de carbono
CP	Cimento Portland
CPB	Cimento Portland branco
CPV- ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
C₃A	Aluminato tricálcico
C₄AF	Ferroaluminato tetracálcico
CaCO₃	Carbonato de cálcio
CaO	Óxido de cálcio
Ca(OH)₂	Hidróxido de cálcio
E	Escória de alto forno
Fe₂O₃	Óxido de ferro
K₂O	Óxido de potássio
MPa	Mega-Pascal
MgO	Óxido de magnésio
Na	Sódio
NaCl	Cloreto de sódio
Na₂O	Óxido de sódio
Na₂SO₄	Sulfato de sódio
pH	Potencial de hidrogênio
RB	Concreto de referência moldado com CPB

REF	Mistura de referência, composta somente de cimento Portland como aglomerante
R²	Coeficiente de determinação
S	Enxofre
SO₃	Trióxido de enxofre
SiO₂	Dióxido de silício
UR	Umidade relativa do ar
3D	Cura de 3 dias
7D	Cura de 7 dias
50A	Mistura composta de 50% de CP + 50% de escória como aglomerantes, além da adição de 4% (da massa de aglomerante) de ativador químico (Na ₂ SO ₄)
50E	Mistura composta de 50% de CP + 50% de escória como aglomerantes
70E	Mistura composta de 30% de CP + 70% de escória como aglomerantes
91d	91 dias de imersão em solução salina
Ø	Diâmetro
#	Abertura da malha de uma peneira padronizada

SUMÁRIO

RESUMO.....	4
ABSTRACT.....	5
LISTA DE FIGURAS.....	6
LISTA DE TABELAS.....	8
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....	9
1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Justificativas da pesquisa.....	17
1.2 Objetivos.....	18
1.2.1 Objetivo geral.....	18
1.2.2 Objetivos específicos.....	18
1.3 Estrutura da dissertação.....	19
2 ESCÓRIA DE ALTO FORNO E ATIVAÇÃO QUÍMICA.....	21
2.1 Introdução.....	21
2.2 Escória de alto forno como aglomerante no concreto.....	22
2.3 Ativação química da escória.....	24
3 RETRAÇÃO DO CONCRETO.....	26
3.1 Introdução.....	26
3.2 Mecanismos de retração.....	26
3.3 Fatores influentes na retração hidráulica.....	28
3.4 Variações volumétricas do concreto nas primeiras idades.....	31
3.5 Influência das condições de cura na retração.....	38
3.6 Influência de ativadores químicos na retração de concretos de escória.....	40
4 AÇÃO DE ÍONS CLORETOS NO CONCRETO ARMADO.....	44
4.1 Introdução.....	44
4.2 Influência da escória e das condições de cura na penetração de cloretos.....	45
5 CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND BRANCO ESTRUTURAL.....	49
5.1 Introdução.....	49

5.2 Características físicas e químicas do cimento Portland branco.....	50
5.3 Exemplos de aplicações do concreto branco estrutural.....	51
6 MATERIAIS E MÉTODOS.....	56
6.1 Introdução.....	56
6.2 Caracterização dos materiais.....	57
6.2.1 Aglomerantes.....	57
6.2.2 Ativador químico.....	58
6.2.3 Agregados.....	58
6.2.4 Aditivo superplastificante.....	61
6.3 Procedimentos de dosagem, moldagem e cura.....	61
6.4 Ensaio experimentais.....	64
6.4.1 Retração total.....	64
6.4.2 Penetração de cloretos por imersão.....	65
6.4.3 Resistência à compressão axial.....	67
7 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	69
7.1 Análise dos resultados do ensaio de retração total.....	69
7.1.1 Comparação de desempenho entre os cimentos investigados.....	74
7.1.2 Comparação entre os diferentes teores de escória.....	75
7.1.2.1 Concreto branco.....	75
7.1.2.2 Concreto cinza.....	76
7.1.3 Comparação entre os períodos de cura.....	76
7.1.3.1 Concreto branco.....	76
7.1.3.2 Concreto cinza.....	76
7.1.4 Discussão dos resultados.....	77
7.2 Análise dos resultados do ensaio de penetração de cloretos por Imersão.....	79
7.3 Análise dos resultados do ensaio de resistência à compressão.....	94
8 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	100
8.1 Sugestões para pesquisas futuras.....	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103
APÊNDICES.....	114
APÊNDICE A – Retração total média nas idades de ensaio, para todas as misturas, cura de 3 dias.....	115

APÊNDICE B – Retração total média nas idades de ensaio, para todas as misturas, cura de 7 dias.....	116
APÊNDICE C – Profundidades de penetração de cloretos para os concretos moldados com CPB.....	117
APÊNDICE D – Profundidades de penetração de cloretos para os concretos moldados com CPV.....	118

1 INTRODUÇÃO

O concreto desempenha um papel indispensável na construção civil, pois está presente na maioria das obras, mesmo que de forma despercebida, como, por exemplo, nas fundações de uma construção em estrutura metálica, assim como em galerias de esgoto, águas pluviais entre outros. Isso se justifica pela sua versatilidade de formas e usos, uma vez que possui consistência plástica no estado fresco, podendo ser moldado em fôrmas com liberdade de geometrias conforme as intenções dos projetistas. Além disso, as matérias-primas necessárias para sua obtenção apresentam custo relativamente baixo e são encontradas na maioria dos lugares onde o concreto é usado, o que viabiliza seu emprego inclusive em simples reparos domésticos, como em muros, calçadas, pisos entre outros usos de pequenas proporções. Toda essa praticidade e conveniência colocam o concreto, de acordo com Mehta e Monteiro (2008), em segundo lugar dentre os materiais mais consumidos no planeta, superado somente pela água.

Devido ao crescente consumo do concreto pela humanidade, compreende-se a necessidade de racionalidade e sustentabilidade no uso das matérias-primas constituintes, evitando-se, assim, o desperdício das mesmas e da energia envolvida no processo de produção do concreto como um todo. Acresce a isto o fato de que, conforme Mehta e Monteiro (2008), cada tonelada de cimento produzido gera outra tonelada de CO₂ liberado na atmosfera durante seu processo de obtenção.

Uma prática bastante difundida, que visa redução da quantia de gases poluentes liberados durante a fabricação do cimento, é a redução de seu consumo por metro cúbico de concreto, sem que haja o comprometimento de sua resistência tampouco de sua durabilidade. Para tanto, faz-se uso de subprodutos industriais na forma de substituição parcial de seu conteúdo, de forma que sejam, então, aplicados juntamente com o cimento Portland como material aglomerante. Alguns subprodutos industriais, muitas vezes, são descartados em locais impróprios, podendo ser danosos ao solo e ao lençol freático, pois podem contaminá-los. Além dos benefícios já mencionados, pode-se afirmar que o uso desses subprodutos industriais é bastante benéfico para o concreto, uma vez que o torna menos poroso e conseqüentemente menos suscetível a alguns tipos de agentes agressivos que

possam atacar a armadura. Como exemplos desses materiais são citados a cinza volante, a sílica ativa, a cinza da casca do arroz e o metacaulim, os chamados materiais pozolânicos, constituídos essencialmente de sílica. Esta reage com o Ca(OH)_2 remanescente da reação de hidratação do cimento Portland, formando produtos resistentes; outro subproduto industrial comumente empregado é a escória de alto forno, segundo o ACI Committee 233 (1995), um produto não metálico que consiste essencialmente de silicatos e aluminosilicatos de cálcio e de outras bases. Desta forma ela apresenta propriedades pozolânicas e cimentícias, justificando seu emprego bastante consolidado como substituto parcial do cimento Portland no concreto.

Tazawa, Yonekura e Tanaka (1989) e Sakai et al. (1992) empregaram escória em substituição parcial ao cimento Portland comum e comprovaram esta prática de grande valia na redução da magnitude da retração hidráulica, a qual ocorre devido à perda de umidade no concreto. Esse fenômeno pode reduzir sua resistência e durabilidade, de modo que um elemento de concreto com restrição de deformação por retração pode desenvolver tensões que levam à formação de fissuras, através das quais agentes agressivos podem penetrar e causar algum dano à armadura no caso do concreto armado. Os fatores que motivam o uso da escória de alto forno no concreto são: seu baixo custo, comparada ao cimento Portland; a possibilidade de ser empregada em elevados teores de substituição; redução da porosidade do concreto quando aplicada; além da questão ambiental, uma vez que dessa forma se consome menos cimento e há uma destinação para a escória.

Como no Brasil a construção civil tem se apresentado em crescente processo de modernização, do mesmo modo que em boa parte dos mercados internacionais, o setor acaba investindo em novos materiais e na padronização de novos procedimentos construtivos. Conforme essas tendências e necessidades, o concreto branco vem sendo cada vez mais empregado, valorizando esteticamente a estrutura, de modo que não seja considerada apenas como elemento estrutural.

Com relação à durabilidade do concreto branco, no Brasil, caracterizam-se como pioneiros alguns trabalhos desenvolvidos na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como o de Kirchheim (2003), que trata da carbonatação e absorção capilar de concretos de cimento Portland branco estrutural. Mattos e Dal Molin (2003) avaliaram a influência do cimento Portland branco estrutural na resistência à penetração acelerada de íons cloretos e na absorvidade de concretos com

diferentes relações água/cimento; Passuelo (2004) analisou os parâmetros influentes na cromaticidade e no comportamento mecânico de concretos à base de cimento branco; Silva et al. (2005) estudaram a absorção capilar em concretos brancos; Vieira e Dal Molin (2005) avaliaram a resistividade elétrica de concretos produzidos com cimento Portland branco; Aguiar (2006) fez a análise da adição de pigmentos quanto à resistência à compressão em concretos de cimento Portland branco estrutural.

Dando continuidade ao tema da durabilidade de concretos brancos, no Grupo de Estudos e Pesquisas em Concreto (GEPECON) da Universidade Federal de Santa Maria, alguns estudos, sob a orientação do Professor Antônio Luiz Guerra Gastaldini, já foram realizados, como é o caso da pesquisa de Siqueira (2008), na qual foi avaliada a penetração de cloretos em concretos compostos com cimento Portland branco e escória de alto forno, ativados quimicamente. Empregando esses mesmos concretos, Lübeck (2008) estudou a resistividade elétrica e Barin (2008) analisou a carbonatação e absorção capilar, de modo que estas três pesquisas caracterizaram a primeira fase dos estudos voltados à durabilidade de concretos brancos. Atualmente, durante a segunda fase, os ensaios em andamento são os de retração total (desenvolvido na presente pesquisa), permeabilidade ao oxigênio, resistência a sulfatos e estrutura da pasta.

Conforme o atual contexto, são necessários novos estudos e pesquisas dando seqüência à evolução do conhecimento das características de durabilidade de concretos moldados com cimento Portland branco estrutural, objetivando o surgimento de diretrizes seguras para sua produção e emprego. Desse modo, Kirchheim (2003) comenta que a execução de concreto aparente com cimento Portland branco se apresenta como uma proposta atual e moderna, uma vez que oferece novas possibilidades dentro do contexto da arquitetura e engenharia civil, desde obras de grande porte a peças pré-moldadas.

1.1 Justificativas da pesquisa

Um fator que motiva o desenvolvimento de novos estudos e pesquisas voltados à durabilidade das estruturas de concreto armado é que, na construção civil, muitos produtos são aplicados sem que se conheça seu provável comportamento perante a exposição a algum agente potencialmente comprometedor de seu desempenho, proporcionando situações de redução de durabilidade em algumas construções, o que reduz sua vida útil. Não só a questão da durabilidade, mas também o aspecto estético muitas vezes é comprometido em função da má aplicação de algum material ou até mesmo por falta de conhecimento dos cuidados a serem tomados durante o seu emprego. Desta maneira, é indispensável que se conheçam as características do material, bem como o seu comportamento quando submetido às diversas solicitações estruturais e exigências estéticas, de modo que não se comprometa o fim para o qual foi aplicado, como é o caso do concreto branco em estruturas aparentes.

Kirchheim (2003), autora de um dos primeiros estudos brasileiros voltados à durabilidade de concretos brancos, enfatiza em sua pesquisa que até então a bibliografia sobre o tema não era ampla. A autora constatou que havia poucas publicações, em sua maioria estrangeiras, referentes à produção do cimento branco, às suas propriedades químicas e físico-mecânicas, à sua hidratação, aos seus tempos inicial e final de pega, sendo geralmente comparadas com as mesmas características do cimento cinza. Kirchheim (2003) ainda observa que, mesmo em países onde já se utilizava o cimento branco em grandes obras, o conhecimento da sua durabilidade ainda era deficiente. Embora alguns outros trabalhos já tenham sido desenvolvidos, esse cenário continua similar ao relatado pela autora, uma vez que ainda mais raras são as publicações de estudos focados no uso de adições minerais juntamente com cimento Portland branco.

Um dos ensaios comumente usados para prever a durabilidade do concreto, buscando evitar a ocorrência de fissuração, é o de retração hidráulica, um fenômeno que tem gerado preocupação com o rápido desenvolvimento do concreto de alto desempenho. Contudo, não há muita informação sobre pesquisas em que este ensaio tenha sido aplicado para concretos brancos estruturais, com ou sem escória. Alguns estudos relatam o comportamento de concretos de cimento Portland comum

com escória frente à retração hidráulica, porém é mais difícil de encontrar relatos sobre concretos de CPV, ou similares, com escória, nos quais haja comparações entre períodos de cura diferentes frente à retração.

Neto (2002) comenta que a retração do cimento de escória (100% de escória como aglomerante e ativada quimicamente) é elevada se comparada à do cimento Portland, porém faltam conhecimentos aprofundados sobre seu comportamento, sua intensidade, a idade em que é mais intensa, o papel da retração autógena, além do efeito do teor de ativador. O autor ainda comenta que o controle da retração do cimento de escória é determinante para sua aplicação, já que ela pode causar fissuras e danos às peças executadas com este tipo de cimento.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo principal desta pesquisa é analisar o desempenho de concretos de CPB-40 e CPV-ARI, com e sem adição de escória de alto forno aplicada em substituição ao cimento nos teores de 50% e 70%, frente à retração total.

1.2.2 Objetivos específicos

Averiguar a influência da escória de alto forno no desempenho do concreto, frente à retração total, à resistência à compressão axial e à penetração de íons cloretos em corpos-de-prova submetidos a 91 dias de secagem ao ar após a cura úmida.

Verificar e comparar a influência dos diferentes prazos de cura estudados frente à retração, à penetração de íons cloretos e à resistência à compressão axial dos concretos moldados com CPB e CPV, com e sem escória.

Analisar o comportamento de concretos brancos moldados com escória, no teor de 50%, ativada por sulfato de sódio (4% da massa de aglomerante), frente aos ensaios propostos, em comparação com as demais misturas investigadas.

Comparar os desempenhos dos concretos moldados com CPB e CPV entre si, com relação às propriedades pesquisadas.

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação se divide em oito capítulos. No primeiro foi feita uma introdução ao tema em questão, expondo a importância da pesquisa, as justificativas e os objetivos a serem alcançados.

O segundo capítulo trata da escória de alto forno e da sua ativação, relatando um pouco do seu histórico como material aglomerante e explicando sua procedência e obtenção. Também são abordados os tratamentos a ela dados para que se obtenha o melhor desempenho possível a partir do seu emprego, além de expor suas características físicas e químicas e mencionar algumas constatações de pesquisas anteriores relevantes ao tema. São expostas ainda algumas características do concreto de escória álcali ativado, a ação química dos ativadores alcalinos nas reações do cimento, assim como alguns exemplos de ativadores.

O terceiro capítulo refere-se especificamente aos diferentes tipos de retração aos quais o concreto está sujeito, com ênfase para a retração hidráulica, que é responsável por quase toda a deformação por retração no concreto. Neste capítulo são mencionados fundamentos teóricos indispensáveis à compreensão dos mecanismos de retração, os fatores influentes neste fenômeno que ocorre comumente no concreto, além dos resultados de estudos nos quais foram empregados ensaios de retração.

A ação de íons cloretos no concreto, a influência da escória e das condições de cura na penetração de cloretos são abordadas no quarto capítulo.

Questões referentes ao concreto branco, como os cuidados tomados na sua fabricação e durante seu emprego, suas características físicas e químicas, além de ilustrações de exemplos de sua aplicação em edificações, são expostos no quinto capítulo.

O sexto capítulo faz menção aos materiais empregados na produção dos concretos avaliados na pesquisa, expondo suas caracterizações físicas e químicas. Neste capítulo também são mencionados os métodos de ensaios realizados.

Discussões e resultados dos ensaios são apresentados no capítulo sétimo, fazendo-se, sempre que possível, comparações com as constatações da bibliografia consultada.

Finalmente, o oitavo capítulo relata as conclusões a partir da análise dos resultados, tentando esclarecer as questões levantadas nos objetivos da pesquisa. Apresenta também sugestões para pesquisas futuras que acrescentem conhecimentos sobre a durabilidade dos concretos investigados.

2 ESCÓRIA DE ALTO FORNO E ATIVAÇÃO QUÍMICA

2.1 Introdução

A necessidade de práticas industriais sustentáveis e menos danosas ao meio ambiente tem influenciado na constituição dos materiais de construção, uma vez que o uso de subprodutos industriais tem sido uma prática globalmente difundida na indústria da construção civil. Para a produção do concreto, especificamente, faz-se uso do cimento Portland, cuja fabricação libera gases poluentes na atmosfera. Uma alternativa para redução dessa poluição é a diminuição do consumo de cimento no concreto, fazendo-se uso de subprodutos industriais na forma de substituição parcial do cimento. Um subproduto industrial utilizado há muito tempo é a escória granulada de alto forno, tanto como material aglomerante quanto agregado. O uso da escória na fabricação de cimentos compostos começou, segundo o ACI Committee 233 (1995), em 1905 nos Estados Unidos. Já o seu emprego como material aglomerante em separado, misturado com cimento Portland somente na betoneira, ganhou aceitação no final da década de 1950 em países como África do Sul, Austrália, Reino Unido, Japão, Canadá e Estados Unidos.

Subprodutos industriais, como a escória, muitas vezes são descartados em locais impróprios, proporcionando riscos de contaminação ao solo e ao lençol freático. Além dos benefícios já mencionados, é globalmente conhecido o benéfico desempenho da escória quando empregada no concreto, uma vez que promove um refinamento dos seus poros e o torna, conseqüentemente, menos suscetível a agentes agressivos.

2.2 Escória de alto forno como aglomerante no concreto

Segundo o ACI Committee 233 (1995), a escória de alto forno é um produto não metálico e consiste essencialmente de silicatos e aluminosilicatos de cálcio e de outras bases. Ela se origina do processo de fabricação do ferro-gusa ou ferro fundido, sendo fundida simultaneamente com o ferro no alto forno, onde os óxidos contidos nos minerais de ferro se reduzem e há uma separação das impurezas que os acompanham. Através da fusão dessas impurezas, juntamente com a adição de fundentes e as cinzas do coque (combustível), é que se forma a escória, flutuando com o ferro derretido. Além dela, do alto forno também se obtém ferro fundido que é coletado da sua parte inferior, pelo fato de ter massa específica muito maior que a da escória. Ambos são periodicamente retirados do forno à temperatura de aproximadamente 1500°C. Neville (1997) afirma que cada tonelada de ferro-gusa produzida gera aproximadamente 300 Kg de escória.

Para otimizar as propriedades cimentícias, a escória fundida deve ser rapidamente esfriada tão logo que saia do alto forno. De acordo com o ACI Committee 233 (1995), o rápido resfriamento minimiza a cristalização e transforma a escória fundida em partículas vítreas, geralmente menores que 4,75 mm. A atividade hidráulica da escória depende muito do seu conteúdo vítreo. Escórias resfriadas lentamente são predominantemente cristalinas, de forma que não possuem propriedades cimentícias significativas.

O processo de resfriamento mais comum para granular a escória e torná-la cimentícia é aquele no qual se faz uso de água. Há alguns anos, geralmente a escória fundida era simplesmente colocada imersa em água (ACI Committee 233, 1995). Conforme o Comitê, um sistema de granulação moderno e mais eficiente usa jatos de água a alta pressão sobre a escória fundida, numa relação água/escória, em massa, de aproximadamente 10/1. Dessa forma, a escória é resfriada quase que instantaneamente a uma temperatura abaixo do ponto de ebulição da água, formando, conseqüentemente, partículas compostas de material altamente vítreo (ACI Committee 233, 1995).

Após a formação da escória granulada de alto forno, ela deve ser seca e moída antes de sua aplicação como material cimentício. Antes e depois da moagem, imãs são geralmente utilizados para remoção de ferro metálico remanescente (ACI

Committee 233, 1995). A escória granulada pode ser moída na finura que se deseje, embora seja comumente moída a uma finura maior que aquela do cimento Portland, com o objetivo de obter maior atividade hidráulica nas primeiras idades. Sua massa específica, após ser moída, é de aproximadamente $2,9 \text{ g/cm}^3$, pouco menor que a do cimento Portland (Neville, 1997). Tipicamente, segundo o ACI Committee 233 (1995), silício, cálcio, alumínio, magnésio e oxigênio constituem 95% ou mais da escória. De acordo com Neville (1997, p. 98), “escórias com as seguintes proporções, em porcentagem, dos óxidos a seguir dão bons resultados no concreto: cal (40 a 50), sílica (30 a 40), alumina (8 a 18) e óxido de magnésio (0 a 8)”.

Quando a escória é misturada com água, sua hidratação inicial é muito mais lenta que a do cimento Portland; dessa forma, cimento Portland, sais alcalinos ou cal são adicionados para acelerar a reação (ACI Committee 233, 1995). Conforme o Comitê, a hidratação da escória em presença do cimento Portland depende bastante da quebra e dissolução da sua estrutura vítrea pelos íons hidroxila liberados durante a hidratação do cimento Portland. Na hidratação da escória, esta reage com álcalis e hidróxido de cálcio para produzir C-S-H (silicatos de cálcio hidratados) secundários, caracterizando assim sua atividade pozolânica.

Smolczyk (1978) comenta que há geral concordância entre vários pesquisadores de que o principal produto de hidratação, originado quando a escória é misturada com cimento Portland e água, é essencialmente o mesmo formado quando o cimento Portland hidrata, isto é, o C-S-H. Os hidratos da escória geralmente são mais similares à forma de gel que os produtos de hidratação do cimento Portland, propiciando assim uma pasta mais densa (ACI Committee 233, 1995).

A escória é geralmente utilizada, segundo o ACI Committee 233 (1995), em teores entre 25% e 70% do total de material aglomerante, sendo que a sua proporção deve ser regida pelo propósito para o qual o concreto será empregado, pela temperatura de cura, pela sua atividade hidráulica, pelos tempos de mistura e de moldagem, pelo controle de expansão devido à reação álcali-sílica, pela resistência a sulfatos, ou ainda pelo emprego do cimento Portland ou outro ativador na mistura. Quando usada misturada com cimento Portland, a combinação desses materiais resulta em propriedades físicas que são características daquele aplicado em maior teor (ACI Committee 233, 1995). Exemplificando: pode-se esperar que, à medida que aumente o teor de escória no concreto, haja um menor ganho de

resistência nas primeiras idades. Contudo, esse comportamento pode ser alterado aumentando-se a finura da escória. Geralmente o teor de 50% de escória é o que proporciona maior resistência do concreto aos 28 dias, conforme testado pela ASTM C 109. Oner e Akyuz (2007) investigaram a otimização do uso da escória frente à resistência à compressão e observaram que o teor ótimo de escória na maximização da resistência está na faixa entre 55% e 59% do total de material aglomerante.

As técnicas de dosagem e proporcionamento, quanto ao uso de escória, são similares às desenvolvidas quando se usa cimento Portland. Porém, como a escória possui menor massa específica que o cimento Portland e é comumente aplicada em elevados teores, ocorre, do seu uso, um aumento no volume de pasta, comparado ao uso do cimento Portland como único aglomerante. Para a correção desse fenômeno, deve-se diminuir a quantidade de areia até que se atinja o mesmo volume de argamassa já arbitrado.

Em conformidade às particularidades da escória, pode-se concluir que os efeitos benéficos oriundos do seu emprego no concreto são: liberação de calor mais lenta na hidratação, reduzindo o pico de temperatura (Sivasundaram e Malhotra, 1992); melhora de consistência do concreto fresco (Swamy e Laiw, 1995); estrutura mais compacta da pasta de cimento hidratada (Tazawa, Yonekura e Tanaka, 1989), resultando em maior durabilidade e aumento da resistência em idades mais avançadas. Desta forma, seu emprego se justifica em obras de concreto-massa, nas quais há necessidade de redução do calor de hidratação, como em barragens, por exemplo. Para ratificar os benefícios proporcionados pela utilização da escória no concreto, Roy (1992) comenta que estudos já provaram que pastas, argamassas e concretos preparados com quantidades substanciais de escória são cada vez mais reconhecidos por sua durabilidade e, em particular, por sua resistência à penetração de cloretos e difusão de vários agentes potencialmente agressivos, incluindo sulfatos e cloretos.

2.3 Ativação química da escória

Geralmente a escória é usada no concreto como um substituto parcial do cimento Portland. Ela é um material aglomerante cuja reação de hidratação é lenta,

conferindo ao concreto baixa resistência inicial, de modo que pode ser ativada quimicamente para que reaja mais prontamente e atinja a resistência desejada no prazo requerido. O concreto de escória ativado alcalinamente é feito com 100% de escória ativada por álcalis, em vez de cimento Portland como aglomerante. Collins e Sanjayan (2001) comentam que os concretos de escória álcali ativados apresentam, assim como os concretos com escória em substituição ao cimento Portland, sensibilidade à falta de cura.

Conforme estudos, sabe-se que adições alcalinas ativam os materiais acelerando as reações pozolânicas, a fim de que ocorra a pega e seu conseqüente endurecimento. Chang, Yeih e Hung (2005) comentam que os concretos de escória álcali ativados apresentam algumas características favoráveis com relação ao concreto de cimento Portland, tais como baixo calor de hidratação, alta resistência inicial, além de uma ótima durabilidade em meios agressivos. Os pesquisadores também comentam que estudos realizados mostraram que o desenvolvimento da resistência de concretos de escória álcali ativados depende da concentração e tipo de ativador. Há diversos compostos que podem ser avaliados como ativadores da escória, como, por exemplo, a cal hidratada (Ca(OH)_2), sulfato de sódio anidro (Na_2SO_4), silicato de sódio (Na_2SiO_3 , também chamado de "waterglass"), hidróxido de sódio (NaOH), carbonato de sódio (Na_2CO_3), dentre outros.

Atis et al. (2009) investigaram três ativadores alcalinos - silicato de sódio líquido (SSL), hidróxido de sódio (HS) e carbonato de sódio (CS) com diferentes concentrações de sódio (4%, 6% e 8% para cada ativador) - em argamassas de cimento de escória. Foi constatado crescimento da resistência à compressão com o aumento da concentração de sódio no ativador. Os autores comentam que isso pode ser explicado pela reação pozolânica. As argamassas de SSL apresentaram maiores valores de resistência à compressão que as de cimento Portland, independentemente do teor de sódio e da idade. Dentre os demais ativadores, apenas o CS, com 8% de sódio, aos 28 dias e aos 3 meses de cura, superou a resistência da argamassa de cimento Portland.

3 RETRAÇÃO DO CONCRETO

3.1 Introdução

O concreto, em seu estado endurecido, é um material que apresenta porosidade, cuja magnitude e interconexão dos poros dependem das propriedades físicas e químicas dos materiais constituintes. Desta forma, toda água que ainda não reagiu quimicamente, presente na estrutura da pasta de cimento endurecida, tende a evaporar do material em decorrência das condições de temperatura e umidade do meio onde o concreto está inserido. A saída da água, através dos poros, pode causar uma retração do concreto, cuja ocorrência e magnitude dependem dos diâmetros dos poros de onde a água é removida. Este fenômeno é chamado de retração hidráulica e ocorre no concreto, submetido ou não a carregamento, devido à perda de umidade, uma vez exposto ao meio ambiente e permitida sua secagem (ACI Committee 209, 2005). A retração hidráulica é a causa de praticamente toda a deformação por retração no concreto. Um elemento de concreto armado, com restrição de deformação por retração, pode desenvolver tensões que levam à formação de fissuras, através das quais agentes agressivos podem penetrar e causar algum dano à armadura, reduzindo sua resistência e durabilidade.

Neste capítulo estão reunidos fundamentos teóricos relativos à retração e fatores que contribuem para sua ocorrência, indispensáveis na compreensão do fenômeno, além da descrição de algumas pesquisas relacionadas ao tema.

3.2 Mecanismos de retração

Antes da apresentação e desenvolvimento dos mecanismos de retração do concreto, é importante que se evidencie o comportamento da água retida na pasta de cimento hidratada, uma vez que seu entendimento é de suma importância para a compreensão dos fenômenos de variação volumétrica do concreto em decorrência

da perda de água; também é indispensável o conhecimento dos tipos de poros onde a água pode estar presente. Conforme a *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC-1971), os poros são classificados, segundo seus diâmetros (\emptyset) em: microporos ($\emptyset < 2\text{nm}$); mesoporos ($2\text{nm} < \emptyset < 50\text{nm}$) e macroporos ($\emptyset > 50\text{nm}$).

Neto (2002) comenta que os poros da estrutura de cimento hidratado são classificados em poros capilares e poros de gel. Os poros capilares, segundo Neville (1997), representam a parte do volume total não preenchida pelos produtos de hidratação. Dessa forma, à medida que a hidratação se processa, há a redução do volume de poros capilares. Estes poros têm diâmetros compreendidos na faixa dos mesoporos e macroporos. Os poros de gel são espaços intersticiais interligados entre os produtos de hidratação, apresentando diâmetro nominal na faixa dos microporos.

Para a continuidade dos fundamentos imprescindíveis à compreensão dos mecanismos de retração, a seguir são definidas as formas como a água se apresenta na estrutura da pasta de cimento hidratado. A água quimicamente combinada é aquela contida nos produtos de hidratação do material aglomerante, podendo ser removida somente em temperaturas superiores a 100°C . Água interlamelar ou intersticial é aquela presente nos espaços entre as superfícies internas da estrutura de gel. Já a água adsorvida é aquela que se mantém fisicamente retida pelas forças superficiais dos produtos sólidos hidratados, sendo geralmente encontrada nos microporos e mesoporos. E, por fim, a água capilar é aquela presente nos macroporos, sendo também chamada de água livre devido à baixa tensão superficial, de forma que sua retirada praticamente não acarreta alteração de volume. De acordo com Brunauer (1969), os poros capilares, devido ao seu tamanho relativamente grande, perdem toda sua água quando em ambiente com umidade relativa inferior a 45%.

Neto (2002) comenta que a água condensada no interior do poro capilar está sujeita a uma pressão de confinamento, principalmente na faixa dos mesoporos. A pressão do líquido que se encontra dentro de capilares é denominada pressão capilar. A tensão superficial e o raio de curvatura da superfície formada pelo líquido (menisco) são parâmetros usados no cálculo da pressão capilar, a qual exerce uma força de atração entre as paredes do capilar. Num ambiente com umidade relativa igual a 100%, tem-se uma pressão de vapor saturante (pressão exercida pela máxima quantidade de vapor de água contido no ar a uma determinada temperatura)

em equilíbrio com a pressão capilar. Segundo Quagliano e Vallarino (1985), quando o material poroso é exposto a um ambiente com umidade relativa abaixo de 100%, ocorre desequilíbrio entre a pressão de vapor parcial (pressão cuja quantidade de vapor de água não é suficiente para saturar o ar) e a pressão capilar, causando evaporação do líquido que forma o menisco para que seja atingido um equilíbrio.

Com a evaporação da água em ambientes com umidade relativa abaixo de 100%, ocorre a diminuição do raio do menisco até ser atingida a pressão de equilíbrio. De acordo com Wittmann (1982 apud NETO, 2002), a diminuição do raio do menisco provoca um aumento da pressão capilar e, conseqüentemente, da força de atração entre as partículas, manifestada pela retração do material.

Young (1988 apud NETO, 2002) sugere que “a pressão capilar só é significativa em poros com diâmetros abaixo de 35 nm, atingindo um valor máximo em poros com diâmetros em torno de 2,5 nm em ambiente com umidade relativa entre 40% e 50%”. Em virtude do estabelecimento do equilíbrio com a umidade relativa, a água sai do capilar e há diminuição da espessura das camadas de água adsorvida, resultando em retração.

3.3 Fatores influentes na retração hidráulica

Os efeitos do ambiente, onde o concreto foi misturado, moldado, curado e exposto durante sua vida útil, têm elevada importância no seu comportamento quanto à secagem. Baixa umidade, vento e altas temperaturas tendem a aumentar a retração hidráulica do concreto. Esta, por sua vez, é primordialmente afetada pela umidade relativa (UR) do ar que cerca o concreto. Já o efeito da temperatura elevada, isoladamente, conforme o ACI Committee 209 (2005), é menos pronunciado no concreto que o efeito da redução da umidade relativa. Para exemplificar a influência da umidade relativa na retração, Müller e Pristl (1993) submeteram concretos, tanto a uma UR constante de 65% quanto a variações cíclicas de umidade, variando de 40% a 90%. Cada ciclo consistiu de dois intervalos de 7 dias a uma umidade constante, sendo um intervalo com UR=90% e o outro de UR=40%. A alternância de 90% para 40% de UR e vice-versa foi feita gradativamente durante 12 horas, para evitar a condensação dentro da câmara

climática. A temperatura foi mantida constante a 20 °C durante os testes. A idade do concreto no momento em que foi submetido ao início da secagem foi de 8 dias. Até esta idade, eles ficaram imersos em água à temperatura de aproximadamente 20 °C. O concreto foi feito com cimento Portland de rápido endurecimento, correspondente aproximadamente ao cimento ASTM tipo I. O consumo de cimento foi de 310 Kg/m³. As proporções da mistura em peso para cimento:areia:pedra:água foram de 1:2.85:3.15:0.55. Aos 28 dias, um cubo de aresta 150 mm deste concreto apresentou uma resistência de 40.9 MPa. Os autores constataram que os corpos-de-prova de concreto mantidos à constante umidade relativa de 65% apresentaram maior retração hidráulica que os corpos-de-prova mantidos no ambiente com variação de umidade relativa, e comentaram que isso pode estar relacionado ao fato de que o histórico da variação de umidade começou com UR=90%. Dessa forma, foi concluído que há necessidade de novos experimentos capazes de quantificar esses efeitos e gerar alguma conclusão consolidada.

A retração hidráulica de uma dada mistura de concreto é governada pela retração da pasta de cimento, além da quantidade e propriedades dos agregados (ACI Committee 209, 2005). A maior influência na retração do concreto, segundo Neville (1997), é feita pelo agregado, o qual restringe parte da retração que poderia ocorrer, sendo esta influência ditada pelo seu teor. Conforme o autor, tamanho e granulometria não apresentam influência na magnitude da retração, mas agregados maiores, por exemplo, permitem misturas mais pobres, resultando, desta maneira, menor retração. Portanto, o fator mais importante que afeta a potencialidade de ocorrência da retração é o volume total de agregados na mistura, de modo que restringem a retração da pasta de cimento. Em geral, um aumento na dimensão máxima do agregado, e subsequente redução no conteúdo de pasta, diminui a retração hidráulica (ACI Committee 209, 2005).

Essa restrição de retração exercida pelo agregado ocorre conforme o nível de contenção estipulado pelas suas propriedades elásticas. Segundo Shideler (1957), o agregado de aço resulta numa retração um terço menor do que agregados comuns, uma vez que um concreto dotado de agregado com alto módulo de elasticidade tende a apresentar uma retração hidráulica menor, comparado a um concreto que contenha agregado com baixo módulo de elasticidade.

De acordo com Neville (1997), além da contenção de retração imposta pelo agregado, a retração não uniforme no interior da peça de concreto pode reter a

retração potencial ou livre, pois as deformações devidas às tensões internas de tração nas proximidades da superfície são compensadas pelas tensões de compressão no interior, de modo que, se a secagem não for simétrica, pode haver um empenamento. Suzuki, Ohno e Nakagawa (1993) enfatizam que a fissuração por retração hidráulica não é influenciada apenas pela quantidade de retração, mas também pelo módulo de elasticidade, pela fluência e resistência à tração do concreto. Neville (1997) lembra que os valores de retração, que geralmente são mencionados, referem-se à retração livre ou potencial, ou seja, aquela sem contenções externas nem internas em um elemento estrutural. Levando em consideração a retração real, o autor comenta que as tensões induzidas são modificadas pela relaxação, a qual pode evitar o surgimento de fissuras nos casos de retração lenta. Pelo fato de o alívio de tensões imposto pela fluência diminuir com a idade, a tendência de fissuração aumenta com o passar do tempo (Neville, 1997). A fissuração do concreto devida à retração hidráulica se desenvolve quando a tensão induzida ou deformação causada pela restrição de retração, por parte das fundações ou qualquer outro elemento estrutural, alcança a resistência à tração do concreto (Suzuki, Ohno e Nakagawa, 1993).

Outro fator influente na retração é o tamanho do elemento de concreto. Neville (1997) comenta que a retração verificada por muitos pesquisadores diminuiu com o aumento das dimensões da peça. Porém, a partir de um certo volume, esse efeito é pequeno inicialmente, embora acentuado mais tarde. A retração pode ser expressa, então, em função da relação volume/área superficial da peça.

A retração da pasta de cimento, conforme Neville (1997), cresce com o aumento da relação água/aglomerante, uma vez que esta condiciona a quantidade de água evaporável na pasta e a sua velocidade de deslocamento para a superfície do concreto. Como exercício de compreensão, pode-se imaginar dois concretos com mesma relação água/aglomerante, sendo que neste caso o que apresenta maior retração é o que contém um maior teor de cimento, pois desta forma apresentará maior volume de pasta sujeita à retração. Por outro lado, de acordo com Shoya (1979 apud NEVILLE, 1997), para uma mesma consistência, que significa, aproximadamente, um mesmo teor de água, a retração não é alterada pelo aumento do teor de cimento, ou pode mesmo ser menor porque é diminuída a relação água/cimento e, portanto, o concreto estará mais capacitado para resistir à retração.

Em se tratando do conteúdo total de água e de cimento numa mistura, sabe-se que tanto o aumento de um quanto do outro acarreta uma tendência de acréscimo de retração, uma vez que água ou cimento adicionais diminuirão o conteúdo de agregados na mistura. Quanto ao abatimento, conforme o ACI Committee 209 (2005), quando aumentado pela adição de água ou acréscimo do conteúdo de pasta na mistura, ocorre uma tendência de maior retração.

A composição química do cimento exerce uma função importante na retração da pasta e do concreto. Roper (1974 apud ACI COMMITTEE 209, 2005), em seu trabalho sobre os efeitos de várias composições de cimentos na retração, constatou que cimentos com baixa quantidade de sulfatos podem resultar em aumento da retração. Verificou também que a retração em concreto com alto teor de alumina ocorreu mais rapidamente. Com relação à finura do cimento foi relatado que, quanto mais finamente moído, maior é a retração resultante.

3.4 Variações volumétricas do concreto nas primeiras idades

A movimentação da água para fora de um corpo poroso não completamente rígido provoca uma contração. Conforme Neville (1997), essa movimentação é bem comum no concreto já no estado fresco até idades avançadas, podendo ocorrer devido à evaporação da água da superfície do material ainda no estado plástico. Esta retração, no estado plástico, é chamada de retração plástica, cuja intensidade é governada pela temperatura, pela umidade relativa do ambiente e pela velocidade do vento que atua na superfície de concreto exposta. Neville (1997) comenta que a retração plástica aumenta com a diminuição da relação água/aglomerante e com o aumento do teor de aglomerante da mistura. O autor também comenta que podem aparecer fissuras se a quantidade de água perdida por unidade de área for grande e maior do que a água que ascende à superfície por efeito da exsudação.

Mesmo depois da pega, ocorrem variações volumétricas na forma de retração ou expansão. Com a evolução da hidratação do cimento, suprindo-se água ocorre uma expansão, porém, também se percebe uma retração sem perda de umidade da mistura cimentícia para o meio ambiente. Esta retração é causada pelo consumo da água dos capilares por parte das reações de hidratação do material aglomerante,

dentro da matriz cimentícia, sendo denominada retração autógena, podendo ser chamada, menos comumente, de retração química ou básica (ACI Committee 209, 2005).

De acordo com Torrenti et al. (1988 apud NEVILLE, 1997, p. 425), “a retração autógena do concreto é uma ordem de grandeza menor do que a da pasta de cimento pura”. Isto se explica pelo fato de que, segundo Neville (1997), o esqueleto rígido da pasta de cimento hidratada e as partículas de agregado restringem a contração da pasta de cimento. Ao pesquisar alterações autógenas de volume em concretos para a barragem Dworshak em Idaho, Estados Unidos, Houk, Borge e Houghton (1969) constataram aumento da retração autógena a temperaturas mais altas, com maiores teores e também com o aumento da finura do material aglomerante. Além disso, Neville (1997) comenta que a retração autógena tende a aumentar com o uso de cimentos que apresentam altos teores de C_3A e C_4AF .

Lim e Wee (2000) estudaram o efeito do teor de substituição e da finura da escória de alto forno na retração autógena de concretos de alto desempenho. Empregou-se no estudo uma relação água/aglomerante de 0.30 em todas as misturas. Foram moldados três prismas de 100 mm x 100 mm x 400 mm para cada mistura, os quais permaneceram em sala climatizada à temperatura de $30 \pm 1^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $65 \pm 5\%$. As finuras da escória avaliadas foram de $4200 \text{ cm}^2/\text{g}$, $6000 \text{ cm}^2/\text{g}$ e $7900 \text{ cm}^2/\text{g}$. Para a comparação dos efeitos dos teores de substituição de cimento Portland comum por escória, foi empregada a finura de $4200 \text{ cm}^2/\text{g}$ e, para o estudo do efeito da finura, foi mantido o teor de escória em 65%. Através do estudo foi constatado que um percentual de substituição de 50% resultou na maior retração autógena a partir dos 21 dias, sendo que o aumento (65% e 80%) e a diminuição (30%) desse teor causaram redução nessa propriedade do concreto, comparados ao teor de 50%. Observou-se também, dentre os concretos com escória, a menor retração para o teor de 80%, pouco superior à do concreto de referência aos 91 dias. Os concretos foram avaliados diariamente, durante a primeira semana, semanalmente até os 35 dias, e a cada duas semanas até os 91 dias. Outra questão observada pelos pesquisadores foi o aumento da retração autógena devido ao aumento da finura da escória presente nos concretos avaliados.

Lee et al. (2006) moldaram 12 misturas, sendo quatro relações água/aglomerante (0.27, 0.32, 0.37 e 0.42) e três teores de escória ($430 \text{ m}^2/\text{Kg}$) em substituição ao cimento Portland comum (0%, 30% e 50%), a fim de analisar a

retração autógena dos concretos até a idade de 180 dias. Em todas as misturas e relações água/aglomerante a quantidade de água foi fixada em 168 Kg/m^3 . Para o ensaio as amostras (dois prismas de $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ para cada mistura) foram estocadas, após a desmoldagem, em câmara à temperatura de $20 \pm 1^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $60 \pm 3\%$. Verificaram que concretos com escória apresentaram maior retração autógena que concretos sem escória. Também constataram que, quanto maior o teor de escória em substituição ao cimento Portland comum, maior é a retração autógena para uma mesma relação água/aglomerante.

Um outro tipo de retração, que ocorre no concreto e que é responsável pela maior parte da perda de dimensões nas primeiras idades, é a retração hidráulica ou por secagem, um fenômeno muito importante que se manifesta pela perda de água no concreto, argamassa ou pasta após o fim de pega do material cimentício. Esta perda se manifesta pela evaporação de parte da água contida nos capilares da mistura, e pode causar fissuração do material, uma vez que, segundo Neville (1997), uma parte da variação de volume que ocorre é irreversível. O aparecimento de fissuras no material prejudica a durabilidade e estabilidade da peça ou estrutura que o contenha.

Com vistas a prever e, conseqüentemente, evitar fissuras nas primeiras idades em peças estruturais de concreto, tem-se empregado com freqüência, nas últimas décadas, o ensaio de retração hidráulica, no qual é medida a redução de comprimento na maior dimensão de corpos-de-prova, sujeitos à secagem ao ar, em idades de ensaio especificadas. Conforme o ACI Committee 209 (2005), para concretos de resistências normais/típicas, ou seja, abaixo daquelas dos concretos de alto desempenho, considera-se, geralmente, que a deformação total por retração é devida à retração hidráulica, de forma que qualquer contribuição da retração autógena é desconsiderada. Deste modo, nesta pesquisa, consideraram-se como referências alguns estudos nos quais foi investigada a retração hidráulica de concretos com escória.

Malhotra (1987) considera que a retração hidráulica pode ser maior em concretos com escória, devido ao aumento do volume de pasta em concretos com substituição da mesma massa de cimento por escória e à sua menor massa específica, comparada à do cimento.

Tazawa, Yonekura e Tanaka (1989) pesquisaram a retração hidráulica de concretos contendo três tipos de escória granulada de alto forno, com superfícies específicas de $4400 \text{ cm}^2/\text{g}$, $5600 \text{ cm}^2/\text{g}$ e $7900 \text{ cm}^2/\text{g}$, além de três teores em substituição ao cimento Portland comum, 0%, 35% e 55%. A relação água/aglomerante foi de 0.5 e o conteúdo de material aglomerante de $370 \text{ Kg}/\text{m}^3$. Para o ensaio, foram moldados corpos-de-prova prismáticos de $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$, sendo que a secagem ao ar foi impedida nas duas superfícies de dimensões $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, permitindo a evaporação através das superfícies restantes. Os corpos-de-prova foram curados durante dois períodos, 7 e 28 dias, em água a 20°C e depois deixados em sala fechada com temperatura de 20°C e umidade relativa de 50%. As idades de ensaio foram: 1, 2, 4, 7, 14, 28, 75, 150 e 300 dias. A retração do concreto com escória foi aproximadamente igual à do concreto de referência nas primeiras idades, porém menor em idades mais avançadas. Foi verificada menor retração com o aumento da superfície específica da escória, acréscimo do seu teor e maior período de cura.

Brooks, Wainwright e Boukendakji (1992) analisaram a influência do tipo e do teor de escória na retração de concretos. Foram testadas escórias de quatro procedências diferentes: do Reino Unido ($412 \text{ m}^2/\text{Kg}$), da Bélgica ($402 \text{ m}^2/\text{Kg}$), da África do Sul ($407 \text{ m}^2/\text{Kg}$) e do Japão ($465 \text{ m}^2/\text{Kg}$). Como referência, foi moldado concreto com cimento Portland comum. Os teores de escória em substituição ao cimento foram de 30%, 50% e 70%. A proporção de materiais, em massa, foi a mesma em todas as misturas: teor de material aglomerante igual a $437 \text{ Kg}/\text{m}^3$, relação entre total de agregados e material aglomerante de 4.11, relação entre agregado graúdo e miúdo de 1.54 e relação água/aglomerante de 0.43. Para o ensaio de retração, os corpos-de-prova cilíndricos, $265 \text{ mm} \times 76 \text{ mm}$ de diâmetro, foram curados durante 24 horas sob sacos de aniagem molhados, desmoldados e curados em água durante 13 dias. A retração foi investigada nas idades de 10, 20, 30, 40, 50, 60 e 70 dias. Através do estudo, os pesquisadores verificaram que a taxa inicial de retração foi maior nos concretos com escória, porém, em idades mais avançadas, as retrações foram similares, de modo a concluir que não houve influência apreciável por parte do teor de substituição, tampouco do tipo de escória, comparados à retração do concreto de referência.

Sakai et al. (1992) investigaram algumas propriedades de concretos com escória granulada de alto forno, dentre elas a retração hidráulica. Os teores de

escória (416 m²/Kg) usados em substituição ao cimento foram de 50%, 60%, 70% e 80% e, para o concreto de referência, foi usado o cimento Portland de calor moderado. Para esse ensaio, foram moldados corpos-de-prova prismáticos com dimensões de 100 mm x 100 mm x 400 mm, os quais foram curados úmidos por 24 horas à temperatura de 20 °C, desmoldados e mantidos imersos em água a 20 °C. O comprimento inicial de referência de cada corpo-de-prova foi medido aos 7 dias de idade. Na seqüência, eles foram colocados numa caixa com umidade constante que continha uma solução saturada de brometo de sódio. Essa caixa foi mantida numa câmara termostática a 20 °C. O teor de material aglomerante foi de 300 Kg/m³ e a relação água/aglomerante da ordem de 0.44. O abatimento e o conteúdo de ar das misturas foram fixados em 40 ± 10 mm e 5 ± 1%. A retração hidráulica foi avaliada nas idades de 1, 4, 8, 13, 26, 39 e 52 semanas. A partir da pesquisa, os autores observaram aumento de retração com o avanço da idade e diminuição com o aumento do teor de escória no concreto.

Sivasundaram e Malhotra (1992) pesquisaram propriedades de concretos com elevados teores de escória em substituição ao cimento. Dentre as propriedades, foi investigada a retração hidráulica, a qual foi aferida através de corpos-de-prova prismáticos de 76 mm x 102 mm x 390 mm. Estes, antes da secagem ao ar, foram mantidos em água saturada de cal durante 7 dias. Os teores de substituição usados foram de 50%, 60%, 65%, 70% e 75%. Como referência, foram moldados corpos-de-prova com concreto de cimento Portland comum. Para atingir os níveis desejados de consistência, foram empregados aditivos superplastificantes e incorporadores de ar. Na pesquisa, os autores constataram que os menores valores de retração foram observados para a relação água/aglomerante de 0.45, que foi a maior investigada e empregada somente nos teores de 60% e 50% de escória. Esse comportamento justifica-se, segundo Sivasundaram e Malhotra (1992), pelos baixos teores de material aglomerante nessas misturas. De maneira geral, foi constatada mesma ordem de grandeza nas variações dimensionais dos concretos com escória e do concreto de referência, caracterizando, segundo os autores, comportamentos similares, conforme se observa na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Resultados de retração da pesquisa de Sivasundaram e Malhotra (1992)

Mistura	a/agl.	Teor de escória (%)	Abatim. (mm)	agl. (Kg/m ³)	Retração hidráulica (x10 ⁻⁶) / Idade (dias)				
					7	14	28	56	112
1	0.45	60	150	242	54	89	213	327	415
2	0.34	70	150	326	149	188	305	422	493
3	0.29	75	125	399	128	185	277	387	472
4	0.45	50	115	244	57	121	217	341	405
5	0.36	60	175	307	163	270	319	404	475
6	0.28	70	200	412	121	195	266	334	433
7	0.38	50	165	294	202	255	298	376	436
8	0.30	60	90	372	199	263	316	387	465
9	0.27	65	225	423	181	217	277	359	411
10	0.39	0	180	292	156	241	319	401	419
11	0.31	0	150	368	199	270	337	397	451
12	0.27	0	205	428	216	241	319	401	419

Jianyong e Yan (2001) prepararam três misturas de concreto de alto desempenho (CAD), sendo uma de referência com apenas cimento Portland comum (CP), chamada CAD A, outra com 70% de CP e 30% de escória ultrafina (800 m²/Kg), CAD B, e uma terceira com 60% de CP, 30% de escória ultrafina e 10% de sílica ativa, CAD C. Nas três misturas, o consumo de aglomerante foi de 600 Kg/m³, a relação água/aglomerante de 0.26 e o teor de aditivo superplastificante à base de naftaleno de 1.6% da massa de aglomerante. No ensaio, as amostras (prismas de 100 mm x 100 mm x 500 mm) foram moldadas à temperatura de 20 ± 2°C, desmoldadas um dia após e mantidas curadas em água a 20 ± 3°C durante 28 dias. Nas primeiras idades (até os 14 dias), os pesquisadores observaram pequena diferença de retração hidráulica entre as misturas. Aos 28 dias, o CAD A obteve o dobro da retração do CAD B e quase o dobro da retração do CAD C. Na idade de 180 dias, as retrações de A, B e C foram de 220 x 10⁻⁶, 96 x 10⁻⁶ e 127 x 10⁻⁶, respectivamente. Em todas as idades (até os 180 dias), o CAD B apresentou a menor retração, já no CAD A foi observada sempre a maior retração durante todo o ensaio.

Além dos tipos de retração já discutidos, o concreto também está sujeito à retração por carbonatação. Houst (1993) comenta que o efeito mais conhecido da carbonatação nos compostos cimentícios é a perda da alcalinidade que protege a armadura contra a despassivação. Devido à carbonatação, o pH da água dos poros é reduzido para aproximadamente 8. A retração por carbonatação é justificada

através de diferentes teorias. Neville (1997) comenta que a retração por carbonatação provavelmente seja causada pela dissolução de cristais de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, sob tensão devida à retração hidráulica, seguida da deposição de CaCO_3 em espaços não sujeitos à tensão. Coelho (2002) comenta que outra teoria que pode explicar a retração por carbonatação se baseia no fato de a água não evaporável ser liberada durante a reação de carbonatação. Houst (1993) comenta que, se a carbonatação ocorre após o estágio de desidratação do C-S-H, também resulta uma retração por carbonatação. Swenson e Sereda (1968) sugerem que a carbonatação promove a despolicimerização e desidratação do C-S-H, resultando em retração.

Na interpretação de resultados de ensaios de retração, sempre deve ser levada em conta a parcela decorrente da retração por carbonatação. Pelo fato de o CO_2 ser fixado pela pasta de cimento hidratada, durante o fenômeno da carbonatação, a massa desta aumenta e, conseqüentemente, aumenta também a massa do concreto. Segundo Neville (1997), quando o concreto seca e se carbonata simultaneamente, o acréscimo de massa decorrente da carbonatação pode, em certo estágio, dar a falsa impressão de que a secagem chegou ao nível de massa constante.

Na Tabela 3.2 são apresentadas as condições de ensaio das principais pesquisas nas quais foi empregada escória como substituição parcial do cimento Portland, juntamente com os resultados referentes à retração.

Tabela 3.2 – Resumo das condições de ensaio e resultados das principais referências

Pesquisa	Cimento Tipo	Escória		Cura Úmida	Resultados
		Teor(es) (%)	Finura(s)		
Tazawa, Yonekura e Tanaka (1989)	Comum	35 e 55	4400, 5600 e 7900 (cm^2/g)	7 e 28 dias	Redução da retração com os aumentos da superfície específica, do seu teor e do período de cura
Brooks, Wainwright e Boukendakji (1992)	Comum	30, 50 e 70	412, 402, 407 e 465 (m^2/Kg)	13 dias	Não houve variação apreciável de retração, independente do teor e tipo de escória
Sakai et al. (1992)	De calor moderado	50, 60, 70 e 80	416 (m^2/Kg)	7 dias	Diminuição da retração com o aumento do teor de escória
Sivasundaram e Malhotra (1992)	Comum	50, 60, 65, 70 e 75	Não informam	7 dias	Não ocorreu variação de retração com o uso e escória
Jianyong e Yan (2001)	Comum	30	800 (m^2/Kg)	28 dias	Redução de mais da metade da retração com o uso de escória

3.5 Influência das condições de cura na retração

É denominada cura o conjunto de procedimentos que visam a hidratação do cimento, consistindo no controle da temperatura e da entrada e saída de umidade do concreto. Segundo Neville (1997), o objetivo da cura é manter o concreto o mais próximo possível da saturação até que os espaços da pasta de cimento fresca, inicialmente preenchidos com água, tenham sido ocupados pelos produtos da hidratação do cimento até uma condição desejável, uma vez que a velocidade máxima de hidratação pode se desenvolver somente em condições de saturação. De acordo com Powers (1947) e Patel et al. (1988), a hidratação é bastante reduzida quando a umidade relativa no interior dos poros capilares atinge valores abaixo de 80%.

Os métodos de cura existentes, conforme mencionam Zhang et al. (1999), são conhecidos como cura por molhagem e cura por membrana. Neville (1997) comenta que os procedimentos usados em cada método variam muito, dependendo das condições da obra e da forma, tamanho e posição da peça de concreto. O primeiro método exige que a superfície do concreto esteja ininterruptamente em contato com a água, durante um período estabelecido, começando-se assim que a superfície do concreto não seja danificada pelo contato com a água. Já o segundo método consiste em impedir a perda de água pela superfície do concreto, sem permitir o ingresso da água do meio que o circunda.

Chern e Chan (1989) pesquisaram o efeito das condições de temperatura e umidade na resistência de concretos com escória. Como aglomerantes foram usados o cimento Portland comum e três tipos de escória de alto forno como seu substituto parcial. Cada escória foi empregada num só teor, sendo estes de 4.5%, 35% e 68%. As condições de cura investigadas foram: cura em água com cal a 23°C; cura em câmara úmida a 23°C; corpos-de-prova selados com saco de polipropileno a 23°C; cura ao ar a 50% de umidade relativa e temperatura de 23°C; cura a 35°C e 95% de umidade relativa e cura a 10°C com selagem de saco de polipropileno. A relação água/aglomerante avaliada foi de 0.51 e o consumo de materiais em Kg/m³ foi o seguinte: aglomerante (378), areia (601) e pedra britada (1152). Quanto à influência do teor de escória, constatou-se maior resistência à compressão aos 28 dias para o concreto moldado com 35% de escória. A influência

da umidade de cura foi avaliada para as condições de cura com temperatura de 23°C. A seqüência geral de resistência à compressão verificada, da mais elevada até a mais baixa, foi a seguinte: cura em câmara úmida; cura por selagem; cura de água com cal e cura ao ar. Comparando-se as temperaturas de cura, concluíram que o concreto com elevado teor de escória apresenta maior redução de resistência em temperatura baixa quando comparado ao concreto de cimento Portland comum. Além disso, confirmou-se a tendência de ganho de resistência inicial mais rápido e resistências em idades avançadas mais baixas com cura a alta temperatura e vice-versa para cura a baixa temperatura.

De acordo com o ACI Committee 209 (2005), períodos de cura úmida prolongados acarretam, geralmente, redução de 10% a 20% na retração de uma mistura de concreto. Esta redução varia em concretos com diferentes relações água/cimento. Perenchio (1997) relacionou períodos de cura úmida (6 horas, 1 dia, 3 dias, 7 dias, 28 dias e 90 dias) com a retração hidráulica, após um ano de secagem ao ar, para concretos com diferentes relações água/cimento (0.3, 0.4, 0.5, 0.6 e 0.7). O concreto com a menor relação água/cimento (0.3) apresentou maior retração independentemente do período de cura. Quando curado por menos de 7 dias, o concreto com a maior relação água/cimento (0.7) e, portanto, com o menor teor de cimento, obteve a menor retração. Segundo o autor, isso já era esperado, pois esse concreto contém a menor quantia de cimento hidratado, que é responsável pela retração hidráulica, além do maior teor de agregado, o qual restringe a retração. Conforme resultados da pesquisa para concretos com relações água/cimento de 0.3 e 0.4, a maior retração ocorreu nos corpos-de-prova curados durante 3 dias. Já para as relações água/cimento de 0.5 e 0.6, a maior retração foi observada nos concretos curados por 7 dias.

Bakharev, Sanjayan e Cheng (1999) estudaram o efeito da temperatura elevada de cura na retração de concretos de escória (460 m²/Kg) com ativação alcalina, comparando-os com concreto de cimento Portland comum (referência). Como ativadores, foram usados o silicato de sódio líquido e uma solução de hidróxido de sódio misturados, resultando em 4% de sódio em relação à massa de escória. No concreto de escória, seu consumo foi de 360 Kg/m³, e a relação água/aglomerante de 0.5; no concreto de referência para comparação de retração foram empregados os mesmos teores de materiais. Para a exposição em temperaturas elevadas, dois métodos foram usados: um deles consistiu de um

banho de água a 70 °C, no qual os moldes ficaram envoltos em saco plástico durante seis horas antes do ensaio e, no outro método, as amostras passaram por um período de pré-cura de duas horas numa sala climatizada, onde ficaram sob uma lona após a moldagem. Depois tais amostras foram envoltas em sacos plásticos e imersas em banho de água a 23 °C. Esta temperatura subiu para 65 °C em três horas e meia e, na seqüência, estabilizou-se nesta condição por cinco horas. Após os dois tratamentos, o elemento de aquecimento foi desligado e os moldes resfriados até a temperatura da sala climatizada. As condições da sala climatizada foram temperatura de 21 ± 2 °C e umidade relativa de 50 ± 5 %. As idades de ensaio foram de 7, 14, 28, 112, 224 e 400 dias. O tratamento de seis horas reduziu consideravelmente a retração hidráulica no concreto de escória ativado por silicato de sódio e hidróxido de sódio, quando comparado ao mesmo concreto curado na sala climatizada. Esse concreto, submetido ao tratamento de seis horas, apresentou retração similar às dos concretos de referência, tanto o submetido às mesmas seis horas de calor quanto o curado na sala climatizada.

3.6 Influência de ativadores químicos na retração de concretos de escória

Os concretos de escória ativados (100% de escória como aglomerante) apresentam, assim como os concretos com escória em substituição ao cimento Portland, sensibilidade à falta de cura. Isso torna imprescindível a realização de um processo de cura eficiente quanto à formação de uma estrutura de poros densa, onde haja a mínima interconexão possível entre eles. Bakharev, Sanjayan e Cheng (2000) comentam que concretos de escória álcali ativados apresentam, conforme constatado em pesquisas, problemas de consistência, além de que a retração, na maioria dos casos, supera a de concretos de cimento Portland comum. Este comportamento é evidenciado nos parágrafos seguintes, nos quais se expõem os resultados de algumas pesquisas nas quais foram avaliados os desempenhos de concretos de escória álcali ativados frente à retração e também comparações de comportamentos entre concretos moldados com diferentes tipos e teores de ativadores.

Bakharev, Sanjayan e Cheng (1999-A) pesquisaram a ativação alcalina de cimentos de escória australianos. Os ativadores utilizados foram silicato de sódio líquido (4%, 6% e 8% de Na em sua concentração), solução de hidróxido de sódio (4%, 7% e 10% de Na), fosfato de sódio (7% de Na) e carbonato de sódio (2,5% e 7% de Na). A relação água/aglomerante empregada foi de 0.5 para todos os concretos, inclusive para o de referência, constituído de cimento Portland comum. As condições de estocagem das amostras (prismas de 75 mm x 75 mm x 285 mm) foram temperatura de 20°C e umidade relativa de 55%. No estudo, foi observada maior retração em todos os concretos de escória (460 m²/Kg) ativada quando comparados ao concreto de referência. Independente do ativador, a retração aumentou com a concentração de álcalis. A maior retração foi observada na presença do silicato de sódio líquido, tendo aproximadamente o triplo do valor do concreto de referência aos 91 dias, sendo essa relação até maior nas idades anteriores.

Collins e Sanjayan (2000) investigaram o comportamento de concreto de escória (100% escória de finura 460 m²/Kg) com ativação alcalina, comparando-o com concreto de cimento Portland comum (referência). Os ativadores empregados no concreto de escória foram o metasilicato de sódio em pó e a cal hidratada. Os traços dos concretos foram os mesmos, com consumo de aglomerante de 360 Kg/m³ e relação água/aglomerante de 0.5. Para o ensaio de retração hidráulica, os corpos-de-prova, com dimensões 75 mm x 75 mm x 285 mm, foram desmoldados após um dia e expostos à temperatura de 23°C e umidade relativa de 50%. Na pesquisa, os autores constataram que a retração do concreto de escória foi consideravelmente superior à do concreto de referência, sendo 2.5 vezes maior já aos 56 dias; esta relação foi ainda maior nas idades posteriores.

Chang, Yeih e Hung (2005) estudaram o efeito do uso combinado de gesso com ácido fosfórico em algumas propriedades, como a retração hidráulica de pastas de escória (383 m²/Kg) com ativador à base de silicato de sódio. O ácido fosfórico foi escolhido como retardador, já o gesso foi usado para inibir a retração. A relação (água + fase líquida do ativador e do ácido)/escória foi de 0.54 para as pastas de escória. Para o ensaio de retração hidráulica, foram empregados três teores de gesso sobre o peso de escória: 0%, 2% e 4%. Para comparação, foram examinadas pastas de cimento Portland comum com relação água/cimento de 0.54. Quando nem o gesso tampouco o ácido foram usados na pasta de escória ativada, esta

apresentou pouco mais que o triplo da retração da pasta de cimento Portland comum aos 7 dias e quase o dobro aos 28 dias. Para os teores de 2% e 4% de gesso aplicado isoladamente na pasta de escória ativada, sem o ácido, houve reduções na retração hidráulica se comparada à pasta de escória sem gesso. Dessa forma, a retração aos 28 dias baixou para aproximadamente 1.5 vezes daquela da pasta de cimento Portland comum, com tendência à estabilização após essa idade. O uso combinado de gesso com ácido fosfórico fez com que desaparecesse o efeito redutor de retração por parte do gesso, uma vez que resultou em concretos com retração superior à dos concretos de escória ativada em todas as idades avaliadas.

Fu-sheng, Rui-lian e Ying-jing (2005) usaram cimento Portland (CP) como substituição de parte da escória em argamassas de escória ativadas, cujo ativador foi o silicato de sódio (Na_2SiO_3). Para o teste de retração hidráulica, as amostras (prismas de 25 mm x 25 mm x 280 mm) foram desmoldadas após um dia e colocadas em água a $20 \pm 3^\circ\text{C}$ e curadas durante 7 dias. Em seguida, foram estocadas para secagem ao ar numa sala até os 35 dias. Para o mesmo teste foram preparadas argamassas com a proporção aglomerante:areia:água de 1:2.5:0.44. As amostras foram ensaiadas aos 2, 3, 5, 7, 8, 9, 10, 14, 21 e 35 dias. Foram confeccionadas misturas contendo, como aglomerante, os seguintes teores de materiais: 100% CP; 80% escória + 10% CP + 10% ativador; 70% escória + 20% CP + 10% ativador; 60% escória + 30% CP + 10% ativador; 90% escória + 10% ativador. As argamassas com 80%, 70% e 60% de escória, todas com CP, obtiveram retração similar à da argamassa de CP comum a partir dos 14 dias. Como esperado, a maior retração ocorreu na argamassa 90% escória + 10% ativador, sendo aproximadamente 2.8 vezes a retração da argamassa de 100% CP aos 35 dias, a qual obteve a menor retração dentre todas as misturas estudadas.

Mun, So e Soh (2007) usaram pequenas quantidades de cal, gesso anidro e pó de calcário como filers e ativadores da escória de alto forno ($4600 \text{ cm}^2/\text{g}$) em argamassas. Empregando esses materiais em pequenos teores (0.5% de cal, 2.5% de gesso e 2.5% de calcário), isoladamente, dois a dois ou todos juntos, em substituição à parte do cimento Portland comum, e usando nas misturas 50% de escória também em substituição, constataram considerável redução da retração hidráulica em argamassas a partir dos 3 dias de idade, uma vez comparadas às argamassas com 50% e 70% de escória sem ativadores. No estudo, empregou-se uma relação água/aglomerante de 0.485 e uma proporção aglomerante:areia de

1:2.45. As amostras foram curadas a $20 \pm 2^\circ\text{C}$ em água, desde a desmoldagem até as datas dos ensaios. Também foi analisada a retração para argamassas com 30%, 50% e 70% de escória sem o uso de ativadores. Observou-se maior retração hidráulica com o aumento do teor de escória na argamassa, independentemente da idade de ensaio (1, 3, 7, 28, 56 e 90 dias).

Atis et al. (2009) usaram três ativadores alcalinos - silicato de sódio líquido (SSL), hidróxido de sódio (HS) e carbonato de sódio (CS) - com diferentes concentrações de sódio (4%, 6% e 8% para cada ativador) em argamassas de cimento de escória (425 m^2/Kg). A proporção aglomerante:areia:água, tanto para a argamassa de escória (100% escória) quanto para a argamassa de cimento Portland (100% CP comum), foi de 1:2.75:0.5. Os corpos-de-prova (prismas de 25 mm x 25 mm x 285 mm) foram desmoldados após 1 dia e medidos antes de serem colocados em câmara úmida à temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $65 \pm 5\%$. As idades do ensaio de retração hidráulica foram de 3, 7, 14 e 28 dias, e de 2, 3 e 6 meses. Os autores constataram que argamassas de escória, ativadas com SSL e HS, apresentaram retração de até aproximadamente 6 e 3 vezes mais que argamassas de CP comum aos 6 meses, respectivamente. Evidenciou-se também um crescimento na retração com o aumento do teor de sódio (Na) nos ativadores. Através do estudo foi recomendado o uso de CS como ativador alcalino, uma vez que as argamassas de escória ativadas por ele, com 8% de Na em concentração, tiveram retração comparável a de argamassas de CP comum durante praticamente todas as idades. Já o emprego de 4% de Na em concentração no CS resultou em decréscimo de 23% na retração, quando comparada à retração da argamassa de CP comum.

4 AÇÃO DE ÍONS CLORETOS NO CONCRETO ARMADO

4.1 Introdução

Swamy e Laiw (1995) comentam que a corrosão de armaduras, devido ao ingresso de íons cloretos no concreto, é universalmente conhecida como o fator de maior influência nos mecanismos destrutivos de estruturas marinhas. Desta maneira, os íons cloretos são considerados como a maior causa de corrosão prematura das barras de armaduras das estruturas de concreto, afetando sua integridade e durabilidade. Os pesquisadores comentam também que muitas investigações de campo e laboratoriais mostram que a penetração de quantias prejudiciais de cloretos no concreto e de as mesmas alcançarem a armadura parece ser apenas uma questão de tempo, mesmo quando o concreto seja dosado, misturado e aplicado de acordo com as especificações.

O íon cloreto, segundo Helene (1986), é o agente agressivo mais comum e pode estar presente no concreto por adição involuntária, a partir do uso de aditivos ou agregados que o contêm e/ou águas contaminadas. De acordo com Hausmann (1967), “concentrações de cloretos iguais ou superiores a 700mg/l despassivam o aço imerso em água de cal (pH = 12,5), além de reduzirem significativamente a resistividade do concreto”.

Os íons cloretos podem penetrar no concreto ou através dele difundir apenas em água na forma líquida, de modo que o mecanismo de penetração é um efeito combinado de reações físicas e químicas. Esta penetração depende da existência de microporos ou microfissuras na superfície do concreto. Já a sua difusão ocorre somente quando há poros internos interconectados que formem um canal contínuo e permeável, geralmente devido a altas relações água/aglomerante, cura inadequada ou microfissuras internas (Swamy e Laiw, 1995). Os autores comentam que as características desses canais são determinadas pela porosidade total, distribuição dos tamanhos dos poros e natureza química das superfícies dos poros.

De acordo com Helene (1986, p. 16), “um dos fatores que parece alterar as condições que favorecem a corrosão é a migração (por ação de secagem,

molhagem alternada, temperaturas, aeração diferencial, etc.) dos íons cloretos na massa de concreto”.

Ainda segundo Helene (1986):

Um fator que minora o efeito da ação agressiva dos cloretos pode ser a sua capacidade de combinação com os aluminatos. A difusão dos cloretos na massa de concreto geralmente é retardada pela formação de cloroaluminato de cálcio, pouco solúvel. Essa reação reduz a concentração de cloretos livres e favorece a proteção das armaduras (HELENE, 1986, p. 16).

As propriedades do concreto e do meio ao qual está exposto (incluindo as características da solução de cloretos) são os dois fatores mais influentes na penetração de cloretos, conforme comentam Swamy e Laiw (1995). Além disso, os autores enfatizam que cimentos compostos com diferentes porcentagens de sílica ativa, escória de alto forno e cinza volante já provaram ser mais resistentes à penetração de cloretos que o cimento Portland comum. Os pesquisadores também comentam que, ao se considerar longos períodos de exposição geralmente é concluído que tanto a natureza da matriz de cimento, quanto a relação água/aglomerante influenciam na profundidade de penetração de cloretos. Entretanto, mesmo quando a relação água/aglomerante for baixa o suficiente para proporcionar uma estrutura de poros descontínua, a natureza da matriz de cimento pode apresentar maior influência.

4.2 Influência da escória e das condições de cura na penetração de cloretos

A vulnerabilidade de um concreto à ação de qualquer agente agressivo, como o íon cloreto, depende do seu volume de poros, da distribuição dos tamanhos dos poros e, principalmente, da interconexão entre eles, características que influenciam na penetrabilidade do concreto. A execução de um processo de cura com a maior duração possível, que mantenha o concreto o mais próximo da condição de saturação, até que se atinja uma condição desejável de hidratação, e ainda a adoção de uma baixa relação a/agl são maneiras de tornar o concreto menos

penetrável e com um reduzido número de macroporos. Outra forma de gerar um concreto menos penetrável, já comprovado em estudos, é usar adições minerais, como a escória, juntamente com cimento Portland como material aglomerante. Isso não só contribui para a redução dos tamanhos dos poros, como também diminui a interconexão entre eles, o que dificulta bastante a difusão de qualquer fluido através do concreto.

Para que se compreenda melhor a relação entre um concreto de escória e sua respectiva cura, Mangat e El-Khatib (1992) comentam que cimentos compostos com escória, segundo alguns estudos, são muito sensíveis a desfavoráveis condições de cura, devido à sua baixa velocidade de hidratação quando comparada com cimento Portland. Também comentam que a falta de água, quando as partículas de escória começam a hidratar, resulta, portanto, em concreto de baixa qualidade, o que pode levar a altas taxas de ingresso de substâncias danosas, como os cloretos.

Na seqüência desta sessão são expostos resultados de algumas pesquisas nas quais foi investigada a penetração de íons cloretos, através de concretos moldados com escória e submetidos a diferentes condições de cura.

McGrath e Hooton (1997) estudaram a resistência à penetração de cloretos em concretos com diferentes aglomerantes. Misturas binárias e ternárias foram moldadas com cimento Portland, escória de alto forno, cinza volante e sílica ativa. Foram avaliadas duas relações água/aglomerante, 0.31 e 0.40. Os corpos-de-prova foram moldados em blocos de 350 mm x 250 mm x 150 mm e de 350 mm x 150 mm x 75 mm e curados na própria fôrma sob sacos de aniagem úmidos nas primeiras 24 horas. Então foram desmoldados e curados úmidos durante 1, 5 e 56 dias. Os concretos curados por 1 e 5 dias foram estocados em ambiente com 50% de umidade relativa e 23°C de temperatura até a idade dos testes (56 dias). Nesta idade, amostras de 100 mm de diâmetro foram extraídas dos núcleos dos blocos, fatiadas, saturadas (e submetidas a vácuo) por 24 horas antes dos testes. Dois métodos de medida de penetração de cloretos no concreto foram empregados: o teste de migração de cloretos (cloretos conduzidos através do corpo-de-prova a partir de uma diferença de potencial aplicada) e o teste de imersão em solução salina (5.0 mol/L de NaCl a 40°C durante 120 dias). Comparando-se o concreto composto de 25% de escória em substituição ao cimento Portland com o concreto de referência, observaram-se, para ambos os métodos de ensaio, notáveis reduções nos coeficientes de penetração quando se usou escória.

Chang e Marosszeky (1997) pesquisaram a penetração de cloretos em concretos com diferentes aglomerantes e sob diferentes condições de cura. O concreto de escória avaliado foi composto de 50% de escória em substituição ao cimento Portland comum. O teor de material aglomerante foi de 400 Kg/m^3 e a relação a/agl de 0.4 para todas as misturas. Aditivos plastificante e superplastificante foram empregados na mesma dosagem em todas as misturas. Foram moldados corpos-de-prova prismáticos de $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$. Três condições de cura foram investigadas: cura em água (24 horas de cura úmida na fôrma, seguida por 6 dias de cura em água e depois cura ao ar a $23 \pm 1^\circ\text{C}$ e $50 \pm 10\%$ de umidade relativa até as idades de ensaio); cura ao ar (24 horas de cura úmida na fôrma, seguida de cura ao ar a $23 \pm 1^\circ\text{C}$ e $50 \pm 10\%$ de umidade relativa até as idades de ensaio) e cura à alta temperatura (12 horas de cura úmida na fôrma, seguida de 12 horas de cura em água a 65°C e depois cura ao ar a $23 \pm 1^\circ\text{C}$ e $50 \pm 10\%$ de umidade relativa até as idades de ensaio). Os autores avaliaram três concentrações diferentes (2%, 5% e 15%) de NaCl em peso de solução. O teste de imersão em solução salina foi realizado de maneira cíclica (ciclos alternados de 12 horas de secagem a 40°C seguidas de 12 horas de imersão em solução salina em sala climatizada), além da forma estática (corpos-de-prova imersos em solução salina durante todo o período do ensaio). Ao fim da duração dos testes, os corpos-de-prova foram cortados ao meio e, nas superfícies recém rompidas, foi aspergida solução de 0.1N nitrato de prata para percepção das profundidades de penetração. O concreto de escória apresentou menor penetração de cloretos que o concreto de referência em todas as condições de cura e concentrações de NaCl avaliadas. Comparando-se as condições de cura, foi constatada, conforme esperado, a maior penetração de cloretos para cura ao ar e o melhor desempenho na redução da penetração para a cura em água. Os autores verificaram que o concreto de escória foi o que mais se beneficiou da cura à alta temperatura, resultando numa resistência à penetração equivalente àquela obtida com a cura em água.

Nakamura et al. (1986) avaliaram, dentre outros ensaios, a resistência à penetração de cloretos em argamassas com 40% de escória em substituição ao cimento Portland, de modo a compará-las à argamassa de referência, constituída de 100% de cimento Portland como aglomerante. Foram empregadas escórias de duas finuras Blaine, de $364 \text{ m}^2/\text{Kg}$ (chamada escória comum) e de $715 \text{ m}^2/\text{Kg}$ (chamada escória muito fina). A relação areia/material aglomerante foi de 1.5. Foi empregada

relação água/aglomerante de 0.4, além de aditivo plastificante num teor de 1% do total da massa de aglomerante. Corpos-de-prova prismáticos de 40 mm x 40 mm x 160 mm foram utilizados para o ensaio de penetração de cloretos, os quais foram submetidos a uma cura em água a 20°C durante 7 dias. Em seguida, ciclos repetitivos de molhagem e secagem foram impostos aos corpos-de-prova usando água do mar. Cada ciclo consistiu de imersão em água do mar por um dia e secagem em forno a 60°C durante outro dia. O ensaio foi realizado com um total de 7 ciclos, após os quais os corpos-de-prova foram cortados em três partes - uma superficial, uma mediana e outra profunda. A seção transversal foi, então, dividida em três camadas de diferentes profundidades, de modo que cada camada foi triturada para medida da concentração de cloretos. Na camada superficial (0 a 7 mm) foi observada uma alta concentração de cloretos em todas as amostras. A argamassa com 40% de escória comum apresentou maior concentração de cloretos que a argamassa de referência. Isso é devido, segundo os autores, ao fato de que a argamassa de escória pode fixar mais cloretos (sal de Friedel) que a argamassa de referência. A argamassa com 40% de escória muito fina apresentou concentração de cloretos ligeiramente inferior às demais. Em todos os corpos-de-prova, os cloretos penetraram no mínimo até a camada intermediária (7 mm a 14 mm). A argamassa com 40% de escória comum apresentou somente metade da concentração de cloretos que a argamassa de referência para esta camada. Já a argamassa com 40% de escória muito fina apresentou, nesta mesma camada, metade da concentração de cloretos que a argamassa de escória comum. Nakamura et al. (1986) constataram também que a concentração de cloretos na camada profunda (14 mm a 20 mm) é igual, em todas as amostras, à concentração nas amostras de referência.

5 CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND BRANCO ESTRUTURAL

5.1 Introdução

Adaptando-se ao comportamento de boa parte dos mercados internacionais, no Brasil a construção civil também tem se apresentado em crescente processo de modernização. Isso faz com que o setor, muitas vezes, arrisque-se na aposta em novos materiais, pois em alguns casos, esses ainda não foram submetidos a pesquisas e testes que comprovem sua total aceitação e desempenho, para que sejam caracterizados como materiais viáveis tecnicamente e com um considerável custo/benefício.

Todo esse processo de contínua evolução na construção civil acaba exigindo o desenvolvimento de novos materiais e também de novos usos para algumas matérias-primas fundamentais, além da necessidade de padronização de procedimentos e de desenvolvimento de práticas sustentáveis no setor como um todo. Como consequência desse aumento de expectativas técnicas e sociais, outros fatores, não apenas a resistência e a durabilidade, começam a ser incorporados na análise dos custos, como é o caso do impacto ambiental, uma vez que concretos que geram menos danos ao meio ambiente passam a ser mais valorizados.

A partir dessas tendências e necessidades, começa-se a pensar e aceitar o uso do cimento branco estrutural, valorizando esteticamente a estrutura de concreto, de maneira que esta não seja considerada apenas como elemento estrutural. Algo que favorece o uso desse cimento, em se tratando de estética, é sua versatilidade cromática, em vista de que as mais variadas cores podem ser obtidas através da inserção de pigmentos inorgânicos ou agregados coloridos.

5.2 Características físicas e químicas do cimento Portland branco

O cimento Portland branco, segundo Neville (1997), é fabricado com matérias-primas contendo baixíssimos teores de óxido de ferro (menos que 0.3% da massa do clínquer) e de óxido de manganês, e comumente é empregado caulim, juntamente com calcário. Para que se evite a contaminação pelas cinzas do carvão, emprega-se, como combustível no forno, óleo ou gás. Silva Filho et al. (2004) comentam que os cimentos brancos estruturais normalmente demandam uma temperatura de clínquerização um pouco mais alta, pois o ferro, praticamente ausente no cimento branco, atua como fundente. Os pesquisadores enfatizam também que esses cimentos apresentam grande reatividade, uma vez que possuem maiores teores de C_3A . Outro cuidado a ser tomado durante a fabricação do cimento branco é com a contaminação pelo aço durante a moagem, de forma que, conforme Neville (1997), em vez de se usar bolas de aço, usa-se seixo ou bolas de ligas de níquel e molibdênio, portanto mais caras, além de moinhos revestidos de pedra ou cerâmica. Em consequência dos maiores custos de moagem e das matérias-primas é que o cimento branco torna-se mais caro.

O cimento Portland branco se diferencia por coloração, e está classificado em dois subtipos: estrutural e não estrutural. O estrutural é aplicado em concretos brancos para fins arquitetônicos, com classes de resistência 25, 32 e 40, similares às dos demais tipos de cimento. Já o não estrutural não tem indicações de classe e é aplicado, por exemplo, em rejuntamento de azulejos e em aplicações não estruturais. Pode ser utilizado nas mesmas aplicações do cimento cinza. A cor branca é obtida a partir de matérias-primas com baixos teores de óxido de ferro e manganês, em condições especiais durante a fabricação, tais como resfriamento e moagem do produto e, principalmente, utilizando o caulim no lugar da argila. O índice de brancura deve ser maior que 78%. Adequado aos projetos arquitetônicos mais ousados, o cimento branco oferece a possibilidade de escolha de cores, uma vez que pode ser associado a pigmentos coloridos (NBR 12989/1993).

Passuelo (2004) lembra que o cimento Portland branco estrutural pode ser usado em concreto estrutural, pré-fabricados e artefatos de cimento, argamassas de revestimento, painéis de fechamento, blocos de concreto e pisos.

Algo a ser observado toda vez que se use o concreto branco aparente é a necessidade de cuidados especiais desde a escolha dos materiais até o planejamento da sua execução. São indispensáveis precauções quanto à cura e a acabamentos finais, sistemas de fôrmas com maior qualidade, o que acarreta ações que exigem mão-de-obra mais bem preparada e treinada que a tradicional, visando a fidelidade cromática e justificando esteticamente seu emprego.

Atentando-se às características do concreto branco, salienta-se que, qualquer medida objetivando aumentar o valor estético e ambiental de um projeto deve ser considerada benéfica. Na análise dos custos decorrentes do uso desse concreto deve haver uma maximização do valor total de retorno do investimento, não sendo considerado apenas o custo dos insumos, algo que viria a tornar um concreto branco sempre mais dispendioso que um concreto cinza tradicional.

5.3 Exemplos de aplicações do concreto branco estrutural

Kirchheim (2003, p. 22) comenta que “além de proporcionar um diferencial frente à sua beleza no projeto arquitetônico, o concreto branco possui vantagens frente à refletância da radiação solar”. Em vista dessas vantagens, a autora afirma que o concreto branco tem sido testado e aplicado em obras de alguns países, inclusive do Brasil. Alguns exemplos de obras que fizeram uso deste material são: Museu Iberê Camargo, RS (Figura 5.1); Prédio da Flextronics, SP (Figura 5.2); Auditório de Tenerife, Espanha (Figura 5.3); Centro Empresarial Rio Negro, SP (Figura 5.4); Ponte Irineu Bornhausen, SC (Figura 5.5); Lótus Temple, Índia (Figura 5.6); RSA Tower Montgomery, EUA (Figura 5.7); Aeroporto de Dulles, EUA (Figura 5.8); Arquidiocese de Los Angeles, EUA (Figura 5.9); Torre do Tombo, Portugal (Figura 5.10); Panamérica Park, SP (Figura 5.11); dentre outras tantas já construídas e em fase de projeto ou execução.



Figura 5.1 – Museu Iberê Camargo, Porto Alegre/RS
Fonte: www.iberecamargo.org.br/content/novasede/maquetes.asp



Figura 5.2 – Flextronics, Sorocaba/SP
Fonte: www.abcp.org.br/downloads/cimento_hj/jornal_32/arquitetura.htm



Figura 5.3 – Auditorio de Tenerife, Tenerife/Espanha
Fonte: www.auditoriodetenerife.com/index_galeria.php



Figura 5.4 – Centro Administrativo Rio Negro, Barueri/SP

Fonte: www.arcoweb.com.br/arquitetura/ricardo-juliao-arquitetura-e-urbanismo-centro-administrativo-01-03-2009.html



Figura 5.5 – Ponte Irineu Bornhausen, Brusque/SC

Fonte: www.carloscampos.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=6:concreto-branco&catid=33:Informa%EF%BF%BD%C3%B5es&Itemid=65



Figura 5.6 – Lótus Temple, Nova Délhi/Índia

Fonte: www.aloveyworld.com/webinde/htmgb/inde070.htm



Figura 5.7 – RSA Tower Montgomery, Alabama/EUA
Fonte: www.castonecorp.com/portfolio/rsa.html



Figura 5.8 – Aeroporto de Dulles, Virginia/EUA
Fonte: www.greatbuildings.com/buildings/Dulles_Airport.html



Figura 5.9 – Arquidiocese de Los Angeles, Califórnia/EUA
Fonte: veja.abril.com.br/180902/p_067.html



Figura 5.10 – Torre do Tombo, Lisboa/Portugal
Fonte: www.aatt.org



Figura 5.11 – Panamérica Park, São Paulo/SP
Fonte: www.hochtief.com.br/escritorios_panamerica.asp#

6 MATERIAIS E MÉTODOS

6.1 Introdução

Nesta pesquisa foi analisado o comportamento de concretos frente à retração total e à penetração de cloretos por imersão, sendo que para esta última, antes de serem colocados na solução salina, os corpos-de-prova foram expostos à cura úmida e posterior cura ao ar durante 91 dias. Os períodos de cura úmida investigados foram de 3 e 7 dias.

Com a finalidade de execução dos ensaios, foram preparadas, a partir dos dois cimentos empregados (CPB-40 e CPV-ARI), as misturas de referência (composta de 100% de cimento Portland como material aglomerante, chamada REF), e outras duas constituídas de 50% e 70% de escória como substituto parcial do cimento (50E e 70E, respectivamente). Uma mistura com substituição de 50% de escória e uma adição de 4% (da massa de aglomerante) de ativador químico (Na_2SO_4) foi preparada com CPB (50A). Cada uma dessas misturas foi moldada com três relações a/agl (0.30, 0.42 e 0.55). Nos concretos branco e cinza foram usados os mesmos teores de cimento, agregados e água, ou seja, mudou-se apenas o tipo de cimento em cada mistura.

Como este capítulo tem o intuito de apresentar os materiais utilizados e descrever as metodologias dos ensaios realizados, na seqüência são apresentadas as características dos materiais através de composições químicas, físicas e granulométricas, e também as descrições dos processos de fabricação, moldagem e cura dos concretos.

6.2 Caracterização dos materiais

6.2.1 Aglomerantes

Os cimentos usados na pesquisa foram o cimento Portland branco (CPB-40) e o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI), ambos de fabricação nacional e de acordo com as normas referentes, NBR 12989/1993 e NBR 5733/1991, respectivamente. A escória de alto forno empregada na pesquisa é proveniente da indústria siderúrgica nacional e foi entregue já moída pela própria empresa. As características físicas e químicas dos aglomerantes são apresentadas nas Tabelas 6.1 e 6.2, respectivamente.

Os ensaios foram realizados conforme as seguintes normas:

- NBR 11579/1991: Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 micrômetros (número 200);
- Análise química: NBR NM 10/2004, 11-1/2004, 11-2/2004, 12/2004, 13/2004, 14/2004, 15/2004, 16/2004, 17/2004, 18/2004, 19/2004, 21/2004;
- NBR NM 23/2004: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação de massa específica;
- NBR NM 43/2002: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal;
- NBR NM 65/2003: Cimento Portland – Determinação do tempo de pega;
- NBR NM 76/1998: Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método Blaine).

Tabela 6.1 – Características físicas dos aglomerantes

Grandeza física	CPV-ARI	CPB-40	Escória
Massa específica (g/cm ³)	3,11	2,97	2,92
Área específica Blaine (cm ² /g)	4490	5070	4090
Resíduo na # 0,075mm (%)	0,13	0,29	—

Tabela 6.2 – Composição química dos aglomerantes

Componentes	Porcentagem em massa dos materiais (%)		
	CPV-ARI	CPB-40	Escória
Perda ao fogo	3,17	11,60	0
SiO ₂	19,34	17,95	33,84
Al ₂ O ₃	4,55	2,98	10,35
Fe ₂ O ₃	2,77	0,21	0,67
CaO	62,43	59,40	44,50
MgO	2,61	2,87	7,99
SO ₃	2,89	3,09	—
S	—	—	0,83
Na ₂ O	0,09	0,43	0,20
K ₂ O	0,74	0,36	0,40
Início de Pega	125 min	100 min	—

6.2.2 Ativador químico

O ativador químico empregado foi o sulfato de sódio (Na₂SO₄) em teor de 4% sobre a massa de aglomerante. Sua dosagem foi justificada por pesquisas realizadas pelo Grupo de Estudos e Pesquisas em Concreto (GEPECON/UFSM), nas quais Gomes (2003) e Sperb (2003) utilizaram, além de outras misturas e ativadores, a ativação química em concretos com escória (70%) e Na₂SO₄ (4%) obtendo resultados satisfatórios quanto à resistência mecânica e à durabilidade. O uso do sulfato de sódio comercial, em vez do puro, foi determinado por razões econômicas.

6.2.3 Agregados

Como agregado miúdo foi usado a areia natural, de origem quartzosa, proveniente do município de Santa Maria/RS. A areia foi previamente lavada para remoção de possíveis impurezas, sejam orgânicas ou de qualquer outra natureza,

que podem influenciar no desempenho esperado para o concreto. Além disso, a areia foi seca em estufa a 105°C para remoção da umidade.

O agregado graúdo empregado foi a pedra britada, proveniente de rocha de origem diabásica, procedente do município de Itaara/RS. Este material foi lavado para remoção de componentes que podem vir a alterar o desempenho do concreto e, posteriormente, seco para remoção da umidade. As características físicas dos agregados são apresentadas na Tabela 6.3 e as distribuições granulométricas da areia e da pedra britada são apresentadas nas Figuras 6.1 e 6.2, respectivamente.

Os ensaios foram realizados de acordo com as seguintes normas:

- NBR NM 26/2001: Agregados – Amostragem;
- NBR NM 45/2006: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios;
- NBR NM 52/2003: Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente;
- NBR NM 53/2003: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água;
- NBR NM 248/2003: Agregados – Determinação da composição granulométrica;
- NBR 7809/2006: Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro.

Tabela 6.3 – Características físicas dos agregados

Grandeza Física	Pedra	Areia
Massa específica (Kg/dm ³)	2,49	2,63
Massa unitária (Kg/dm ³)	1,40	1,66
Módulo de finura	6,87	2,45
Índice de forma	2,41	–
Dimensão máxima característica (mm)	19	4,75

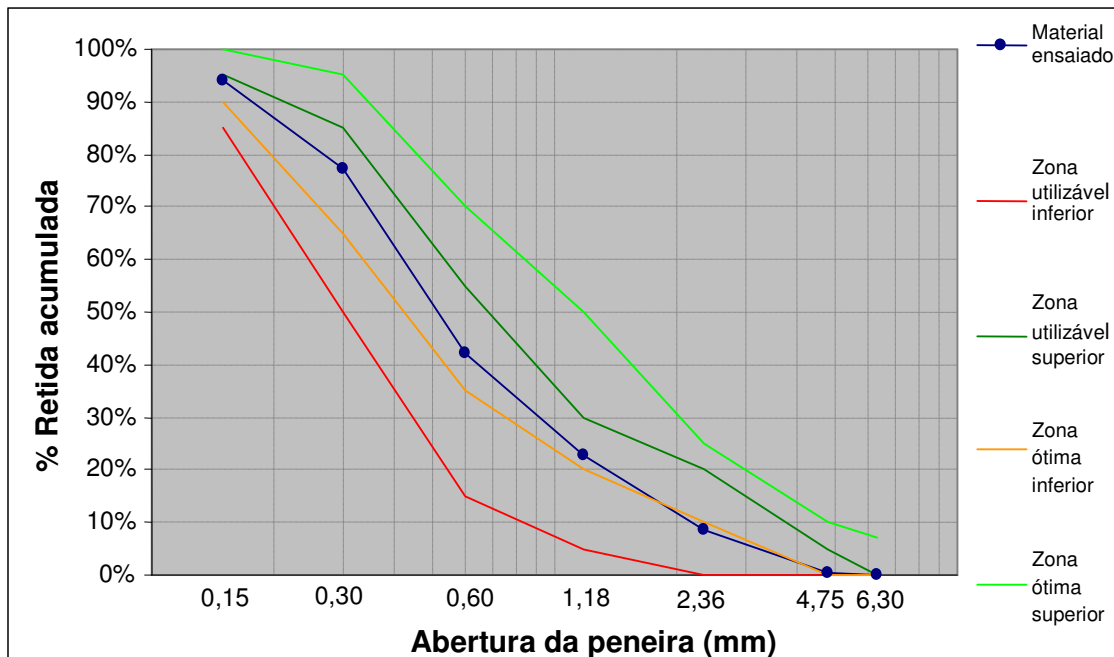


Figura 6.1 – Curva granulométrica do agregado miúdo

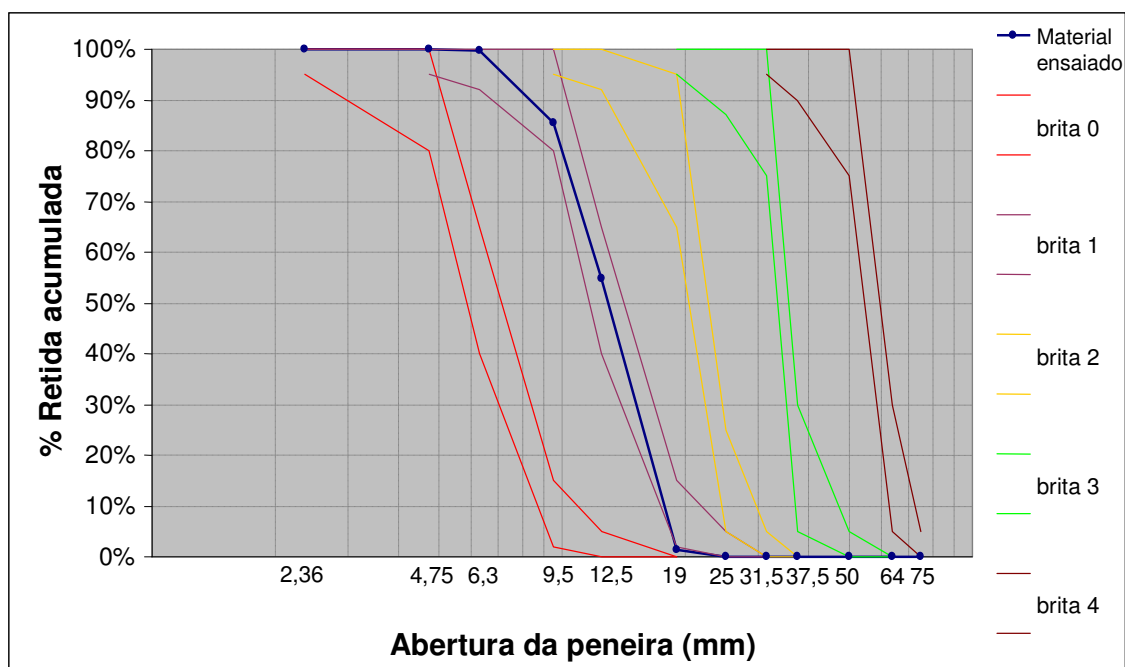


Figura 6.2 – Curva granulométrica do agregado graúdo

6.2.4 Aditivo superplastificante

Utilizou-se um aditivo superplastificante de 3^a geração, à base de éter policarboxílico, para que se alcançassem as consistências previamente fixadas nos valores de 90 ± 10 mm.

6.3 Procedimentos de dosagem, moldagem e cura

A execução do procedimento de dosagem possibilita a obtenção de misturas homogêneas. Nestas há uma desejável proporcionalidade entre os teores de materiais empregados, objetivando um completo preenchimento do total de agregado graúdo por parte da argamassa, cujo teor empregado foi de 52%.

Foi feito uso de quatro composições de material aglomerante, tendo cada uma delas três relações água/aglomerante (a/agl). Nas misturas em que se empregou escória juntamente com o cimento como aglomerante, fez-se uma correção no volume de areia a ser usado na mistura, visando-se manter o mesmo volume de argamassa da mistura de referência, uma vez que a escória tem menor massa específica que o cimento Portland e gera, então, um aumento do volume de pasta. As Tabelas 6.4 e 6.5 apresentam, respectivamente, os traços unitários das misturas e o consumo de materiais por m^3 de concreto.

Tabela 6.4 – Traços unitários para as misturas com CPB e CPV

Mistura	a/agl	Materiais					
		Cimento	Escória	Areia	Pedra	Aditivo *	Ativador
REF	0,30	1	—	1,24	2,06	0,33%	—
	0,42	1	—	1,70	2,50	0,08%	—
	0,55	1	—	2,69	3,41	—	—
50E	0,30	0,5	0,5	1,20	2,06	0,28%	—
	0,42	0,5	0,5	1,67	2,50	0,07%	—
	0,55	0,5	0,5	2,66	3,41	—	—
70E	0,30	0,3	0,7	1,19	2,06	0,28%	—
	0,42	0,3	0,7	1,66	2,50	0,07%	—
	0,55	0,3	0,7	2,65	3,41	—	—
50A	0,30	0,5	0,5	1,20	2,06	1,01%	4,00%
	0,42	0,5	0,5	1,67	2,50	0,03%	4,00%
	0,55	0,5	0,5	2,66	3,41	—	4,00%

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

Tabela 6.5 – Consumo de materiais por m³ de concreto

Mistura	a/agl	Materiais (Kg/m ³ de concreto)						
		Cimento	Escória	Areia	Brita	Aditivo*	Ativador	Água#
REF CPB	0,30	516,7	—	640,7	1064,3	1,70	—	153,8
	0,42	415,4	—	706,2	1038,6	0,33	—	174,3
	0,55	305,0	—	820,4	1039,9	—	—	167,7
REF CPV	0,30	520,7	—	645,7	1072,7	1,72	—	155,0
	0,42	418,1	—	710,7	1045,2	0,33	—	175,4
	0,55	306,4	—	824,2	1044,8	—	—	168,5
50E CPB	0,30	260,0	260,0	624,0	1071,2	1,46	—	155,0
	0,42	208,5	208,5	696,2	1042,3	0,27	—	174,9
	0,55	152,9	152,9	813,3	1042,7	—	—	168,2
50E CPV	0,30	261,0	261,0	626,4	1075,4	1,46	—	155,6
	0,42	209,1	209,1	698,4	1045,6	0,27	—	175,5
	0,55	153,2	153,2	815,2	1045,1	—	—	168,6
70E CPB	0,30	156,2	364,5	619,6	1072,6	1,46	—	155,2
	0,42	125,2	292,2	692,8	1043,4	0,29	—	175,1
	0,55	91,8	214,2	810,9	1043,5	—	—	168,3
70E CPV	0,30	156,6	365,4	621,1	1075,2	1,46	—	155,6
	0,42	125,5	292,7	694,2	1045,4	0,29	—	175,4
	0,55	91,9	214,5	812,1	1045,0	—	—	168,5
50A CPB	0,30	260,0	260,0	624,0	1071,2	5,25	20,80	152,3
	0,42	208,5	208,5	696,2	1042,3	0,13	16,68	175,0
	0,55	152,9	152,9	813,3	1042,7	—	12,23	168,2

* Valor correspondente à massa total do aditivo (30% de fase sólida + 70% de fase líquida)

Água presente no aditivo descontada do total de água da mistura correspondente

Durante o procedimento de dosagem, busca-se a minimização do número de variáveis influentes no comportamento do concreto. Desta forma, nas misturas com substituição parcial de cimento Portland por escória, atentou-se para a homogeneização de ambos, de forma que foram misturados antes de serem colocados na betoneira. Para o emprego do ativador químico, foi feita sua dissolução na água de amassamento para após ser acrescentado à mistura. Outro cuidado tomado foi com relação à temperatura do concreto fresco, buscando mantê-la na faixa de $19 \pm 1^\circ\text{C}$. Este controle foi possível através do uso da equação 6.1 proposta por Mehta e Monteiro (2008), a qual tem sido empregada nas pesquisas do GEPECON (Grupo de Estudos e Pesquisas em Concreto da UFSM). Com esta equação e possuindo o peso e a temperatura dos materiais secos, pode-se estimar a

temperatura que certo volume de água (podendo ser aquecido ou resfriado) deve apresentar para que a temperatura desejada do concreto seja alcançada.

$$T = \frac{0,22.(T_m.M_m + T_c.M_c) + T_a.M_a}{0,22.(M_m + M_c)} \quad (\text{Equação 6.1})$$

Onde:

- T - temperatura do concreto fresco (°F);
- T_m, T_c, T_a - temperaturas dos agregados, cimento e água, respectivamente (°F);
- M_m, M_c, M_a - massas dos agregados, cimento e água, respectivamente (Kg).

Atentando-se a esses procedimentos e cuidados especificados, as moldagens dos corpos-de-prova cilíndricos (Ø 100 mm x 200 mm) e dos prismáticos (100 mm x 100 mm x 285 mm) foram realizadas em duas camadas, sendo adensadas em mesa vibratória. Após 24 horas da moldagem, os corpos-de-prova foram desmoldados e colocados em câmara úmida, à temperatura de 23 ± 2°C e umidade relativa de 95%, e mantidos até suas datas de ruptura à compressão axial e de leitura inicial de comprimento. Os procedimentos de moldagem e cura foram realizados em conformidade com a NBR 5738/2003.

6.4 Ensaios experimentais

6.4.1 Retração total

As recomendações que regem este ensaio são dadas pela ASTM C 157/C 157M - 06 e ASTM C 490 - 04. A moldagem foi executada em fôrmas prismáticas de 100 mm x 100 mm x 285 mm, inserindo-se um pino com 22,5 mm de comprimento no centro de cada uma das duas bases do prisma, de modo que a distância entre os pinos, dentro do corpo-de-prova, fosse de 250 mm. Foram moldados quatro corpos-de-prova para cada mistura. A desmoldagem foi feita após 24 horas e logo em

seguida as amostras foram estocadas em câmara úmida durante o prazo de cura desejado e, depois, retiradas da mesma para ser feita a primeira leitura de seus comprimentos. Na seqüência, elas foram mantidas em sala climatizada (temperatura = $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e UR = $50 \pm 10\%$) para secagem ao ar. As leituras de retração foram feitas nas idades de 7, 14, 21, 28, 35, 56, 91 e 182 dias após a retirada da câmara úmida. Essas leituras foram realizadas em comparador de expansibilidade com marcador digital de precisão 0,001 mm. Após a leitura aos 91 dias, dois dos quatro corpos-de-prova de cada mistura foram preparados para o ensaio de penetração de cloretos por imersão, sendo que os outros dois permaneceram na sala climatizada para a leitura seguinte de retração. A Figura 6.3 mostra um dos corpos-de-prova acoplado ao aparelho de medição.



Figura 6.3 – Corpo-de-prova acoplado ao comparador de expansibilidade

6.4.2 Penetração de cloretos por imersão

A metodologia deste ensaio caracteriza-se pela preparação de metade dos corpos-de-prova utilizados no ensaio de retração após terem completado 91 dias de secagem, sendo realizada na seguinte ordem de procedimentos: primeiramente, os dois corpos-de-prova de cada mistura foram serrados, cada um, em cinco fatias de

aproximadamente 53 mm de espessura, totalizando dez fatias para cada mistura, sendo duas para cada um dos cinco períodos de imersão em solução salina; em seguida, cada fatia foi impermeabilizada em quatro das suas seis faces com três demãos de verniz poliuretânico, permitindo assim que ocorresse penetração de íons cloretos somente nas duas faces laterais (100 mm x 53 mm). Nas faces das fatias onde havia o pino, o mesmo foi serrado para que viabilizasse a sua futura ruptura. Após a preparação, as fatias foram imersas num reservatório com solução salina na proporção de 31,94 g de NaCl para cada litro de água destilada.

Os períodos de penetração avaliados foram de 7, 14, 28, 56 e 91 dias. Ao completar cada uma dessas idades, duas fatias foram retiradas do reservatório, lavadas com água potável e rompidas na direção de penetração dos íons cloretos. Em seguida, foi aspergida solução de nitrato de prata (17 g de AgNO_3 para cada litro de água deionizada) para percepção visual da região de penetração de íons cloretos e registro fotográfico após a secagem da solução sobre a face rompida. De acordo com Otsuki, Nagataki e Nakashita (1992), a profundidade de penetração de cloretos é claramente indicada por um limite de mudança de cor. A solução de AgNO_3 reage, preferencialmente, com os cloretos livres presentes na matriz cimentícia endurecida e forma uma precipitação branca de cloreto de prata (AgCl); em profundidades maiores, onde não há cloretos livres, AgNO_3 reage com os hidróxidos e forma uma precipitação marrom de óxido de prata (AgO). A coloração esbranquiçada é percebida nos locais onde a concentração de íons cloretos livres é superior a 0,15% do peso de cimento. As características das soluções de NaCl e de AgNO_3 estão em conformidade com o método utilizado por Wee, Suryavanshi e Tin (2000). Através de inserção da fotografia digitalizada no programa computacional *AutoCAD*, foi possível colocar a imagem em escala e sobre ela traçar um contorno ao redor da região penetrada por íons cloretos. Esta região foi dividida por linhas paralelas traçadas ao longo da profundidade de penetração e espaçadas 1 mm uma da outra; através de uma rotina chamada *COTA*, foi medido o comprimento de cada uma dessas linhas. Essa rotina gerou automaticamente um arquivo em formato *Excel*, do qual se obtiveram os valores, que depois foram transferidos para uma planilha onde foi dado um tratamento estatístico e obtida a distância média de penetração de íons cloretos, na qual os valores discrepantes, com coeficiente de variação superior a 10%, foram excluídos. Na Figura 6.4 é apresentada uma das fotografias digitalizadas usada na

obtenção dos resultados do ensaio de penetração de cloretos por imersão. Na Figura 6.5 são expostas as regiões de penetração correspondentes à Figura 6.4.

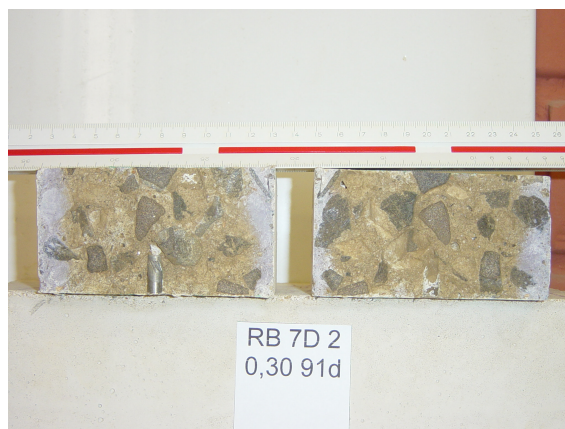


Figura 6.4 – Corpo-de-prova após ruptura e aspersão de nitrato de prata

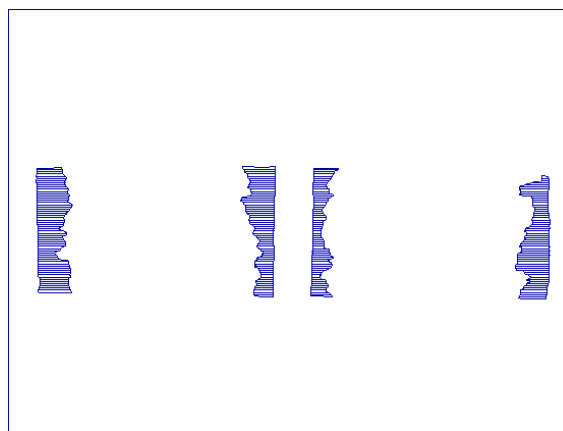


Figura 6.5 – Regiões de penetração e linhas paralelas a cada 1 mm

6.4.3 Resistência à compressão axial

Este ensaio foi realizado conforme a NBR 5739/2007. Para cada uma das misturas investigadas foram moldados 3 corpos-de-prova cilíndricos (\varnothing 100 mm x 200 mm) para cada uma das idades de cura de 3 e 7 dias, além de 4 corpos-de-prova para cada uma das idades de 28 e 91 dias. Foi empregado capeamento à

base de enxofre nas bases dos corpos-de-prova, visando regularizar as extremidades e permitir uma distribuição de carga uniforme.

7 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

7.1 Análise dos resultados do ensaio de retração total

Os resultados do ensaio de retração total são apresentados nas Figuras 7.1, 7.2, 7.3 e 7.4. Nelas são mostradas as micro-deformações (10^{-6} mm/mm) dos corpos-de-prova das misturas em cada uma das idades avaliadas para os dois períodos de cura.

A análise detalhada dos resultados, incluindo comparações percentuais entre os resultados numéricos, foi feita com base nos valores obtidos nas leituras de retração da última idade avaliada até então, 182 dias, conforme a Tabela 7.1. Nas idades anteriores, de maneira geral, foram evidenciadas tendências de comportamentos similares às observadas aos 182 dias. Com base nas comparações percentuais dos resultados, toda vez que uma mistura apresentou retração superior em até 20% da observada em outra mistura, ou redução de até 17% quando comparadas, considerou-se que ambas possuem comportamentos similares. Estes valores foram usados porque Sivasundaram e Malhotra (1992), ao discutir seus resultados, concluíram que a retração hidráulica foi praticamente a mesma dentro de uma faixa entre 405×10^{-6} e 493×10^{-6} .

Conforme análise das figuras, constata-se que, em praticamente todas as misturas, a maior parte da redução dimensional ocorreu durante as três primeiras semanas, sendo creditada, principalmente, à perda de parte da água presente devido à cura.

Tabela 7.1 – Retração final das misturas avaliadas

Cura	a/agl	Retração final ($\times 10^{-6}$ mm/mm), aos 182 dias, para cada mistura						
		REF CPB	REF CPV	50E CPB	50E CPV	70E CPB	70E CPV	50A CPB
3D	0,30	774	490	594	594	472	462	480
	0,42	724	572	572	566	474	558	562
	0,55	778	568	536	520	466	656	464
7D	0,30	612	538	506	472	404	488	488
	0,42	680	660	560	558	544	492	672
	0,55	706	550	576	516	402	574	398

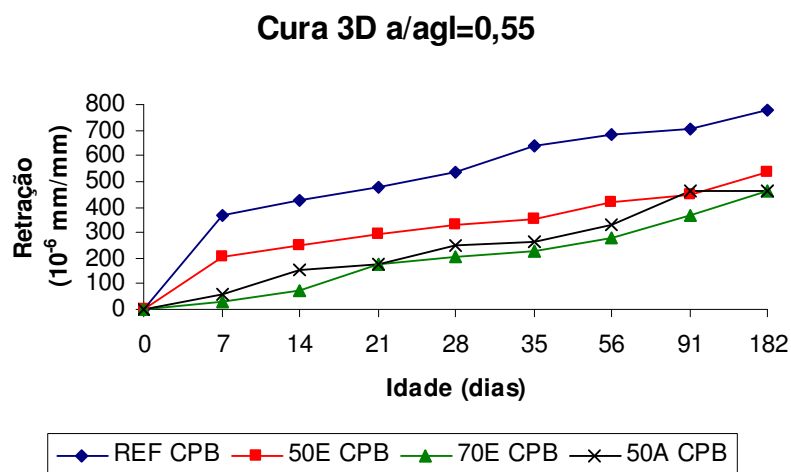
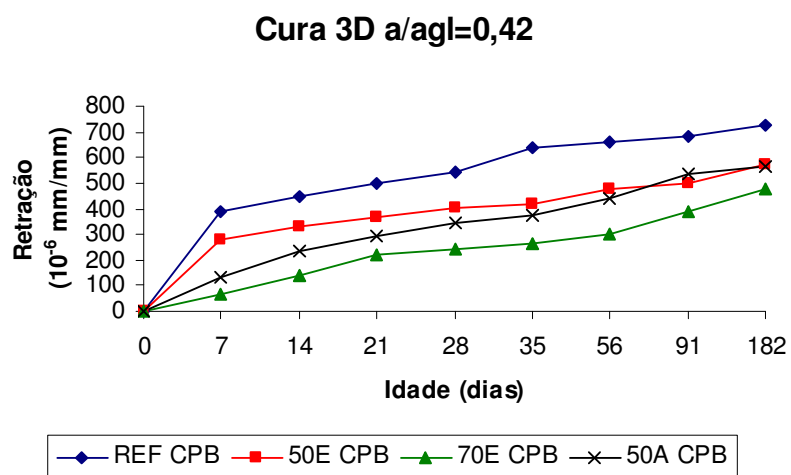
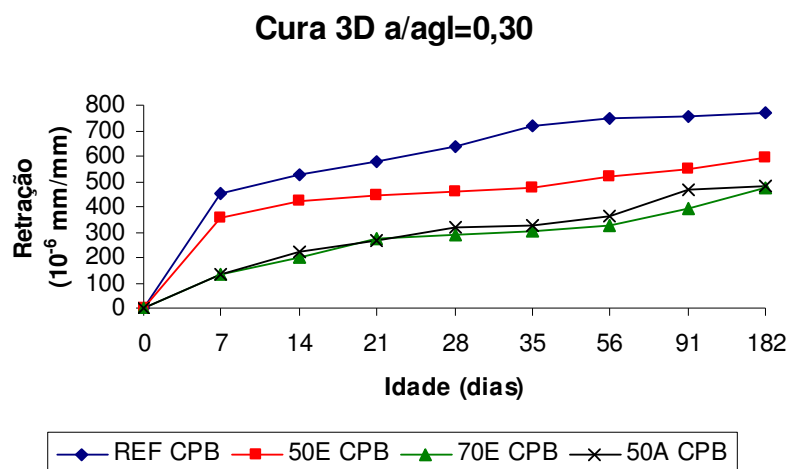
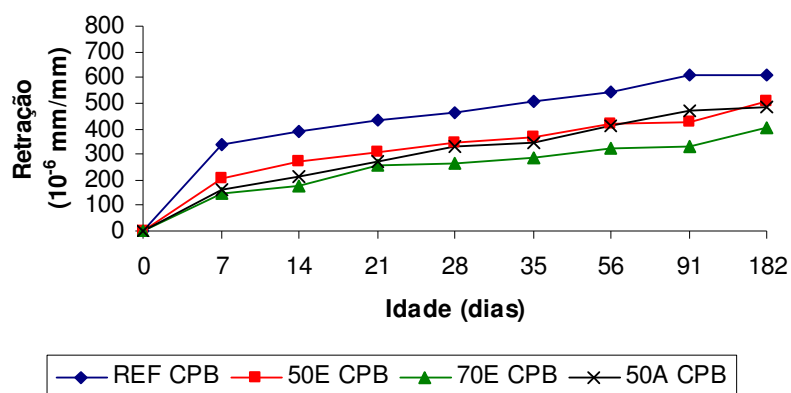
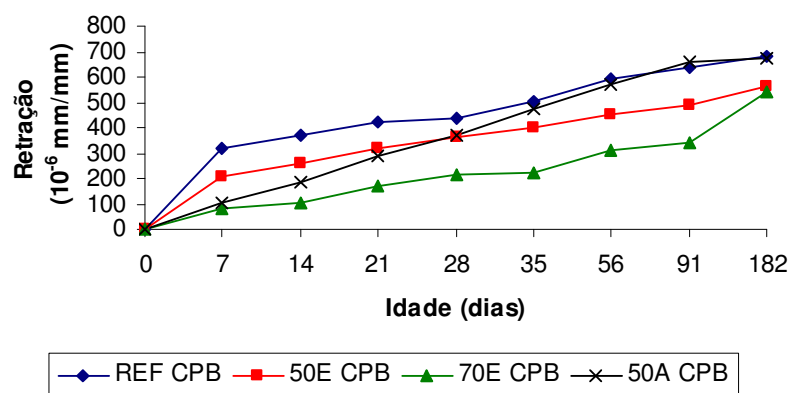


Figura 7.1 – Retração total dos concretos brancos com 3 dias de cura para as diferentes relações a/agl

Cura 7D a/agl=0,30



Cura 7D a/agl=0,42



Cura 7D a/agl=0,55

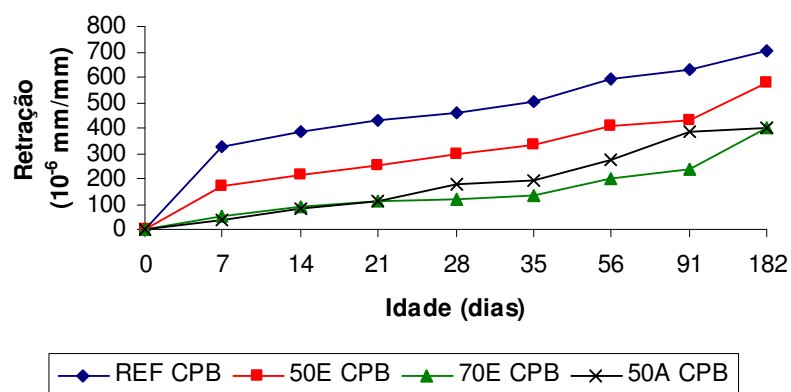
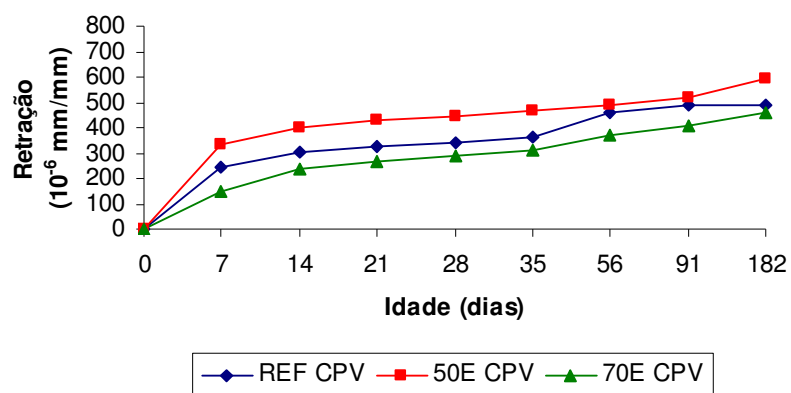
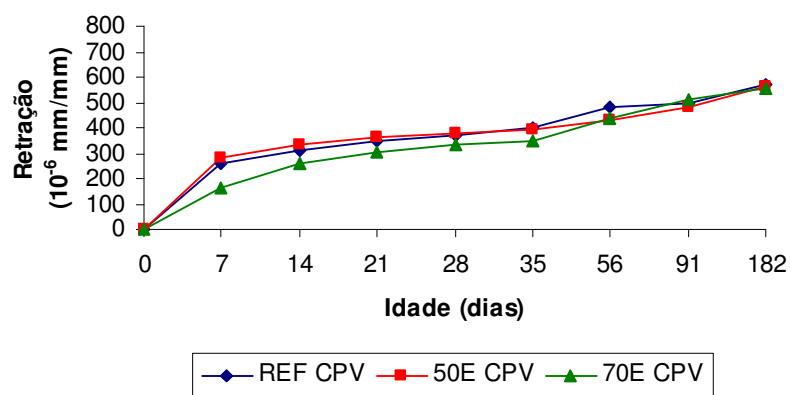


Figura 7.2 – Retração total dos concretos brancos com 7 dias de cura para as diferentes relações a/agl

Cura 3D a/agl=0,30



Cura 3D a/agl=0,42



Cura 3D a/agl=0,55

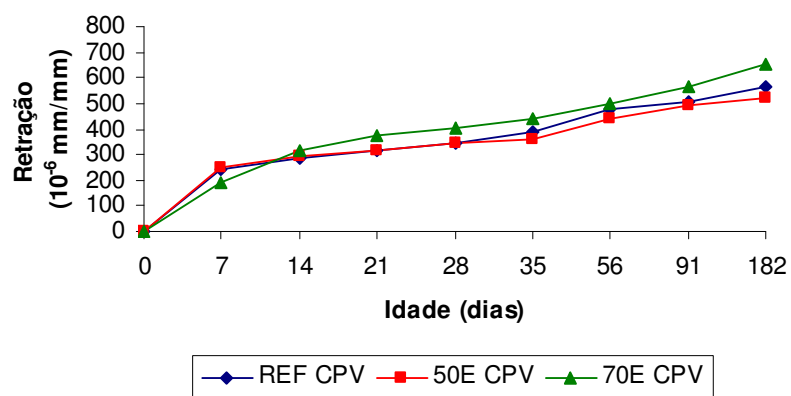
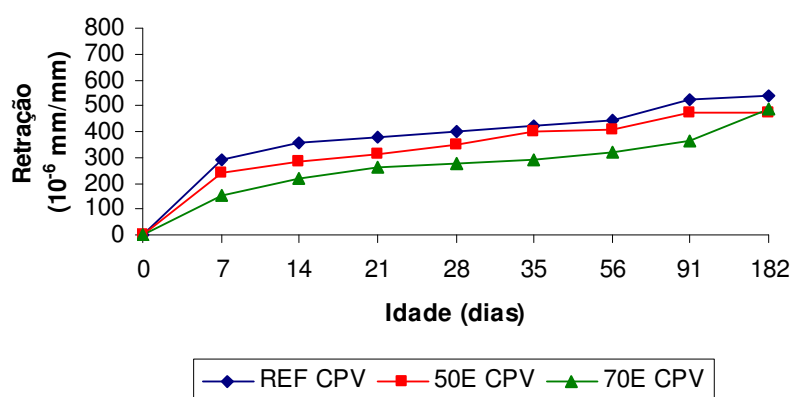
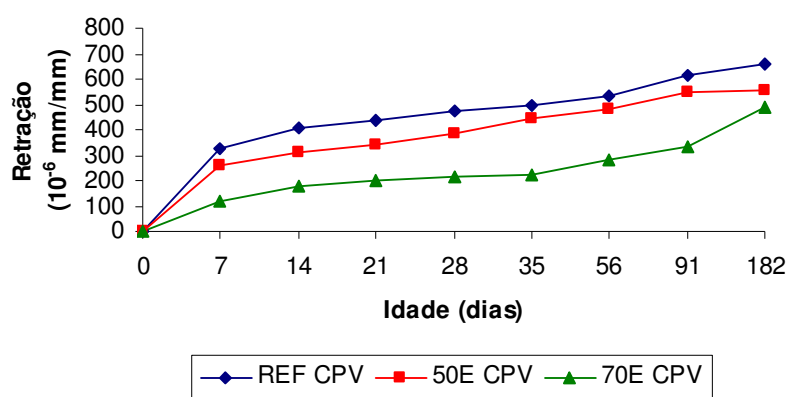


Figura 7.3 – Retração total dos concretos cinzas com 3 dias de cura para as diferentes relações a/agl

Cura 7D a/agl=0,30



Cura 7D a/agl=0,42



Cura 7D a/agl=0,55

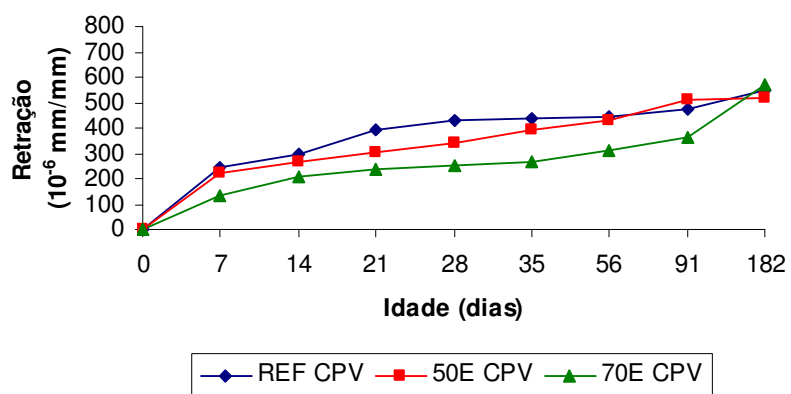


Figura 7.4 – Retração total dos concretos cinzas com 7 dias de cura para as diferentes relações a/agl

Na Tabela 7.1 observam-se, conforme Zia, Ahmad e Leming (1997 apud ACI COMMITTEE 209, 2005), valores típicos de retração para concretos em idades avançadas, entre 200 e 800×10^{-6} mm/mm.

7.1.1 Comparação de desempenho entre os cimentos investigados

Conforme o observado nas Figuras 7.1, 7.2, 7.3 e 7.4, até 182 dias de exposição ao ar, o concreto de referência (REF) branco apresentou maior retração que o correspondente cinza, tendo ocorrido variação pronunciada para o período de cura de 3 dias, com aumentos de 58%, 27% e 37% nas relações a/agl de 0.30, 0.42 e 0.55, respectivamente. Já para a cura de 7 dias houve crescimento considerado, ao se usar cimento branco, somente na relação a/agl de 0.55 (28%).

Para as misturas compostas de 50% de escória (50E), em ambos os períodos de cura, praticamente não se notou variação de retração entre os concretos branco e cinza, sendo as diferenças muito pequenas para cura de 3 dias.

Levando-se em conta os concretos moldados com 70% de escória (70E), curados durante 3 dias, observou-se maior retração no cinza, com aumento pronunciado somente na relação a/agl de 0.55 (41%), uma vez comparado ao correspondente concreto branco 70E. No caso dos concretos curados por 7 dias, constatou-se diferença notável entre o cinza e o branco nas relações a/agl de 0.30 e 0.55, sendo maior a retração no cinza em 21% e 43%, respectivamente.

Na comparação entre as misturas não mencionadas, foram observados comportamentos similares.

7.1.2 Comparação entre os diferentes teores de escória

7.1.2.1 Concreto branco

Confrontando-se os teores de escória entre si para os concretos confeccionados com CPB, independente do prazo de cura, notou-se redução pronunciada de retração com o aumento do teor de escória.

Considerando-se o prazo de cura de 3 dias, foram constatados, com o aumento do teor de escória, percentuais de redução de retração ligeiramente superiores aos da cura de 7 dias. Na comparação entre a mistura REF e a 50E, cura de 3 dias, foram observadas diminuições de 23%, 21% e 31%, respectivamente nas relações a/agl 0.30, 0.42 e 0.55. Comparando-se o concreto REF com o 70E, as reduções de retração evidenciadas foram de 39%, 34% e 40%, respectivamente. Com o uso da mistura 50A ocorreram decréscimos na retração de 38%, 22% e 40%, respectivamente, quando comparada à mistura REF. Ainda para cura de 3 dias, no confronto de resultados entre os concretos 50E e 50A, observaram-se comportamentos similares, exceto na relação a/agl 0.30, na qual se evidenciou redução de 19% na retração com o uso do ativador.

Ao comparar a mistura REF com a 50E, 7 dias de cura, observaram-se diminuições na retração de 18% nas relações a/agl 0.42 e 0.55; já para a relação a/agl 0.30 seus desempenhos foram parecidos. Na mistura 70E, constataram-se reduções na retração ainda mais expressivas, da ordem de 34%, 20% e 43%, respectivamente para as relações a/agl 0.30, 0.42 e 0.55, uma vez comparada à mistura REF. Da análise do concreto composto com escória ativada quimicamente (50A), foram evidenciadas reduções de retração nas relações a/agl 0.30 e 0.55, da ordem de 20% e 44%, respectivamente, uma vez comparado ao concreto REF na cura de 7 dias. Na relação a/agl 0.42 não houve alteração na retração. Com o intuito de compreender melhor a influência do ativador no concreto de escória, foram comparadas as misturas 50E e 50A e constataram-se desempenhos similares de retração na cura de 7 dias, exceto para a relação a/agl 0.55, na qual a mistura não ativada apresentou retração 45% superior àquela ativada.

7.1.2.2 Concreto cinza

Para os concretos moldados com CPV-ARI, de maneira geral e independente do prazo de cura, não se constatou diferença de comportamento quanto à retração total, quando comparados o concreto de referência com aqueles compostos de escória, com exceção da mistura 70E na relação a/agl 0.42 e cura de 7 dias, que gerou um decréscimo de 25% na retração, quando comparada à mistura REF.

7.1.3 Comparação entre os períodos de cura

7.1.3.1 Concreto branco

Foi evidenciada, para os concretos moldados com CPB, maior retração na cura de 3 dias, com diferença notável, apenas na mistura REF com relação a/agl 0.30, apresentando um valor 26% maior. Para os demais concretos foram observados comportamentos parecidos quanto à retração total entre os prazos de cura de 3 e 7 dias.

7.1.3.2 Concreto cinza

Nos concretos de CPV-ARI foi constatada maior retração na cura de 3 dias, com diferença considerada somente para a mistura 50E na relação a/agl 0.30, com um valor 26% superior ao da mesma mistura curada por 7 dias. Nas demais misturas, a pequena diferença nos resultados caracterizou comportamentos similares, quanto à retração total, entre os prazos de cura.

7.1.4 Discussão dos resultados

Algo a ser enfatizado, que auxilia na compreensão de alguns resultados, é que as diferentes relações a/agl possuem diferentes teores de material aglomerante, de forma que, quanto menor a relação a/agl, maior foi o consumo de material aglomerante, possibilitando uma mesma consistência para todas as misturas, tendo sido fixado o abatimento em 90 ± 10 mm. Isso justifica alguns casos nos quais não se constataram diferenças expressivas de retração entre as diferentes relações a/agl investigadas em uma mesma mistura. Esse comportamento também foi evidenciado por Sivasundaram e Malhotra (1992). Os autores observaram os menores valores de retração nos concretos com a maior relação a/agl investigada, de modo que tal comportamento foi justificado pelos baixos teores de material aglomerante nesses concretos. De acordo com Young (1988 apud COLLINS E SANJAYAN, 2000), a retração, em condições usuais, depende da perda de água dos mesoporos (raios dos poros entre as dimensões de 1 nm e 25 nm), de modo que nem sempre o concreto que apresenta maior quantidade de água evaporável é o que retrai mais.

Collins e Sanjayan (2000) pesquisaram o efeito da distribuição dos tamanhos dos poros na retração hidráulica em concretos de escória ativados por metasilicato de sódio em pó e cal hidratada. Os autores verificaram maior magnitude de retração no concreto de escória (100% de escória como aglomerante) álcali ativado quando comparado ao concreto de cimento Portland comum, embora este tenha perdido mais água que aquele durante a secagem. Collins e Sanjayan (2000) concluíram que a maior retração do concreto de escória álcali ativado não se justifica somente pela quantidade de água perdida durante a secagem, mas também pelo maior percentual de poros na faixa dos mesoporos, uma vez que perdeu muito mais água presente nesses poros que o concreto sem escória. Segundo os autores, seus resultados ratificam a teoria de que as tensões capilares estabelecidas durante a secagem, que são mais intensas com a redução do raio dos poros, influenciam significativamente a retração de concretos de escória. Perenchio (1997) comenta que se acredita que a retração hidráulica nas idades iniciais é devida, principalmente, à tensão superficial gerada pela saída de água através dos poros capilares da pasta hidratada. Em se tratando da retração em idades avançadas, considera-se que é causada pela perda de água adsorvida nas superfícies da pasta

de cimento hidratada (Perenchio, 1997). Aldred e Lee (2004) comentam que o mecanismo de tensão capilar é usado para explicar a retração.

De maneira geral, até 182 dias de exposição ao ar, não foi constatada diferença expressiva de retração quando comparados os dois prazos de cura entre si. A magnitude da retração verificada nos concretos curados durante o maior período avaliado (7 dias) pode ser justificada pelo maior refinamento da estrutura da pasta hidratada, desenvolvendo, conseqüentemente, maior quantidade de mesoporos, de modo que parte da água que ainda não reagiu quimicamente, presente nesses poros, tende a aumentar a tensão capilar ao abandoná-los em função da exposição ao ar, ocasionando retração do elemento e confirmando assim, de acordo com o evidenciado por Wittmann (1982 apud COLLINS E SANJAYAN, 2000) e Young (1988 apud COLLINS E SANJAYAN, 2000), a forte influência da distribuição dos tamanhos dos poros na retração hidráulica do concreto. Por outro lado, a retração verificada para a cura de menor duração (3 dias) é creditada à maior quantidade de água evaporável presente, uma vez que apresenta um menor grau de hidratação, com menos água combinada quimicamente. Segundo Neville (1997), o esvaziamento dos capilares causa uma perda de água sem retração, porém, uma vez removida a água capilar, passa a ocorrer a remoção da água adsorvida. Perenchio (1997), com o fim de comparar diferentes períodos de cura úmida, moldou misturas com relações água/cimento (a/c) de 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 e 0.7, e observou, confrontando as misturas curadas durante 3 e 7 dias, menor retração nos concretos curados durante o menor período para as misturas com relações a/c de 0.5, 0.6 e 0.7. Com exceção da relação a/c de 0.7, constataram-se diferenças pouco expressivas de retração entre os dois períodos de cura.

Comparando-se os teores de escória entre si, notam-se, nos concretos moldados com CPV-ARI, desempenhos similares entre as misturas com escória e a de referência. Comportamentos similares foram observados por Brooks, Wainwright e Boukendakji (1992) e Sivasundaram e Malhotra (1992). Diferentemente do concreto cinza, no branco houve redução considerada de retração a partir do aumento do teor de escória em substituição ao cimento Portland.

Em se tratando do concreto composto de escória ativada (50A), observaram-se, de maneira geral, menores valores de retração quando comparado ao concreto correspondente não ativado (50E), tendência essa também observada por Mun, So e Soh (2007). Esse comportamento pode ser justificado pelo refinamento da

estrutura da pasta e redução da conectividade dos poros, comprovados pelos resultados obtidos por Lübeck (2008), que empregou as mesmas misturas do presente estudo e verificou, nos prazos de cura de 3 e 7 dias, aumentos expressivos de resistividade elétrica aparente a partir do uso de ativador químico. Os resultados (ohm x cm) verificados pelo autor, para as relações a/agl de 0.30, 0.42 e 0.55, foram:

- Mistura 50E, 3 dias de cura (10222, 6793 e 6136); 7 dias de cura (25667, 16431 e 15022).
- Mistura 50A, 3 dias de cura (15914, 10306 e 3901); 7 dias de cura (47492, 36769 e 25533).

Essa justificativa foi considerada porque, de acordo com Andrade (2005), a resistividade elétrica de concreto saturado é uma medida indireta da conectividade dos poros.

De acordo com os resultados observados no ensaio de retração total, verifica-se que, nos concretos moldados com CPV-ARI, nenhuma mistura apresentou, de forma expressiva, melhora de desempenho quando comparada às demais, em igualdade de cura e relação a/agl. Já para os concretos com CPB-40, na mistura 70E foram constatados os menores valores de retração, tendo apresentado reduções expressivas quando comparada ao concreto de referência. Com relação ao prazo de cura, não houve diferença considerada entre ambos, porém, visando praticidade na execução, recomenda-se a cura de 3 dias, desde que o concreto em questão não seja submetido a agentes agressivos que possam comprometer sua durabilidade.

7.2 Análise dos resultados do ensaio de penetração de cloretos por imersão

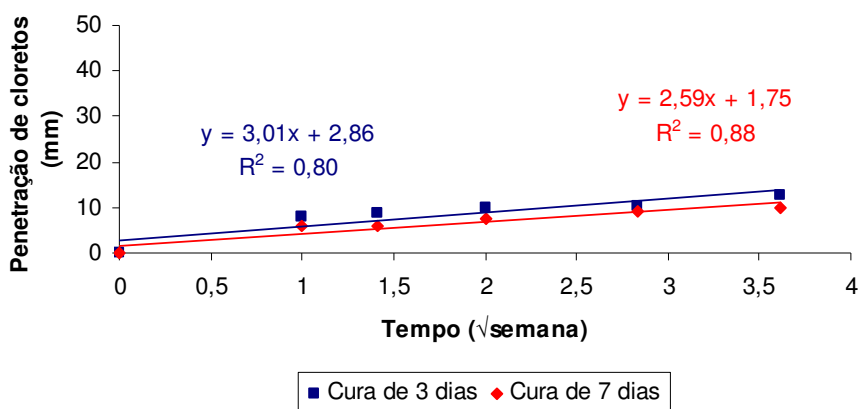
A análise dos resultados do ensaio de penetração de cloretos por imersão é feita com base no coeficiente angular da equação de regressão linear, proposta por Bakker (1988) e empregada por Wee, Suryavanshi e Tin (2000), chamado coeficiente de penetração. A partir dos gráficos (profundidade de penetração x $\sqrt{\text{tempo}}$), ilustrados nas Figuras 7.5, 7.6, 7.7, 7.8, 7.9, 7.10 e 7.11, foram obtidas equações de regressão (Equação 7.1) correspondentes às linhas retas de tendências traçadas entre os pontos obtidos (profundidades de penetração para

cada uma das 5 idades) em cada mistura investigada. Das equações são obtidos os coeficientes de penetração (k) e dos gráficos seus coeficientes de determinação (R^2).

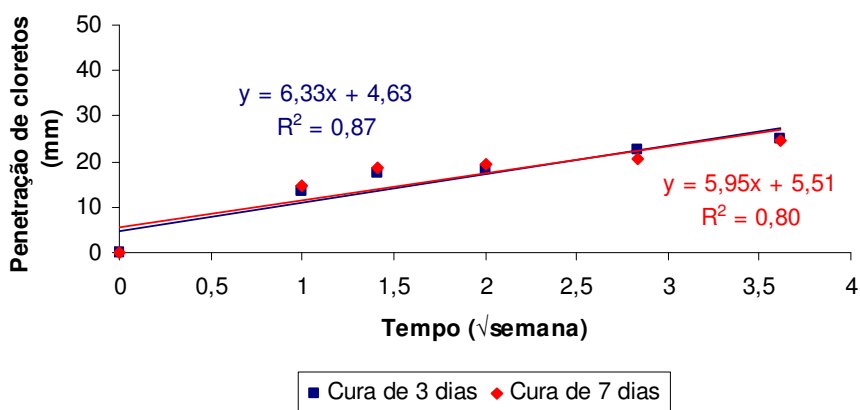
$$y = a + k (\sqrt{\text{semana}}) \quad (\text{Equação 7.1})$$

A adoção de uma constante “a” igual a zero gera maiores coeficientes de penetração e menores coeficientes de determinação, de modo que impossibilita o melhor ajuste aos resultados obtidos no ensaio, conforme foi comprovado por Siqueira (2008). Em razão disso, nesta pesquisa, a constante “a” foi considerada diferente de zero, como propõem Wee, Suryavanshi e Tin (2000). Os autores comentam que a magnitude dessa constante se caracteriza mais como um artefato para o ajuste da curva do que um indicador das propriedades das misturas. Para diferenciar a simbologia, neste método ($a \neq 0$) o coeficiente de penetração foi denominado k' .

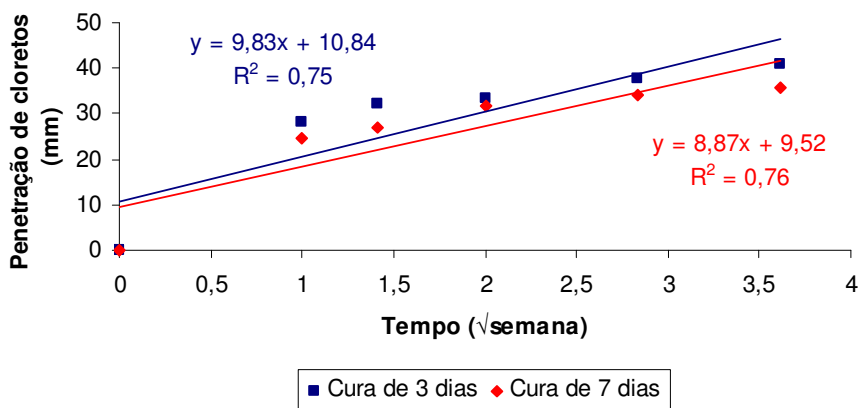
REF CPB a/agl=0,30



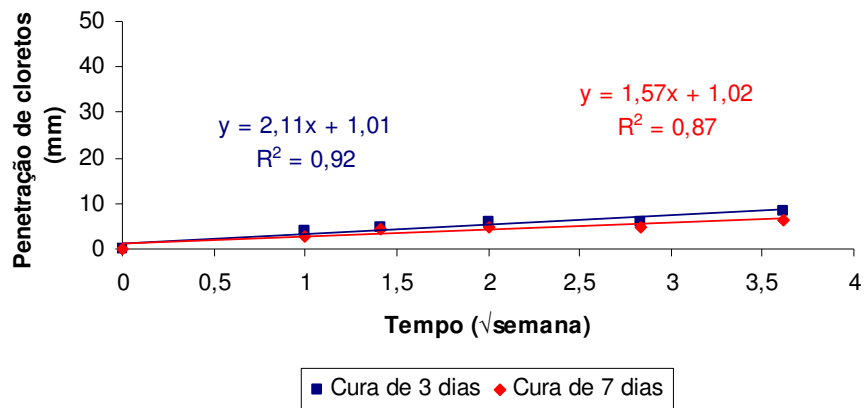
REF CPB a/agl=0,42



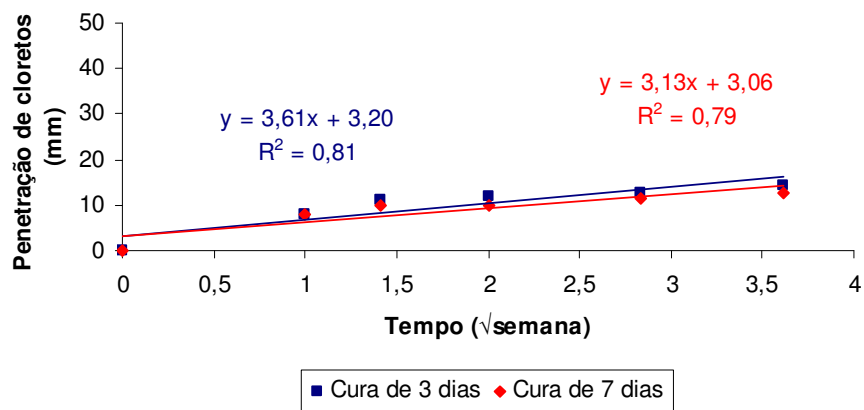
REF CPB a/agl=0,55

Figura 7.5 – Gráficos para obtenção dos coeficientes k' , mistura REF CPB

50E CPB a/agl=0,30



50E CPB a/agl=0,42



50E CPB a/agl=0,55

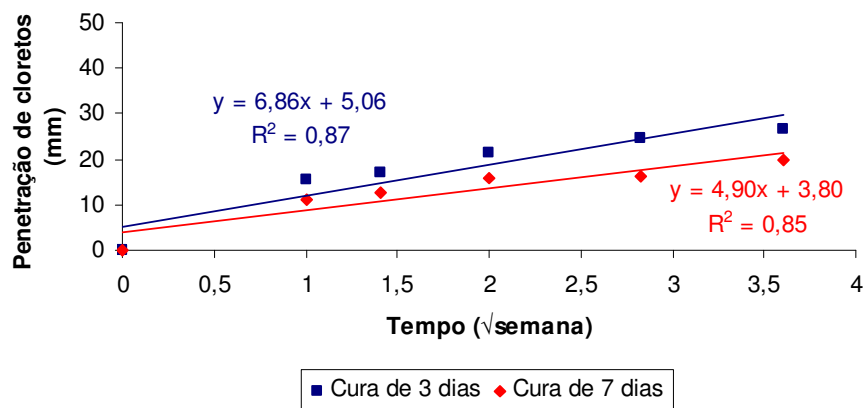
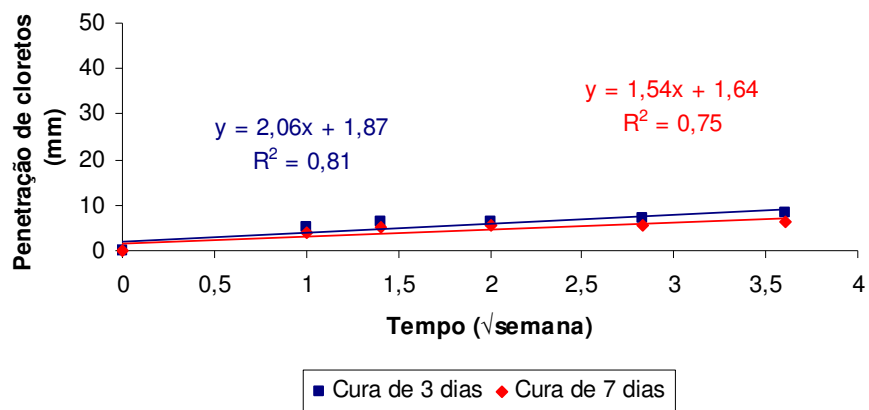
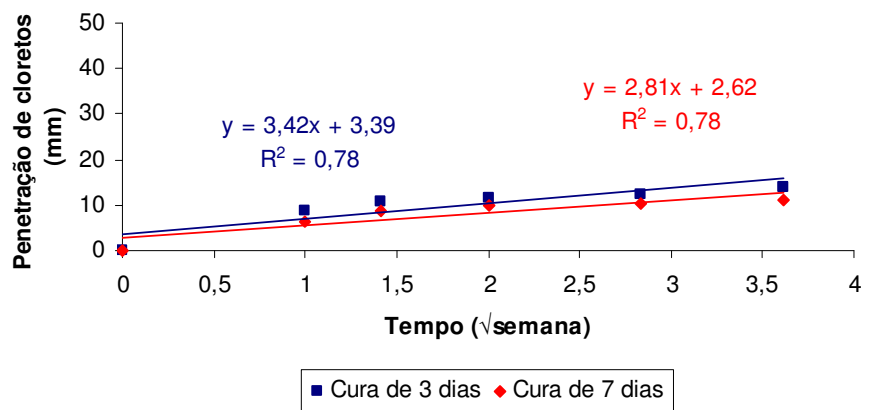


Figura 7.6 – Gráficos para obtenção dos coeficientes k' , mistura 50E CPB

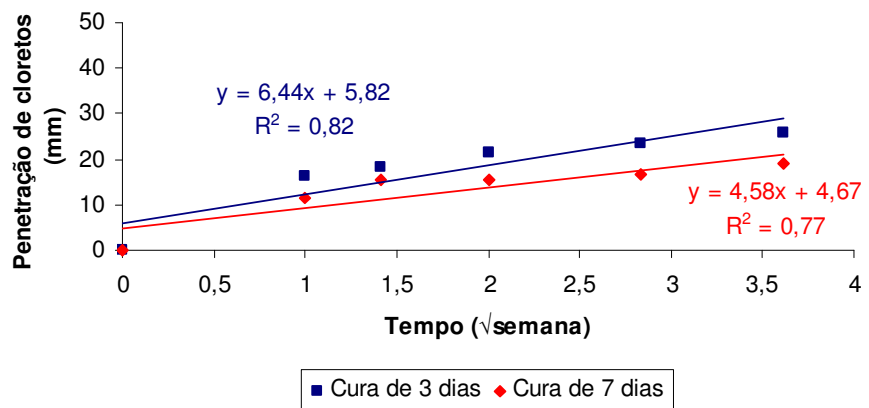
70E CPB a/agl=0,30



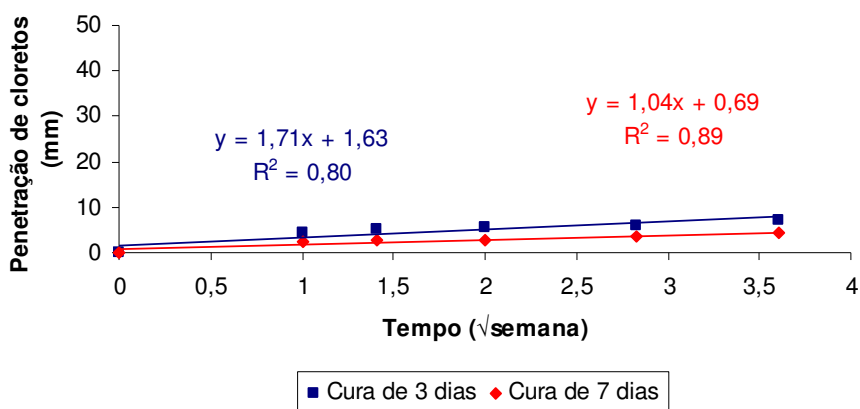
70E CPB a/agl=0,42



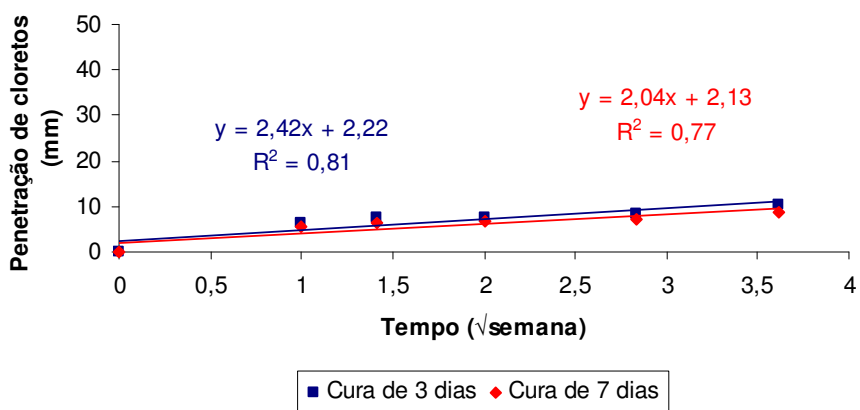
70E CPB a/agl=0,55

Figura 7.7 – Gráficos para obtenção dos coeficientes k' , mistura 70E CPB

50A CPB a/agl=0,30



50A CPB a/agl=0,42



50A CPB a/agl=0,55

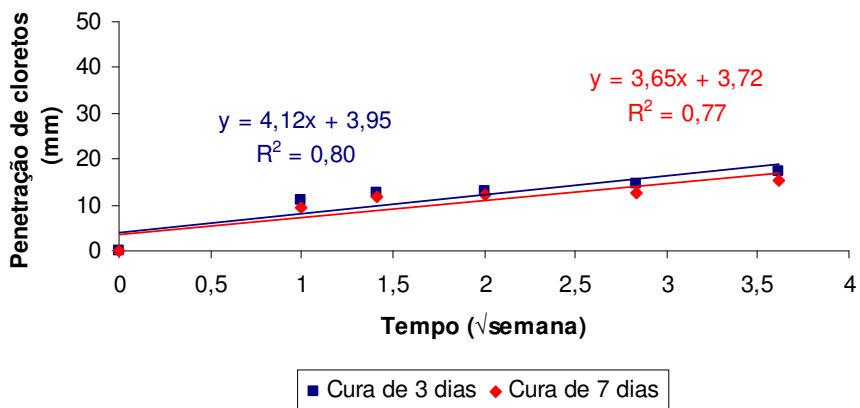


Figura 7.8 – Gráficos para obtenção dos coeficientes k' , mistura 50A CPB

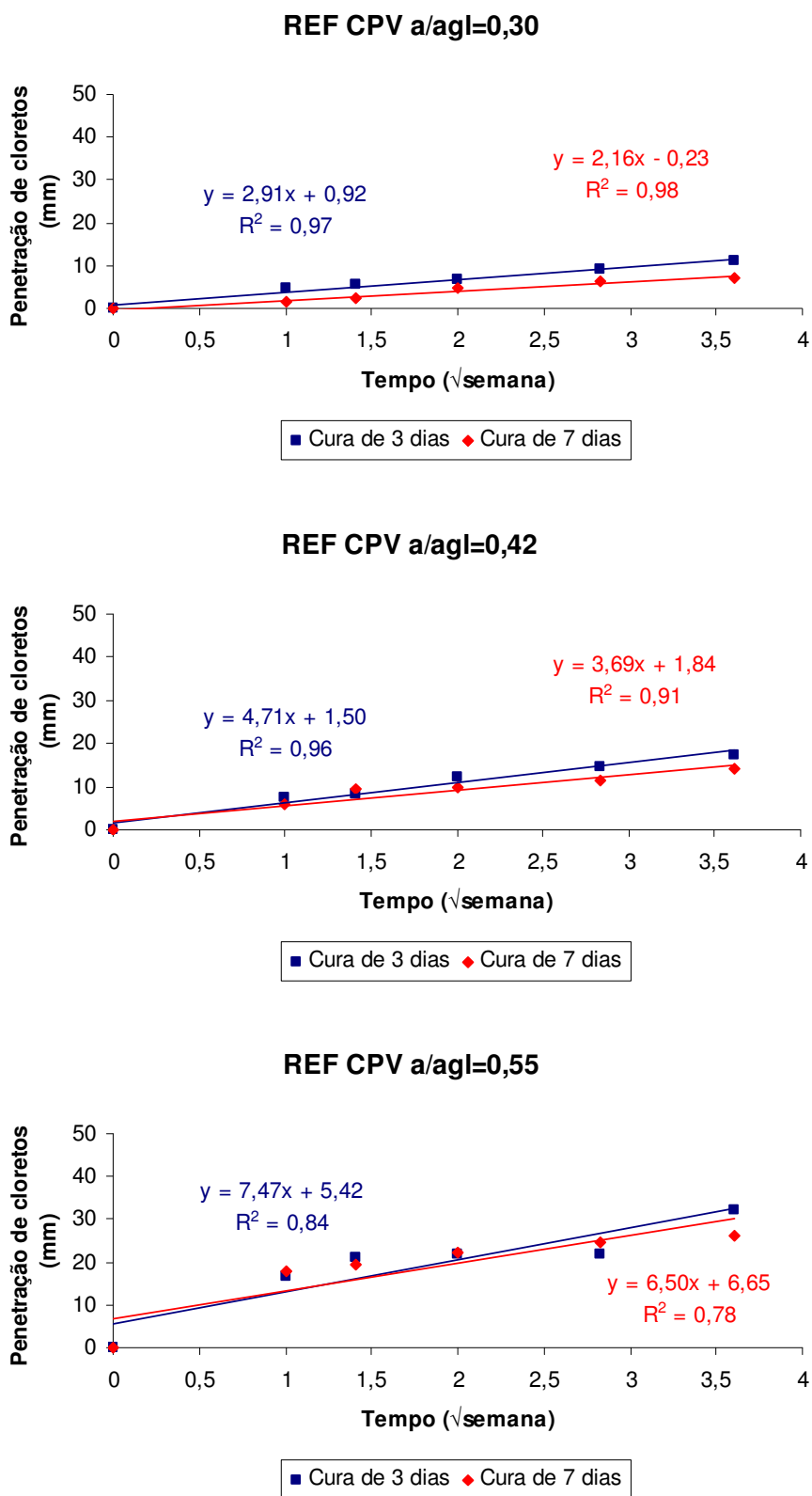
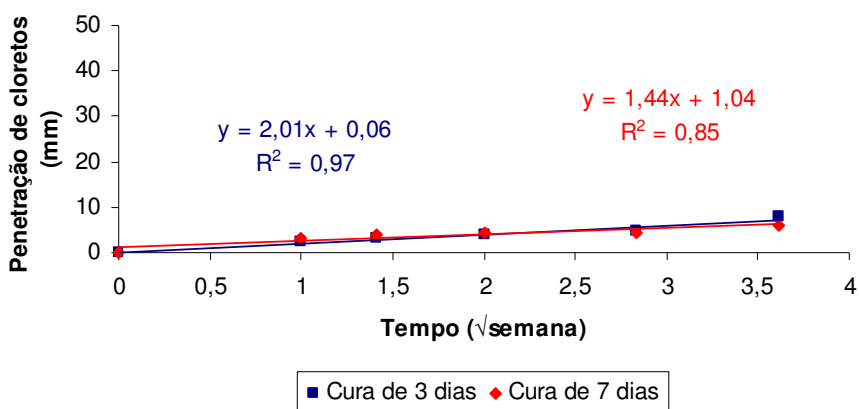
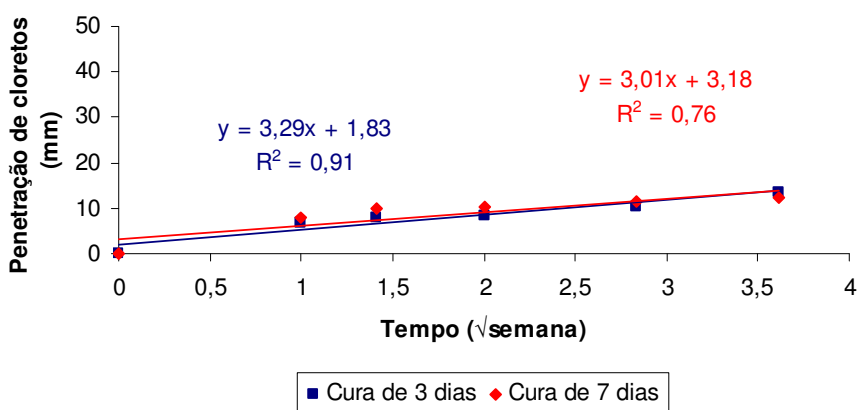


Figura 7.9 – Gráficos para obtenção dos coeficientes k' , mistura REF CPV

50E CPV a/agl=0,30



50E CPV a/agl=0,42



50E CPV a/agl=0,55

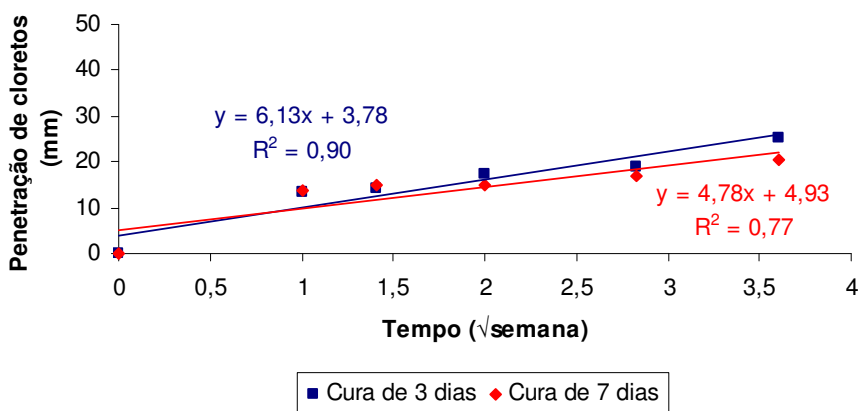


Figura 7.10 – Gráficos para obtenção dos coeficientes k' , mistura 50E CPV

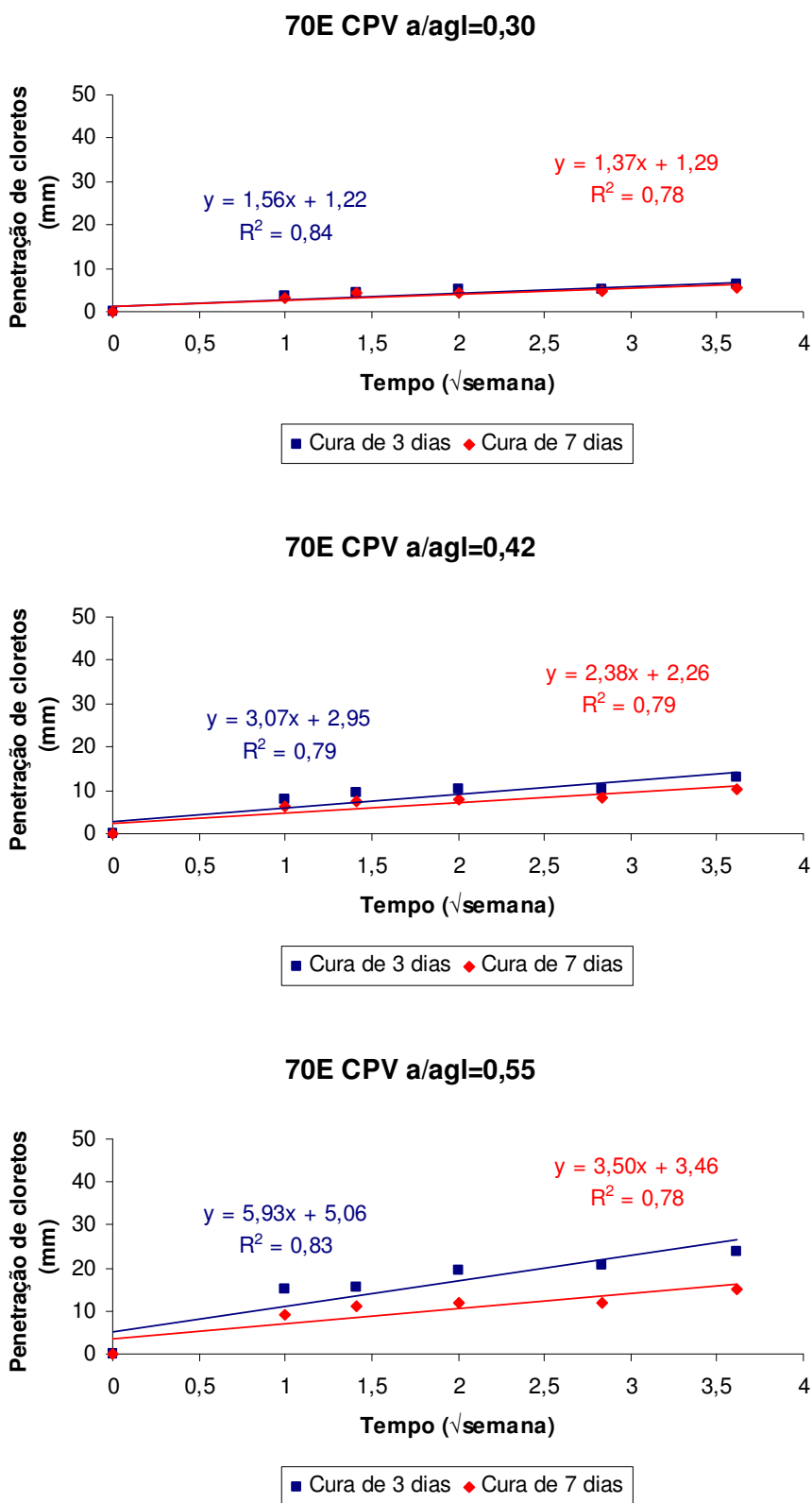


Figura 7.11 – Gráficos para obtenção dos coeficientes k' , mistura 70E CPV

Neste ensaio, sempre que possível, são feitas comparações com os resultados obtidos por Siqueira (2008), cujo estudo faz parte da primeira fase de um projeto que trata da durabilidade de concretos brancos moldados com escória de alto forno em substituição ao cimento Portland branco, realizado pelo GEPECON. O autor pesquisou, dentre outras propriedades, a penetração de cloretos por imersão, fazendo uso das mesmas misturas de concreto branco empregadas nesta pesquisa, comparando três períodos de cura, 3, 7 e 28 dias. Siqueira (2008) submeteu os corpos-de-prova à solução salina assim que foram retirados da cura úmida, diferentemente do presente estudo, no qual os corpos-de-prova foram expostos à cura ao ar por 91 dias após a cura úmida. Outra diferença entre as pesquisas é que os corpos-de-prova no estudo de Siqueira (2008) eram cilindros de Ø 100 mm x 100 mm. Vale ressaltar então que a presente pesquisa faz parte da segunda fase do projeto mencionado anteriormente. Outro estudo que merece destaque e serve como referência para esta pesquisa é o realizado por Wee, Suryavanshi e Tin (2000), no qual foi investigada a penetração de cloretos por imersão em concretos moldados com diferentes teores de escória (30%, 55% e 70%) em substituição ao cimento Portland comum. Os autores avaliaram três prazos de cura úmida, 3, 7 e 28 dias, empregaram a mesma concentração da solução salina, além dos mesmos períodos de imersão do presente estudo.

Na Tabela 7.2 são ilustrados os coeficientes obtidos, a partir dos gráficos das figuras anteriores, em cada mistura investigada.

Tabela 7.2 – Coeficientes de penetração (k')

Mistura	a/agl	k' (mm/ $\sqrt{\text{semana}}$)		Coef. de determinação (R ²)	
		Cura		Cura	
		3 dias	7 dias	3 dias	7 dias
REF CPB	0,30	3,01	2,59	0,80	0,88
	0,42	6,33	5,95	0,87	0,80
	0,55	9,83	8,87	0,75	0,76
REF CPV	0,30	2,91	2,16	0,97	0,98
	0,42	4,71	3,69	0,96	0,91
	0,55	7,47	6,50	0,84	0,78
50E CPB	0,30	2,11	1,57	0,92	0,87
	0,42	3,61	3,13	0,81	0,79
	0,55	6,86	4,90	0,87	0,85
50E CPV	0,30	2,01	1,44	0,97	0,85
	0,42	3,29	3,01	0,91	0,76
	0,55	6,13	4,78	0,90	0,77
70E CPB	0,30	2,06	1,54	0,81	0,75
	0,42	3,42	2,81	0,78	0,78
	0,55	6,44	4,58	0,82	0,77
70E CPV	0,30	1,56	1,37	0,84	0,78
	0,42	3,07	2,38	0,79	0,79
	0,55	5,93	3,50	0,83	0,78
50A CPB	0,30	1,71	1,04	0,80	0,89
	0,42	2,42	2,04	0,81	0,77
	0,55	4,12	3,65	0,80	0,77

A partir da análise da Tabela 7.2 é constatado o benefício da adição de escória quanto à ação dos íons cloretos, uma vez que todas as misturas contendo escória geraram concretos com menores profundidades e coeficientes de penetração de cloretos, comparados ao concreto de referência, em igualdade de cura e relação a/agl, de acordo com Wee, Suryavanshi e Tin (2000) e Siqueira (2008). Este comportamento pode ser justificado pela maior capacidade de fixação dos íons cloretos e de refinamento da estrutura dos poros proporcionados pelo emprego da escória, tanto no concreto branco quanto no cinza. A tendência de redução do coeficiente de penetração de cloretos a partir do emprego de escória, como substituição parcial do cimento Portland no concreto, também foi constatada por Chang e Marosszeky (1997) e McGrath e Hooton (1997).

Comparando-se os concretos branco e cinza entre si, evidenciam-se maiores coeficientes de penetração nas misturas moldadas com CPB, em igualdade de relação a/agl, período de cura e teor de escória. Este comportamento pode ser justificado pelos resultados do ensaio de retração total, a partir dos quais foi constatada maior retração nos concretos brancos.

Analisando a Tabela 7.2, com atenção voltada às alterações dos coeficientes de penetração com a variação da relação a/agl em uma mesma mistura, observam-se diferentes desempenhos entre os concretos com escória e o de referência. Neste, os valores dos coeficientes das diferentes relações a/agl apresentaram grandes variações entre si, enquanto que a adição de escória gerou uma aproximação entre os mesmos, de modo que esta aproximação foi maior com o aumento do teor de escória, em conformidade com o evidenciado por Siqueira (2008). Na mistura 50A foram observadas as maiores aproximações entre os resultados.

A Tabela 7.3 mostra os coeficientes de penetração (k') obtidos no estudo de Siqueira (2008) para os prazos de cura de 3 e 7 dias. Já a Tabela 7.4 apresenta os índices de aumento dos coeficientes devido ao método empregado no presente estudo, comparando-se os coeficientes da Tabela 7.2 para concretos brancos com os coeficientes da Tabela 7.3.

Tabela 7.3 – Coeficientes de penetração (k') da pesquisa de Siqueira (2008)

Mistura	a/agl	k' (mm/ $\sqrt{\text{semana}}$)		Coeficiente (R^2)	
		Cura de		Cura de	
		3 dias	7 dias	3 dias	7 dias
REF CPB	0,30	2,06	1,81	0,99	0,98
	0,42	3,59	2,75	0,97	1,00
	0,55	5,64	4,99	0,96	0,98
50E CPB	0,30	1,14	0,79	0,89	0,87
	0,42	1,70	1,05	0,89	0,88
	0,55	2,26	1,49	0,90	0,92
70E CPB	0,30	0,97	0,82	0,95	0,97
	0,42	1,51	0,99	0,91	0,92
	0,55	1,79	1,40	0,92	0,93
50A CPB	0,30	0,99	0,87	0,95	0,99
	0,42	1,08	1,02	0,90	0,93
	0,55	1,61	1,41	0,89	0,95

Tabela 7.4 – Aumento de k' em função da cura ao ar de 91 dias

Mistura	a/agl	Aumento de k' (%)	
		Cura de	
		3 dias	7 dias
REF CPB	0,30	46,2%	43,4%
	0,42	76,3%	116,3%
	0,55	74,3%	77,7%
50E CPB	0,30	85,1%	98,6%
	0,42	112,6%	198,2%
	0,55	203,6%	228,5%
70E CPB	0,30	112,5%	88,0%
	0,42	126,6%	183,8%
	0,55	259,9%	227,5%
50A CPB	0,30	72,4%	19,4%
	0,42	124,5%	99,8%
	0,55	156,1%	158,7%

A partir da análise da Tabela 7.4 foram observados grandes aumentos nos coeficientes de penetração em todas as misturas, comparados aos evidenciados por Siqueira (2008). Isto pode ser explicado pelo fato de os corpos-de-prova da presente pesquisa terem sido expostos à secagem ao ar durante 91 dias antes de serem colocados na solução salina. Desta forma, eles apresentaram uma retração considerável, a qual lhes proporcionou faces mais porosas e suscetíveis à penetração dos íons cloretos, comparados aos corpos-de-prova de Siqueira (2008), os quais mesmo em solução salina continuaram a hidratar após a cura úmida, obtendo uma estrutura de poros mais densa que os corpos-de-prova do presente estudo, dificultando a difusão dos cloretos. Nota-se também, na Tabela 7.4, que o período de 91 dias de secagem ao ar foi mais prejudicial às misturas compostas por escória não ativadas (50E CPB e 70E CPB), uma vez que concretos com escória em substituição ao cimento Portland apresentam sensibilidade à falta de cura, pois dependem da formação do hidróxido de cálcio para então desenvolverem a reação pozolânica.

Para elucidar mais uma vez a redução do coeficiente de penetração com o aumento do teor de escória empregado em substituição ao cimento Portland, nas Tabelas 7.5 e 7.6 são apresentados os índices de penetração (relação $k'_{\text{mistura}}/k'_{\text{referência}}$) para os concretos moldados com CPB e CPV, respectivamente.

Tabela 7.5 – Índices de penetração (lk') em relação ao concreto REF CPB

Mistura	a/agl	$lk' = k'_{mistura}/k'_{REF}$	
		Cura	
		3 dias	7 dias
REF CPB	0,30	100,0%	100,0%
	0,42	100,0%	100,0%
	0,55	100,0%	100,0%
50E CPB	0,30	70,1%	60,5%
	0,42	57,1%	52,6%
	0,55	69,8%	55,2%
70E CPB	0,30	68,4%	59,4%
	0,42	54,0%	47,2%
	0,55	65,5%	51,7%
50A CPB	0,30	56,7%	40,0%
	0,42	38,3%	34,3%
	0,55	41,9%	41,1%

Tabela 7.6 – Índices de penetração (lk') em relação ao concreto REF CPV

Mistura	a/agl	$lk' = k'_{mistura}/k'_{REF}$	
		Cura	
		3 dias	7 dias
REF CPV	0,30	100,0%	100,0%
	0,42	100,0%	100,0%
	0,55	100,0%	100,0%
50E CPV	0,30	69,0%	66,9%
	0,42	69,8%	81,7%
	0,55	82,0%	73,6%
70E CPV	0,30	53,7%	63,3%
	0,42	65,2%	64,4%
	0,55	79,3%	53,8%

Analisando a Tabela 7.7, observa-se que o aumento do período de cura foi mais eficiente, tanto no concreto branco quanto no cinza, ambos sem ativação, para as misturas 70E com relação a/agl 0.55, causando reduções de 28,8% e 41% no coeficiente de penetração, respectivamente.

Tabela 7.7 – Reduções de penetração com o aumento do prazo de cura

Mistura	a/agl	Redução do coeficiente k'
		Prazos de cura de
		3 para 7 dias
REF CPB	0,30	13,8%
	0,42	6,0%
	0,55	9,8%
REF CPV	0,30	25,9%
	0,42	21,7%
	0,55	13,0%
50E CPB	0,30	25,6%
	0,42	13,4%
	0,55	28,7%
50E CPV	0,30	28,1%
	0,42	8,3%
	0,55	22,0%
70E CPB	0,30	25,2%
	0,42	17,9%
	0,55	28,8%
70E CPV	0,30	12,6%
	0,42	22,6%
	0,55	41,0%
50A CPB	0,30	39,1%
	0,42	15,9%
	0,55	11,5%

Os resultados obtidos na pesquisa de Siqueira (2008) podem ser considerados, para uma situação prática e real, na avaliação da durabilidade de pilares de pontes submersos em água marinha, submetidos ao contato com cloretos logo após a cura. Os resultados verificados no presente estudo mostram a tendência de comportamento de componentes estruturais que tenham sofrido exposição ao ar logo após a cura, apresentando, conseqüentemente, uma certa retração, e podendo, ainda, estarem submetidos à maresia ou em contato direto com a água do mar. Dessa forma, vale recordar que a metodologia empregada no presente estudo teve por objetivo confirmar as tendências observadas por Siqueira (2008) e avaliar a suscetibilidade à penetração de cloretos em concretos que já tenham sido submetidos à retração.

Conforme os resultados obtidos no ensaio de penetração de cloretos por imersão, constata-se que a mistura de melhor desempenho, independentemente do cimento, e sem ativação química, foi a 70E com cura de 7 dias, pois apresentou os menores coeficientes de penetração, uma vez comparados aos das demais misturas, em igualdade de relação a/agl e prazo de cura.

7.3 Análise dos resultados do ensaio de resistência à compressão

Os resultados do ensaio de resistência à compressão axial, em todas as idades de ensaio para todas as misturas, são apresentados na Tabela 7.8.

Como esta pesquisa faz parte da segunda fase de um projeto que trata da durabilidade de concretos brancos, os resultados de resistência à compressão dos concretos brancos foram importados da primeira fase (obtidos com CPB-40 de mesma origem e mesmas características físico-químicas), pois as misturas empregadas em ambas as fases são as mesmas. Já os resultados correspondentes ao concreto cinza foram obtidos no presente estudo.

Tabela 7.8 – Resistências médias obtidas no ensaio de compressão axial

Mistura	a/agl	Resistência à compressão (MPa)			
		Idade (dias)			
		3	7	28	91
REF CPB	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
REF CPV	0,30	53,8	54,0	68,1	71,1
	0,42	36,6	39,9	50,3	59,3
	0,55	26,2	30,5	42,4	45,7
50E CPB	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
50E CPV	0,30	39,9	49,4	60,6	63,8
	0,42	19,6	28,1	40,4	44,7
	0,55	11,8	18,5	33,3	41,3
70E CPB	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
70E CPV	0,30	31,8	42,5	51,3	53,8
	0,42	15,3	24,0	34,1	41,5
	0,55	7,4	11,9	22,4	27,6
50A CPB	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

A partir da análise da Tabela 7.8, verifica-se, para os concretos moldados com ambos os cimentos investigados, redução da resistência à compressão com o aumento do teor de escória em substituição ao cimento Portland. Isto está em conformidade com o evidenciado por Sakai et al. (1992) que, ainda, listaram algumas desvantagens do cimento de escória: demora no desenvolvimento de resistência em baixas temperaturas, necessidade de período de cura relativamente longo, além de progresso da carbonatação mais rápido, uma vez comparado a outros tipos de cimento. Nakamoto e Togawa (1995) estudaram o desenvolvimento da resistência à compressão em concretos com elevados teores de escória em substituição ao cimento Portland (50%, 70%, 75%, 80%, 85%, 90% e 95%) e concluíram que parece ser difícil manter, fazendo uso de altos conteúdos de escória, uma resistência à compressão equivalente àquela do concreto de cimento Portland.

Os pesquisadores constataram, porém, que a resistência dos concretos pode ser aumentada significativamente a partir da utilização de escórias com elevadas finuras.

Lim e Wee (2000) utilizaram escória em substituição ao cimento Portland no concreto, com teores de 30%, 50%, 65% e 80%. Para comparação de resistência à compressão entre os diferentes teores, foi empregada escória de finura Blaine 420 m²/Kg. Os autores observaram, já aos 7 dias de cura, que concretos com 50% e 65% de escória apresentaram resistência pouco maior que a do concreto de cimento Portland comum. Aos 28 dias de cura notaram resistências superiores às do concreto de referência para os teores de 50%, 65% e 80%. E por fim, aos 91 dias, evidenciaram maiores resistências em todos os concretos de escória quando comparados ao concreto de cimento Portland comum, apresentando a mistura com 50% de escória a maior resistência registrada na pesquisa.

Voltando à análise dos resultados do presente estudo, aos 3 dias de cura perceberam-se reduções expressivas de resistência à compressão com o aumento do teor de escória, de maneira pronunciada para a relação a/agl 0.55 em ambos os cimentos empregados. Para que se compreenda quantitativamente o desempenho dos concretos, a partir da adição de escória, com e sem ativador, quanto à resistência à compressão, nas diferentes relações a/agl e idades de ensaio, nas Tabelas 7.9 e 7.10 são apresentados os índices percentuais de obtenção de resistência em relação aos valores evidenciados nos concretos de referência branco e cinza, respectivamente.

Tabela 7.9 – Índices de resistência das misturas em relação ao concreto de referência branco

Mistura	a/agl	fc mistura / fc referência			
		Idade			
		3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
REF CPB	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 CPB	0,30	64,7%	79,4%	84,5%	95,7%
	0,42	48,8%	78,8%	81,1%	82,1%
	0,55	45,1%	62,3%	69,8%	74,4%
70E CPB	0,30	44,2%	76,3%	84,8%	86,5%
	0,42	29,9%	65,7%	76,9%	70,4%
	0,55	25,0%	50,9%	69,3%	74,9%
50A CPB	0,30	77,6%	82,5%	89,2%	85,4%
	0,42	93,3%	110,7%	105,1%	91,6%
	0,55	79,1%	101,4%	95,2%	91,4%

Tabela 7.10 – Índices de resistência das misturas em relação ao concreto de referência cinza

Mistura	a/agl	fc mistura / fc referência			
		Idade			
		3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
REF CPV	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 CPV	0,30	74,2%	91,5%	89,0%	89,7%
	0,42	53,6%	70,4%	80,3%	75,4%
	0,55	45,0%	60,7%	78,5%	90,4%
70E CPV	0,30	59,1%	78,7%	75,3%	75,7%
	0,42	41,8%	60,2%	67,8%	70,0%
	0,55	28,2%	39,0%	52,8%	60,4%

Conforme o constatado nas tabelas anteriores, o emprego de escória no concreto reduziu sua resistência à compressão axial em todas as idades e relações a/agl avaliadas, de modo que os menores índices foram observados em períodos de cura reduzidos, uma vez que a reação pozolânica é lenta e altamente dependente da formação do hidróxido de cálcio. Desta maneira, o melhor desempenho entre os concretos de escória foi o averiguado na mistura 50E, tendo apresentado as

menores perdas de resistência quando comparada à mistura REF. O melhor comportamento observado nos concretos brancos foi o da mistura 50E, aos 91 dias na relação a/agl 0.30, atingindo aproximadamente 96% da resistência do concreto REF correspondente. Já no concreto cinza, na mistura 50E, tanto a relação a/agl 0.30 como a 0.55, aos 91 dias, atingiram aproximadamente 90% da resistência dos seus correspondentes concretos REF.

Conforme o esperado, tanto para o concreto branco quanto para o cinza, o pior desempenho foi evidenciado na mistura 70E, aos 3 dias e relação a/agl de 0.55, obtendo apenas 25% e 28% da resistência desenvolvida pelos seus correspondentes concretos REF branco e cinza, respectivamente.

Uma vez que se use o cimento Portland comum, existe a tendência de que concretos com escória, num teor de aproximadamente 50%, superem a resistência do concreto de referência a partir dos 28 dias, conforme evidenciado por Tazawa, Yonekura e Tanaka (1989) e Brooks, Wainwright e Boukendakji (1992). Em alguns estudos, como o de Lim e Wee (2000), isso já é evidenciado aos 7 dias. Oner e Akyuz (2007) realizaram um estudo experimental focado na otimização do uso da escória frente à resistência à compressão. Para tal empregaram cimento Portland comum e escória (2.87 g/cm^3 e $4250 \text{ cm}^2/\text{g}$). Os teores de escória avaliados em substituição ao cimento foram de 0%, 15%, 30%, 50%, 70%, 90% e 110%. Para cada mistura foram empregados seis cubos de aresta 15 cm na determinação da resistência, investigada para as idades de cura de 7, 14, 28, 63, 119, 180 e 365 dias. Os autores notaram que a resistência à compressão do concreto de escória cresce com o aumento do seu teor até um certo ponto, depois do qual a resistência diminui. Constataram que o teor ótimo de escória na maximização da resistência está na faixa entre 55% e 59% do total de material aglomerante. Desta forma, os autores concluíram que após essa faixa de teores, a adição de escória não melhora a resistência à compressão, pois não consegue reagir quimicamente e acaba agindo apenas como um filer na pasta.

Levando-se em consideração o concreto de escória com ativador (50A), moldado apenas com cimento branco, observa-se grande melhora de desempenho principalmente até os 28 dias, de modo que apresentou, em praticamente todas as idades e relações a/agl, maiores resistências quando comparado ao concreto 50E. Essa melhora foi ainda mais perceptível na relação a/agl 0.42, aos 7 dias e 28 dias, e na relação a/agl 0.55 aos 7 dias, pois nestas misturas o concreto 50A superou a

resistência das misturas de referência correspondentes. Este benefício, gerado a partir do uso do concreto 50A, ocorre porque as adições alcalinas ativam os materiais acelerando as reações pozolânicas, proporcionando um desenvolvimento de resistência mais rápido. Para comprovar este comportamento pode ser mencionado o trabalho de Rosa (2005), um estudo realizado no GEPECON, no qual se empregou concreto com escória, em um teor de 50% e ativada por sulfato de sódio (4% em massa de aglomerante), tendo sido verificado maiores resistências ao compará-lo com o concreto correspondente sem ativação e em igualdade de cura e relações a/agl (0.35, 0.50 e 0.65). Ao comparar o concreto de escória ativada com o de referência (100% de CPV como aglomerante), o autor constatou resistências similares e até pouco superiores às do REF a partir da cura de 7 dias.

Comparando-se as misturas de referência branca e cinza entre si, evidenciam-se no concreto cinza, de maneira geral, valores de resistência à compressão ligeiramente superiores. Este comportamento também foi observado por Kirchheim (2003) e Silva et al. (2005), que avaliaram os desempenhos de mais de um tipo de cimento branco estrutural em comparação ao CPV-ARI.

8 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa teve por objetivo avaliar a influência da utilização de escória de alto forno em substituição ao CPB-40 e ao CPV-ARI, em propriedades como a retração total, penetração de cloretos por imersão e resistência à compressão axial de concretos curados durante dois prazos de cura, 3 e 7 dias. Os teores de escória investigados foram de 0%, 50% e 70%. Além das comparações entre os teores de escória e entre os prazos de cura, foram comparados também entre si os desempenhos dos cimentos utilizados.

Foi constatada redução de resistência à compressão axial, a partir do emprego de escória. Os menores valores de resistência foram evidenciados na mistura 70E, na qual se observaram, aos 3 e 7 dias, as reduções mais expressivas. Isso se deve ao fato de que a reação pozolânica é lenta e depende da formação de hidróxido de cálcio para formar produtos resistentes.

O emprego de ativador químico mostrou-se vantajoso para atenuar a queda de resistência no concreto com 50% de escória em substituição ao cimento Portland. Este artifício resultou em incremento acentuado de resistência nas idades iniciais, uma vez que, aos 3 dias, em comparação ao concreto 50E, foram verificadas resistências 20%, 91% e 75% superiores nas relações a/agl 0.30, 0.42 e 0.55, respectivamente. Em alguns casos, o concreto com escória ativada superou, inclusive, as resistências do concreto de referência.

Ao comparar os concretos de referência branco e cinza entre si, observaram-se resistências pouco maiores por parte do cinza, conforme evidenciado em outras pesquisas. A constatação de queda de resistência com o aumento do conteúdo de escória no concreto vale, de acordo com outros estudos, para teores a partir de 50%.

Diferentemente daquilo que se constatou no ensaio de resistência à compressão, o emprego de escória no concreto resultou em efeitos benéficos, tanto na retração total quanto na resistência à penetração de cloretos. Em ambas as propriedades, o aumento do teor de escória proporcionou melhores desempenhos, em igualdade de relação a/agl e período de cura.

Na retração foram observados maiores valores no concreto branco, comparado ao cinza, inclusive nas misturas compostas com escória, em igualdade

de cura e relação a/agl . De maneira geral, independente do cimento empregado, embora tenham sido observados valores de retração pouco maiores para a cura de 3 dias, não foi constatada variação pronunciada entre os prazos de cura, caracterizando assim, comportamentos similares. Estas constatações reforçam a teoria da tensão capilar, a qual se processa durante a exposição ao ar ocasionando ou não retração, o que depende da distribuição dos tamanhos dos poros e também da quantidade de água evaporável. Estas, por sua vez, são influenciadas pelo grau de hidratação do material aglomerante.

Com relação ao ensaio de penetração de cloretos por imersão, observou-se que o uso de escória juntamente com o cimento Portland favoreceu a resistência à penetração, que aumentou com o acréscimo do teor de escória, ratificando tal efeito já verificado em outros estudos. No que tange os prazos de cura, perceberam-se maiores coeficientes de penetração nos concretos curados durante 3 dias, comportamento também observado em outras pesquisas.

A utilização de ativador no concreto gerou reduções satisfatórias dos coeficientes de penetração, pois a mistura 50A foi a que apresentou os menores valores. Pelo fato de as amostras terem sido submetidas a um período de exposição ao ar de 91 dias antes da imersão em solução salina, elas já haviam sofrido a maior parte da retração registrada, de modo que foram constatadas profundidades de penetração de cloretos bastante elevadas. Sendo assim, o objetivo desta metodologia foi de avaliar as profundidades de penetração de cloretos em concretos com um considerado grau de retração, além de confirmar as tendências verificadas por Siqueira (2008) em estudo precedente.

Embora não tenha sido verificada redução expressiva de retração com o aumento do prazo de cura, na penetração de cloretos o concreto de melhor desempenho foi aquele curado durante o maior período, 7 dias. Isto ocorreu porque, além do volume total de poros, distribuição de seus tamanhos e sua interconexão, na retração hidráulica o que mais influencia sua magnitude é a quantidade de água evaporada através dos mesoporos.

Visando a obtenção de elevados desempenhos nas idades iniciais, recomenda-se o emprego da escória de alto forno ativada quimicamente, uma vez que os agregados não sejam reativos.

Comparando-se os diferentes teores de escória entre si, e ainda, os dois prazos de cura, de acordo com os desempenhos constatados nos ensaios

realizados, conclui-se que a mistura de melhor desempenho, quanto à durabilidade, é a 50E, cura de 7 dias, pois apresentou resistência à penetração de cloretos e retração praticamente similares às da mistura 70E, além de ter gerado resistências à compressão superiores, quando comparadas as misturas entre si.

De acordo com este estudo, comprovou-se mais uma vez a eficiência do emprego de escória de alto forno em substituição ao cimento Portland, frente à retração total e às resistências à compressão axial e à penetração de íons cloretos. Além disso, concluiu-se que o uso da escória se apresenta como um importante contribuinte na busca pela sustentabilidade e preservação do meio ambiente por parte da indústria da construção civil.

8.1 Sugestões para pesquisas futuras

Este trabalho iniciou a segunda fase de estudos que tratam da durabilidade de concretos moldados com escória de alto forno em substituição ao cimento Portland branco, realizados pelo GEPECON/UFSM. As pesquisas realizadas na primeira fase abrangeram a absorção capilar, a carbonatação, a resistividade elétrica e a penetração de íons cloretos. A seguir são mencionadas sugestões para futuros trabalhos relacionados aos mesmos concretos já investigados:

- Realização dos ensaios em igualdades de resistência mecânica;
- Resistência a sulfatos;
- Permeabilidade ao oxigênio;
- Estrutura da pasta: MEV, DR. X, TG e Porosimetria de mercúrio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, C. A. **Concreto de cimento Portland branco estrutural: Análise da adição de pigmentos quanto à resistência à compressão.** 2006. 88p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

ALDRED, J. M.; LEE, S. N. Factors affecting the autogenous shrinkage of ground granulated blast-furnace slag cement concrete. In: Malhotra, V. M. (ed) Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. CANMET/ACI International Conference, 8th, Las Vegas, 2004. **Proceedings**. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2004, p. 783-796 (SP-221).

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI Committee 233:** Ground granulated blast-furnace slag as a cementitious constituent in concrete, 1995.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI Committee 209:** Report on factors affecting shrinkage and creep of hardened concrete, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 109/C109M – 08:** Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in. or [50-mm] cube specimens), 2008.

_____. **ASTM C 157/C 157M – 06:** Standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete, 2006.

_____. **ASTM C 490 – 04:** Standard practice for use of apparatus for the determination of length change of hardened cement paste, mortar and concrete, 2004.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5732:** Cimento Portland comum. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5733.** Cimento Portland de alta resistência inicial. 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. 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 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 75 micrômetros (número 200). Rio de Janeiro, 1991.

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

_____. **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, 2004.

_____. **NBR NM 11-2**. Cimento Portland - Análise química - Método optativo para determinação de óxidos principais por complexometria - Parte 2: Método ABNT. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **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, 2002.

_____. **NBR NM 45.** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **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.

ATIS, C. D.; BILIM, C.; ÇELIK, Ö.; KARAHAN, O. Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 1, p. 548-555, 2009.

BAKHAREV, T.; SANJAYAN, J. G.; CHENG, Y. B. Alkali activation of Australian slag cements. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 1, p. 113-120, 1999 A.

BAKHAREV, T.; SANJAYAN, J. G.; CHENG, Y. B. Effect of elevated temperature curing on properties of alkali-activated slag concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 10, p. 1619-1625, 1999 B.

BAKHAREV, T.; SANJAYAN, J. G.; CHENG, Y. B. Effect of admixtures on properties of alkali-activated slag concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 1367-1374, 2000.

BAKKER, R. F. M. **Corrosion of Steel in Concrete**. Chapter 3: Initiation Period. RILEM Report of the Technical Committee 60-CSC, Editor Peter Schiessl. Chapman and Hall, London, 1988.

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

BROOKS, J. J.; WAINWRIGHT, P. J.; BOUKENDAKJI, M. Influence of slag type and replacement level on strength, elasticity, shrinkage and creep of concrete. In: Malhotra, V. M. (ed) Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. ACI International Conference, 4th, Istanbul, 1992. **Proceedings**. Detroit: American Concrete Institute, 1992, 2v, v. 2, p. 1325-1342 (SP-132).

BRUNAUER, S. **New approaches to pore structure analysis**. Chemical Engineering Progress Symposium Series. New York: American Institute of Chemical Engineers, 1969, v. 65, n. 96, p. 1-10.

CHANG, Z. T.; MAROSSZEKY, M. Chloride penetration and water absorption into P. C., fly ash and slag concrete under different curing conditions. In: Malhotra, V. M. (ed) Durability of Concrete. CANMET/ACI International Conference, 4th, Sydney, 1997. **Proceedings**. Farmington Hills: American Concrete Institute, 1997, 2v, v. 1, p. 349-362 (SP-170).

CHANG, J. J.; YEIH, W.; HUNG, C. C. Effects of gypsum and phosphoric acid on the properties of sodium silicate-based alkali-activated slag pastes. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 1, p. 85-91, 2005.

CHERN, J. C.; CHAN, Y. W. Effect of temperature and humidity conditions on the strength of blast furnace slag cement concrete. In: Malhotra, V. M. (ed) Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. ACI International Conference, 3rd, Trondheim, 1989. **Proceedings**. Detroit: American Concrete Institute, 1989, 2v, v. 2, p. 1377-1397 (SP-114).

COELHO, M. M. **Contribuição ao estudo da carbonatação e retração em concretos com elevados teores de escória de alto-forno**. 2002. 203p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2002.

COLLINS, F.; SANJAYAN, J. G. Effect of pore size distribution on drying shrinkage of alkali-activated slag concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 9, p. 1401-1406, 2000.

COLLINS, F.; SANJAYAN, J. G. Microcracking and strength development of alkali-activated slag concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 23, p. 345-352, 2001.

FU-SHENG, W.; RUI-LIAN, S.; YING-JING, C. Study on modification of the high-strength slag cement material. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 7, p. 1344-1348, 2005.

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

HAUSMANN, D. A. Steel corrosion in concrete: How does it occur? **Materials Protection**, v. 6, n. 11, p. 19-23, 1967.

HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. 1.ed. São Paulo: Pini, 1986.

HOUK, I. E.; BORGE, O. E.; HOUGHTON, D. L. Studies of autogenous volume change in concrete for Dworshak Dam. **ACI Journal**, v. 66, n.7, p. 560-568, 1969.

HOUST, Y. F. Influence of moisture on carbonation shrinkage kinetics of hydrated cement paste. In: Bazant, Z. P. and Carol, I. (eds) Creep and shrinkage of concrete. RILEM International Symposium, 5th, Barcelona, 1993. **Proceedings**. London: E e FN SPON, 1993, p. 121-126.

INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY (IUPAC). **Manual of symbols and terminology for physicochemical quantities and units**, section 1, definitions and terminology, IUPAC Council, Editor D. H. Everett, Washington, 1971.

JIANYONG, L.; YAN, Y. A study on creep and drying shrinkage of high performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 1203-1206, 2001.

KIRCHHEIM, A. P. **Concreto de cimento Portland branco estrutural: Avaliação da carbonatação e absorção capilar**. 2003. 168 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

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.

LIM, S. N.; WEE, T. H. Autogenous shrinkage of ground-granulated blast-furnace slag concrete. **ACI Materials Journal**, v. 97, n. 5, p. 587-593, 2000.

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

MALHOTRA, V. M. Properties of fresh and hardened concrete incorporating ground granulated blast-furnace slag. In: Malhotra, V. M. (ed) *Supplementary Cementing Materials for Concrete*. **Proceedings**. Ottawa: Canadian Government Publishing Centre, 1987, p. 291-333.

MANGAT, P. S.; EL-KHATIB, J. M. Influence of initial curing on pore structure and porosity of blended cement concretes. In: Malhotra, V. M. (ed) *Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*. ACI International Conference, 4th, Istanbul, 1992. **Proceedings**. Detroit: American Concrete Institute, 1992, 2v, v. 1, p. 813-833 (SP-132).

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 absorvidade de concretos com diferentes relações água/cimento**. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 45^o, Vitória, 2003. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2003.

MCGRATH, P. F.; HOOTON, R. D. Influence of binder composition on chloride penetration resistance of concrete. In: Malhotra, V. M. (ed) *Durability of Concrete*. CANMET/ACI International Conference, 4th, Sydney, 1997. **Proceedings**. Farmington Hills: American Concrete Institute, 1997, 2v, v. 1, p. 331-347 (SP-170).

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 2008.

MÜLLER, H. S.; PRISTL, M. Creep and shrinkage of concrete at variable ambient conditions. In: Bazant, Z. P. and Carol, I. (eds) *Creep and shrinkage of concrete*. RILEM International Symposium, 5th, Barcelona, 1993. **Proceedings**. London: E e FN SPON, 1993, p. 15-26.

MUN, K. J.; SO, S. Y.; SOH, Y.S. The effect of slaked lime, anhydrous gypsum and limestone powder on properties of blast furnace slag cement mortar and concrete. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 7, p. 1576-1582, 2007.

NAKAMOTO, J.; TOGAWA, K. A study of strength development and carbonation of concrete incorporating high volume blast furnace slag. In: Malhotra, V. M. (ed) Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. ACI International Conference, 5th, Milwaukee, 1995. **Proceedings**. Detroit: American Concrete Institute, 1995, 2v, v. 2, p. 1121-1139 (SP-153).

NAKAMURA, N.; SAKAI, M.; KOIBUCHI, K.; IJIMA, Y. Properties of high-strength concrete incorporating very finely ground granulated blast furnace slag. In: Malhotra, V. M. (ed) High-Strength Concrete. ACI International Conference, 2nd, Madrid, 1986. **Proceedings**. Detroit: American Concrete Institute, 1986, 2v, v. 2, p. 1361-1380 (SP-91).

NETO, A. A. M. **Estudo da retração em argamassa com cimento de escória ativada**. 2002. 179p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução: Engenheiro Salvador E. Giammusso. 2.ed. São Paulo: Pini, 1997.

ONER, A.; 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 hardened cementitious matrix materials. **ACI Materials Journal**, v. 89, n. 6, p. 587-592, 1992.

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.

PATEL, R. G.; KILLOH, D. C.; PARROTT, L. J.; GUTTERIDGE, W. A. Influence of curing at different relative humidities upon compound reactions and porosity in Portland cement paste. **Materials and Structures**, v. 21, n. 123, p. 192-197, 1988.

PERENCHIO, W. F. The drying shrinkage dilemma. **Concrete Construction**, v. 42, n. 4, p. 379-383, 1997.

POWERS, T. C. A discussion of cement hydration in relation to the curing of concrete. In: 27th Annual Meeting of the Highway Research Board. **Proceedings**. Washington, 1947, p. 178-188.

QUAGLIANO, J. V.; VALLARINO, L. M. **Química**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1985.

ROPER, H. R. The influence of cement composition and fineness on concrete shrinkage, tensile creep and cracking tendency. In: Morgan, D. R. (ed) Australian Conference on Engineering Materials, 1st, Sidney, 1974. **Proceedings**. Sidney: University of New South Wales. 1974.

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.

ROY, D. M. The effect of blast furnace slag and related materials on the hydration and durability of concrete. In: Holm, J. and Geiker, M. (eds) Durability of Concrete. G. M. Idorn International Symposium, Toronto, 1990. **Proceedings**. Detroit: American Concrete Institute, 1992, p. 195-208 (SP-131).

SAKAI, K.; WATANABE, H.; SUZUKI, M.; HAMAZAKI, K. Properties of granulated blast-furnace slag cement concrete. In: Malhotra, V. M. (ed) Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. ACI International Conference, 4th, Istanbul, 1992. **Proceedings**. Detroit: American Concrete Institute, 1992, 2v, v. 2, p. 1367-1383 (SP-132).

SHIDELER, J. J. Lightweight aggregate concrete for structural use. **ACI Journal**, v. 54, n.10, p. 299-328, 1957.

SHOYA, M. Drying shrinkage and moisture loss of superplasticizer admixed concrete of low water cement ratio. Transactions of the Japan concrete institute, II – 5, p. 103-110, 1979.

SILVA, L. B.; VENQUIARUTO, S.; DAL MOLIN, D. C.; ABREU, A. G. **Estudo da absorção capilar em concretos brancos**. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 47°, Recife, 2005. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2005.

SILVA FILHO, L. C. P.; DAL MOLIN, D. C. C.; KIRCHHEIM, A. P.; PASSUELO, A.; PASA, V. F. **Uso do concreto branco estrutural: Museu Iberê Camargo**. In: 2º Seminário de Patologia das Edificações. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

SIQUEIRA, H. C. **Penetração de cloretos em concretos compostos com cimento Portland branco e escória de alto forno, ativados quimicamente**. 2008. 141p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

SIVASUNDARAM, V.; MALHOTRA, V. M. Properties of concrete incorporating low quantity of cement and high volumes of ground granulated slag. **ACI Materials Journal**, v. 89, n. 6, p. 554-563, 1992.

SMOLCZYK, H. G. The effect of the chemistry of slag on the strength of blast-furnace cements. **Zement-Kalk-Gips**, v. 31, n. 6, p. 294-296, 1978.

SPERB, J. E. K. **Carbonatação e absorção capilar de concretos com adições minerais e ativadores químicos**. 2003. 121p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

SUZUKI, K.; OHNO, Y.; NAKAGAWA, T. Test method for cracking of concrete due to drying shrinkage. In: Bazant, Z. P. and Carol, I. (eds) Creep and shrinkage of concrete. RILEM International Symposium, 5th, Barcelona, 1993. **Proceedings**. London: E e FN SPON, 1993, p. 63 -70.

SWAMY, R. N.; LAIW, J. C. Effectiveness of supplementary cementing materials in controlling chloride penetration into concrete. In: Malhotra, V. M. (ed) Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. ACI International Conference, 5th, Milwaukee, 1995. **Proceedings**. Detroit: American Concrete Institute, 1995, 2v, v. 2, p. 657-674 (SP-153).

SWENSON, E. G.; SEREDA, P. J. Mechanism of the carbonation shrinkage of lime and hydrated cement. **Journal of Applied Chemistry**, v. 18, n. 4, 111-117, 1968.

TAZAWA, E.; YONEKURA, A.; TANAKA, S. Drying shrinkage and creep of concrete containing granulated blast furnace slag. In: Malhotra, V. M. (ed) Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. ACI International Conference, 3rd, Trondheim, 1989. **Proceedings**. Detroit: American Concrete Institute, 1989, 2v, v. 2, p. 1325-1343 (SP-114).

TORRENTI, J. M.; ACKER, P.; BOULAY, C.; LEJEUNE, D. Contraintes initiales dans le béton. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, 158, p. 39-44, nov-déc, 1988.

UCHIKAWA, H.; HANEHARA, S.; HIRAO, H. Influence of structural and humidity changes at the inner part of hardened cement paste on autogenous shrinkage. In: Malhotra, V. M. (ed) Durability of Concrete. CANMET/ACI International Conference, 4th, Sydney, 1997. **Proceedings**. Farmington Hills: American Concrete Institute, 1997, 2v, v. 2, p. 949-964 (SP-170).

VIEIRA, G. L.; DAL MOLIN, D. C. **Concretos produzidos com cimentos Portland branco e cinza: Avaliação da resistividade elétrica**. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 47^o, Recife, 2005. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2005.

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, 2000.

WITTMANN, F. H. **Creep and shrinkage mechanisms**. In: Z.P. Bazant, F.H. Wittmann (Eds.). Creep and shrinkage in concrete structures, p.129-161, Wiley, Chichester, 1982.

YOUNG, J. F. **Physical mechanisms and their mathematical descriptions**. In: Z.P. Bazant (Ed.). Mathematical modeling of creep and shrinkage of concrete, p. 63-98, Wiley, Chichester, 1988.

ZHANG, M. H.; BILODEAU, A.; MALHOTRA, V. M.; KIM, K. S.; KIM, J.C. Concrete incorporating supplementary cementing materials: effect on compressive strength and resistance to chloride-ion penetration. **ACI Materials Journal**, v. 96, n. 2, p. 181-189, 1999.

ZIA, P.; AHMAD, S.; LEMING, M. **High-performance concretes: a state-of-art**. Report (1989-1994) FHWA-RD-97-030, Federal Highway Administration, Department of Transportation, Washington, 1997.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Retração total média nas idades de ensaio, para todas as misturas, cura de 3 dias.

Cura 3D Mistura	a/agl	Retração total ($\times 10^{-6}$ mm/mm) nas idades (dias) de secagem ao ar							
		7	14	21	28	35	56	91	182
REF CPB	0,30	455	527	581	633	719	747	757	774
	0,42	386	450	498	540	639	658	681	724
	0,55	366	426	477	534	641	679	701	778
REF CPV	0,30	247	301	328	344	361	461	487	490
	0,42	256	315	345	368	401	483	497	572
	0,55	239	284	317	345	390	476	508	568
50E CPB	0,30	355	424	448	463	476	521	547	594
	0,42	281	327	370	402	416	477	498	572
	0,55	204	250	296	329	353	417	449	536
50E CPV	0,30	336	399	428	448	467	489	516	594
	0,42	278	337	364	378	392	433	484	566
	0,55	253	293	319	342	361	442	494	520
70E CPB	0,30	135	197	272	289	304	323	395	472
	0,42	66	138	218	245	266	299	388	474
	0,55	30	76	177	207	230	277	364	466
70E CPV	0,30	147	236	269	292	308	367	405	462
	0,42	163	262	302	333	351	440	510	558
	0,55	189	319	372	407	440	500	563	656
50A CPB	0,30	132	220	265	317	323	365	464	480
	0,42	133	235	296	347	371	440	536	562
	0,55	59	153	174	246	266	333	459	464

APÊNDICE B – Retração total média nas idades de ensaio, para todas as misturas, cura de 7 dias.

Cura 7D Mistura	a/agl	Retração total ($\times 10^{-6}$ mm/mm) nas idades (dias) de secagem ao ar							
		7	14	21	28	35	56	91	182
REF CPB	0,30	336	389	433	460	509	540	609	612
	0,42	321	373	419	434	501	589	639	680
	0,55	328	385	429	459	505	591	631	706
REF CPV	0,30	294	353	379	401	421	446	523	538
	0,42	327	407	440	471	496	530	616	660
	0,55	245	297	391	429	438	448	477	550
50E CPB	0,30	204	268	305	341	364	421	425	506
	0,42	209	259	321	366	398	453	491	560
	0,55	168	217	253	294	337	406	433	576
50E CPV	0,30	239	283	316	349	399	409	472	472
	0,42	257	309	344	383	446	483	549	558
	0,55	221	270	304	340	395	428	511	516
70E CPB	0,30	149	179	253	264	284	321	331	404
	0,42	79	105	173	213	219	309	344	544
	0,55	49	87	110	119	131	201	236	402
70E CPV	0,30	152	221	261	277	293	321	367	488
	0,42	118	181	200	214	224	281	332	492
	0,55	137	209	237	250	265	314	364	574
50A CPB	0,30	163	215	268	329	345	408	471	488
	0,42	101	185	287	373	475	569	660	672
	0,55	37	79	108	175	193	272	385	398

APÊNDICE C – Profundidades de penetração de cloretos para os concretos moldados com CPB.

Mistura	a/agl	Profundidade de penetração (mm)				
		Tempo em solução salina				
		7 dias	14 dias	28 dias	56 dias	91 dias
REF CPB 3D	0,30	7,98	8,82	10,03	10,36	12,64
	0,42	13,57	17,51	18,10	22,44	24,85
	0,55	28,11	32,03	33,26	37,63	40,70
REF CPB 7D	0,30	5,80	5,93	7,67	9,31	9,93
	0,42	14,51	18,65	19,25	20,50	24,72
	0,55	24,72	27,04	31,69	34,20	35,70
50E CPB 3D	0,30	3,84	4,65	5,84	6,10	8,52
	0,42	8,06	11,11	12,01	12,86	14,37
	0,55	15,41	16,90	21,50	24,52	26,48
50E CPB 7D	0,30	2,94	4,36	4,58	4,91	6,34
	0,42	8,01	9,92	9,98	11,70	12,70
	0,55	11,20	12,86	15,80	16,18	19,86
70E CPB 3D	0,30	5,03	6,38	6,40	7,34	8,44
	0,42	8,72	10,74	11,67	12,29	14,04
	0,55	16,11	18,20	21,36	23,34	25,81
70E CPB 7D	0,30	4,10	5,17	5,36	5,43	6,53
	0,42	6,17	8,90	9,99	10,13	11,04
	0,55	11,63	15,28	15,38	16,50	19,00
50A CPB 3D	0,30	4,55	5,10	5,47	6,00	7,15
	0,42	6,26	7,38	7,41	8,36	10,23
	0,55	11,16	12,43	12,87	14,69	17,30
50A CPB 7D	0,30	2,30	2,66	2,77	3,53	4,17
	0,42	5,65	6,50	6,87	7,28	8,63
	0,55	9,63	11,88	12,29	12,62	15,51

APÊNDICE D – Profundidades de penetração de cloretos para os concretos moldados com CPV.

Mistura	a/agl	Profundidade de penetração (mm)				
		Tempo em solução salina				
		7 dias	14 dias	28 dias	56 dias	91 dias
REF CPV 3D	0,30	4,93	5,40	6,62	8,98	11,19
	0,42	7,45	8,08	12,40	14,71	17,45
	0,55	16,63	21,02	21,81	21,92	32,22
REF CPV 7D	0,30	1,50	2,40	4,67	6,15	7,28
	0,42	5,73	9,53	9,93	11,58	14,27
	0,55	18,01	19,33	22,06	24,72	26,32
50E CPV 3D	0,30	2,33	3,09	3,92	4,89	7,90
	0,42	6,82	7,88	8,15	10,47	13,35
	0,55	13,48	14,19	17,32	19,02	25,16
50E CPV 7D	0,30	3,32	3,84	4,21	4,39	6,14
	0,42	7,94	9,76	10,51	11,32	12,25
	0,55	13,83	14,96	15,07	17,12	20,52
70E CPV 3D	0,30	3,42	4,41	4,94	5,07	6,40
	0,42	7,93	9,58	10,14	10,29	13,09
	0,55	14,90	15,52	19,54	20,75	23,93
70E CPV 7D	0,30	3,24	4,46	4,53	4,65	5,69
	0,42	6,11	7,37	7,73	8,11	10,04
	0,55	9,18	11,04	11,72	11,88	14,90