

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

**PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS
COM ESCÓRIA DE ALTO FORNO E ATIVADOR
QUÍMICO SUBMETIDOS A DIFERENTES PERÍODOS
DE CURA : AVALIAÇÃO ASTM C1202 X IMERSÃO
EM SOLUÇÃO SALINA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Jonas André Schneider

Santa Maria, RS, Brasil

2005

**PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS
COM ESCÓRIA DE ALTO FORNO E ATIVADOR
QUÍMICO SUBMETIDOS A DIFERENTES PERÍODOS
DE CURA: AVALIAÇÃO ASTM C1202 X IMERSÃO EM
SOLUÇÃO SALINA**

por

Jonas André Schneider

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

Orientador: Prof. Antônio Luiz Guerra Gastaldini

**Santa Maria, RS, Brasil
2005**

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

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

**PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS COM ESCÓRIA DE
ALTO FORNO E ATIVADOR QUÍMICO SUBMETIDOS A DIFERENTES
PERÍODOS DE CURA : AVALIAÇÃO ASTM C1202 X IMERSÃO EM
SOLUÇÃO SALINA**

elaborada por
Jonas André Schneider

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

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Antônio Luiz Guerra Gastaldini - UFSC
(Presidente/Orientador)

Prof. Dr. Geraldo Cechella Isaia - UFSC

Prof. Dr. Wellington L. Repette - UFSC

Santa Maria, 20 de dezembro de 2005.

*Aos meus pais, Darcísio e Celita,
aos meus irmãos, Estêvão e Stefânia, e
à Lutiane,
por estarem sempre presentes.*

AGRADECIMENTOS

Ao prof. *Antônio Luiz Guerra Gastaldini*, pela orientação, amizade e confiança desde os tempos de graduação e por conduzir com integridade, ética e responsabilidade o exercício da docência.

Ao prof. *Geraldo Cechella Isaia*, pela clareza e segurança com que repassa seu vasto conhecimento sobre o assunto e pela coragem em abordar temas diferenciados no meio científico.

Ao inestimável grupo de colegas de Pós-Graduação, *Cássio Rubin dos Santos, Dalton Wegner da Rosa, Felipe Clauss Rauber, Giovanni Rubin, Gustavo Cantarelli, Minéia Johann Scherer, Rodrigo Brizola, Tiago Fernandes Hoppe e Willian Vidmar Cadore*, pela amizade e pelas enriquecedoras discussões.

Aos amigos bolsistas de iniciação científica, *André Lübeck, Éder Pedroso, Henrique Carvalho Siqueira, Irineu Dalla Corte Filho, Leonardo Felipe dos Santos Tombesi, Rafael Dallacort*, pela contribuição de idéias e pelo empenho e companheirismo nos momentos de árduas tarefas laboratoriais.

Ao Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC–UFSM), pelo empréstimo de seus equipamentos e pela contribuição de seus funcionários. Cabe, ainda, ressaltar o apoio do amigo *Emerson Martins Wagner*.

À UFSM e ao PPGEC que, pela força de seu patrimônio humano, mantêm seu nível de excelência em ensino, pesquisa e extensão, mesmo em momento prolongado de falta de reconhecimento por parte do governo.

Às empresas Cimento Mizu e MBT, pelos materiais cedidos.

A Deus, por, além de tudo, oferecer uma natureza tão extraordinária e instigante.

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPQ – Brasil, da CAPES, da FAPERGS e do FIPE.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1	Representação da corrosão eletroquímica no concreto armado	6
FIGURA 1.2	Corrosão em estruturas executadas com aditivo com cloretos	10
FIGURA 1.3	Corrosão em estruturas pré-moldadas	10
FIGURA 1.4	Ensaio de penetração de cloretos - AASHTO T259	13
FIGURA 1.5	Ensaio de Penetração de cloretos - NT Build 443	14
FIGURA 1.6	Quantidade de cloretos totais e cloretos livres em pastas, argamassas e concretos, em relação à massa de cimento	15
FIGURA 1.7	Movimento iônico causado por forças de origem elétrica (F1) e forças de origem química (F2)	17
FIGURA 1.8	Ensaio de Penetração de cloretos - NT Build 492	18
FIGURA 2.1	Resistência à compressão (esq.) e porosidade total (dir.) no tempo ..	32
FIGURA 2.2	Volume de intrusão de pastas em função do tamanho dos poros	32
FIGURA 2.3	Corrente inicial e profundidade de penetração x teor de escória	34
FIGURA 2.4	Efeito do nível de substituição de escória na permeabilidade intrínseca, difusão de cloretos e capacidade de fixação de cloretos ..	35
FIGURA 2.5	Coefficiente de difusão para 15 anos de exposição	36
FIGURA 2.6	Variação da resistência à compressão com o teor de escória	38
FIGURA 2.7	Resistência à compressão de escória ativada por diferentes ativadores	43
FIGURA 2.8	Resistência à compressão em argamassas ativadas	44
FIGURA 2.9	Efeito de ativadores no pH e do pH na dissolução do SiO ₂	45
FIGURA 3.1	Curva granulométrica do agregado miúdo	51

FIGURA 3.2	Curva granulométrica do agregado graúdo	51
FIGURA 3.3	Ensaio de resistência à compressão axial	55
FIGURA 3.4	Procedimento na determinação da profundidade de penetração de cloretos	57
FIGURA 3.5	Medição da penetração de Cloretos	57
FIGURA 3.6	Procedimento adotado no EAPC	58
FIGURA 3.7	Medição da penetração de cloretos pós EAPC	60
FIGURA 4.1	Resultados do ensaio acelerado de penetração de cloretos para a/agl 0,35; 0,50 e 0,65	65
FIGURA 4.2	Evolução da carga passante com o aumento do grau de hidratação .	65
FIGURA 4.3	Redução da carga passante da mistura 50EX em relação a 50E	69
FIGURA 4.4	Limites de penetração aos íons cloreto conforme ASTM C1202	70
FIGURA 4.5	Correlação entre carga passante e profundidade de penetração	72
FIGURA 4.6	Resultados do índice k para a/agl 0,35; 0,50 e 0,65	75
FIGURA 4.7	Evolução do índice k com o aumento do grau de hidratação	75
FIGURA 4.8	Redução do índice k da mistura 50EX em relação a 50E	79
FIGURA 4.9	Resistência à compressão para a/agl 0,35; 0,50 e 0,65	81
FIGURA 4.10	Evolução da resistência à compressão com o aumento do grau de hidratação	81
FIGURA 4.11	Evolução da resistência à compressão para a mistura de 50% de escória com e sem ativador	83
FIGURA 4.12	Condutividade elétrica específica da solução dos poros	88
FIGURA 4.13	Variação do volume de intrusão com o aumento do tempo de cura (a/agl 0,35; 0,50 e 0,65)	90
FIGURA 4.14	Correlação entre carga passante e índice k(mm [√] /semana)	93
FIGURA 4.15	Variação do índice k(mm [√] /semana) com o volume total de intrusão de mercúrio	94
FIGURA 4.16	Variação da carga passante (C) com o volume total de intrusão de mercúrio	96
FIGURA 4.17	Variação da carga passante com o volume de intrusão para as misturas 50E, 70E e 50EX	98

FIGURA 4.18	Varição do índice k com o volume de intrusão para as misturas 50E, 70E e 50EX	99
FIGURA 4.19	Varição do índice k(mm ³ /semana) com a resistência à compressão	102
FIGURA 4.20	Relação R\$/MPa com o desenvolvimento da cura	105

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1	Composição química de escórias de alto forno	28
TABELA 3.1	Características físico-mecânicas do cimento	47
TABELA 3.2	Composição química do cimento e escória	48
TABELA 3.3	Características físicas da escória	49
TABELA 3.4	Características físicas dos agregados	50
TABELA 3.5	Teor do material aglomerante e ativador químico nas misturas estudadas	53
TABELA 3.6	Quantidade de materiais utilizados por m ³ de concreto	53
TABELA 3.7	Classificação do concreto com base na carga passante (ASTM C 1202)	59
TABELA 3.8	Condutividade equivalente de íons aquosos numa concentração infinita em 25°C	61
TABELA 4.1	Resultados do ensaio acelerado de penetração de cloretos – ASTM C1202	64
TABELA 4.2	Constantes da equação e coef. de determinação da equação $Q = A/Bx$ - ASTM C1202	64
TABELA 4.3	Variação da carga passante com o aumento do tempo de cura	66
TABELA 4.4	Relação entre a carga passante nas misturas com adição em relação ao concreto de referência em igualdade de idade e relação a/agl	67
TABELA 4.5	Enquadramento dos concretos quanto ao risco de penetração de cloreto (ASTM C1202)	71

TABELA 4.6	Resultados da profundidade de penetração após ensaio acelerado ..	72
TABELA 4.7	Classificação do concreto com base na carga passante (ASTM C1202) ou profundidade de penetração de cloretos	73
TABELA 4.8	Resultados do índice k do EPCI	74
TABELA 4.9	Equação $K = A/Bx$ para o EPCI	74
TABELA 4.10	Variação do índice k com o aumento do tempo de cura	76
TABELA 4.11	Relação entre o índice k das misturas com adição em relação ao concreto de referência em igualdade de idade e relação a/agl	77
TABELA 4.12	Resistência à compressão axial média	80
TABELA 4.13	Constantes de Abrams e coeficiente de determinação para resistência à compressão	80
TABELA 4.14	Índice de resistência das misturas compostas	82
TABELA 4.15	Solução aquosa dos poros para misturas de relação a/agl 0,35	84
TABELA 4.16	Solução aquosa dos poros para misturas de relação a/agl 0,50	85
TABELA 4.17	Solução aquosa dos poros para misturas de relação a/agl 0,65	85
TABELA 4.18	Valores de pH da solução dos poros das misturas estudadas	87
TABELA 4.19	Condutividade elétrica específica da solução dos poros	88
TABELA 4.20	Percentual de variação dos resultados de penetração de cloretos ..	100
TABELA 4.21	Percentual de aumento dos resultados de penetração de cloretos .	100
TABELA 4.22	Preços dos materiais (Outubro 2005)	103
TABELA 4.23	Custo dos materiais por m ³ de concreto para as misturas estudadas	104
TABELA 4.24	Custo por m ³ , índice k e relação a/agl para um mesmo nível de resistência (3 e 7 dias)	106
TABELA 4.25	Custo por m ³ , índice k e relação a/agl para um mesmo nível de resistência (28 e 91 dias)	107
TABELA 4.26	Custo por m ³ , resistência à compressão e relação a/agl para um mesmo nível de resistência à penetração de cloretos (3 e 7 dias) ..	108
TABELA 4.27	Custo por m ³ , resistência à compressão e relação a/agl para um mesmo nível de resistência à penetração de cloretos (28 e 91 dias)	109

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/agl - Relação água/ aglomerante, em massa.

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials.

ACI - American Concrete Institute.

ASTM - American Society for Testing Materials.

AT - Ativador químico.

C - Cal hidratada.

C/S - Relação entre cal (CaO) e sílica (SiO₂).

C₂S - Silicato bicálcio.

C₃A - Aluminato tricálcio.

C₃S - Silicato tricálcio.

C₄AF - Ferroaluminato tetracálcio.

CH - Hidróxido de cálcio.

CP - Cimento Portland.

C-S-H - Silicato de cálcio hidratado.

CST - Companhia Siderúrgica de Tubarão.

CV - Cinza volante.

e⁻ - Elétron.

E - Escória de alto forno.

EPCI - Ensaio de penetração de cloretos por imersão em solução salina.

IBS - Instituto Brasileiro de Siderurgia.

IP - índice que relaciona o índice k (ou carga passante) de uma mistura e o índice k (ou carga passante) da mistura de base, para uma dada idade e relação a/agl .

k - Índice do ensaio imerso de penetração de cloretos, em $(mm/\sqrt{\text{semana}})$.

pH - Potencial de hidrogênio ou hidrogeniônico.

R - Coeficiente de correlação.

R² - Coeficiente de determinação.

UR - Umidade relativa do ar.

WG - "waterglass".

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

INTRODUÇÃO 1

CAPÍTULO I

AVALIAÇÃO DA PENETRAÇÃO DE CLORETOS E SUA

INFLUÊNCIA NA CORROSÃO DAS ARMADURAS 4

1.1 Introdução 4

1.2 Condições necessárias para o processo corrosivo 5

1.3 O mecanismo da corrosão 6

1.4 Corrosão das armaduras induzida pelos íons cloreto 7

 1.4.1 Contaminação do concreto por íons cloreto 9

 1.4.2 Mecanismos de penetração de íons cloreto no concreto 10

 1.4.3 Teores limites de íon cloreto 11

1.5 Avaliação da resistência do concreto à penetração de cloretos	12
1.5.1 Ensaios de longa duração	13
1.5.1.1 Ensaio imerso de penetração de cloretos (EIPC)	14
1.5.2 Ensaios acelerados por campo elétrico externo	16
1.5.2.1 Ensaio acelerado de penetração de cloretos (EAPC) – ASTM C 1202	17
1.5.2.2 Outros ensaios acelerados por potencial elétrico	19
1.5.3 Outros ensaios	21
1.6 Características do concreto contra a penetração de cloretos	22

CAPÍTULO II

ESCÓRIA DE ALTO FORNO E ATIVADORES QUÍMICOS	25
2.1 Introdução	25
2.2 Produção	26
2.3 Reatividade	27
2.4 Efeitos da adição de escória ao cimento Portland	28
2.4.1 Solução dos poros e condutividade elétrica	30
2.4.2 Porosidade	31
2.4.3 Penetração e fixação de cloretos	33
2.4.4 Resistência à compressão	37
2.5 Ativação química da escória de alto forno	39
2.5.1 O ativador químico Na ₂ SO ₄	42

CAPÍTULO III

MATERIAIS, MÉTODOS E TÉCNICAS	46
3.1 Introdução	46
3.2 Caracterização dos materiais	47

3.2.1 Cimento	47
3.2.2 Escória granulada de alto forno	48
3.2.3 Ativador químico	49
3.2.4 Agregados	49
3.2.5 Superplastificante	52
3.3 Dosagem dos concretos	52
3.4 Moldagem e cura	53
3.5 Ensaio realizados	55
3.5.1 Resistência à compressão axial	55
3.5.2 Ensaio imerso de penetração de cloretos (EIPC)	55
3.5.3 Ensaio acelerado de penetração de cloretos (EAPC)	58
3.5.4 Análise da solução aquosa dos poros	60
3.5.5 Ensaio de porosimetria de mercúrio	61

CAPÍTULO IV

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	63
4.1 Introdução	63
4.2 Análise dos resultados de penetração de cloretos – ASTM C1202	63
4.2.1 Influência do grau de hidratação na carga passante	66
4.2.2 Misturas compostas em relação ao concreto de referência	67
4.2.3 Análise do fator a/agl	68
4.2.4 Acréscimo de desempenho pela adição de ativador químico	68
4.2.5 Enquadramento das misturas quanto ao risco de penetração de cloretos	70
4.2.6 Medição da profundidade de penetração após ensaio acelerado ...	71
4.3 Análise do ensaio de penetração de cloretos por imersão - EPCI	73
4.3.1 Influência do grau de hidratação no índice k	76

4.3.2 Misturas compostas em relação ao concreto de referência	77
4.3.3 Análise do fator a/agl	78
4.3.4 Acréscimo de desempenho pela adição de ativador químico	78
4.4 Resistência à compressão axial	79
4.4.1 Análise das misturas compostas em relação ao concreto de referência	82
4.4.2 Análise da ativação química na resistência mecânica	83
4.5 Solução dos poros	84
4.6 Volume de intrusão de mercúrio	89
4.7 Análise da integração dos resultados	91
4.7.1 Ensaio acelerado de penetração de cloretos (ASTM C1202) e por imersão (EPCI)	91
4.7.1.1 Ensaio de penetração de cloretos por imersão (EPCI) e volume de intrusão	93
4.7.1.2 Ensaio acelerado de penetração de cloretos (ASTM C1202) e volume de intrusão	95
4.7.1.3 Ensaio acelerado de penetração de cloretos (ASTM C1202) e condutividade elétrica da solução dos poros	97
4.7.1.4 Considerações finais	101
4.7.2 Resistência à compressão axial e penetração de cloretos por imersão (EPCI)	102
4.8 Análise econômica	103
CONCLUSÃO	110
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFIAS	114
ANEXO	124

INTRODUÇÃO

O campo de possibilidades oferecidas pelo material aço permite desde a construção de verdadeiros arranha-céus até a fabricação de embalagem de alimentos, cobrindo, portanto, uma extensa gama de necessidades humanas. Não é difícil imaginar que a ausência desse material tornaria nosso planeta completamente diferente do que é hoje. Entretanto, quando analisamos a produção desse material, evidenciamos a possibilidade de forte impacto ambiental. Isto, porque a produção de cada tonelada de aço gera em média 435 Kg de resíduos sólidos, sendo 80% composto de escória de alto-forno e de aciaria e o restante formado por material particulado e lamas coletadas nas estações de tratamento de efluentes (IBS 2003).

Em pesquisa realizada nos EUA, constatou-se que o concreto é hoje o segundo material mais consumido no mundo (Metha & Monteiro, 1994). A possibilidade de incorporação de escória de alto forno ao concreto faz deste um gigantesco depósito de resíduo industrial. A comprovação dessa possibilidade instigou o meio científico a investigar cada vez mais as alterações ocasionadas nos concretos que passaram a utilizar esse resíduo em sua composição.

Pesquisas focadas na durabilidade de concretos indicam que a utilização da escória substituindo parte do cimento Portland promove uma maior densificação da matriz do concreto, tornando-o mais resistente em certos ambientes agressivos, como no caso de ambientes contaminados por cloretos. Dessa forma, a utilização desse resíduo passou a ser não apenas ambientalmente correta, mas necessária ao melhor desempenho durável do material.

A constatação de elevado número de estruturas com falhas prematuras de desempenho devido à corrosão das armaduras por contaminação de cloretos tornou ainda mais necessário o conhecimento das possíveis alterações benéficas causadas pela incorporação de escória de alto forno aos concretos de cimento Portland.

A maior densificação originada do uso de escória, entretanto, não se refletiu em alta resistência à compressão. Ao contrário, o uso de elevada substituição de cimento Portland por escória indicou que ocorre considerável perda de resistência nas idades

iniciais. Essa desvantagem tem diminuído o campo de aplicação desse tipo de concreto, no qual a resistência inicial é imprescindível.

Técnicas, como cura térmica e aumento da finura da escória, podem ser utilizadas como tentativa de vencer essa barreira necessitando, todavia, tanto de equipamentos especiais quanto de mão-de-obra extra na produção desses concretos. Em contrapartida, a utilização de ativadores químicos, que não necessitam de tais custos adicionais, vem chamando a atenção do meio científico como interessante alternativa de ganho de resistência mecânica em idades iniciais.

Os ativadores químicos são compostos à base de álcalis e sulfatos, utilizados com a escória de alto forno em proporções bastante pequenas (de 1 a 4% em relação massa do aglomerante). Apesar das indicações de efeito benéfico à resistência mecânica inicial, é relativamente pequeno o estudo referente aos aspectos de durabilidade (como pela resistência à penetração de cloretos), principalmente quando tratamos do ativador utilizado nessa pesquisa: o sulfato de sódio.

Apesar da inegável importância do estudo da resistência dos concretos à penetração de cloretos, um dos métodos acelerados de avaliação (ASTM C1202) bastante difundido no meio científico tem enfrentado quantidade considerável de críticas. Isto se deve, sobretudo, ao fato do ensaio ser afetado pela condutividade específica da solução dos poros do concreto que, para Shi et al. (1998), tem importância irrelevante no transporte de íons cloreto no concreto. Em contrapartida, o ensaio de penetração de cloretos por imersão em solução salina não é afetado pela condutividade (Wee et al., 2000).

Desse modo, o estudo desenvolvido nessa dissertação teve como objetivo analisar, em concretos, os efeitos tanto da adição de elevados teores de escória de alto-forno quanto da ativação química da escória em relação à resistência à penetração de íons cloreto e à resistência à compressão axial. O ensaio recomendado pela ASTM C1202 também é avaliado através de estudo comparativo. Para essa finalidade, foram realizados ensaios de resistência à penetração de cloretos (método da ASTM C1202 e de imersão em solução salina), resistência à compressão axial, determinação da solução iônica dos poros e ensaio de porosimetria por mercúrio. Finalmente, foi realizado também um estudo de custo.

O conteúdo da dissertação foi estruturado em quatro capítulos, sendo que o Capítulo I revisa conceitos e mecanismos ligados à corrosão das armaduras e analisa as formas de contaminação e participação dos íons cloreto no processo corrosivo. São apresentados os métodos de avaliação da resistência de concretos à penetração de cloretos utilizados pelo meio científico e, também, algumas características ligadas à qualidade do concreto que devem ser respeitadas para que este cumpra uma de suas principais funções: a proteção do aço.

O Capítulo II revisa as alterações causadas aos concretos que utilizam substituição parcial de cimento Portland por escória granulada de alto forno, resumindo trabalhos sobre solução dos poros, porosidade, penetração e fixação de cloretos e resistência à compressão. Ao final do capítulo, são também apresentados estudos sobre a ativação química da escória e, mais especificamente, a ativação por sulfato de sódio.

No Capítulo III, são expostos os resultados dos ensaios de caracterização do material de pesquisa, a técnica de dosagem dos concretos, assim como os procedimentos adotados em sua moldagem e cura. Esse capítulo também apresenta de forma detalhada a metodologia adotada em cada ensaio.

No Capítulo IV, são reunidos os resultados dos ensaios de resistência à compressão, dos dois ensaios de penetração de cloretos, da análise da condutividade elétrica da solução dos poros e do ensaio de porosidade por intrusão de mercúrio. O capítulo analisa e discute os resultados de forma individual e integrada. Por fim, uma análise econômica avalia os custos de produção das misturas estudadas.

CAPÍTULO I

AValiação DA PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS E SUA INFLUÊNCIA NA CORROSÃO DAS ARMADURAS

1.1 Introdução

Através do aproveitamento inteligente das potencialidades individuais, a associação do concreto simples com o aço forma um dos sistemas estruturais mais utilizados na indústria da construção civil. No entanto, a ocorrência de manifestações patológicas de forma prematura tem gerado grande preocupação, sobretudo, em relação aos elevados custos de reparo. Metha e Monteiro (1994) estimam que, em países industrialmente desenvolvidos, acima de 40% dos recursos da indústria da construção sejam aplicados no reparo e manutenção de estruturas já existentes.

No que se refere às manifestações patológicas geradoras dessa falha de desempenho afirma Aitcin (2000): “A corrosão do aço das armaduras tem sido e ainda é o principal mecanismo de deterioração de estruturas de concreto armado”. Muitos relatórios citados por Metha (1992, apud Isaia 1995, p. 8) também apontam a corrosão como a principal causa. Segundo Isaia (1995), nos países desenvolvidos, os problemas de corrosão estão mais ligados às rodovias (sais descongelantes) ou às estruturas marítimas. No Brasil, cita o autor que a incidência de corrosão está mais ligada às falhas na execução e manutenção das estruturas.

Segundo o Comitê 222 do ACI, os íons cloreto são os agentes responsáveis pela maior incidência de corrosão prematura do aço. A corrosão pode também ocorrer por meio de outras situações, como a carbonatação. Entretanto, a corrosão por carbonatação é geralmente mais lenta e menos comum que a corrosão induzida por cloretos.

Apesar da grande incidência de falhas, documentadas ou não, o concreto fornece um ambiente estável para abrigar o aço, evitando a corrosão, desde que sejam respeitadas determinadas condições. Assim, a adoção de adequado tempo de cura,

dosagem, execução, entre outros, podem tornar a velocidade de evolução da corrosão tão lenta a ponto de tornar-se desprezível durante a vida útil de projeto.

1.2 Condições necessárias para o processo corrosivo

O primeiro obstáculo presente no sistema aço-concreto para ocorrência da corrosão é a camada passivante. Essa camada, conforme Neville (1997), se forma logo após o início da hidratação do cimento e, cuja composição, segundo Sagoe-Crentsil e Glasser (1990, apud Cascudo, 1997, pág. 39), vai do Fe_3O_4 (magnetita) ao $\delta-Fe_2O_3$. Na condição de não carbonatado, a solução aquosa dos poros do concreto se encontra em ambiente altamente alcalino mantendo esta película estável.

Destruída a camada passivadora do aço, o mecanismo eletroquímico do processo corrosivo necessita da permanência de três condições, as quais são mencionadas por Rüsç (1975 apud Helene, 1986, p.2): existência de eletrólito, diferença de potencial e oxigênio.

O eletrólito tem finalidade de permitir a mobilidade de íons que precisam se combinar para formar os produtos da corrosão. É formado pela solução aquosa dos poros do concreto saturada por produtos da hidratação (CH, KOH e NaOH) que conferem a essa solução caráter de bom eletrólito.

A diferença de potencial pode ser originada por uma infinidade de situações citadas na literatura: diferenças de umidade, aeração, concentração salina, solicitações mecânicas distintas no concreto e no aço, variações significativas nas características superficiais do aço, metais diferentes embutidos no concreto, etc.

O oxigênio é necessário porque participa das reações químicas envolvidas na formação da ferrugem (óxidos e hidróxidos de ferro). No entanto, a participação do oxigênio é dependente do teor de umidade do concreto: em caso de totalmente úmidos, a difusão de CO_2 é muito lenta e, conforme Cascudo (1997), para que o oxigênio seja consumido ele precisa estar no estado dissolvido.

Pela análise desses fatores, pode-se perceber a notável importância do ambiente ao qual o concreto está submetido. Assim, é possível concluir que estruturas submetidas a ambientes secos ou totalmente úmidos (imersos) sejam menos agredidas

pela corrosão que atmosferas úmidas. Segundo Neville (1995), a umidade relativa ótima para corrosão está entre 70% e 80%. A corrosão pode ainda ser influenciada por agentes agressivos, como o íon cloreto relatado no item 1.4.

1.3 O mecanismo da corrosão

No caso de existirem todas as condições necessárias, a corrosão da armadura no interior do concreto ocorre através da formação de células eletroquímicas: na região anódica, há dissolução do metal com formação de cátions ferrosos (Fe^{++} , Fe^{+++}), que passam para a solução aquosa dos poros e migração de elétrons livres para a região catódica onde, em conjunto com água e oxigênio, formam íons hidroxila (OH^-). Como há mobilidade de íons pelo eletrólito, os íons hidroxila se combinam com os íons ferrosos formando assim a ferrugem como produto da corrosão.

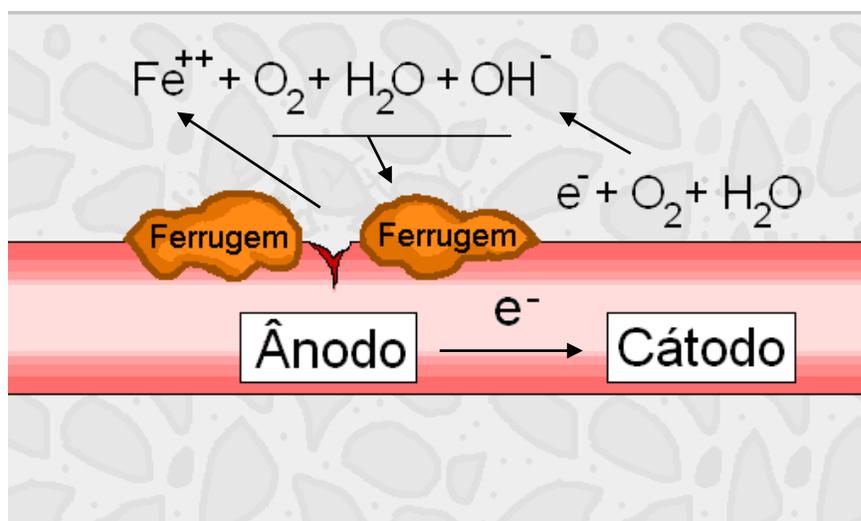
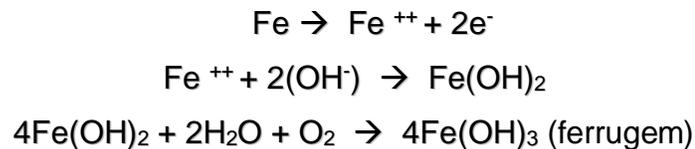


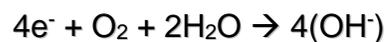
Figura 1.1 – Representação da corrosão eletroquímica no concreto armado

As reações que governam o processo são bastante numerosas e complexas. No entanto, de maneira simplificada e tradicional, o processo corrosivo pode ser equacionado da seguinte forma:

- Nas regiões anódicas (corroídas):



- Nas regiões catódicas (não corroídas):



Os produtos de corrosão são óxidos e hidróxidos de ferro perceptíveis pela coloração marrom-avermelhada que podem, segundo Metha e Monteiro (1994), expandir 600 por cento do volume do metal original. Esse aumento de volume, segundo Cánovas (1977 apud Cascudo, 1997, p.61), pode causar pressões que podem atingir valores de até 40MPa. Inicialmente há surgimento de microfissuras que vão crescendo e se ligando para resultar no lascamento do cobrimento do concreto.

Um segundo efeito nocivo pode ser visualizado na Figura 1.1 na região anódica. A seção transversal do aço vai reduzindo devido à dissolução progressiva do metal. A perda de aderência concreto/armadura também é apontada por Andrade (1992) como resultado da corrosão.

1.4 Corrosão das armaduras induzida pelos íons cloreto

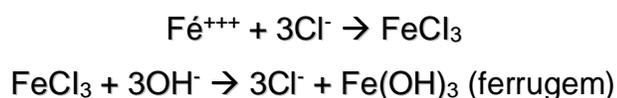
A presença de íons cloreto no concreto simples é quase irrelevante nas propriedades de engenharia, a não ser como aditivo acelerador (Isaia, 1995). No entanto, quando há armadura embutida no concreto, os cloretos são capazes de destruir a primeira barreira à corrosão (camada passivante) mesmo em ambientes alcalinos e, com o mantimento das condições referidas anteriormente (O_2 e H_2O), ocorre a corrosão.

O relatório do Comitê 222 do ACI apresenta três teorias que buscam explicar os efeitos dos íons cloreto sobre a corrosão do aço:

- teoria do filme de óxido: os íons cloreto penetram o filme passivante que protege o aço com maior facilidade que outros íons (como por exemplo o SO_4^-),
- teoria da adsorção: os íons cloreto são adsorvidos na superfície do metal em competição com o O_2 dissolvido ou íons hidroxila. Os íons cloreto facilitam a dissolução dos íons metálicos;
- teoria do complexo transitório: os íons cloreto competem com OH^- na formação de íons ferrosos. Forma-se um complexo solúvel de cloreto de ferro que pode migrar até certa distância onde esse complexo é rompido, precipitando hidróxido de ferro. O íon cloreto fica livre e pode refazer esse processo.

Sobre a teoria do filme óxido, acrescenta Lima (1990) que o raio atômico do íon cloreto é bastante pequeno (36 \AA) e, assim, consegue penetrar os pontos fracos da camada passivante mais facilmente que outros íons.

Helene (1986) apresenta uma reação simplificada que mostra a participação do íon cloreto no processo corrosivo, onde este atua como catalisador, acelerando o processo:



Os cloretos também influenciam a resistividade elétrica do concreto (que tem grande influência na velocidade do processo corrosivo). Estudando essa propriedade, Saleem et al. (1996) examinaram concretos contaminados por cloretos com diferentes teores de umidade. Os resultados mostraram que, em altas concentrações salinas, o estado de umidade do concreto tem muito pouca influência na resistividade elétrica. Isto indica que, mesmo em concretos pouco úmidos, altas concentrações salinas poderiam sustentar altas taxas de corrosão.

Gentil (1996) oferece uma classificação quanto à morfologia da corrosão: generalizada (geralmente atribuída à carbonatação), por pite ou puntiforme e sob tensão fraturante (em concreto protendido, segundo Andrade, 1992). Cita Cascudo (1997), que se deve essencialmente aos cloretos a ocorrência da corrosão localizada por pite. Dessa forma, mesmo que uma pequena área da estrutura seja induzida a

corroer, através de escarificações, a armadura vai perdendo sua capacidade de solitação mecânica podendo alcançar a ruptura pontual da barra.

1.4.1 Contaminação do concreto por íons cloreto

Os íons cloreto podem estar presentes no interior do concreto de duas diferentes formas: através de contaminação externa, quando são capazes de atravessar a massa de concreto que protege a armadura, ou, ainda, por meio da equivocada incorporação ao concreto no momento da mistura.

A contaminação externa pode ocorrer devido à água do mar ou água salobra, névoa salina e sais descongelantes como o CaCl_2 e NaCl (empregados em locais com invernos rigorosos) ou, ainda, devido a solos contaminados por cloretos. Meira et al. (2004) investigaram concretos com a/a_{gl} de 0,50 submetidos à nevoa salina e encontrou redução bastante acentuada entre 100 e 500 metros de distância do mar. Para 500 metros, a simulação de exposição por 50 anos revelou baixa agressividade por cloretos. Assim, a partir de 500 metros, sugere o autor que outro fenômeno (como a carbonatação) pode apresentar maior risco à corrosão. Cita Neville (1997) que, a depender do vento e da topografia, os íons podem atingir distâncias superiores a 2 Km.

A incorporação ao concreto no momento da mistura pode acontecer através de uso de matéria-prima contaminada (como agregados, água ou aditivos) ou por meio do uso intencional de cloretos como agente acelerador de pega e endurecimento (Figura 1.2 e Figura 1.3).

É ainda importante ressaltar que o próprio cimento Portland traz cloretos em sua composição. No entanto, conforme Neville (1997), são pequenas quantidades, não mais que 0,01% da massa total.



Figura 1.2 – Corrosão em estruturas executadas com aditivo com cloretos (Vagheti et al., 2002)



a)

b)

c)

Figura 1.3 – Corrosão em estruturas pré-moldadas: a) viga; b) caixões e c) pilar (Laranjeiras, 2004)

1.4.2 Mecanismos de penetração de íons cloreto no concreto

A contaminação externa ou a movimentação interna de cloretos no concreto somente ocorrem quando estes estão dissolvidos em água, na forma de íons, simplesmente porque na forma de cristais sólidos eles apresentam dimensões superiores aos poros do concreto. Os quatro mecanismos de penetração tradicionalmente referidos na literatura são: absorção, difusão iônica, permeabilidade sob pressão e migração iônica.

A absorção é geralmente o primeiro mecanismo de penetração de cloretos por contaminação externa e ocorre pelo fenômeno da capilaridade em materiais porosos

que não estejam saturados. Wiens (1996 apud Paulsso-Tralla e Silfwerbrand 2002, p. 34) relata que, após a molhagem, a absorção capilar é o mecanismo de transporte dominante até 72 horas. Concretos com poros mais delgados, apesar de apresentarem forças de sucção mais intensas, segundo Cascudo (1997), apresentam absorção total menor. A absorção menor justifica-se pelo fato de que em estrutura de pasta mais compacta há queda significativa na porosidade capilar e na interconexão entre os poros. Aliado a isso, a absorção também é menor quanto menor for o teor de umidade do concreto e mais viscosa for a solução salina.

Quando o cloreto ultrapassa a massa superficial e alcança o interior do concreto, o mecanismo de penetração passa a ser a difusão iônica. Acontece devido a gradientes de concentração iônica, tanto do ambiente externo para o ambiente interno, quanto dentro do próprio concreto. Segundo Zhang e GjØrv (1994), a sucção capilar pode dominar a penetração da camada superficial do concreto que é muito porosa e somente parcialmente saturada. Entretanto, se a porosidade for muito pequena ou concreto é muito úmido, o mecanismo de difusão pode dominar a penetração de íons cloreto.

Os íons cloreto também podem contaminar o concreto através de permeabilidade sob pressão externa. No entanto, segundo Cascudo (1997), isso ocorre apenas em situações especiais como contenção de solos, contato direto com a ação de águas correntes e estruturas semi-enterradas.

A migração iônica acontece pela ação de campos elétricos que induzem a movimentar elementos com carga elétrica (íons). Assim, através da corrente elétrica gerada na corrosão ou através de campos elétricos externos, os cloretos podem também ser induzidos a movimentar-se pela rede de poros do concreto.

1.4.3 Teores limites de íon cloreto

A procura por um valor que indique o teor limite a partir do qual o cloreto é capaz de destruir a camada passivadora e iniciar o processo corrosivo tem impulsionado uma grande quantidade de trabalhos. Apesar da maioria de normas e recomendações limitar o teor de cloretos em relação à massa de cimento (média de 0,4% segundo Andrade, 1992, Isaia, 1995, Cascudo, 1997), a relação iônica Cl^-/OH^- tem sido apontada como

melhor indicador do limite de despassivação da armadura. Dessa forma, todos os fatores que afetam a concentração de hidroxila na solução aquosa dos poros, como teor de álcalis do cimento, nível de sulfato, grau de carbonatação, afetam, também, o teor limite de cloretos.

A fixação de cloretos também tem sido apontada como relevante no valor limite de cloretos. Isto, porque o cloreto pode estar sob três formas no concreto: quimicamente combinado, fisicamente retido por adsorção à superfície dos poros de gel ou dissolvido na fase aquosa dos poros (íons livres). É sob a forma de íons que os cloretos são capazes de iniciar e participar da corrosão, embora os combinados possam reconverter-se em livres por carbonatação ou outras situações particulares (Isaia, 1995). Dessa forma, conforme Hussain et al. (1995), todos os fatores que afetam a capacidade de fixação de cloretos, como teor de C_3A e de C_4AF no cimento, sulfatos, temperatura de exposição e carbonatação, têm influência no teor limite Cl^-/OH^- .

Hussain et al. (1995), através de revisão do valor limite Cl^-/OH^- citam valores que vão desde 0,3% até 3%. E, devido à dificuldade de medição e ao fato de a iniciação da corrosão depender de uma série de fatores, conclui o autor que não há valor único aceito universalmente.

1.5 Avaliação da resistência do concreto à penetração de cloretos

Em vista da importância do tema, e com objetivo de encontrar um método que avalie corretamente e, em menor tempo, muitos autores têm desenvolvido diferentes métodos de avaliar a capacidade do concreto de impedir que os íons cloreto atravessem a camada de cobrimento e alcancem a armadura de aço em teores suficientes para deflagrar o processo corrosivo. Os métodos encontrados na literatura são descritos a seguir onde são apontados vantagens e desvantagens em sua utilização.

1.5.1 Ensaio de longa duração

O ensaio proposto pela AASHTO T259 avalia a resistência de concreto à penetração de íons cloreto através de placas (espessura mínima 75 mm e área superficial 300 mm²) que, depois de curadas, são armazenadas em ambiente seco (50% de umidade relativa) por 28 dias. Após esse período de condicionamento e, com as faces laterais impermeabilizadas, a superfície superior da placa entra em contato com solução de 3% de NaCl por 90 dias, enquanto a face inferior continua em contato com ambiente seco (50% UR). As concentrações de cloretos são determinadas em profundidades progressivas de camadas de 0,5 polegadas.

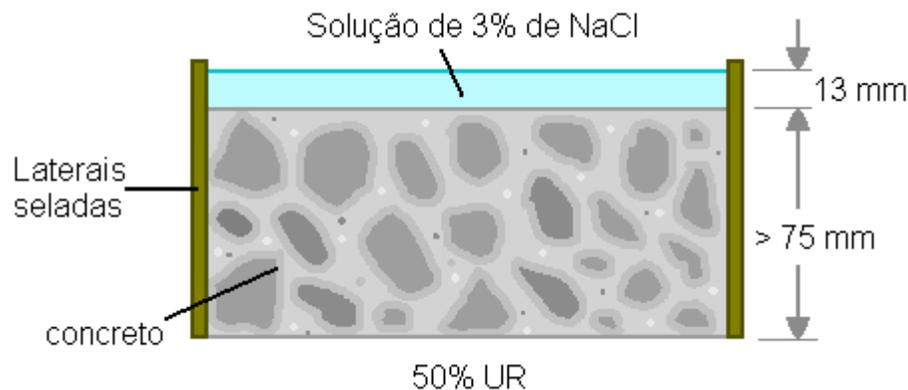


Figura 1.4 – Ensaio de penetração de cloretos - AASHTO T259.

Stanish et al. (1997) apontam as imperfeições da avaliação. Primeiramente, somente a média de cada 0,5 polegada é verificada, resultando em informação muito grosseira do perfil de penetração. Em segundo, além da difusão, ocorre uma inicial absorção capilar (que tem importância exagerada num teste com duração de apenas 90 dias) e uma transmissão de vapor da superfície úmida para a superfície em contato com o ambiente seco que acelera a penetração de cloretos. Por último, para concretos de alta qualidade, o tempo de duração do ensaio deve ser estendido para que este desenvolva um perfil de penetração.

A NT Build 443, conforme Stanish et al. (1997), sugere uma nova metodologia com finalidade de superar as deficiências do ensaio proposto pela AASHTO T259. A

primeira diferença consiste no estado de umidade da amostra de concreto: em vez de seco por 28 dias, as amostras são saturadas para prevenir qualquer absorção inicial. Somente uma das faces não é impermeabilizada e é colocada em contato com solução a 2,8 M de NaCl. Com utilização do conteúdo de cloretos (determinado em profundidades sucessivas de 0,5 mm de acordo com a AASHTO T260), a dimensão da difusividade é determinada pelo ajuste da segunda lei de Fick. O tempo de duração depende da qualidade do concreto (40 a 120 dias de exposição).

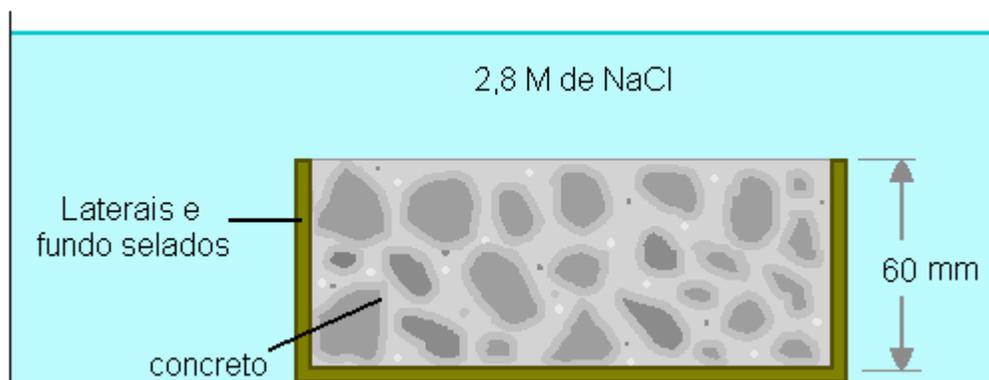


Figura 1.5 – Ensaio de Penetração de cloretos - NT Build 443.

1.5.1.1 Ensaio imerso de penetração de cloretos (EIPC)

Otsuki et al. (1992) realizaram um estudo na busca de um indicador químico para medir a penetração de íons cloretos em materiais cimentícios endurecidos. Com esta finalidade, testaram três diferentes produtos químicos: nitrato de prata, nitrato de chumbo e nitrato de tálio. Estes foram aspergidos em concretos contaminados por cloretos e os autores constataram que, somente no caso do nitrato de prata, a região contendo cloretos era claramente delimitada pela mudança de cor.

Isto ocorre porque a solução de AgNO_3 , em presença de luz, reage preferencialmente com os cloretos livres (presentes na região contaminada pelos cloretos) para formar um precipitado branco de cloreto de prata (AgCl) e, em região isenta de cloretos, reage com os íons OH^- formando um precipitado marrom de óxido de

prata (AgO). Desse modo, a profundidade de cloretos é claramente indicada pela mudança de cor.

Foram ainda avaliadas diferentes concentrações de nitrato de prata (0,05; 0,10; 0,20; 0,30 e 0,40M). Como conclusão do trabalho a concentração ótima foi a de 0,10M. Esta solução e a concentração são idênticas àquelas recomendadas pelo método italiano UNI 7928, 1978 (que ainda recomenda uma solução fluorescente antes da aplicação do nitrato, não sendo necessária, conforme Jucá et al., 2002).

A Figura 1.6 mostra a quantidade limite de cloretos livres e totais em relação à massa de cimento para pastas, argamassas e concretos, onde surge a coloração esbranquiçada. Essa figura indicou que, enquanto a quantidade de cloretos totais é bastante variável, a quantidade de cloretos livres é razoavelmente constante. Assim, a formação de precipitado branco (cloreto de prata) ocorre em regiões onde a concentração de cloretos livres é maior que 0,15% da massa de cimento. Este valor está de acordo com o valor limite de cloretos livres recomendado pelo Comitê 201 do ACI (0,2% de cloretos livres).

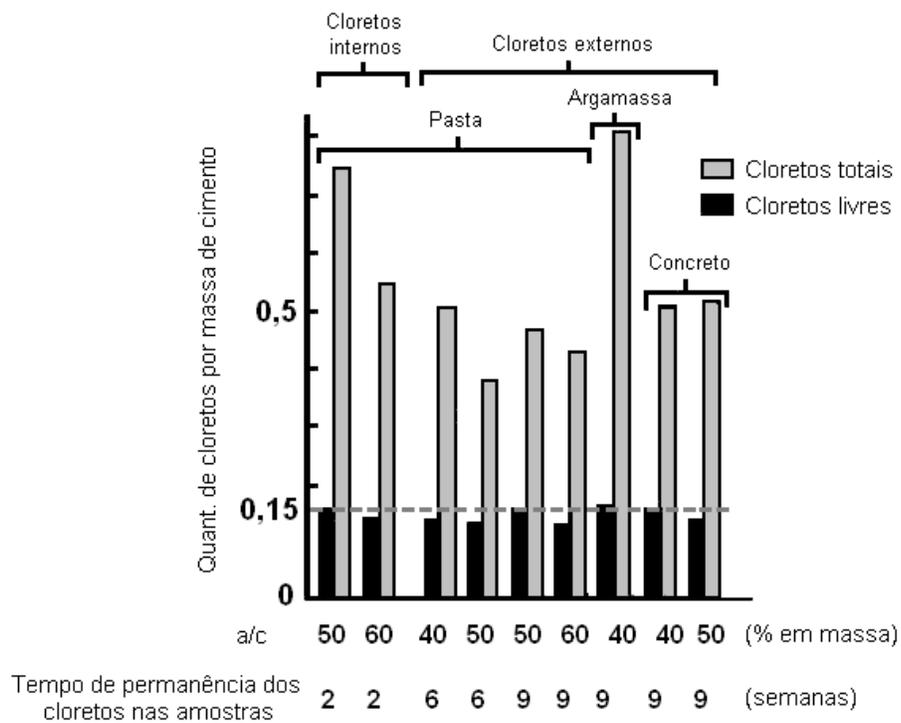


Figura 1.6 – Quantidade de cloretos totais e cloretos livres em pastas, argamassas e concretos, em relação à massa de cimento (Otsuki et al., 1992, p.591).

Bakker (1988 apud Wee et al., 2000, p.224) sugere relacionar as profundidades de penetração com a raiz quadrada do tempo de imersão em semanas através da equação empírica a seguir, e obter os parâmetros a e k .

$$X = a + k\sqrt{t}$$

Wee et al. (2000) estudaram o uso da equação em concretos com escória de alto forno em diferentes proporções e finuras e, devido à falta de uma tendência consistente do parâmetro a , apenas o índice k foi utilizado como indicador da resistência do concreto contra a penetração de cloretos.

1.5.2 Ensaios acelerados por campo elétrico externo

Os ensaios de imersão, referidos anteriormente, têm desvantagem de envolver grande necessidade de tempo, sendo por isso chamados de ensaios de longa duração. A aceleração da penetração tem sido utilizada pela aplicação de um campo elétrico externo que, segundo Streicher e Alexander (1995), não acelera o mecanismo de difusão dos íons cloreto, mas os induz ao mecanismo único de migração iônica (o aumento da velocidade de penetração é da ordem de 100 vezes o que permite negligenciar a difusão). O aumento da concentração de cloretos na solução de contaminação também é apontada como forma de acelerar o ensaio, porém o comportamento da difusão pode não seguir a lei de Fick devido ao efeito da interação iônica (Zhang e GjØrv, 1994).

Na utilização de campos elétricos externos, além dos íons cloreto, todos os íons que se encontram na solução dos poros da amostra ensaiada (principalmente OH^- , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e SO^{2-}) são induzidos a movimentar-se sob a ação do campo elétrico (força F_1 da Figura 1.7). Devido a gradientes de concentração também existem forças de origem química (representadas por F_2 da Figura 1.7). Segundo Zhang e GjØrv (1994), durante o ensaio os íons vão penetrando a amostra motivados por F_1 , enquanto o gradiente de concentração diminui até que um regime estacionário é alcançado e, então, o fluxo de

cloretos e o aumento da concentração na célula coletora tornam-se constantes. A respeito da influência do gradiente de concentração de cloretos, os autores informam que ela é desprezível (para uso de voltagem de 6 a 12 V a relação F_1/F_2 alcança várias centenas).

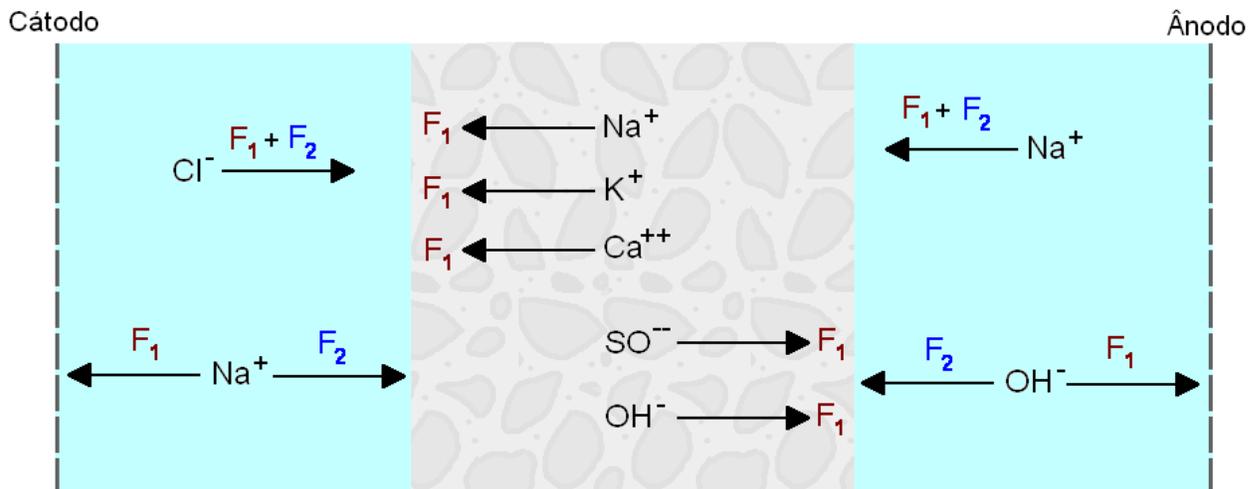


Figura 1.7 – Movimento iônico causado por forças de origem elétrica (F_1) e forças de origem química (F_2) (Zhang e GjØrv, 1994, p. 1539).

1.5.2.1 Ensaio acelerado de penetração de cloretos – ASTM C1202

O ensaio recomendado pela ASTM C1202 é uma das formas mais utilizadas de avaliar a resistência de concreto à penetração de cloretos. Através da manutenção de uma diferença de potencial de 60 V dc, os íons cloreto são induzidos a atravessar uma fatia de concreto (procedimento detalhado no item 3.6.3). O mecanismo preponderante de penetração é a migração iônica, porque a elevada tensão permite desprezar as forças de difusão (Hisada et al., 1999) e estando o concreto saturado a absorção inexistente.

Andrade et al. (1999) utilizaram o ensaio proposto pela ASTM C1202 e uma modificação (com 12 V durante 30 horas) em concretos com cimento comum e composto medindo posteriormente a penetração de cloretos através de método colorimétrico com AgNO_3 . Concluiu que a densidade de carga elétrica e a profundidade

em que há mudança de cor apresentam uma relação linear ($R = 0,924$). Ou seja, a profundidade de penetração depende da densidade de carga passante e não da voltagem aplicada e, assim, a carga passante é um bom indicador da resistência à penetração de cloretos.

Shi (2004), através de uma revisão de resultados publicados, conclui que fatores que pouco contribuem no transporte de íons cloreto pelo concreto têm grande influência na condutividade elétrica do concreto (que é o parâmetro medido pelo ensaio da ASTM C1202). Pela análise individual dos componentes do concreto o autor afirma:

- O uso de materiais cimentícios suplementares pode alterar significativamente a solução dos poros do concreto porque incorporam muitos álcalis em seus produtos hidratados, resultando em alteração química na solução dos poros.
- O aumento do volume de agregado no concreto tem um efeito diluente de íons condutivos e álcalis que podem ser adsorvidos na sua superfície diminuindo a condutividade. Certos tipos de agregados podem também liberar íons na solução dos poros que a tornam mais condutiva.
- A composição do cimento também tem grande influência na solução dos poros do concreto.

Andrade (1993) também considera a produção de calor (gerado pela elevada voltagem de 60V) um fator de erro no ensaio. Dessa forma, ensaios de concretos bastante porosos tendem, pela elevação da temperatura, aumentar ainda mais a sua carga passante em comparação com concretos menos porosos.

Apesar das críticas, o ensaio é uma forma rápida de avaliar a qualidade do concreto, sendo bastante difundido em vários centros de pesquisa. Segundo Neville (1997), o ensaio pode ser útil para comparação e escolha do concreto mais adequado. Segundo Isaia (1995), o ensaio apresenta a vantagem de ser aplicado a quase todos os tipos de concretos, principalmente quando se deseja comparar resultados em relação a outro de referência.

1.5.2.2 Outros ensaios acelerados por potencial elétrico

O ensaio de migração elétrica, desenvolvido por Dhir et al. (1990), utiliza campos elétricos para acelerar o movimento iônico dos íons cloreto da mesma forma que o ensaio proposto pela ASTM C1202. No entanto, utiliza-se voltagem reduzida para evitar o problema do aquecimento das soluções (comumente entre 10 e 12V). A amostra de concreto (usualmente de diâmetro 100 mm e espessura 15 a 50 mm) divide duas câmaras: uma contendo íons cloreto formando o cátodo e outra formando o ânodo por água destilada ou água com cal. Durante o ensaio, a concentração de cloretos do ânodo (e não simplesmente a carga passante) é periodicamente monitorada para calcular o coeficiente de difusão de cloretos.

Zhang e Gjrv (1994) utilizaram o ensaio e concluíram que este pode ser utilizado como um parâmetro geral de qualidade para avaliar a resistência do concreto contra penetração de cloretos. Os resultados experimentais também mostraram que o aumento da voltagem do ensaio de 6 para 12 V não afeta substancialmente o coeficiente medido. Para diminuir a duração do ensaio, em concretos de qualidade moderada, a voltagem de 12 V pode ser utilizada.

Assim, as vantagens apontadas por este ensaio em relação ao proposto pela ASTM C1202 são a ausência aquecimento das soluções, evitado pelo uso de voltagem reduzida, e a avaliação relativa somente ao que ocorre com os íons cloreto (e não a outros íons que podem estar em solução). No entanto, o ensaio mantém ainda um inconveniente: a migração iônica pode ser afetada por qualquer material condutor (como fibras condutivas, inibidores de corrosão, ou partículas da armadura de aço utilizados no concreto). O uso de menor voltagem também gera a elevação do tempo de ensaio. Conforme Stanish et al. (1997), os testes realizados por El-Belbol e Buenfeld (1989) necessitaram de 4 dias devido ao uso de 40 V.

O ensaio rápido de migração (NT Build 492), inicialmente proposto por Tang e Nilsson (1992), utiliza cilindros de 100 mm de diâmetro e 50 mm de espessura conforme Figura 1.8, submetido à tensão dependente da corrente inicial medida em tensão de 60 V (sendo essa voltagem apropriada para o teste, entretanto, para concretos porosos a voltagem deve ser entre 30 e 10V) durante 18 horas (Stanish et al.,

2001). Após esse tempo, o cilindro é rompido ao meio e a penetração de cloretos é determinada pela aspersão de solução de nitrato de prata (descrito no item 1.5.1.1). A profundidade de penetração pode ser utilizada para determinar um coeficiente de difusão de cloretos ou ela mesma pode ser um parâmetro de medida. No entanto, a migração continua sendo afetada por qualquer material condutivo presente no concreto.

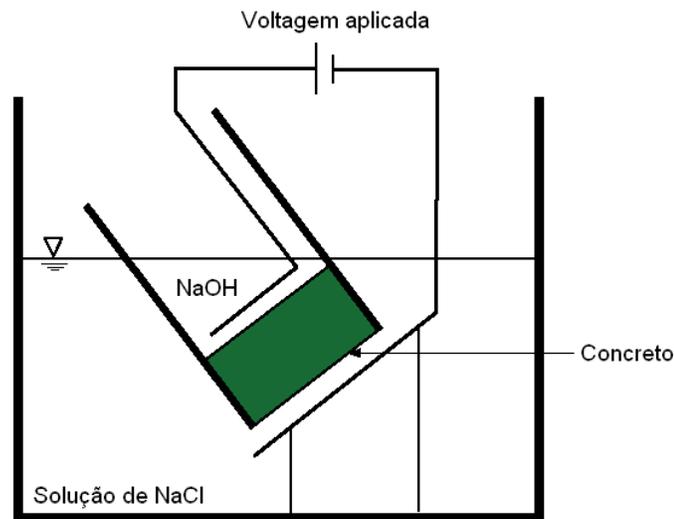


Figura 1.8 – Ensaio de penetração de cloretos - NT Build 492 (Stanish et al., 2001, p. 2).

Streicher e Alexander (1995) sugerem um equipamento similar ao utilizado pela ASTM C1202 para avaliar a difusão de cloretos através da medição da condutividade elétrica do concreto. As amostras, de dimensões também similares, são secas a 50° C por 7 dias e posteriormente saturadas com solução 5M de NaCl. As duas células do equipamento são preenchidas com a mesma solução salina e, assim, o ensaio é virtualmente independente da condutividade da solução dos poros do concreto (devido à alta condutividade da solução salina). Com aplicação de uma diferença de potencial entre 2 e 10V, a condutividade pode ser obtida pela medição da corrente elétrica. O ensaio, neste caso, é extremamente rápido (até 20 amostras são testadas em 1 hora). Mackechnie e Alexander (2000) compararam este ensaio com outros ensaios acelerados. Os autores classificaram-no como adequado para prever a resistência de concretos à cloretos.

1.5.3 Outros ensaios

Existem métodos que utilizam pressão para acelerar o fluxo de cloretos através do concreto. Uma fatia de concreto é pré-saturada e selada em suas laterais e uma das faces é colocada em contato com solução contendo cloretos sob pressão. A pressão é mantida durante determinado tempo e posteriormente a penetração de cloretos pode ser determinada pelo método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata (descrito no item 3.8.1). O tempo de duração depende da pressão utilizada e da qualidade do concreto.

Técnicas de resistividade também são apontadas como métodos de estimar a habilidade dos cloretos de penetrar o concreto (Stanish et al., 1997). A resistividade de um material é definida como a resistência elétrica entre faces opostas de uma unidade cúbica desse material e caracteriza a dificuldade com que os íons se movimentam no concreto, e a condutividade é o inverso da resistividade. No entanto, como também é baseada em medidas elétricas, materiais condutivos trazem os mesmos inconvenientes comentados anteriormente sobre os ensaios elétricos.

Existem autores que sugerem avaliar propriedades relativas à qualidade do concreto, como permeabilidade e absorção, e relacioná-las com a penetração de cloretos. Outros sugerem utilizar outros fluidos para difundir-se pelo concreto e relacionar os resultados com a difusão de cloretos. Considerando este último aspecto, Sharif et al. (1997) usaram técnicas de difusão de gás através de duas câmaras (preenchidas uma por hélio e outra por nitrogênio) separadas pela amostra de concreto. Os resultados, segundo o autor, mostraram-se excelentes para estimar o coeficiente de difusão efetiva de cloretos no concreto. Stanish et al. (1997), porém, apontam dificuldades nesses ensaios, entre elas: correlações muito fracas (difusividade), avaliações não condizentes com toda a massa de concreto (absorção), possíveis dificuldades na performance do experimento (técnica de difusão de gás). Ainda, nenhuma dessas técnicas considera o efeito particular da fixação de cloretos.

1.6 Características do concreto contra a penetração de cloretos

Estando o concreto exposto a ambiente contaminado por cloretos, a taxa de difusão será dependente da qualidade do concreto que protege a armadura. Essa taxa será grandemente influenciada pela estrutura de poros existente no concreto que, por sua vez, depende de uma série de fatores que vão desde a dosagem até o tempo de cura. Assim, quando a estrutura de poros torna-se mais fechada, ou compacta, os íons cloreto são obrigados a difundir-se por canais mais tortuosos.

O *fator a/agl* é apontado como fator principal na resistência do concreto à penetração de cloretos (Ngala et al., 1995 e Aïtcin, 2000), sendo que sua redução afeta profundamente a conformação da estrutura de poros da matriz do concreto em idades iniciais. Com o aumento do *tempo de cura*, essa estrutura vai se tornando menos permeável pelo gradativo preenchimento dos produtos de hidratação. Segundo Hoffmann e Dal Molin (2002), a redução da relação a/agl gera concretos de melhor qualidade, e menos influenciáveis pelas outras variáveis (idade de cura, temperatura de exposição durante a cura e teor de adição). A importância da cura é confirmada em estudos realizados por Malhotra e Ramezaniampour (1995), onde foram verificados acréscimos na resistência à penetração de cloretos e redução da porosidade com o aumento do tempo de cura.

A *fixação de cloretos* acontece principalmente pelas fases aluminato do cimento. O C_3A é a fase mais apontada na literatura como capaz de fixar o cloreto formando o cloroaluminato de cálcio ou sal de Friedel ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$). Reação semelhante ocorre com o C_4AF resultando cloroferrato de cálcio. Conclui Neville (1997) que, quanto mais alto o teor de C_3A do cimento, maior quantidade de cloretos são retidos. Estes, além de se apresentarem quimicamente combinados, podem estar sob duas outras formas no interior do concreto: fisicamente retidos por adsorção à superfície dos poros de gel ou dissolvidos na fase aquosa dos poros (íons livres). É sob a forma de íons que os cloretos são capazes de iniciar e participar da corrosão.

Assim, a *composição do cimento* também é citada como influente na proteção do concreto contra os cloretos (Helene, 1993). Hussain et al. (1995) calcularam o teor máximo de cloretos (por massa de cimento) que pode ser adicionado em pastas de

cimento com diferentes teores de C_3A (2,4%, 4% e 14%) com adição de álcalis (Na_2O equivalente de 0,65% e 1,2%) e sulfatos (SO_3 de 1,71%, 4% e 8% em relação à massa cimento), para alcançar a relação iônica Cl^-/OH^- de 0,3%. Encontrou efeito benéfico quando o teor de C_3A aumenta (de 2,4% para 14% o teor de cloretos limite aumenta 2,85 vezes), efeito pequeno na adição de álcalis, efeito moderado na adição de sulfato (dependente da composição do cimento) e efeito considerável no aumento de temperatura de exposição para todos os tipos de cimento (de 20° para 70°C há diminuição no teor limite de cloretos de 5 vezes). A composição química também influencia fortemente a velocidade de hidratação do cimento.

Mohammed e Hamada (2003), através de uma série de resultados de longa duração em concretos submetidos a ambiente marinho, propuseram relações lineares entre cloretos livres e totais para vários tipos de cimento com cloretos totais variando de 1,11 (cimentos com escória) até 1,48 (cimento de aluminato de cálcio). No entanto, Andrade et al. (1999) afirmam que o mecanismo de fixação de cloretos ainda não é bem entendido devido à habilidade de fixação da matrix depender de uma série de fatores, como a composição química da solução dos poros, tipo de cimento, tipo e teor de adição mineral utilizada, entre outros.

As *práticas construtivas* devem garantir que a massa de concreto envolva a armadura de aço de forma contínua, homogênea e respeite as dimensões de projeto, como é o caso da espessura de cobertura. Comenta Helene (1986) que, principalmente em lajes, o cobertura adequado das armaduras é naturalmente dificultado pela sua delgada espessura e pela movimentação de pessoal e equipamentos durante a etapa de concretagem.

As *fissuras* permitem o acesso fácil dos agentes agressivos, da umidade e do oxigênio, o que acelera o processo corrosivo (Helene, 1993). Segundo Paulsson-Tralla e Silfwerbrand (2002), o ingresso de cloretos é dependente da profundidade das fissuras no cobertura. Usando modelos numéricos para garantir vida útil de 80 anos em pontes e evitar concentração máxima de cloreto/cimento por massa de 0,3% e 0,6% na armadura, os autores sugerem que o concreto de cobertura deve ser aumentado em aproximadamente 50% da profundidade da fissura.

As *adições minerais*, como cinza volante (CV), cinza de casca de arroz, sílica ativa e escória (detalhada no Capítulo II) proporcionam o chamado refinamento dos grãos e dos poros, produzindo concretos de menor permeabilidade aos cloretos. A literatura registra ainda que adições minerais também atuam na fixação de cloretos.

CAPÍTULO II

ESCÓRIA DE ALTO FORNO E ATIVADORES QUÍMICOS

2.1 Introdução

O material aglomerante conhecido como escória de alto forno tem sua origem na fabricação do aço. Ao longo dos anos, foi necessário encontrar destino adequado a esse material devido a sua elevada produção. Segundo Neville (1997), para cada tonelada de ferro gusa, são produzidas 300Kg de escória. Segundo John, 1995, inicialmente, a escória formava material cimentante com pequenas adições de cal hidratada, mas houve crescente desinteresse por esse tipo de uso devido à resistência mecânica relativamente baixa, especialmente nas primeiras idades. O uso que obteve destaque e perdura até os dias de hoje é a adição ao cimento Portland.

Segundo dados do IBS, o Brasil ocupa lugar de destaque na produção siderúrgica mundial, ocupando no ano de 2004 a oitava colocação (31,4 milhões de toneladas). Em 2003, a produção nacional de 31,2 milhões de toneladas gerou 13,5 milhões de toneladas de resíduos, sendo 80% desse total (10,8 milhões de toneladas) formado por escória de alto forno e de aciaria. A substituição do cimento Portland pela escória de alto forno e a utilização da escória de aciaria na construção civil (pavimentos) têm consumido grande parte desses resíduos, sendo seus resultados financeiros representativos nas companhias siderúrgicas.

Os cimentos nacionais que possuem adição de escória de alto forno são o CP II E (cimento Portland composto) e CP III (cimento Portland de alto forno). O primeiro possui adição de 6 a 34% de escória sendo normalizado pela NBR 11578. O cimento CP III recebe adição de 35 a 70% e é normalizado pela NBR 5735. De acordo com a NBR 5737, os cimentos de CP III que contiverem entre 60 e 70% são considerados resistentes aos sulfatos e recebem, portanto, a terminação RS.

De acordo com Neville (1997), a norma européia ENV 197-1:1992 admite teores de escória em 5 níveis, segundo seu tipo: II/A (6 a 20%), II/B (21 a 35%), III/A (36 a 65%), III/B (66 a 80%) e III/C (81 a 95%). Segundo Metha e Monteiro (1994), a ASTM

C595 admite para o cimento Portland tipo IS teores de escória que vão desde 25 até 70%.

A utilização de escória no cimento Portland, impulsionada pela questão ambiental, traz modificações nas propriedades de interesse da engenharia. Devido à redução do calor de hidratação, esses cimentos podem ser utilizados em estruturas nas quais seja necessário o controle da elevação da temperatura como barragens de gravidade (Neville, 1997). A escória também aumenta o desempenho de concretos sujeitos ao ataque por sulfato e quando há possibilidade de reação álcali-sílica.

No entanto, o uso de elevados teores (> 70%), devido às reações pozolânicas se procederem de forma lenta, também provocam redução na resistência mecânica nas idades iniciais em comparação ao concreto de somente cimento Portland. Desse modo, medidas que tendem a ativar a mistura aglomerante e elevar a resistência mecânica inicial podem aumentar o campo de aplicação desse tipo de cimento.

2.2 Produção

A escória de alto forno é um subproduto obtido numa das etapas da produção do aço. Na obtenção do ferro-gusa, o minério de ferro em conjunto com as cinzas do coque e o calcário (utilizado como fundente) são introduzidos num alto-forno onde a temperatura alcança 1500° C. Por diferença de densidade, o ferro-gusa é obtido na base do alto-forno e o líquido sobrenadante (cal e impurezas do minério e do coque) corresponde à escória.

Ao sair do forno, a escória pode ser submetida a um resfriamento lento com formação de um produto bastante cristalizado que pode ser moído e granulado para se obter grãos densos e resistentes utilizados como agregado. No entanto, um resfriamento rápido, com água ou com a combinação água-ar, permite a formação de um material em sua maioria vítreo, de granulometria muito grosseira e com certo teor de umidade. A escória vítrea pode formar material cimentante se as partículas forem secas e granuladas a partículas, em sua maior parte, menores que 45 µm, o que corresponde a aproximadamente 500 m²/kg de área específica Blaine (Metha e Monteiro, 1994).

2.3 Reatividade

Segundo John (1995), a reatividade da escória de alto forno, ou seu desempenho como material aglomerante, é dependente tanto da sua composição química quanto do seu teor de vidro. A composição química do vidro vai influenciar na solubilidade da escória, a possibilidade de precipitação e composição química dos hidratados. O teor de vidro é importante porque uma escória totalmente cristalina não será capaz de hidratar-se em condições normais de temperatura e pressão. Conforme o mesmo autor, as escórias das principais siderúrgicas nacionais apresentam teor de vidro acima de 90%.

A escória é constituída principalmente por cal, sílica, alumina e magnésio e, em menores quantidades, por enxofre, na forma de sulfeto, e óxidos de ferro e magnésio. O conteúdo desses componentes pode variar dependendo da natureza do minério, da composição do fundente, do consumo de coque e do tipo de gusa fabricado, mas segundo o Comitê 233 do ACI, as variações de composição química em escórias de diferentes origens são muito maiores do que quando ela é proveniente de uma única usina. Segundo Aïtcin (2000), numa mesma usina, os metalurgistas observam composição química muito constante, pois qualquer desvio dela traduz-se em demandas significativas de energia e em custos adicionais.

A Tabela 2.1 apresenta a composição química típica da escória de alguns países e as últimas duas linhas apresentam, respectivamente, a composição de escória brasileira e os limites recomendados por Neville (1997) para uso em concreto.

Além dos já citados composição química e fração vítrea, o Comitê 233 do ACI apresenta como fatores determinantes na eficiência da escória em misturas compostas a concentração alcalina do sistema reativo, a finura da escória e do cimento Portland e a temperatura durante os períodos iniciais.

2.4 Efeitos da adição de escória ao cimento Portland

Ao contrário das pozolanas, segundo Metha e Monteiro (1994), a escória em presença de umidade pode formar produtos cimentantes (não necessitando do hidróxido de cálcio). Entretanto, a quantidade de produtos cimentantes formados e a taxa de formação são insuficientes para aplicação do material para fins estruturais. Quando utilizado em conjunto com o cimento Portland, a hidratação da escória é acelerada na presença de hidróxido de cálcio e gipsita (sendo, portanto, os seus primeiros ativadores químicos).

Tabela 2.1 – Composição química de escórias de alto forno (Moranville-Regourd, 1998).

Fonte	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	MnO	S
UK	40	35	16	6	0,8	0,6	1,7
Canadá	40	37	8	10	1,1	0,7	2,0
França	43	35	12	8	2,0	0,5	0,9
Alemanha	42	35	12	7	0,3	0,8	1,6
Japão	43	34	16	5	0,5	0,6	0,9
Rússia	39	34	14	9	1,3	1,1	1,1
África do Sul	34	33	16	14	1,7	0,5	1,0
USA	41	34	10	11	0,8	0,5	1,3
Brasil (CST)*	42	34	12	8	-	-	-
Neville (1997)	40-50	30-40	8-18	0-8	-	-	-

* Fonte: www.cst.com.br (acessado em 01/09/05)

Quando as pozolanas (como cinza volante, cinza de caca de arroz e sílica ativa) formam o material aglomerante em conjunto com o cimento Portland e são colocadas em contato com a água, há na hidratação do cimento liberação do CH que é consumido pela pozolana com formação de C-S-H secundário. Essa reação também acontece quando o aglomerante é formado pela escória e cimento Portland, entretanto, como a escória é rica em cálcio, há o seu consumo na reação pozolânica com formação de C-

S-H secundário de maior relação CaO/SiO₂. Assim, em ordem de relação C/S o C-S-H formado diminui na ordem (NT Metha e Monteiro, 1994):

Cimento Portland > escória de alto-forno > pozolana

Como resultado das mudanças provocadas pela reação pozolânica, concretos com escória têm comportamento diferenciado em relação a concretos com somente cimento Portland. Primeiramente, porque a formação de C-S-H secundário, apesar de menor densidade comparada ao C-S-H primário (produzido pelo cimento), é muito eficiente no preenchimento dos grandes capilares em misturas contendo adições minerais (Wee et al., 2000) e esse efeito é conhecido como refinamento dos poros. A microestrutura torna-se relativamente mais densa, tortuosa e descontínua (portanto, menos permeável a difusão de íons agressivos) comparada com concretos com somente cimento Portland em idade similar.

O segundo efeito é a diminuição no teor de CH, tanto pelo consumo na reação pozolânica quanto pela substituição do cimento por escória que gera efeitos benéficos quando há possibilidade de reação álcali-agregado ou ataque por sulfato, por exemplo. No entanto, em relação à carbonatação, Stumpp (2003) e Sperb (2003) encontraram maior profundidade de carbonatação quando o teor de escória foi de 70%. Cabe salientar, também, que há transformação do tamanho dos grãos de CH em grãos pequenos e menos orientados e esse efeito é conhecido como refinamento dos grãos.

O terceiro efeito é o desenvolvimento mais lento da liberação de calor e da resistência mecânica. Cita Neville (1995) que cimentos compostos com alto teor de escória podem ser usados em estruturas nas quais devem ser lançadas grandes quantidades de massa de concreto, de modo que seja necessário o controle do calor de hidratação desprendido nas primeiras idades, sendo possível controlar a abertura de fissuras de origem principalmente térmica.

O desenvolvimento e a intensidade da reação química são controlados pela finura da escória. Metha e Monteiro (1994) esclarecem que partículas de escória menores que 10 µm contribuem para a resistência inicial do concreto até 28 dias; partículas de 10 µm a 45 µm contribuem para a resistência a longa idade, mas

partículas maiores que 45 μm são difíceis de se hidratar. Além da finura da escória, a reatividade da escória pode ser influenciada pela composição química e pelo teor de fase vítrea da escória.

No caso específico de ambientes contaminados por cloretos, há também o efeito do aumento da fixação de cloretos em concretos que incorporam escória (Xu, 1997, e Luo et al., 2003) sendo esse efeito crescente quando há aumento no teor de substituição do cimento Portland. Dhir et al. (1996) relatam que essa capacidade de fixação é resultado do aumento das fases aluminato na mistura aglomerante. A reação aglomerante-íons cloretos afeta diretamente a penetração de cloretos e serão, por isso, abordados conjuntamente no item 2.4.3.

Os subitens que seguem resumem trabalhos nacionais e internacionais sobre a influência da substituição parcial de cimento Portland por escória nas propriedades estudadas nessa pesquisa: solução dos poros e condutividade elétrica, porosidade, penetração e fixação de cloretos e resistência à compressão.

2.4.1 Solução dos poros e condutividade elétrica

O estudo da solução dos poros do concreto torna-se particularmente importante no ensaio da ASTM C1202, porque este é bastante influenciado pela condutividade específica dessa solução e, o uso de materiais cimentícios, como a escória de alto forno, tem efeito considerável na transformação de sua composição. Para Shi et al. (1998), a solução dos poros é irrelevante no transporte de íons cloreto no concreto e, desse modo, a ligação entre carga passante (resultado do ensaio) e a permeabilidade a cloretos torna-se bastante complexa devido à inclusão dessa variável (Wee et al., 2000).

Quando somente cimento Portland é misturado com água, apreciáveis concentrações de Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , OH^- e SO_4^{2-} dos componentes do cimento entram em solução. Após pega e hidratação inicial, Ca^{2+} e SO_4^{2-} diminuem até valores negligenciáveis, deixando a solução composta essencialmente por hidróxidos alcalinos dissolvidos (Shi et al., 1998). Segundo Andrade (1993), o íon OH^- pode transportar mais

proporção de corrente (referindo-se ao ensaio da ASTM C1202) que o íon Cl^- devido a sua elevada condutividade iônica (ver Tabela 3.8).

Sobre a concentração de íons OH^- em misturas que utilizam escória, relatam Shi et al. (1998) que a substituição de 60 a 70% do cimento por escória causa grande redução em sua concentração, mas não modifica consideravelmente o pH. Há também acréscimo na concentração de Na^+ e decréscimo em K^+ . Os autores ainda constataram que 50% de escória em substituição do cimento de pastas (a/agl de 0,6) resultam em redução na condutividade elétrica de 3,25% aos 28 dias. A redução aumentou com o tempo, alcançando 24% aos 730 dias.

Costa (2001) estudou a solução dos poros para diferentes finuras de escória (300, 500 e 700 m^2/kg) com teores de 30% e 70%, e em idade de cura de 91 dias. Os resultados indicaram que todas as misturas apresentaram redução nos íons K^+ , SO_4^{2-} e OH^- com redução máxima do pH de 3% em relação ao concreto de referência. A condutividade elétrica resultante das misturas com escória foi consideravelmente reduzida: para 300 m^2/kg e 70% de escória o resultado foi de 47% da mistura de referência. Dal Ri (2002) encontrou 66% de condutividade da mistura de referência, para escória com 470 m^2/kg e 70% de substituição.

2.4.2 Porosidade

Nakamura et al. (1992) estudaram a influência da finura da escória (453, 786 e 1160 m^2/kg) em concretos com nível de substituição de 50% (Figura 2.1). Para as idades de 3, 7, 28 e 91 dias, todas as misturas de escória estudadas (a/agl de 0,4) apresentaram menor tamanho de poros que a mistura de referência e o volume total de intrusão de mercúrio diminuiu quando houve aumento da finura da escória. Apesar do efeito benéfico do aumento da finura da escória se confirmar também na resistência à compressão, comentam os autores que parece não haver simples relação entre as duas propriedades. Concluem que a resistência à compressão não pode ser estimada somente pelo volume total de poros.

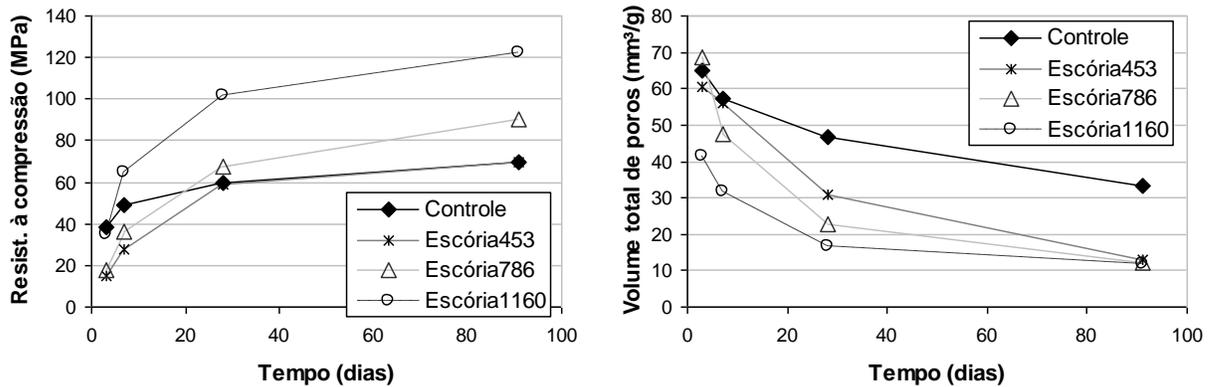


Figura 2.1 – Resistência à compressão (esq.) e porosidade total (dir.) no tempo (Nakamura et al., 1992).

Aldea et al. (2000) investigaram a porosidade de pastas com variados teores de escória e encontrou para o teor de 50% a maior quantidade de macroporos ($>0,05\mu\text{m}$), enquanto para 75% de escória a menor. O resultado pode ser analisado na Figura 2.2 abaixo.

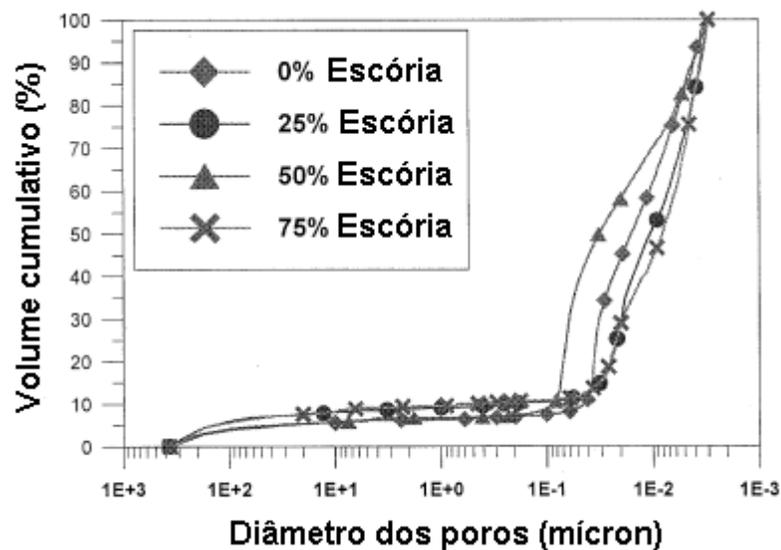


Figura 2.2 – Volume de intrusão de pastas em função do tamanho dos poros (Aldea, 2000, p.470).

2.4.3 Penetração e fixação de cloretos

Sivasundaram e Malhotra (1992) utilizaram a AASHTO T277 – 83 para avaliar a resistência à penetração de concretos com elevados teores de escória. Em ensaios aos 28 dias de cura, encontraram bastante aumento da resistência à penetração de cloretos quando há acréscimo no teor de escória. Para os concretos de somente cimento Portland (a/agl entre 0,27 e 0,39), a carga passante variou de 1283 até 2984 coulombs, enquanto que concretos com níveis de escória entre 50% e 75% (a/agl entre 0,27 e 0,38) apresentaram carga passante entre 174 e 383 coulombs.

Zhang et al. (1999) estudaram a penetração de cloretos (ASTM C1202) em concretos sem e com 55% escória com a/agl de 0,32 e 0,33, respectivamente, em dois processos de cura: um em câmara úmida por 28 dias e outro com utilização de sacos de estopa úmidos por 7 dias e depois ao ar em ambiente de laboratório, até completar 28 dias de idade. Como conclusão, os autores relatam que os concretos não são afetados significativamente pelas condições de cura, entretanto, a carga passante em concretos com escória diminui pela metade em relação ao concreto de controle nos dois processos.

Aldea et al. (2000) utilizaram duas formas de avaliar penetração de cloretos para concretos com escória em teores de 0%, 25%, 50% e 75% curados durante 28 dias. O primeiro empregou a corrente inicial (primeiros 100 segundos) do ensaio da ASTM C1202 e o segundo avaliou a frente de penetração em imersão em solução salina por 10 meses. Os resultados são apresentados na Figura 2.3.

As duas avaliações sugerem que substituições crescentes de cimento Portland por escória resultam sempre em acréscimo de resistência à penetração de cloretos. No entanto, os resultados da corrente inicial (ASTM C1202) mostraram diferenças mais expressivas quando os concretos com escória são comparados ao concreto de referência.

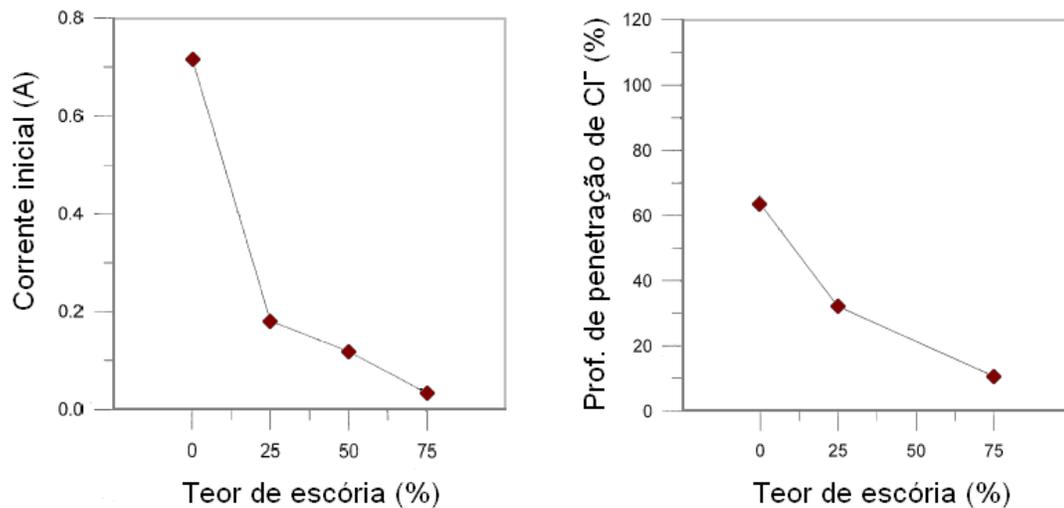


Figura 2.3 – Corrente inicial e profundidade de penetração x teor de escória (Aldea, 2000, p.468).

Wee et al. (2000) avaliaram o ensaio da ASTM C1202 em concretos com escória (30%, 55% e 70% em substituição parcial do cimento Portland) em diferentes graus de finura (Blaine de 3000cm²/g, 5000cm²/g e 8000cm²/g). Os autores utilizaram o ensaio EPCI, descrito anteriormente, para comparar frontalmente o parâmetro k e a carga passante. Assim, os resultados mostraram que os dois testes não seguiram absolutamente a mesma tendência porque, quando aumentou o grau de hidratação de 3 para 7 dias e de 7 para 28 dias, a redução da carga passante foi muito mais acentuada que a redução correspondente no parâmetro k, em todas as misturas.

Conforme explicação dos autores, o EPCI é influenciado pela estrutura de poros, pela capacidade de fixação de cloretos nas fases do cimento (C₃A e C₄AF) e também pela dupla camada elétrica formada nas paredes dos poros. Todavia, o ensaio da ASTM C1202, além de ser controlado pela microestrutura, também depende da condutividade elétrica da solução dos poros. Assim, o rebaixamento na condutividade da solução dos poros (devido a diminuição dos íons OH⁻) sugere maior ganho de resistência à penetração de cloretos quando aumenta o grau de hidratação do que realmente acontece. Além disso, os autores sugerem que durante o ensaio acelerado o impulso gerado pelo campo elétrico externo impeça, ou diminua, a interação química entre cloretos e o concreto (como fixação de cloretos e dupla camada elétrica).

Dhir et al. (1996) estudaram a difusão de cloretos e permeabilidade intrínseca em concretos com níveis de substituição de escória de 0%, 33%, 50% e 67% e a fixação de cloretos em pastas com os mesmos níveis de escória. Os resultados para relação a/agl de 0,55 aos 28 dias são apresentados na Figura 2.4. Assim, como todos os concretos apresentaram permeabilidade intrínseca similar, a maior capacidade de fixação de cloretos de misturas com escória tornou-se o fator dominante da maior resistência à penetração de cloretos.

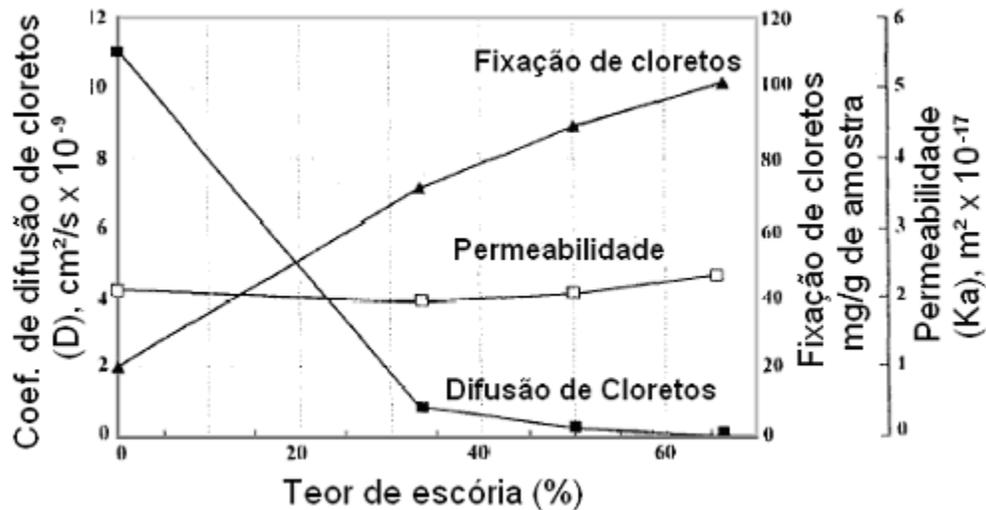


Figura 2.4 – Efeito do nível de substituição de escória na permeabilidade intrínseca, difusão de cloretos e capacidade de fixação de cloretos (Dhir et al., 1996, p. 1772).

Luo et al. (2003) também encontraram um aumento considerável na capacidade de fixação de cloretos tanto interno quanto externamente, principalmente pela fixação química (através de análises de microestrutura, a escória foi capaz de formar mais sal de Friedel). Os coeficientes de difusão de cloretos livres e totais tiveram considerável decréscimo quando 70% de escória foi adicionado. A melhora da estrutura dos poros também foi verificada.

Com relação aos cimentos comercializados no Brasil, cabe salientar seus teores de C_3A e C_4AF . Jucá et al. (2002) apresentaram em seu trabalho a composição química de cimentos nacionais: enquanto para os cimentos CP I – S – 32 e CP V – ARI os teores de C_3A e C_4AF eram em torno de 8,5%, respectivamente, para o cimento CP III –

32 o teor de C_3A foi 24% (teor C_4AF de 7%). Estes valores indicam tendência de maior fixação de cloretos por parte dos cimentos de alto-forno. Cabe salientar, ainda, que o cimento pozolânico (CP IV - 32) também apresentou altos teores desses compostos. Regattieri et al. (1999) estudaram a penetração de cloretos nos cimentos brasileiros CP I-S-32, CP III-32 e CP IV-32 em concretos de relação a/agl 0,35 a 0,70. Encontraram para o CP III a maior resistência à penetração de cloretos aos 28 dias e, aos 63 dias, teve desempenho inferior apenas ao cimento pozolânico.

Costa (2001) estudou a penetração de cloretos (ASTM C1202) em concretos com escória em diferentes níveis de finura. Em teores de 35% e 70% de escória, o autor verificou que o aumento no teor de substituição sempre resultou em aumento na resistência à penetração de cloretos. No entanto, o aumento da finura de 300 m^2/kg para 700 m^2/kg resultou em leve aumento da carga passante, embora os valores das misturas compostas fossem sempre inferiores ao concreto de referência.

Mohammed et al. (2002) investigaram concretos com 15 anos de exposição à zona das marés com escória em três níveis de substituição: baixo (5 a 30%), médio (30 a 60%) e alto (60 a 70%). Resultados da análise do perfil de cloretos livres mostraram excelente acréscimo do coeficiente de difusividade quando há inclusão de escória (Figura 2.5). A análise da porosimetria verificou que superficialmente havia maior compacidade do que em regiões interiores do concreto e esse efeito foi creditado à deposição de produtos da reação água do mar com o concreto. A redução no volume de poros foi mais predominante nos concretos com maior teor de escória. Resultados de corrosão de barras de aço nas amostras de concreto indicaram tendência similar à difusão de cloretos: quanto maior foi o teor de escória, maior proteção à corrosão.

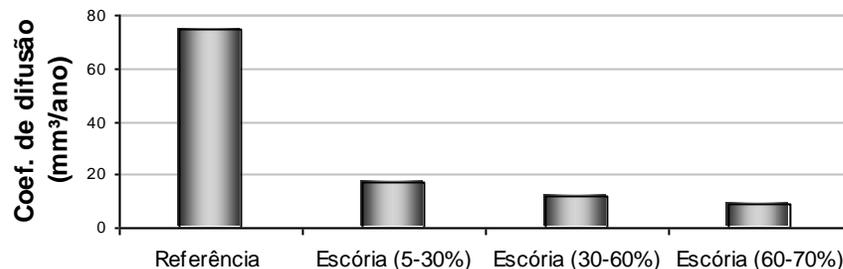


Figura 2.5 - Coeficiente de difusão para 15 anos de exposição (Mohammed et al., 2002).

2.4.4 Resistência à compressão

Dhir et al. (1996) estudou concretos de a/agl 0,55 com níveis de escória de 0%, 33%, 50% e 67%, em cura úmida de 28 e 90 dias. Os resultados obtidos mostraram que o aumento no teor de escória foi prejudicial à resistência mecânica inicial, entretanto, aos 90 dias os resultados tenderam a aproximar-se.

Sivasundaram e Malhotra (1992) relatam que a desvantagem da utilização de altos teores de escória é a baixa resistência em baixas idades. Assim, em idade de 1 dia para os concretos de somente cimento Portland (a/agl entre 0,27 e 0,39), a resistência à compressão variou de 16,4 até 37,2 MPa, enquanto que concretos com níveis de escória entre 50% e 75% (a/agl entre 0,27 e 0,38) apresentaram resistência entre 3,8 e 6,9 MPa.

Os autores ainda verificaram a resistência à tração e o módulo de Young. Constataram que concretos de somente cimento Portland tendem a aumentar a sua resistência à tração quando há inclusão e aumento no teor de escória. Acreditam que esse efeito é devido ao forte vínculo no sistema cimento/escória/agregado causado pela forma e textura das partículas de escória. Entre os ensaios de 14 dias de cura, em concretos de a/agl 0,27 com somente cimento Portland, a tensão de tração foi 7,2Mpa. Em concretos com 65% de escória e mesma relação a/agl, a tensão de tração foi de 8,7MPa. Quanto ao módulo de elasticidade, ele também aumenta quando cresce o teor de escória e decresce a relação a/agl. Na idade de 28 dias, os valores variaram de 32,6GPa (a/agl de 0,45 e 50% escória) até 45,1GPa (a/agl de 0,28 e 70% escória).

Zhang et al. (1999) estudaram a resistência de concretos sem e com 55% escória com a/agl de 0,32 e 0,33, respectivamente, em dois processos de cura (3, 7 e 28 dias): um em câmara úmida até a data de ensaio e outro com utilização de sacos de estopa úmidos por 7 dias e depois ao ar em ambiente de laboratório. Como conclusão, os autores relatam que os concretos não são afetados significativamente pelas condições de cura, apresentando resultados semelhantes entre os dois processos de cura.

Wang, et al. (2002), estudando a resistência mecânica em argamassas com escória aos 28 dias, concluíram que o teor ótimo de escória fica em torno de 25%

(dependendo da finura da escória) sendo que a resistência é 10% superior ao concreto de controle. Os autores atribuem o teor ótimo ao fato de os produtos da reação pozolânica e as partículas não hidratadas de escória preencherem os vazios entre as partículas de cimento do sistema, aumentando assim a resistência mecânica. Quando o teor de escória é maior, não ocorre o empacotamento ótimo entre as partículas e os vazios capilares, então, crescem.

Aldea et al. (2000) também encontraram teor ótimo de escória em 25%. Pela análise de concretos com teores crescentes de escória (as 28 dias de cura úmida), a resistência à compressão apresenta um pico quando o teor atinge 25% e além de 50% o teor de escória traz efeitos negativos na resistência. Os resultados podem ser observados na Figura 2.6.

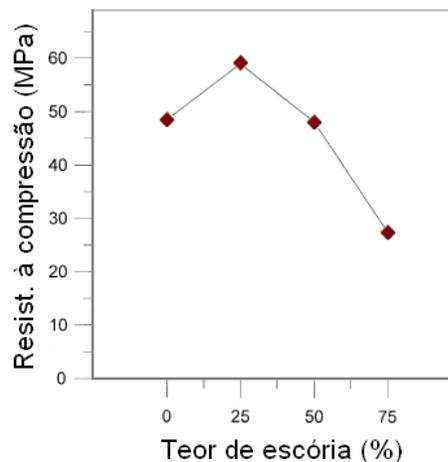


Figura 2.6 – Variação da resistência à compressão com o teor de escória (Aldea, 2000, p.467).

Wee et al. (2000) estudaram concretos com incorporação de escória (30%, 55% e 70% em substituição parcial do cimento Portland) em diferentes graus de finura (Blaine de 3000cm²/g, 5000cm²/g e 8000cm²/g). Os resultados mostraram que, para um dado teor de escória e idade de cura, quanto maior for sua finura, maior será a resistência à compressão. Em idades iniciais (3 dias), os concretos com escória apresentaram resistência decrescente com o aumento no teor de escória, sendo portanto a maior resistência alcançada pelo concreto de controle. Com o aumento do

grau de hidratação, em geral, a quantidade de ganho de resistência à compressão é muito maior para os concretos com elevados teores de escória (55% e 70%).

Sobre a influência da finura da escória, Costa (2001) estudou três níveis de superfície específica Blaine (300 m²/kg, 500 m²/kg e 700 m²/kg) e relação a/agl (0,35; 0,50 e 0,65). Nas idades de 7, 28 e 91 dias, em teor de substituição de 35%, a mistura composta apresentou resistência mecânica menor que a do concreto de referência para a finura de 300 e, em geral, maior quando a finura passou para 700 m²/kg. Quando o teor de substituição foi de 70%, a resistência mecânica foi sempre inferior, porém com o aumento da finura, os valores tenderam a se aproximar do concreto de referência.

Brooks et al. (1992) utilizaram em seus estudos escórias típicas de quatro regiões (Reino Unido, Bélgica, África do Sul e Japão). Comparando os resultados de resistência mecânica em igualdade de idade (7, 14, 28, 56, 84 e 112) em teor de escória de 30, 50 e 70% e a/agl (0,43), a variação máxima foi de 19%. Quanto aos resultados de módulo de elasticidade e de deformação, os autores concluem que a influência do tipo de escória é pequena e não pode ser associada quantitativamente com a composição química.

Mohammed et al. (2002) investigaram concretos expostos por 15 anos à zona das marés. Os resultados de resistência à compressão ultrapassaram os de 28 dias (em cura úmida) sendo esse efeito creditado à continuidade da hidratação e à deposição de produtos da reação da água do mar com o concreto (como etringita, sal de Friedel e hidróxido de magnésio). Segundo revisão dos autores, concretos com somente cimento Portland e com adição de escória tem sua resistência acrescida até a idade de 5 anos e, a partir daí, reduzida. Na idade de 20 anos torna-se a mesma ou menor que a resistência de 28 dias devido à formação de etringita.

2.5 Ativação química da escória de alto forno

O problema das baixas resistências iniciais de concretos que incorporaram altos teores de escória de alto forno pode ser superado pelo uso de ativação química (Collins e Sanjayan, 1999). Existe também a possibilidade de ativação térmica e mecânica (pelo

aumento da finura da escória), entretanto, essas alternativas podem requerer, entre outros, equipamentos especiais que podem onerar o custo de produção.

Os ativadores químicos são compostos alcalinos, geralmente à base de álcalis e sulfatos. Estes, conforme John (1995), tendem a acelerar o processo de hidratação da escória pela elevação da velocidade de dissolução da escória (devido à elevação do pH) e pela antecipação do início de precipitação dos compostos hidratados (devido ao aumento na concentração de íons em solução ou à alteração da solubilidade dos compostos da escória).

Puertas et al. (2000) citam que as vantagens da ativação química da escória são: alta resistência mecânica inicial e, também, menores custos energéticos em seu processo de fabricação. As desvantagens são: pega rápida e alta retração com formação de microfissuras. Para Collins e Sanjayan (1998), escória ativada produz baixo calor de hidratação e melhor durabilidade que concretos de somente cimento Portland. Os autores ainda acrescentam que o principal produto formado na ativação alcalina de escória ainda é o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) sendo diferente daquele formado pelo cimento Portland pela sua relação C/S menor. A formação de outros produtos depende do tipo e da quantidade de ativador usado, estrutura e composição da escória e das condições de cura.

Quanto às formas de adição do ativador químico ao concreto, existem três: em solução, em estado sólido com ativador e escória misturados ou, ainda, em estado sólido sendo escória e ativador adicionados separadamente. Em estudos de Wang et al. (1994), o uso de Na_2SiO_3 em estado sólido não somente resultou em menor resistência mecânica, como também resultou em maior variação dos resultados do que a adição na forma dissolvida. Utilizando um ativador de alta solubilidade em água (NaOH), a forma de adição sólida e a dissolvida produziram adequada ativação com pequena diferença nas resistências. Assim, apesar de interesses comerciais em adicionar o ativador na forma sólida (escória ativada pronta para o uso), a forma dissolvida produz a mistura de maior homogeneidade possível sendo, portanto, a indicada.

Puertas et al. (2000) estudaram a ativação alcalina de pastas em misturas aglomerantes com somente escória e cinza volante com NaOH (em solução de 2 e

10M). A resistência mecânica em diferentes idades de ensaio mostrou ser sempre crescente quando o aglomerante teve aumento na proporção de escória (até ser 100%) e o ativador utilizado na maior concentração (10M). Testando a influência da temperatura de cura (uma de 25°C e outra com 65°C nas primeiras 5 horas e posteriormente 25°C) no desenvolvimento da resistência mecânica, os autores encontraram tendências alternadas com o decorrer do tempo. O aumento da temperatura foi benéfica a 1 dia de idade e prejudicial em idades avançadas (28 e 90 dias). No entanto, a influência da temperatura foi menos significativa que a influência dos outros dois parâmetros estudados: teor escória/cinza volante e concentração do ativador.

Shi e Day (1995) monitoraram o calor de hidratação de escórias ativadas com NaOH, Na₂CO₃, Na₂SiO₃.5H₂O, Na₃PO₄ e NaF, à 25 e 50°C. Os resultados mostraram que o pH inicial da solução ativadora tem importante função na dissolução da escória para a formação inicial de compostos de cálcio. Isso porque quantidades maiores de OH⁻ em solução são capazes de aumentar a dissolução da escória, colocando mais íons em solução com maior formação de produtos hidratados. Com o desenvolvimento da hidratação, esta passa a ser comandada pela reação entre ânion ou grupo aniônico do ativador e o Ca²⁺ dissolvido da superfície dos grãos de escória. Ainda, a taxa de liberação de calor para ativação e calor total liberado, em alguns casos, superou o cimento Portland. Desse modo, geralmente, cimentos de escória ativada não podem ser considerados como de baixo calor de hidratação.

Bakharev et al. (1999) investigaram a ativação de escória com diferentes compostos (silicato de sódio líquido, hidróxido de sódio, carbonato de sódio, fosfato de sódio e a combinação desses ativadores). O melhor ativador foi o silicato de sódio, com resistência à compressão sempre superior à referência (100% de cimento Portland) com desempenho dependente do módulo da solução (SiO₂/Na₂O) e da concentração de álcalis. Os autores utilizaram o ativador de melhor desempenho em pastas e argamassas compostas de 30% de cimento Portland e 70% de escória, mas os resultados de resistência à compressão foram inferiores aos da escória ativada sozinha e, então, esse tipo de mistura não foi desenvolvida. Em altas concentrações de álcalis, o silicato de sódio ainda apresentou preocupante retração com fissuras claramente

visíveis. Baseado em estudos de trabalhabilidade e resistência à compressão os autores recomendam a ativação de escória com silicato de sódio com módulo ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) de 0,75 e teor de Na de 4%.

Segundo Wang et al. (1994), usualmente são necessários 2 a 8% de Na_2O sobre a massa de escória para promover a sua adequada ativação. Acréscimos nessa dosagem alcançam um determinado teor (dependente da escória, ativador ou cura) onde não há aumento significativo na resistência mecânica e propriedades indesejáveis como eflorescências e fragilidade são aumentadas devido ao efeito de mais álcalis livres. Além disso, há aumento desnecessário do custo do concreto. Portanto, o autor recomenda a dosagem de 3 a 5,5% de Na_2O sobre a massa de escória.

Collins e Sanjayan (1998) trabalharam com o efeito combinado de NaOH e Na_2CO_3 em pastas ($a/agl = 0,50$) curadas à temperatura de 23 °C. Os resultados mostraram que pastas (100% escória) ativadas com NaOH em combinação com Na_2CO_3 apresentaram resistências semelhantes à pasta de referência com 1 dia de idade (com somente NaOH as resistências foram inferiores). A combinação ótima da ativação foi 5% de NaOH + 4% de Na_2CO_3 . A partir dos 7 dias de idade, a pasta ativada com o teor ótimo não apresentou ganho de resistência ficando bastante inferior à referência (que teve sua resistência dobrada dos 7 aos 28 dias). Resultados de trabalhabilidade com o tempo através do teste “mini-slump” indicaram que a escória ativada apresenta o mesmo abatimento no momento da mistura, mas com o decorrer do tempo houve perda de abatimento sendo significativa a partir de 30 min, evidenciando a ação do ativador.

2.5.1 O ativador químico Na_2SO_4

Segundo Wang et al. (1994), para melhorar algumas propriedades especiais da escória ativada, diferentes adições têm sido utilizadas. A CV em substituição da escória (até 10%) pode resultar em acréscimo da resistência, mas em altas proporções é esperada queda de performance nessa propriedade sobre cura normal. A adição de cal também tem sido utilizada para melhorar a resistência e controlar o tempo de pega. Clinquer de cimento Portland é considerada adição de mesmo efeito da cal, mas o uso

de clínquer é diferente do uso de cimento Portland porque o gesso adicionado neutraliza os componentes alcalinos e produz “mirabilite” expansiva ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) e assim é prejudicial para a resistência.

Ainda sobre o mesmo trabalho, os autores realizaram ensaios de resistência à compressão usando diferentes ativadores (Figura 2.7). Apesar de autores (Shi e Day, 1995) mencionarem que a aplicação de Na_2SO_4 não é muito eficaz em ativar misturas com 100% de escória devido a sua baixa resistência mecânica inicial, citam Wang et al. (1994) que, quando o Na_2SO_4 é utilizado como ativador, a adição de cimento Portland, cal ou clínquer resulta em um aumento drástico na resistência mecânica. Além disso, em escórias básicas ou com alta taxa $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$, adição de pequenas quantidades de outras adições alcalinas e cura a vapor são também favoráveis à ativação da escória por Na_2SO_4 . Pela correta combinação mencionada, um concreto com resistência de 70 MPa pode ser produzido, conforme Pu et al. (1988, apud Wang et al., 1994, p. 1035).

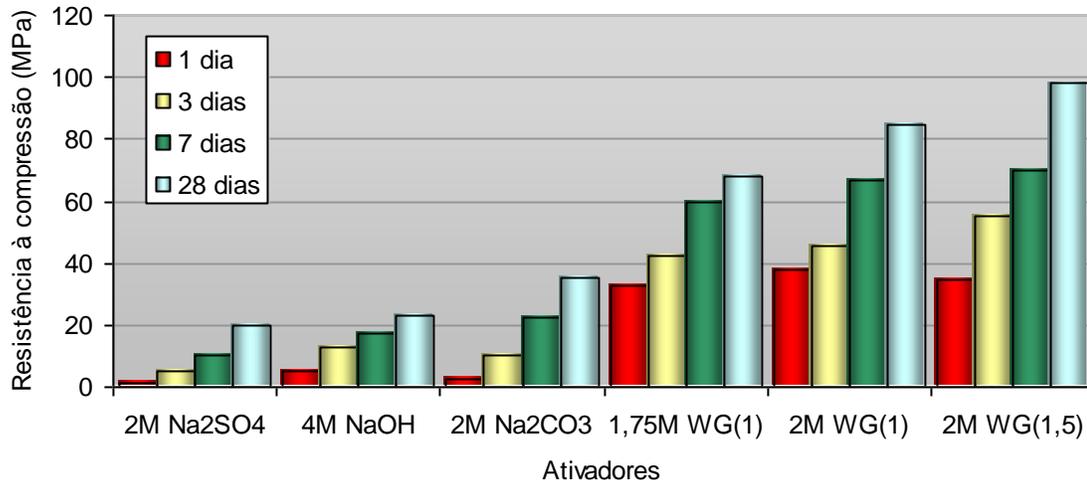


Figura 2.7 – Resistência à compressão de escória ativada por diferentes ativadores(Wang et al., 1994, p. 1035).

Qian et al. (2001) contribuíram com o estudo do ativador químico Na_2SO_4 em argamassas de cimentos compostos com CV. Primeiramente, misturas de somente CV com e sem ativação indicaram resistência mecânica insignificante. Em seguida,

realizou-se, então, a adição de 20% de cal em substituição parcial da CV, revelando efeito benéfico principalmente quando o sulfato de sódio foi utilizado. Posteriormente, além do uso de 13% cal, a substituição de parte da CV (27%) por escória foi adotada para aumentar a resistência mecânica. Assim, conforme conclusão dos autores, a escória mostrou ser muito mais sensível ao Na_2SO_4 que a cinza volante. A evolução da resistência de argamassas pode ser observado na Figura 2.8.

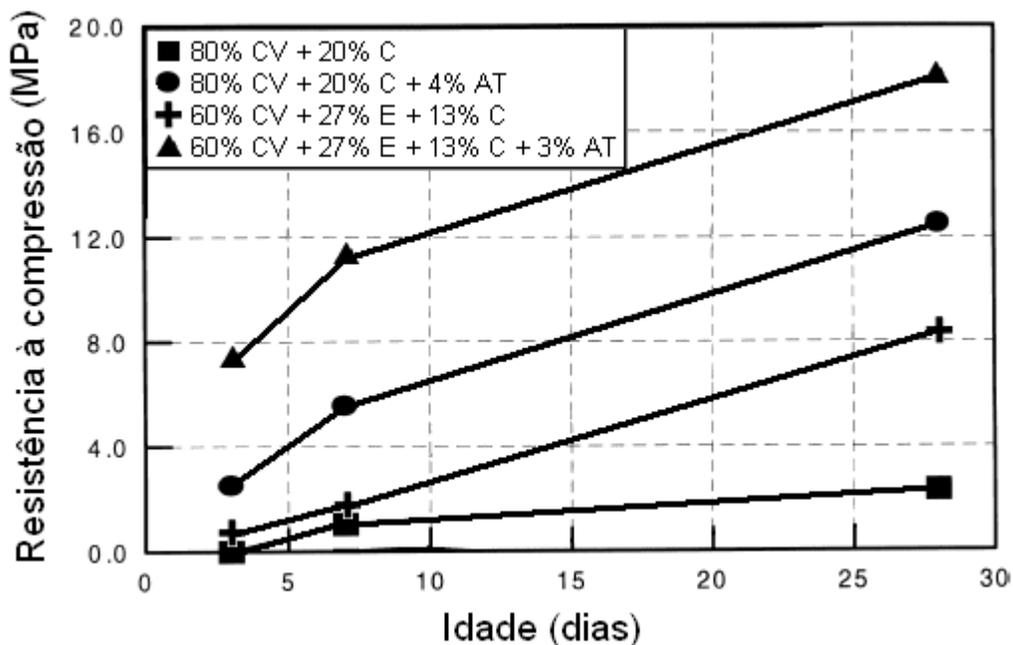


Figura 2.8 – Resistência à compressão em argamassas ativadas (adaptação de Qian et al., 2001).

O efeito da dosagem de Na_2SO_4 em soluções saturadas de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ foi estudado por Shi e Day (2000). Medidas do pH de soluções saturadas de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ mostraram que incrementos no teor desse ativador resultaram em acréscimo da alcalinidade da solução (Figura 2.9 esq.), sendo que para o teor de 4% o valor do pH foi de 12,75. O efeito do pH na dissolução de SiO_2 amorfo (Figura 2.9 dir.) mostra que após 12,5 há uma forte ascensão em sua dissolução. Visto que a energia de ligação do Ca-O e Al-O é menor que Si-O (maiores componentes da escória), no caso da escória, o efeito da elevação do pH pode resultar em sua maior dissolução e, portanto, aceleração de suas

reações químicas. Além desse efeito, a elevação da resistência inicial de pastas (cal e pozolanas naturais) ativadas foi creditada à formação de etringita.

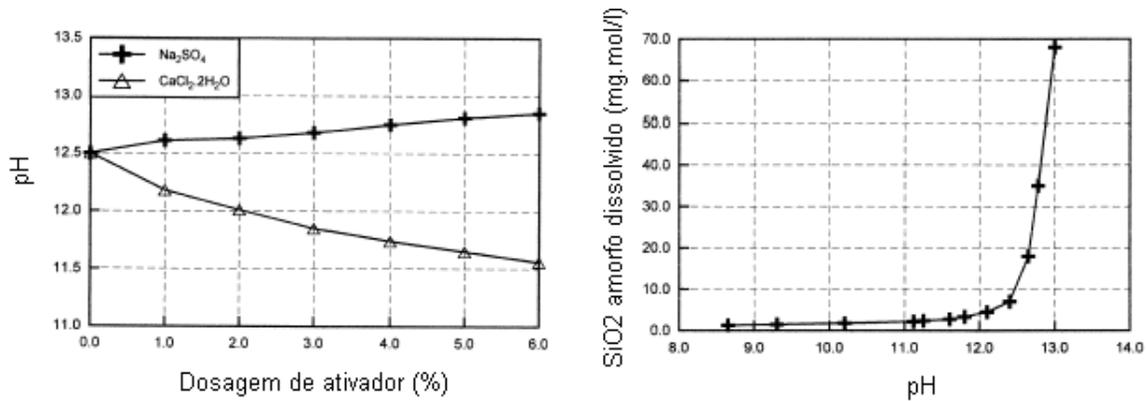


Figura 2.9 – Efeito de ativadores no pH e do pH na dissolução do SiO₂ (Shi e Day, 2000, p. 610).

Em pesquisa de Gomes (2003), a utilização de 4% de Na₂SO₄ foi bastante benéfica tanto para a resistência à compressão quanto à penetração de cloretos. Em mistura ativada com 70% de escória, o acréscimo médio de resistência em relação à mistura composta sem ativador foi de 51% aos 7 dias, atingindo 92% da resistência do concreto de referência. Utilizando o ensaio da ASTM C1202, o autor encontrou para a mistura ativada menor carga passante, apesar desta apresentar condutividade elétrica específica superior à mistura composta sem ativador e de referência.

CAPÍTULO III

MATERIAIS, MÉTODOS E TÉCNICAS

3.1 Introdução

A pesquisa experimental tem como finalidade a investigação de fenômenos, os quais são influenciados por uma infinidade de variáveis existentes na natureza. Estas, porém, precisam ser isoladas através de um ambiente controlado. Dessa forma, é possível partir de situações particulares e alcançar cada vez mais o entendimento do todo (Isaia, 1995).

Apesar da utilização do ambiente laboratorial inicialmente afastar-se das condições reais nas quais que as estruturas estão inseridas, além de necessárias, essas condições ainda possibilitam que pesquisas realizadas em diferentes tempo e local sejam aproveitadas por um mesmo pesquisador resultando grande enriquecimento de sua investigação na busca do todo.

Considerando o exposto acima e com a finalidade de utilizar a investigação experimental para observar as mudanças ocasionadas em concretos que utilizam escória de alto forno frente à penetração de cloretos e à resistência à compressão, foram moldados concretos com teores de 50 e 70% de escória em substituição parcial do cimento Portland. A ativação química, através de Na_2SO_4 , também foi investigada em teor de escória de 50%. Para efeito de comparação com as demais misturas, foi moldado, também, um concreto de referência (100% de cimento Portland).

Para o estudo da penetração de cloretos, foram realizados dois experimentos. O primeiro, bastante conhecido pelo meio científico, foi o método proposto pela ASTM C 1202 e AASHTO T-277. O segundo foi realizado através da imersão das amostras em solução salina e monitoramento da penetração de cloretos ao longo do tempo.

Para complementar a análise, foi ainda investigada a composição da solução aquosa dos poros e realizado o ensaio de porosimetria de mercúrio. Esse capítulo, portanto, se destina a informar os materiais, métodos e técnicas utilizados para alcançar os objetivos dessa investigação.

3.2 Caracterização dos materiais

3.2.1 Cimento

O cimento Portland utilizado foi o CP V-ARI, em conformidade com a NBR 5733, escolhido pela sua capacidade de fornecer rapidamente as maiores quantidades de CH para reação pozolânica com a escória. Isto se deve em parte à sua área específica Blaine (maior que a dos outros tipos de cimento) e em parte devido ao maior teor de C_3S que, segundo Metha e Monteiro, 1994, produz em sua hidratação 39% de CH, enquanto que a hidratação do C_2S produz apenas 18%.

Na Tabela 3.1 são apresentadas as características físico-mecânicas do cimento e na Tabela 3.2 a composição química do cimento e da escória. Os ensaios foram realizados em conformidade com as seguintes normas:

- Massa específica – NBR 6474;
- Finura # 0,075 mm – NBR 11579;
- Superfície específica Blaine – NBR 7224;
- Análise química – NBR 5743, 5744, 5745, 5747, 7227 e 9203;
- Resistência à compressão da argamassa normal – NBR 7215.

Tabela 3.1 – Características físico-mecânicas do cimento

Característica	Cimento CPV - ARI
Resistência (MPa) 1 dia	20,1
Resistência (MPa) 3 dias	32,9
Resistência (MPa) 7 dias	39,9
Resistência (MPa) 28 dias	50,9
Massa específica (kg/m ³)	3,06
Finura # 0,075 mm (%)	0,26
Superfície específica Blaine (m ² /kg)	423
Superfície específica BET (m ² /kg)	1,48

Tabela 3.2 – Composição química do cimento e escória.

Teor em Massa (%)	CPV - ARI	Escória
SiO ₂	19,59	34,98
Al ₂ O ₃	4,79	13,06
Fe ₂ O ₃	3,07	1,11
CaO	64,35	42,28
MgO	1,69	6,01
SO ₃	2,75	0,11
Na ₂ O	0,07	0,17
K ₂ O	0,98	0,40
Perda ao Fogo	2,09	0,71
Equivalente Alcalino	0,71	0,43

3.2.2 Escória granulada de alto forno

A escória granulada de alto forno utilizada foi procedente da indústria nacional e teve sua moagem na própria indústria, sendo assim empregada sem nenhum processamento adicional.

Sua composição química é apresentada na Tabela 3.2. Na Tabela 3.3 são apresentadas as características físicas da escória. Os ensaios foram realizados conforme as seguintes normas:

- Massa específica – NBR 6474;
- Superfície específica BET – ASTM D 3663;
- Superfície específica Blaine – NBR 7224;
- Análise química – procedimento IPT.

Tabela 3.3 – Características físicas da escória

Característica	Escória de alto forno
Massa específica (kg/m ³)	2,89
Superfície específica Blaine (m ² /kg)	510
Superfície específica BET (m ² /kg)	1,07

3.2.3 Ativador químico

O ativador químico utilizado foi o sulfato de sódio (Na₂SO₄) em teor de 4% sobre a massa de aglomerante. Sua escolha foi baseada principalmente em trabalhos conduzidos pelo GEPECON – Grupo de pesquisa e estudos em concreto da UFSM – onde Gomes (2003) e Sperb (2003) utilizaram, além de outras misturas e ativadores, a ativação química em concretos com escória (70%) e Na₂SO₄ (4%) encontrando bons resultados de resistência mecânica e durabilidade.

Utilizou-se sulfato de sódio comercial por razões econômicas.

3.2.4 Agregados

O agregado miúdo utilizado na pesquisa foi areia natural de origem quartzosa, proveniente do município de Santa Maria, RS. A areia foi submetida a um processo de lavagem, em betoneira, com finalidade de eliminar possíveis impurezas que por ventura venham a interferir no processo de hidratação, na aderência agregado/pasta ou na resistência mecânica no concreto. A areia foi ainda seca em estufa, peneirada na peneira # 4,8mm e depois estocada em caixas de madeira.

O agregado graúdo utilizado foi a pedra britada de rocha diabásica, proveniente do município de Itaara, RS. A brita foi peneirada pelas peneiras de abertura # 19mm e # 6,3mm e posteriormente lavada, seca em estufa e estocada.

A Tabela 3.4 apresenta as características físicas dos agregados e nas Figuras 3.1 e 3.2 são apresentados as curvas granulométricas para o agregado miúdo e

graúdo, respectivamente. Os ensaios foram realizados em conformidade com as seguintes normas:

- Composição granulométrica – NBR 7217;
- Massa específica do agregado miúdo – NBR 9776;
- Massa específica do agregado graúdo – NBR 9937;
- Absorção de água do agregado graúdo – NBR 9937;
- Massa unitária solta – NBR 7251;
- Índice de forma pelo método do paquímetro – NBR 7809.

Tabela 3.4 – Características físicas dos agregados

Peneiras (mm)	% Retida acumulada	
	Ag. graúdo	Ag. miúdo
12,50	58	
9,50	87	
6,30	100	
4,80	100	
2,40	100	
1,20	100	1
0,60	100	11
0,30	100	63
0,15	100	90
Módulo de Finura	6,87	1,65
Dimensão Máxima Característica -	19,00	1,20
Massa Específica - kg/dm ³	2,49	2,62
Massa Unitária Solta - kg/dm ³	1,36	1,36
Absorção de Água - %	2,61	0,50
Índice de Forma	3	

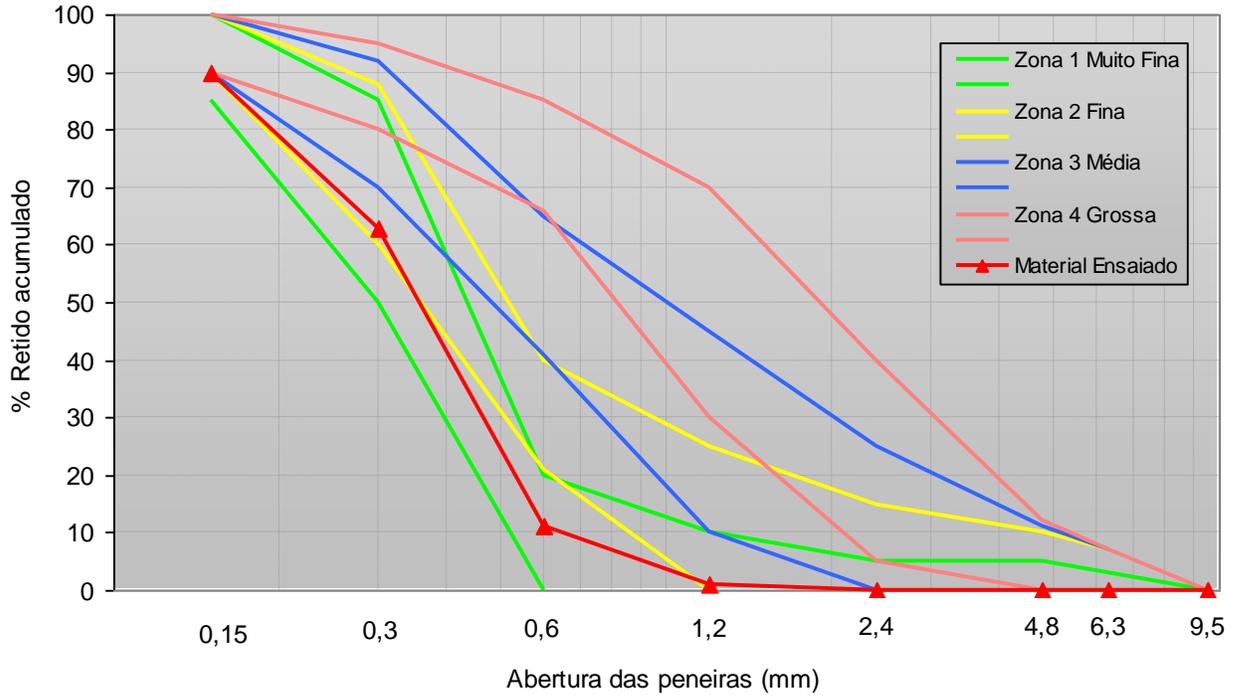


Figura 3.1 – Curva granulométrica do agregado miúdo

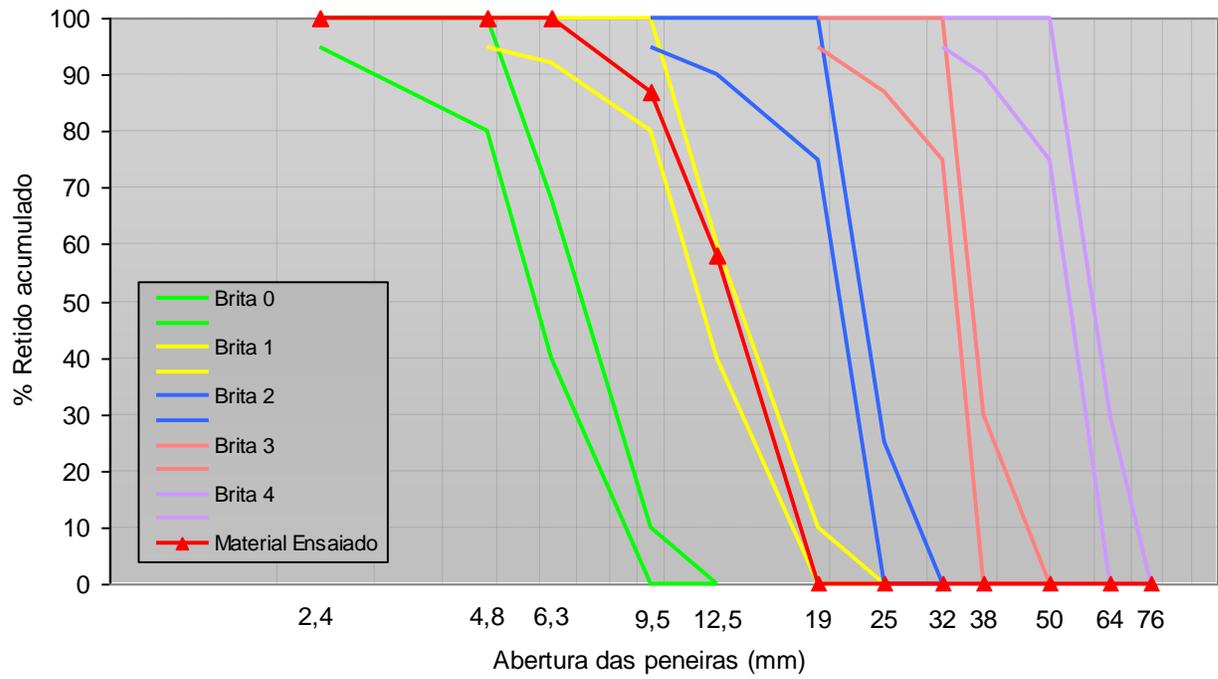


Figura 3.2 – Curva granulométrica do agregado graúdo

3.2.5 Superplastificante

Nas misturas com baixa relação a/agl, a consistência desejada só foi alcançada com emprego de aditivo. Assim, utilizou-se um aditivo superplastificante de 3ª geração, de base química policarboxilatos, isento de cloretos conforme ASTM C 494.

Na Tabela 3.6, que mostra a quantidade de material por m³, é possível avaliar o efeito benéfico na reologia do concreto quando há inclusão de escória (através do rebaixamento do consumo de superplastificante) e o efeito contrário do ativador químico (aumentando o consumo de aditivo).

3.3 Dosagem dos Concretos

A dosagem dos concretos foi realizada com base nos procedimentos recomendados por Helene e Terzian (1992). Nas misturas compostas, o cimento foi substituído em massa pela escória. O ativador químico foi adicionado em porcentagem da massa total de aglomerante. Os teores de escória, ativador químico e as nomenclaturas adotadas são apresentados na Tabela 3.5.

O teor de argamassa em volume seco obtido em ensaios preliminares foi mantido em todos os traços em 52%. Dessa forma, as misturas compostas tiveram correções nas quantidades de areia devido à escória (de menor massa específica que o cimento) aumentar o volume de argamassa. O objetivo dessa correção foi manter a demanda de água constante.

Para a construção da curva de Abrams foram adotados três níveis de relação a/agl para cada uma das misturas estudadas: 0,35; 0,50 e 0,65 com proporções aglomerante/agregado de 1:3,50; 1:5,10 e 1:6,63.

A consistência do concreto fresco medida pelo abatimento do tronco de cone (conforme NBR 7223) foi fixada em 80±10mm, sendo alcançada para todas as misturas de relação a/agl 0,35 às custas de aditivo superplastificante.

Na tabela 3.6, as quantidades de materiais por m³ de concreto são apresentadas.

Tabela 3.5 – Teor do material aglomerante e ativador químico nas misturas estudadas

Misturas	Cimento (%)	Escória (%)	Ativador Químico Na ₂ SO ₄ (%)
REF	100	-	-
50E	50	50	-
70E	30	70	-
50EX	50	50	4

Tabela 3.6 – Quantidade de materiais utilizados por m³ de concreto.

Concreto	Relação a/agl	Cimento (Kg/m ³)	Escória (Kg/m ³)	Aditivo Massa (%)	Na ₂ SO ₄ Massa (%)	Agregados	
						Miúdo (Kg/m ³)	Graúdo (Kg/m ³)
REF	0,35	486	-	0,25	-	652	1051
	0,50	353	-	-	-	766	1035
	0,65	279	-	-	-	830	1022
50E	0,35	243	243	0,175	-	634	1051
	0,50	177	177	-	-	753	1035
	0,65	140	140	-	-	819	1022
70E	0,35	146	341	0,15	-	627	1051
	0,50	106	247	-	-	748	1035
	0,65	84	196	-	-	815	1022
50EX	0,35	243	243	0,45	4	634	1051
	0,50	177	177	-	4	753	1035
	0,65	140	140	-	4	819	1022

3.4 Moldagem e cura

No caso das misturas compostas, o material aglomerante (cimento Portland + escória) foi homogeneizado antes de ser misturado aos outros componentes do concreto. Na mistura 50EX, o ativador químico foi previamente dissolvido na água de

amassamento sempre com a finalidade de resultar na mistura mais homogênea possível.

Em virtude de não haver câmara climatizada para a moldagem, foi necessário atenção especial à temperatura do concreto fresco. Assim, com a finalidade de manter a mesma temperatura em todas as misturas foi utilizada a equação proposta por Metha e Monteiro (1994) e Neville (1995), para aquecer ou resfriar a água de amassamento:

$$T = \frac{0,22.(T_m.M_m + T_c.M_c) + T_a.Ma}{0,22.(M_m + M_c)} \quad (1)$$

T – Temperatura da massa de concreto (°F)

T_m – Temperatura dos agregados (°F)

T_c – Temperatura do cimento (°F)

T_a – Temperatura da água (°F)

M_m – Massa dos agregados (Kg)

M_c – Massa de cimento (Kg)

M_a – Massa de água (Kg)

A moldagem foi realizada conforme NBR 5738, através de corpos de prova 10x20cm adensados em mesa vibratória em duas camadas que permaneceram nos moldes pelas primeiras 24 horas (21°C) e foram posteriormente removidos de suas fôrmas e acondicionados em câmara úmida em temperatura e umidade controladas de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e 95%. Os corpos de prova permaneceram nessa condição até completarem o seu tempo de cura de 3, 7, 28 e 91 dias quando foram encaminhadas para o ensaio acelerado de penetração de cloretos (ASTM C1202), ensaio de penetração de cloretos por imersão (EPCI) e resistência à compressão, .

Foram ainda moldadas pastas com proporção a/agl e teor de aditivo idêntico aos concretos estudados para extração da solução aquosa dos poros (em fôrmas metálicas cilíndricas de 4x8 cm) e determinação do volume total de intrusão de mercúrio (em recipientes cilíndricos de PVC 2x4 cm). As pastas permaneceram nos moldes por 24 horas (21°C) e depois de desmoldadas foram imersas em solução saturada de

hidróxido de cálcio ($23 \pm 2^\circ\text{C}$) até completarem o seu tempo de cura de 3, 7, 28 e 91 dias.

3.5 Ensaio Realizados

3.5.1 Resistência à compressão axial

Para o ensaio de resistência à compressão axial, foram rompidos 4 corpos de prova cilíndricos de dimensões 10x20cm para cada idade de cura (3, 7, 28 e 91 dias) e traço. Os ensaios foram realizados de acordo com a NBR 5738 e 5739 e capeados com fina camada de enxofre. A Figura 3.3 apresenta a prensa de 2000KN utilizada para os ensaios de compressão axial.



Figura 3.3 – Ensaio de resistência à compressão axial

3.5.2 Ensaio de penetração de cloretos por imersão (EPCI)

O ensaio consistiu em imergir amostras de concreto em solução de NaCl com concentração de íons cloreto semelhante a existente na água do mar (concentração de

Cl⁻ de 20.000 mg/l conforme Metha e Monteiro, 1994). Após determinado período de tempo, mediu-se a profundidade de penetração de cloretos (procedimento esquematizado na figura 3.4).

Neste ensaio, para cada uma das idades de cura (3, 7, 28 e 91 dias) e traço estudado, foram utilizados 3 corpos de prova de dimensões cilíndricas 10x20cm. Após completarem o seu período de cura, as amostras foram serradas ao meio para formarem amostras cilíndricas de 10x10cm.

Serradas e identificadas, as amostras foram impermeabilizadas em suas duas faces paralelas (através da aplicação de três camadas de verniz poliuretânico) e imersas em tanque com solução semelhante à água do mar. As amostras ficaram nessa condição até completarem idades pré-definidas de imersão: 7, 14, 28, 56 e 91 dias.

Completado o tempo de permanência no tanque, as amostras de concreto foram rompidas diametralmente para revelar a sua face interna. Uma solução de nitrato de prata (0,1M) foi aspergida sobre a face exposta e os corpos de prova permaneceram em ambiente iluminado para que a solução pudesse reagir com os cloretos e o CH, conforme método referido anteriormente (Otsuki et al., 1992).

Após esse procedimento, as regiões penetradas por cloreto eram claramente delimitadas (conforme Figura 3.5). A medição da penetração de cloretos foi realizada através de 10 medidas igualmente espaçadas, em cada uma das regiões penetradas por cloretos. De posse de todas as medidas, foram eliminadas as medidas discrepantes (CV > 10%) e a penetração foi obtida pela média aritmética dos valores restantes.

De posse da penetração média de íons cloreto nas idades de 7, 14, 28, 56 e 91 dias, para cada mistura, idade de cura e relação a/agl, foi possível utilizar o trabalho de Bakker (1988, apud Wee et al., 2000, p 224.), referida anteriormente, para obter o índice *k*.

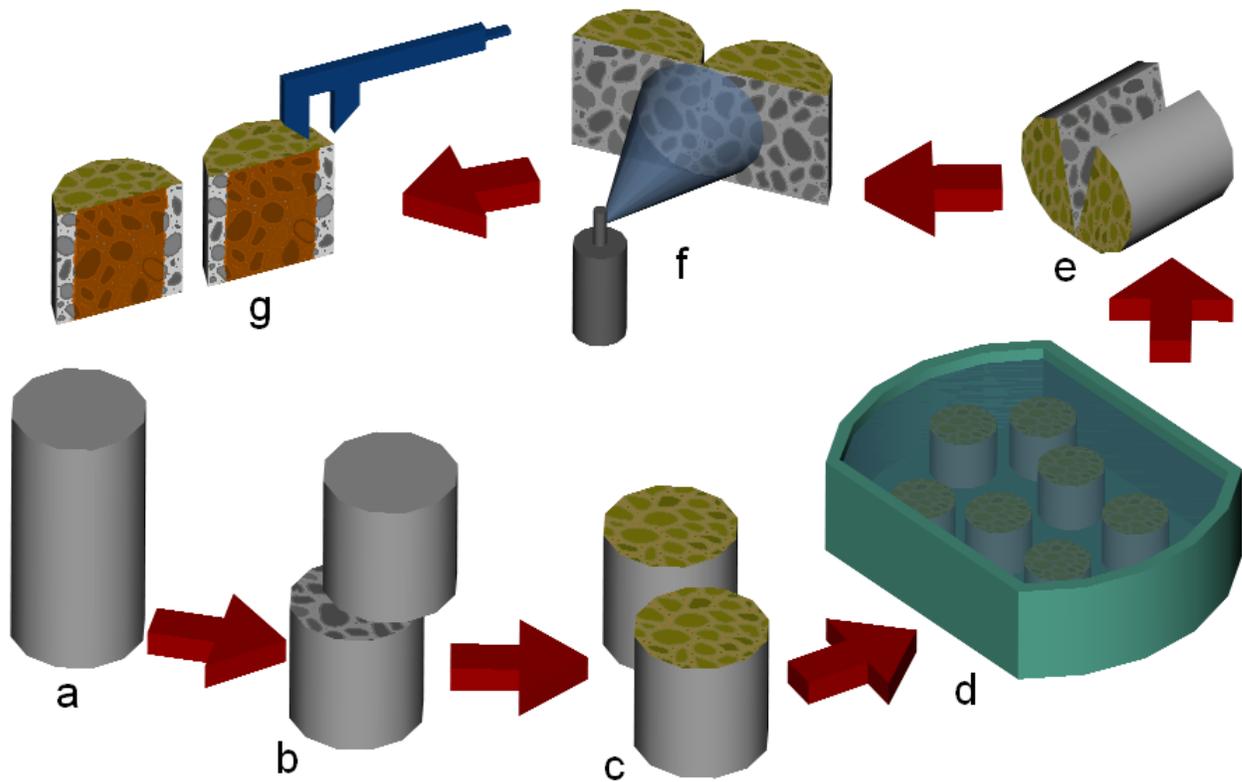


Figura 3.4 – Procedimento na determinação da profundidade de penetração de cloretos (a – corpo de prova 10X20, b – Corte, c – impermeabilização, d – imersão em solução salina, e – rompimento diametral, f – aspersão de nitrato de prata, g – medição da penetração)

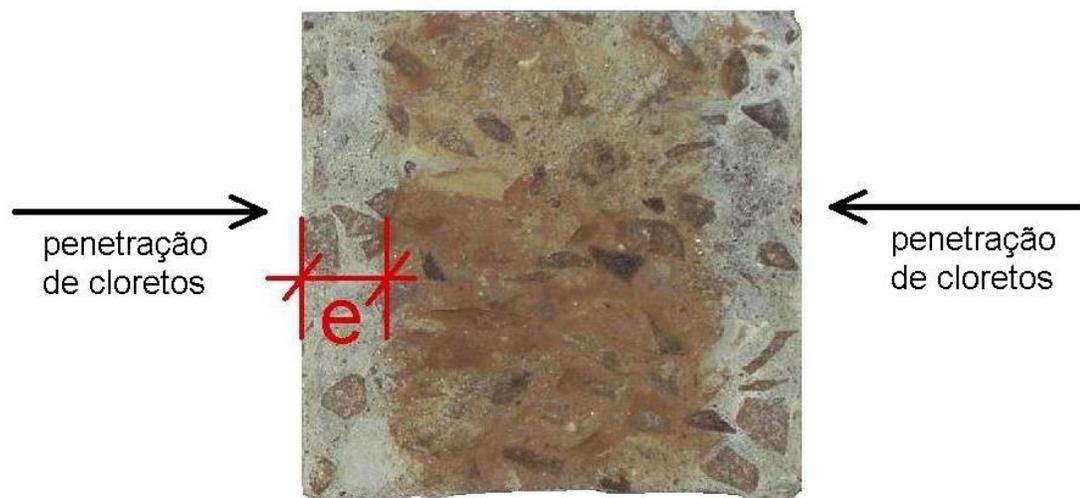


Figura 3.5 – Medição da penetração de Cloretos

3.5.3 Ensaio acelerado de penetração de cloretos – ASTM C1202

Este ensaio foi realizado em conformidade com a ASTM C1202 e consiste na verificação da carga passante através de uma fatia de concreto em contato, por um lado, com solução de NaCl e, por outro, de NaOH, formando uma pilha eletroquímica. A resistência do concreto à penetração de cloretos pode ser associada à carga passante (procedimento esquematizado na Figura 3.6).

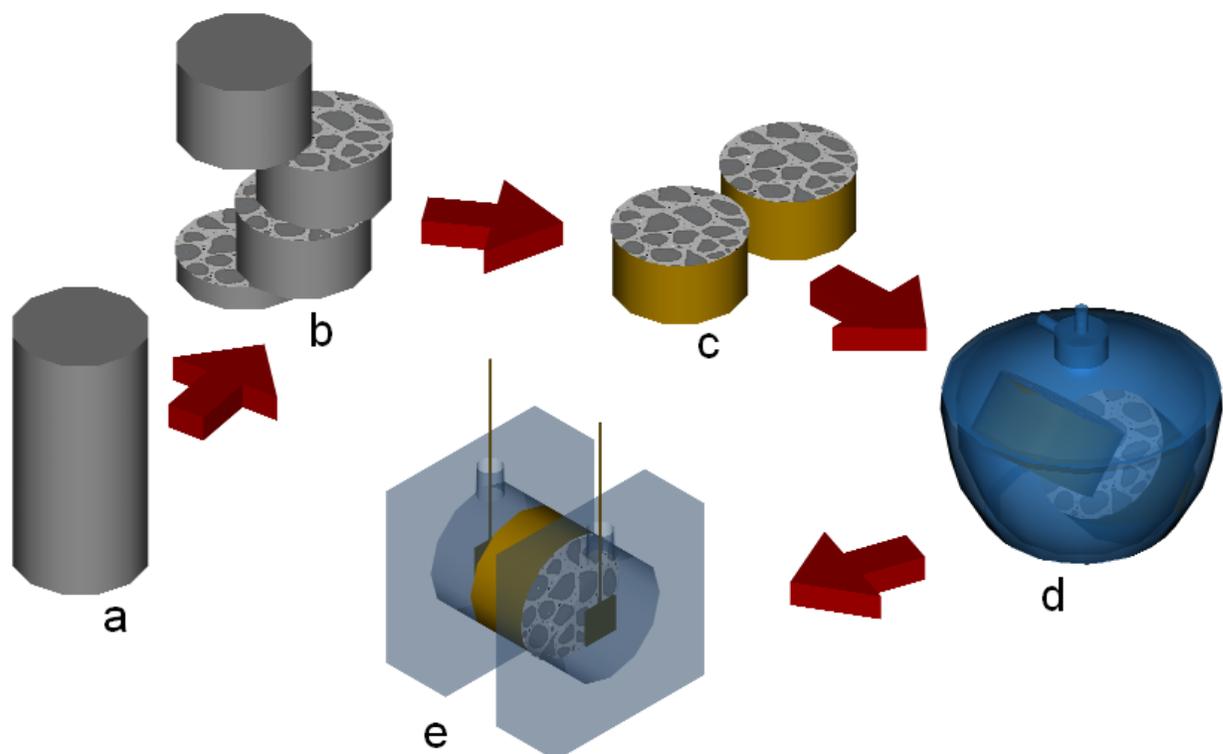


Figura 3.6 – Procedimento adotado no ensaio da ASTM C1202 (a – corpo de prova 10X20, b – Corte, c – selagem das faces laterais, d – saturação, e – montagem das células para o ensaio

O ensaio utilizou um corpo de prova 10x20cm para cada período de cura (3, 7, 28 e 91 dias) e traço. Estes foram serrados com disco diamantado para formarem duas amostras cilíndricas 10X5,1cm que foram então impermeabilizados lateralmente com resina epóxi e submetidos ao processo de vácuo para saturar completamente os poros das amostras de concreto.

Completado o processo de saturação, cada amostra foi fixada em duas células acrílicas. Uma dessas era preenchida com solução de 3% de NaCl e a outra com 0,3N de NaOH. Através de condutores de cobre, cada recipiente com solução foi conectado a uma fonte de 60V dC durante 6 horas. Através de leituras sucessivas, foi possível integrar a curva ampères x segundo (Coulomb) e obter a carga elétrica circulante no sistema. Através da Tabela 3.7, a ASTM C1202 permite classificar o concreto ensaiado quanto a sua permeabilidade a cloretos.

Tabela 3.7 – Classificação do concreto com base na carga passante (ASTM C 1202).

Carga Passante	Permeabilidade à Cloretos
> 4000	Alta
2000 a 4000	Moderada
1000 a 2000	Baixa
100 a 1000	Muito baixa
< 100	Desprezível

De posse dos resultados das duas amostras ensaiadas, adotou-se a média aritmética como valor representativo, desde que satisfeitas as prescrições da norma. Em caso contrário, adotou-se o resultado que mais se adequava na equação $Q = A/B^x$ (corrente passante “Q” em função da relação a/agl “x”).

Para cada amostra ensaiada pelo método acelerado, a medição da frente penetração de cloretos foi realizada pelo mesmo procedimento descrito anteriormente no EPCI (Figura 3.7).



Figura 3.7 – Medição da penetração de cloretos pós ensaio da ASTM C1202

3.5.4 Análise da solução aquosa dos poros

As pastas cilíndricas 4x8cm foram lavadas superficialmente quando completaram o seu período de cura (3, 7, 28 e 91 dias) e pulverizadas. Esse pó foi peneirado na peneira #100 e misturado com igual quantidade de água deionizada até estabilização do pH (30 minutos). Em seguida esse material foi filtrado e a solução obtida utilizada para a determinação das concentrações de íons Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , SO_4^{2-} e OH^- . O procedimento recomendado por Longuet et al. (1973) não foi utilizado devido à dificuldade observada em pesquisas anteriores com traços de relação a/agl muito baixa.

A concentração dos íons foi determinada da seguinte forma:

- Ca^{2+} → titulação complexométrica;
- Na^+ , K^+ → espectrometria de absorção atômica;
- SO_4^{2-} → cromatografia iônica;
- OH^- → titulação de neutralização (HCl).

A condutividade elétrica para cada traço e idade de cura foi calculada utilizando as equações propostas por SHI et al. (1998):

$$\rho = \rho_{\text{água}} + \frac{\sum C_i \lambda_i}{1000}$$

$$\lambda_i = \lambda_{i,0} - A_i \sqrt{C_i}$$

$$A_i = 0,2289 \cdot \lambda_{i,0} + 60,19$$

ρ = condutividade elétrica da solução aquosa;

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

C_i = concentração equivalente do íon i ;

λ_i = condutividade equivalente do íon i ;

$\lambda_{i,0}$ = condutividade equivalente a concentração infinita.

A Tabela 3.8 apresenta os valores de $\lambda_{i,0}$ dos íons presentes na solução dos poros do concreto.

Tabela 3.8 – Condutividade equivalente de íons aquosos numa concentração infinita em 25°C.

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

3.5.5 Ensaio de porosimetria de mercúrio

As amostras moldadas em recipiente de PVC cilíndrico 2x4cm, após completarem o seu período de cura (3, 7, 28 dias), foram cortadas em cubos de 6mm de aresta. Essas amostras foram imersas em álcool isopropílico para paralisação da hidratação e posteriormente submetidas a um processo de secagem gradativo e foram

então enviados para a determinação da porosidade em equipamento da marca Micromeritics, modelo Autopore II 9220.

CONCLUSÕES

Com base nas interpretações, análises e discussões dos resultados obtidos na literatura disponível sobre o tema, é possível traçar algumas conclusões a respeito das questões relativas aos objetivos do presente trabalho.

A adição de escória de alto forno, em substituição parcial do cimento Portland, é bastante eficiente na elevação da resistência dos concretos à penetração de cloretos, e o aumento de seu teor majora essa proteção. Os resultados do ensaio de imersão (EPCI) revelaram considerável diminuição do índice k , principalmente em concretos de alta relação a/agl 0,65 e nas idades iniciais da relação 0,50. Para a relação 0,65 e, em igualdade de cura, os índices k das misturas contendo 50% e 70% de escória (50E e 70E) não ultrapassaram 32% dos índices da mistura de referência.

O uso de ativação química da escória por sulfato de sódio potencializou o bom desempenho da escória contra a penetração de cloretos. Dessa forma, essa foi a mistura que apresentou sempre o melhor desempenho, em igualdade de cura e relação a/agl . Em relação à mistura de mesmo teor de escória sem ativação, a redução do índice foi mais expressivo nas idades de 3, 7 e 28 dias e, quanto menor foi a relação a/agl .

Em relação à resistência à compressão axial, o efeito da adição de escória foi contrário àquele da resistência aos cloretos. A substituição de 50% de cimento Portland por escória provocou diminuição da resistência à compressão principalmente nas idades de 3 e 7 dias. O aumento do teor de escória para 70% resultou em redução ainda mais expressiva, sendo que para esse teor, a resistência à compressão nunca alcançou mais que 67% do resultado para o concreto de referência, em igualdade de idade e cura.

A ativação química, porém, mostrou ser bastante eficiente na elevação da resistência à compressão. A não ser para a idade de 3 dias e relação a/agl 0,35 e 0,50 (ambos com índices de resistência 0,88), essa mistura apresentou comportamento bastante similar à mistura de referência. Aos 7 dias de idade, a mistura ativada superou

a resistência à compressão da mistura com mesmo teor de escória sem ativador em 27%, 25% e 28% nas relações a/agl 0,35; 0,50 e 065, respectivamente.

Os índices k foram fortemente correlacionados com os resultados de volume de intrusão de mercúrio. Entretanto, foram constatados dois comportamentos diferenciados: um para a mistura de referência e outro para as três misturas que receberam adição de escória (50E, 70E e 50EX). Assim, a partir de um certo valor de volume total de intrusão, as misturas com escória tiveram um crescimento de seu índice k consideravelmente menos expressivo que o da mistura de referência devido, possivelmente, à maior fixação de cloretos e à maior densificação da zona de transição. Assim, quanto maior a relação a/agl e menor a idade de cura (e, portanto, maior o volume intrudido), maior é a influência do tipo de aglomerante na resistência do concreto à penetração de cloretos.

A comparação do ensaio acelerado recomendado pela ASTM C1202 com o ensaio de imersão (EPCI) indicou algumas particularidades entre estes. Além de apresentarem diferenças nos resultados com o aumento do tempo de cura e em relação ao concreto de referência, as regressões por mistura estudada apresentaram tendências diferenciadas entre si e algumas não apresentaram coeficiente de determinação alto. A regressão generalizada acusou correlação relativamente baixa.

Em comparação com o ensaio por imersão (EIPC), o ensaio acelerado apresentou uma correlação muito pequena com o volume total de intrusão para as misturas com adição de escória. Isto indica que, além desse ensaio ser possivelmente influenciado pela fixação de cloretos e densificação da zona de transição, o ensaio acelerado foi bastante influenciado por outro tipo de variável: condutividade elétrica.

A condutividade elétrica da solução dos poros mostrou ter influência considerável no resultado do ensaio acelerado. Nas misturas com adição de escória, comparando concretos aos pares, os de maior volume de intrusão de mercúrio apresentaram menor resultado da carga passante. Isto devido, possivelmente, aos concretos de maior volume de intrusão apresentarem solução dos poros com menor condutividade elétrica. No caso do ensaio de imersão, EPCI, para os mesmos pares das misturas analisadas, ocorreu o contrário: os de maior volume de intrusão de mercúrio apresentaram maior índice k.

As profundidades de penetração de cloretos durante o ensaio acelerado mostraram forte correlação linear com os resultados da carga passante. Isto prova que, apesar de outros íons presentes no concreto influenciarem na condutividade elétrica, a carga passante é fortemente correlacionada ao que ocorre aos cloretos no interior do concreto durante o ensaio. Entretanto, em alguns casos, foi possível verificar, de forma indireta, a menor fixação de cloretos ocorrida durante o ensaio acelerado.

Em virtude da incapacidade de não se conseguir a quantificação da influência da condutividade elétrica, ou de outras variáveis que venham a interferir no desempenho do ensaio da ASTM C1202, considera-se que representa com clareza a resistência dos concretos à penetração de cloretos. Assim, na necessidade de utilizar ensaios acelerados para determinação dessa propriedade, torna-se necessário o desenvolvimento de outro método que consiga contornar os defeitos apontados no transcorrer da dissertação.

Da análise de igualdade de resistência à compressão e de resistência à penetração de cloretos (índice k) dentro dos limites estudados de relação a/agl foi possível obter as seguintes conclusões:

- Concretos de somente cimento Portland, apesar de atingirem resistências relativamente altas em todas as idades, necessitam de custo elevado (baixa relação a/agl) para atingir resistência à penetração de cloretos, no máximo, comparáveis aos concretos com escória;
- A adição de escória (misturas 50E e 70E) revelou ser bastante eficiente na diminuição do custo. Para os níveis de resistência à compressão e índice k alcançados, estas foram, em geral, as misturas mais econômicas. Entretanto, níveis maiores de resistência mecânica não foram alcançados em idades iniciais para efeito de comparação.
- A ativação química revelou elevar o custo das misturas com escória sem ativação química para os níveis alcançados. Em relação ao concreto de referência, os custos foram menores ou semelhantes em igualdade de resistência à compressão e, bastante inferiores em relação ao índice k . Entretanto, elevado desempenho de resistência mecânica e de índice k em

idades iniciais (por exemplo: 45 MPa; 0,70 mm $\sqrt{\text{semana}}$ aos 7 dias) somente foram alcançados pela mistura ativada (50EX).

As potencialidades técnicas e econômicas oferecidas pela escória de alto forno, relativas às propriedades avaliadas nessa dissertação, foram ressaltadas. Além disso, existem ainda as razões ambientais que tornam sua utilização uma importante forma de minimizar impactos ambientais. Todavia, quando determinado uso necessitar de concreto de qualidade superior àquela oferecida pelos concretos com escória, a utilização de Na₂SO₄ apresenta uma interessante forma de alcançar tal nível de qualidade.

Sugestões para pesquisas futuras

O ensaio de imersão pode ainda ser utilizado para investigar a penetração de cloretos em concretos que incorporam materiais condutivos, como na utilização de cal hidratada (reposição de reserva alcalina), ou utilizar ciclos de molhagem e secagem para considerar, também, o mecanismo de penetração por absorção. Além de investigar outros ativadores químicos e adições minerais, a influência do ativador químico sobre a hidratação do cimento Portland, isento de adições, pode trazer, também, resultados instigantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AÏTCIN, P.C. **Concreto de Alto Desempenho**. São Paulo: Pini, 2000. 667p.
- ALDEA, C.-M.; YOUNG, F.; WANG, F.; SHAH, S. P. Effects of curing conditions on properties of concrete using slag replacement. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 465-472, 2000.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T-259-80**: Standard method of test for resistance of concrete to chloride ion penetration. Washington. D. C, 1980.
- _____. **AASHTO T-277-89**: Standard method of test for rapid determination of the chloride permeability of concrete. Washington D. C, 1986.
- _____. **AASHTO T-260-94**: Standard method for sampling and testing for chloride ion in concrete and concrete raw materials. Washington D. C, 1994.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI Committee 201**: Guide to durable concrete, 1991.
- _____. **ACI Committee 222**: Corrosion of Metals in Concrete, 1997.
- _____. **ACI Committee 233**: Ground granulated blast-furnace slag as a cementitious constituent in concrete, 1995.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C1202-97**: Standard Test Method for Electrical Indication of concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. Philadelphia, 1997.
- _____. **ASTM C494**: Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. Philadelphia, 1992.
- ANDRADE, C. Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. **Cement and Concrete Research**, v. 23, n. 3, p. 724-742, 1993.

- _____. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras.** São Paulo: Ed. Pini, 1992. 105p.
- ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M.; ALONSO, C.; GONZÁLEZ, C. Relation between colourimetric chloride penetration depth and charge passed in migration tests of the type of standard ASTM C1202-91. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 417-421, 1999.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733:** Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1980.
- _____. **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, 1994.
- _____. **NBR 5739:** Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto. Rio de Janeiro, 1980.
- _____. **NBR 5743:** Cimento Portland: determinação da perda ao fogo. Rio de Janeiro, 1991.
- _____. **NBR 5744:** Análise química de cimento Portland: determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 1989.
- _____. **NBR 5745:** Análise química de cimento Portland: determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 1989.
- _____. **NBR 5747:** Análise química de cimento Portland: determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama. Rio de Janeiro, 1989.
- _____. **NBR 6474:** Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

- ____. **NBR 7215:** Cimento Portland: determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1991.
- ____. **NBR 7217:** Agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987.
- ____. **NBR 7223:** Determinação da consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone – ensaio de abatimento. Rio de Janeiro, 1982.
- ____. **NBR 7224:** Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da área específica. Rio de Janeiro, 1984.
- ____. **NBR 7227:** Análise química de cimento Portland: determinação de óxido de cálcio livre por etileno glicol. Rio de Janeiro, 1989.
- ____. **NBR 7251:** Agregados em estado solto: determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.
- ____. **NBR 7809:** Agregado graúdo: determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. Rio de Janeiro, 1983.
- ____. **NBR 9203:** Cimento Portland comum e clínquer: análise química por complexometria. Rio de Janeiro, 1985.
- ____. **NBR 9776:** Agregados: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 1987.
- ____. **NBR 9937:** Agregados: determinação da absorção e da massa específica do agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1987.
- ____. **NBR 11579:** Cimento Portland: determinação da finura por meio da peneira 75µm (n° 200). Rio de Janeiro, 1991.
- ____. **NBR 14931:** Execução de Estruturas de Concreto Armado. Rio de Janeiro, 2003.

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

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.) INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE, 4., 1992, Istanbul. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1992. v. 2, p.1325-1343.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: Inspeção e Técnicas Eletroquímicas.** São Paulo: Pini, 1997. 237p.

COLLINS, F.; SANJAYAN, J. G. Early age strength and workability of slag pastes activated by NaOH and Na₂CO₃. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 5, p. 655-664, 1998.

_____. Workability and mechanical properties of alkali activated slag concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 455-458, 1999.

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

CST – COMPANHIA SIDERÚRGICA DE TUBARÃO. Espírito Santo. Disponível em: <<http://www.cst.com.br>>. Acesso em: ago. 2005.

DAL RI, M. **Efeitos da adição de cal hidratada em concretos com altos teores de adição mineral na penetração de cloretos e na solução aquosa dos poros do concreto.** 2002. 111f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Santa Maria, 2002.

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

DHIR, R.K.; JONES, M. R.; AHMED, H.E.H.; SENEVIRATNE, A. M. G. Rapid estimation of chloride diffusion coefficient in concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 42, n. 152, p. 177-1785, 1990.

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

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

HELENE, P.R.L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. 271f. Tese (Livre Docência em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**, São Paulo : Pini, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1986. 46p

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

HISADA, H.; NAGATAKI, S.; OTSUKI, N. Evaluation of mineral admixtures on the viewpoint of chloride ion migration through mortar. **Cement & Concrete Composites**, Great Britain: Elsevier Science, v. 21, p. 443-448, 1999.

HOFFMANN, A.T.; DAL MOLIN, D. Influência da adição de sílica ativa, relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos e na vida útil de concretos. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 30., 2002, Brasília. **Anais...** Brasília: Universidade de Brasília, 2002. 1 CD-ROM.

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

IBS – INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA. Rio de Janeiro. Disponível em <<http://www.ibs.org.br>>. Acessado em set. 2005.

ISAIA, G. C. **Efeitos de Misturas Binárias e Ternárias de Pozolanas em Concreto de Elevado Desempenho**: um estudo de Durabilidade com Vistas à Corrosão da Armadura. 1995. 280f. Tese (Doutor em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

- JOHN, V. M. **Cimentos de escória ativada com silicato de sódio**. 1995. 190f. Tese (Doutor em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- JUCÁ, T. R. P.; SELMO, S. M. S.; FIGUEIREDO, E. P. Avaliação da capacidade de certos cimentos brasileiros na combinação de cloretos através do método colorimétrico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO-IBRACON, 44., 2002. Brasília-DF. **Anais...** Brasília: Instituto Brasileiro do Concreto, 2002. 1 CD-ROM.
- LARANJEIRAS, A. C. R. **Caso 1**: Uma estrutura de concreto armado sem defesa imunológica. OBRACADABRA. Disponível em <<http://www.obracadabra.com.br>> acessado em dez. 2004.
- LIMA M. G., **Influência dos componentes do concreto na corrosão das armaduras**, 1990. 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1990.
- LONGUET, P.; BURGLEN, L. M.; ZELWER, A. La phase liquide du ciment hydraté. **Revue du Materiaux de Construcion**, n. 767, p. 34-41, 1973.
- LUO, R.; CAI, Y.; WANG, C.; HUANG, X. Study of chloride binding and diffusion in GGBS concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 1-7, 2003.
- MACKECHNIE, R.; ALEXANDER, M. G. Rapid chloride test comparasions. **Concrete International**, p. 40-45, 2000.
- MEHTA. P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto**: Estrutura, propriedades e materiais. 2. ed. São Paulo: Pini, 1994. 573p.
- MEIRA, G.R.; PADARATZ, I. J.; ALONSO, M. C.; ANDRADE, C. A.; BORBA JÚNIOR, J. C. Penetração de cloretos em estruturas de concreto armado em zona de atmosfera marinha no nordeste brasileiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO-IBRACON, 46., 2004. Florianópolis-SC. **Anais...** Florianópolis: Instituto Brasileiro do Concreto, 2004. 1CD-ROM.

- MOHAMMED, T.U.; HAMADA, H.. Relationship between free chloride and total chloride contents in concrete. **Cement and Concrete Research**. v.33, n. 9, 2003. 1487–1490.
- MOHAMMED, T.U.; YAMAJI, T.; HAMADA, H.. Chloride diffusion, microstructure, and mineralogy of concrete after 15 years of exposure in tidal environment. **ACI Materials Journal**, v. 99, n. 3, 2002.
- MORANVILLE-REGOURD, M. Cements made from blastfurnace slag. In: HEWLWTT, P. C. (ed). **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**. 4. ed. London: Arnold, 1998. cap. 11, p. 633-669.
- NAKAMURA, N; SAKAI, M.; SWAMY, R. N. Effect of slag fineness on the development of concrete strength and microstructure. In: MALHOTRA, V. M. (ed.) INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURALS POZZOLANS IN CONCRETE, 4., 1992, Istanbul. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1992. v. 2, p.1344-1366.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997. 828p.
- NGALA, V. T.; PAGE, C. L.; PARROTT, L. J.; YU, S. W. Diffusion in cementitious materials: II. further investigations of chloride and oxygen diffusion in well-cured OPC and OPC/30% PFA pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 4, p. 819-826, 1995.
- OTSUKI, N.; NAGATAKI, S.; NAKASHITA, K. Evaluation of AgNO₃ solution spray Method for measurement of chloride penetration into hardener cementitious matrix materials. **ACI Materials Journal**, v. 89, no 6, 1992.
- PAULSSO-TRALLA, J.; SILFWERBRAND, J. Estimation of chloride ingress in uncracked and cracked concrete using measured surface concentrations. **ACI Materials Journal**, v.99, n.1, p. 27-36, 2002.
- PUERTAS, F.; MARTÍNEZ-RAMÍREZ, S.; ALONSO, S.; VÁSQUEZ, T. Alkali-activated fly ash/slag cement strength behaviour and hydration products. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 1625-1632, 2000.

- QIAN, J.; SHI, C.; WANG, Z. Activation of blended cements containing fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 1121-1127, 2001.
- ROSA, D. W. **Resistividade elétrica de concretos contendo escória de alto forno e ativador químico**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.
- RAMEZANIANPOUR, A. A.; MALHOTRA, V. M. Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume. **Cement and Concrete Composites**, v. 17, n. 2, p. 125-133, 1995.
- SAKAI, K.; WATANABE, H.; SUZUKI, M.; HAMAZAKI, K. Properties of granulated blast-furnace slag cement concrete. In: MALHOTRA, V. M. (ed.) INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE, 4., 1992, Istanbul. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1992. v. 2, p.1367-1384..
- SALEEM, M.; SHAMEEM, M.; HUSSAIN, S. E.; MASLEHUDDIN, M. Effect of moisture, chloride and sulphate contamination on the electrical resistivity of Portland cement concrete. **Construction and Building Materials**, v. 10, n. 3, p. 209-214, 1996
- SHARIF, A.; LOUGHLIN, K. F.; AZAD, A.K.; NAVAZ, C. M. Determination of the effective chloride diffusion coefficient in concrete via a gas diffusion technique. **ACI Materials Journal**, v. 94, n. 3, p. 227-233, 1997
- SHI, C.; DAY, R.L. A calorimetric study of early hydration of alkali-slag cements. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 6, p. 1333-1346, 1995.
- _____. Pozzolanic reaction in the presence of chemical activators part II. reaction products and mechanism. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 607-613, 2000.
- SHI, C.; STEGEMANN, J.A.; CALDWELL, R.J. Effect of supplementary cementing materials on the specific conductivity of pore solution and this implications on the Rapid Chloride Permeability Test (AASHTO T277 and ASTM C1202) results. **ACI Materials Journal**, v. 95, n. 4, p. 389-394, 1998.

SHI, C. Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277) results. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 537-545, 2004.

_____. Pozzolanic reaction in the presence of chemical activators part II. reaction products and mechanism. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 607-613, 2000.

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.

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

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

_____. The rapid migration test - an alternative to AASHTO T277. **HPC Bridge Views**, jan./fev. 2001. Disponível em: <http://www.cement.org/pdf_files/hpc-13janfeb01.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2005.

STREICHER, P. E.; ALEXANDER, M. G. A Chloride Conduction Test for Concrete, **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 6, p. 1284-1294, 1995.

STUMPP, M. J. **Carbonatação de concretos com altos teores de adições minerais e cal hidratada**. 2003. 141f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Santa Maria, 2003.

TANG, L.; NILSSON, L.-O. Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field. **ACI Materials Journal**, v. 89, n. 1, p. 49-53, 1992.

VAGHETTI, M. A. O.; SARKIS, P. J.; SARKIS, J. M. Ação dos cloretos incorporados: um estudo de caso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO-IBRACON, 44., 2002. Brasília-DF. **Anais...** Brasília: Instituto Brasileiro do Concreto, 2002. 1 CD-ROM.

- WANG, K.; KONSTA-GDOUTOS, M. S.; SHAH, S. P. Hydration, rheology, and strength of ordinary Portland cement (OPC) - cement kiln dust (CKD) - slag binders. **ACI Materials Journal**, v. 99, n. 2, p. 173-179, 2002.
- WANG, S.-D.; SCRIVENER, K. L.; PRATT, P. L. Factors affecting the strength of alkali-activated slag. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 6, p. 1033-1043, 1994.
- 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.
- XU, Y. The influence of sulphates on chloride binding and pore solution chemistry. **Cement and Concrete Research**, v. 27, p. 1841-1850, 1997.
- 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.
- ZHANG, T.; GJØRV, O.E. An electrochemical method for accelerated testing of chloride diffusivity in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 8, p. 1534-1548, 1994.