

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais
PPGEM

Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto

Rejane Maria Tubino Geyer

Tese para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Porto Alegre
2001

ESCOLA DE ENGENHARIA
BIBLIOTECA

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais
PPGEM

Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto

Rejane Maria Tubino Geyer
Doutora em Engenharia

Trabalho realizado no Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Área de concentração: Metalurgia Extrativa

Porto Alegre

2001

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia, área de concentração: Metalurgia Extrativa/Tecnologia Mineral e aprovada em sua forma final pelo orientador, co-orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr-Ing. Antônio Cezar Faria Vilela
Dr. Pela Universidade Técnica de Aachen, Alemanha

Co-orientadora: Profª. Dra. Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Drª pela Universidade de São Paulo

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Vladimir Antônio Paulon- UNICAMP
Dr. Pela Universidade de São Paulo

Prof. Dr. Hélio Adão Greven- PPGEC- UFRGS
Dr. Pela Universidade Técnica de Hannover/Alemanha

Prof. Dr. Nilo César Consoli- PPGEC- UFRGS
Ph.D. pela Concórdia University/Canadá

Prof. Dr. Carlos Alberto Mendes Moraes- PPGEM- UFRGS
Ph.D. pela University of Manchester and Institut of Science and
Technology/UMIST/Inglaterra

Prof. Dr. Jair Carlos Koppe
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
de Minas, Metalúrgica e dos Materiais

**Só uma coisa torna um sonho impossível:
O medo de fracassar.**

Paulo Coelho

Esta tese é dedicada ao André, à minha família e
aos meus amigos.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr-Ing. Antônio C. F. Vilela pela valiosa orientação recebida.

À Professora Dra. Denise Dal Molin pela co-orientação, indispensável para o desenvolvimento deste trabalho.

À GERDAU- Aços Finos Piratini, em especial ao Arquiteto Itajaíba Mafaldo, pelo apoio recebido desde o início desta pesquisa, inclusive no fornecimento das amostras de escória.

Aos técnicos do LEME- UFRGS que auxiliaram nos ensaios de viabilização desta pesquisa, aos técnicos do laboratório de materiais de construção da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás no auxílio à parte complementar deste trabalho.

Ao Centro Tecnológico de Engenharia Civil de FURNAS Centrais Elétricas S.A., em especial às Engenheiras Nicole Hasparyk e Márcia Campos dos Santos, onde foi possível a realização dos ensaios químicos e na parte de difração de raios X, autoclave e de microscopia eletrônica de varredura.

Aos fornecedores de materiais, em especial ao Engenheiro José Antônio de Souza, do Cimento Goiás e Richelieu Costa Miranda, da Impercia Atacadista Ltda.

Ao Prof. Dr. Jean-Pera, do Instituto INSA, em Lyon, França, pela sugestão dos ensaios de expansibilidade de perda de massa.

Ao Professor Dr. José Luis Ribeiro, professor da disciplina de Planejamento e Avaliação de Experimentos, do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS pela supervisão da parte estatística da pesquisa.

Ao CNPq pela bolsa de estudos oferecida na parte inicial desta pesquisa.

Aos colegas da Universidade Federal de Goiás pelo apoio recebido.

Aos colegas do LASID, do NORIE e da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, pelo companheirismo e apoio demonstrados.

A todos que, de alguma forma, colaboraram na elaboração deste trabalho, meu reconhecimento.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE FOTOS	xii
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	xvi
RESUMO	xvii
ABSTRACT	xviii
1- INTRODUÇÃO	1
1.1 RELEVÂNCIA DO TEMA	1
1.2 OBJETIVOS	4
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	5
2- A ESCÓRIA DE ACIARIA	6
2.1 GERAÇÃO	6
2.1.1 Geração da escória	6
2.1.2 Estado da arte da escória na expansão	11
2.2 ESTADO DA ARTE DA UTILIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA NA CONSTRUÇÃO CIVIL	17
2.2.1 Utilização como agregado	18
2.2.2 Utilização na produção de cimento	21
2.2.3 Utilização como adição aos materiais à base de cimento	22
2.2.4 Outras possibilidades de utilização	24
3 A QUESTÃO DAS ADIÇÕES AO CONCRETO	27
3.1 ADIÇÕES MINERAIS	27
3.2 AÇÃO DAS ADIÇÕES MINERAIS NOS PRODUTOS CIMENTÍCIOS	30
3.2.1 Reação pozolânica	30
3.2.2 Ação filer	31
4 ENSAIOS DE VIABILIZAÇÃO DA ESCÓRIA COMO ADIÇÃO AO CONCRETO	34
4.1 MATERIAIS UTILIZADOS	34
4.2 VARIÁVEIS ANALISADAS	39
4.3 MÉTODOS DE ENSAIO	40
4.3.1 Expansibilidade	40
4.3.2 Pozolanicidade	41
4.3.3 Resistência à compressão	42
4.3.4 Profundidade de carbonatação	42
4.4 METODOLOGIA UTILIZADA	43
4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.5.1 Expansibilidade	45
4.5.2 Pozolanicidade	45
4.5.3 Resistência à compressão	46
4.5.4 Profundidade de carbonatação	50
4.6 CONCLUSÕES	52

5 JUSTIFICATIVA DA ESCOLHA DOS ENSAIOS	53
5.1 EXPANSIBILIDADE	53
5.1.1 Agulhas de Le Chatelier	53
5.1.2 Ensaio de autoclave	53
5.1.3 Perda de massa	54
5.2 POZOLANICIDADE	54
5.3 ENSAIOS MECÂNICOS	55
5.3.1 Resistência à compressão	55
5.3.2 Resistência à tração	56
5.3.3 Módulo de deformação e coeficiente de Poisson	56
5.4 ENSAIOS DE DURABILIDADE	58
5.5 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL	59
6 ENSAIOS COM ESCÓRIA DO REFINO REDUTOR COMO ADIÇÃO AO CONCRETO	60
6.1 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS	60
6.2 MATERIAIS UTILIZADOS	62
6.2.1 Cimento	62
6.2.2 Agregados	63
6.2.3 Aditivo superplastificante	64
6.2.4 Água	65
6.2.5 Escória	65
6.3 PROPORCIONAMENTO DOS MATERIAIS	70
6.4 PRODUÇÃO E PREPARO DOS CORPOS-DE-PROVA	71
6.5 MÉTODOS DE ENSAIO	71
6.5.1 Expansibilidade	72
6.5.1.1 Agulhas de Le Chatelier	72
6.5.1.2 Ensaio da autoclave	72
6.5.1.3 Perda de massa	74
6.5.2 Pozolanicidade	74
6.5.3 Resistência à compressão	74
6.5.4 Resistência à tração	74
6.5.5 Módulo de deformação e coeficiente de Poisson	75
6.5.6 Profundidade de carbonatação	76
6.5.7 Análise microscópica do material	77
6.5.8 Difração de raios X (DRX)	77
7 RESULTADOS E ANÁLISE	79
7.1 ANÁLISE DA ESCÓRIA	79
7.2 EXPANSIBILIDADE	83
7.2.1 Agulhas de Le Chatelier	83
7.2.2 Ensaio da autoclave	84
7.2.3 Perda de massa	88
7.2.4 Análise geral dos ensaios de expansibilidade	90
7.3 POZOLANICIDADE	90
7.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	93
7.5 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	99

7.6 MÓDULO DE DEFORMAÇÃO E COEFICIENTE DE POISSON	106
7.7 PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO	109
7.8 ANÁLISE MICROSCÓPICA DO MATERIAL	112
7.9 DIFRAÇÃO DE RAIOS X	114
8 AVALIAÇÃO DA CORROSÃO DE ARMADURAS EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM ESCÓRIA	119
8.1 VARIÁVEIS ANALISADAS	120
8.2 MATERIAIS UTILIZADOS E PROPORCIONAMENTO DO CONCRETO	121
8.3 PRODUÇÃO E PREPARO DOS CORPOS-DE-PROVA	121
8.4 MÉTODOS DE ENSAIO	122
8.4.1 Potencial de corrosão e resistividade elétrica	123
8.4.1.1 Potencial de corrosão	126
8.4.1.2 Resistência de polarização I_{corr} (Intensidade de corrosão)	127
8.4.1.3 ROHM (Resistência ôhmica)	128
8.4.2 Profundidade de carbonatação	128
8.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	128
8.5.1 Potencial de corrosão e resistividade elétrica	128
8.5.1.1 Potencial de corrosão	128
8.5.1.2 Resistência de polarização I_{corr} (Intensidade de corrosão)	130
8.5.1.3 ROHM (Resistência ôhmica)	132
8.5.2 Profundidade de carbonatação	134
9 CONCLUSÕES	136
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	139
ANEXO A Resultados dos ensaios com agulhas de Le Chatelier”.	146
ANEXO B- Resultados dos ensaios de perda de massa.	148
ANEXO C- Modelos de equação de regressão múltipla obtidos no programa computacional estatístico “statgraphics.	153
ANEXO D-. Resultados de resistência à compressão e resistência à tração	160
ANEXO E- Resultados de módulo de deformação e coeficiente de Poisson	169

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 Esquema simplificado da geração de escórias na aciaria elétrica e à oxigênio (LD) (GEYER et al, 1996).	08
FIGURA 2.2 Usos correntes e usos potenciais da escória de aciaria (GEYER, 1997).	25
FIGURA 4.1- Curva granulométrica da escória de aciaria simplesmente moída.	37
FIGURA 4.2- Agulha de Le Chatelier.	40
FIGURA 4.3 Esquema da metodologia dos ensaios de viabilização do uso de escória de aciaria.	44
FIGURA 4.4 Resistência à compressão para escória simplesmente moída.	47
FIGURA 4.5 Comparação entre resistência à compressão da escória simplesmente moída, do material passante na peneira 200 (finos) e testemunho (corpos-de-prova confeccionados com 0% de adição de escória), aos 28 dias.	48
FIGURA 4.6- Carbonatação em corpos-de-prova de concreto com diferentes adições. F significa adição com material passante na peneira # 200 (finos).	51
FIGURA 6.1 Esquema geral de execução dos ensaios complementares.	62
FIGURA 6.2 Difração de raios X da escória de aciaria elétrica.	66
FIGURA 6.3 Microscopia eletrônica de varredura da escória de aciaria elétrica destacando três grãos típicos. Aumento de 3.000 X.	67
FIGURA 6.4 Esquema das variáveis analisadas nos ensaios de expansibilidade.	72
FIGURA 6.5 Esquema dos ensaios de difratometria de raios X.	77
FIGURA 7.1 Expansão em autoclave em função da idade da escória.	85
FIGURA 7.2 Resultados do ensaio de perda de massa- diferenças de massa.	88
FIGURA 7.3 Resultados do ensaio de perda de massa- diferenças de volume.	89
FIGURA 7.4 Determinação da pozolanicidade para cimento Portland pozolânico (NBR 5753/92)- FRATINI.	91
FIGURA 7.5- Influência do teor de adição na resistência à compressão aos 28-dias.	95
FIGURA 7.6- Influência da relação água/aglomerante na resistência à compressão aos 28 dias.	96
FIGURA 7.7- Influência da idade da escória na resistência à compressão aos 28 dias.	96

FIGURA 7.8 Influência da interação entre a idade da escória e da relação água/aglomerante na resistência à compressão aos 28 dias.	97
FIGURA 7.9- Influência do teor de adição na resistência à compressão aos 91 dias.	98
FIGURA 7.10 Influência da relação água/aglomerante na resistência à compressão aos 91 dias.	99
FIGURA 7.11 Influência do teor de adição na resistência à tração aos 28 dias.	100
FIGURA 7.12 Influência da relação água/aglomerante na resistência à tração aos 28 dias.	101
FIGURA 7.13 Influência da idade da escória na resistência à tração aos 28 dias.	101
FIGURA 7.14 Influência da relação água/aglomerante na resistência à tração aos 28 dias.	102
FIGURA 7.15 Influência do teor de adição na resistência à tração aos 91 dias.	103
FIGURA 7.16 Influência da relação água/aglomerante na resistência à tração aos 91 dias.	104
FIGURA 7.17 Influência da idade da escória na resistência à tração aos 91 dias.	104
FIGURA 7.18 Influência da adição e da relação água/aglomerante na resistência à tração aos 91 dias.	105
FIGURA 7.19 Efeito isolado da relação a/agl no módulo de deformação do concreto gerado com escória.	107
FIGURA 7.20 Efeito isolado do teor de adição no módulo de deformação do concreto gerado com escória.	107
FIGURA 7.21 Influência isolada do teor de adição na profundidade de carbonatação em corpos-de-prova com idade de 150 dias.	110
FIGURA 7.22 Influência isolada da relação a/agl na profundidade de carbonatação em corpos-de-prova com idade de 150 dias.	110
FIGURA 7.23 Influência da interação entre a relação a/agl e o teor de adição na profundidade de carbonatação em corpos-de-prova com idade de 150 dias.	111
FIGURA 7.24 Pastas de cimento (a) sem escória, (b) com 5%, (c) com 10%, (d) com 25% e com 40% de escória de aciaria. Análise por microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários feita aos 28 dias de moldagem. Aumento de 3000 vezes.	112
FIGURA 7.25 Difração de raios X para uma amostra com adição de 5% de escória de aciaria, depois (a) e antes (b) de ser submetida à autoclave.	114

FIGURA 7.26 Difração de raios X para uma amostra com adição de 10% de escória de aciaria, depois (a) e antes (b) de ser submetida à autoclave.	115
FIGURA 7.27 Difração de raios X para uma amostra com adição de 25% de escória de aciaria, depois (a) e antes (b) de ser submetida à autoclave.	116
FIGURA 7.28 Difração de raios X para uma amostra com adição de 40% de escória de aciaria, depois (a) e antes (b) de ser submetida à autoclave.	117
FIGURA 8.1 Esquema de execução dos ensaios realizados com as vigas de concreto armado.	120
FIGURA 8.2 Detalhe da viga de concreto armado (GEYER et al, 1999).	121
FIGURA 8.3 Esquema para medida dos potenciais de corrosão (CASCUDO, 1997).	125
FIGURA 8.4 Potenciais de corrosão versus tempo para vigas 1, 2 e 3 que têm relação a/agl de 0,3 e 0, 10 e 40% de adição, respectivamente.	129
FIGURA 8.5 Potenciais de corrosão versus tempo para vigas 4, 5 e 6 que têm relação a/agl de 0,52 e 0, 10 e 40% de adição, respectivamente.	130
FIGURA 8.6 Potenciais de corrosão versus tempo para vigas 7, 8 e 9 que têm relação a/agl de 0,8 e 0, 10 e 40% de adição, respectivamente.	130
FIGURA 8.7 Intensidade de corrosão (resistência de polarização) versus tempo. Vigas 1, 2 e 3 têm relação a/agl de 0,3 e 0, 10 e 40% de adição, respectivamente.	131
FIGURA 8.8 Intensidade de corrosão (resistência de polarização) versus tempo. Vigas 4, 5 e 6 têm relação a/agl de 0,52 e 0, 10 e 40% de adição, respectivamente.	132
FIGURA 8.9 Intensidade de corrosão (resistência de polarização) versus tempo. Vigas 7, 8 e 9 têm relação a/agl de 0,8 e 0, 10 e 40% de adição, respectivamente.	132
FIGURA 8.10 Resistência ôhmica versus tempo. Vigas 1, 2 e 3 têm relação a/agl de 0,3 e 0, 10 e 40% de adição, respectivamente.	133
FIGURA 8.11 Resistência ôhmica versus tempo. Vigas 4, 5 e 6 têm relação a/agl de 0,52 e 0, 10 e 40% de adição, respectivamente.	134
FIGURA 8.12 Resistência ôhmica versus tempo. Vigas 7, 8 e 9 têm relação a/agl de 0,8 e 0, 10 e 40% de adição, respectivamente.	134
FIGURA 8.13 Profundidade de carbonatação em vigas de concreto armado aos 210 dias de idade.	135

LISTA DE FOTOS

FOTO 2.1 Escória de aciaria sendo vazada da panela diretamente na baia de escória.	08
FOTO 4.1 Aspecto da escória de aciaria solidificada e resfriada.	38
FOTO 4.2 Aparência da escória de aciaria e do cimento Portland CP V-ARI.	38
FOTO 6.1- Autoclave utilizada para o ensaio.	73
FOTO 6.2- Equipamento que mede a expansão em autoclave.	73
FOTO 6.3 MEV com microssonda eletrônica EDS (<i>Energy Dispersive Spectrometry</i>) acoplada.	77
FOTO 7.1- Corpos-de-prova (CP) prismáticos depois de serem submetidos ao ensaio de autoclave. Da esquerda para a direita tem-se: CP testemunho (0% de adição de escória), CP com 5% de escória, 10%, 25% e 40%.	85
FOTO 8.1 GECOR6 – aparelho utilizado para fazer leitura das vigas de concreto.	124

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 Gerações e taxas de reciclagem de resíduos em uma usina siderúrgica integrada a coque (PEREIRA, 1994).	04
TABELA 2.1 Produção de aço bruto no Brasil, por processo de aciaria, no ano de 1999 (IBS, 2000).	07
TABELA 2.2 Composições típicas de escórias de aciaria elétrica (PEREIRA, 1994; GEYER et al, 1994).	10
TABELA 2.3 Composição química típica das escórias de refino oxidante (FEA e LD), escórias de refino redutor (FP), escórias de alto-forno (AF) e do cimento Portland comum (CP) no Brasil (TÓPICOS ESPECIAIS, 1994).	10
TABELA 2.4 Campo de aplicação de escórias de diferentes origens (BRUN & YUAN, 1994).	17
TABELA 3.1 Composição dos cimentos Portland conforme as normas da ABNT (NEVILLE, 1997).	32
TABELA 4.1 Composição química e propriedades físicas e mecânicas do cimento utilizado CP V-ARI.	35
TABELA 4.2 Composição química média da escória de aciaria utilizada nos ensaios de viabilização.	36
TABELA 4.3 Análise granulométrica da escória de aciaria simplesmente moída.	37
TABELA 4.4 Características físicas da escória estudada.	39
TABELA 4.5 Expansibilidade por Le Chatelier- ensaios de viabilização.	45
TABELA 4.6 Índice de atividade pozolânica com cimento Portland (I).	46
TABELA 4.7 Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 3 dias	46
TABELA 4.8 Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 7 dias.	47
TABELA 4.9 Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias.	47
TABELA 4.10 Resultados estatísticos obtidos no programa computacional COMPVAR - Tabela ANOVA, para um nível de significância de 95%.	50
TABELA 4.11 Tabela ANOVA (estatística) para o ensaio da profundidade de carbonatação no concreto aos 210 dias.	51
TABELA 6.1 Fracionamento dos ensaios complementares propostos.	61

TABELA 6.2 Composição química e propriedades físicas e mecânicas do cimento utilizado nos ensaios realizados aos 360 dias de idade da escória CP V-ARI.	63
TABELA 6.3 Características dos agregados.	64
TABELA 6.4 Análise granulométrica do agregado miúdo utilizado.	64
TABELA 6.5 Análise granulométrica do agregado graúdo utilizado.	64
TABELA 6.6 Características da escória utilizada nos ensaios complementares.	65
TABELA 6.7 Microanálise semi-quantitativa dos pontos marcados na figura 6.3.	68
TABELA 6.8 Determinação físico-química de água (lixiviação).	68
TABELA 6.9 Determinação físico-química de água (solubilização).	69
TABELA 6.10 Proporcionamento dos materiais utilizados na confecção dos concretos, em massa.	70
TABELA 7.1 Índices químicos da escória estudada no presente trabalho.	79
TABELA 7.2 Exigências químicas e físicas para classificar um material como pozolânico, de acordo com a NBR 12.653 (ABNT, 1992) versus escória de aciaria estudada.	80
TABELA 7.3 Exigências químicas, físicas e mecânicas para classificar um cimento Portland composto (CPII- NBR 11.578, ABNT, 1991) e os resultados obtidos para o material estudado (CP II-EA).	81
TABELA 7.4 Expansão por agulhas de Le Chatelier a frio e a quente.	83
TABELA 7.5 Expansão em autoclave.	84
TABELA 7.6 Expansão em autoclave de escórias submetidas a ciclos acelerados de estabilização e escórias mantidas em condições de laboratório, com idade de 870 dias.	87
TABELA 7.7 Índice de atividade pozolânica com cimento Portland (NBR 12653/92).	90
TABELA 7.8 Codificação dos teores de adição.	93
TABELA 7.9 Codificação das idades de envelhecimento da escória (referência).	94
TABELA 7.10 Coeficiente de Poisson.	108
TABELA 7.11 Microanálise semi-quantitativa dos pontos marcados na figura 7.26.	113
TABELA 8.1 Variação da relação água/aglomerante e da adição de escória nos concretos utilizados nas vigas.	121

TABELA 8.2 Critérios de avaliação da corrosão através de medidas de potencial de corrosão, segundo a ASTM C-876.	129
TABELA 8.3 Critérios de avaliação da velocidade de corrosão (CASCUDO, 1997).	131
TABELA 8.4 Critérios de avaliação da corrosão pela resistividade elétrica. Segundo o CEB 192.	133

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

A= Al_2O_3

AF- Alto-forno

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM- American Society for Testing and Materials

BOF- Basic Oxygen Furnace

C = CaO

CP- cimento Portland

COSIPA- Companhia Siderúrgica Paulista

DEMAT- Departamento de Materiais da Escola de Engenharia da UFRGS

F= Fe_2O_3

FEA- Forno Elétrico à Arco

FP- Forno-panela

H= H_2O

ISO- International Organization for Standardization

JIS- Japan Institute Standard

LD- Linz e Donawitz

M= MgO

PTM- Pennsylvania Testing Method

S= SiO_2

S= SO_3

RESUMO

A geração de resíduos tem se mostrado um problema de preocupação mundial crescente. Muitos rejeitos, sejam industriais ou urbanos, muitas vezes acabam por poluir o meio-ambiente, causando problemas de armazenagem de certos materiais. Além disso, materiais alternativos a partir desses rejeitos podem ser mais baratos, apresentando muitas vezes características de desempenho melhores que os materiais convencionais.

As siderúrgicas, em nível mundial, vêm enfrentando um problema comum, que consiste no que fazer para que a totalidade da escória gerada no refino do aço em aciarias elétricas ou à oxigênio tenha uma solução de aproveitamento melhor do que vem sendo feito atualmente. Na fabricação do aço as escórias são geradas em duas etapas: a primeira provém do chamado refino oxidante (forno elétrico a arco ou convertedor à oxigênio) e a segunda do refino redutor em processos de metalurgia na panela (forno-panela).

Este trabalho tem como objetivo principal o de apontar potencialidades de uso da escória de aciaria elétrica, com destaque para a proveniente do forno-panela (escória do refino redutor), na indústria da construção civil através de testes em que a escória é utilizada, após moagem, como adição ao cimento Portland comum.

Inicialmente foram realizados ensaios de viabilização para se testar a pozolanicidade, resistência à compressão, expansibilidade e profundidade de carbonatação de concretos gerados com diversas adições de escórias de aciaria elétrica. Comprovada a sua viabilidade partiu-se para os ensaios complementares do trabalho utilizando-se somente uma escória do refino redutor. Nesta segunda etapa foram realizados ensaios de caracterização de todos materiais estudados, ensaios de expansibilidade, ensaios mecânicos e de durabilidade dos concretos gerados com esta escória e ensaios de microscopia eletrônica de varredura e de difração de raios X do material.

Após o estudo realizado comprovou-se ser perfeitamente viável a utilização de até 10% da escória do refino redutor (forno-panela- FP) como adição ao cimento para produção de concretos. Inclusive, independente do tempo de estocagem da escória, pode-se constatar melhorias no concreto produzido.

ABSTRACT

Solid wastes generation is a world problem that is getting worse each day. A large number of rejects, industrial or urbans, polute the environment and cause storage problems of some products. Besides that, alternative materials, which come from these rejects, are cheaper, and many times present better performance characteristics than the conventional ones.

Steel plants from around the world have a commom problem, that is what to do with all the steel slags generated as a by-product from the steel refining in electric steel plants or oxygen steel plants. There are two points of these process where slags can be generated: the first comes from the electric or oxygen furnace itself (called oxidizing refining) and the second is the ladle metallurgy slag (reduction refining slag), which is the last stage of the steel production.

This thesis has as the main objective to show potencial use of the steel slag generated at the steel slag (reduction refining slag) at the civil construction industry. The tests have the purpose to use this slag, after grinding, as an addition to the ordinary Portland cement.

Feasibly tests were performed to find out the pozzolanic behavior, compressive strength, expansion and carbonation depth of concretes generated with several additions of this slag. As long as the slag was feasible, complementary tests were started using only the reduction refining slag. At this stage, tests such as: characterization of the materials used, expansibility of the steel slag, durability and mechanical tests for the concrete generated with this material, and scanning electron microscopie and X-ray diffraction of the material were carried out.

It was concluded that additions up to 10% of the oxidizing refining slag to the cement weight to produce concretes was not only absolutely feasible, but also improved the characteristics of the generated concrete.

1 INTRODUÇÃO

1.1 RELEVÂNCIA DO TEMA

O aproveitamento de resíduos na Construção Civil tem se tornado freqüente, já que os materiais alternativos geralmente são mais baratos e, muitas vezes, possuem características de resistência e durabilidade melhores que os materiais convencionais.

Outro fator importante que faz com que as pesquisas na área cresçam a cada dia é o fato que muitos rejeitos, sejam industriais ou urbanos, acabam por poluir o meio-ambiente, causando problemas de armazenagem de certos produtos.

Numa usina siderúrgica é gerada uma grande quantidade de resíduos industriais, resíduos estes que para serem descartados apresentam inúmeros inconvenientes, tais como (GALDEANO et al, 1994):

- necessidade de grandes áreas para o descarte;
- elevado custo de transporte e preparação da área de descarte (US\$ 20 a US\$ 30 por tonelada de resíduo depositado);
- perda de materiais;
- agressão ao meio-ambiente.

Nos processos pirometalúrgicos, além da fase líquida constituída pelo banho metálico, está quase sempre presente uma fase líquida de natureza não-metálica, denominada escória (LÚCIO, 1981).

Pelo simples fato de que a siderurgia lida diariamente com quantidades imensas de matérias-primas e energia, o seu impacto ambiental sempre foi importante. Nas usinas, os esforços para reduzir emissões e efluentes tendem a passar da mera captação e tratamento à adoção de novas tecnologias de produção, menos poluentes e mais eficientes em termos energéticos. O trabalho para preservar o meio-ambiente se faz e continuará a se realizar de quatro maneiras (PEREIRA, 1994): obedecendo à legislação ambiental; implementando medidas de conservação de energia; reciclando e conservando os recursos naturais; buscando novas tecnologias, menos poluidoras.

Os padrões de identificação e de descarte de resíduos industriais variam sensivelmente entre os países. Praticamente todas as nações industrializadas têm revisto e tornado mais

restritivas suas legislações ambientais, em especial no que concerne à produção, ao transporte, ao tratamento e à deposição final dos resíduos industriais.

Da legislação ambiental surge a série ISO 14000 (ABNT, 1994), que é o conjunto de normas em elaboração pela ISO- International Organization for Standardization, que visa estabelecer diretrizes para a implementação de Sistemas de Gestão Ambiental, nas diversas atividades econômicas que possam impactar o meio ambiente e para a avaliação e certificação destes sistemas, com metodologias uniformes e aceitas internacionalmente. Também têm como objetivo a preparação de critérios para a avaliação da qualidade e eficácia das relações entre empresas e o meio ambiente.

Nos países desenvolvidos, o cidadão comum está cada vez mais sensibilizado para os danos infligidos ao meio ambiente. Esta sensibilização existe não só relativamente aos danos provocados pelas grandes catástrofes, mas também em relação aos danos menos espetaculares, embora muito graves, causados por atividades não acidentais, como por exemplo: efluentes industriais, manejo do lixo urbano, entre outros.

Uma pesquisa realizada nos Estados Unidos, em 1993, indicou que cerca de 50% dos consumidores norte-americanos dão preferência a produtos menos agressivos ao meio ambiente. Na Europa, estudos recentes estimam que o consumidor europeu está disposto a pagar de 5% a 15% a mais em mercadorias desde que ostentem rótulos ecológicos (ABNT, 1995).

Sendo assim, a reciclagem de resíduos industriais representa um componente primordial do esforço para um desenvolvimento sustentável. Além disso, ela guarda uma relação econômica importante com as práticas legais de descarte, cada vez mais restritivas. Técnicas de utilização desses resíduos foram desenvolvidas em todo o mundo, mas muito ainda deve ser feito quanto à recuperação de alguns deles, considerados nocivos e gerados em quantidades limitadas. Como consequência natural, pode-se prever investimentos crescentes em técnicas de tratamento interno às usinas de seus resíduos: reciclagem, obtenção de subprodutos ou, último dos casos, descarte em categoria menos onerosa.

Dentro deste contexto, a Construção Civil é, dentre os setores industriais, um dos mais apropriados para o aproveitamento de resíduos. Isto se deve a uma série de fatores, tais como o elevado número de insumos consumidos e o déficit habitacional associado aos altos custos dos insumos básicos para o desenvolvimento de projetos habitacionais. Isto torna indispensável o desenvolvimento de materiais e/ou tecnologias alternativas. Alguns estudos neste sentido já foram realizados como pode-se citar o desenvolvimento de cimentos de

escória de alto-forno sem clínquer. Verifica-se que este produto alternativo dispensa a calcinação da matéria-prima, que para o caso do cimento convencional é responsável por cerca de 40% a 60% dos custos de produção, além do excessivo consumo de energia (JOHN et al, 1994).

A quantidade total de resíduos gerados por uma moderna usina siderúrgica integrada a coque, por exemplo, situa-se em torno de 700kg/t de aço líquido (PEREIRA, 1995). A um nível de produção mundial de 700 milhões de toneladas por ano, pode-se supor que a geração anual de resíduos é de cerca de meio bilhão de toneladas. A tabela 1.1 fornece as gerações e as taxas de reciclagem de resíduos de uma usina integrada a coque.

Esses valores são comparáveis aos apresentados por outras usinas desse tipo, mas a tendência tem sido de redução das gerações específicas. Com o emprego mais generalizado de tecnologias baseadas em baixa geração de escórias, a sua quantidade total tem diminuído.

Dos dados apresentados na tabela 1.1 conclui-se que os resíduos produzidos em quantidades mais elevadas são as escórias de alto-forno e de aciaria, constituindo um pouco mais da metade do total.

A maior parte desses materiais é utilizada externamente ou reciclada nas usinas (87%). Pós e lamas originam-se em diversos pontos na usina. Embora suas composições químicas variem muito, a maior parte contém quantidades apreciáveis de óxidos de ferro, cal e carbono, o que torna interessante a sua utilização. A parcela que não é reciclada nem vendida apresenta variados graus de toxidez e vem a ser incinerada ou depositada em aterros especiais.

O volume mundial gerado de escória de aciaria é da ordem de 84 milhões de toneladas por ano, sendo que o Brasil retém aproximadamente 5% desta geração. Por isso a importância de se estudar a sua reciclagem como forma de resolver o problema de armazenagem ou “bota fora” desta escória. Entretanto, há alguns inconvenientes no uso deste produto; por exemplo, a cal que participa no processo de produção do aço parte pode permanecer como matéria-prima não reagida presente na escória. Como a cal, em presença de umidade, reage, formando compostos expansivos, limita-se o seu uso.

TABELA 1.1 Gerações e taxas de reciclagem de resíduos em uma usina siderúrgica integrada a coque (PEREIRA, 1994)

	kg/t aço líquido	%	Proporção reciclada
moinha de apagamento	14.1	2.0	0
escória de alto-forno	309.1	44.3	100
pó de alto-forno	11.6	1.7	100
lama de alto-forno	4.2	0.6	0
escória de dessulfuração	15.9	2.3	100
escória de aciaria LD	121.1	17.3	100
lama grossa de aciaria	7.8	1.1	60
lama fina de aciaria	49.1	7.0	0
carepa	25.2	3.6	100
outros resíduos	140.0	20.1	85
Total	698.1	100.0	87

Existem alguns usos de escória de aciaria na Construção Civil, principalmente como base, sub-base e revestimento asfáltico em rodovias. Entretanto, seja qual for o reaproveitamento da escória, é necessário um período de “cura” de três meses a um ano (RUBIO & CARRETERO, 1991). É exatamente este processo lento de cura que pode torná-la não competitiva em certas regiões em comparação com os materiais convencionais.

As siderúrgicas têm por hábito mandar para os pátios de escória todo e qualquer tipo de escória da aciaria, não se preocupando em separá-las. Para o estudo deste material torna-se recomendável que numa aciaria as escórias de diferentes procedências sejam separadas para que possam ser melhor avaliadas e reaproveitadas.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo demonstrar a possibilidade de utilização da escória de aciaria como adição ao cimento Portland para confecção de concreto, tendo como objetivos os seguintes:

- a partir do estado da arte do fenômeno da expansão da escória buscar parâmetros para que possam ser comparados com os resultados obtidos neste trabalho;
- definir a viabilidade técnica da utilização das escórias de aciaria elétrica como adição ao cimento Portland na confecção de concreto, avaliando, sempre que possível, questões relativas à durabilidade. Serão utilizadas as escórias do forno elétrico a arco (FEA) e do forno-panela (FP) misturadas e, caso for necessário, serão realizados testes com as escórias de forma separada;

- indicar parâmetros limites de expansibilidade para garantir durabilidade do produto gerado, quando utilizada como adição ao concreto;
- apontar potencialidades de uso na indústria da Construção Civil através de testes com o intuito de utilização do material, após moagem, como adição ao cimento Portland comum, procurando-se analisar o comportamento pozolânico do material ou se este está agindo apenas como filler no concreto.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta tese é composta de nove capítulos, sendo este apresentado a título de INTRODUÇÃO.

O restante do trabalho é dividido em três partes principais. A parte I, REVISÃO BIBLIOGRÁFICA, é composta pelos capítulos 2 e 3. O capítulo 4 compõe a parte II, ENSAIOS DE VIABILIZAÇÃO. E a parte III- ENSAIOS COM ESCÓRIA DO REFINO REDUTOR COMO ADIÇÃO AO CONCRETO (COMPLEMENTARES), está nos capítulos 5, 6, 7 e 8. O capítulo 9 finaliza o trabalho.

O capítulo 2- A ESCÓRIA DE ACIARIA apresenta a geração desta e de outras escórias de aciaria elétrica e à oxigênio, procurando informar sobre o fenômeno da expansibilidade e também faz uma caracterização química, física e ambiental do material, apresentando uma revisão bibliográfica a respeito das possibilidades já existentes de utilização desta escória.

No capítulo 3- A QUESTÃO DAS ADIÇÕES AO CONCRETO é feita uma revisão a respeito dos conceitos básicos sobre adições ao concreto, pozolanas e fillers.

O capítulo 4- ENSAIOS DE VIABILIZAÇÃO DA ESCÓRIA COMO ADIÇÃO AO CONCRETO descreve e mostra os resultados dos ensaios preliminares realizados com o material.

A JUSTIFICATIVA E DISCUSSÃO DA ESCOLHA DOS ENSAIOS complementares encontra-se no capítulo 5.

Nos ENSAIOS COM ESCÓRIA DO REFINO REDUTOR COMO ADIÇÃO AO CONCRETO, que estão no capítulo 6, descreve-se os materiais utilizados e todos os métodos para realização da parte experimental principal deste trabalho.

No capítulo 7- RESULTADOS E ANÁLISE- são analisados e discutidos os resultados dos ensaios apresentados no capítulo 6.

Após a discussão dos problemas relacionados com a durabilidade que as adições minerais podem causar no concreto, no capítulo 8 faz-se uma AVALIAÇÃO DA CORROSÃO DE ARMADURAS EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM ESCÓRIA.

O capítulo 9- CONCLUSÕES faz um fechamento final do trabalho.

2 A ESCÓRIA DE ACIARIA

2.1 GERAÇÃO

2.1.1 Geração da escória

Os dois processos mais utilizados para a produção de aço no Brasil e no mundo se dão através da fusão e refino de sucata em fornos elétricos à arco (aciarias elétricas) e através do refino do ferro-gusa líquido em convertedores à oxigênio (aciarias LD- Linz e Donawitz).

A tabela 2.1 retrata a produção brasileira de aço em aciarias, como também a sua participação na produção nacional.

TABELA 2.1 Produção de aço bruto no Brasil, por processo de aciaria, no ano de 1999 (IBS, 2000).

Processo de aciaria	Aço produzido (x10 ³ t)	Participação (%)
Aciaria à oxigênio (LD)/BOF	19.115	76,5
Aciaria elétrica	5.476	21,9
Outros	405	1,6
Total	24.996	100

A figura 2.1 mostra o circuito básico da geração de resíduos na aciaria elétrica e na aciaria à oxigênio (LD), com a geração específica da escória em cada etapa. Há duas escórias de refino, a escória oxidante e a escória redutora.

O metal obtido dos processos de redução nunca tem a composição química especificada do produto final do processo siderúrgico, sendo sempre acompanhado por maior ou menor proporção de impurezas. Por exemplo, o ferro-gusa sai do alto-forno com cerca de 4,0% de carbono, e além disto, silício, manganês, fósforo, enxofre, etc. em proporções variáveis. Um dos métodos de se conduzir o metal à composição desejada é a combinação de um refino oxidante e de um refino redutor, esse último realizado normalmente na panela ou no forno-panela (LÚCIO, 1981).



FIGURA 2.1 Esquema simplificado da geração de escórias na aciaria elétrica e à oxigênio (LD) (GEYER et al, 1996).

Na foto 2.1 observa-se a escória de aciaria sendo vazada da panela, ainda líquida e incandescente. A partir daí ela é transportada para o pátio de escória, onde se resfria.



FOTO 2.1 Escória do refino redutor sendo vazada da panela diretamente na baia de escória.

A cal é adicionada no processo de fabricação do aço com a finalidade de absorver e neutralizar os óxidos ácidos formados nas reações de oxidação que poderiam atacar o revestimento do forno pela escória. É desejável que a dissolução da cal seja rápida, de forma a manter a trajetória de composição da escória em regiões de alta basicidade.

A escória de aciaria, tanto de refino oxidante quanto redutor, é normalmente vazada em uma panela e/ou descarregada em locais onde pode solidificar em forma cristalina.

Após o resfriamento, a escória de aciaria é britada. Após britagem, por meio de correias rolantes, a escória é separada em distintas granulometrias (bitolas). Em geral, a escória de aciaria é processada para a recuperação da fração metálica, empregada na própria aciaria, ou na sinterização ou no alto-forno. Em média, essa recuperação corresponde a 30% da sua geração. Parte da fração não-magnética é eventualmente reciclada no alto-forno, na sinterização e na aciaria. Esta escória reaproveitada no forno é conhecida como sucata C ou sucata recuperada. A escória separada por bitolas tem outras utilizações como, por exemplo, na indústria da Construção Civil ou na de fertilizante como corretivo de solo.

Salienta-se que as escórias de refino oxidante e redutor diferem das escórias de redução (alto-forno) porque participam ativamente e fundamentalmente do processo, enquanto que as últimas principalmente incorporam as impurezas. Quando é possível, sem prejuízo da principal função de uma escória redutora, que é a liquefação da ganga numa temperatura adequada, a composição deve ser tal que o refino seja possível. O exemplo mais importante do uso desta técnica em relação com a quantidade de metal tratada é a remoção do enxofre do ferro no alto-forno.

A massa específica da escória de aciaria elétrica é tipicamente em torno de $2,4 \text{ kg/dm}^3$ (COMMITTEE, 1994). A sua composição química e mineralógica varia. Cal livre, na maior parte matéria-prima não reagida, hidrata em presença de umidade, causando expansão e desagregação da escória.

Como apresentado na figura 2.1, a geração específica de escórias de aciaria elétrica ou à oxigênio varia entre 140 a 170 kg/t de aço líquido na etapa oxidante e 15 kg/t de aço líquido na etapa redutora. Considerando-se uma média mundial de 120 kg/t de aço líquido e uma produção anual de 700 milhões de toneladas (Mt) de aço, a geração de escória de aciaria, em nível mundial, é de 84 Mt por ano (PEREIRA, 1994). No Brasil (tabela 2.1), para uma produção de 24.996 Mt de aço no ano de 1999, tem-se uma geração de aproximadamente 4 Mt de escória nos processos de aciaria elétrica e à oxigênio.

Algumas gerações específicas, assim como composições químicas de escórias de aciaria elétrica, são dadas na tabela 2.2.

TABELA 2.2 Composições típicas de escórias de aciaria elétrica (PEREIRA, 1994; GEYER et al, 1994).

País	Geração kg/t	CaO (%)	MgO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	FeO (%)	MnO (%)	P ₂ O ₅ (%)	S (%)
Japão	127	40	4	25	5	19	7	-	0.06
Suécia	100	46	5	11	5	28	4	0.7	-
EUA	160	41	10	17	8	18	4	0.6	0.2
Alemanha	120	32	10	15	4	31	4	1.4	0.1
Brasil	150	33	10	18	6	30	5	-	-
Itália	120	41	8	14	7	20	6	0.9	0.1
Faixa	100-160	32-46	4-10	11-25	4-8	18-31	4-7	0.6-1.4	0.1-0.2

A tabela 2.3 mostra as composições típicas das escórias de refino oxidante (FEA e LD), escórias de refino redutor (FP) em aciarias elétricas brasileiras, bem como das escórias de alto-forno e do cimento Portland comum. Os valores não citados na tabela não foram informados pelos autores respectivos.

TABELA 2.3 Composição química típica das escórias de refino oxidante (FEA e LD), escórias de refino redutor (FP), escórias de alto-forno (AF) e do cimento Portland comum (CP) no Brasil (TÓPICOS ESPECIAIS, 1994).

	FEA (%)	FP (%)	LD (%) (GUMIERI, 2000)	AF (%)	CP comum (%) (PETRUCCI, 1978)
CaO	30-35	45-55	6-45	42	61-67
SiO ₂	15-20	20-25	7-16	34	20-23
MgO	8-12	8-12	1-9	6	0,8-6
Al ₂ O ₃	3-9	3-9	1-4	14	4,5-7
FeO	25-35	0,5-3,5	8-30	0,35	-
MnO	3-6	0,5-3,5	3-7	-	-
TiO ₂	-	-	-	0,50	-
Fe ₂ O ₃	-	-	-	-	2-3,5
SO ₃	-	0,5	-	-	0-3,0
Alcalis (K ₂ O- Na ₂ O)	-	-	-	-	0,3-1,5
CaO livre	-	-	0-8	-	-
P ₂ O ₅	-	-	1,6	-	-
S	-	-	0,13	-	-
Cr ₂ O ₃	-	-	0,35	-	-
i=CaO/SiO ₂	1,75-2,00	2,2-2,25	0,86-2,8	1,23	2,91-3,05

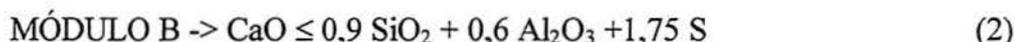
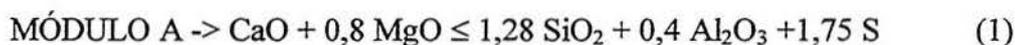
2.1.2 Estado da arte da escória na expansão

Segundo CINCOTTO et al (1989; 1992), a escória de aciaria retém parte da cal virgem empregada para retirar e neutralizar os elementos fósforo, enxofre e silício no processo de refino de ferro-gusa para a produção de aço, a qual, exposta ao ar, pode apresentar expansão por hidratação.

RUBIO e CARRETERO (1991) relatam a instabilidade das escórias de aciaria como um fenômeno de hidratação da cal livre presente principalmente nas escórias novas. A quantidade de cal livre pode variar para distintas escórias entre 1 e 15%. A expansibilidade é maior em escórias com maior conteúdo de cal e aumenta com o aumento da temperatura. Os autores citam ainda que alguns países consideram seguro o uso de escórias com proporções de cal livre entre 4 e 7%, quando utilizadas em revestimentos granulares. Para aplicações em revestimentos betuminosos onde as partículas são envolvidas por uma camada de betume, alguns países permitem o emprego da escória seja qual for o seu conteúdo de cal. O procedimento mais utilizado para reduzir ao mínimo o fenômeno é o de envelhecer a escória no pátio, regando-a com água natural ou água quente para conseguir hidratar os elementos instáveis. Já se comprovou que o armazenamento ao ar sem regar com água não oferece garantias e que as pilhas de escória devem ter uma altura máxima de 1,5-2 metros. O tempo de estocagem depende do conteúdo de cal livre e pode oscilar entre 3 meses e um ano, ainda que alguns países, para algumas aplicações, utilizem escória fresca. Mediante alguns ensaios físicos e de expansão tem-se estudado a relação entre a desintegração e a expansão com o conteúdo de cal livre da escória. A conclusão que se chegou, em todos os casos, de que existe um conteúdo crítico em torno de 4 a 5 % onde a deterioração dos materiais secos (agregados) se aceleram. Por outro lado, os limites impostos aos estragos oscilam entre 2 e 3% tanto em desintegrações como em expansões (se o ensaio se realiza em misturas o limite deve reduzir-se a 1%).

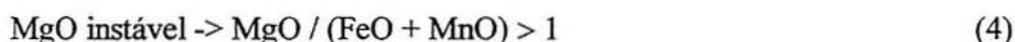
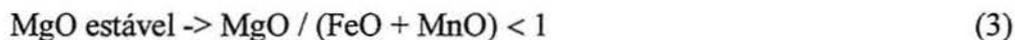
As escórias envelhecidas de uma aciaria espanhola, citada no trabalho de RUBIO e CARRETERO (1991), têm porcentagens de cal livre com valores inferiores extremos de 1 a 6 % e normais de 2 a 3%. O envelhecimento dá-se regando o estoque com molhagens diárias durante 12 horas durante 12-18 meses. Os resultados dos ensaios de desintegração e expansão sobre o agregado envelhecido 3 meses são muito inferiores aos conteúdos que se consideram perigosos para a utilização do material. Por outro lado, a escória não envelhecida apresenta riscos potenciais de expansão.

Em estudos feitos por Pablo Gaibrois, apud GUMIERI (2000), as equações de equilíbrio entre os óxidos de cálcio e magnésio ou do óxido de cálcio isoladamente com outros constituintes das escórias, são descritas a seguir:



De acordo com as fórmulas (1) e (2), uma escória cuja análise química apresentar uma composição que atenda aos módulos A ou B, segundo Pablo Gaibrois, possivelmente estará livre da desintegração causada pela hidratação dos óxidos de cálcio e magnésio.

MONTGOMERY e WANG (1991) e GEISELER e SCHLOSSER (1989) citam que geralmente o óxido de magnésio presente nas escórias de aciaria LD se encontra sob forma de soluções sólidas, compostas de FeO e MnO e denominadas magnésio-wustita, enquanto que o MgO sob a forma de periclásio é mais rara. No entanto, o periclásio é a forma em que o MgO apresenta-se propício à expansão. A estabilidade do óxido de magnésio também foi proposta por LUO apud MONTGOMERY e WANG (1991) e equacionada através das equações (3) e (4), descritas a seguir:



Para a maioria das escórias esta relação é menor que 1, apresentando o MgO sob forma estável. Estas equações são baseadas na premissa de que o MgO pode formar soluções sólidas com FeO e MnO. Estes mesmos autores relatam ainda que a cal ou a dolomita utilizada no processo de aciaria deve possuir os menores tamanhos de grãos possíveis, possibilitando, desta forma, sua dissolução e completa reação, minimizando assim os efeitos do CaO e do MgO instáveis nas escórias.

AKINMUSURU (1991); PERA (1996) e CRAWFORD e BURN (1969) relatam que o óxido de cálcio hidrata-se rapidamente com uma grande expansão volumétrica, sendo responsável pela maior parte da expansão que ocorre a curto prazo. A taxa de hidratação é acelerada pela moagem da escória. Por outro lado, o óxido de magnésio hidrata-se lentamente, expandindo por um longo período de tempo, podendo ocorrer por muitos anos.

NEVILLE (1982) e CINCOTTO et al. (1990) evidenciam ser o periclásio, MgO cristalizado, o responsável por parte da expansão de cimentos, não tendo qualquer contribuição o MgO na fase vítrea, ou dissolvida. Para NEVILLE (1982), o ensaio de “Le Chatelier” revela unicamente a expansibilidade referente à cal livre, devido aos baixos teores

de MgO reativo presentes na maioria dos cimentos. Este processo pode também estar relacionado às escórias de aciaria. PETRUCCI (1978), por outro lado, acredita que a influência do MgO aparece melhor no ensaio das agulhas de “Le Chatelier” à frio e a influência da cal livre, no ensaio à quente.

Através da análise de difração de raios-X (DRX), MONTGOMERY e WANG (1991) detectaram que a forma pura do CaO livre possui $d=2,41$ e a forma em solução sólida apresenta $d=2,38$. O excesso de CaO livre, especialmente na presença de solução sólida contendo pequenas quantidades de FeO (wustita), segundo estes pesquisadores, é a principal causa do aumento de volume das escórias. Estes autores sugerem que o valor limite para o teor de CaO livre nas escórias de aciaria varia de acordo com o emprego das mesmas, considerando-se a condição de uso destes resíduos.

GAZE e SMITH (1977) estudaram a cura a 50°C como uma medida de estabilidade de volume de cimentos de alto teor de MgO e compararam os efeitos de adições hidráulicas e não hidráulicas na expansão destes cimentos submetidos ao teste de autoclave proposto pela ASTM C-151. O objetivo deste trabalho foi o de induzir um significativo grau de hidratação da matriz pela pré cura a 50°C para que este efeito pudesse ser investigado nos resultados dos testes de autoclave. Foram utilizados dois tipos de cimento de alto teor de MgO. Foi adicionado 40% de cinza volante em comparação com cimentos sem adição, ambos tendo sido submetidos a cura prévia a 50°C por até 14 dias, comparados com cura convencional. O cimento denominado de “sintético” foi preparado adicionando-se periclásio (MgO) na planta de produção do cimento Portland comum nas proporções de 2 e 5% e o cimento denominado de “normal” foi confeccionado num forno de laboratório queimando-se junto a matéria-prima do cimento e adições de carbonato de magnésio nas proporções de 7 e 13%.

Os resultados com cimentos sintéticos com cura prévia de 14 dias foram os seguintes: o cimento de controle passou no ensaio de autoclave (com resultados $< 0,8\%$ de expansão). Com 2% de adição de MgO e 40% de cinza volante os corpos-de-prova passaram no teste de autoclave padrão, mas a pré cura a 50°C causou expansão, chegando a 20% com 14 dias de idade, permanecendo constante após este tempo. Após 4 dias de pré- cura as resistências dos concretos autoclavados e não autoclavados foram muito similares. Mesmo com a presença de MgO ou de $\text{Mg}(\text{OH})_2$ as fases detectadas com 2% de MgO e 40% de cinza volante e seu controle foram bastante similares quando analisados na DRX.

Os resultados para cimentos normais com cinza volante e para cimentos sintéticos com relações CaO/SiO_2 (C/S) na ordem de 1,2 tiveram diferenças significativas. Os cimentos normais com adição de 40% de cinza volante não mostraram aumento significativo de

expansão com a pré cura. Entretanto, um aumento foi determinado para cimentos normais ($C/S=3,16$) sem adição de cinza volante. Os resultados para os 2 cimentos com relação C/S de aproximadamente 1,5 também não foram alterados significativamente pela pré cura, mas o cimento com relação $C/S=1,99$ mostrou um decréscimo na expansão. A análise de DRX mostrou que mudanças na expansão, aumentando ou diminuindo, mostradas por cimentos normais sem cinza volante e o cimento $C/S=1,99$ foram associados com o decréscimo na quantidade de C-S-H cristalino produzido e no aumento no teor de cal hidratada ($Ca(OH)_2$).

Esperava-se que o uso de corpos-de-prova pré curados no teste de autoclave resultaria um método de ensaio mais severo e por isso mais seguro. Ao contrário do que se esperava foi descoberto que cimentos com expansões moderadas na autoclave podem proporcionar expansões levemente menores quando curados previamente a $50^\circ C$ e portanto conclui-se que mudanças na forma de cura para o ensaio de autoclave da ASTM do tipo investigado não seria justificado.

WACHSMUTH et al. (1981), apud GUMIERI (2000), analisaram a instabilidade volumétrica das escórias alemãs, através de ensaios em autoclave. Neste estudo, os autores verificaram a influência do teor de CaO livre e da porosidade na expansibilidade. As amostras de escórias ensaiadas por WACHSMUTH et al. (1981) possuíam grãos de dimensões entre 1 a 3,15 mm. Após ensaiadas, a desagregação das amostras foi obtida através da porcentagem, em massa, dos grãos menores que 1 mm, em função do teor de CaO livre e da porosidade das amostras. De acordo com as investigações de WACHSMUTH et al. (1981), as amostras que apresentaram elevadas desagregações possuíam também altos teores de CaO livre, ou seja, acima de 6% e maiores porosidades (acima de 4%). Estes resultados podem estar relacionados com a maior facilidade de hidratação de altos teores de CaO livre, através dos poros das escórias, provocando, desta forma, maior expansibilidade e, conseqüentemente, maior fissuração e desagregação das mesmas.

Na cura normal, a escória siderúrgica é solidificada por resfriamento, britada e empilhada ao ar livre, mantendo-a nesta situação até a sua estabilização. Este processo de cura requer um período de pelo menos um ano e necessita de um pátio espaçoso (LIMA, 1999).

Já a cura acelerada, após a solidificação e britagem, a escória siderúrgica é submetida ao spray de água quente (cura por água quente), à injeção de vapor ou passagem através de zona de vapor (cura por vapor). Esses processos permitem acelerar a estabilização da escória, reduzindo o tempo de cura.

A siderúrgica japonesa DAIDO STEEL (1993) vem realizando pesquisas através de testes de campo com o intuito de caracterizar o comportamento da escória do forno elétrico

visando a estabilização da sua expansibilidade. Desta forma estão sendo desenvolvidas por esta empresa técnicas de envelhecimento a vapor. Como método de aceleração do envelhecimento através de vapor, adota-se o sistema de sopro de vapor de 110° C no fundo da pilha de escória com 3 metros de altura. O topo da pilha é revestido por uma lona de borracha para minimizar a perda e agilizar o processo de envelhecimento. Desta forma, a expansibilidade menor ou igual a 1,5% (nível estabelecido na norma japonesa) tem sido conseguida com 18 dias de envelhecimento a vapor. Atualmente o procedimento padrão é de 20 dias, depois dos quais a escória é liberada para uso. A expansibilidade da escória do refino oxidante (FEA) é baixa, mesmo sem o tratamento de envelhecimento. A escória do refino redutor (FP), que se esfarela durante o jateamento de água no início do processo de resfriamento, inicia a reação de hidratação com um simples umidecimento e a sua expansibilidade cai pela metade quando comparada com a escória seca; mesmo assim, o seu valor é elevado: maior ou igual a 20%.

A expansão da escória FP pela absorção de água é um grande empecilho na sua utilização como material de enchimento ou como base da pavimentação de rodovias. A causa da expansão é a transformação volumétrica que ocorre devido à reação de hidratação das fases minerais das seguintes composições químicas da escória: 12CaO , $7\text{Al}_2\text{O}_3$, CaO , 2CaO-SiO_2 . A principal causa disso é a expansão volumétrica que ocorre devido à transformação da cal livre (CaO livre) em cal extinta (Ca(OH)_2). Esta transformação faz com que o volume da cal aumente 1,99 vezes. Contudo, a influência da CaO livre não explica todo o fenômeno da expansão da escória FP. Presume-se que a transformação volumétrica ocorra devido à uma série de reações de hidratação difíceis de serem esclarecidas (DAIDO, 1993). Ainda nesta siderúrgica a escória FEA é transportada ao pátio de escória, enquanto a de redução sofre um resfriamento de jato d'água após completa solidificação na panela de escória. Os pátios de tratamento de ambos os tipos de escória são bem independentes de modo a evitar a mistura. Uma vez que a expansibilidade da escória FP é baixa desde o início, não se observam variações significativas ao longo do tempo de envelhecimento. Na medida em que a escória FP no estado de pó apresenta uma alta expansibilidade e a sua reação de hidratação dura por longo tempo, os efeitos do envelhecimento ao ar livre é praticamente nulo. Para se atingir o nível estabelecido na norma japonesa (menor ou igual a 1,5%) será preciso muitos anos de exposição.

A norma do DNER (1994) cita que deve haver rigoroso controle da escória de aciaria, quando da sua aceitação, relativamente à expansão, não devendo ser superior a 3% ou o valor determinado pela especificação particular de projeto, conforme o método PTM 130

(Pennsylvania Testing Method, USA), adaptado pelo Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais.

CHATTERJI (1995) cita que o mecanismo de expansão não é totalmente entendido. Relata que alguns autores têm mostrado que a expansão em autoclave cresce proporcionalmente com o crescimento do tamanho das partículas de MgO. KEIL apud CHATTERJI (1995) descobriu que 4% de MgO abaixo de 5 μ m de tamanho produz a mesma expansão em autoclave que 1% de MgO com 30-60 μ m de tamanho. Portanto quanto maior a partícula original do óxido, tanto maior será o volume dos finos cristais do hidróxido e maior será o volume do crescimento do cristal alongado e então também a capacidade de expansão. Isto explica o efeito do tamanho da partícula do óxido na expansão retardada.

Conforme PAVLENKO (1992) o processo da estrutura falha da escória está ligado com a transformação polimórfica do silicato dicálcio e sua transformação de β para γ . A cal livre (acima de 6%) que está presente na escória estudada pelo autor em vários graus de queima em excesso, e é hidratada com o aumento de volume, também contribui para a falha da escória. Decidiu-se moer a escória até a pulverização com uma superfície específica de 4000 a 4500cm²/g o que permitiu eliminar as propriedades negativas da escória e usar as positivas (retirar a cal livre de uma cobertura fundida e misturá-la com sílica e água).

A escória atua como redutor e diluente dos constituintes vulneráveis e nocivos ao clínquer. A penetração de íons cloreto na pasta de cimento com escória parece ser mais lenta. A difusão dos cloretos na massa é retardada pela formação do cloroaluminato de cálcio, pouco solúvel, reduzindo desta forma a concentração de cloretos livres (BARBOSA, 1993).

A norma japonesa JIS A-5015 (1992) define cura para o caso da escória de aciaria que consiste no tratamento de estabilização química através da reação de hidratação e carbonatação de substâncias expansíveis (como cal livre) da escória com ar e água. Durante a cura, essas substâncias reagem, transformando-se em hidróxidos e carbonatos estáveis.

Esta mesma norma fixa cura normal superior a seis meses para escória de aciaria para uso em estradas. A duração da cura pode ser reduzida desde que, no caso de escória de forno elétrico, após a cura mínima normal de 3 meses, o índice de dilatação em água fique menor que 0,6% e no caso de escória de aciaria com cura acelerada a dilatação seja confirmadamente estabilizada.

O Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (BRASIL, 1988) determina que o tempo de exposição ao ar livre desses resíduos deve ser de no mínimo 6 meses. Após este período, os lotes devem ser amostrados e as escórias devem ser analisadas com relação às características expansivas, levando-se em consideração os respectivos campos de aplicação

destes materiais. Se algum lote não satisfizer o critério de expansibilidade para a aplicação prevista, este não deverá ser reamostrado e reensaiado até que tenha decorrido um período adicional de 2 meses.

De acordo com o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, esses lotes de estocagem devem ter uma forma tronco-cônica, com a menor altura e a maior área possíveis, visando a melhor condição para a hidratação e menor segregação do material (BRASIL, 1988).

2.2 ESTADO DA ARTE DA UTILIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Neste item são relacionados alguns trabalhos já executados com o intuito de aproveitar as escórias de aciaria como material de construção civil.

BRUN & YUAN (1994) apontam os vários campos de aplicação de escórias de diferentes origens, o que pode ser observado na tabela 2.4.

TABELA 2.4 Campo de aplicação de escórias de diferentes origens (BRUN & YUAN, 1994).

CAMPOS DE APLICAÇÃO		PROCEDÊNCIA DA ESCÓRIA		
		Aciaria	Alto-forno	Ferro-liga
Ferroviário	lastro/sub-lastro	X		X
Rodoviário	base/sub-base	X	X	X
	rev. asfáltico	X	X	X
	dreno/canaleta	X	X	X
	proteção talude	X		X
	pátio industrial	X	X	X
	estacionamento	X	X	X
	meio-fio	X	X	X
Construção Civil	piso de concreto	X	X	X
	pré-moldados	X	X	X
	manilhas/tubos	X	X	X
Agricultura	corretivo de solos	X	X	
Fábrica de cimento	substituto calcário	X		
	minério de ferro	X		
	clínquer		X	
Metalúrgico	fundente/redução	X	X	

De acordo com VON KRÜGER (1995), as escórias de aciaria têm como destinação mais comum a de agregado na Construção Civil, na pavimentação de estradas de rodagem e como lastro de ferrovias, sendo que ela deve passar, antes, por um período de cura. Como agregado, na Construção Civil, ela substitui parcialmente a areia e/ou a brita. No concreto, a escória entraria como adição ou como agregado. Entretanto, a utilização da escória está condicionada à sua competitividade na região com os agregados naturais. As escórias de aciaria têm, também, propriedades cimentantes latentes, se bem que menos que as escórias de alto-forno. Para o seu emprego efetivo nesta direção, devem ser corrigidas com alumina e submetidas a resfriamento brusco, ou seja, uma granulação, como nos altos-fornos. Na França foi desenvolvido processo dentro daquela linha, onde a escória é ajustada a cimento, dentro de um reator tipo convertedor e granulada no vazamento. O processo se revelou tecnicamente viável, mas a competitividade do produto depende do preço do cimento. Parte da escória de aciaria tem sido usada internamente na usina substituindo parte da cal e do calcário, respectivamente na aciaria e nos altos-fornos. Um ponto favorável à escória de aciaria elétrica (FEA), em relação a de convertedor (LD), é que as usinas operando por aquela via são de menor escala, mais disseminadas e, normalmente, próximas de grandes centros. Disto resulta, em princípio, um mercado para agregados mais favorável. Provavelmente decorre daí o aumento das taxas de reciclagem das escórias de forno elétrico e a redução daquelas referentes à escória de convertedor.

Atualmente, há indícios de aumento das destinações para a Construção Civil, conforme discutido nos itens a seguir.

2.2.1 Utilização como agregado

As escórias de refino como agregado podem ser empregadas em pavimentação, na produção de tijolos e blocos e em concreto.

BRUN & YUAN (1994), conforme dados fornecidos pela empresa responsável pelo processamento e venda das escórias nas siderúrgicas (Sobremetal), apresentam como vantagens da utilização do agregado graúdo de escória de aciaria sobre o agregado pétreo (brita) as seguintes:

- menor custo, já que não requer explosivos para desmonte;
- maior resistência à abrasão do concreto gerado;
- estrutura vesicular, permitindo perfeita drenagem quando utilizados em drenos e lastros ferroviários;

- forma de grão (cúbica), que confere ótima consistência e adesividade às misturas asfálticas;

- maior peso próprio, resultando em economia de material no dimensionamento de contenções e lastros, assegurando grande estabilidade.

Com vistas a obter um agregado com maior qualidade, alguns aspectos devem ser observados, tais como se o agregado produzido não foi contaminado com outros materiais, como lixo industrial, plástico, refratário, entre outros, assim como não se deve misturar escória de diferentes tipos, como por exemplo, escória de aciaria e alto-forno.

As propriedades dos agregados variam conforme a composição e resfriamento das escórias. Geralmente escórias ácidas produzem agregados mais densos e escórias básicas agregados com estrutura vesicular. Nas aciarias brasileiras são geradas escórias básicas, onde o índice de basicidade (i) é maior que um.

VALLE apud GUMIERI (2000) relata que na AÇOMINAS (Aço Minas Gerais S. A.) a geração de resíduos é da ordem de 121 mil toneladas por mês. Nesta empresa são gerados cerca de 610 kg de resíduos de diversos tipos (90% de escórias de alto-forno e aciaria LD, 10% de lamas e pós de sinterização) para cada tonelada de aço produzida. Deste total de resíduos, 52% sofre processo de reciclagem direta ou indireta na própria empresa, 43% é comercializado e 5% é descartado. No que diz respeito à escória de aciaria, este resíduo, ainda na forma líquida, é descartado em uma baía, onde sofre um resfriamento lento, solidificando-se em forma cristalina. Após esta etapa, o material passa por um processo de beneficiamento onde a parte metálica, denominada sucata, é reciclada no processo de produção do aço e o restante, denominado agregado graduado de aciaria, é normalmente utilizado como lastro ferroviário e pavimentação. Este agregado, comumente chamado de escória, é produzido atualmente em três faixas granulométricas (agregado 1 → 0 a 9,5 mm; agregado 2 → 9,5 a 32mm e agregado 3 → >32mm). A AÇOMINAS vem utilizando o agregado 2 na pavimentação de vias dentro de sua usina e comercializando para a prefeitura de Ouro Branco, que o utiliza na preparação de base de vias (solo-escória).

Em bases confinadas com agregado proveniente de escória é condição necessária que o material esteja devidamente curado, para se evitar o inconveniente da sua característica de expansibilidade.

A norma japonesa JIS A-5015 (1992), que trata da escória siderúrgica-para construção de estradas, limita o índice de dilatação em água para a escória de aciaria de granulometria simples em 2% aos 10 dias (240 horas): quando utilizadas como agregados para construção de estradas. Esta norma ainda fixa outras condições para esta escória como a massa específica,

que deve ser superior a $2,45 \text{ kg/dm}^3$, o índice de absorção de água, inferior a 3% e o índice de abrasão, inferior a 30%.

Estudos realizados pela COSIPA (1995) indicam um pavimento econômico que é constituído de uma ou mais camadas de agregado de origem siderúrgica, misturados com água e compactados. Este pavimento deve ser executado com agregados que preencham os seguintes requisitos:

- 1ª camada (reforço)- agregado de origem siderúrgica de 6 a 20cm;
- 2ª camada (intermediária)- agregado de origem siderúrgica de 2,5 a 6cm;
- 3ª camada (rolamento)- agregado de origem siderúrgica de 0 a 1,27cm.

Sua execução consiste nas operações de espalhamento, umedecimento, compactação e acabamento dos materiais, realizados na pista, devidamente preparada na largura desejada, nas quantidades que permitam, após a compactação, atingir a espessura projetada.

GUTT (1972) relata que algumas escórias de aciaria têm uma alta resistência à abrasão, o que a torna uma boa fonte de agregado para confecção de estrada.

LIMA (1999) estudou agregados de escória de aciaria para confecção de concretos e argamassas. Neste estudo a autora faz algumas considerações interessantes a respeito de substâncias nocivas em concretos e argamassas que podem ser encontradas nestes materiais.

Os agregados podem ter substâncias que causam instabilidade volumétrica, aumento no tempo de pega, aumento do consumo de água e despassivação das armaduras. As substâncias nocivas que geralmente estão na normalização dos materiais convencionais são as impurezas orgânicas, argilas, finos, sulfatos e cloretos.

A cal livre (CaO) e o periclásio (MgO) não estão normalizados porque são substâncias pouco freqüentes nos agregados convencionais, mas que causam expansões no concreto e podem ser encontradas em agregados artificiais, principalmente em escórias de aciaria porque estas são formadas por adições de óxido de cálcio e os fornos geralmente são revestidos com material refratário de magnésio e cal dolomítico utilizado para dissolver a cal calcítica no forno elétrico .

Embora já se tenha discutido, o óxido de cálcio ou a cal livre reage com a água formando hidróxido de cálcio. O volume ocupado pelo hidróxido de cálcio é menor que o ocupado pelo CaO , mas as partículas hidratadas formadas crescem com uma orientação preferencial, produzindo pressão ao seu redor (LEA, 1988). A reatividade da cal livre depende da temperatura a que é preparada. Quando não for levada a mais de 1000°C , reage instantaneamente com a água, mas se não chegar a esta temperatura requer um período

considerável de tempo para hidratar-se porque forma cristais densos e compactos que possuem menor superfície específica para reagir com a água.

O óxido de magnésio (MgO) ou periclásio tem uma instabilidade ao longo do tempo, já que se hidrata lentamente, causando uma expansão que pode causar a ruptura do elemento. De acordo com LEA (1988), o grau de instabilidade depende do tamanho dos cristais. Os cristais pequenos hidratam-se rapidamente e não chegam a causar pressões internas. O tamanho dos cristais depende da velocidade de resfriamento. No caso de resfriamento lento, formar-se-ão grandes cristais que se hidratarão lentamente, causando grande expansão.

Portanto, antes de se utilizar os agregados de escória, deve-se assegurar que estejam livres de compostos ou que estas reações já tenham acontecido (LIMA, 1999).

2.2.2 Utilização na produção de cimento

ROSTIK (1999) relata a experiência da Chaparral Steel, que faz parte da Texas Industries Inc. Esta indústria é a maior produtora de cimento do Texas e uma das maiores da Califórnia, nos Estados Unidos. As suas siderúrgicas, que trabalham com aciaria elétrica, produzem anualmente cerca de 2 milhões de toneladas de aço. Em 1995 esta indústria aceitou um desafio de reutilização de 100% de seus resíduos, iniciando um programa chamado de STAR (“Systems and Technology for Advanced Recycling”), onde foi dada especial atenção ao pó de aciaria, escória, consumo de energia e o resíduo de fragmentadora de automóveis.

A escória de forno elétrico, com uma geração aproximada de 11,5% da massa de aço líquido, que contém uma quantidade significativa de ferro, costumava ser resfriada e britada e usada como aterro ou como base em construção de estradas. Mas o ferro perdido e o seu potencial de recuperação começou a chamar a atenção dos técnicos da fábrica, que propuseram uma mudança no processo. Passaram a britar a escória em partículas menores e separar magneticamente o ferro. Estas partículas de ferro começaram a ser reaproveitadas no forno elétrico.

A escória restante, contendo menos ferro, foi analisada pelos químicos da cimenteira, que, baseados no uso da escória de alto-forno (que não contém ferro), começaram a estudar como utilizar a escória de aciaria no processo de fabricação do cimento. O processo criado e patenteado por esta indústria chama-se CemStarTM e utiliza hoje 100% da escória gerada pela siderúrgica. O método baseia-se em substituir 10-15% do calcário da fabricação do cimento por escória, que é um material que já tem estrutura pozolânica criada pelo imenso calor

produzido no forno elétrico. O monitoramento deste processo indica que a indústria cimenteira está emitindo 10% menos de CO₂ na atmosfera.

Os especialistas em aquecimento global culpam a produção do cimento Portland por 7% das emissões mundiais de dióxido de carbono. A atual produção do cimento contribui com a emissão de aproximadamente uma tonelada de CO₂ por tonelada de cimento produzido. Metade disso resulta da calcinação do calcário e o resto vem do uso predominante de combustível fóssil na produção de clínquer. Com o processo utilizando o CemStar™, além da utilização de 100% da escória gerada, a produtividade aumentou em 9% e está se conseguindo uma economia de energia no forno de 10-15%, energia esta que normalmente vem do carvão.

MURPHY, MEADOWCROFT e BARR (1997) estudaram as melhorias das propriedades cimentícias devidas à adição de escória de aciaria. Neste artigo os autores relatam que em ensaios realizados aos 1, 7, 14 e 35 dias de idade, misturas de escória adicionadas ao clínquer do cimento Portland mostraram substanciais ganhos de resistência com 10% de adição de escória e com 20% de adição as resistências obtidas permaneceram próximas ao testemunho. Além disso a resistência caiu para a adição máxima de 40% de escória testada. O aumento da resistência é atribuído a um efeito sinérgico entre a escória hidratada e o cimento Portland. Esses resultados são encorajadores e sugerem que, por um pequeno processo aplicado à escória no estado líquido, possa ser obtido um material útil e de elevado valor agregado para um produto que atualmente é apenas um resíduo.

De acordo com GEISELER (1996), as escórias de aciaria têm sido usadas para produção de cimento. Entretanto, como as suas propriedades hidráulicas são mais pobres se comparadas a escória granulada de alto-forno, somente pequenas quantidades são usadas para este propósito. Também pode ser usada na indústria de cimento como matéria-prima para confecção do clínquer, o que permite uma temperatura de queima mais baixa, reduzindo assim o consumo de energia.

2.2.3 Utilização como adição aos materiais à base de cimento

As propriedades físicas características das escórias (densidade, granulometria, propriedades estruturais) variam de acordo com a maneira como é feito o resfriamento deste resíduo. RUBIO E CARRETERO (1991) citam que pode existir grande variação na composição destas escórias, mesmo sendo estas produzidas numa mesma indústria.

A escória fundida, ao sair do forno à temperatura próxima de 1500°C, pode ser submetida a diferentes processos de resfriamento. Estes processos são normalmente utilizados para as escórias de alto-forno (SILVA e ALMEIDA, 1986).

Se a escória é resfriada naturalmente ao ar, os seus óxidos componentes se cristalizam e perdem as características hidráulicas, podendo ser considerada inerte.

A escória obtida pelo resfriamento rápido, sendo previamente expandida pela aplicação de uma quantidade controlada de água, ar ou vapor, é conhecida como escória expandida. A solidificação assim acelerada aumenta a natureza vesicular da escória, produzindo-se assim um material leve, que é em seguida moído e classificado granulometricamente.

Finalmente, a escória obtida por resfriamento brusco, conhecida como escória granulada, é previamente fragmentada por jato d'água e posteriormente resfriada em tanque com água, onde se granula. Dessa forma, se obtém uma escória vítrea, resultando em pouca ou nenhuma cristalização, de granulometria semelhante à da areia de rio e com massa unitária em torno de 1000 kg/m³. Apresenta estrutura porosa e textura áspera. Este tipo de material é utilizado em função de sua excelente ligação hidráulica. Para as escórias de alto-forno este produto não cristalizado é moído à finura adequada e usado como adição ao cimento Portland.

O método mais comum empregado no resfriamento da escória de alto-forno é pela granulação por água. A escória fundida é normalmente fragmentada por jatos d'água e é então imediatamente imersa em água, mas muitas variações são usadas. Embora este seja um método eficiente de resfriamento, a granulação por água tem várias desvantagens pelos pontos de vista ambiental e de produção. A água de resfriamento contamina-se com enxofre e outros componentes lixiviados a partir da escória e os sulfetos combinam-se com a água, formando ácido sulfídrico (H₂S). Entretanto, as suas emissões são menores que as que ocorrem nos poços de escória resfriada ao ar e granuladores modernos são usados e são adequados se tiverem uma chaminé com coletores apropriados. Além de problemas potenciais com poluição do ar e da água, a escória pode ter um conteúdo de umidade residual alta e deve ser seca antes de ser moída para uso como material cimentante (MALHOTRA, 1987).

As escórias de aciaria no Brasil têm um resfriamento lento ao ar, recebendo pequenos jatos d'água para auxiliar no resfriamento logo que chegam nos pátios de escória.

A escória de alto-forno é usualmente adicionada ao clínquer Portland para produção de cimentos como o CP II-E (cimento Portland com adição de 6 a 34% de escória- NBR 11.578/91) e o CP III (Cimento de Alto-Forno, com adição de 35 a 70% de escória- NBR 5735/91), normalizados no Brasil desde 1964.

Na Alemanha, em 1865, produziu-se o primeiro aglutinante hidráulico de escória ativada por cal (SILVA et al, 1991), porém o aproveitamento em mistura com cimento Portland só se deu em 1882 e em 1896 nos Estados Unidos, o qual possuía grande interesse no estudo de utilização de escórias para aumentar a produção de cimentos em épocas de escassez do mesmo (CALLEJA, 1982). Este aglutinante hidráulico de escória recebeu em 1901 o nome de cimento ferro-Portland (CINCOTTO et al, 1990).

JOHN (1995), em sua tese de doutorado, faz uma vasta revisão histórica do surgimento deste tipo de cimento. Cita o autor que em dezembro de 1909 era editada a norma alemã de cimento Portland com adição de até 30% de escória de alto-forno. Em 1917 foi editada a norma de cimento de alto-forno que permitia a adição de até 85% de escória. Em 1911 era editada a norma russa para cimentos de alto-forno, introduzido no mercado por volta de 1916.

Em 1952 a normalização em países como a Bélgica, Inglaterra, França, Alemanha, Holanda e Estados Unidos permitia a adição de 65% de escória nos cimentos de alto-forno.

Em 1959 os cimentos de alto-forno compreendiam aproximadamente 35,3% da produção de cimento na ex-URSS e, no Japão, eram produzidas entre 1,5 e 2 milhões de toneladas.

Na década de 70 mais de 30% do cimento produzido em países como a Polônia, Holanda, Bélgica, Romênia, França e URSS continha escória, em teores entre 5 e 95%.

No Brasil a adição de escória de alto-forno ao cimento Portland iniciou-se em 1952 e tem crescido continuamente. É importante lembrar que, dos 7 milhões de toneladas de escória de alto-forno produzidas anualmente no Brasil, cerca de 2,5 milhões são provenientes da produção de ferro gusa em altos-fornos que empregam carvão vegetal, gerando uma escória ácida, onde a relação $i=C/S < 1$, menos reativa do que as escórias básicas ($i=C/S > 1$) produzidas nos altos-fornos que utilizam carvão coque.

2.2.4 Outras possibilidades de utilização

Tem-se, na figura 2.2, aspectos potenciais do uso da escória de aciaria e o que já existe.

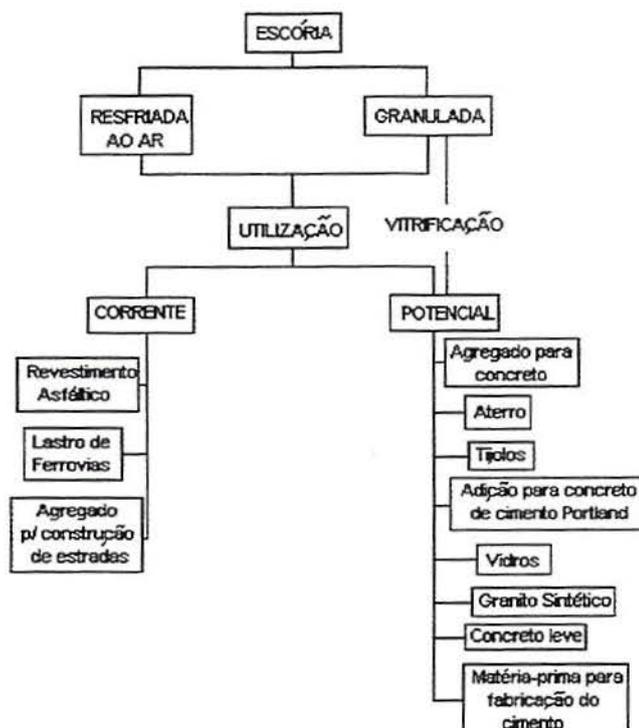


FIGURA 2.2 Usos correntes e usos potenciais da escória de aciaria (GEYER, 1997).

GROMOV (1984) cita, em seu artigo sobre a utilização de escórias metalúrgicas na ex-União Soviética, além do uso como agregado leve para confecção de concreto e na indústria de cimento, a sua utilização na indústria do vidro e na confecção de granito sintético chamado de “sigrán”.

Não existe roteiro para beneficiamento da escória de aciaria no Brasil como já é feito em outros países como no Japão, onde esta escória já é liberada para uso, estabilizada, após 20 dias de cura acelerada a vapor (JIS A-5015). O seu uso naquele país encontra-se principalmente em sub-leitos de estradas. Entretanto permanecem abertas a potencialidade de uso em outras áreas, como é o caso da adição ou substituição do cimento Portland na confecção do concreto.

A indústria siderúrgica tem realizado um grande esforço para reduzir o impacto ambiental por ela provocado. Apesar da adoção de novas tecnologias, menos poluentes e energeticamente mais eficazes, a geração e captação de uma grande variedade de resíduos deixa a siderurgia mundial com o ônus da gestão de meio bilhão de toneladas anuais desses materiais. Cada unidade de produção das siderúrgicas gera resíduos, que são reciclados, vendidos ou simplesmente descartados. Nesse último caso, diversos fatores têm levado as usinas a tratarem os resíduos antes do descarte ou a encontrar uma utilização para os mesmos.

GEISELER (1996) cita que exigências restritas para estabilidade de volume são feitas quando se usa escórias de aciaria como componente do concreto, por causa da rápida formação da ligação rígida. Nesta aplicação qualquer expansão do agregado leva a fissuração e coloca em risco a integridade de toda estrutura. Por isso a escória de aciaria é usada preferencialmente em aplicações não estruturais, como lajes de pavimento ou blocos de quebra-mar (gabiões). Trabalhos na Áustria também têm mostrado que fazendo-se uma escolha cuidadosa é possível usá-la como agregado no concreto para construção de estradas e em pisos de concreto.

3 A QUESTÃO DAS ADIÇÕES AO CONCRETO

Além das usinas siderúrgicas, fornos de usinas termoelétricas que empregam carvão como combustível e fornos metalúrgicos que produzem ferro fundido, silício metálico e ligas de ferro-silício são as maiores fontes de subprodutos em potencial para a construção civil, os quais estão sendo produzidos num volume de milhões de toneladas a cada ano em muitos países. Acumular estes subprodutos em aterros representa uma perda de material e causa sérios problemas de poluição ambiental. O uso como agregado para concreto e em subleito de rodovias é um aproveitamento menos nobre que não utiliza o potencial destes materiais muitas vezes pozolânicos e cimentantes. Com controle de qualidade adequado, grandes quantidades de muitos subprodutos industriais podem ser incorporados ao concreto, na forma de cimentos Portland compostos ou de adições minerais. Quando as propriedades pozolânicas ou cimentantes de um material são tais que ele pode ser um substituto parcial do cimento Portland no concreto, ou se este material age como filler, isto resulta numa economia significativa de energia e custo, podendo inclusive apresentar melhorias nas propriedades do concreto gerado.

O mecanismo pelo qual a reação pozolânica exerce um efeito benéfico sobre os efeitos do concreto é o mesmo, quer o material pozolânico tenha sido adicionado como uma adição mineral quer como um constituinte de cimentos Portland compostos. Da reação pozolânica e das propriedades dos cimentos Portland compostos, fica claro que os benefícios de engenharia derivados do emprego de adições minerais no concreto incluem melhora da resistência à fissuração térmica devido ao calor de hidratação mais baixo, aumento das resistências e redução da permeabilidade por refinamento de poros e (como resultado da redução da alcalinidade) uma durabilidade maior a ataques químicos, tais como, águas sulfatadas e reação álcali-agregado (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

3.1 ADIÇÕES MINERAIS

Conforme MEHTA & MONTEIRO (1994), adições minerais são materiais silicosos finamente moídos, adicionados ao concreto em quantidades relativamente grandes, geralmente na faixa de 20 a 100% da massa do cimento Portland.

O AMERICAN COMMITTEE 212 (1985) do ACI (American Concrete Institute) classifica as adições minerais em pó segundo 4 tipos:

- Cimentícios: cimentos naturais ou cales hidráulicas produzidas pela queima de rochas calcárias argilosas, assim como cimentos de escória e escória granulada de alto-forno;
- Pozolânicos: materiais silicosos ou silicosos e aluminosos que por si só, possuem pouco ou nenhum poder cimentício, mas que na forma de pó e na presença de umidade, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio em temperaturas normais, formando compostos com propriedades cimentícias. Exemplos disto são as cinzas volantes, cinzas vulcânicas ácidas no seu estado natural ou calcinadas, alguns xistos e argilas calcinadas e alguns subprodutos industriais, como a sílica ativa;
- Pozolânicos e cimentícios: cinza volante classe C, cujo teor de cal livre no material é suficiente para produzir reação cimentícia quando o material está úmido. A escória granulada de alto-forno, da mesma forma possui tanto características pozolânicas como cimentícias;
- Outros – são materiais quimicamente inertes que, quando na forma de pó, são atacados pela cal e pelos álcalis liberados durante a hidratação do cimento Portland, favorecendo ao longo do tempo o aparecimento de efeitos benéficos à resistência mecânica, permeabilidade e resistência química. São exemplos destes materiais o quartzo, dolomita, rochas calcárias e vários produtos rochosos silicosos, além de granito e asbesto.

Já a Norma Européia ENV 206, conforme ALMEIDA (1990), denomina adições aos materiais inorgânicos finamente divididos que podem ser incorporados aos concretos com a finalidade de aprimorar ou acrescentar determinadas propriedades ao material.

Esta norma divide as adições em dois tipos: Tipo I – adições praticamente inertes e Tipo II- adições pozolânicas ou potencialmente hidráulicas.

Conforme MEHTA E MONTEIRO (1994), as adições podem ser classificadas em dois grupos em função da origem:

Materiais naturais: são materiais processados com o único objetivo de produzir uma pozolana. O processamento consiste usualmente de britagem, moagem, classificação por tamanho, em alguns casos pode também incluir ativação. Podendo também estar presentes operações como queima ou incineração.

Entre os principais materiais naturais utilizados pode-se citar: Terras diatomáceas, vidros vulcânicos, Tufos vulcânicos, argilas ou folhelhos calcinados.

Subprodutos: materiais que não são produtos primários de suas respectivas indústrias produtoras. Os subprodutos industriais podem ou não requerer processamentos.

Entre os mais conhecidos materiais pozolânicos subprodutos pode-se citar: a cinza volante, a escória granulada de alto-forno, a sílica ativa, a cinza de casca de arroz, o metacaulin.

Conforme MEHTA & MALHOTRA (1996), os benefícios do uso de adições minerais no cimento ou em concretos pode ser dividido em três categorias: benefícios de engenharia, benefícios econômicos e/ou benefícios ecológicos.

Benefícios de Engenharia: primeiro, a incorporação de finas partículas na mistura de concreto tende a melhorar a trabalhabilidade e reduzir a quantidade de água para dar consistência, exceção a materiais muito finos como por exemplo a sílica ativa. Em segundo lugar, em geral há um incremento da resistência, redução da permeabilidade e aumento da durabilidade ao ataque químico. Também uma redução nas fissuras térmicas pode ocorrer devido a se ter um menor calor de hidratação do concreto.

Benefícios Econômicos: O cimento Portland normalmente representa o mais caro dos materiais utilizados no concreto e seu custo tem aumentado nos últimos anos devido ao aumento do custo da energia. Como a maioria dos materiais utilizados como adições minerais são subprodutos industriais ou resíduos, obviamente quando se substitui parte do cimento por estes materiais tem-se uma redução do custo do aglomerante e por consequência do concreto.

Benefícios Ecológicos: Muitos dos subprodutos utilizados como adições minerais a cimentos ou concretos contêm nas suas composições materiais poluentes, tóxicos e mesmo patogênicos e podem ser nocivos ao homem se não forem dispostos de uma forma segura. O lançamento destes produtos em mananciais ou o uso como aterros não tem sido uma prática segura, porque contaminam o meio ambiente em que são colocados. A indústria do cimento e do concreto tem se tornado um veículo preferencial para disposição de subprodutos, principalmente porque a maioria dos materiais contaminantes, como metais, podem ser seguramente incorporados na hidratação dos produtos do cimento. Outro ponto importante é quanto à poluição que causam as indústrias de cimento, principalmente quanto à emissão de CO₂ e outros poluentes. No caso do aproveitamento de subprodutos existe um grande ganho ambiental porque se reduz a quantidade de cimento produzido, reduzindo-se a poluição e também preservando os recursos naturais para próximas gerações.

Conforme MEHTA & MONTEIRO (1994), fazendo-se uma análise técnica, econômica e ecológica, não há melhor alternativa do que o concreto para as milhões de toneladas de subprodutos pozolânicos e cimentícios. A estocagem destes subprodutos no solo causa a poluição do ar, enquanto seu despejo em lagos e córregos ocasiona a liberação dos

metais tóxicos normalmente presentes em pequenas quantidades. Mesmo as aplicações de menor valor, tais como aterros e materiais granulares para sub-bases e ombreiras de rodovias, são, em última análise, alternativas de risco para a saúde humana, porque os metais tóxicos irão infiltrar-se no lençol freático. Por outro lado, o uso de sub-produtos como constituintes de cimento Portland composto ou como adições minerais no concreto, representa uma maneira relativamente barata de disposição adequada dos elementos tóxicos presentes.

Conforme MEHTA & MALHOTRA (1996), o uso de materiais pozolânicos e cimentícios no cimento e no concreto tem aumentado muito nos últimos 50 anos. Os autores prevêem que num futuro próximo a utilização de cimentos sem estas adições seja a exceção à regra.

3.2 AÇÃO DAS ADIÇÕES MINERAIS NOS PRODUTOS CIMENTÍCIOS

3.2.1 Reação pozolânica

Reação pozolânica é o nome dado à reação química entre uma pozolana e o hidróxido de cálcio (CH) para formar o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que é o principal produto cimentante da hidratação do cimento Portland (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

A reação de hidratação do cimento Portland forma o C-S-H, porém a reação pozolânica não forma este material a partir da combinação entre a água, os compostos do cimento e a pozolana e sim numa etapa posterior à reação de hidratação. Isto é, a pozolana reage com o CH formado pelas reações de hidratação, em presença de água numa etapa secundária à reação de hidratação, por isto também é conhecida como reação secundária.

MEHTA E MONTEIRO (1994) exemplificam as duas reações no seguinte esquema:

Reação do cimento Portland- rápida	Reação Pozolânica- lenta
$C_3S + H \rightarrow C-S-H + CH$	$POZOLANA + CH + H \rightarrow C-S-H$
Silicato tri-cálcico mais água, produzindo silicato de cálcio hidratado e hidróxido de cálcio.	Pozolana mais hidróxido de cálcio formado na reação de hidratação do cimento Portland na presença de água forma silicato de cálcio hidratado.

A importância técnica dos cimentos com adições pozolânicas deriva principalmente de três aspectos:

1. A reação é lenta, e portanto, a taxa de liberação de calor e de desenvolvimento da resistência serão conseqüentemente lentas.
2. A reação consome hidróxido de cálcio, ao invés de produzi-lo, o que representa uma contribuição importante para a durabilidade da pasta endurecida de cimento frente a meios ácidos.
3. Estudos sobre a distribuição do tamanho das pastas de cimento hidratadas com adições mostram que os produtos da reação são bastante eficientes no preenchimento dos espaços capilares grandes, melhorando assim a resistência e reduzindo a permeabilidade do sistema.

3.2.2 Ação filer

O filer é um material finamente moído, com aproximadamente a mesma finura do cimento Portland, que, devido às suas propriedades físicas, tem um efeito benéfico sobre as propriedades do concreto, tais como trabalhabilidade, densidade, permeabilidade, capilaridade, exsudação ou tendência de fissuração. Usualmente os filers são inertes, mas não é desvantajoso que apresentem algumas propriedades hidráulicas ou se entrem em reações não prejudiciais com os produtos de hidratação. Os filers podem também ativar a hidratação do cimento Portland atuando como ponto de nucleação (NEVILLE, 1997).

Quanto aos materiais que são formados podem ser tanto naturais como processados, sendo importante que apresentem propriedades uniformes, especialmente a finura. Sempre que a adição de filers aumentar a demanda de água do concreto, pode-se utilizar aditivos redutores de água, para não prejudicar a resistência do concreto a intempéries ou mesmo a proteção às armaduras. Também a adição de filers não deve resultar numa degradação da resistência do concreto a longo prazo.

Conforme CANOVAS (1996), os filers empregados como adições ao cimento Portland são materiais inorgânicos minerais, naturais ou artificiais, especialmente selecionados, que melhoram as propriedades do cimento, por exemplo, a trabalhabilidade ou a retenção de água. Os filers podem ser inertes ou possuírem características hidráulicas em pequena escala, terem forte características cimentícias ou serem materiais pozolânicos.

Como a ação dos filers é predominantemente física, eles devem ser fisicamente compatíveis com o cimento com o qual vão ser usados.

Conforme NEVILLE (1997), embora as normas estabeleçam percentuais de 0 a 10% de teor de filers em relação à massa do cimento, como são os casos das normas brasileiras mostradas na tabela 3.1, a norma européia ENV 197-1992 já admite o uso de até 35% de calcário, desde que o restante do material cimentício seja apenas cimento Portland, e com este teor de adição o cimento passa ter o nome de Portland Calcário II/B-I. Como o calcário moído adicionado é na realidade um filer, pode-se dizer que já existem cimentos com teores de até 35%. NEVILLE (1997) acredita que para determinadas finalidades, num futuro próximo, se tornem populares cimentos com 15% a 20% de filers.

TABELA 3.1 Composição dos cimentos Portland conforme as normas da ABNT (NEVILLE, 1997).

Tipo de Cimento Portland	Sigla	Clínquer + gesso (%)	E Escória de Alto forno (%)	Z Material pozolânico (%)	F Filers (%)	Norma da ABNT
Comum	CPI	100	0	0	0	NBR5732
	CPI-S	95-99	0	0	1-5	
Composto	CPII-E	56-94	6-34	0	0-10	NBR11578
	CPII-Z	76-94	0	6-14	0-10	
	CPII-F	90-94	0	0	0-10	
Alto-forno	CPIII	25-65	35-70	0	0-5	NBR5735
Pozolânico	CPIV	45-85	0	15-50	0-5	NBR5736
Alta Resistência inicial	CPV- ARI	95-100	0	0	0-5	NBR5733

LEA citado por ANDRIOLO (1998), afirma que rochas finamente moídas ou areias muito finas incorporadas a concretos compactados a rolo ou mesmo concretos convencionais de baixa resistência tem melhorado o desempenho destes quanto à plasticidade dos materiais.

A utilização de filers com alto teor de sílica tem apresentado interessantes propriedades para os concretos compactados a rolo e massa, como por exemplo (ANDRIOLO, 1998):

- Diâmetros médios próximos a 25 μm , normalmente pouco superiores aos dos cimentos que podem variar de 10 a 15 μm ;

- Os grãos de areias moídas ou basaltos moídos analisados pelo microscópio eletrônico mostram-se equidimensionais;
- A atividade pozolânica dos filers tem aumentado de acordo com a finura;
- Alguns filers testados têm demonstrado substancial eficiência na redução das expansões devido às reações álcali-agregados, demonstrando assim outra importante ação pozolânica.

4 ENSAIOS DE VIABILIZAÇÃO DA ESCÓRIA COMO ADIÇÃO AO CONCRETO

Com o objetivo de apontar a viabilidade técnica da utilização da escória de aciaria elétrica como adição ao cimento Portland na confecção de concreto foram executados alguns ensaios de viabilização. A partir dos resultados destes ensaios foi definido o andamento da tese propriamente dita. Os ensaios de viabilização foram os seguintes:

- 1- Determinação de expansibilidade (NBR 11582/91- “Cimento Portland- Determinação da expansibilidade de Le Chatelier” (ABNT, 1991)). Este ensaio é decisivo para o uso desta escória como adição ao cimento, uma vez que a bibliografia aponta o material como expansivo;
- 2- Ensaio de pozolanicidade (NBR 5752/77- “Pozolanas- Determinação do índice de atividade pozolânica com cimento Portland” (ABNT, 1977)). Devido à característica química deste material, procurou-se determinar a possibilidade dele ser pozolânico ou não, por ser este o uso mais nobre que poderia se dar a esta escória;
- 3- Determinação de resistência à compressão (NBR 7215/82- “Ensaio de cimento Portland” (ABNT, 1982)). Este ensaio foi escolhido por ser um ensaio referência para o estudo de concreto dentro da construção civil;
- 4- Profundidade de carbonatação- este é um ensaio que indiretamente avalia a durabilidade em relação à porosidade capilar do concreto gerado.

4.1- MATERIAIS UTILIZADOS

a) Cimento

Para os ensaios preliminares foi utilizado o cimento CP V - ARI (Cimento Portland classe V de alta resistência inicial).

O uso deste cimento é devido ao fato dele possuir no máximo 5% de adição de filer, de acordo com a NBR 5733/91, não interferindo de forma significativa nos resultados dos ensaios.

A tabela 4.1 mostra a composição química e as propriedades físicas e mecânicas do cimento utilizado nos ensaios, com os dados fornecidos pelo fabricante. Os limites estabelecidos pela NBR 5733/91 foram atendidos, com exceção do resíduo insolúvel, o que leva a crer que existam outras adições incorporadas ao cimento.

TABELA 4.1- Composição química e propriedades físicas e mecânicas do cimento utilizado CP V-ARI.

Composição química	Cimento estudado CP V-ARI	Limites NBR 5733/91
CaO (%)	63,44	-
CaO livre (%)	1,52	-
SiO ₂ (%)	19,85	-
MgO (%)	1,74	≤ 6,5
Al ₂ O ₃ (%)	5,24	-
FeO (%)	3,98	-
Na ₂ O (%)	0,27	-
K ₂ O (%)	0,4	-
SO ₃ (%)	3,13	≤ 3,5
CaSO ₄ (%)	5,32	-
Perda ao fogo(%)	1,9	≤ 4,5
Resíduo insolúvel (%)	1,72	≤ 1
Sílica + resíduo insolúvel (%)	19,85	-
i=CaO/SiO ₂	3,20	-
Propriedades físicas		
Massa Especifica (kg/dm ³)	3,10	-
Finura BLAINE (m ² /kg)	393	≥ 300
Início de pega (h)	1,58	≥ 1
Fim de pega	4,58	≤ 10
Propriedades mecânicas		
fc 1 dia (MPa)	16,8	≥ 14
fc 3 dias (MPa)	25,0	≥ 24
fc 7 dias (MPa)	35,3	≥ 34
fc 28 dias (MPa)	42,5	-

b) Escória

A escória utilizada nestes ensaios de viabilização é proveniente de uma aciaria do estado do Rio Grande do Sul composta tanto pela escória do forno elétrico a arco (FEA) como do forno-panela (FP). Esta mistura de escórias é a maneira usual de armazenagem nos pátios de escória das siderúrgicas brasileiras.

Foi coletada uma amostra aleatória de material, cuja composição química média obtida via espectrômetro de fluorescência de raios X ARL, modelo 7200, encontra-se na tabela 4.2.

TABELA 4.2- Composição química média da escória de aciaria utilizada nos ensaios de viabilização.

Composição química	Escória de aciaria utilizada nos ensaios de viabilização LENZI, 1995 (%)
CaO	28,60
SiO ₂	15,90
Al ₂ O ₃	2,30
MgO	10,15
FeO	36,15
MnO	4,25
P ₂ O ₅	0,81
Cr ₂ O ₃	1,50
TiO ₂	0,32
V ₂ O ₅	0,11
S	0,12
i= CaO/SiO ₂	1,80

É uma escória envelhecida naturalmente, a céu aberto, com idade superior a seis meses. O que significa que, teoricamente, seria um material curado.

Esta escória foi moída em moinho de bolas utilizado para ensaio de abrasão Los Angeles, com capacidade para 50 kg de material, por um período de três horas, com intuito de se alcançar uma granulometria próxima à do cimento.

A curva granulométrica obtida, após moagem, encontra-se na figura 4.1.

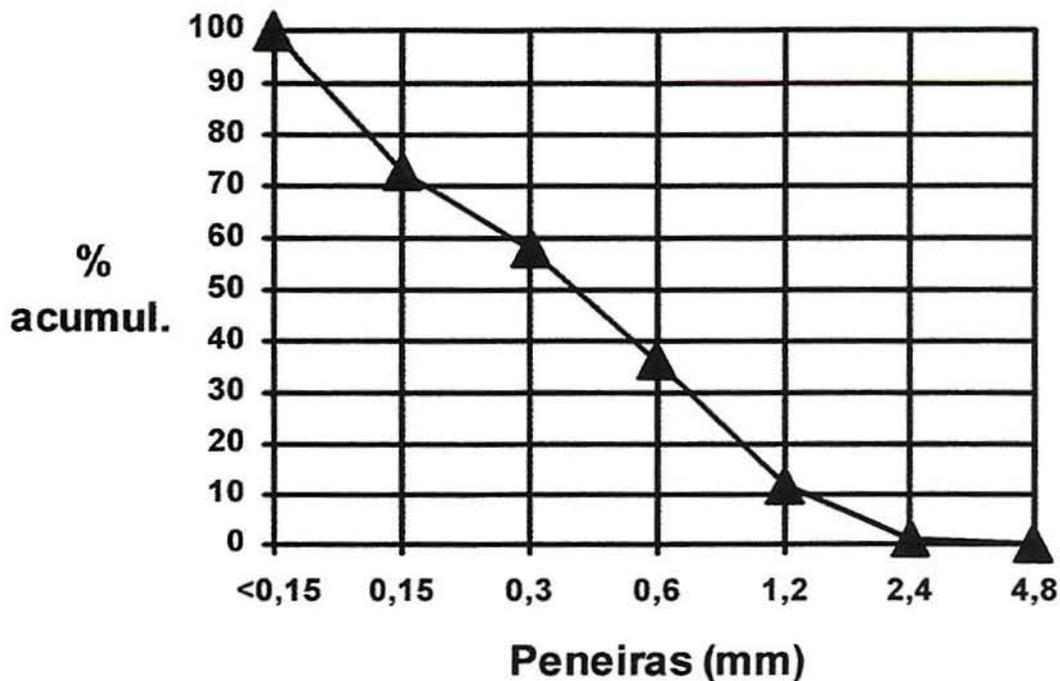


FIGURA 4.1- Curva granulométrica da escória de aciaria simplesmente moída.

Os valores de material retido nas peneiras de classificação do material encontram-se na tabela 4.3.

TABELA 4.3- Análise granulométrica da escória de aciaria simplesmente moída.

Peneira (mm)	Material retido (g)	% retida	% acumulada
4,8	-	-	0
2,4	5,5	1	1
1,2	45	11	12
0,6	103,5	24	36
0,3	95,5	22	58
0,15	65	15	73
<0,15	115	27	100
Somatório	429,9	100	-

Diâmetro máximo do agregado= 2,4mm

Módulo de finura= 1,8

A escória solidificada e resfriada apresenta-se em diversos formatos, como, por exemplo, pode ser observado na foto 4.1. A escória utilizada, depois de moída em moinho de bolas por um período mínimo de três horas até que passasse na peneira número 200 (Série

Tyler), aparentemente fica com aspecto muito semelhante ao cimento Portland, como pode ser observado na foto 4.2.



FOTO 4.1 Aspecto da escória de aciaria solidificada e resfriada.



ESCÓRIA

CIMENTO

FOTO 4.2 Aparência da escória de aciaria e do cimento Portland CPV-ARI.

Outras características físicas do material podem ser observadas na tabela 4.4. Estas determinações foram realizadas nos laboratórios do Centro Tecnológico de Engenharia Civil de Furnas Centrais Elétricas S. A.

TABELA 4.4 Características físicas da escória estudada.

Características	Escória estudada
Finura BLAINE	376m ² /kg
Massa Específica	3,12kg/dm ³

c) Concreto

O concreto confeccionado com os materiais citados tem as seguintes características:

Traço: 1:2,15:3,85(cimento:areia:brita)- traço em massa
 Adição de escória nas proporções definidas em 4.2
 Relação água/aglomerante= 0,59
 Abatimento= 7 ± 1 cm

Este traço foi escolhido por ser um concreto previamente dosado em laboratório para resistências convencionais (em torno de 25MPa), com uma relação água/aglomerante usualmente empregada em obra.

4.2- VARIÁVEIS ANALISADAS

Para os ensaios de viabilização de uso da escória foram analisadas como variáveis a porcentagem de adição de escória (0, 5, 35 e 70% sobre a massa de cimento) e a idade dos ensaios (3, 7 e 28 dias). As porcentagens de adição foram definidas a partir de valores já utilizados para a adição de escória de alto-forno para a confecção de cimento tipo CPII-E (cimento Portland composto com adição de 6 a 34% de escória de alto-forno) e de CPIII (cimento de alto-forno, com adição de 35 a 70% de escória).

Os ensaios foram realizados aos 3, 7 e 28 dias, por serem estas as idades dos ensaios tradicionalmente utilizadas para análise de materiais à base de cimento.

4.3 MÉTODOS DE ENSAIO

4.3.1 Expansibilidade

Para a realização do ensaio que mede a expansibilidade da pasta de cimento foram empregadas “agulhas de Le Chatelier”, de chapa de latão de 0,5mm de espessura (NBR 11.582, ABNT, 1991), que encontra-se detalhada na figura 4.2

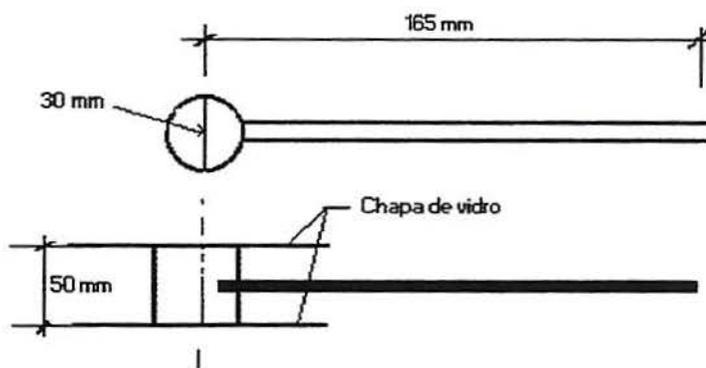


FIGURA 4.2 Agulha de Le Chatelier.

De acordo com a norma NBR 11.582 (ABNT, 1991), são moldados três corpos-de-prova para cada material que se deseja determinar a expansibilidade.

Para moldagem coloca-se o cilindro de agulha sobre uma chapa de vidro e preenche-se cuidadosamente com pasta de consistência normal (determinada de acordo com NBR 7215/82 item 4.2.5.2). Após a moldagem o cilindro é coberto com outra chapa de vidro e em seguida todo o conjunto é imerso em tanque de água potável, mantida a uma temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

O ensaio é realizado a quente e a frio. Para o ensaio a quente colocam-se as agulhas em recipiente cheio de água fria e se aquece até levá-lo à ebulição. A medida do afastamento das extremidades das agulhas, em milímetros, é feita:

1. momentos antes da colocação dos corpos-de-prova na água quente;
2. após 3 horas de ebulição;

3. tantas vezes quantas necessárias até que não se verifique, em 2 horas consecutivas de ebulição, aumento de afastamento das extremidades das hastes.

A expansibilidade a quente é a diferença, em mm, entre os afastamentos final e inicial das medições executadas.

Para o ensaio a frio as agulhas devem ser colocadas em tanque de água potável ($23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) e aí permanecer durante sete dias. O afastamento das extremidades das agulhas, em mm, deve ser medido:

1. logo após à execução dos corpos-de-prova;
2. após sete dias consecutivos em água fria.

A expansibilidade a frio é a diferença, em mm, entre os afastamentos final (após 7 dias) e inicial das hastes das “agulhas de Le Chatelier”.

Cada resultado deve ser a média de três determinações.

4.3.2 Pozolanicidade

Na determinação do índice de atividade pozolânica com cimento Portland NBR 5752 (ABNT, 1977) são moldadas duas séries de três corpos-de-prova cilíndricos 5x10cm. Uma dessas séries é moldada com cimento Portland, água e areia normal e é chamada de argamassa A. Na outra série, parte do volume absoluto desse cimento (35%) é substituído pela pozolana, chamada de argamassa B.

Após moldagem, todos os corpos-de-prova são conservados em câmara úmida durante 28 dias em recipientes hermeticamente fechados, quando são removidos, rematados e rompídos de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1982).

O índice de atividade pozolânica com cimento Portland é definido como sendo a relação, em porcentagem, entre a resistência média a 28 dias dos corpos-de-prova moldados com pozolana e cimento Portland (argamassa B) e a resistência média, também aos 28 dias, dos corpos-de-prova moldados com cimento Portland (argamassa A).

4.3.3 Resistência à compressão

Este ensaio, segundo norma NBR 7215 (ABNT, 1982), consiste em determinar a resistência à compressão de corpos-de-prova de concreto. Foram confeccionados corpos-de-prova cilíndricos com dimensões 10x20cm, em número de três para cada adição e para cada idade.

Cada corpo-de-prova foi submetido a uma prensa hidráulica de carga contínua¹ até a ruptura do mesmo, na idade de 3, 7 e 28 dias.

O resultado final foi a média dos três valores, em MPa.

4.3.4 Profundidade de carbonatação

A profundidade de carbonatação é um teste largamente utilizado na construção civil para avaliar a durabilidade do concreto, apesar de não ser normalizado no Brasil.

Segundo ANDRADE (1992), o dióxido de carbono CO₂ presente no ar penetra através da rede de poros do concreto e reage com os constituintes alcalinos da pasta de cimento, principalmente com o hidróxido de cálcio. Esse processo leva à formação de carbonatos cálcicos alcalinos e a uma redução do valor do pH da solução aquosa presente nos interstícios do concreto.

Em geral a profundidade de carbonatação no concreto é medida através do emprego de indicadores como a fenolftaleína ou a timolftaleína, borrifados em perfis do concreto de cobrimento.

Esses indicadores são substâncias químicas que, em contato com a solução alcalina do concreto, rica em hidróxido de cálcio, adquirem colorações típicas a partir de um determinado pH da solução. A solução de fenolftaleína (dissolvida a 1% em álcool etílico e água- 1g de fenolftaleína dissolvida em 50g de álcool e 50g de água) é incolor em pH inferior a 8,3. Para valores de pH superiores a 9,5 torna-se vermelho-carmin (violeta). Entre 8 e 9,5 fica com coloração variável de rosa a vermelho-carmin. A timolftaleína assume uma coloração azulada com pHs da ordem de 10,5 ou superiores.

¹ Prensa hidráulica com acionamento elétrico de origem alemã, marca WPM, com capacidade de carga de até 200 toneladas, aferida pelo INMETRO.

Abaixo desses pHs de modificação, o concreto tende a não sofrer alteração de cor quando da aspersão do indicador (mantém-se incolor). Tem-se, então, com a linha divisória entre a região incolor e a de coloração típica, uma clara evidência do avanço da frente de carbonatação para o interior do concreto de cobrimento. Em nível prático, admite-se que o concreto não está carbonatado quando, ao se aspergir o indicador químico, ele adquirir em sua superfície a coloração típica; caso fique incolor assume-se que o concreto está carbonatado.

4.4 METODOLOGIA UTILIZADA

Um resumo da metodologia descrita para a realização dos ensaios de viabilização encontra-se no esquema da figura 4.3.

Foram preparadas duas baterias de ensaios. A primeira bateria (bateria 1-figura 4.3) de ensaios foi realizada com escória moída e com composição granulométrica constante na tabela 4.3.

Com intuito de se verificar a real pozolanicidade do material, que quanto mais fino melhora esta característica, foi realizada uma segunda bateria de ensaios utilizando-se apenas o material passante na peneira n°200 (série Tyler), de malha 0,075mm de lado quadrado (finura próxima a do cimento Portland).

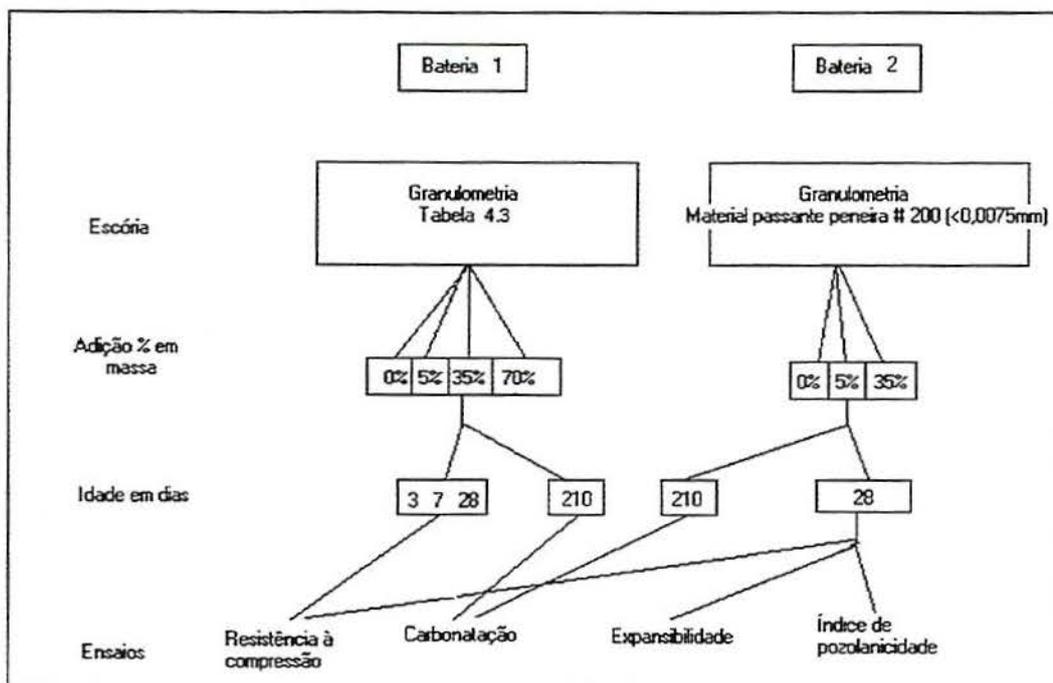


FIGURA 4.3 Esquema da metodologia dos ensaios de viabilização do uso de escória de aciaria.

Para a determinação de resistência à compressão da bateria 1 foram moldadas quatro séries de nove corpos-de-prova cada. Cada série composta com adições de 0% (testemunho), 5%, 35% e 70% de escória de aciaria elétrica sobre a massa de cimento.

O número de nove corpos-de-prova por amostra é para se ter três determinações por idade (3, 7 e 28 dias), onde se utiliza a média de cada uma.

Para a segunda bateria de ensaios (bateria 2-figura 4.3), feita para material passante na peneira nº 200 (finos), foram moldados corpos-de-prova com adições de 5% e 35% uma vez que já se tinham os valores iniciais e o que se queria era confirmar uma tendência de que adições nestes níveis são as que apresentam melhores resultados.

Para todas as misturas, foram moldados corpos-de-prova 10 x 20cm para, após 210 dias, serem realizadas medições de profundidade de carbonatação com solução de fenolftaleína.

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.5.1 Expansibilidade

Os ensaios da determinação de expansibilidade por “Le Chatelier” têm os seus resultados expressos na tabela 4.5.

TABELA 4.5 Expansibilidade por Le Chatelier- ensaios de viabilização.

	Expansão (mm)	Límite de norma NBR 11578/91 (mm)
pasta de cimento à frio	< 5	≤ 5**
pasta de cimento à quente	< 5	≤ 5*
pasta de cimento + escória à frio	0	≤ 5**
pasta de cimento + escória à quente	0	≤ 5*

* Exigência física obrigatória.

** Exigência física facultativa.

A escória utilizada nos ensaios tinha uma idade superior a seis meses. Como se previa (RUBIO & CARRETERO, 1991), esta escória não expande mais, como pode-se observar na tabela 4.5, onde a pasta de cimento teve uma expansibilidade maior do que a pasta de cimento com 35% de escória. De qualquer modo todos resultados ficaram abaixo do limite de 5mm estabelecido pela norma NBR 11578/91, caracterizando a estabilidade do material.

De acordo com a revisão bibliográfica, a escória deve estar estável e não expandir, seja qual for o seu uso. Aponta-se também que este período de cura pode durar de 3 meses a um ano, dependendo do teor inicial de cal livre que a escória contenha (RUBIO & CARRETERO, 1991), da granulometria da mesma, da altura de estocagem e das condições climáticas.

4.5.2 Pozolanicidade

Os resultados do ensaio de pozzolanicidade da argamassa de cimento (C) e da argamassa de cimento + escória (C + E) encontram-se na tabela 4.6.

TABELA 4.6 Índice de atividade pozolânica com cimento Portland (I)

	C_B (C+E) (MPa)	C_A (Cimento) (MPa)	$I = 100 \times (\delta_{CB})/(\delta_{CA})$ [(%)]
Média (δ) (Bateria 2- fig.4.3)	21,80	31,18	69,92

De acordo com a NBR 12.653 (ABNT, 1992), o índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias, em relação ao controle, deve ser no mínimo 75% para o material ser considerado pozolânico. Para o material estudado tem-se o valor de 69,92% (tabela 4.6).

4.5.3 Resistência à compressão

Os resultados do ensaio de resistência à compressão encontram-se nas tabelas 4.7, 4.8 e 4.9 e nas figuras 4.4 e 4.5.

TABELA 4.7 Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 3 dias

	Média (MPa)	Desvio Padrão -DP (MPa)	Coefficiente de Variação -CV (%)
T	18,56	2.84	15.3
5%	21,15	2.48	11.7
35%	7,64	0.33	4.4
70%	1,91	0.25	13.3

Legenda:

T= testemunho

5%= adição de 5% de escória de aciaria elétrica sobre a massa de cimento

35%= adição de 35% de escória de aciaria elétrica sobre a massa de cimento

70%= adição de 70% de escória de aciaria elétrica sobre a massa de cimento

TABELA 4.8 Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 7 dias

	Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)
T	21,75	0.14	0.6
5%	25,73	0.33	1.3
35%	10,03	0.60	6.0
70%	2,51	0.07	2.9

Legenda:

T= testemunho

5%= adição de 5% de escória de aciaria elétrica sobre a massa de cimento

35%= adição de 35% de escória de aciaria elétrica sobre a massa de cimento

70%= adição de 70% de escória de aciaria elétrica sobre a massa de cimento

TABELA 4.9 Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias

	28 dias Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)
T	24,82	0.26	1.0
5% finos	37,28	0.79	2.1
5%	30,66	4.95	16.1
35% finos	25.86	0.70	2.7
35%	12,17	0.17	1.3
70%	3,31	0.00	0.0

Legenda:

T= testemunho

5%= adição de 5% de escória de aciaria elétrica sobre a massa de cimento

35%= adição de 35% de escória de aciaria elétrica sobre a massa de cimento

70%= adição de 70% de escória de aciaria elétrica sobre a massa de cimento

Finos= material passante na peneira n° 200.

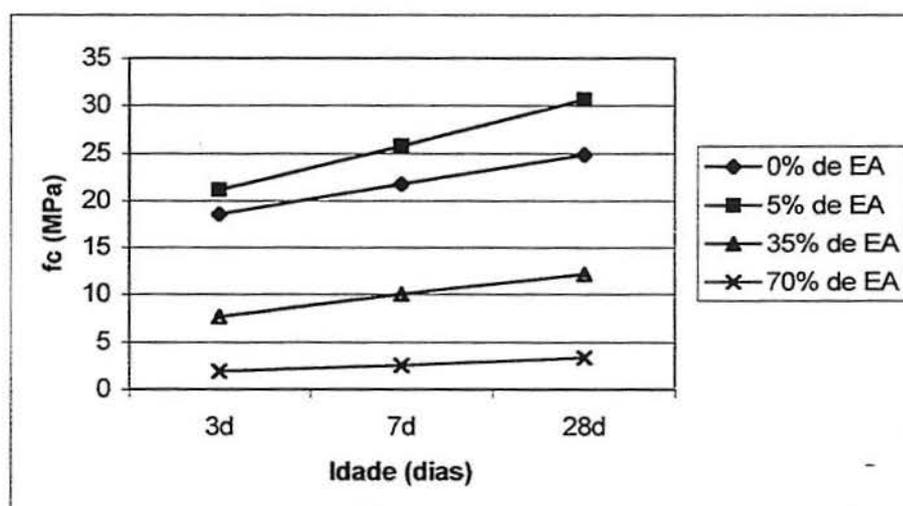


FIGURA 4.4 Resistência à compressão para escória simplesmente moída.

Embora não comprovado estatisticamente, em virtude da alta variabilidade dos resultados, para a escória simplesmente moída, o ensaio de resistência à compressão mostrou que adições de 5% aumentaram a resistência do concreto em relação aos corpos-de-prova testemunho, com 0% de adição, em 13,95% aos 3 dias de idade, 18,29% aos 7 dias e 23,52% aos 28 dias (tabelas 4.7, 4.8, 4.9 e figura 4.4).

Pode ser observado, ainda no gráfico da figura 4.4 e nos resultados apresentados na tabela 4.9 para os 28 dias de idade, que 35% de adição baixou a resistência a 49% em relação ao testemunho. Adição de 70% baixou a 13% a resistência do concreto em relação ao testemunho. Isto sugere que, provavelmente, adições em torno de 5% preenchem os vazios deixados no concreto quando a sua água de amassamento evapora. Com os seus vazios preenchidos o concreto torna-se mais denso, aumentando assim a sua resistência, o que aponta um efeito filler da escória no concreto.

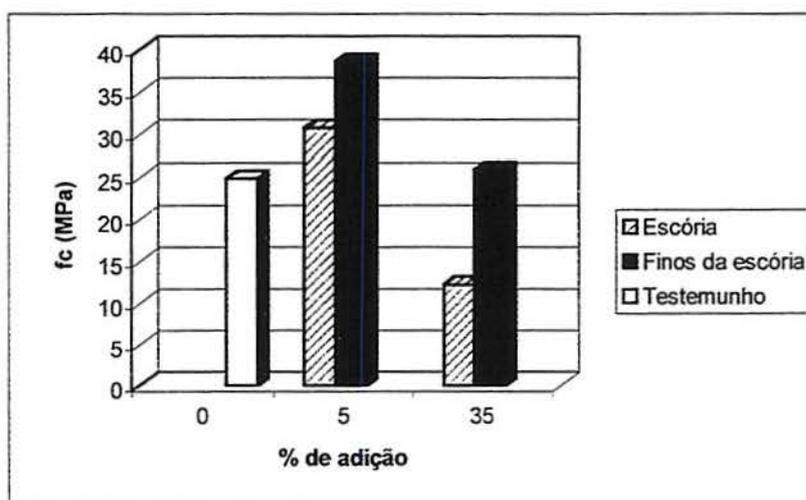


FIGURA 4.5 Comparação entre resistência à compressão da escória simplesmente moída, do material passante na peneira 200 (finos) e testemunho (corpos-de-prova confeccionados com 0% de adição de escória), aos 28 dias.

Nos resultados que podem ser visualizados no gráfico da figura 4.5, quando se executou este mesmo ensaio apenas para as partículas finas da escória, os resultados, aos 28 dias, aumentaram em 23,7% e em 112,48% para adições de 5 e 35%, respectivamente, em relação a estas mesmas adições com a escória simplesmente moída. Para 5%, onde tinha-se 30,66MPa de resistência aos 28 dias de idade, apenas com os finos da escória, para um concreto moldado com as mesmas características, esta resistência à compressão subiu para

37,28MPa. Ainda melhor, nos resultados para 35% de adição, aos 28 dias, a resistência à compressão passou de 12,17 para 25,86MPa.

Para os 28 dias de idade (figura 4.5), em relação ao testemunho, 5% de adição de finos da escória no concreto melhorou a resistência à compressão em 50,2%. Para 35% desta mesma adição o resultado permaneceu praticamente o mesmo, com um pequeno aumento de resistência de 4%.

Uma análise estatística dos resultados foi realizada utilizando-se o programa de comparação entre grupos denominado COMPVAR. Esta técnica permite comparar grupos de observações, através da comparação da variabilidade das médias entre grupos e a variabilidade das observações dentro de cada grupo (NANNI e RIBEIRO, 1992). Esta análise foi feita para os ensaios de resistência à compressão e de profundidade de carbonatação, com o objetivo de comprovar estatisticamente a influência dos teores de adição investigados, bem como a existência de possíveis interações entre estas adições em relação aos resultados obtidos para os corpos-de-prova testemunho. Foi verificada a significância estatística do efeito de cada uma das variáveis, através da análise de variância (ANOVA). O efeito de um determinado fator sobre uma variável de resposta analisada é determinado através de um teste de comparação entre valores calculados ($F_{\text{calculado}}$) e os tabelados (F_{tabelado}) de uma função de distribuição de probabilidade de Fischer. Os valores de (F_{tabelado}) são estabelecidos para um nível de significância de 95%. A hipótese de um determinado fator influenciar significativamente nos resultados é confirmada se ($F_{\text{calculado}}$) foi maior do que (F_{tabelado}). Os resultados encontram-se na tabela 4.10.

A entrada dos dados neste programa estatístico obedeceu à seguinte ordem:

1. Divisão dos resultados em grupos;
2. Cada grupo composto por três observações, que são as resistências à compressão para cada porcentagem de adição de escória ao cimento, aos 28 dias de idade.

TABELA 4.10 Resultados estatísticos obtidos no programa computacional COMPVAR - Tabela ANOVA, para um nível de significância de 95%.

Efeito testado: Resistência à compressão aos 28 dias	Valores de Fcalculado*	Probabilidade **	Significância ***
T x 5% x 35% x 70%	74.02	$F(3,8) > 74.02 \approx 0.5031D-04$	DS
T x 5%	4.15	$F(1,4) > 4.15 \approx 0.1106D+00$	NS
T x 35%	4980.86	$F(1,4) > 4980.86 \approx 0.1635D-03$	DS
T x 70%	20563.56	$F(1,4) > 205630.56 \approx 0.1270D-03$	DS
T x 5% (finos)	715.60	$F(1,4) > 715.6 \approx 0.3238D-03$	DS
T x 35% (finos)	5.76	$F(1,4) > 5.76 \approx 0.7413D-01$	DS

* Fcalculado é um número resultante da análise estatística que deve ser comparado com o Ftabelado estabelecendo-se a significância entre os termos.

** Se essa probabilidade é menor que 0,05 a diferença é considerada significativa. Se for maior que 0,05 a diferença é não significativa. Por exemplo, comparando-se o testemunho (T) com concreto com adição de 5% (T x 5%), a probabilidade de Fcalculado (4,15) ser maior que o Ftabelado (F(1,4)) é de 0,1106, ou seja, maior que 0,05, sendo a diferença não significativa. Já para a comparação entre o testemunho com 35% de adição (T x 35%), a probabilidade de Fcalculado (4980,86) ser maior que o Ftabelado(F(1,4)) é de $0,1635 \times 10^{-03}$, ou seja, menor que 0,05 sendo a diferença significativa.

*** NS = diferença não significativa

DS = diferença significativa.

Estatisticamente, para os 28 dias de idade, excetuando-se a adição de 5%, os resultados entre os grupos tiveram diferença significativa, o que pode ser observado na última coluna da tabela 4.10, de análise de variância (ANOVA), comparando-se sempre o testemunho com cada uma das adições (5%, 35% e 70%). Pode-se observar que entre os grupos houve diferenças significativas para os resultados, o que comprova que as diferentes adições interferem nos resultados de resistência à compressão das amostras estudadas.

4.5.4 Profundidade de carbonatação

A figura 4.6 traz os resultados obtidos no ensaio de carbonatação realizado com solução de fenolftaleína em corpos-de-prova com idade de 210 dias. Para se testar a influência das várias adições na profundidade de carbonatação do concreto, estes resultados foram submetidos à análise estatística, onde obteve-se a tabela ANOVA (tabela 4.11).

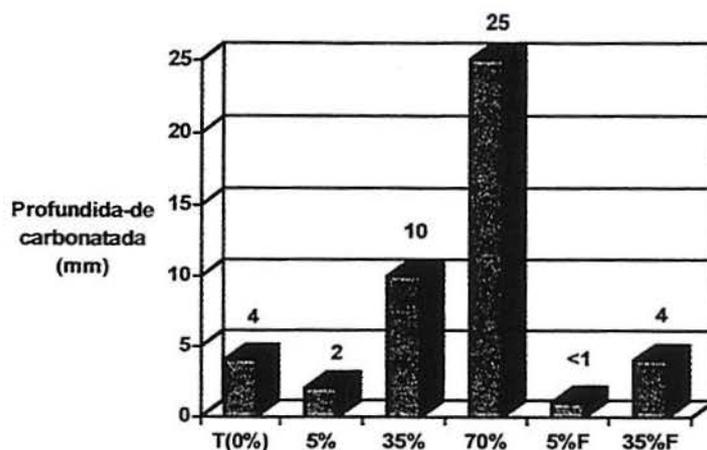


FIGURA 4.6 Carbonatação em corpos-de-prova de concreto com diferentes adições. F significa adição com material passante na peneira # 200 (finos).

TABELA 4.11 Tabela ANOVA (estatística) para o ensaio da profundidade de carbonatação no concreto aos 210 dias de idade.

Efeito testado: profundidade de carbonatação	Valores de Fcalculado	Probabilidade *	Significância
T x 5% x 35% x 70% x 5%F x 35%F	140,74	$F(5,12) > 140,74 \approx 0,1228 \times 10^{-05}$	DS

* A probabilidade que $F(5,12) > 140,74$ é aproximadamente igual a $0,1228 \times 10^{-05}$. Se esta probabilidade é menor que 0,05 a diferença é considerada significativa. Se for maior que 0,05 a diferença é não significativa.

No ensaio de carbonatação, como pode-se observar na figura 4.6, 5% de adição de escória resultou numa diminuição de 50% da profundidade carbonatada no período estudado, se comparado aos corpos-de-prova testemunho. Se usadas apenas partículas finas (5%F) este resultado é ainda melhor (< 1mm), o que aponta uma durabilidade maior de estruturas confeccionadas com este material. Confirmando os outros resultados, sob o ponto de vista de resistência à compressão, a adição de 35% aumentou a profundidade carbonatada em relação ao testemunho em mais de 100% e adições próximas a 70% são inviáveis. Com o uso das partículas finas com 35% de adição o resultado permaneceu inalterado em relação ao testemunho.

Estes resultados provavelmente são devidos à obturação dos poros proporcionada por esta escória quando utilizada em baixas proporções de adição.

A tabela ANOVA (tabela 4.11) comprova que há influência do teor de adição na profundidade de carbonatação do concreto.

4.6 CONCLUSÕES

Em função dos resultados obtidos nestes ensaios de viabilização aponta-se a potencialidade de uso deste material como adição ao cimento Portland na confecção de concreto. Salienta-se, entretanto, que os valores de adição devem ser no máximo de 35%.

Adições de 5% mostraram ganhos de resistência de até 50% em relação ao testemunho e melhoria na profundidade de carbonatação, baixando a valores em torno de 50% desta profundidade.

Adições de 35% de finos de escória, comparadas com o testemunho, mantiveram o mesmo desempenho nos ensaios acima citados.

Este material apresentou índice de pozolanicidade de aproximadamente 70%, portanto abaixo dos 75% mínimos necessários para caracterizá-lo como pozolana. Os resultados positivos de adições de 5% mostraram indicativo de atuação desta escória como um filler no concreto.

Baseado nestes resultados definiu-se os ensaios complementares deste trabalho, os quais foram realizados ao longo de 2,5 anos a fim de se avaliar com maior precisão o desempenho da escória de aciaria ao longo do tempo.

5 JUSTIFICATIVA DA ESCOLHA DOS ENSAIOS

Neste capítulo são apresentados os ensaios para a parte complementar deste trabalho, chamada de Ensaios com Escória do Refino Redutor como Adição ao Concreto. A partir desta exposição é feita uma avaliação para seleção destes ensaios. A metodologia de execução de cada um dos ensaios é descrita no capítulo 6.

5.1 EXPANSIBILIDADE

O principal problema da escória de aciaria é a expansão que esta sofre quando em contato com a umidade. Por isso foram realizados alguns ensaios de expansibilidade do material ao longo do tempo. Para a avaliação da expansibilidade, a revisão bibliográfica aponta os ensaios com agulhas de Le Chatelier, expansão em autoclave, perda de massa e expansão pelo método da norma japonesa JIS A 5015.

Dentre os ensaios existentes na bibliografia, foram selecionados os seguintes:

5.1.1 Agulhas de Le Chatelier

Este ensaio é bastante utilizado para se determinar o grau de expansão em cimentos com adição mineral. Nos ensaios de viabilização, quando foi usada uma escória com idade superior a seis meses, este ensaio apontou uma expansibilidade do material abaixo dos limites da normalização. Por isso este ensaio foi escolhido para verificar a evolução da expansão do material ao longo do tempo.

5.1.2 Ensaio de autoclave

O ensaio da autoclave é mais agressivo que o com agulhas de Le Chatelier, pois submete o material à temperatura e pressão elevadas. Portanto as condições em que este teste é realizado são muito mais severas do que as condições de serviço do concreto. Assim

os resultados rapidamente revelam qualquer instabilidade química do material que pode resultar em variações de dimensão.

Por tratar-se de um ensaio que traduz um resultado mais imediato, corpos-de-prova com diversas adições e relações água/aglomerante foram ensaiados a várias idades de envelhecimento da escória.

5.1.3 Perda de massa

Com intuito de se confrontar os resultados dos dois outros ensaios de expansibilidade definidos para esta etapa complementar, buscou-se um terceiro ensaio passível de ser realizado com os recursos disponíveis. Este ensaio surgiu em contatos realizados com o Instituto INSA, de Lyon, França, proposto pelo Prof. Dr. Jean-Pera. Por não ser um ensaio normalizado, este ensaio de expansibilidade foi denominado simplesmente por “perda de massa” e está descrito no capítulo 6.

5.2 POZOLANICIDADE

Este foi um teste realizado nos ensaios de viabilização desta tese para a escória do forno elétrico a arco misturada com a do forno-panela, após moagem e peneiramento. Uma vez conhecida a análise química da escória proveniente unicamente do forno-panela (FP), observou-se que a mesma tinha um grande potencial de ser um material pozolânico. Assim repetiu-se este teste nos ensaios complementares do trabalho, seguindo-se o mesmo critério utilizado anteriormente. A determinação da atividade pozolânica com cimento Portland é a mais utilizada por ser mais realista, segundo ZAMPIERRI (1989); MASSAZA e COSTA (1997) apud MOURA (2000).

Para auxiliar nesta análise procedeu-se outro ensaio utilizado para se determinar se um cimento é ou não pozolânico, conhecido como ensaio de FRATINI.

5.3 ENSAIOS MECÂNICOS

Enquanto que os ensaios de expansibilidade já foram tratados no capítulo 2, no estado da arte da escória na expansão, os ensaios mecânicos requerem algumas considerações adicionais.

5.3.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão dos concretos em iguais condições de mistura, lançamento, adensamento, cura e condições de ensaio, é influenciada por uma série de fatores. Os principais, segundo NEVILLE (1997) e MEHTA & MONTEIRO (1994) são: natureza e dosagem do ligante; granulometria dos agregados; dimensão máxima; forma; textura superficial; resistência e rigidez dos agregados; relação água/cimento; porosidade; relação cimento/inertes; grau de compactação; condições de cura e condições do ensaio.

A resistência do concreto geralmente é considerada como sendo o parâmetro mais importante. MEHTA & MONTEIRO (1994) citam que, no projeto estrutural do concreto, o valor da resistência à compressão, aos 28 dias, é mundialmente aceito como índice da resistência. Isso se deve, provavelmente, a maior facilidade em aferir esta propriedade.

As adições minerais têm influência bastante significativa na resistência do concreto. Esta influência se dá por ação química e física. Esses materiais podem reagir quimicamente e desenvolver produtos de hidratação, estabelecendo uma maior ligação entre os inertes e ocupando espaços vazios. Por outro lado, as adições minerais, através do efeito filer, podem contribuir para maior densificação da matriz e da zona de interface agregado-pasta (MALHOTRA & ZHANG apud MOURA, 2000).

Vários pesquisadores, nacionais e estrangeiros (GEYER, 2000; MOURA, 2000; GUMIERI, 2000; DAL MOLIN 1995; GEYER, 1997, MEHTA & MALHOTRA, 1996 entre outros), têm estudado o efeito de adições minerais nas propriedades mecânicas do concreto, mostrando que há influência dessas adições sobre a resistência do concreto.

Este ensaio já tinha sido utilizado nos ensaios de viabilização. Por ser um dos principais ensaios de referência para avaliação comparativa de concretos com e sem adições minerais, será utilizado também na etapa complementar dos trabalhos.

5.3.2 Resistência à tração

O comportamento do concreto à tração nem sempre acompanha o seu comportamento à compressão, principalmente na presença de materiais finos que possuem pouca atividade pozolânica. O filer possui teor máximo à partir do qual a resistência à tração decresce, bem antes da resistência à compressão. Além disso, este ensaio é mais sensível a reações expansivas.

Sendo assim os ensaios de resistência à tração foram utilizados em conjunto com os de resistência à compressão para avaliação de resistência mecânica de concretos gerados com e sem escória de aciaria.

5.3.3 Módulo de deformação e coeficiente de Poisson

O módulo de deformação é uma medida de resistência à deformação elástica do material. Embora o concreto não seja verdadeiramente um material elástico e o gráfico tensão-deformação para incrementos contínuos de carga em geral tem a forma de uma linha com uma suave curvatura, para fins práticos é considerado linear, dentro do campo das tensões normalmente adotadas (FURNAS, 1997).

O coeficiente de Poisson é um parâmetro utilizado para caracterizar a deformação do concreto. É definido como a relação entre as deformações transversal e longitudinal, provocadas por carregamentos axiais dentro do limite elástico. Esta relação entre a deformação transversal, que acompanha a aplicação de uma tensão axial e a deformação longitudinal correspondente, é utilizada para o projeto e análise de vários tipos de estrutura.

O conhecimento do módulo de deformação é importante na análise das deformações elásticas ou viscoelásticas das estruturas de concreto.

Quando se aplica uma carga de compressão num determinado corpo-de-prova de concreto, produz-se uma deformação proporcional à tensão aplicada, dentro do limite elástico, conforme a Lei de Hooke. A relação entre o incremento de tensão e a deformação é chamada de módulo de deformação “E”.

É interessante observar que os dois componentes do concreto, a pasta de cimento e o agregado, quando submetidos isoladamente a tensões, mostram as relações entre a tensão e a deformação sensivelmente lineares, ao passo que o material composto, o concreto, mostra uma curvatura no gráfico tensão x deformação. Este fato reside na existência de interfaces entre a pasta de cimento e o agregado, e no fato de aparecerem microfissuras nessas interfaces.

Como as fissuras desenvolvem-se progressivamente nessas interfaces, fazendo ângulos diferentes com a tensão aplicada, ocorre um acréscimo localizado progressivo de tensões. Assim, a deformação cresce proporcionalmente mais do que a tensão aplicada, e o gráfico tensão x deformação mostra uma curvatura com aparência de comportamento pseudoplástico. O módulo de deformação do concreto depende das proporções da mistura, pois o agregado, em geral, tem um módulo maior do que a pasta.

O módulo de deformação dos concretos é afetado a princípio pelos mesmos fatores já citados na análise da resistência à compressão. Porém a porosidade e o tipo dos agregados tem maior influência sobre esta característica (MEHTA & MONTEIRO, 1994; ALMEIDA, 1990).

Existem indicações de que quanto maior o volume, dimensão máxima e módulo de deformação do agregado graúdo maior o módulo do concreto. A relação água/cimento e a porosidade atuam inversamente ao crescimento do módulo. Outros fatores que também influenciam são a aderência pasta agregado e a própria resistência do concreto (MEHTA & MONTEIRO, 1994; MINDESS, 1983; COUTINHO, 1988).

Algumas das características e fatores que influenciam o comportamento desta propriedade do concreto estão descritos a seguir (FURNAS, 1997):

- a) o coeficiente de Poisson normalmente varia entre 0,16 e 0,20;

- b) Os valores extremos se situam entre 0,11 e 0,27. Alguns resultados de ensaios mostram que o coeficiente de Poisson é ligeiramente mais elevado para baixas tensões do que para altas;
- c) Tende a aumentar com o tempo de cura.

O coeficiente de Poisson, assim como o módulo de deformação, varia com o tipo de agregado, o teor de pasta de cimento e a proporção relativa entre os dois.

Este ensaio foi escolhido como auxiliar na avaliação do desempenho mecânico de concretos com e sem escória.

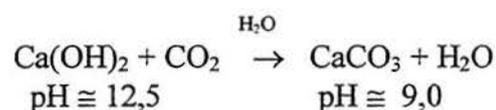
5.4 ENSAIOS DE DURABILIDADE

Profundidade de carbonatação

No concreto armado a carbonatação é considerada um fenômeno indesejável, na medida em que pode afetar a proteção das armaduras contra a corrosão, originalmente garantida pela alta alcalinidade do concreto (NEVILLE, 1997).

ALMEIDA (1990) descreve o fenômeno da profundidade de carbonatação como o gás carbônico penetrando por difusão, da superfície para o interior do concreto, podendo reagir com os componentes alcalinos da pasta de cimento, principalmente com o hidróxido de cálcio, provocando uma redução do pH da solução dos poros para valores inferiores a 9,0.

A neutralização da pasta de cimento endurecida processa-se simplificadamente de acordo com a equação:



Conforme ALMEIDA (1990), a carbonatação é um fenômeno complexo dependente de muitas variáveis. Em termos genéricos, entretanto, a velocidade de carbonatação dos concretos varia principalmente com:

- A relação água/cimento;
- A natureza, finura e a dosagem do cimento;
- A duração e as condições de cura;
- A porosidade, a permeabilidade e a compacidade da pasta endurecida;
- A resistência à compressão;
- A presença de fissuras e segregação.

Ainda não existe um ensaio isolado que seja capaz de avaliar a durabilidade do concreto. Hoje em dia, entretanto, aceita-se o ensaio de profundidade de carbonatação como um dos parâmetros principais para avaliação da durabilidade do concreto frente à penetração de agentes agressivos ao longo de sua vida útil, tendo sido escolhido por este motivo.

5.5 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

Análise microscópica do material e difração de raios X

Como suporte à análise dos ensaios de expansibilidade, procurou-se buscar informações sobre a microestrutura do material através da análise com o microscópio eletrônico de varredura e da difração de raios X.

Com a análise microestrutural procurou-se identificar a possibilidade da formação de compostos expansivos, à medida que aumentava-se o teor de adição, nas pastas de cimento com e sem escória. Procurou-se também verificar estruturalmente se houve mudança de porosidade desses compostos. Para auxiliar na identificação destes elementos foram analisadas, através da técnica de difração de raios X, amostras de pastas de cimento com escória, antes e depois de terem sido submetidas ao ensaio de autoclave. -

6 ENSAIOS COMPLEMENTARES

Para obtenção de parâmetros que caracterizem o concreto com adição de escória e possibilitem sua utilização com maior segurança, foram realizados ensaios de expansibilidade (Le Chatelier, autoclave e perda de massa), mecânicos (resistência à compressão, à tração, módulo de deformação e coeficiente de Poisson) e de durabilidade (profundidade de carbonatação).

Para auxiliar no entendimento das mudanças nas propriedades dos concretos investigados, foi realizada uma análise da microestrutura com a utilização de microscópio eletrônico de varredura e difração de raios-X.

A seguir descreve-se o planejamento, os procedimentos e materiais utilizados nesta fase da pesquisa.

6.1 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS

De acordo com os resultados obtidos na fase de viabilidade da pesquisa, a escória avaliada, que encontrava-se estabilizada, mostrou-se viável de ser utilizada como adição ao cimento Portland (capítulo 4), uma vez que melhora as propriedades do concreto com ela gerado.

Os resultados dos ensaios de viabilização apontaram a faixa de adição entre 5 e 35% como a de melhor desempenho para o concreto gerado com esta escória. Baseado nisso, os ensaios complementares desta pesquisa utilizaram adições de 0% (testemunho), 5%, 10%, 25% e 40% sobre a massa de cimento.

Com intuito de se verificar a influência da relação a/agl nos diferentes percentuais de adição de escória para confecção de concretos gerados com este material, as relações a/agl testadas foram de 0,30; 0,40; 0,52; 0,65 e 0,80. Para tornar viável a execução desta etapa do trabalho, os ensaios foram planejados estatisticamente e fracionados (MONTGOMERY, 1986; NANNI e RIBEIRO, 1992), como pode ser observado na tabela 6.1.

TABELA 6.1 Fracionamento dos ensaios complementares propostos

Adição a/agl	0% (Testemunho)	5%	10%	25%	40%
0,30	X		X		X
0,40		X		X	
0,52	X		X		X
0,65		X		X	
0,80	X		X		X

Levando-se em consideração que dentro dos objetivos deste trabalho está a necessidade de se indicar parâmetros limites de expansibilidade e ao fato da escória usada nos ensaios anteriores apresentar-se estável, surgiu a necessidade da utilização de uma nova escória. Optou-se, para esta etapa do trabalho, pela escória gerada nas operações do forno-panela (escória de refino redutor- figura 2.1). Apesar de ser a de menor geração dentro das aciarias, ela é tida como a que apresenta maiores características de expansibilidade (JIS, 1992). Supõe-se que se este problema for solucionado para esta escória, que é a pior situação, o uso da escória do refino oxidante será também possível para a mesma finalidade.

Pelas características do resíduo estudado, os ensaios devem ser realizados ao longo do tempo para definir parâmetros que limitem a problemática da expansibilidade da escória como adição ao cimento no desempenho do concreto gerado. Para tanto, foram realizadas quatro etapas de ensaios, tomando-se como referência a idade de envelhecimento da escória, como pode ser visualizado na figura 6.1. Assim, a primeira etapa foi desenvolvida com escória nova, recém saída do forno, tendo como idade de referência zero. Aos 28 dias de idade da escória foi moldada a segunda etapa, e assim por diante, até os 90 e 360 dias, quando a quarta e última etapa dos ensaios foi moldada.

A determinação de resistências à tração e compressão foi feita aos 28 e 91 dias das datas de moldagem.

O módulo de deformação e o coeficiente de Poisson foram determinados aos 28 dias de idade, a partir da moldagem dos concretos, utilizando-se somente a escória com idade de referência zero. Para esta mesma escória foi realizado, aos 150 dias da moldagem, o ensaio de profundidade de carbonatação para os corpos-de-prova.

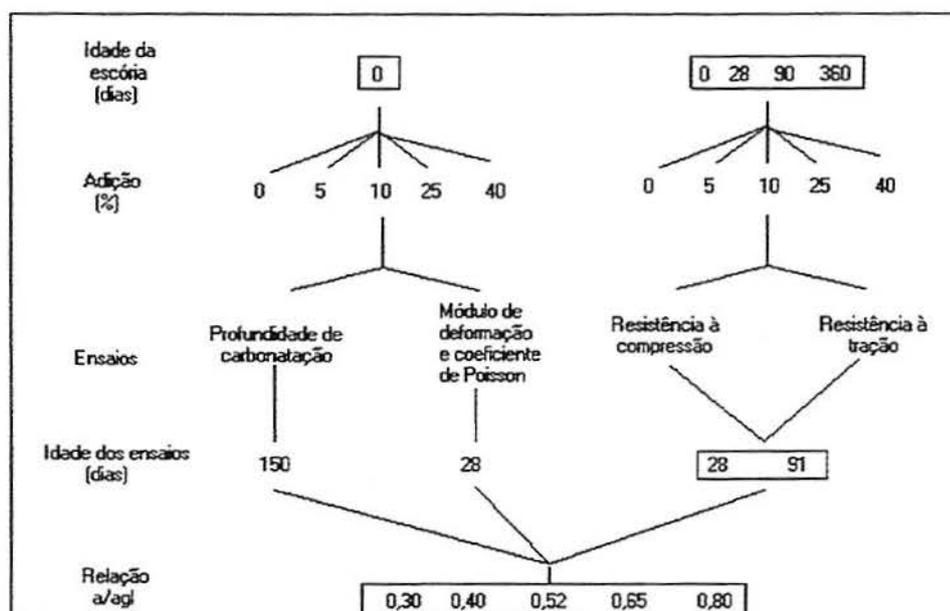


FIGURA 6.1 Esquema geral de execução dos ensaios complementares.

Para os ensaios de expansibilidade houve ainda uma quinta, uma sexta e uma sétima idade de envelhecimento da escória testada aos 182 dias, 720 dias e aos 870 dias de idade (figura 6.4).

Espera-se assim confirmar as informações obtidas na fase preliminar do trabalho, complementando os dados com os ensaios desta etapa.

6.2 MATERIAIS UTILIZADOS

6.2.1 Cimento

O cimento utilizado nesta etapa (para escória com idades de zero, 28 e 90 dias) foi o CP V-ARI em virtude do mesmo não possuir, na sua composição, adições pozolânicas. As suas características encontram-se na tabela 4.1. Para moldagem dos corpos-de-prova de 360 dias (escória com 360 dias de idade de envelhecimento) foi utilizado um cimento produzido pelo mesmo fabricante, mas de outro lote de produção. As características deste cimento CP V-ARI, encontram-se na tabela 6.2. Nota-se, conforme já tinha sido observado na tabela 4.1, que

também aqui o resíduo insolúvel excede o valor estabelecido na NBR 5733/91, o que leva a crer que existam outras adições incorporadas ao cimento.

TABELA 6.2 Composição química e propriedades físicas e mecânicas do cimento utilizado nos ensaios realizados aos 360 dias de idade da escória- CP V-ARI. Dados fornecidos pelo fabricante.

Composição química	Cimento estudado CP V-ARI	Limites NBR 5733/91
CaO (%)	61,67	-
CaO livre (%)	1,47	-
SiO ₂ (%)	20,23	-
MgO (%)	1,28	≤ 6,5
Al ₂ O ₃ (%)	6,23	-
FeO (%)	3,21	-
Na ₂ O (%)	0,31	-
K ₂ O (%)	0,20	-
SO ₃ (%)	2,32	≤ 3,5
CaSO ₄ (%)	3,86	-
Perda ao fogo(%)	2,30	≤ 4,5
Resíduo insolúvel (%)	1,67	≤ 1
Sílica + resíduo insolúvel (%)	20,23	-
i=CaO/SiO ₂	3,05	-
Propriedades físicas		
Massa Específica (kg/dm ³)	3,18	-
Finura BLAINE (m ² /kg)	450	≥ 300
Início de pega (h)	1,49	≥ 1
Fim de pega (h)	2,00	≤ 10
Propriedades mecânicas		
fc 1 dia (MPa)	22,4	≥ 14
fc 3 dias (MPa)	33,5	≥ 24
fc 7 dias (MPa)	40,1	≥ 34
fc 28 dias (MPa)	48,5	-

6.2.2 Agregados

A tabela 6.3 mostra as características dos agregados utilizados nos ensaios complementares e as tabelas 6.4 e 6.5 as análises granulométricas dos agregados miúdo e

graúdo, respectivamente. Estes ensaios foram realizados nos laboratórios da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás.

TABELA 6.3 Características dos agregados

Agregado	Tipo	Massa específica (kg/dm ³)	Dimensão máxima característica (mm)	Módulo de Finura
Miúdo	Areia natural	2,60	4,8	2,69
Graúdo	Brita micaxisto	2,78	25	7,06

TABELA 6.4 Análise granulométrica do agregado miúdo utilizado.

Peneira (mm)	Massas Retidas (g)	% retida	% acumulada
4,8	6,0	0,60	0,60
2,4	53,0	5,30	5,90
1,2	152,0	15,20	21,10
0,6	335,0	33,50	54,60
0,3	335,0	33,50	88,10
0,15	109,0	10,90	99,00
<0,15	10,0	1,00	-
Somatório	1000,0	100,00	269,30

TABELA 6.5 Análise granulométrica do agregado graúdo utilizado.

Peneira (mm)	Massas Retidas (g)	% retida	% acumulada
19	900,0	9,00	9,00
12,7	8233,0	82,33	91,33
9,5	688,0	6,88	98,21
4,8	96,0	0,96	99,17
2,4	10,0	0,10	99,27
<0,15	73,0	0,73	100,00
Somatório	1000,0	100,00	296,65

6.2.3 Aditivo superplastificante

Utilizou-se aditivo superplastificante à base de melamina sulfonada, com teor de sólidos de 28%. A dosagem recomendada pelo fabricante varia de 0,5 a 3% sobre a massa de cimento.

6.2.4 Água

Utilizou-se água proveniente da rede de abastecimento local.

6.2.5 Escória

A escória de aciaria elétrica utilizada foi proveniente de uma única corrida do forno panela de uma Siderúrgica do estado do Rio Grande do Sul (escória do refino redutor- FP).

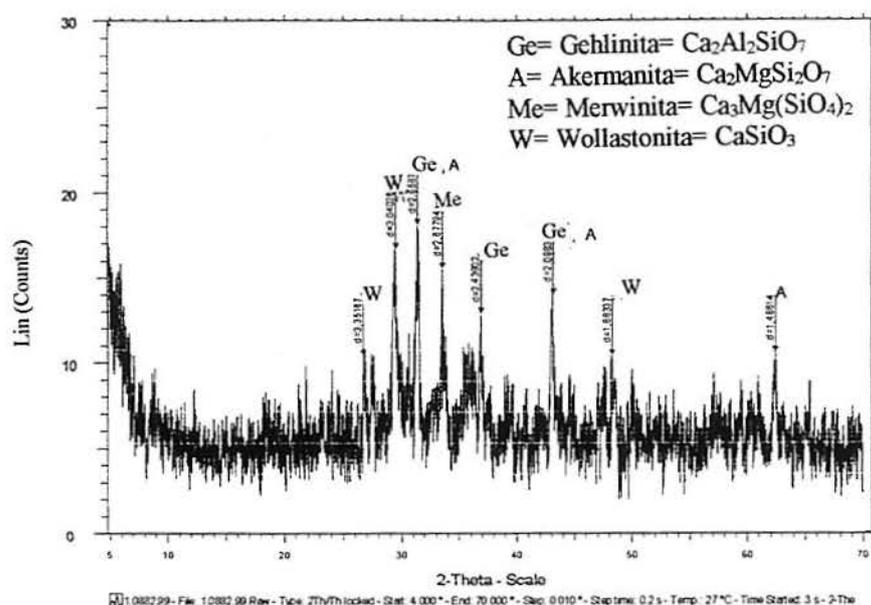
Toda escória utilizada foi mantida em tonéis abertos dentro do laboratório, exatamente como recebida. À medida que as etapas iam se aproximando, o material era moído em moinho de bolas utilizado para ensaio de abrasão Los Angeles, com capacidade para 50 kg de material, por um período de 3 horas, e peneirado para utilização. As características desta escória encontram-se na tabela 6.6. Esta caracterização foi realizada no Centro Tecnológico de Engenharia Civil de Furnas Centrais Elétricas S. A., utilizando-se, para a composição química, a análise química semiquantitativa por espectrometria de raios X.

Uma das maiores dificuldades encontradas neste trabalho foi o da moagem da escória. Para seu uso industrial este é um aspecto que deve ser estudado com atenção para que o cimento alternativo gerado com esta escória não se torne pouco ou não competitivo comercialmente devido ao seu custo de fabricação.

TABELA 6.6 Características da escória utilizada nos ensaios complementares.

Composição química	Escória de aciaria dos ensaios complementares (FP) (%)
CaO	33,33
CaO livre	0,8
SiO ₂	19,50
Al ₂ O ₃	10,51
MgO	18,58
FeO	10,63
Na ₂ O	0,05
K ₂ O	0,32
SO ₃	0,32
Perda ao fogo	4,76
Sílica + resíduo insolúvel	19,5
CaSO ₄	0,54
i= CaO/SiO ₂	1,71
Finura BLAINE	376 m ² /kg
Massa específica	3,12 kg/dm ³

As fases e morfologia da escória estudada podem ser observadas na difração de raios X e na microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários, conforme figuras 6.2 e 6.3.



Legenda:

Ge= Gehlinita= $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$

A= Akermanita= $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$

Me= Merwinita= $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$

W= Wollastonita= CaSiO_3

FIGURA 6.2 Difração de raios X da escória de aciaria elétrica.

Esta análise apresenta-se com um ruído bastante grande e com uma contagem de elétrons baixa (<1000), mostrando apenas uma tendência dos elementos presentes na escória.

Os principais compostos identificados por seus picos correspondentes na difração de raios X da escória pura são a gehlinita, cuja fórmula química é $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$; a akermatita ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$); a merwinita ($\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$) e a wollastonita, com a fórmula química de CaSiO_3 .

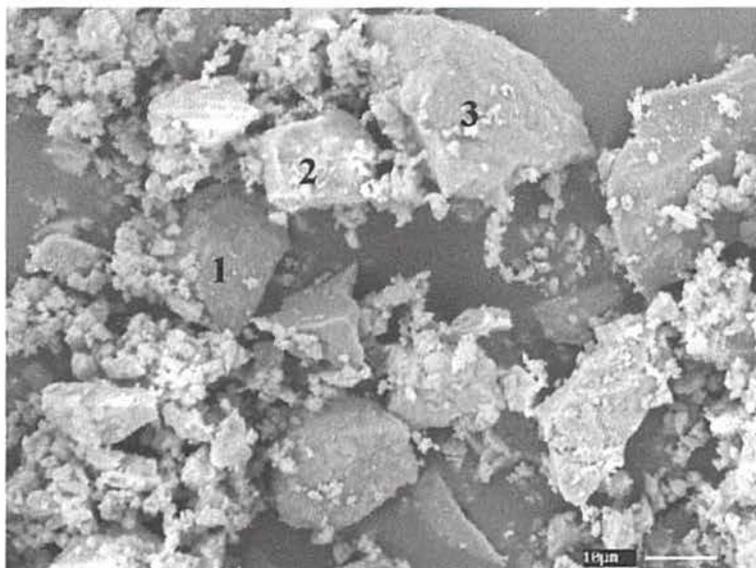


FIGURA 6.3 Microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários da escória de aciaria elétrica (material passante na peneira # 200), destacando três grãos típicos. Aumento de 3.000 X.

Para preparo da amostra coleta-se 15mg de escória, coloca-se num copo de Becker com 30ml de xilol (solvente à base de álcool), procedimento este realizado em capela. Este procedimento é adotado para se fazer uma melhor dispersão da amostra. Após, com auxílio de uma pipeta, coleta-se o material e coloca-se no porta amostra. Depois disso submete-se o material a uma secagem em estufa a uma temperatura de 60° C a fim de remover o solvente. Finalmente procede-se a metalização, que consiste no revestimento da superfície da amostra com uma liga de ouro por um período de 30segundos. Após o porta amostra é colocado dentro do microscópio eletrônico de varredura para se proceder o ensaio.

Observa-se na figura 6.3 que a escória estudada apresenta morfologia heterogênea, com partículas irregulares, de formato anguloso. Os grãos assinalados apresentaram microanálise semi-quantitativa de acordo com a tabela 6.7.

TABELA 6.7 Microanálise semi-quantitativa dos pontos assinalados na figura 6.3.

Ponto	Composição química (iônica) % dos elementos prováveis					
	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe
1	5,1	1,5	28,3	-	65,1	-
2	9,3	29,8	10,9	-	50,0	-
3	3,5	10,9	21,3	-	64,3	-

Chama-se atenção às altas relações Ca/Si e os teores de Mg como elementos presentes nos fenômenos de expansão. Alumínio, utilizado como desoxidante na fabricação do aço, tem presença destacada no ponto 2.

Fazendo parte da caracterização ambiental da escória, a tabela 6.8 contém a análise da água proveniente do ensaio de lixiviação, realizado de acordo com a NBR 10.005 (ABNT, 1987) e a tabela 6.9 contém a análise da água submetida ao ensaio de solubilização, realizado de acordo com a NBR 10.006 (ABNT, 1987) pelo laboratório de análises químicas da Faculdade de Agronomia da UFRGS.

TABELA 6.8 Determinação físico-química de água (lixiviação).

Determinações (mg/L)	Extrato de lixiviado (mg/L)	Limite máximo no extrato (mg/L) NBR 10.004/87 Anexo G- Listagem nº 7.
Fluoreto *	17	150
Cádmio *	<0,01	0,5
Chumbo *	<0,05	5,0
Cromo total *	<0,02	5,0
Bário	<1	100,0
Prata	2,2	5,0
Merúrio *	<0,0005	0,1
Arsênio *	<0,005	5,0
Selênio	<0,05	1,0

* Substância considerada tóxica

TABELA 6.9 Determinação físico-química de água (solubilização).

Determinações (mg/L)	Extrato de solubilizado (mg/L)	Limite máximo no extrato (mg/L) NBR 10.004/87 Anexo H-Listagem nº 8
Cloretos (Cl) *	173	250,00
Dureza total (CaCO ₃)	650	500,00
Sódio (Na ⁺)	11	200,00
Zinco (Zn ²⁺)	<0,01	5,00
Ferro total	<0,03	0,30
Alumínio (Al ³⁺)	23	0,20
Cobre (Cu ²⁺)	0,02	1,00
Manganês (Mn ²⁺)	0,01	0,10
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	123,2	400,00
Cromo total *	<0,02	0,05
Fluoreto *	0,66	1,5
Cádmio (Cd) *	<0,01	0,005
Chumbo (Pb) *	<0,05	0,05
Bário (Ba) *	<1	1,0
Prata *	1,2	0,05
Mercúrio (Hg) *	0,0005	0,001
Fenol *	<0,001	0,001
Nitrato	<0,1	10,0
Arsênio *	<0,005	0,05
Selênio	0,038	0,01
Cianeto *	0,01	0,1

* Substância considerada tóxica

Analisando-se as tabelas 6.8 e 6.9 de acordo com a norma de classificação de resíduos sólidos NBR 10.004 (ABNT, 1987) e seguindo-se os parâmetros de avaliação da compatibilidade ambiental da escória siderúrgica estabelecidos no projeto de norma desenvolvido pelo DEMAT (1998), obteve-se o seguinte:

- No extrato de lixiviado (tabela 6.8) todos os itens analisados mantiveram-se abaixo dos valores limites estabelecidos nesta norma. Portanto esta escória não é um resíduo tóxico.
- Para o extrato de solubilizado (tabela 6.9) o material apresentou alguns valores (dureza total, alumínio, cádmio, prata e selênio) acima do estabelecido por esta norma. Trata-se então de um resíduo sólido classe II, não inerte.

A maneira de se determinar a classificação de um resíduo é feita através de ensaios de lixiviação e solubilização que, segundo as normas, exige uma moagem do material. Entretanto, se os materiais fossem ensaiados em tamanhos mais próximos daqueles em que eles são utilizados, poderão surgir casos em que o material moído resulta em resíduo perigoso

(classe I), mas em tamanho natural poderia ser inerte, caracterizando o encapsulamento daqueles resíduos perigosos.

6.3 PROPORCIONAMENTO DOS MATERIAIS

A tabela 6.10 apresenta o proporcionamento dos materiais utilizados na confecção dos concretos. O método de dosagem utilizado foi o proposto por ALVES (1999), que é uma adaptação do método do ACI (American Concrete Institute). O abatimento foi fixado em $10\text{cm} \pm 2$ para todos os traços e o teor de argamassa em 50%.

TABELA 6.10 Proporcionamento dos materiais utilizados na confecção dos concretos, em massa.

a/agl	Cimento	areia	brita	escória	Aditivo (%)	Consumo cimento (kg/m^3)	Abatimento (mm)
0,30	1	1	2	0	1,1	617	80
				0,05	-	-	-
				0,10	1,2	555	90
				0,25	-	-	-
				0,40	2,0	370	120
0,40	1	1,82	2,69	0	-	-	-
				0,05	2,0	413	85
				0,10	-	-	-
				0,25	2,0	325	120
				0,40	-	-	-
0,52	1	1,52	2,6	0	-	369	80
				0,05	-	-	-
				0,10	-	332	100
				0,25	-	-	-
				0,40	-	221	120
0,65	1	2,44	3,92	0	-	-	-
				0,05	-	269	80
				0,10	-	-	-
				0,25	-	212	120
				0,40	-	-	-
0,80	1	3,27	4,64	0	-	265	90
				0,05	-	-	-
				0,10	-	239	100
				0,25	-	-	-
				0,40	-	158	120

6.4 PRODUÇÃO E PREPARO DOS CORPOS-DE-PROVA

A mistura dos materiais foi realizada em betoneira de eixo inclinado por um período de 2 minutos. A ordem de colocação dos materiais foi mantida constante para todas as misturas: brita, parte da água junto com o plastificante, quando necessário, cimento misturado com a adição (escória de aciaria), areia e o restante da água.

O processo de adensamento adotado foi mecânico, segundo a norma NBR 5739 (ABNT, 1980). Após a moldagem, os corpos-de-prova foram mantidos em câmara úmida (UR = 95%) e temperatura de $23 \pm 2^\circ \text{C}$ (NBR 5738- ABNT, 1984) até a data de ruptura (ensaios mecânicos).

Para os ensaios de resistência à compressão, os corpos-de-prova foram retirados da câmara úmida e capeados com enxofre.

6.5 MÉTODOS DE ENSAIO

Os ensaios realizados em cada etapa desta parte complementar são os seguintes:

1. Expansibilidade
 - a) por agulhas de Le Chatelier
 - b) em autoclave
 - c) perda de massa em ciclos acelerados de envelhecimento
2. Pozolanicidade
3. Resistência à compressão
4. Resistência à tração por compressão diametral
5. Módulo de deformação e coeficiente de Poisson
6. Profundidade de carbonatação
7. Análise microscópica do material por microscopia eletrônica de varredura
8. Difração de raios X

Observa-se que os ensaios aqui utilizados e que também foram empregados nos ensaios de viabilização, foram realizados com os mesmos equipamentos.

6.5.1 Expansibilidade

Para uma melhor compreensão das variáveis analisadas nos ensaios de expansibilidade realizados o esquema da figura 6.4 traz um panorama geral destes ensaios.

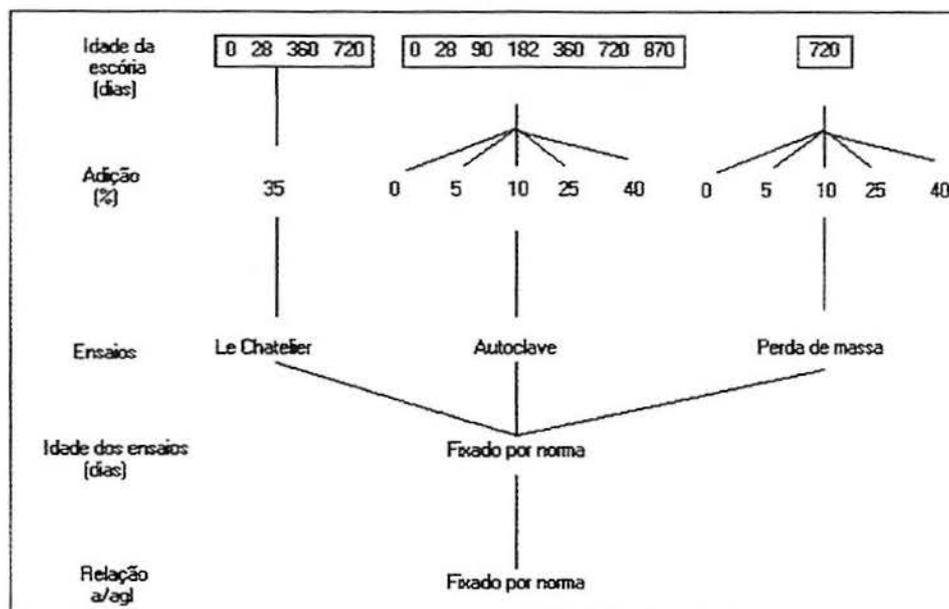


FIGURA 6.4 Esquema das variáveis analisadas nos ensaios de expansibilidade.

6.5.1.1 Agulhas de Le Chatelier: o ensaio das agulhas de Le Chatelier foi realizado com corpos-de-prova com 35% de adição de acordo com a NBR 11.582 (ABNT, 1991), para as idades da escória de zero, 28, 360 e 720 dias, conforme consta na figura 6.4.

6.5.1.2 Ensaio da autoclave: realizado de acordo com a ASTM C-151 (ASTM, 1993). Neste ensaio são moldados corpos-de-prova prismáticos 2,5x2,5x25 cm, nas adições propostas, que são de 0% (T), 5%, 10%, 25% e 40%. Com 1 dia de idade estes corpos-de-prova são colocados em autoclave com capacidade nominal de 15 litros (foto 6.1) e submetidos à pressão de 2 MPa (correspondentes a temperaturas de 216°C), por 3 horas. Foram avaliadas as idades da escória de zero, 28, 90, 182, 360, 720 e 870 dias (figura 6.4).

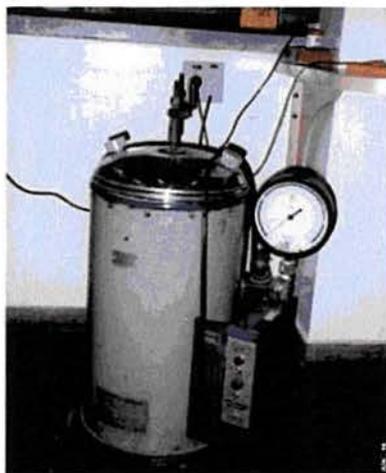


FOTO 6.1 Autoclave utilizada para o ensaio.

Após o tratamento, o comprimento final é comparado com o inicial. O equipamento que mede as barras após o ensaio está na foto 6.2. Esta medição é feita no relógio digital comparativo com precisão de 0,01mm na parte superior do equipamento que compara o corpo-de-prova após o ensaio com o tamanho original do gabarito que, na foto 6.2, aparece do lado esquerdo do equipamento.

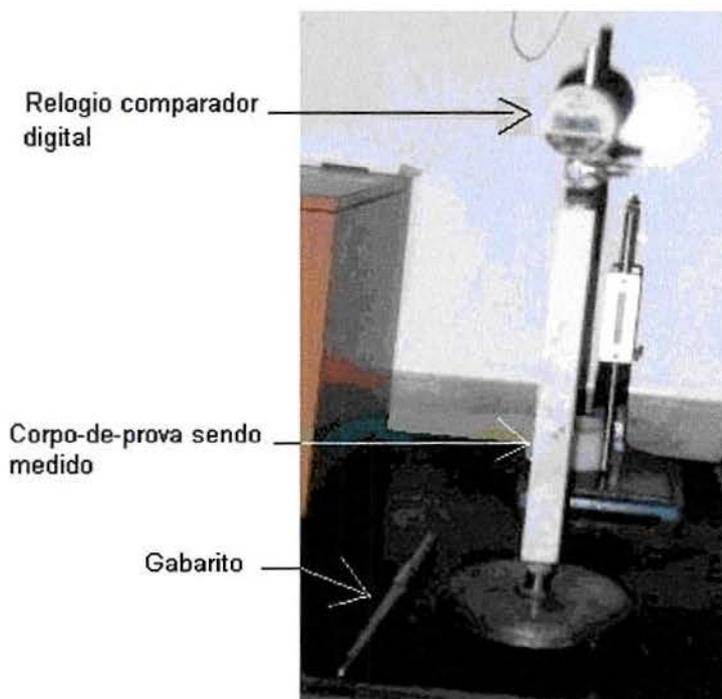


FOTO 6.2- Equipamento que mede a expansão em autoclave.

6.5.1.3 Perda de massa: No ensaio de perda de massa moldam-se barras de argamassa de consistência normal (NBR 7215/82) (cimento, escória e areia), com as proporções de escória já analisadas, ou seja, 0% (testemunho), 5%, 10%, 25% e 40%. Depois de 28 dias de moldagem estes corpos-de-prova são submetidos a ciclos de calor e frio, procurando simular o que ocorre na prática durante o envelhecimento natural da escória. Em cada ciclo, os corpos-de-prova ficam imersos em água durante cinco dias e depois são retirados e colocados em estufa numa temperatura média de 70°C por mais três dias. Antes da entrada e na saída da estufa todos corpos-de-prova são pesados e medidos, procurando-se determinar perda de massa ou deformações devidas à presença da escória. Quando se determina a massa e o volume seco de cada barra de argamassa, a medição é feita assim que o material é retirado da estufa. Para a determinação do volume e peso úmidos as barras são retiradas da água e espera-se 10 minutos para que o excesso de água escorra das barras e só então procede-se a medição.

Seguindo-se estas recomendações foram moldadas duas barras de argamassa de consistência normal (NBR 7215/82) para cada adição, com dimensões de 2,5x2,5x10cm cada.

6.5.2 Pozolanicidade

A determinação do índice de atividade pozolânica com cimento Portland foi realizada de acordo com a NBR 12.653 (ABNT, 1992).

Além disso foi realizada outra análise de determinação da pozolanicidade, de acordo com a NBR 5753 (ABNT, 1992), conhecido como FRATINI, normalmente utilizado para cimento Portland pozolânico.

6.5.3 Resistência à compressão

Estes ensaios foram realizados em corpos-de-prova cilíndricos de 15cm de diâmetro por 30 cm de altura, conforme NBR 5739 (ABNT, 1980).

6.5.4 Resistência à tração

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado segundo a NBR 7222 (ABNT, 1994) em corpos-de-prova cilíndricos de 15 x 30 cm.

6.5.5 Módulo de deformação e coeficiente de Poisson

O módulo de deformação e o coeficiente de Poisson foram determinados através do método de ensaio prescrito na NBR 8522 (ABNT, 1984), utilizando-se extensômetros mecânicos onde é empregado um aparelho adaptador do tipo compressômetro-expansômetro, acoplado com relógios comparadores de resolução ($\times 10^{-3}$ mm).

Os ensaios de módulo de deformação foram realizados na mesma prensa hidráulica empregada nas determinações de resistência à compressão simples, em corpos-de-prova cilíndricos de 15cm de diâmetro por 30 cm de altura, nos laboratórios do Centro Tecnológico de Engenharia Civil de Furnas Centrais Elétricas S. A.

O módulo de deformação estático é obtido carregando-se os corpos-de-prova e observando-se a deformação elástica correspondente a cada incremento de carga (FURNAS, 1997).

A NBR 8522 (ABNT, 1984) considera que a tensão inicial adotada na curva seja a correspondente a 0,5 MPa e a tensão considerada para o cálculo dos diferentes módulos de 30% da resistência à compressão do concreto. A ASTM C- 469 considera a tensão para cálculo dos diferentes módulos a de 40% da resistência à compressão do concreto.

Adotou-se para este trabalho o módulo de deformação secante, que é conhecido através da declividade de uma reta traçada na origem, a um ponto da curva correspondente a uma tensão relativa da carga de ruptura, que no caso do procedimento do Laboratório de FURNAS foi de 40%. A adoção deste módulo como módulo de deformação é recomendação da revisão da NB-1 – revisão da norma brasileira de concreto (ABNT, 1997).

O resultado final do módulo de deformação é a média dos resultados de pelo menos dois corpos-de-prova.

A determinação do coeficiente de Poisson é feita utilizando os mesmos corpos-de-prova e aparelhagem empregados na determinação do módulo de deformação.

Antes de se iniciar o ensaio são efetuados dois carregamentos, seguidos de descarregamentos até ao máximo de 40% da tensão de ruptura, para melhor acomodação dos medidores. Após os dois carregamentos, o corpo-de-prova é submetido ao carregamento de ensaio. É utilizada uma máquina ou prensa para ensaio de compressão, com capacidade máxima de 200 toneladas.

Após os dois carregamentos iniciais para acomodação dos medidores, o corpo-de-prova repousa aproximadamente 60 segundos, com os relógios comparadores zerados. Em seguida, deverá ser dado um incremento de carga até atingir a tensão inferior a 0,5MPa, e logo após continua-se aplicando o incremento de carga até atingir a tensão final, correspondente entre 30% a 40% da tensão de ruptura ensaiada.

São realizados três ensaios consecutivos, para cada corpo-de-prova, em cada idade especificada.

6.5.6 Profundidade de carbonatação

Para auxiliar na avaliação da durabilidade do concreto gerado com os diferentes teores de adição de escória de aciaria foram realizados ensaios de profundidade de carbonatação em corpos-de-prova com adição de escória. A medida de profundidade de carbonatação dos corpos-de-prova foi realizada quando eles estavam com 150 dias de idade. Os corpos-de-prova foram mantidos em condição de laboratório, na cidade de Goiânia, Goiás, onde a temperatura no período variou entre 21 e 24° C e a umidade relativa do ar entre 45 e 75%. O procedimento de execução deste ensaio seguiu as recomendações do RILEM CPC-18 (1988) e consiste em borrifar solução de fenolftaleína na superfície do concreto previamente quebrado para este fim. É feita então a medição da profundidade de carbonatação a partir da superfície do concreto. A superfície encontra-se carbonatada na região onde o indicador químico não atuou (permaneceu incolor).

6.5.7 Análise microscópica do material

A análise microscópica foi feita aos 28 dias de idade dos concretos no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV- Marca LEICA, modelo S440i) (foto 6.3), para uma escória nova, com idade de referência zero, utilizando-se todas adições propostas nestes ensaios complementares.



FOTO 6.3 MEV com microsonda eletrônica EDS (*Energy Dispersive Spectrometry*) acoplada.

6.5.8 Difração de raios X (DRX)

Como amostras para este ensaio foram moldadas barras de pasta de cimento puro e com 5%, 10%, 25% e 40% de adição de escória de aciaria. Após 28 dias da moldagem estas barras eram moídas e submetidas ao ensaio de DRX.

Aos 360 dias de idade o ensaio foi realizado para todas as amostras, antes e depois de terem sido submetidas à autoclave, como mostra a figura 6.5.

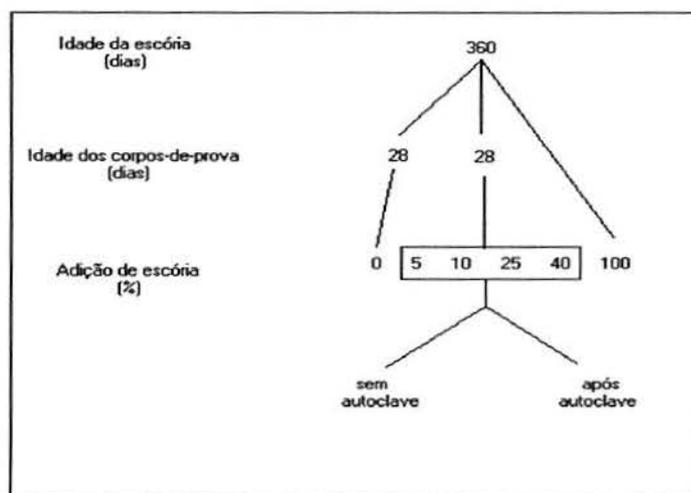


FIGURA 6.5 Esquema dos ensaios de difratometria de raios X.

O equipamento utilizado foi da marca Siemens modelo D-5000, com tubo de cobre. Para o preparo da amostra para a difratometria de raios X primeiro leva-se a amostra numa cápsula metálica para estufa a uma temperatura de aproximadamente 80°C por pelo menos uma hora. Em seguida a amostra é desagregada com o uso de almofariz até sua moagem total. O objetivo é obter 10 gramas de material representativo de granulação bem fina. Para quarteação, usa-se um conjunto de peneiras de abertura 0,075 mm (#200) e 0,037 mm (#400), respectivamente. Com o auxílio de espátula metálica retira-se do fundo da peneira, o material passante na #400 que em seguida é colocado em um suporte plástico circular de concavidade plana sendo submetido a uma leve compressão. Desse modo o material não deslizará quando se der ao suporte o movimento basculatório. Concluída esta etapa o suporte, devidamente identificado, é então levado ao difratômetro de raio-X para análise.

7 RESULTADOS E ANÁLISE

7.1 ANÁLISE DA ESCÓRIA

O DNER (BRASIL, 1988) aponta teores de cal livre para escória na faixa de 0 a 8% para uso em estradas. Como pode-se observar na tabela 6.6, a escória estudada encontra-se dentro deste limite, com um teor de cal livre de 0,8%. Pode-se considerar que esta escória é básica, apresentando índice de basicidade (CaO/SiO_2) acima de 1,00 (valor de 1,71 para a escória estudada).

No que diz respeito aos índices químicos especificados na norma européia UNE 83480EX (1996), que trata das especificações das escórias granuladas moídas de alto-forno utilizadas como adição em concretos e argamassas fabricados com cimento Portland tipo I, tem-se o determinado na tabela 7.1.

TABELA 7.1 Índices químicos da escória estudada no presente trabalho.

Especificações UNE 83480 EX (%)	Escória estudada (%)
$(\text{CaO} + \text{MgO})/\text{SiO}_2 > 1$	2,66
$\text{CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3 > 325$	350
$\text{CaO} + \text{MgO} + \text{SiO}_2 \geq 67$	71,41

Em função das exigências químicas estabelecidas por esta norma européia a escória estudada poderia ser utilizada como adição ao concreto.

A norma brasileira para materiais pozolânicos, NBR 12.653 (ABNT, 1992), estabelece as características de acordo com a tabela 7.2.

TABELA 7.2 Exigências químicas e físicas para classificar um material como pozolânico, de acordo com a NBR 12.653 (ABNT, 1992) versus escória de aciaria estudada.

Propriedades	Classe de material pozolânico			Escória estudada
	N*	C*	E*	
<u>Exigências químicas</u> SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + FeO (% min)	70	70	50	40,64
SO ₃ % máx	4,0	5,0	5,0	0,32
Teor de umidade, % máx.	3,0	3,0	3,0	ND**
Perda ao fogo % máx	10,0	6,0	6,0	4,76
Álcalis disponíveis em Na ₂ O, % máx	1,5	1,5	1,5	0,05
<u>Exigências físicas</u> Material retido na peneira 45 µm, %máx	34	34	34	ND**
Índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias, em relação ao controle, % min.	75	75	75	92,53 (item 6.2)

*Classe N= pozolanas naturais e artificiais que obedeçam aos requisitos aplicáveis nesta norma, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, terras diatomáceas e argilas calcinadas.

Classe C= cinza volante produzida pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas que obedece aos requisitos desta norma.

Classe E= qualquer pozolana cujos requisitos diferem das classes anteriores, conforme estabelecido nesta norma.

**ND = não determinado.

No caso da norma brasileira esta escória deixa de atender a apenas um requisito para ser considerada um material pozolânico, como mostra a tabela 7.2, já que os elementos responsáveis pela reação química pozolânica encontram-se presentes em baixa quantidade, reduzindo a capacidade de formação de silicatos, aluminatos e ferroaluminatos de cálcio, que determinam o aumento da resistência dos materiais à base de cimento.

No caso de um cimento Portland composto (NBR 11578, ABNT 1991), as exigências existentes em comparação com o material estudado encontram-se na tabela 7.3.

TABELA 7.3 Exigências químicas, físicas e mecânicas para classificar um cimento Portland composto (CPII- NBR 11.578, ABNT, 1991) e os resultados obtidos para o material estudado (CP II-EA).

CP II		Limites (% da massa)			
Exigências químicas		CP II-E			CP II-EA
Resíduo insolúvel (RI) (%)		≤ 2,5			ND ⁽¹⁾
Perda ao fogo (%)		≤ 6,5			4,76 ⁽²⁾
Óxido de magnésio (MgO) (%)		≤ 6,5			18,58 ⁽²⁾
Trióxido de enxofre (SO ₃) (%)		≤ 4,0			0,32 ⁽²⁾
Anidrido carbônico (CO ₂) (%)		≤ 5,0			ND ⁽¹⁾
Exigências físicas e mecânicas obrigatórias		Limites de classe			
		25	32	40	
Finura	Resíduo na peneira #200(%)	≤ 12	≤ 12	≤ 10	0
	Área específica (m ² /kg)	≥ 240	≥ 260	≥ 260	376
Tempo de início de pega (h)		≥ 1	≥ 1	≥ 1	1,49 ⁽³⁾
Expansibilidade a quente (mm)		≤ 5	≤ 5	≤ 5	Máximo 1,5 (tabela 7.4) ⁽⁵⁾
fc (MPa)	3 dias de idade	≥ 8,0	≥ 10,0	≥ 15,0	ND ⁽¹⁾
	7 dias de idade	≥ 15,0	≥ 20,0	≥ 25,0	ND ⁽¹⁾
	28 dias de idade	≥ 25,0	≥ 32,0	≥ 40,0	56,00 ⁽⁴⁾
Exigências físicas e mecânicas facultativas		Limites			
		CP II-E			
Tempo de fim de pega (h)		≤ 10			4,48 ⁽³⁾
Expansibilidade à frio (mm)		≤ 5			Máximo 2,53 (tabela 7.4) ⁽⁵⁾
Teor de escória (%)		6-34			10
Teor de material pozolânico (%)		-			ND ⁽¹⁾
Teor de material carbonático (%)		0-10			ND ⁽¹⁾

⁽¹⁾ ND= não determinado.

⁽²⁾ % na escória

⁽³⁾ pasta com 10% de escória

⁽⁴⁾ concreto com 10% de adição de escória sobre a massa de cimento

⁽⁵⁾ pasta com 35% de escória de aciaria

De acordo com as exigências desta norma, dos elementos determinados para a escória estudada esta contém apenas um teor mais elevado de MgO do que o recomendado, atendendo às demais recomendações.

A revisão bibliográfica (PABLO GAIBROIS apud GUMIERI, 2000) aponta, entretanto, que o material formado com a escória estudada não está livre de desintegração

causada pela hidratação dos óxidos de cálcio e de magnésio uma vez que os módulos A e B (apresentados em 2.1.2) não são atendidos, ou seja,

$$\text{Módulo A} \rightarrow \text{CaO} + 0,8 \text{ MgO} \leq 1,285\text{SiO}_2 + 0,4 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 1,75\text{S} \quad (1)$$

$$\text{Módulo B} \rightarrow \text{CaO} \leq 0,9\text{SiO}_2 + 0,6 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 1,75\text{S} \quad (2)$$

Para esta escória:

$$\text{Módulo A} \rightarrow 48,194 > 29,164 \quad (1)$$

$$\text{Módulo B} \rightarrow 33,33 > 23,86 \quad (2)$$

Outro motivo que leva a crer que o MgO apresenta-se sob forma instável é o fato de que (item 2.1.2), nas equações propostas por LUO apud MONTGOMERY e WANG (1991):

$$\text{MgO instável} \rightarrow \text{MgO} / (\text{FeO} + \text{MnO}) > 1 \quad (3)$$

Onde, para o material estudado tem-se:

$$\text{MgO instável} \rightarrow 18,58 / (10,63 + 0) > 1$$

$$\text{MgO instável} \rightarrow 1,75 > 1.$$

Nota-se que o MgO foi determinado na análise química, o que não garante a presença da fase MgO na escória. Esta pode ser identificada com a análise difratométrica.

Observa-se no difratograma da escória pura (figura 6.2) uma grande incidência de picos, o que indica que a estrutura da escória é, predominantemente, cristalina, embora apresente um halo de amorfização. Esta forma cristalina é, provavelmente, proveniente da forma de resfriamento lento da escória. Dos elementos encontrados neste difratograma (gehlinita, akermatita, merwinita e wollastonita), nenhum pôde ser identificado na análise semi-quantitativa dos pontos assinalados na microscopia eletrônica de varredura da figura 6.3.

Com relação à análise ambiental, esta escória foi classificada como um resíduo classe II, não inerte (tabelas 6.8 e 6.9). Dentre os elementos solubilizados que apresentaram valores acima do estabelecido na listagem nº 8, do anexo H da NBR 10.004 (ABNT, 1987) estão a dureza total, o alumínio, o cádmio, a prata e o selênio. Destes elementos, o cádmio e a prata são considerados tóxicos. Um resíduo classificado como classe II pode ter algumas finalidades:

1. a primeira seria a disposição deste material em aterros sanitários devidamente preparados para receber um resíduo desta categoria;

2. a segunda alternativa seria a utilização deste resíduo como sub-base de rodovias e ferrovias, desde que o local seja inspecionado e devidamente liberado pelos órgãos ambientais;
3. a terceira alternativa possível seria a utilização deste resíduo como material de construção civil.

Entretanto, para que o resíduo seja totalmente liberado como material de construção, deve-se submeter este material, concreto no caso deste estudo, a uma análise ambiental de lixiviação e solubilização, de concretos com e sem escória, para se verificar que classificação ambiental receberia o material de construção gerado. Só assim o material estaria totalmente liberado para utilização sob o aspecto ambiental.

Devido às características deste material, foram realizados ensaios com o objetivo de quantificar e limitar a expansibilidade apresentada pela escória de aciaria quando utilizada como adição ao concreto.

7.2 EXPANSIBILIDADE

7.2.1 Agulhas de Le Chatelier

A tabela 7.4 mostra os valores médios obtidos para este ensaio com escórias novas, escórias com 28, 360 e 720 dias de idade, realizado a frio e a quente. Todas leituras feitas neste ensaio encontram-se no anexo A.

TABELA 7.4 Expansão por agulhas de Le Chatelier a frio e a quente.

Elemento Testado	Expansão a frio (mm) Média	Expansão a quente (mm) Média	Idade da escória (dia)	Limite NBR 11578/91 (mm)
C	1,73	0,30	Zero	Exigência obrigatória a quente ≤ 5
CE	0,80	0,23		
C	0,55	0,40	28	
CE	0,56	0,37		
C	1,80	1,13	360	Exigência facultativa a frio ≤ 5
CE	2,53	1,50		
C	0,03	0,10	720	
CE	0,35	0,30		

C Pasta de cimento puro.

CE Pasta de cimento com 35% de escória de aciaria elétrica (FP).

A norma para cimento Portland composto NBR 11.578 (ABNT, 1991) estabelece como exigência física e mecânica obrigatória o limite de expansibilidade a quente em $\leq 5\text{mm}$. Esta norma estabelece ainda como exigência física e mecânica facultativa a expansibilidade a frio em $\leq 5\text{mm}$.

Nos ensaios realizados a frio e a quente, o que pode ser visualizado na tabela 7.4, a expansão manteve-se abaixo dos 5mm para todos os casos.

Os resultados apontam uma maior influência do óxido de magnésio do que do óxido de cálcio, pela expansibilidade ser maior no ensaio a frio. Cabe salientar que a porcentagem de MgO na escória estudada (tabela 6.3- 18,58%) está acima da encontrada na bibliografia, que é de 8 a 12% (tabela 2.3). Já a porcentagem de CaO na escória estudada (33,33%- tabela 6.3) está abaixo da encontrada na bibliografia, que fica entre 45 e 55%(tabela 2.3).

Os ensaios de verificação da expansibilidade pelas agulhas de Le Chatelier apresentam como vantagem a simplicidade do equipamento e a facilidade de execução.

7.2.2 Ensaio da autoclave

A tabela 7.5 e a figura 7.1 mostram os valores obtidos para este ensaio com escórias novas (idade de referência zero) e escórias com 28, 91, 182, 360, 720 e 870 dias de idade de envelhecimento.

Na retirada da autoclave os corpos-de-prova encontravam-se nas condições que podem ser visualizadas na foto 7.1.

TABELA 7.5 Resultados do ensaio de expansão em autoclave.

Teor de adição (%)	Expansão (%)							Limite de norma ASTM C-150
	Escória 0 dias	Escória 28 dias	Escória 91 dias	Escória 182 dias	Escória 360 dias	Escória 720 dias	Escória 870 dias	
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	≤0,8%
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
10	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,02	
25	2,60	4,00	2,40	3,50	3,40	1,11	0,80	
40	7,70	10,10	7,70	8,80	8,00	5,55	4,20	

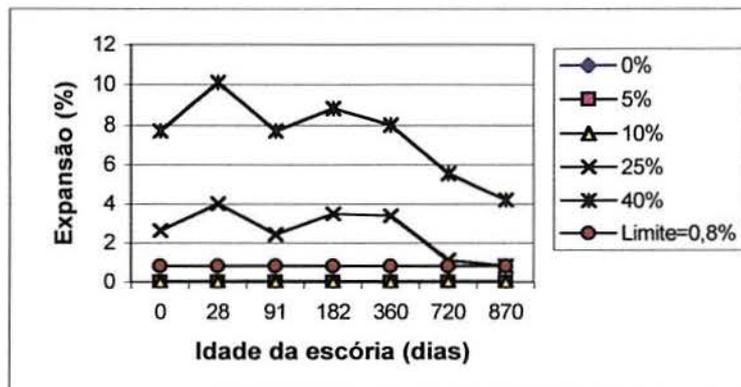


FIGURA 7.1 Expansão em autoclave em função da idade da escória.

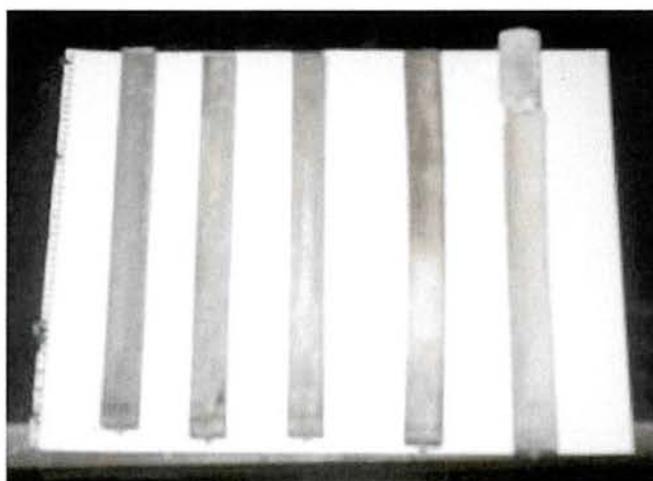


FOTO 7.1 Corpos-de-prova (CP) prismáticos depois de serem submetidos ao ensaio de autoclave. Da esquerda para a direita tem-se: CP testemunho (0% de adição de escória), CP com 5% de escória, 10%, 25% e 40%.

Na expansão em autoclave, as pastas de cimento puro e com 5% de adição não expandiram para todas as idades de referência da escória (tabela 7.5). Para 10% de adição a expansão ficou entre 0,02 e 0,05% para escórias com qualquer idade de envelhecimento testada, inclusive escória nova, com idade de referência zero. A bibliografia (ASTM C-150/98 e PETRUCCI, 1978) aponta valores de até 0,8% como limite de estabilidade do cimento, verificado pela expansão em autoclave. Sendo assim, o uso de adições em até 10% não

prejudicou o concreto gerado com esta escória. Para se confirmar esta tendência as outras variáveis testadas devem ser avaliadas em conjunto.

Para adições de 25 e de 40%, praticamente todos os valores de expansibilidade encontram-se muito acima do aceitável para escórias com todas as idades de envelhecimento estudadas, variando de 0,80 a 4% de expansão para 25% de adição e de 4,20 até 10,1% com 40% de adição. Nota-se, nestas adições, que o fenômeno mostrou-se crescente nos primeiros 28 dias e decrescente para as outras idades. Aos 870 dias de idade de envelhecimento esta escória já pode ser utilizada como adição em proporções de até 25%.

A bibliografia descreve resultados de CRAWFORD e BURN (1969) do final da década de 60 para argamassas com traço 1:3 (cimento:escória) apontando uma expansão em autoclave de 10%, sendo portanto coerentes com os resultados obtidos nesta pesquisa.

A substituição do cimento pela adição mineral é de 35% no ensaio das agulhas de Le Chatelier. Verificando-se no ensaio de autoclave, adições maiores que 10% expandem mais do que o concreto pode suportar, pelo menos para escórias com menos de 870 dias de idade de envelhecimento, o que não se repetiu no ensaio utilizando as agulhas de Le Chatelier.

Uma questão que poderia surgir aqui seria: se a escória estivesse estocada no ambiente, ao ar livre, ela não teria a sua estabilidade acelerada devido às condições ambientais de chuva, sol, calor e frio?

Desta forma foram tomadas duas amostras da mesma escória com aproximadamente 870 dias de idade. Uma delas foi submetida à autoclave tendo sido retirada da sua condição de laboratório diretamente para o ensaio. Com a outra amostra foi realizado um ensaio expedito de estabilização acelerada, procedendo-se da seguinte maneira:

1. A escória foi colocada em estufa e submetida a uma temperatura de $80^{\circ} \text{C} \pm 10$ por 24 horas;
2. Depois de seca em estufa esta escória permaneceu no ambiente por 48 horas a fim de permitir que as reações internas de estabilização acontecessem;
3. Após este período a escória foi imersa em água por mais 24 horas.

Foram realizados três ciclos e em seguida as duas amostras de escória foram submetidas a teste de autoclave obtendo-se como resultado os valores que constam na tabela 7.6.

TABELA 7.6 Expansão em autoclave de escórias submetidas a ciclos acelerados de estabilização e escórias mantidas em condições de laboratório, com idade de 870 dias.

Teor de adição (%)	Expansão em escórias com 870 dias de idade	
	Em condições de laboratório (%)	Submetida a ciclos de estabilização acelerada (%)
0	0,00	0,00
5	0,00	0,00
10	0,02	0,00
25	0,80	0,61
40	4,20	3,60

Analisando-se a tabela 7.6 pode-se observar que, para os corpos-de-prova moldados sem adição de escória (0%), com 5% e com 10% de adição, não houve alteração entre uma e outra situação, pois a quantidade utilizada é pequena e os produtos da expansão provavelmente se acomodam nos vazios da pasta endurecida, ou abaixo dos níveis máximos de expansão, que é 0,8% (ASTM C-150/87), como confirma a tabela 7.5.

Para adições de 25 e 40% observa-se uma queda na expansão, de 0,8 para 0,61% em corpos-de-prova com 25% de adição e de 4,20 para 3,60% para 40% de adição. Esses resultados apontam que, se a escória é mantida no ambiente, a sua estabilização seria mais rápida. Poderia inclusive estar estável no período de um ano, como apontam pesquisas feitas por RUBIO & CARRETERO (1991).

7.2.3 Perda de massa

Como o ensaio de autoclave é bastante agressivo, ou seja, as barras moldadas são submetidas a altas temperaturas e pressões, foi feito o ensaio de “perda de massa” (descrito em 6.5.1.3) por tratar-se de um ensaio acelerado de expansão, mas menos agressivo que a autoclave, procurando-se determinar diferenças de massa (figura 7.2) e volume (figura 7.3) dos corpos-de-prova. Foram realizados 20 ciclos de molhagem e secagem. Os resultados das medições encontram-se no anexo B.

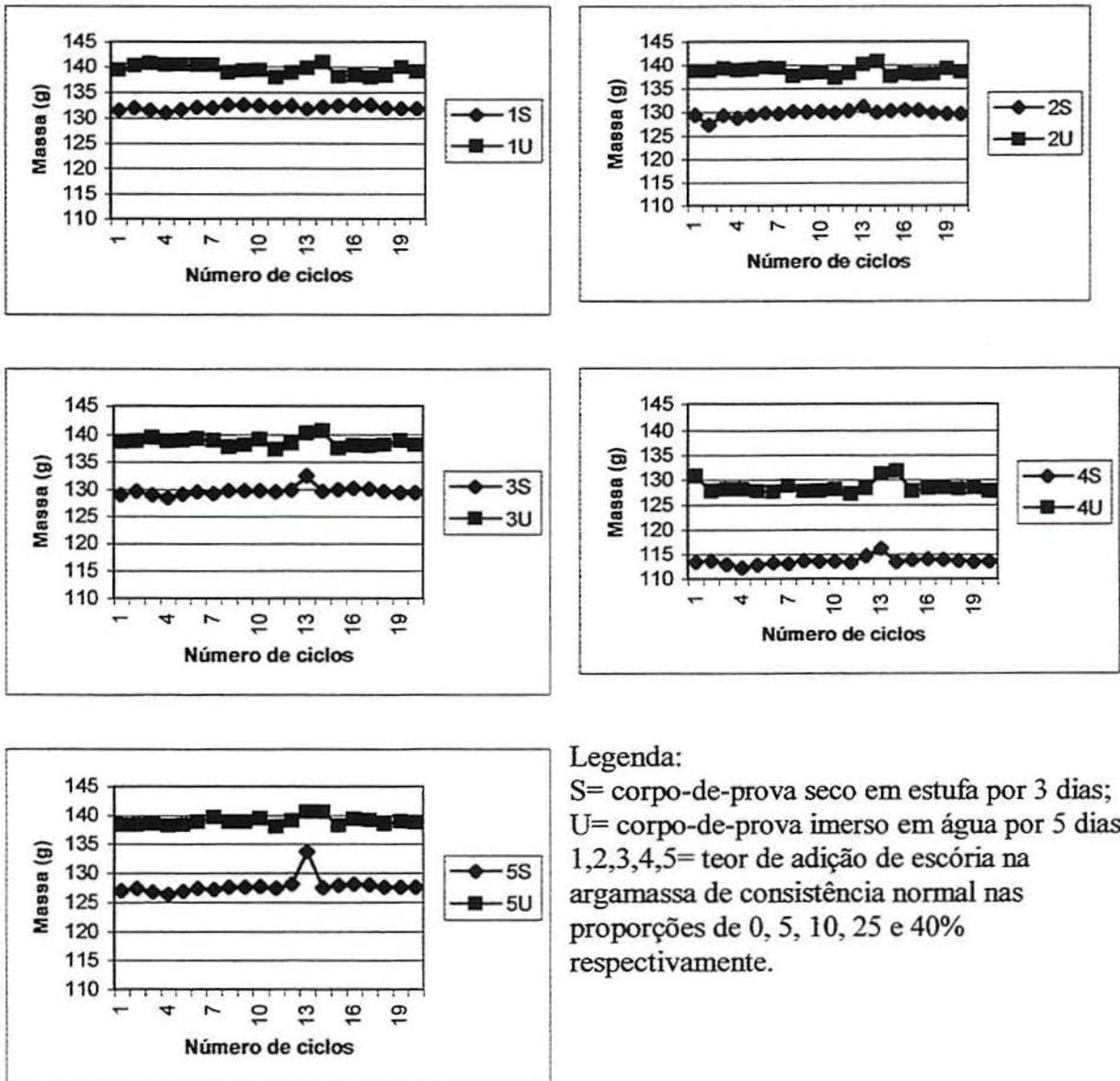
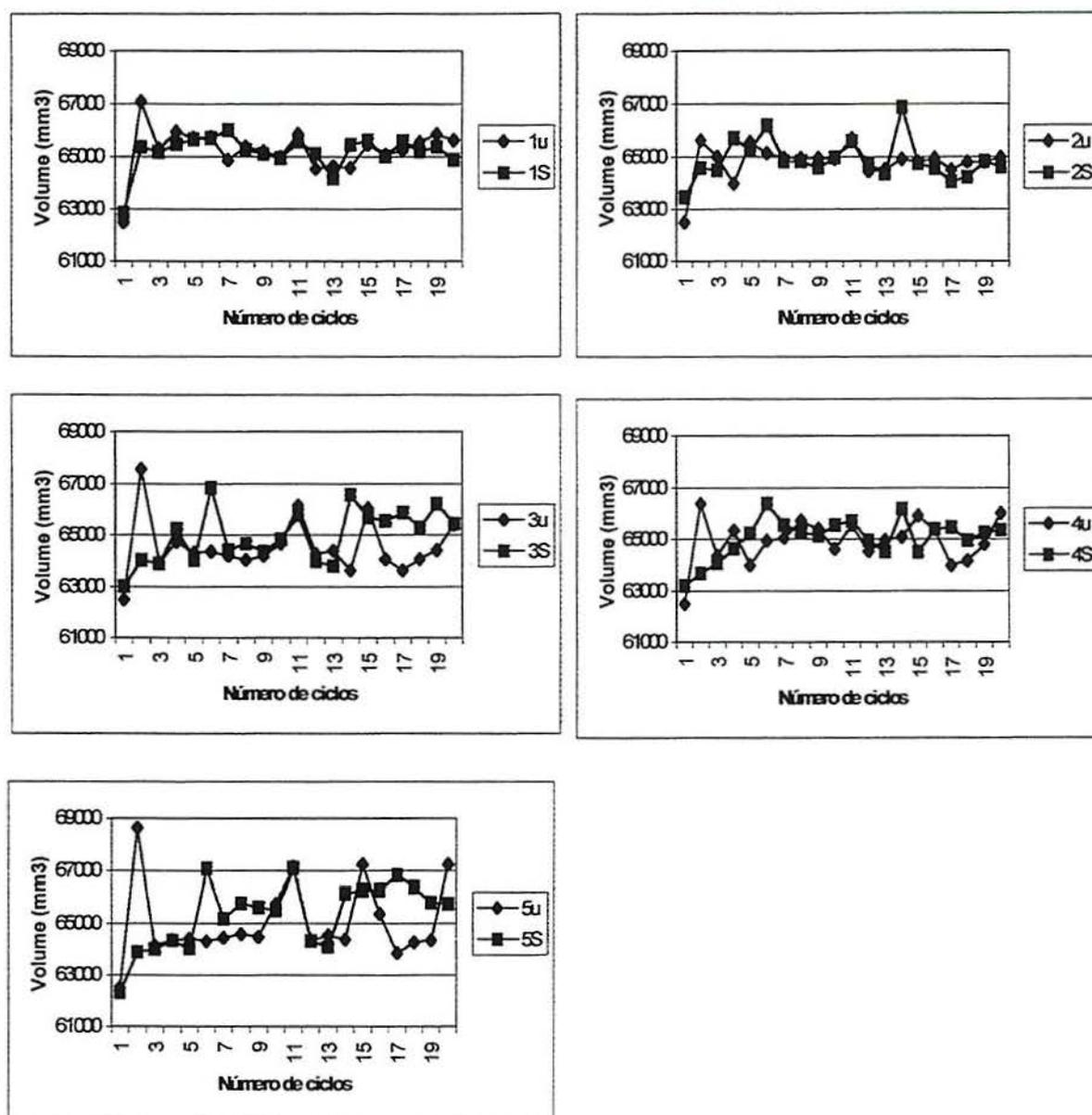


FIGURA 7.2 Resultados do ensaio de perda de massa- diferenças de massa.



Legenda:

S= corpo-de-prova seco em estufa por 3 dias;

U= corpo-de-prova imerso em água por 5 dias;

1,2,3,4,5= teor de adição de escória na argamassa de consistência normal nas proporções de 0, 5, 10, 25 e 40% respectivamente.

FIGURA 7.3 Resultados do ensaio de perda de massa- diferenças de volume.

Neste ensaio não se nota uma perda de massa significativa com a evolução dos vários ciclos de perda de massa, para todas as adições de escória (figuras 7.2 e 7.3). Observa-se entretanto um ligeiro aumento de massa na figura 7.2 no ciclo de número 13. Como os demais valores resultaram constantes, atribui-se a este aumento um provável erro de medição. Por outro lado o volume seco de todas as barras apresenta um pequeno aumento de volume com a

evolução dos ciclos, o que pode apontar uma pequena expansão do material, mesmo após 2 anos de idade de envelhecimento.

7.2.4 Análise geral dos ensaios de expansibilidade

Observou-se que para confecção de concreto numa proporção de até 10% de escória este material pode ser utilizado sem prejuízo ao concreto, mesmo que esta escória seja nova. Esta conclusão baseia-se nos fatos de que: nos ensaios de expansibilidade realizados, todos elementos com até 10% de adição de escória tiveram sua expansão abaixo de 0,8% (limite para autoclave) e abaixo de 5mm (limite para as agulhas de Le Chatelier), apesar dos ensaios das agulhas utilizar 35% de substituição do cimento pela escória. A autoclave é mais agressiva, tendo sido usada como referência, pois se o elemento ficar abaixo deste limite na autoclave sempre é aprovado no ensaio de Le Chatelier.

A expansibilidade ocasionada com a adição desta escória só pode ser detectada com as condições marcadamente agressivas dos ensaios feitos em autoclave, já que nos outros ensaios realizados a expansibilidade existente não apresentou resultados limitantes.

Estes resultados corroboram os obtidos por MURPHY, MEADOWCROFT e BARR (1997), onde misturas de escória adicionadas ao clínquer de cimento Portland mostraram substanciais ganhos de resistência com 10% de adição de escória.

7.3 POZOLANICIDADE

Os resultados de pozolanicidade obtidos para a escória utilizada nesta fase dos ensaios encontram-se na tabela 7.7 e na figura 7.4.

TABELA 7.7 Índice de atividade pozolânica com cimento Portland (NBR 12653/92).

	C_B (C + E) (MPa)	C_A (Cimento) (MPa)	$I = 100 \times (\delta_{CB}) / (\delta_{CA})$ (%)
Valores encontrados	24,96	27,00	
	26,51	29,54	
	23,94	24,96	
Média (δ)	25,14	27,17	92,53

A tabela 7.7 mostra a determinação do índice de atividade pozolânica com cimento Portland, onde a média dos valores de resistência à compressão dos corpos-de-prova

moldados com cimento sobre os moldados com cimento e escória resultou em 92,53%. Portanto bem acima do estabelecido na NBR 12.653/92, que indica valores mínimos de 75% para que um cimento seja considerado pozolânico.

Na etapa de viabilização deste trabalho a escória estudada apontou uma pozolanicidade de 69,92%. Como este índice aumentou para o uso da escória do forno-panela, indica-se aqui a separação destas escórias em função da sua origem no momento da estocagem, a fim de que elas possam ser utilizadas de acordo com as características individuais.

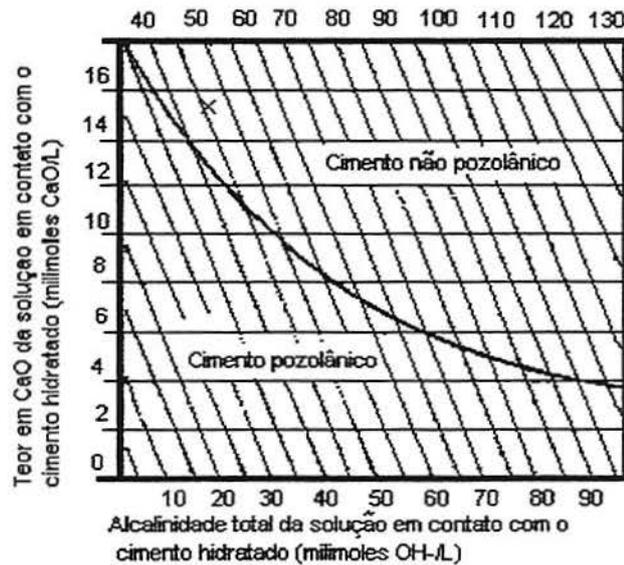


FIGURA 7.4 Determinação da pozolanicidade para cimento Portland pozolânico (NBR 5753/92)- FRATINI.

Apesar do ensaio do índice de atividade pozolânica com cimento Portland apontar uma pozolanicidade de 92,53%, o ensaio conhecido como FRATINI classificou esta escória como cimento não pozolânico. Este ensaio é utilizado unicamente para classificação de cimento pozolânico. Trata-se de um ensaio que faz uma avaliação química do cimento e que foi adaptado pelos laboratórios de Furnas para auxiliar na identificação da pozolanicidade de materiais cimentícios alternativos. O resultado depende da quantidade de adição mineral que foi utilizada, substituindo-se o cimento pela pozolana testada, o que, neste caso, foi de 35%.

Segundo informações recebidas deste laboratório (SANTOS, 2000), num estudo realizado com 30 modalidades de argilas diferentes, calcinadas e não calcinadas, utilizadas sempre na proporção de 35% de adição, apenas duas apresentaram características pozolânicas, compatíveis com o cimento composto CP II-F, apesar de todas terem apresentado índice de atividade pozolânica com cimento Portland (NBR 12.653/92) acima dos 75% exigidos. De acordo com estas informações o que mais influencia no ensaio de Fratini é o tipo de calcinação do material e a finura do mesmo. As argilas que apresentaram características pozolânicas foram calcinadas e moídas até uma finura Blaine próxima aos 20.000 m²/kg, aumentando assim a sua área de contato e conseqüentemente suas características pozolânicas.

Outro exemplo citado foi de ensaios realizados com cinza de casca de arroz, material comprovadamente pozolânico se corretamente calcinado e moído. Para adições de 15%, o ensaio de Fratini apontou esta cinza como um material pozolânico, mas quando a adição passou a ser de 8% o resultado do ensaio indicou esta cinza como um cimento não pozolânico.

Com isso pode-se supor que:

- A escória utilizada teve um resfriamento lento ao ar. Se esta tivesse sido granulada, provavelmente as suas propriedades hidráulicas tivessem sido melhoradas, já que o resfriamento lento ao ar torna o material mais cristalino. Com as propriedades hidráulicas melhoradas o ensaio de Fratini poderia ter apontado esta escória como cimento pozolânico;
- A finura Blaine a que se chegou com a moagem da escória foi de 376 m²/kg, portanto muito menor que a utilizada nas argilas consideradas pozolânicas.

Como este ensaio está ligado à composição química do material que depende da composição mineralógica da escória, sugere-se que se repita este ensaio alterando-se a finura Blaine.

7.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

De acordo com o que foi descrito no capítulo 6 (figura 6.1), para os ensaios de determinação de resistência à compressão e resistência à tração foram moldadas quatro etapas de ensaios e as resistências determinadas aos 28 e 91 dias das datas de cada moldagem, avaliando-se a influência das relações a/agl , diferentes teores de adições e a idade da escória na resistência. Todo resultado apresentado foi submetido a tratamento estatístico com auxílio do programa computacional “statgraphics”. Os modelos de equação de regressão múltipla obtidos para cada resultado encontram-se no anexo C e os resultados obtidos nos ensaios estão no anexo D deste trabalho.

Para se testar a influência, por exemplo, do teor de adição na resistência à compressão, toma-se o valor médio dos outros termos na equação da regressão múltipla variando-se o teor de adição. Outra consideração a ser feita é que se deve codificar alguns dados antes de se entrar na equação com intuito de uniformizar a ordem de grandeza dos termos. Desta forma, o intervalo utilizado ficou entre (-1) e (1) e não entre 0% e 40% e 0 e 360 dias para teores de adições e idade de envelhecimento da escória (referência), respectivamente. A relação a/agl utilizada permaneceu com os valores reais, ou seja, 0,3; 0,4; 0,52; 0,65 e 0,80. Os teores de adição foram codificados da maneira apresentada na tabela 7.8.

TABELA 7.8 Codificação dos teores de adição.

% de adição	Código recebido
0	-1,00
5	-0,75
10	-0,50
25	0,25
40	1,00

A idade de envelhecimento da escória, utilizada como idade de referência, foi outra variável independente analisada, com a codificação constante na tabela 7.9.

TABELA 7.9 Codificação das idades de envelhecimento da escória (referência).

Idade (dias)	Código recebido
zero	-1,00
28	-0,844
91	-0,494
360	1,00

Modelo de regressão múltipla obtido para a resistência à compressão aos 28 dias (anexo C) está apresentado na equação 1, com coeficiente de determinação de 97,7%. Neste modelo a variável dependente é a resistência à compressão e as variáveis independentes são os teores de adição (ad), a relação a/agl (acr) e a idade de envelhecimento da escória.

$$f_{c28} = -5,47342 - 3,32123 \cdot ad + 13,1945 \cdot \frac{1}{acr^2} - 2,35295 \cdot \frac{1}{acr^3} + 2,23296 \cdot idade^2 + 1,13544 \cdot \frac{idade}{acr} \quad (\text{eq. 1})$$

$$r^2 = 97,7 \%$$

onde: f_{c28} = resistência à compressão aos 28 dias da moldagem dos corpos-de-prova;

ad = teor de adição - codificado segundo tabela 7.8;

acr = relação água/aglomerante;

idade = idade de envelhecimento da escória. Codificada segundo tabela 7.9;

r^2 = coeficiente de determinação.

De acordo com o modelo, foram considerados significativos o teor de adição, a relação água/aglomerante, a idade da escória e a interação entre idade da escória e relação água/aglomerante.

A figura 7.5 apresenta a influência isolada do teor de adição na resistência à compressão aos 28 dias, onde observa-se uma tendência de redução da resistência do concreto sem adição

com o aumento do teor de adição, com valores médios de decréscimo de 2 % para 5% de escória, 7 % para 10%, 13 % para 25% e 26 % para 40% de adição.

Isto se dá, provavelmente, pelo fechamento dos poros do concreto com pequenas adições, não baixando significativamente a resistência com adições de 5 e 10% em relação ao testemunho. À medida que o teor de escória aumenta (para 25 e 40%) a resistência decresce, chegando a uma perda de até 26% para 40% de adição, já que o consumo de cimento das misturas é reduzido com a adição da escória. Esses resultados estão coerentes com os de outros estudos como os efetuados por MOURA (2000), GUMIERI (2000) e GEYER (2000), onde quanto maior o teor de adição, para valores acima de 20%, menor a resistência do concreto.

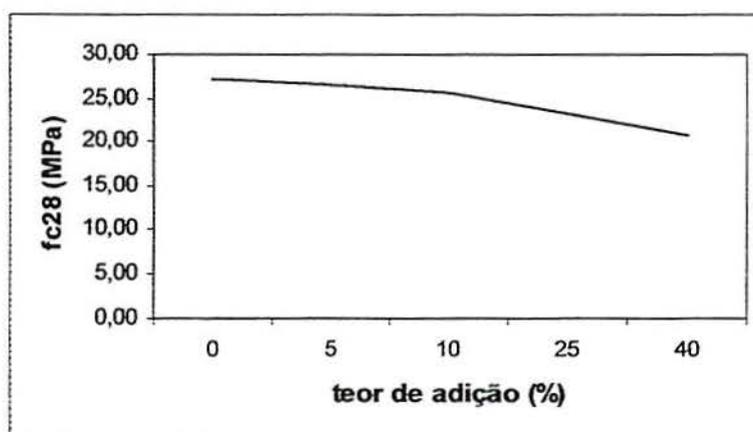


FIGURA 7.5 Influência do teor de adição na resistência à compressão aos 28 dias.

A figura 7.6 apresenta a influência do efeito isolado da relação água/aglomerante na resistência à compressão, aos 28 dias. Conforme o esperado, para um concreto moldado em iguais condições de mistura, lançamento, adensamento, cura e condições de ensaio, quanto maior a relação água/aglomerante, menor a sua resistência relativa (NEVILLE (1997) e MEHTA & MONTEIRO (1994)).

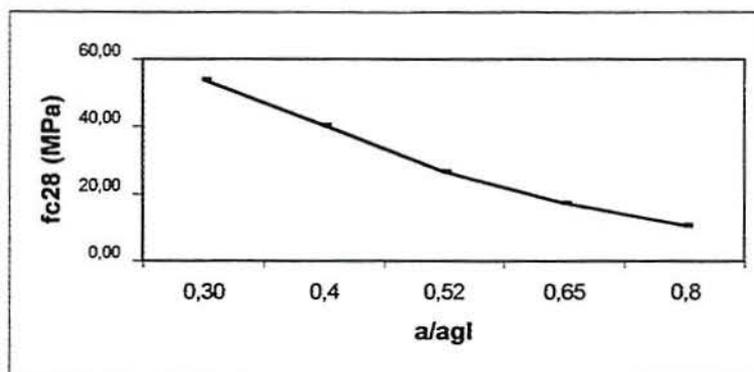


FIGURA 7.6 Influência da relação água/aglomerante na resistência à compressão aos 28 dias.

A figura 7.7 apresenta o efeito isolado da idade da escória na resistência à compressão aos 28 dias, onde se observa claramente que as escórias com 1 ano de idade produziram concretos de resistência mais elevada (aproximadamente 18 %). Este fato foi causado, provavelmente, por ter-se empregado cimento de um lote diferente daquele utilizado para os ensaios com escória nova, com 28 e com 91 dias de idade de envelhecimento. Como pode-se observar na tabela 6.2, o cimento empregado para os ensaios de 360 dias de idade da escória tem uma finura superior ao utilizado anteriormente (tabela 4.1) e uma resistência média aos 28 dias superior em 13% ao usado nos primeiros ensaios. Para os resultados de f_c do cimento, com 1 dia de idade a resistência foi superior em 25%, o mesmo ocorrendo aos 3 dias e aos 7 dias de idade foi superior em 12%. Do que pode-se afirmar que a resistência à compressão do segundo lote de cimento foi superior ao primeiro em média 19%.

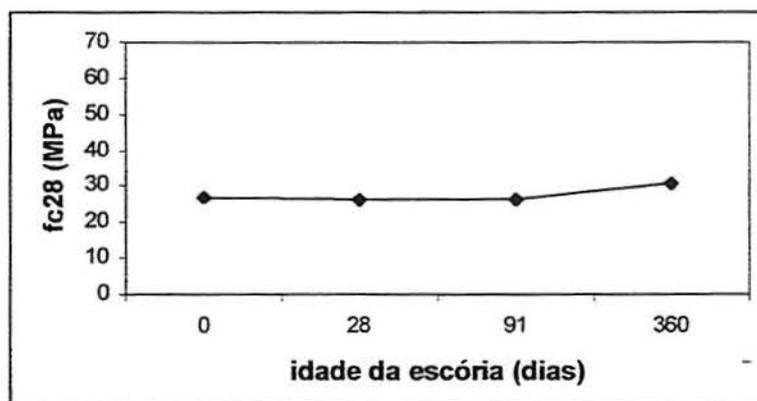


FIGURA 7.7 Influência da idade da escória na resistência à compressão aos 28 dias.

A figura 7.8 mostra a interação entre a idade da escória e a relação água/aglomerante, onde se constata que quanto maior a relação a/agl, menor a influência da idade da escória. Para valores maiores de relações a/agl as curvas das idades de sobrepõem. Para escórias com 1 ano de idade a curva de resistência à compressão resultou superior às demais em aproximadamente 70%, provavelmente devido à maior f_c deste lote de cimento.

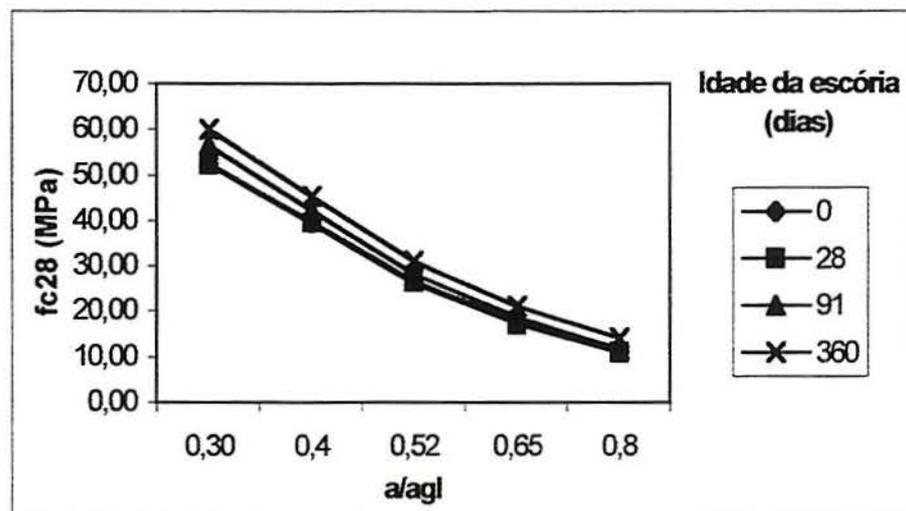


FIGURA 7.8 Influência da interação entre a idade da escória e da relação água/aglomerante na resistência à compressão aos 28 dias.

O modelo de regressão múltipla obtido para a resistência à compressão aos 91 dias (anexo C) está descrito na equação 2, com coeficiente de determinação de 97,8%.

$$f_{c91} = -1,01686 - 3,81675 \cdot ad - 1,62138 \cdot ad^2 + 12,4149 \cdot 1/acr^2 - 2,12886 \cdot 1/acr^3 \quad (\text{eq. 2})$$

$$r^2 = 97,8 \%$$

onde: f_{c91} = resistência à compressão aos 91 dias da moldagem dos corpos-de-prova;

ad = teor de adição - codificado segundo tabela 7.8;

acr = relação água/aglomerante;

r^2 = coeficiente de determinação.

De acordo com o modelo, para a resistência à compressão aos 91 dias foram considerados estatisticamente significativos somente o teor de adição e a relação água/aglomerante.

A figura 7.9 apresenta o efeito isolado do teor de adição onde a mesma tendência apresentada aos 28 dias foi repetida: quanto maior o teor de adição, menor a resistência, sendo a queda mais significativa para teores acima de 10%. Com 5% de adição não foi alterada a resistência do concreto em relação ao testemunho. Os valores médios de decréscimo, neste caso, foram de 1,5% para 10% de adição, 10% para uma adição de 25% e de 25% para 40% de adição de escória.

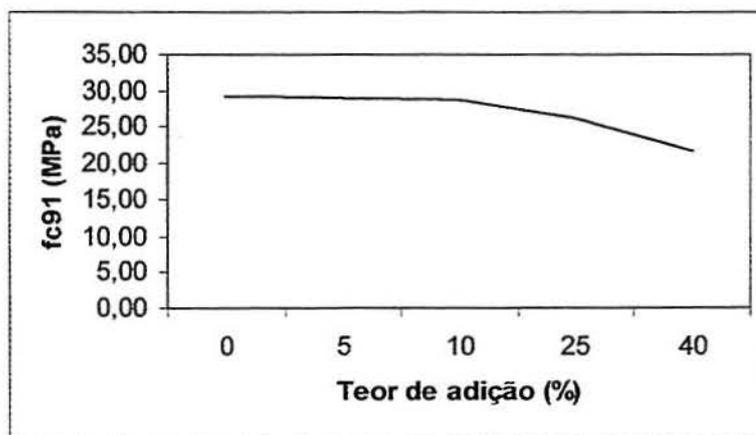


FIGURA 7.9 Influência do teor de adição na resistência à compressão aos 91 dias.

A influência da adição na resistência à compressão mostra que, quanto maior a adição de escória, mais baixa a resistência do concreto, tanto para os 28 dias (figura 7.5) quanto para os 91 dias da moldagem (figura 7.9). Nestas figuras ainda é possível observar que para adições de até 10% de escória a resistência à compressão apresentou uma queda muito pequena (da ordem de 1,5 a 2%) em todas situações.

A figura 7.10 apresenta o efeito isolado da relação a/agl , onde, conforme esperado, quanto menor a relação a/agl , maior a resistência à compressão. Resultado semelhante obteve-se para os 28 dias de idade (figura 7.6). Esta tendência também aparece em estudos que vêm sendo realizados com materiais alternativos como adição ao concreto descritos por MOURA (2000), GUMIERI (2000), LIMA (1999), entre outros.

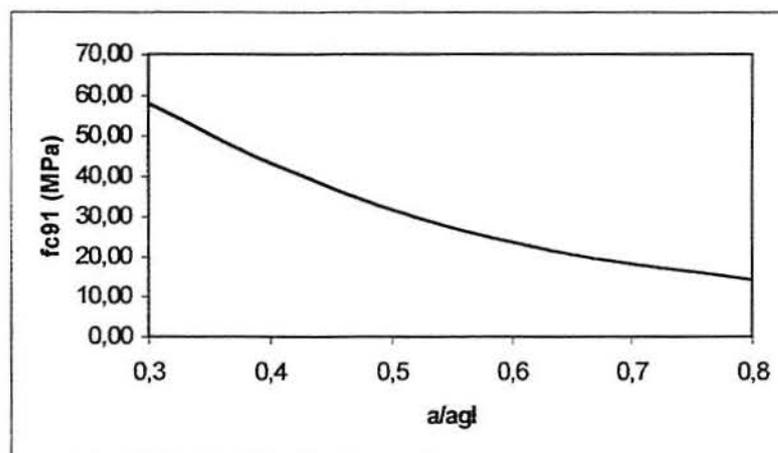


FIGURA 7.10 Influência da relação água/aglomerante na resistência à compressão aos 91 dias.

7.5 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Todas considerações feitas para os ensaios de resistência à compressão também valem para os ensaios de resistência à tração, cujos resultados encontram-se no Anexo D.

O modelo de regressão múltipla obtido para a resistência à tração aos 28 dias (anexo C) está apresentado na equação 3, com coeficiente de determinação de 95,2 %:

$$f_{t28} = 0,177703 - 0,3815 \cdot ad - 0,100985 \cdot ad^2 + 0,769311 \cdot 1/acr + 0,103635 \cdot idade^2 + 0,129034 \cdot ad/acr \quad (\text{eq. 3})$$

$$r^2 = 95,2 \%$$

onde: f_{t28} = resistência à tração aos 28 dias da moldagem dos corpos-de-prova;

ad = teor de adição - codificado segundo tabela 7.8;

acr = relação água/aglomerante;

idade= idade de envelhecimento da escória (referência). Codificada segundo tabela 7.9;

r^2 = coeficiente de determinação.

De acordo com o modelo, foram considerados estatisticamente significativos o efeito do teor de adição, da relação água/aglomerante, da idade da escória e da interação entre o teor de adição e a relação a/agl.

A figura 7.11 apresenta a influência isolada do teor de adição na resistência à tração aos 28 dias. Este resultado apresenta a mesma tendência de redução de resistência com o aumento do teor de adição, como havia sido constatado no ensaio de resistência à compressão aos 28 dias. Neste caso, 5 e 10% de adição não apresentaram queda de resistência em relação ao testemunho. Para teores de adição de 25% houve uma queda de aproximadamente 5% na resistência à tração e para 40% de adição esta queda média foi de 15%.

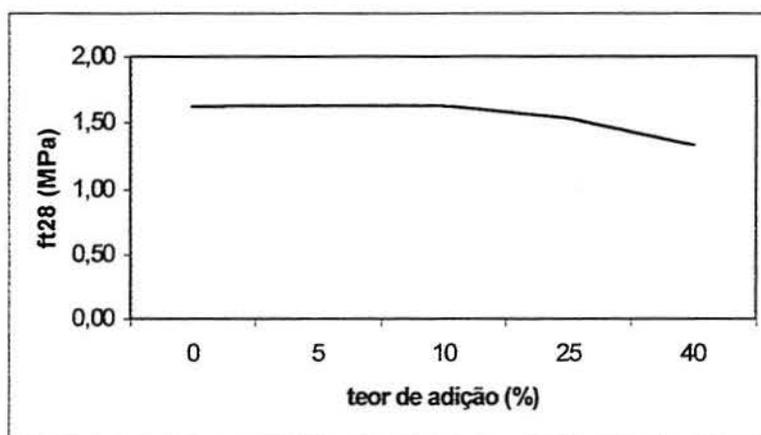


FIGURA 7.11 Influência do teor de adição na resistência à tração aos 28 dias.

Na figura 7.12 tem-se a influência isolada da relação a/agl na resistência à tração, aos 28 dias. Este gráfico confirmou a tendência visualizada na resistência à compressão (figura 7.6) onde, quanto maior a relação a/agl, menor a resistência relativa do concreto.

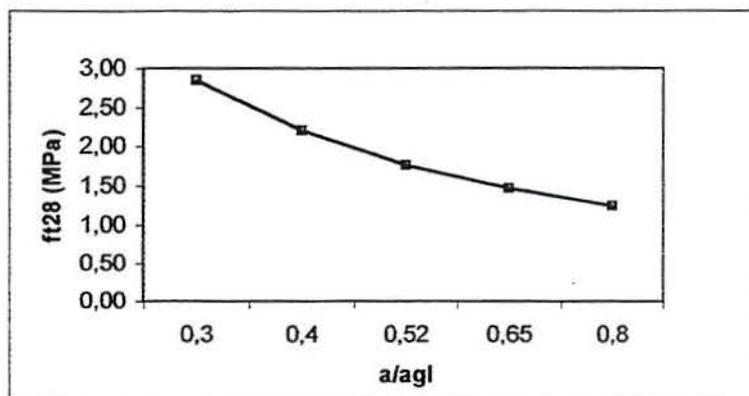


FIGURA 7.12 Influência da relação água/aglomerante na resistência à tração aos 28 dias.

A figura 7.13 apresenta o efeito isolado da idade da escória na resistência à tração aos 28 dias.

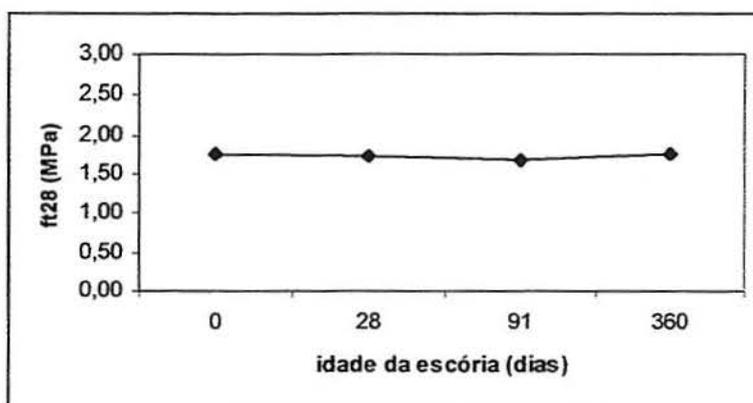


FIGURA 7.13 Influência da idade da escória na resistência à tração aos 28 dias.

Na figura 7.14 tem-se a interação entre o teor de adição e a relação a/agl . Neste caso observa-se que as curvas dos concretos sem adição (testemunho) e de 5% se sobrepõem, para qualquer relação a/agl , não tendo influência portanto a adição de 5% na resistência à tração aos 28 dias.

Para 10% de adição a resistência à tração permaneceu levemente abaixo da curva testemunho (0%) onde, para concretos mais densos (a/agl 0,3 e 0,4), esta curva também sobrepôs-se à curva testemunho. Para relação a/agl de 0,52, a resistência à tração baixou cerca de 5% em relação ao testemunho, 6% para relação a/agl de 0,65 e cerca de 14% para a/agl 0,8.

Nas curvas de teores de adição de 25% e de 40%, em concretos mais porosos (a/agl 0,65 e 0,80), a influência da adição foi mais significativa, chegando a uma perda de resistência de até 38% para a/agl 0,8 e adição de 40%, em relação ao testemunho. Para 25% de adição esta perda foi um pouco menor, na faixa de 14%.

Em concretos mais compactos (baixas relações a/agl), o teor de adição não exerce influência significativa, mas à medida que aumenta-se a relação a/agl , o teor de adição mostra-se mais importante na resistência à tração do concreto.

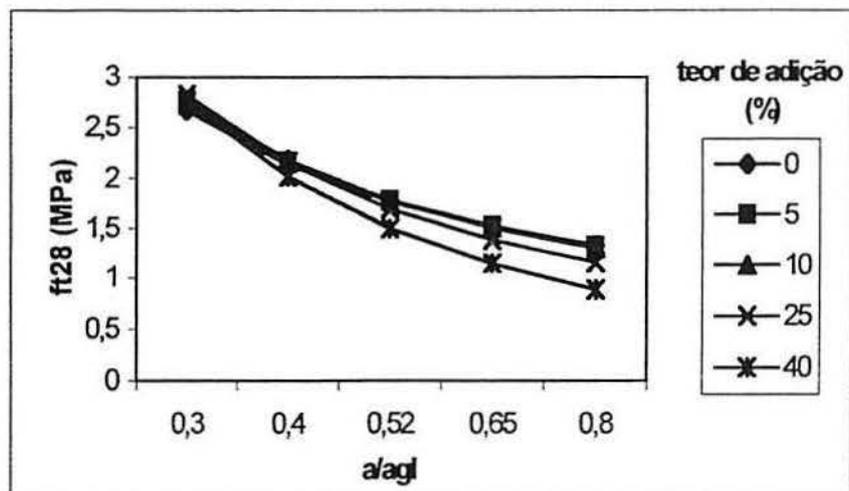


FIGURA 7.14 Influência da adição e da relação água/aglomerante na resistência à tração aos 28 dias.

O modelo de regressão múltipla obtido para a resistência à tração aos 91 dias (anexo C) é apresentado na equação 4, com coeficiente de determinação de 92,4%:

$$f_{t91} = 0,236408 - 0,358112 \cdot ad - 0,134786 \cdot ad^2 + 0,872618 \cdot 1/acr + 0,124436 \cdot idade^2 + 0,108874 \cdot ad/acr \quad (\text{eq. 4})$$

$$r^2 = 92,4 \%$$

onde: f_{t91} = resistência à tração aos 91 dias da moldagem dos corpos-de-prova;

ad = teor de adição - codificado segundo tabela 7.8;

acr = relação água/aglomerante;

$idade$ = idade de envelhecimento da escória (referência). Codificada segundo tabela 7.9;

r^2 = coeficiente de determinação.

Nesse modelo de regressão foram considerados significativos o teor de adição, a relação a/agl, a idade da escória e a interação entre o teor de adição e a relação a/agl.

A figura 7.15, confirmando a tendência observada nas figuras 7.5, 7.9 e 7.11, para a influência isolada do teor de adição na resistência do concreto, a f_t manteve-se igual ao testemunho para adições de até 10%, apresentando quedas de aproximadamente 3% para adições de 25% e de 17% para 40% de adição.

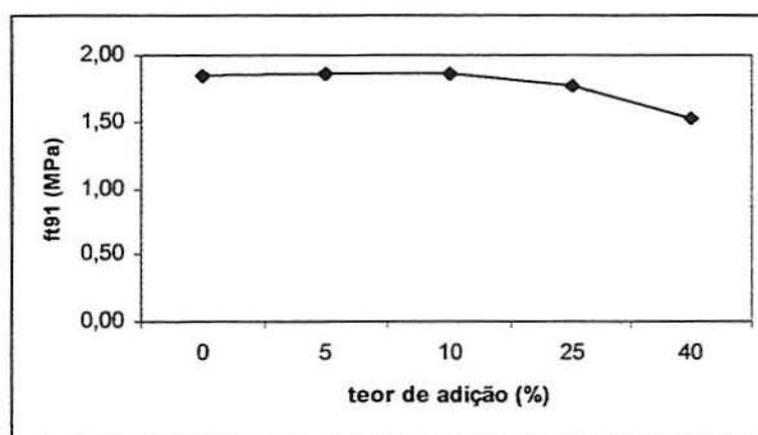


FIGURA 7.15 Influência do teor de adição na resistência à tração aos 91 dias.

Na figura 7.16 tem-se a influência isolada da relação a/agl na resistência à tração, aos 91 dias. Este gráfico confirmou a tendência visualizada na resistência à tração aos 28 dias (figura 7.12) onde, quanto maior a relação a/agl , menor a resistência relativa do concreto.

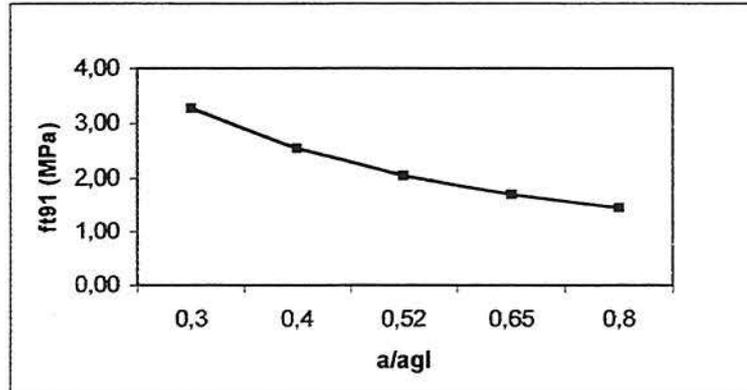


FIGURA 7.16 Influência da relação água/aglomerante na resistência à tração aos 91 dias.

A figura 7.17 apresenta a influência isolada da idade da escória na resistência à tração, aos 91 dias.

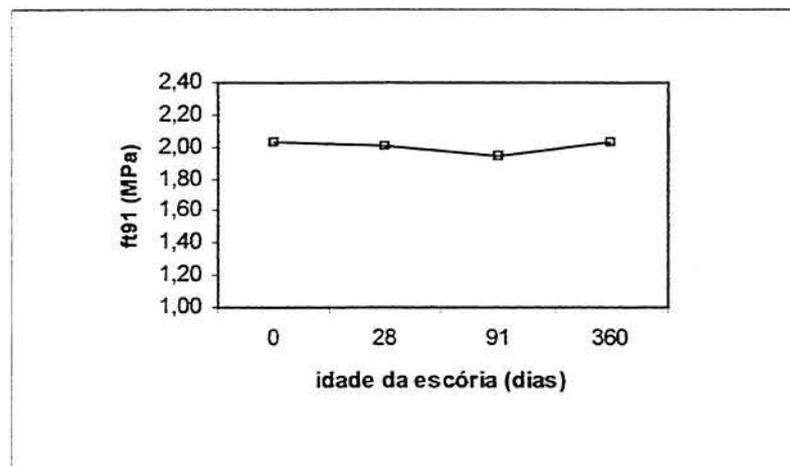


FIGURA 7.17 Influência da idade da escória na resistência à tração aos 91 dias.

Na figura 7.18 observa-se a mesma tendência da figura 7.14 onde, para concretos mais densos (baixas relações a/agl), o teor de adição tem menor influência na resistência do concreto gerado.

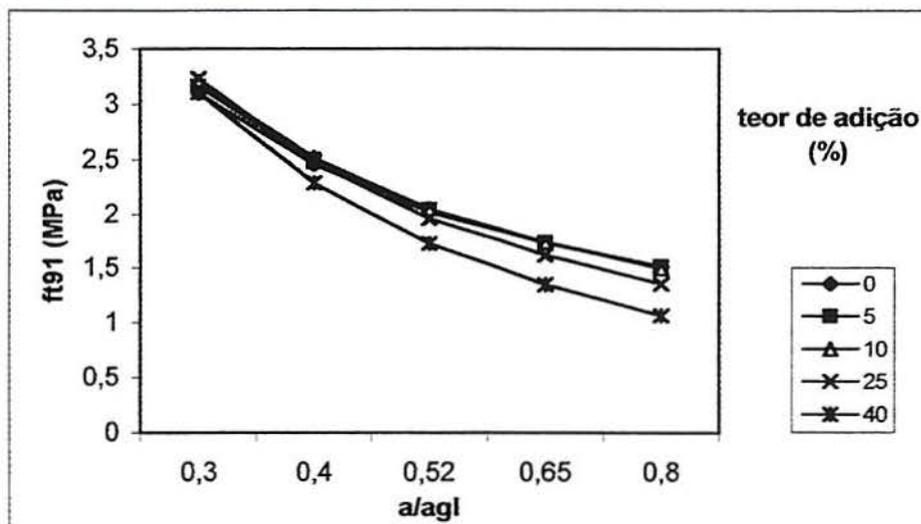


FIGURA 7.18 Influência da adição e da relação água/aglomerante na resistência à tração aos 91 dias.

7.6 MÓDULO DE DEFORMAÇÃO E COEFICIENTE DE POISSON

O módulo de deformação é dado pela expressão:

$$E = (\sigma_f - \sigma_a) / (\varepsilon_f - \varepsilon_a)$$

Onde:

σ_f = Tensão correspondente a 30% a 40% da tensão de ruptura;

σ_a = Tensão correspondente à deformação específica de 50×10^{-6} ;

ε_f = Deformação específica correspondente à tensão σ_f (30% a 40% da tensão de ruptura);

ε_a = Deformação específica de 50×10^{-6} .

Nota: a NBR 8522 considera que a tensão inicial de ensaio seja de 0,5 MPa e a velocidade de carga do ensaio de $0,5 \pm 0,05$ MPa/s.

Os resultados brutos do módulo de deformação encontram-se no anexo E e a regressão linear múltipla obtida (anexo C) foi a seguinte:

$$E_{28a} = 56,153 - 0,998828 \cdot ad - 2,57184 \cdot ad^2 - 103,974 \cdot acr + 69,7245 \cdot acr^2 \quad (\text{eq. 5})$$

$$r^2 = 93,4 \%$$

onde: E_{28a} = módulo de deformação determinado aos 28 dias da moldagem dos corpos-de-prova;

ad = teor de adição - codificado segundo tabela 7.8;

acr = relação água/aglomerante;

r^2 = coeficiente de determinação.

O teor de adição e a relação a/agl influenciaram significativamente o módulo de deformação do concreto gerado com esta escória, como observa-se na equação 5.

Os resultados médios encontram-se no anexo E e as curvas geradas, após tratamento estatístico pelo software statgraphics, estão nos gráficos das figuras 7.19 e 7.20.

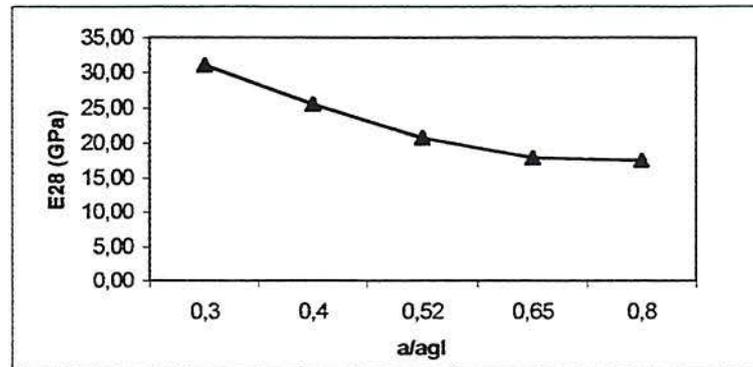


FIGURA 7.19 Efeito isolado da relação a/agl no módulo de deformação do concreto gerado com escória.

Para o módulo de deformação do concreto determinado aos 28 dias da data de moldagem (figura 7.19), observa-se que a relação a/agl influenciou significativamente os resultados. Conforme a bibliografia (MEHTA & MONTEIRO, 1994 e ALMEIDA, 1990), o que rege o módulo de deformação é basicamente o agregado. Como o agregado utilizado em todos os corpos-de-prova foi o mesmo, a influência ficou apenas com a relação a/agl, que quanto maior, menor o módulo.

Na figura 7.20 tem-se o efeito isolado do teor de adição no módulo de deformação do concreto. Neste caso observa-se uma queda no valor do módulo para uma adição de 40%. As demais adições resultaram em valores ligeiramente superiores em relação ao testemunho.

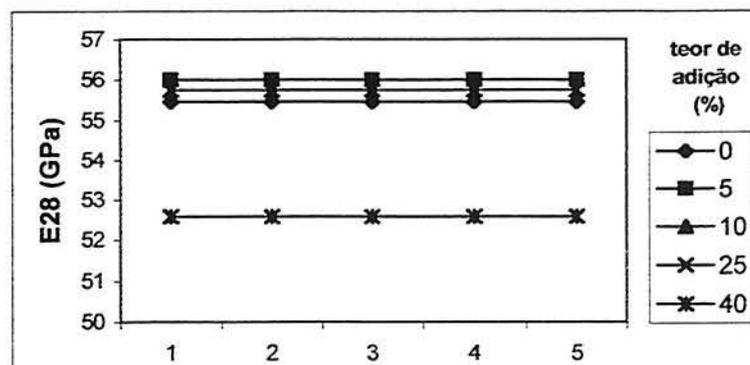


FIGURA 7.20 Efeito isolado do teor de adição no módulo de deformação do concreto gerado com escória.

O coeficiente de Poisson é dado pela relação entre as deformações específicas transversais e longitudinais medidas durante o ensaio.

O coeficiente de Poisson (μ) é dado pela seguinte expressão:

$$\mu = (\epsilon_{tf} - \epsilon_{ti}) / (\epsilon_{lf} - \epsilon_{li}) * e$$

onde:

μ = coeficiente do Poisson

ϵ_{tf} = deformação transversal específica final (30% a 40%) da tensão de ruptura.

ϵ_{ti} = deformação transversal específica inicial (com tensão a 0,5MPa, conforme NBR 8522).

ϵ_{lf} = deformação longitudinal específica final (30% a 40%) da tensão de ruptura.

ϵ_{li} = deformação longitudinal específica inicial (com tensão a 0,5MPa, conforme NBR 8522).

e = correção da excentricidade para extensômetro mecânico tipo compressômetro-expansômetro. Para o utilizado nos laboratórios de Furnas tem-se $e=0,327$.

Os valores médios do coeficiente de Poisson determinado para o material estudado encontram-se na tabela 7.10 e os resultados brutos estão no anexo E.

TABELA 7.10 Valores médios dos coeficientes de Poisson obtidos.

adição	0%	5%	10%	25%	40%
a/agl	Testemunho				
0,30	0,17		0,17		0,16
0,40		0,16		0,14	
0,52	0,16		0,14		0,16
0,65		0,18		0,18	
0,80	0,11		0,12		0,14

O coeficiente de Poisson, para todas as adições e todos os fatores a/agl estudados, manteve-se dentro dos limites de variação normais, que é entre 0,16 e 0,20, com valor extremo aceitável de 0,11 (FURNAS, 1997), não tendo sido possível modelar estatisticamente o seu comportamento.

7.7 PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

A regressão múltipla (equação 6) determinada para os ensaios dos corpos-de-prova mostrou que a carbonatação é influenciada pelo teor de adição, pela relação a/agl e pela interação entre o teor de adição com a relação a/agl, como pode ser observado no modelo de regressão linear múltipla determinado pelo programa statgraphics.

$$\text{Carb150} = -1,45172 - 0,824316 * \text{ad} + 6,78958 * \text{acr} + 2,51763 * \text{ad} * \text{acr} \quad (\text{eq. 6})$$

$$r^2 = 81,7 \%$$

Onde: Carb150= carbonatação em corpos-de-prova com idade de 150 dias;

ad= teor de adição, codificado segundo tabela 7.8;

acr= relação água/aglomerante;

r^2 = coeficiente de determinação.

Nos ensaios preliminares, o concreto com 5% de adição de escória (material passante na peneira #200- 5%F) ficou com profundidades de carbonatação, após 210 dias de sua moldagem, de menos de 1mm (figura 4.6). O testemunho teve a profundidade média de 4mm e o com 35%F de adição ficou igual ao testemunho.

Na influência isolada do teor de adição na profundidade de carbonatação do concreto (figura 7.21) observa-se com clareza que, quanto maior a adição, maior a profundidade de carbonatação. Nota-se também que a partir dos 10% de adição a declividade da curva aumenta.

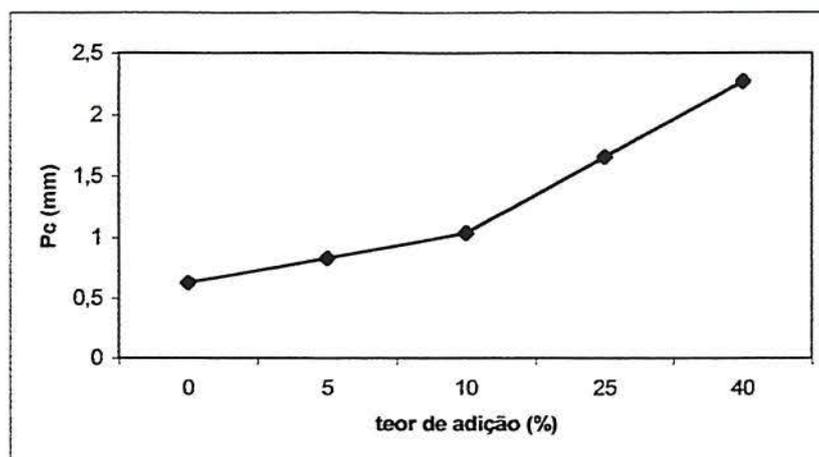


FIGURA 7.21 Influência isolada do teor de adição na profundidade de carbonatação em corpos-de-prova com idade de 150 dias.

A bibliografia mostra que a profundidade de carbonatação diminui com o aumento da quantidade de cimento por metro cúbico de concreto, logo, quanto maior a relação água/cimento, maior será a porosidade e permeabilidade de um concreto. Quanto maior a porosidade mais facilmente o CO_2 pode difundir através do concreto aumentando assim a profundidade carbonatada do mesmo (FIGUEIREDO et al., 1993). O que pode ser observado no gráfico da figura 7.22 que mostra a influência isolada da relação a/agl na profundidade de carbonatação do concreto.

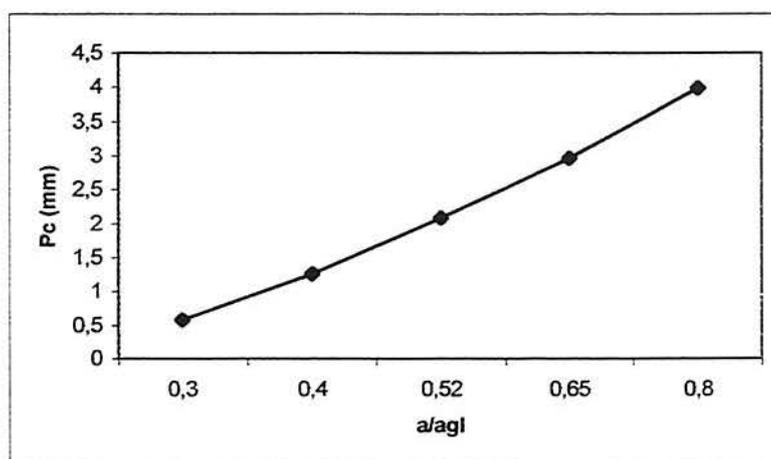


FIGURA 7.22 Influência isolada da relação a/agl na profundidade de carbonatação em corpos-de-prova com idade de 150 dias.

Quanto maior o teor de adição e a relação a/agl, maior a carbonatação do concreto gerado por ser este um material mais poroso do que o com relação a/agl mais baixa. O que

pode ser observado na figura 7.23, onde relações a/agl mais altas (0,8) e teores de adição mais altos (40%) levam a uma profundidade de carbonatação média mais alta. Observa-se ainda nesta figura que 5% de adição, para relação a/agl de 0,8 (valores extremos), a profundidade carbonatada aumentou 8,5% em relação ao testemunho. Para 10% de adição esta profundidade aumentou 16,0%. Valores bastante baixos se comparados aos 25% e 40% de adição onde a profundidade carbonatada aumentou em média 37,0 e 49,0% respectivamente. Este fato indica que a escória pode estar agindo mais como filler, fechando os poros do concreto, do que como uma pozolana.

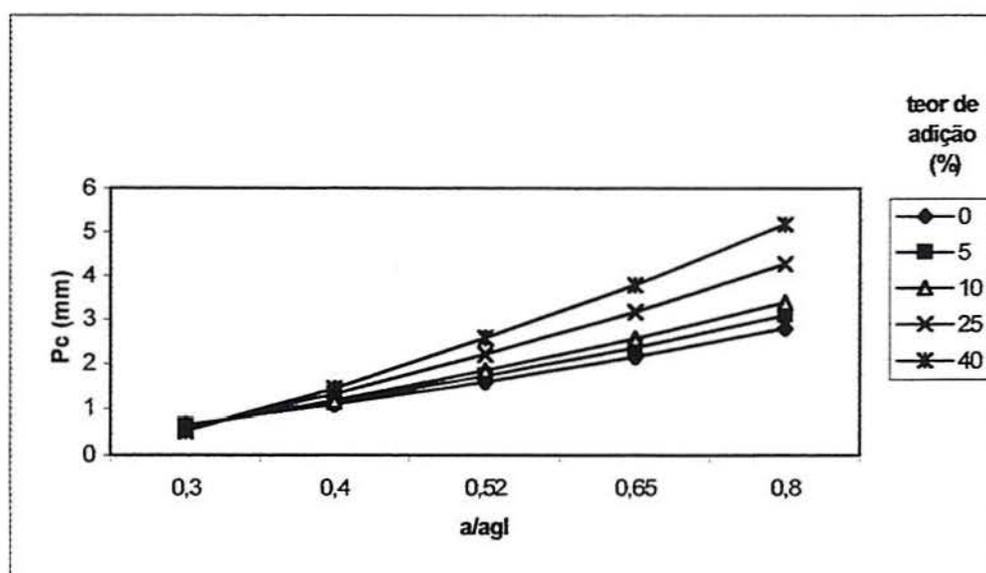


FIGURA 7.23 Influência da interação entre a relação a/agl e o teor de adição na profundidade de carbonatação em corpos-de-prova com idade de 150 dias.

Nas baixas relações a/agl o teor de adição não influencia, pois a manutenção de baixa porosidade capilar é garantida pela baixa relação a/agl .

Para a/agl maiores que 0,4, onde a porosidade capilar tende a aumentar, o aumento no teor de escória acarreta maior carbonatação, pois o material é mais poroso e a provável reação pozolânica reduz a reserva alcalina dos concretos.

7.8 ANÁLISE MICROSCÓPICA DO MATERIAL

A análise apresentada na figura 7.24 foi feita aos 28 dias de idade das pastas de cimento no Microscópio Eletrônico de Varredura, para uma escória nova, com idade de referência zero.

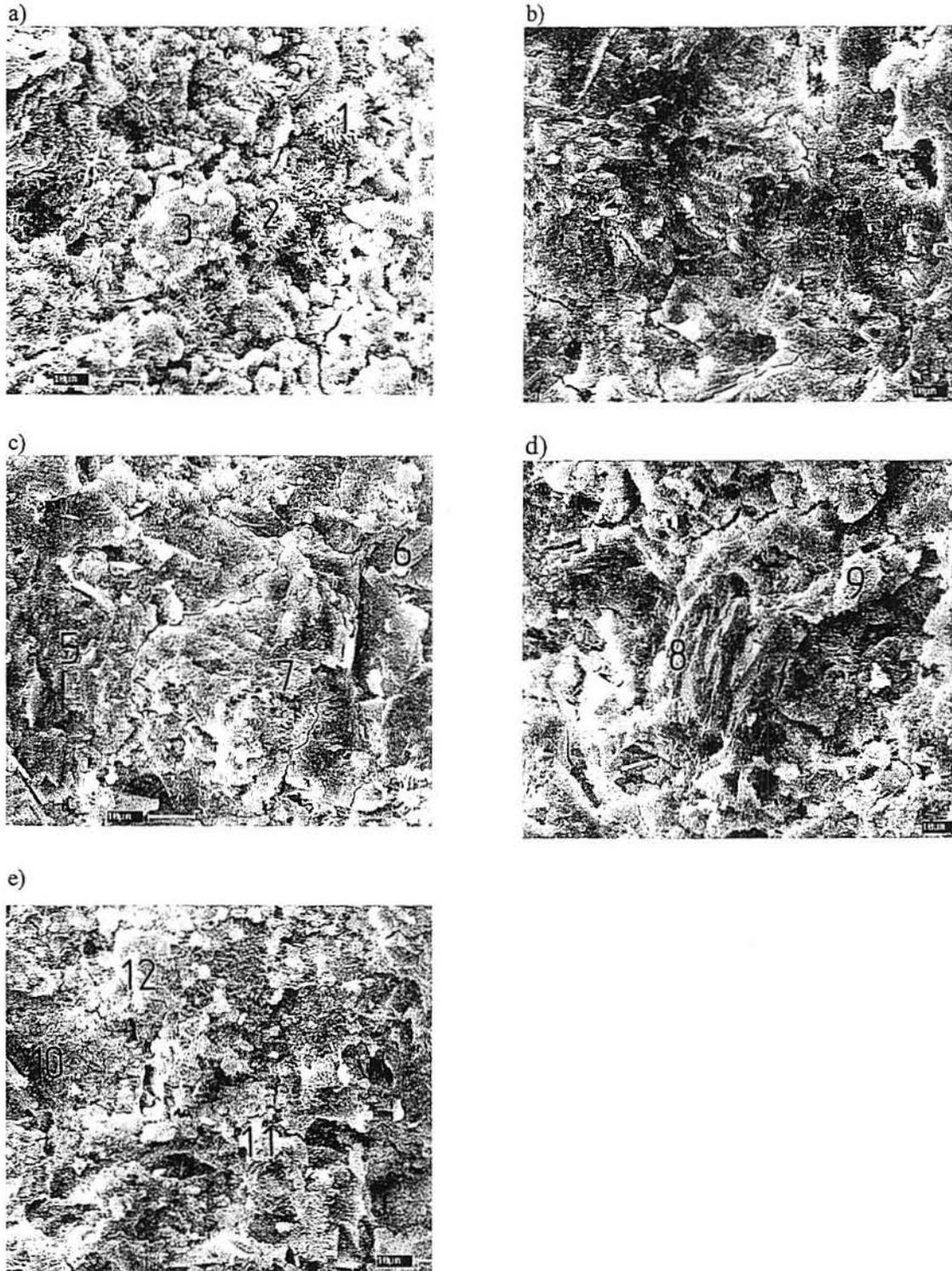


FIGURA 7.24 Pastas de cimento (a) sem escória, (b) com 5%, (c) com 10%, (d) com 25% e (e) com 40% de escória de aciaria. Análise por microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários feita aos 28 dias de moldagem. Aumento de 3000 vezes.

A microanálise realizada nestas amostras encontra-se na tabela 7.11.

TABELA 7.11 Microanálise semi-quantitativa dos pontos marcados na figura 7.24.

Localização	Pontos	Composição química (iônica) % dos elementos prováveis						
		Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe
(a)	1	0,9	9,9	9,5	0,9	74,1	-	4,7
	2	0,8	9,1	8,1	1,6	75,7	-	4,8
	3	0,2	0,8	16,9	0,3	81,4	-	0,4
(b)	4	0,3	0,6	15,6	2,9	78,5	0,6	1,5
(c)	5	0,4	6,2	7,2	1,0	83,3	-	1,9
	6	-	0,1	0,8	-	99,1	-	-
	7	2,1	5,5	16,5	0,6	72,2	-	3,1
(d)	8	0,4	1,5	6,5	0,5	89,9	0,2	1,0
	9	1,3	0,7	6,1	0,2	66,2	2,4	13,2
(e)	10	0,1	0,3	2,1	0,1	96,9	0,4	0,2
	11	5,7	26,0	16,3	0,6	49,0	0,5	1,0
	12	11,3	10,3	14,7	0,6	60,8	1,2	0,6

Nota-se que a presença da escória provoca um fechamento na estrutura, dificultando a identificação das formas dos grãos, na comparação com a pasta de cimento puro ((a)- figura 7.24).

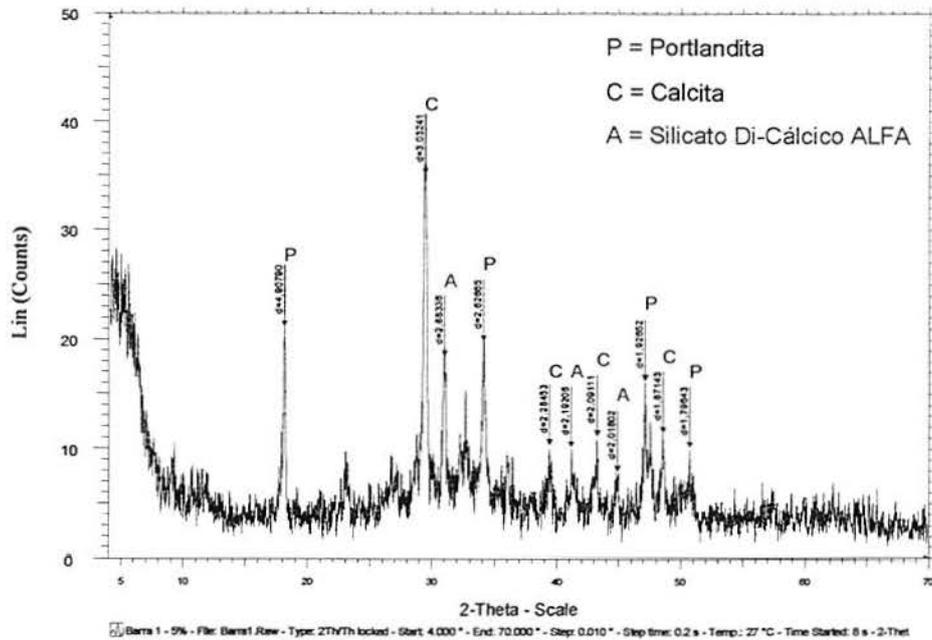
Nota-se também a presença de microfissuras nas micrografias com presença de escória, o que poderia estar indicando a presença do fenômeno de expansão, não podendo ser descartada a hipótese de que essas microfissuras sejam oriundas da própria preparação da amostra.

Percebe-se a presença de altas relações Ca/Si no ponto 10 da micrografia (e), no ponto 8 da (d) e no ponto 6 da (c), podendo servir, por exemplo, como fator indicativo da presença possível de cal livre, isto é, quanto maior esta relação maior a tendência da presença de cal livre.

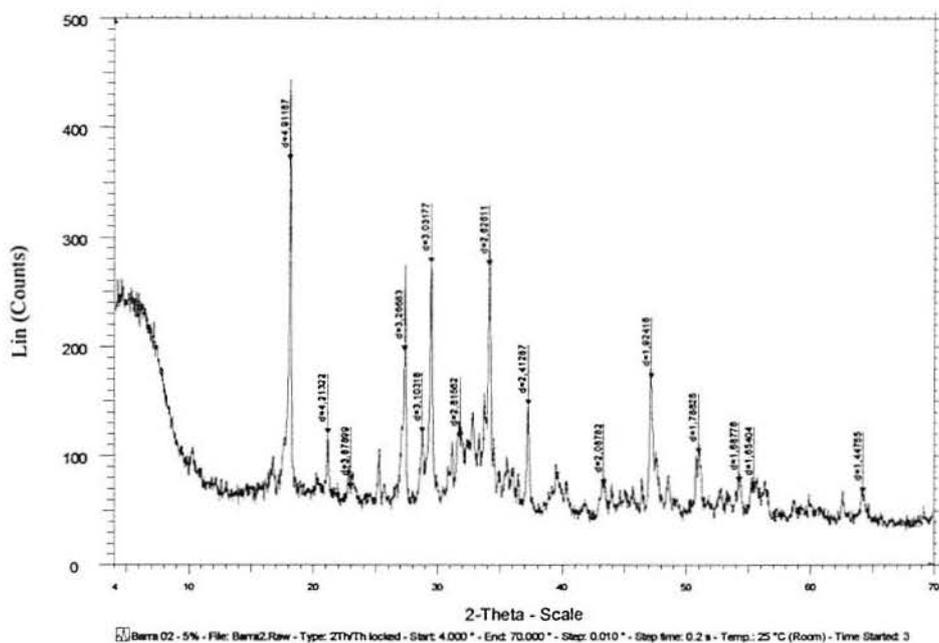
Como os resultados aqui não são precisos, não foi possível identificar diferenças significativas e as diferenças encontradas não são conclusivas. A literatura na área é carente de dados para efeitos comparativos.

7.9 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

Nas figuras 7.25 a 7.28 tem-se resultados de difração de raios X para amostras com adições de 5%, 10%, 25% e 40% de escória de aciaria antes e depois de terem sido submetidas ao ensaio de autoclave. Ensaios realizados no Centro Tecnológico de Engenharia Civil de Furnas Centrais Elétricas S. A.

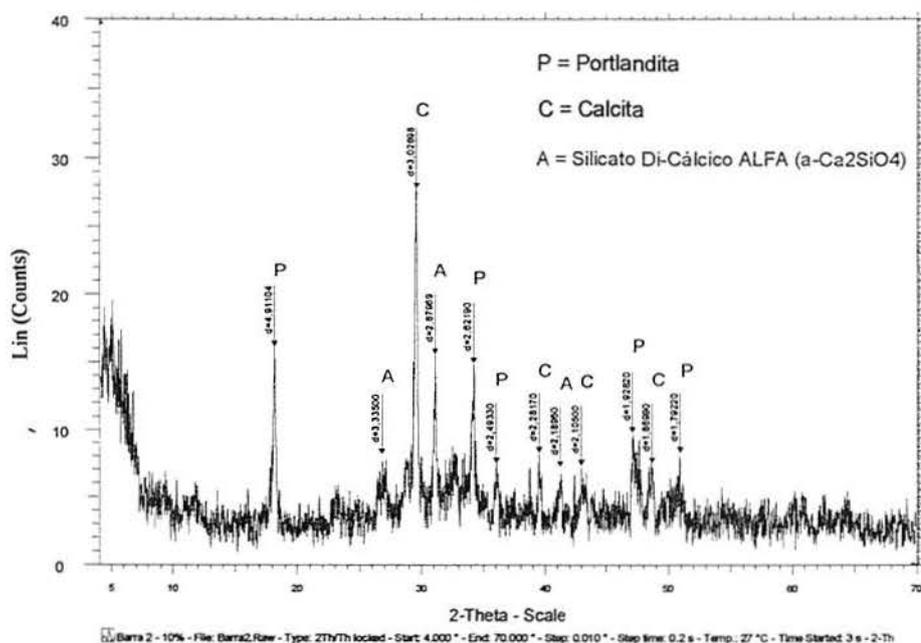


(a)

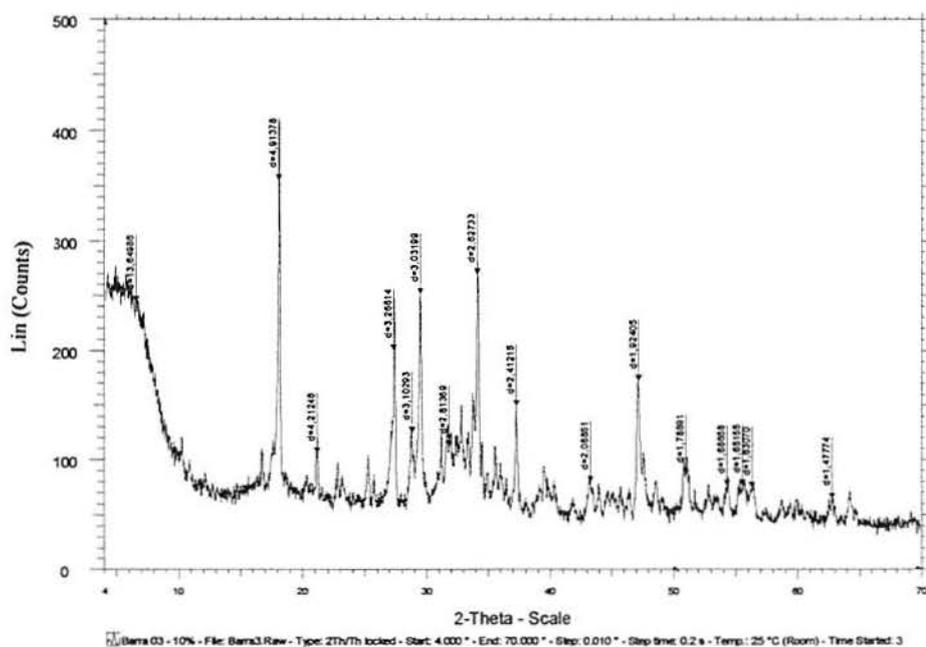


(b)

FIGURA 7.25 Difração de raios X para uma amostra com adição de 5% de escória de aciaria, depois (a) e antes (b) de ser submetida à autoclave.

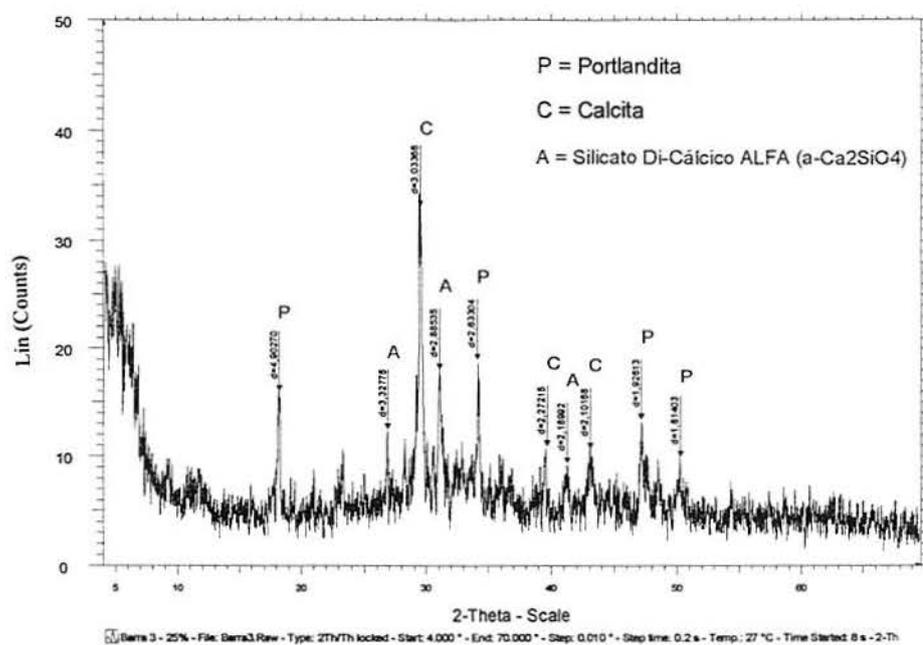


(a)

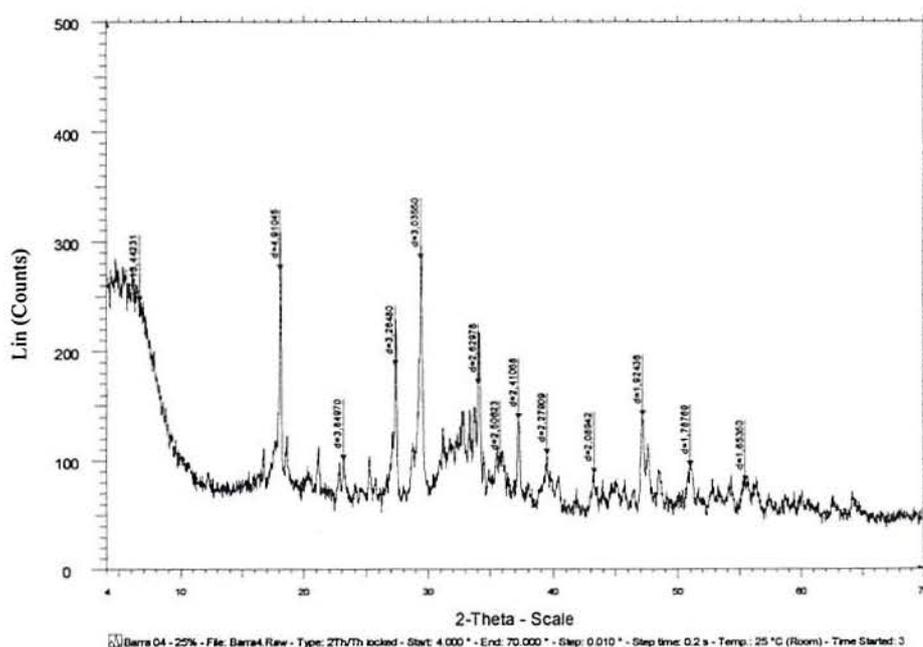


(b)

FIGURA 7.26 Difração de raios X para uma amostra com adição de 10% de escória de aciaria, depois (a) e antes (b) de ser submetida à autoclave.

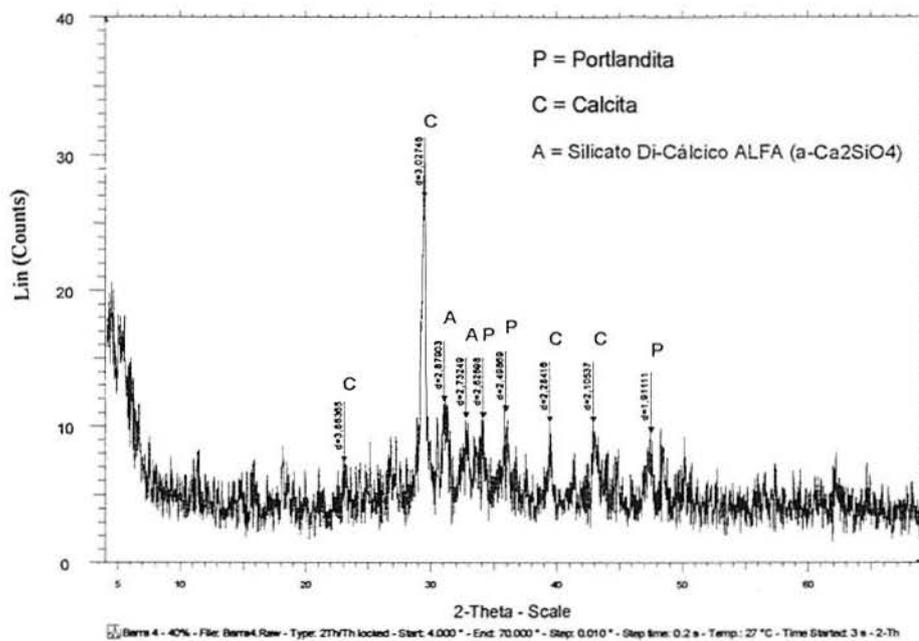


(a)

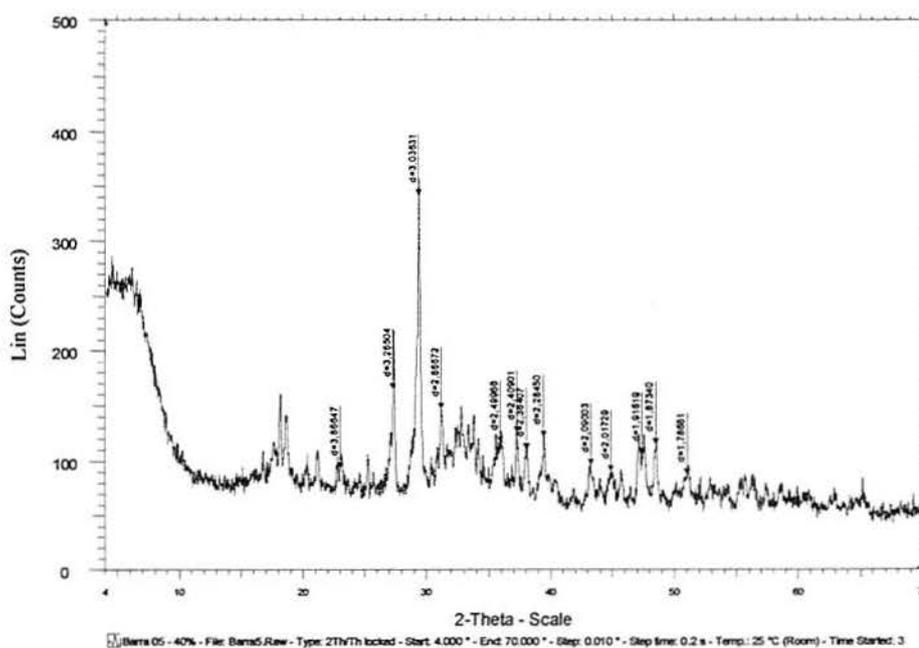


(b)

FIGURA 7.27 Difração de raios X para uma amostra com adição de 25% de escória de aciaria, depois (a) e antes (b) de ser submetida à autoclave.



(a)



(b)

FIGURA 7.28 Difração de raios X para uma amostra com adição de 40% de escória de aciaria, depois (a) e antes (b) de ser submetida à autoclave.

A seqüência, depois da autoclave, mostra a redução da presença de portlandita com a adição de escória, como pode ser visto pela diminuição do pico em $d=4,91$.

A seqüência antes da autoclave mostra a mesma tendência, porém não tão acentuadamente.

		Teor de adição (%)			
		5	10	25	40
Altura do pico $d= 4,91$	Antes	360-70= 290	350-70=280	260-70=190	150-70=80
	Depois	22-5= 17	17- 3= 14	16- 4= 12	0

CaO livre $d=2,41$ (MONTGOMERY e WANG, 1991) antes da autoclave desaparece depois de submetida à autoclave para adições de 5, 10 e 25%. A 40% este composto não é detectado, mesmo antes da autoclave.

Para identificação de constituintes expansivos típicos das pastas de escória citados na bibliografia com auxílio das técnicas de DRX aliada ao MEV, primeiro calcula-se qual a massa molar do composto e depois verifica-se nos pontos marcados no MEV a existência destes compostos. Dentre os elementos pesquisados tem-se o silicato di-cálcico α ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), a portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), a etringita ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), o periclasio (MgO) e a calcita (CaCO_3). Nos pontos marcados neste trabalho não foi possível a identificação de nenhum destes compostos com exatidão.

8 AVALIAÇÃO DA CORROSÃO DE ARMADURAS EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO

Em virtude dos resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação realizados em corpos-de-prova de concreto com escória de aciaria elétrica, onde constatou-se que quanto maior a adição de escória, maior a profundidade de carbonatação, o que pode levar à corrosão das armaduras no concreto armado, procurou-se determinar a real influência desta escória no processo de corrosão das armaduras inseridas no concreto.

Como a corrosão de armaduras está entre as patologias de maior ocorrência no concreto armado, afirmação constatada nacionalmente por ARANHA (1993) e ANDRADE (1994) e internacionalmente por MEHTA e MONTEIRO (1994), vale a pena aprofundar o estudo nesta área.

Para auxiliar na avaliação da durabilidade do concreto gerado com os diferentes teores de adição de escória de aciaria, foram realizados ensaios de potencial de corrosão e resistividade elétrica, resistência de polarização e resistência ôhmica em vigas de concreto armado, complementados pelo controle da profundidade de carbonatação, de acordo com o esquema da figura 8.1.

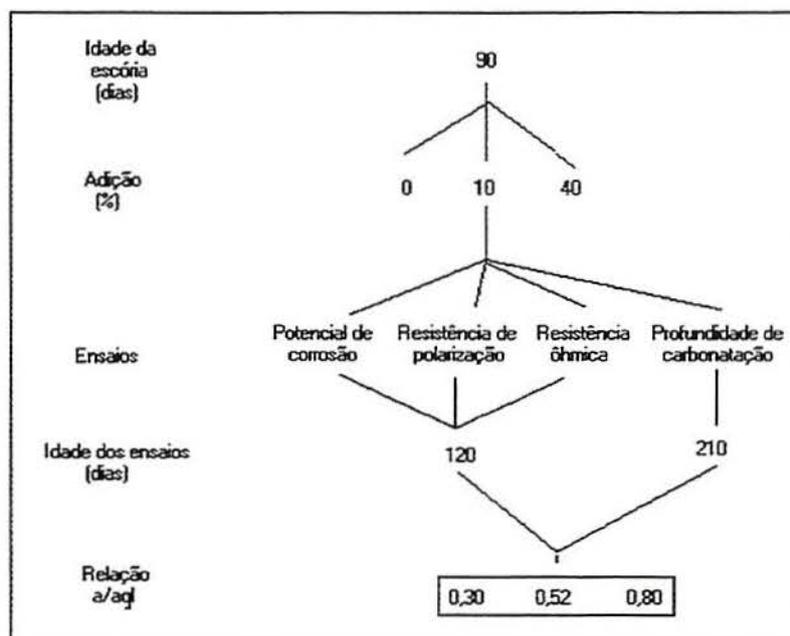


FIGURA 8.1 Esquema de execução dos ensaios realizados com as vigas de concreto armado.

8.1 VARIÁVEIS ANALISADAS

As vigas de concreto armado foram moldadas variando-se a relação água/aglomerante e o teor de adição de escória de acordo com a tabela 8.1. Procurou-se avaliar o teor extremo de adição utilizado para os demais ensaios, que foi de 40% e também a adição de 10%, já que para os ensaios da etapa complementar apontou melhorias nos concretos gerados com esta adição. Adotou-se também as relações a/agl mínima e máxima utilizada para os demais ensaios. Moldou-se também uma viga testemunho, sem adição, para cada relação a/agl.

TABELA 8.1 Variação da relação água/aglomerante e da adição de escória nos concretos utilizados nas vigas

A/agl	ADIÇÃO		
	0%	10%	40%
0,30	VIGA 1	VIGA 2	VIGA 3
0,52	VIGA 4	VIGA 5	VIGA 6
0,80	VIGA 7	VIGA 8	VIGA 9

8.2 MATERIAIS UTILIZADOS E PROPORCIONAMENTO DO CONCRETO

O proporcionamento dos concretos, assim como os materiais utilizados nesta etapa foram os mesmos já descritos no capítulo 6.

8.3 PRODUÇÃO E PREPARO DOS CORPOS-DE-PROVA

Foram moldadas nove vigas de concreto cujas dimensões podem ser verificadas na figura 8.2, sendo armadas com quatro barras longitudinais e cinco estribos igualmente distribuídos. O cobrimento utilizado foi de 1,5cm. As armaduras foram feitas utilizando-se o aço CA-50 A para as barras longitudinais de 8.0mm e aço CA-60 B para os estribos de 4.2mm.

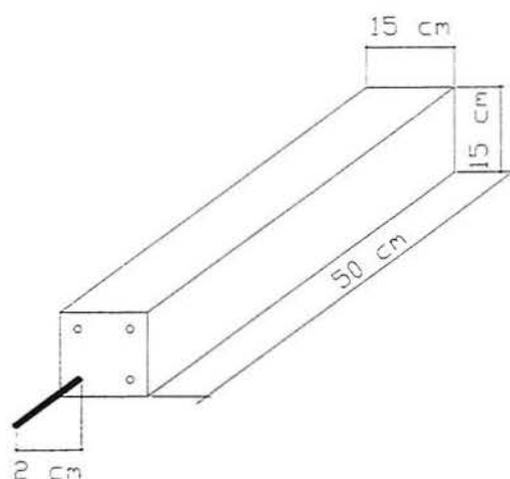


FIGURA 8.2 Detalhe da viga de concreto armado (GEYER et al, 1999).

A limpeza das barras de aço foi feita pelo método da ASTM G1 (1990), de acordo com o seguinte processo:

- As barras são imersas em solução 1:1 de água destilada e ácido clorídrico 37% e 3g/l de hexametilenotetramina por 2 minutos;
- Retiram-se as barras de aço da solução e em seguida esfregam-se de forma enérgica com escova de cerdas de nylon por 1 minuto;
- Logo após, enxaguam-se as barras em água abundante para remover parte da sujeira;
- Para completar a limpeza, as barras são imersas novamente na solução ácida;
- Enxaguam-se as barras novamente em água abundante;
- Para acelerar o processo de secagem, mergulham-se as barras em uma proveta contendo acetona;
- Finalmente as barras são colocadas para secar.

8.4 MÉTODOS DE ENSAIO

Para a realização dos ensaios de potencial de corrosão e resistividade elétrica as vigas foram submetidas a ciclos de molhagem e secagem em solução de cloreto de sódio, de acordo com o descrito a seguir.

a) Ciclos de molhagem e secagem

Os ciclos de molhagem e secagem consistiram em se colocar as vigas de concreto armado em um meio propício à corrosão (solução de cloretos). O ciclo apresentou duas etapas: uma etapa em que as vigas ficavam dois dias imersas na solução e após este período efetuava-se a medição dos potenciais de corrosão. Em outra etapa as vigas eram postas em condições ambientais durante cinco dias, sendo feita a medição após este prazo. Repetia-se

o ciclo, sempre em condições de laboratório, à temperatura ambiente. Foram realizados 21 ciclos.

b) Preparação da solução com NaCl (Cloreto de Sódio)

A solução de NaCl (cloreto de sódio) foi preparada em uma caixa d'água de 500 litros de capacidade, com 2% de adição de NaCl, sendo que as vigas foram imersas na solução deixando uma borda livre de 5cm. Sempre que necessário o nível desta solução era completado.

8.4.1 Potencial de corrosão e resistividade elétrica

A avaliação de desempenho anti-corrosivo do concreto com adição foi feita utilizando-se técnica eletroquímica, com determinação de potenciais de corrosão e ensaios de carbonatação.

Neste trabalho, o equipamento utilizado para a determinação do potencial de corrosão, intensidade de corrosão (resistência de polarização) e a resistência ôhmica foi o GECOR6 (GEOCISA, 1993) (FOTO 8.1).

À esquerda da foto 8.1 tem-se a viga sendo ensaiada. Ao centro está o aparelho e à direita da foto a caixa que torna o aparelho portátil, podendo ser utilizado em obras de concreto armado. Como pode ser observado nesta foto, um dos polos do equipamento é conectado à barra da armadura que ficou exposta no momento da moldagem das vigas e o outro polo conecta-se ao equipamento. A passagem de corrente entre um eletrodo e outro é o parâmetro que mede as variáveis analisadas, explicado esquematicamente na figura 8.3.



FOTO 8.1 GECOR6 – aparelho utilizado para realizar leituras eletroquímicas nas vigas de concreto.

Este equipamento tem a configuração esquemática conforme a figura 8.3. O que se faz é um registro, em alguns locais previamente determinados da estrutura, de uma diferença de potencial (ddp) verificada entre duas semicélulas: a semicélula aço/concreto (eletrólito) e a semicélula estável que é o eletrodo de referência. Pode-se dizer, então, que o eletrodo de referência exerce o papel de detectar a presença das linhas de corrente que se verificam quando há um processo eletroquímico de corrosão nas armaduras. Sendo assim, nos locais por onde passam essas linhas de corrente (entre as regiões anódicas e catódicas) os potenciais registrados pelo milivoltímetro tendem a ser mais eletronegativos do que nos locais passivados, sem corrosão. Esses locais com característica de maior eletronegatividade indicam, portanto, a presença de zonas ativas de corrosão nas barras.

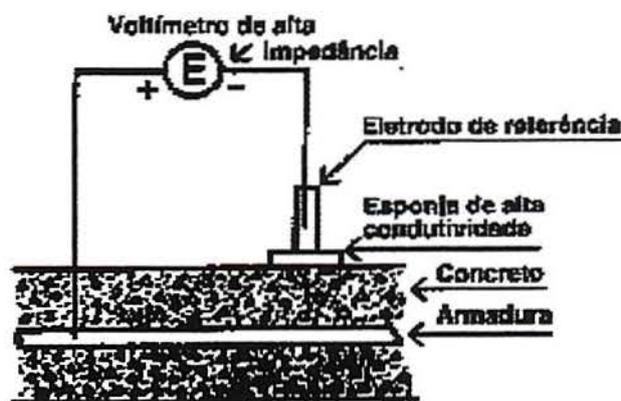


FIGURA 8.3 Esquema para medição dos potenciais de corrosão (CASCUDO, 1997).

O equipamento básico para medição dos potenciais eletroquímicos é o seguinte:

- Voltímetro de alta impedância de entrada (não inferior a 10 Mohms), com resolução a nível de milivolts;
- Eletrodo de referência (o utilizado com o equipamento GECOR6 é o de cobre/sulfato de cobre)

Além destes, os seguintes acessórios são necessários:

- Esponja de alta condutividade (esponja umidecida em uma solução, destinada a melhorar a condutividade elétrica entre o eletrodo de referência e a superfície do concreto; na prática esse líquido é uma solução contendo detergente na proporção de 4 a 5 ml por litro de água potável);
- Conexões elétricas (fiação) adequadas, as quais não devem exceder 150 metros lineares e devem ser, pelo menos, de número 24 AWG (*American Wire Gage*, escala de classificação de condutores).

A figura 8.3 mostra como é possível a obtenção dos potenciais eletroquímicos no concreto. Desta configuração é importante notar que o pólo negativo do milivoltímetro

deve ser conectado ao eletrodo de referência e o pólo positivo a um ponto da armadura. Para tanto é necessário expor parte desta armadura, a fim de que se possa fazer a devida conexão elétrica.

Por isso, neste ensaio, as vigas são moldadas de acordo com a figura 8.2, deixando exposta parte da armadura principal.

Vale salientar também que o eletrodo de referência é móvel e pode ser colocado em diversos locais da superfície do elemento estrutural, enquanto o voltímetro registra os diferentes potenciais de acordo com a posição do referido eletrodo e com as condições da armadura no interior do concreto (se em estado ativo de corrosão ou se passivada). Nesse sentido, é cabível ressaltar o papel da esponja de alta condutividade previamente descrita cuja utilização faz-se necessária porque é preciso estabelecer um meio condutor entre a extremidade do eletrodo de referência (placa porosa) e a superfície do concreto.

A corrosão das armaduras no concreto, com descrição detalhada da corrosão eletroquímica em meio aquoso, pode ser encontrada em CASCUDO (1997).

8.4.1.1 Potencial de corrosão

Potencial de equilíbrio é o que se estabelece a partir de uma situação de equilíbrio entre duas tendências: a dos átomos metálicos, em deixar o metal e passar para a dissolução, ionizando-se e hidratando-se e a dos cátions, em depositar-se sobre o metal. A esse equilíbrio dinâmico é correspondido uma densidade de corrente de intercâmbio equivalente à velocidade de dissolução anódica ou de depósito de cátions.

A utilização da medida do potencial de corrosão tem a vantagem de ser uma técnica não destrutiva e de fácil aplicação, não sendo necessário o emprego de aparelhos caros e sofisticados (sua leitura pode ser feita com um simples Multímetro) porém, apresenta a desvantagem de apenas fornecer uma idéia relativa e aproximada do processo de corrosão instalado sobre a armadura, ou seja, do seu registro não se obtém nenhum dado quantitativo da cinética da corrosão.

A medida do potencial de corrosão da armadura consiste no registro da diferença de voltagem entre a armadura e um eletrodo de referência, que é colocado em contato com a superfície do concreto.

8.4.1.2 Resistência de polarização I_{corr} (Intensidade de Corrosão)

A resistência de polarização (R_p) representa a inércia que o sistema possui em desenvolver um processo de transferência de carga elétrica, isto é, um processo eletroquímico de corrosão. Sendo assim, um sistema aço/concreto passivado apresenta R_p muito maior do que aquele onde há atividade corrosiva. A polarização ocorre aplicando-se sinais em forma de potencial (ΔE) e registrando-se o incremento de corrente (ΔI). A resistência de polarização é definida como sendo o quociente entre os incrementos de potencial e corrente ($R_p = \Delta E / \Delta I$); na curva potencial versus corrente, ela é a declividade da reta em torno do potencial de corrosão.

A velocidade ou intensidade instantânea de corrosão (I_{corr}) é obtida a partir da resistência de polarização através da fórmula de STERN, GEARY apud FIGUEIREDO, 1994.

$$i_{corr} = B/R_p$$

Onde:

B- é a constante que varia em função das características do sistema metal/meio e que dificilmente abandona o intervalo entre 13 e 52 mV;

R_p - Resistência de polarização ($\Delta E / \Delta I$).

Ao dividir a intensidade de corrosão, I_{corr} , pela área efetiva de estudo "A", obtém-se a densidade de corrosão, i_{corr} .

$$i_{corr} = B / (R_p \cdot A)$$

Onde:

i_{corr} é obtida em $\mu A/cm^2$;

B é dado em mV;

R_p é dada em $K.\Omega$;

A é dada em cm^2 .

8.4.1.3 ROHM (Resistência Ôhmica)

Rohm é a resistência ôhmica entre a armadura de estudo e o eletrodo de referência dos equipamentos que a medem, neste caso o GECOR6, e é expressa em ohm Ω .

8.4.2 Profundidade de carbonatação

A medida de profundidade de carbonatação das vigas foi realizada quando elas estavam com 210 dias de idade, tendo sido mantidas em ambiente de laboratório.

O procedimento de execução deste ensaio seguiu as recomendações do RILEM CPC-18 (1988), descrito no item 6.5.6 deste trabalho.

8.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

8.5.1 Potencial de corrosão e resistividade elétrica

8.5.1.1 Potencial de corrosão

A norma americana ASTM C876 apresenta uma correlação entre intervalos de diferença de potencial (E_{corr}), em relação a um eletrodo de referência de Cu/SO_4Cu , e a probabilidade de ocorrência de corrosão. Estes valores são mostrados na tabela 8.2.

TABELA 8.2 Critérios de avaliação da corrosão através de medidas de potencial de corrosão, segundo a ASTM C-876.

E _{corr} (mV, Cu/SO ₄ Cu)	Probabilidade de corrosão
< -200	< 5%
Entre -200 e -350	50%
> -350	> 95%

A utilização dessa técnica possibilita a obtenção de um mapa de linhas equipotenciais, podendo ser bastante útil na identificação das regiões de caráter anódico de uma estrutura de grandes dimensões.

Das medições de potenciais de corrosão dos corpos-de-prova observa-se um comportamento aproximadamente igual em todos até o início do ciclo de molhagem e secagem em solução de NaCl. Após isto (figuras 8.4, 8.5 e 8.6) as séries com maior relação a/agl (0,52 e 0,80- vigas 4 a 9) despассивaram e sofreram início de corrosão ativa.

Observa-se, neste caso, que a adição de escória não interferiu significativamente no resultado do ensaio. O que prejudica aqui é a relação a/agl que quanto maior, maior a tendência de despассивação da armadura e conseqüente corrosão.

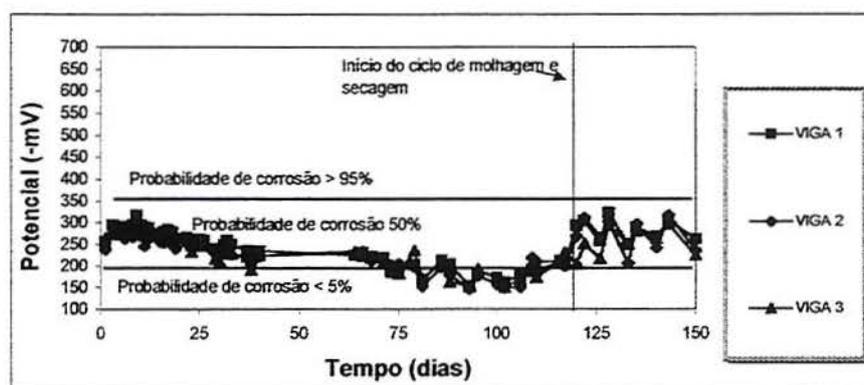


FIGURA 8.4 Potenciais de corrosão versus tempo para vigas 1, 2 e 3 que têm relação a/agl de 0,3 e 0, 10 e 40% de adição, respectivamente.

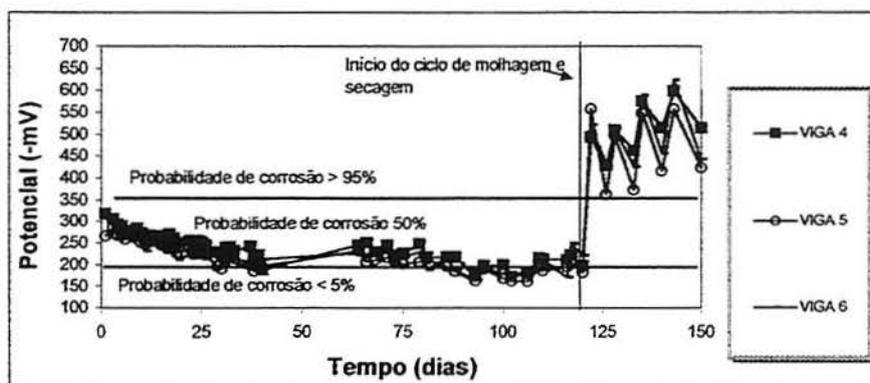


FIGURA 8.5 Potenciais de corrosão versus tempo para vigas 4, 5 e 6 que têm relação a/agl de 0,52 e 0, 10 e 40% de adição, respectivamente.

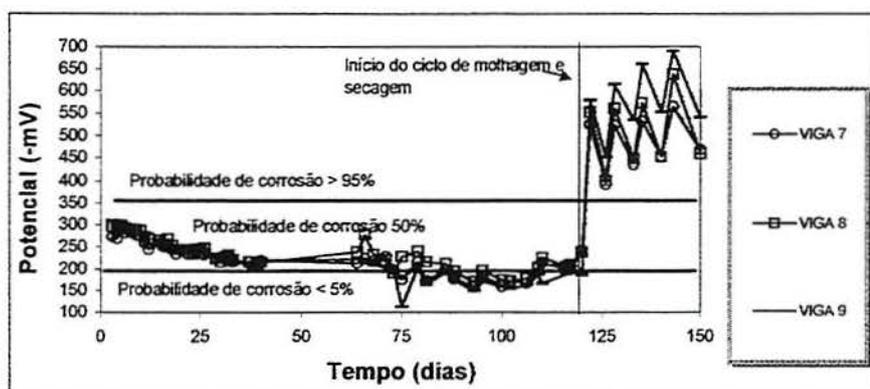


FIGURA 8.6 Potenciais de corrosão versus tempo para vigas 7, 8 e 9 que têm relação a/agl de 0,8 e 0, 10 e 40% de adição, respectivamente.

8.5.1.2 Resistência de polarização I_{corr} (Intensidade de Corrosão)

Embora não hajam ainda critérios muito definidos para relacionar a taxa de corrosão com o grau de deterioração e a importância do ataque, conforme CASCUDO, 1997, Alonso & Andrade propuseram os critérios descritos na tabela 8.3 para se avaliar a corrosão, com os dados obtidos pela técnica de resistência de polarização.

TABELA 8.3 Critérios de avaliação da velocidade de corrosão (CASCUDO, 1997).

GRAU DE CORROSÃO	TAXA DE CORROSÃO (icorr)	
	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$	$\mu\text{m}/\text{ANO}$
Desprezível	0,1 a 0,2	1,1 a 2,2
Início de corrosão ativa	> 0,2	> 2,2
Ataque importante mas não severo	~ 1,0	~ 11,0
Ataque muito importante	> 10,0	> 110,0

A intensidade (velocidade) de corrosão esteve dentro da faixa esperada para a situação observada (figura 8.7, 8.8 e 8.9). Após o início dos ciclos de molhagem e secagem em solução de NaCl, as vigas com maior relação a/agl sofreram aumento na intensidade de corrosão, como pode ser observado nas figuras 8.8 e 8.9. Novamente, para relação a/agl de 0,3 as vigas mantiveram-se com intensidade de corrosão muito baixa, mesmo após início dos ciclos (figura 8.7). Nota-se que o teor de adição não teve influência significativa na intensidade de corrosão (resistência de polarização) destas vigas, independente da relação a/agl , exceto no caso das vigas 5 e 8, com relação a/agl 0,52 e 0,80, respectivamente, ambas com teor de adição de 10%. Para relação a/agl de 0,52 esta foi a viga que mais demorou para aumentar a intensidade de corrosão. Para a relação de 0,8 ela manteve-se no nível de início de corrosão ativa, mas abaixo das vigas 7 e 9 que passaram para a região de ataque importante mas não severa de corrosão.

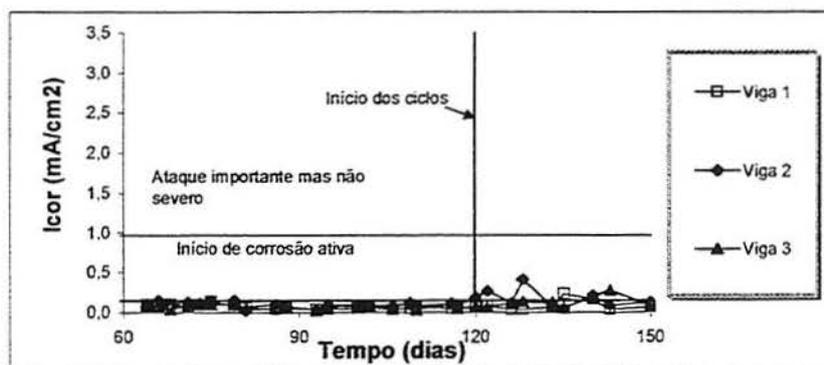


FIGURA 8.7 Intensidade de corrosão (resistência de polarização) versus tempo. Vigas 1, 2 e 3 têm relação a/agl de 0,3 e 0, 10 e 40% de adição, respectivamente.

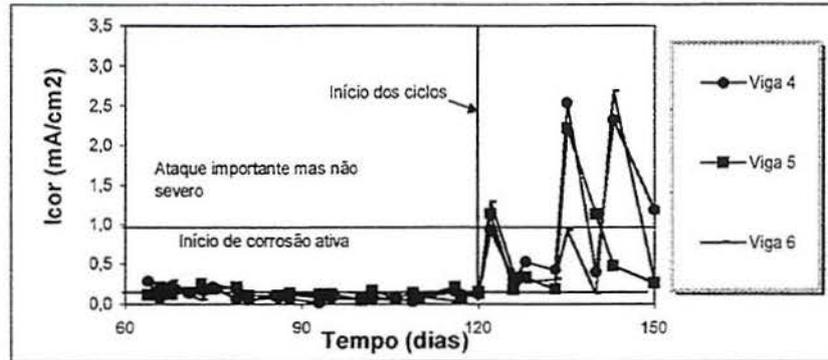


FIGURA 8.8 Intensidade de corrosão (resistência de polarização) versus tempo. Vigas 4, 5 e 6 têm relação a/agl de 0,52 e 0, 10 e 40% de adição, respectivamente.

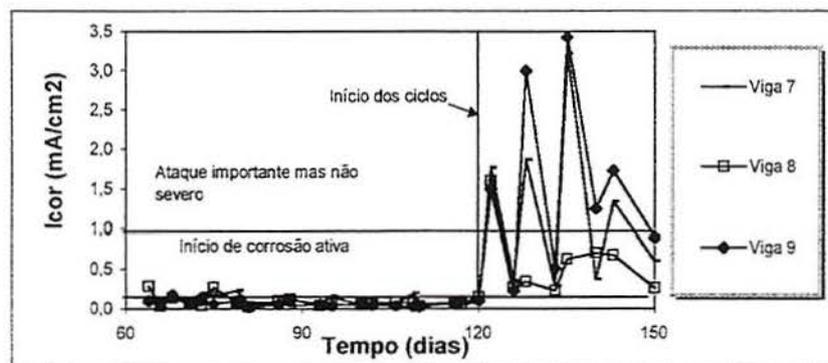


FIGURA 8.9 Intensidade de corrosão (resistência de polarização) versus tempo. Vigas 7, 8 e 9 têm relação a/agl de 0,8 e 0, 10 e 40% de adição, respectivamente.

8.5.1.3 ROHM (Resistência Ôhmica)

O Comitê Euro-International du Beton – CEB adota os parâmetros de avaliação da correlação da resistividade elétrica do concreto com o risco de corrosão relacionados na tabela 8.4, sendo estes bastante aceitos no meio técnico-científico.

TABELA 8.4 Critérios de avaliação da corrosão pela resistividade elétrica. Segundo o CEB 192.

RESISTIVIDADE DO CONCRETO	INDICAÇÃO DE PROBABILIDADE DE CORROSÃO
> 20 kohm.cm	Desprezível
10 a 20 kohm.cm	Baixa
5 a 10 kohm.cm	Alta
< 5 kohm.cm	Muito alta

A resistência ôhmica apresentou um comportamento desordenado durante o período de cura do concreto e passivação da armadura. Após o início dos ciclos (figuras 8.10, 8.11 e 8.12) nota-se a formação de uma tendência de queda da resistência ôhmica das vigas com maior relação a/agi , sem que fique claro qualquer evidência de comportamento desigual para as vigas de uma mesma série com variações de adição de escória.

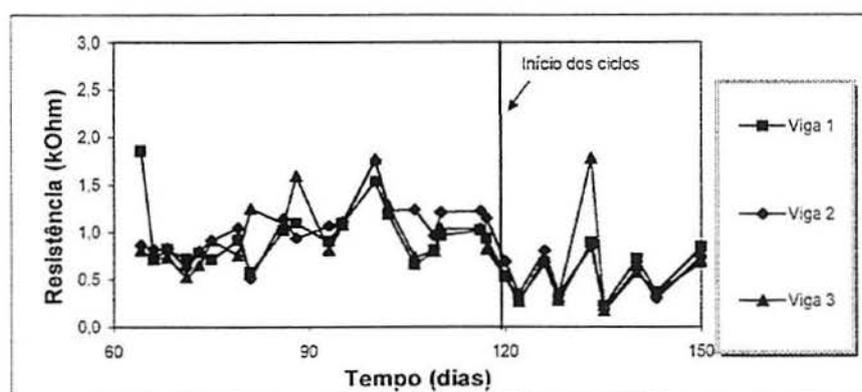


FIGURA 8.10 Resistência ôhmica versus tempo. Vigas 1, 2 e 3 têm relação a/agi de 0,3 e 0,10 e 40% de adição, respectivamente.

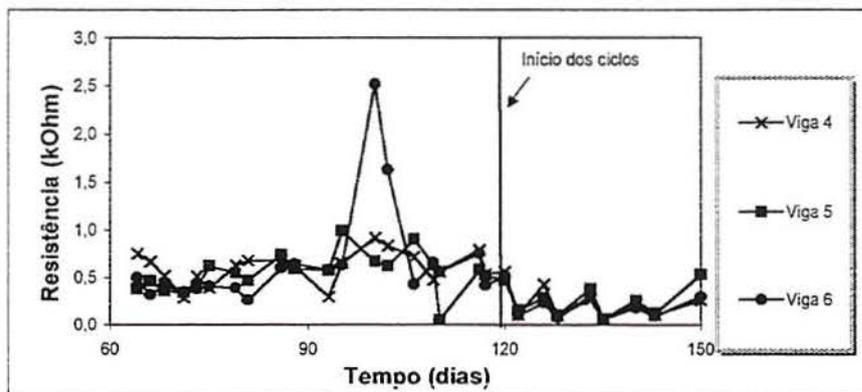


FIGURA 8.11 Resistência ôhmica versus tempo. Vigas 4, 5 e 6 têm relação a/agl de 0,52 e 0,10 e 40% de adição, respectivamente.

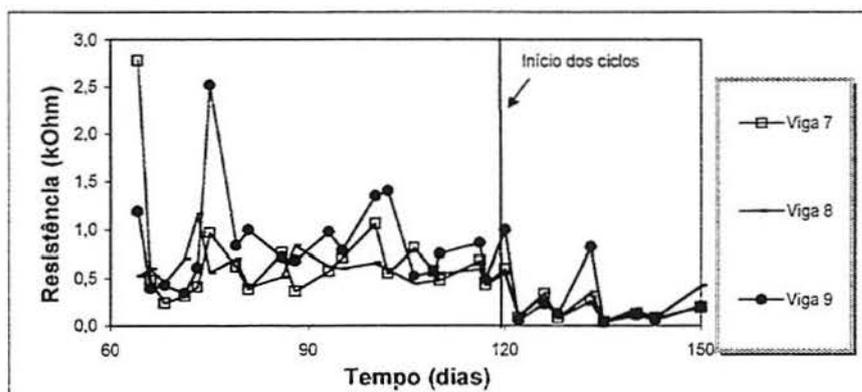
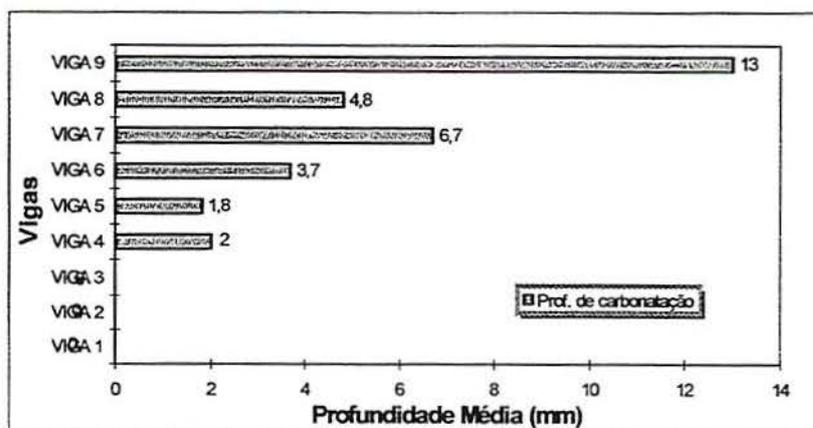


FIGURA 8.12 Resistência ôhmica versus tempo. Vigas 7, 8 e 9 têm relação a/agl de 0,8 e 0,10 e 40% de adição, respectivamente.

8.5.2 Profundidade de carbonatação

Os resultados quanto à profundidade de carbonatação nas vigas de concreto armado encontram-se na figura 8.13.



Legenda:

A/agl	ADIÇÃO		
	0%	10%	40%
0,30	VIGA 1	VIGA 2	VIGA 3
0,52	VIGA 4	VIGA 5	VIGA 6
0,80	VIGA 7	VIGA 8	VIGA 9

FIGURA 8.13 Profundidade de carbonatação em vigas de concreto armado aos 210 dias de idade.

Verificou-se na primeira série ($a/agl=0,30$ - vigas V1, V2 e V3) que não ocorreu carbonatação devido a baixa relação a/agl . Na segunda série ($a/agl=0,52$ - V4, V5 e V6) houve a carbonatação e nos corpos-de-prova com 10% de adição de escória (V5) a profundidade de carbonatação foi inferior a dos corpos-de-prova testemunho. Os corpos-de-prova com 40% de adição (V6) apresentaram profundidade de carbonatação superior aos corpos-de-prova testemunho (V4 e V7). Na terceira série ($a/agl=0,80$ - V7, V8 e V9) notou-se novamente a mesma tendência, ou seja, os corpos-de-prova com 10% de adição (V8) apresentaram profundidade de carbonatação inferior aos testemunhos (V7) e os de 40% de adição superior aos mesmos (V9) (FIGURA 8.13). Este resultado foi inesperado, já que nos ensaios complementares observou-se que, quanto maior a relação a/agl e o teor de adição, maior a profundidade de carbonatação dos concretos gerados. Neste caso observou-se uma inversão nesta tendência, pois nas vigas com 10% de adição de escória, a profundidade de carbonatação apresentou-se ligeiramente mais baixa, se comparados com as vigas testemunho.

9 CONCLUSÕES

A partir dos experimentos realizados nos chamados ensaios de viabilização e diante dos resultados complementares obtidos com a escória do forno-panela (refino redutor) da aciaria elétrica e das respectivas análises e discussões apresentadas, podem ser estabelecidas as seguintes conclusões:

1. A escória de aciaria (FEA + FP) utilizada nos ensaios de viabilização mostrou-se estabilizada e viável em adições de até 35% no concreto. Adições de até 5% melhoraram a resistência e reduziram a profundidade de carbonatação de um concreto convencional.
2. Nos ensaios complementares com a escória gerada no forno-panela, (FP) esta mostrou-se expansiva para adições de 25 e 40%, sendo crescente nos primeiros 28 dias e decrescendo lentamente até os 870 dias de sua geração, chegando mesmo a atingir limites aceitáveis para adições de 25% nesta idade. Aos 870 dias de geração desta escória os ensaios mostraram que adições de até 25% de escória apresentaram expansões de até 0,8% em autoclave, dentro do limite apontado pela norma para não danificar concretos gerados com este material.
3. Escória de aciaria utilizada nos ensaios de viabilização apresentou pozolanicidade de 69,92%. Ao se utilizar a escória unicamente do forno-panela este valor subiu para 92,53%. Portanto, acima dos 75% que caracteriza a pozolanicidade do material (NBR 11578).
4. Para confecção de concreto numa proporção de até 10% de adição de escória este material pode ser utilizado sem prejuízo à qualidade final do concreto no que diz respeito à expansibilidade, mesmo quando se usa uma escória nova, recém saída do forno (idade de referência zero).
5. Os resultados de resistência à compressão e tração de concretos gerados com esta escória reforçam a conclusão anterior, mostrando que:
 - a. Para adições de até 10% aos 28 dias (data de moldagem) a resistência à compressão não apresentou queda de resistência significativa em relação ao testemunho.
 - b. Aos 91 dias os valores de resistência à compressão permaneceram os mesmos para adições de 5 e 10% de escória em relação aos corpos-de-prova testemunho (adição zero).

- c. O mesmo fenômeno ocorreu para a resistência à tração.
6. Ao realizar os ensaios de carbonatação observou-se, como esperado, que os corpos-de-prova que apresentavam menor relação a/agl (0,3 e 0,4) foram os que forneceram as menores profundidades de carbonatação nos valores de 0mm para as vigas com idade de 210 dias e pouco mais de 1mm para os corpos-de-prova com 150 dias. Em relação ao teor de adição de escória para os ensaios realizados nos corpos-de-prova, teores de 10, 25 e 40% de adição apresentaram profundidade de carbonatação maior, aumentando também com a relação a/agl (0,65 e 0,80).
 7. Para as vigas estudadas, adições de 10% apresentaram uma pequena queda na profundidade de carbonatação em relação à viga testemunho (de 2mm para 1,8mm para relação a/agl de 0,52 e de 6,7 para 4,8 mm na relação a/agl de 0,8). Adições de 40% em relações a/agl de 0,52 e 0,80 apresentaram profundidades de carbonatação muito elevadas, na faixa de 6,7 e 13 mm, respectivamente.
 8. De uma maneira geral, a adição de escória ao concreto armado não alterou significativamente o desempenho do mesmo frente ao ataque corrosivo do agente agressivo analisado (cloretos). Contudo, para concretos com altas relações a/agl notou-se uma tendência de queda na resistência anticorrosiva do concreto. Esta tendência se mostrou superior para o concreto com maior adição de escória.

PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Pretende-se ainda continuar o estudo nesta área, iniciando-se com o uso do resíduo da moagem desta escória. O material utilizado neste trabalho foi retirado do forno, moído em moinho de bolas e peneirado na peneira #200 (0,075mm de malha), tendo sido aproveitado apenas o material passante nesta peneira. O material restante foi classificado como agregado miúdo. Propõe-se aqui um estudo para aproveitamento deste material como tal.

Análises de difração de raios X mostraram uma diminuição de elementos como a portlandita, à medida que a expansão aumenta. Estudos mais aprofundados poderão estabelecer correlações mais precisas. Espera-se que os difratogramas apresentados neste trabalho possam servir de parâmetro para novos estudos.

Dada a alta expansibilidade da escória do forno-panela sugere-se realizar estudos para verificação do tempo que levaria para estabilizar esta escória depositada nos pátios de

estocagem, ao ar livre. É possível também realizar ensaios acelerados de estabilização desta escória para que se possa utilizá-la o mais rápido possível e em teores de adições elevados.

Sugere-se que se realizem os mesmos ensaios propostos neste trabalho para a escória do refino oxidante.

Sugere-se também que se misture escórias do refino redutor de diversas corridas e que se faça a verificação da influência sobre os valores aqui indicados.

Para se determinar a pozolanicidade para cimento Portland pozolânico (ensaio de Fratini – NBR 5753/92) sugere-se que se procedam ensaios, com os mesmos 35% de adição utilizados neste trabalho, para escórias com finura Blaine menor que os 376 m²/kg testados e com uma escória FP que tenha sido submetida a um resfriamento mais rápido.

Com relação à parte ambiental é necessário que se façam ensaios de lixiviação e solubilização para concretos com escória a fim de se verificar qual a classificação do concreto gerado.

É importante que se estude a compatibilidade da escória de aciaria elétrica com outros tipos de aditivos.

Fica como sugestão, como já é feito em algumas siderúrgicas como a japonesa DAIDO STEEL (1993), que numa aciaria as escórias do forno-panela (refino redutor) sejam separadas das do refino oxidante. No caso da impossibilidade de se separar as escórias nos pátios das siderúrgicas propõe-se que pelo menos as mesmas sejam estocadas em proporções pré-estabelecidas e conhecidas a fim de que possam ser melhor aproveitadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland comum- especificação NBR 5732.** Rio de Janeiro, 1991. 5p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland de alta resistência inicial- especificação NBR 5733.** Origem: EB-2. Rio de Janeiro, 1991. 5p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland de alto-forno- especificação NBR 5735.** Rio de Janeiro, 1991. 5p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland pozolânico- especificação NBR 5736.** Rio de Janeiro, 1991. 5p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Moldagem e cura de corpos-de-prova de concreto, cilíndricos ou prismáticos NBR 5738.** Rio de Janeiro, 1984. 5p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos NBR 5739.** Rio de Janeiro, 1980.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Pozolanas- Determinação do índice de atividade pozolânica com cimento Portland NBR 5752.** Rio de Janeiro, 1977. 3p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland pozolânico- Determinação da pozolanicidade NBR 5753.** Rio de Janeiro, 1992. 5p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto e execução de obras de concreto armado- procedimento NBR 6118.** NB-1- em revisão. Rio de Janeiro, 1997. 53p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Ensaio de cimento Portland. NBR 7215.** Rio de Janeiro, 1982. 20p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa e concreto: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos.** NBR 7222. Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto- Determinação do módulo de deformação elástico e diagrama tensão-deformação- Método de Ensaio.** NBR 8522. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004. Resíduos sólidos- classificação** Rio de Janeiro, 1987. 63p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.005. Lixiviação de resíduos** Rio de Janeiro, 1987. 10p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.006. Solubilização de resíduos** Rio de Janeiro, 1987. 2p.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland composto** NBR 11.578. Origem: EB-2138. Rio de Janeiro, 1991. 5p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland –** determinação da expansibilidade de Le Chatelier NBR 11.582. Origem: MB-3435. Rio de Janeiro, 1991. 2p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12.653. **Materiais pozolânicos- Especificação.** Rio de Janeiro, 1992. 3p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Certificação ambiental de produtos- Rótulo ecológico- ABNT- Qualidade ambiental- Departamento de certificação I encontro Internacional sobre barreiras não-tarifárias - ISO 14000.** Porto Alegre, 9p. mar. 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **O Brasil e a futura série ISO 14000** Rio de Janeiro, 1994. 15p.
- AKINMUSURU, J. O. Potential beneficial uses of steel slag wastes for civil engineering purposes. **Resources, Conservation and Recycling.** Elsevier, Pergamon, n. 5, p. 73-80, 1991.
- ALMEIDA, I. R. **Betões de alta resistência e durabilidade-** composição e características. Lisboa, 1990. 740p. Tese (Doutorado em Engenharia)- Laboratório Nacional de Engenharia Civil-LNEC- Portugal.
- ALVES, J. D. **Materiais de construção.** Goiânia: UFG/CEFET, 1999. 298p.
- AMERICAN COMMITTEE 212- **Guide for Use of Admixtures in Concrete-** Manual of Concrete Practice, 1985. Part 1, p. 212.2R-1- 212.2R-13.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. Standard Practice for Preparing, Cleaning and Evaluating Corrosion Test Specimens. ASTM G1. In: **Annual Book of ASTM Standards.** Philadelphia, EUA, 1990.
- . Standard Specification for Portland Cement- ASTM C-150- 97. In: ----. vol 4.01, p. 134-138. Philadelphia, EUA, 1998.
- . Standard Test Methods for Half Cell Potential of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. ASTM C876. In: ----. v.04.02, Sec. 4, p. 429-33. Philadelphia, EUA, 1991.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS **Standard Test Method for Autoclave Expansion of Portland Cement** Philadelphia, 1993. ASTM C-151.
- ANDRADE, J. J. O. **Durabilidade das estruturas de concreto armado: análise das manifestações patológicas nas estruturas no estado de Pernambuco.** Porto Alegre: Escola de Engenharia, 1997. 148p. Dissertação (Mestrado em Engenharia)- Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS.
- ANDRADE PERDRIX, Maria del Carmen **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras.** São Paulo: PINI, 1992.
- ANDRIOLO, F. R. **The Use of Roller Compacted Concrete.** São Paulo: Ed. Oficina de Textos, 1998.

- ARANHA, P. M. S. **Contribuição ao estudo das manifestações patológicas nas estruturas de concreto armado na região amazônica.** Porto Alegre: 1994. 144p. Dissertação (Mestrado em Engenharia)- Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, UFRGS.
- BARBOSA, M.T.G. **Viabilidade do uso do pó oriundo do forno elétrico (resíduo siderúrgico) na construção civil.** Porto Alegre: 1993. 104p. Dissertação (Mestrado em Engenharia)- Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, UFRGS.
- BRASIL. Ministério dos Transportes. **Escórias siderúrgicas- material de múltiplas aplicações.** Brasília: DNER- Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1988. 50p.
- BRUN, D. W.; YUAN, W. C. **Caracterização e aproveitamento dos resíduos siderúrgicos principais gerados pela aciaria elétrica.** Porto Alegre: PPGEMM/UFRGS, 1994, 34p. [Seminário da disciplina MTMD99- Tópicos especiais- Resíduos industriais siderúrgicos: caracterização e aproveitamento].
- CALLEJA, J. Escorias y cementos siderúrgicos **Materiales de Construcción**, Madrid, n.186, p. 11-38, 1982.
- CANOVAS, M. F. **Hormigon** Madrid, 1996.
- CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto- Inspeção e técnicas eletroquímicas.** São Paulo, 1997.
- CHATTERJI, S. Mechanism of Expansion of Concrete Due to the Presence of Dead-Burnt CaO and MgO **Cement and Concrete Research**, vol. 25, n. 1, p. 51-56, 1995.
- CINCOTTO et al Cimento alternativo à base de escória de alto-forno. **A Construção - Região Sul**, n. 259, p.23-26, mai 1990.
- . Caracterização da escória granulada de alto-forno e seu emprego como aglomerante e agregado. IPT. São Paulo, 1992, 35p. (Boletim 65).
- . Utilização de subprodutos e resíduos na indústria da construção civil. In: SIMPÓSIO DE DESEMPENHO DE MATERIAIS E COMPONENTES DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 2, 1989, Florianópolis, SC, **Anais...** Florianópolis, 1989, p.171-181.
- COMMITTEE ON ENVIRONMENTAL AFFAIRS AND COMMITTEE ON TECHNOLOGY **The Management of Steel Plant Ferruginous By-Products.** Brussels International Iron and Steel Institute, 1994.
- COSIPA **Agregado siderúrgico COSIPA- uso e aplicações.** Cubatão, SP. 1995.
- COUTINHO, A. S. **Fabrico e propriedades do betão LNEC**, 1988, 401p. Portugal. vol. 1. 2 ed.
- CRAWFORD, C.B.; BURN, K. N. Building damage from expansive steel slag backfill. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division**, New York, n. SM6, p. 1325-1334, nov 1969.
- DAIDO STEEL Aproveitamento da escória de forno elétrico. In: SIMPÓSIO DO GRUPO DE FORNO ELÉTRICO, 39. Comitê de Pesquisa Cooperada da Japan Iron and Steel Association, **Anais...** 1993, 13p.

- DAL MOLIN, D.C.C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microssilica.** São Paulo, 1995. 286p. Tese (Doutorado em Engenharia)- Departamento de Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Departamento de Engenharia de Materiais, Departamento de Engenharia Metalúrgica, Departamento de Engenharia Civil. **Especificações de qualidade e ensaios para utilização de escórias siderúrgicas como agregados:** Projeto de Norma. Versão 1. Porto Alegre, jun. 1998.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem- PRO 263/94 **Emprego de escórias de aciaria em pavimentos rodoviários** MT- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem Norma Rodoviária- Procedimento. 3p. 1994.
- FIGUEIREDO, E. J. P. **Avaliação do desempenho de revestimentos para proteção da armadura contra a corrosão através de técnicas eletroquímicas.** São Paulo, 1994. 423p.: Tese (Doutorado em Engenharia)- Departamento de Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- FIGUEIREDO, E. J. P.; HELENE, P.; ANDRADE, C. **Fatores determinantes da iniciação e propagação da corrosão da armadura do concreto.** São Paulo, 1993. 19p. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP).
- FURNAS, Equipe de; Laboratório de Concreto. **Concretos massa, estrutural, projetado e compactado com rolo-** Ensaios e propriedades. São Paulo: Walton Pacelli de Andrade/PINI, 1997.
- GALDEANO, O.V.R. et al A experiência da CSN na reciclagem de resíduos sólidos nas sinterizações da CSN. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO E MATÉRIAS-PRIMAS RESÍDUOS NA SIDERURGIA, 25, Volta Redonda, RJ. **Anais...** Volta Redonda, 1994. p.271-285.
- GAZE, M. E.; SMITH, M. A. The Effect of Pre-Curing at 50° C on Autoclave Expansion on High Magnesia Cements. **Cement and Concrete Research**, v. 7, p. 659-668, 1977.
- GEISELER, J. Use of Steelworks Slag in Europe. **Waste Management**, London, vol. 16, n. 1-3, p.59-63, 1996.
- GEISELER, J.; SCHLOSSER, R. Investigations concerning structure and properties of steel slags. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOLTEN SLAGS AND FLUXES, 3. 1988, Glasgow. **Proceedings...** Glasgow: The Institute of Metals, 1989. p. 40-42.
- GEOCISA **The GECOR6 corrosion rate meter- for steel in concrete.** Madrid, 1993. 31p.
- GEYER, A.L.B. **Estudo sobre a disposição final e potencialidades de aproveitamento das cinzas de lodos de estações de tratamento de esgotos sanitários de Porto Alegre como insumo na produção de concreto.** Porto Alegre, 2000. 165p.: Tese (Doutorado em Engenharia)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. NORIE/UFGRS. No prelo.
- GEYER, R. M. T. et al Escórias Siderúrgicas: caracterização e aplicações para a Indústria da Construção Civil. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO E MATÉRIAS-PRIMAS RESÍDUOS NA SIDERURGIA, 25. Volta Redonda, RJ. **Anais...** Volta Redonda, p.363-381, 1994.

- GEYER, R. M. T.; DAL MOLIN, D. ; VILELA, A.C. Possibilidades e fatores limitantes da reutilização de escórias de aciaria na Construção Civil. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 51. Porto Alegre, RS. **Anais...** Porto Alegre, 1996. p. 5-9.
- GEYER, R. M. T. **Estudo sobre a expansibilidade das escórias de aciaria e sua potencialidade de uso na construção civil.** Porto Alegre, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais – UFRGS, 1997. 33p. Proposta de tese de doutorado.
- GEYER, Rejane et al Avaliação da durabilidade do concreto com adição de escória de aciaria através do estudo de vigas de concreto armado In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO- IBRACON, 41, 1999 **Anais...** Salvador. 1999. 12p.
- GROMOV, B. V. Utilización de escorias metalúrgicas en la Unión Soviética. **PNUMA Industria y Medio Ambiente** p. 13-18, 1984.
- GUMIERI, A G. **Estudo da viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria do processo LD em materiais de Construção Civil.** Porto Alegre, PPGEC/UFRGS. 2000. 91p. Proposta de tese de doutorado.
- GUTT, W. Aggregates from waste materials. **Chemistry and Industry**, London, n. 3, p. 439-447, jun. 1972.
- HASPARYK, N.P. **Investigação dos mecanismos da reação álcali-agregado- efeito da cinza de casca de arroz e da sílica ativa.** Goiânia: 1999. 257p. Dissertação (Mestrado em Engenharia)- Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia Civil, UFG.
- IBS- INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA **Anuário estatístico da indústria siderúrgica brasileira – 1999.** Rio de Janeiro, 2000. 100p.
- JAPAN INSTITUTE STANDARD JIS A 5015- **Escória Siderúrgica para construção de estradas.** 1992. 48p.
- JOHN, V.M. et al. Cimentos de escória de alto-forno sem clínquer. In: RESÍDUOS INDUSTRIAIS PARA REDUÇÃO DE CUSTOS NA CONSTRUÇÃO HABITACIONAL. Vitória, ES. **Anais...** IPT/UFES, p.52-59, 1994.
- JOHN, V.M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio** São Paulo, 1995. 189p.: Tese (Doutorado em Engenharia)- Departamento de Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- LEA, F. M. **The Chemistry of Cement and Concrete.** 3 ed. Northants, Great Britain, Woolnough Bookbinding Limited, 1988.
- LENZI, J.C.R. **Técnicas de análise estrutural e microestrutural aplicadas ao estudo de escórias siderúrgicas - uma abordagem sobre a aplicabilidade em escórias de aciaria elétrica.** Porto Alegre: 1995. 118p. Dissertação (Mestrado em Engenharia)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais, Escola de Engenharia, UFRGS.
- LIMA Fruto permitido- USIMINAS diversifica e lança tijolo de escória de alto-forno. **A Construção-** Região Sul. n. 282, p.24. abr, 1992.
- LIMA, L. A. de **Hormigones com escorias do horno eléctrico como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental.** Barcelona, 1999. 243p.: Tese (Doutorado em

Engenharia)- Universitat Politècnica de Catalunya- Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports- Departament D'Enginyeria de la Construcció.

- LÚCIO, A. **Físico-química metalúrgica- 2ª parte.** Belo Horizonte, 1981. p.555-599
- MALHOTRA, V. M. **Supplementary Cementing Materials for Concrete** Canada. March, 1987.
- MINDESS, S. **Mechanical Performance of Cimentitious Systems.** Structure of performance of cements. Essex, Ed. P. Barnes. Applied Science Publishers, 1983.
- MEHTA, P. K.; MALHOTRA, V. M. **Pozzolanic and Cementitious Materials** - Advances in concrete technology. Amsterdam, 1996. vol. 1.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto- Estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo, 1994.
- MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments.** New York: John Wiley, 1986.
- MONTGOMERY, D.G.; WANG, G. Preliminary laboratory study of steel slag for blended cement manufacture. **Materials Forum**, n. 15, p. 374-382, 1991.
- MOURA, W. A **Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto.** Porto Alegre, 2000. 207p.: Tese (Doutorado em Engenharia)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. UFRGS.
- MURPHY, J.N.; MEADOWCROFT, T.R.; BARR, P. V. Enhancement of the cementitious properties of steelmaking slag **Canadian Metallurgical Quarterly**, vol. 36, n. 5, p. 315-331, 1997.
- NANNI, L. F.; RIBEIRO, J. L. **Planejamento e avaliação de experimentos.** 2 ed., Porto Alegre, CPGEC, UFRGS, 1992. 213p. (Caderno Técnico, 30).
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto** Trad. de Salvador Giamusso, São Paulo: PINI, 1997.
- PAVLENKO, S.I. Fine-grained concrete on the basis of fly ash and slag from steel works. In: CEMENT INDUSTRY SOLUTIONS TO WASTE MANAGEMENT. 1992. Calgary. **Proceedings...**, Alberta, Canada, p. 647-661.
- PERA, J. State of the art report-use of waste materials in construction in western europe. In: WORKSHOP RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL. 1996, São Paulo. **Anais...** São Paulo: EPUSP/ANTAC, 1997, p 1-20.
- PEREIRA, E. A. C. Aspectos técnicos da gestão de resíduos nas siderúrgicas integradas a coque. **Metalurgia & Metais**, p.122-128, fev. 1995.
- PEREIRA, E. A. C. Aspectos técnicos da gestão de resíduos nas siderúrgicas integradas a coque. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO E MATÉRIAS-PRIMAS RESÍDUOS NA SIDERURGIA, 25, 1994, Volta Redonda, RJ. **Anais...** Volta Redonda, 1994. p.187-199.
- PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland.** 6ed. atual. e revi. por Vladimir Antônio Paulon. Porto Alegre: Globo, 1978.

- REBAP- Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado- decreto-lei 349-C/83 de 30 de julho de 1983, Lisboa, 1985, 214p.
- RILEM- Recommendations CPC-18. Measurement of Hardened Concrete Carbonatation Depth. *Matériaux et constructions*, RILEM, vol.21, nov/dec. 1988, p. 453-455.
- ROSTIK, L. F. **EAF Steel Company on the by-product synergy environment** In: REWAS 99 p. 1593-1603. San Sebastian, Spain. 5-7 September 1999.
- RUBIO A.R.; CARRETERO, J. G. La aplicación de las escorias de acería en carreteras. **Ingeniería Civil**, v.80, p. 5-8, 1991.
- SANTOS, M. C. **Ensaio químicos** Goiânia, 2000. [Comunicação pessoal].
- SILVA et al. Estudo e avaliação comparativa do poder aglomerante da escória de alto-forno granulada. **A Construção- Região Sul**, n. 270, p.29-30. abr. 1991.
- SILVA, E.; ALMEIDA, C. Escória de alto-forno granulada como agregado miúdo para argamassa e concreto. In: I SIMPÓSIO NACIONAL DE AGREGADOS. Departamento de Engenharia de Construção Civil. **Anais...** São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 1986. p.255-273.
- SWAMY, R. N. **High Strength Concrete** – Materials, properties and structural behavior, 1985.
- TÓPICOS ESPECIAIS Resíduos industriais siderúrgicos: caracterização e aproveitamento. Seminário da disciplina MTMD99- Tópicos especiais. PPGEMM, UFRGS, 34p., 1994.
- UNE 83.480 EX **Adiciones al hormigón. Escorias granuladas molidas de horno alto.** Definición. Especificaciones, transporte, almacenamiento de las escorias granuladas molidas utilizadas en los hormigones y morteros fabricados com cemento portland tipo I. Asociación Espanola de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, 1996.
- VON KRÜGER, P. Panorama mundial do aproveitamento de resíduos na siderurgia. **Metalurgia & Materiais**, p.116-119, fev. 1995.

ANEXO A

Resultados dos ensaios com agulhas de Le Chatelier.

Tabela 1- Resultados absolutos dos ensaios com agulhas de Le Chatelier.

Elemento Testado	Expansão a frio (mm)	Expansão a quente (mm)	Idade da escória (dia)	Limite NBR 1578/91 (mm)
C*	3,30	0,50	Zero	Exigência obrigatória a quente ≤ 5 Exigência facultativa a frio ≤ 5
	1,60	0,00		
	0,30	0,40		
CE**	0,75	0,55		
	1,25	0,10		
	0,40	0,05		
C	0,45	0,40	28	
	0,65	0,30		
	0,55	0,50		
CE	0,50	0,00		
	0,60	0,00		
	0,60	1,10		
C	1,90	1,30	360	
	1,80	1,00		
	1,70	1,10		
CE	2,70	1,40		
	2,50	1,40		
	2,40	1,70		
C	0,00	0,20	720	
	0,10	0,10		
	0,10	0,00		
CE	0,95	0,10		
	0,00	0,60		
	0,10	0,20		

* Pasta de cimento puro.

** Pasta de cimento com 35% de escória de aciaria elétrica.

ANEXO B

Resultados dos ensaios de perda de massa.

Tabela 1- Perda de massa- volume úmido.

Barra/ Medição	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	5A	5B
1	62500	62500	62500	62500	62500	62500	62500	62500	62500	62500
2	67154,1	67020,46	65767,59	65535	66890,65	68262,48	66026,51	66762,15	69705,29	67571,77
3	65339,274	65288,16	65535,1	64517,78	63410,13	64455,04	64581,3	64138,54	64133,48	64201,41
4	65859,66	66056,48	63883,51	64069,01	64456,18	65027,84	65851,79	64837,58	64199,64	64517,78
5	65855,79	65606,4	65404,55	65731,61	64264,03	64359,47	63915,39	64074,78	64647,57	64201,03
6	65466,468	66056,26	65349,12	64964,31	63947,27	64774,06	66056,26	63820,52	64453,39	64200,02
7	64583,31	65156,61	64583,31	65343,28	64264,03	64138,54	65862,68	64264,03	64711,83	64201,03
8	65212,722	65604,39	64073,01	65862,68	64074,78	64011,02	65859,66	65604,39	64703,23	64519,05
9	65280	65152,58	64454,79	65473,83	63948,53	64457,06	65346,11	65476,15	64967,61	64011,02
10	64837,575	65156,61	64454,79	65408,56	64197,02	65151,04	65154,05	64074,78	65859,66	65663,06
11	65338,395	66413,39	65314,88	66111,05	66198,08	66111,05	65787,81	65346,45	67553,18	66726,4
12	64515	64577,28	64329,05	64583,31	63631,51	64899,07	64133,01	64963,58	64201,03	64520,06
13	65476,147	63819,76	64519,05	64519,05	64457,06	64328,04	64902,09	65027,07	64645,03	64454,79
14	65343,278	63820,52	65535,1	64326,26	63190	64074,78	65859,66	64328,04	64138,54	64647,57
15	65016,888	65960,98	64068,75	65532	66240,46	65870,33	64897,54	66931,54	68170,87	66305,46
16	65086,021	65087,82	65216,06	64709,55	64074,78	64073,01	65093,85	65669,67	65286,14	65479,17
17	65288,16	65221,38	65023,06	64009	63631,51	63630,01	64265,04	63694,51	63756	63948,53
18	65867,52	65286,14	65341,08	64262	63694,76	64454,79	64329,05	64011,02	64287,4	64266,05
19	66382,11	65346,11	64329,05	65280	64138,54	64709,55	64583,31	65027,07	64454,79	64266,05
20	65698,8375	65604,39	63439,75	66532,05	65281,08	65545,97	66691,76	65350,13	66983,4	67488,3

Legenda:

- Barras 1A e 1B= Argamassa de consistência normal com 0% de escória (testemunho);
- Barras 2A e 2B= Argamassa de consistência normal com 5% de escória;
- Barras 3A e 3B= Argamassa de consistência normal com 10% de escória;
- Barras 4A e 4B= Argamassa de consistência normal com 25% de escória;
- Barras 5A e 5B= Argamassa de consistência normal com 40% de escória.

Tabela 2- Perda de massa- volume seco.

Barra/ Medição	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	5A	5B
1	61875	63817,75	63756	63127	62687,5	63315,25	64009	62405,63	62120,52	62500
2	65151,04	65606,4	63946,38	65224,28	63946,64	64103,08	63820,89	63535,94	63566,5	64199,64
3	65147,5	65217,35	65087,82	63883,51	64074,53	63694,51	63693,51	64456,18	64520,31	63504,26
4	65245,36	65732,61	65604,39	65862,68	64583,31	65921,58	65216,06	64074,53	64322,45	64392,8
5	65987,37	65349,12	64834,77	65728,6	63946,64	64138,54	65216,06	65281,08	64386,97	63694,51
6	66115,05	65346,11	66247,15	66183,68	66568,32	67132,07	66662,84	66114,93	66983,4	67190,11
7	66375,23	65669,67	63945,26	65731,61	64011,02	64834,77	65216,06	65925,19	64774,06	65600,37
8	65469,47	65091,84	64011,02	65671,68	64521,07	64834,77	65350,13	65219,07	65928,21	65663,06
9	65214,72	65029,08	64011,02	65158,62	64457,06	64262	65350,13	64962,3	65671,68	65597,53
10	64703,23	65219,07	65151,04	64834,56	64456,06	65219,07	65341,08	65789,11	64997,99	66056,26
11	65408	65798,94	65408	65797,14	65731,61	65867,66	66051,4	65381,63	67118,04	67098,83
12	64773,06	65475,84	64871,63	64645,03	64456,06	63505,01	65154,05	64773,06	64837,58	63820,52
13	65091,84	63252	64137,02	64583,31	63758,02	63820,52	64264,03	64773,06	64326,26	63883,51
14	64190	66734,98	66987,05	66762,15	66919,16	66242,18	67275,71	65091,84	66983,4	65350,27
15	65535	65733,53	64165,01	65315,38	65503,62	65903,48	64489,07	64486,92	66848,76	65698,28
16	64633,86	65441,2	63376,5	65764,37	65340,44	65804,29	65350,91	65469,82	66586,61	65978,25
17	64851,54	66378,24	62622,5	65470,46	65977,34	65804,29	65662,1	65281,08	67508,76	66174,68
18	65015,06	65405	63849,63	64577,86	64958,29	65674,24	64964,71	64931,93	66796,74	66010,23
19	65407,50	65406,50	65090,03	64612,52	65593,69	66882,82	65086,02	65447,66	64506,62	67125,96
20	64247,04	65539,11	63488,00	65731,61	65275,29	65612,01	65343,84	65346,11	66512,16	65027,84

Legenda:

- Barras 1A e 1B= Argamassa de consistência normal com 0% de escória (testemunho);
- Barras 2A e 2B= Argamassa de consistência normal com 5% de escória;
- Barras 3A e 3B= Argamassa de consistência normal com 10% de escória;
- Barras 4A e 4B= Argamassa de consistência normal com 25% de escória;
- Barras 5A e 5B= Argamassa de consistência normal com 40% de escória.

Tabela 3- Perda de massa- massa úmida.

Barra/ Medição	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	5A	5B
1	138,20	140,53	137,90	139,50	138,36	139,04	131,54	130,00	140,40	136,24
2	139,32	141,18	138,10	139,26	138,20	139,46	128,70	126,96	139,74	136,98
3	139,64	141,70	138,60	139,90	138,80	140,20	129,20	127,10	140,50	136,50
4	139,45	141,10	138,00	139,84	138,20	139,28	128,72	127,44	140,00	136,55
5	139,30	141,54	138,40	139,60	138,10	139,76	128,70	126,80	139,70	137,04
6	139,10	141,50	138,70	140,20	138,60	139,90	128,50	126,80	140,30	137,20
7	139,00	141,60	138,50	140,10	138,90	139,10	130,20	127,40	141,20	138,08
8	137,00	140,80	136,80	138,54	137,40	138,20	128,70	126,70	140,50	137,00
9	138,40	140,00	137,40	138,80	137,40	139,00	128,80	126,80	140,40	137,10
10	138,60	140,00	137,70	139,00	137,90	140,40	129,00	127,30	141,20	137,70
11	137,48	138,37	136,46	137,96	136,55	138,07	128,33	126,00	139,76	136,23
12	138,20	139,50	137,20	139,20	137,60	139,30	129,60	127,10	141,00	137,10
13	138,20	141,20	139,00	141,30	139,60	141,00	132,20	130,20	142,50	138,70
14	139,50	142,40	139,90	141,70	139,90	141,60	133,00	130,50	142,50	138,70
15	137,40	138,75	136,50	138,56	136,90	138,00	129,00	126,62	140,04	136,50
16	137,60	139,20	137,20	139,00	137,60	138,50	129,30	127,40	141,10	137,40
17	137,50	138,30	137,00	138,90	137,60	138,30	129,40	127,60	141,30	137,00
18	137,60	139,00	137,00	139,10	137,60	138,80	129,00	127,50	140,20	136,60
19	138,87	140,90	138,50	139,90	138,40	139,50	129,50	127,50	140,50	137,30
20	138,20	140,00	137,40	139,50	137,00	139,25	128,80	126,80	140,30	137,00

Legenda:

- Barras 1A e 1B= Argamassa de consistência normal com 0% de escória (testemunho);
- Barras 2A e 2B= Argamassa de consistência normal com 5% de escória;
- Barras 3A e 3B= Argamassa de consistência normal com 10% de escória;
- Barras 4A e 4B= Argamassa de consistência normal com 25% de escória;
- Barras 5A e 5B= Argamassa de consistência normal com 40% de escória.

Tabela 4- Perda de massa- massa seca.

Barra/ Medição	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	5A	5B
1	130,52	132,30	128,90	129,88	128,40	129,40	114,16	112,60	128,06	125,74
2	131,10	132,68	129,26	125,26	128,74	130,40	114,40	112,82	128,40	126,20
3	130,69	132,17	128,74	129,74	128,26	129,64	113,65	112,10	127,80	125,60
4	130,20	131,80	128,33	129,22	127,70	129,14	113,19	111,25	127,50	125,10
5	130,80	132,30	128,80	129,80	128,30	129,70	113,70	111,90	128,00	125,70
6	131,20	132,80	129,30	130,25	128,72	130,20	114,10	112,34	128,41	126,20
7	131,10	132,70	129,20	130,10	128,50	130,00	114,00	112,10	128,30	126,00
8	131,70	133,30	129,70	130,60	129,10	130,50	114,50	112,70	128,80	126,30
9	131,60	133,40	129,50	130,50	129,10	130,40	114,30	112,70	128,90	126,30
10	131,62	133,20	129,70	130,60	129,00	130,53	114,40	112,73	128,86	126,50
11	131,25	132,80	129,30	130,30	128,64	130,30	114,20	112,40	128,50	126,17
12	131,70	133,20	129,80	130,70	129,10	130,70	115,00	114,20	129,20	127,00
13	130,50	133,00	130,10	132,20	131,30	133,60	116,70	115,50	134,00	133,40
14	131,36	132,90	129,35	130,40	128,80	130,33	114,30	112,50	128,60	126,26
15	131,66	133,28	129,76	130,80	129,20	130,75	114,75	112,90	129,05	126,65
16	131,72	133,35	129,90	131,00	129,40	130,85	114,92	113,14	129,40	126,70
17	131,70	133,38	129,80	130,90	129,30	130,85	114,80	113,00	129,12	126,70
18	131,20	132,66	129,23	130,35	128,80	130,33	114,47	112,70	128,70	126,45
19	131,10	132,60	129,05	130,15	128,60	130,20	114,35	112,50	128,70	126,30
20	131,00	132,60	129,00	130,15	128,60	130,20	114,40	112,60	128,70	126,40

Legenda:

- Barras 1A e 1B= Argamassa de consistência normal com 0% de escória (testemunho);
- Barras 2A e 2B= Argamassa de consistência normal com 5% de escória;
- Barras 3A e 3B= Argamassa de consistência normal com 10% de escória;
- Barras 4A e 4B= Argamassa de consistência normal com 25% de escória;
- Barras 5A e 5B= Argamassa de consistência normal com 40% de escória.

ANEXO C

Modelos de equação de regressão múltipla obtidos no programa computacional estatístico "STATGRAPHICS".

Multiple Regression Analysis

Dependent variable: fc28

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	p-Value
CONSTANT	-5,47342	1,15496	-4,73905	0,0000
ad	-3,32123	0,320934	-10,3486	0,0000
1/acr ²	13,1945	0,701597	18,8064	0,0000
1/acr ³	-2,35295	0,186576	-12,6112	0,0000
idade ²	2,23296	0,528409	4,22582	0,0000
idade/acr	1,13544	0,137949	8,23089	0,0000

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	p-Value
Model	24668,5	5	4933,7	928,81	0,0000
Residual	589,617	111	5,31186		
Total (Corr.)	25258,1	116			

R-squared = 97,6656 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 97,5605 percent

Standard Error of Est. = 2,30475

Mean absolute error = 1,81745

Durbin-Watson statistic = 1,09925

The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between fc28abc and 5 independent variables. The equation of the fitted model is

$$fc28 = -5,47342 - 3,32123*ad + 13,1945*1/acr^2 - 2,35295*1/acr^3 + 2,23296*idade^2 + 1,13544*idade/acr$$

Since the p-value in the ANOVA table is less than 0.01, there is a statistically significant relationship between the variables at the 99% confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 97,6656% of the variability in fc28abc. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 2,30475. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 1,81745 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the DW value is less than 1.4, there may be some indication of serial correlation. Plot the residuals versus row order to see if there is any pattern which can be seen.

In determining whether the model can be simplified, notice that the highest P-value on the dependent variables is 0,000, belonging to idade². Since the p-value is less than 0.01, the highest order term is statistically significant at the 99% confidence level.

Consequently, you probably don't want to remove any variables from the model.

Multiple Regression Analysis

Dependent variable: fc91

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	p-Value
CONSTANT	-1,01686	1,25226	-0,812025	0,4185
ad	-3,81675	0,318965	-11,9661	0,0000
ad^2	-1,62138	0,67955	-2,38596	0,0187
1/acr^2	12,4149	0,714368	17,3789	0,0000
1/acr^3	-2,12886	0,190875	-11,1531	0,0000

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	p-Value
Model	25379,1	4	6344,78	1214,60	0,0000
Residual	585,059	112	5,22374		
Total (Corr.)	25258,1	116			

R-squared = 97,7467 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 97,6662 percent

Standard Error of Est. = 2,28555

Mean absolute error = 1,82821

Durbin-Watson statistic = 0,751669

The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between fc91abc and 4 independent variables. The equation of the fitted model is

$$fc91 = -1,01686 - 3,81675*ad - 1,62138*ad^2 + 12,4149*1/acr^2 - 2,12886*1/acr^3$$

Since the p-value in the ANOVA table is less than 0.01, there is a statistically significant relationship between the variables at the 99% confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 97,7467% of the variability in fc91abc. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 97,6662%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 2,28555. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 1,82821 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the DW value is less than 1.4, there may be some indication of serial correlation. Plot the residuals versus row order to see if there is any pattern which can be seen.

In determining whether the model can be simplified, notice that the highest P-value on the dependent variables is 0,0187, belonging to ad^2. Since the p-value is less than 0.05, that term is statistically significant at the 95% confidence level. Consequently, you probably don't want to remove any variables from the model.

Multiple Regression Analysis

Dependent variable: ft28

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	p-Value
CONSTANT	0,177703	0,0458041	3,87962	0,0002
ad	-0,3815	0,0464356	-8,21569	0,0000
ad^2	-0,100985	0,034451	-2,93128	0,0041
1/acr	0,769311	0,0169044	45,5095	0,0000
idade^2	0,103635	0,0274986	3,76873	0,0003
ad/acr	0,129034	0,0199689	6,45172	0,0000

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	p-Value
Model	29,6657	5	5,93314	436,52	0,0000
Residual	1,50871	111	0,013592		
Total (Corr.)	31,1744	116			

R-squared = 95,1604 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 94,9424 percent

Standard Error of Est. = 0,116585

Mean absolute error = 0,097285

Durbin-Watson statistic = 1,34778

The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between ft28abc and 5 independent variables. The equation of the fitted model is

$$ft28 = 0,177703 - 0,3815*ad - 0,100985*ad^2 + 0,769311*1/acr + 0,103635*idade^2 + 0,129034*ad/acr$$

Since the p-value in the ANOVA table is less than 0.01, there is a statistically significant relationship between the variables at the 99% confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 95,1604% of the variability in ft28abc. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 94,9424%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 0,116585. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 0,097285 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the DW value is less than 1.4, there may be some indication of serial correlation. Plot the residuals versus row order to see if there is any pattern which can be seen.

In determining whether the model can be simplified, notice that the highest P-value on the dependent variables is 0,0041, belonging to ad^2. Since the p-value is less than 0.01, the highest order term is statistically significant at the 99% confidence level. Consequently, you probably don't want to remove any variables from the model.

Multiple Regression Analysis

Dependent variable: ft91

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	p-Value
CONSTANT	0,236408	0,0665286	3,55348	0,0006
ad	-0,358112	0,0674458	-5,30963	0,0000
ad^2	-0,134786	0,0500387	-2,69364	0,0082
1/acr	0,872618	0,024553	35,5402	0,0000
idade^2	0,124436	0,0399406	3,11552	0,0023
ad/acr	0,108874	0,0290041	3.75375	0,0003

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	p-Value
Model	38,5338	5	7,70676	268,77	0,0000
Residual	3,18284	111	0,0286742		
Total (Corr.)	41,7167	116			

R-squared = 92,3803 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 92,0267 percent

Standard Error of Est. = 0,169335

Mean absolute error = 0,123937

Durbin-Watson statistic = 1,47284

The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between ft91abc and 5 independent variables. The equation of the fitted model is

$$\text{ft91} = 0,236408 - 0,358112 \cdot \text{ad} - 0,134786 \cdot \text{ad}^2 + 0,872618 \cdot 1/\text{acr} + 0,124436 \cdot \text{idade}^2 + 0,108874 \cdot \text{ad}/\text{acr}$$

Since the p-value in the ANOVA table is less than 0.01, there is a statistically significant relationship between the variables at the 99% confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 92,37037% of the variability in ft91. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 92,0267%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 0,169335. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 0,123937 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the DW value is less than 1.4, there is probably not any serious autocorrelation in the residuals.

In determining whether the model can be simplified, notice that the highest P-value on the dependent variables is 0,0082, belonging to ad^2. Since the p-value is less than 0.01, the highest order term is statistically significant at the 99% confidence level. Consequently, you probably don't want to remove any variables from the model.

Multiple Regression Analysis

Dependent variable: carb150

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	p-Value
CONSTANT	-1,45172	0,305975	-4,74456	0,0000
ad	-0,824316	0,38066	-2,16549	0,0372
acr	6,78958	0,565735	12,0014	0,0000
ad*acr	2,51763	0,6976	3,60899	0,0010

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	p-Value
Model	44,727	3	14,909	52,17	0,0000
Residual	10,0013	35	0,285751		
Total (Corr.)	54,7283	38			

R-squared = 81,7256 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 80,1592 percent

Standard Error of Est. = 0,534556

Mean absolute error = 0,425511

Durbin-Watson statistic = 1,05458

The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between carb150 and 3 independent variables. The equation of the fitted model is

$$\text{Carb150} = -1,45172 - 0,824316 \cdot \text{ad} + 6,78958 \cdot \text{acr} + 2,51763 \cdot \text{ad} \cdot \text{acr}$$

Since the p-value in the ANOVA table is less than 0.01, there is a statistically significant relationship between the variables at the 99% confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 81,7256% of the variability in carb150. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 80,1592%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 0,534556. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 0,425511 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the DW value is less than 1.4, there is probably not any serious autocorrelation in the residuals.

In determining whether the model can be simplified, notice that the highest P-value on the dependent variables is 0,0372, belonging to ad. Since the p-value is less than 0.05, the highest order term is statistically significant at the 95% confidence level. Consequently, you probably don't want to remove any variables from the model.

Multiple Regression Analysis

Dependent variable: E28a

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	p-Value
CONSTANT	56,153	2,75224	20,4027	0,0000
ad	-0,998828	0,37108	-2,69168	0,0109
ad^2	-2,57184	0,66456	-3,86998	0,0005
acr	-103,974	10,7333	-9,68708	0,0000
acr^2	69,7245	9,69055	7,1951	0,0000

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	p-Value
Model	776,141	4	194,035	120,96	0,0000
Residual	54,5403	34	1,60413		
Total (Corr.)	830,681	38			

R-squared = 93,4343 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 92,6618 percent

Standard Error of Est. = 1,26654

Mean absolute error = 0,969533

Durbin-Watson statistic = 0,995673

The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between E28a and 4 independent variables. The equation of the fitted model is

$$E28a = 56,153 - 0,998828*ad - 2,57184*ad^2 - 103,974*acr + 69,7245*acr^2$$

Since the p-value in the ANOVA table is less than 0.01, there is a statistically significant relationship between the variables at the 99% confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 93,4343% of the variability in E28a. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 92,6618%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 1,26654. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 0,969533 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the DW value is less than 1.4, there is probably not any serious autocorrelation in the residuals.

In determining whether the model can be simplified, notice that the highest P-value on the dependent variables is 0,0109, belonging to ad. Since the p-value is less than 0.05, the highest order term is statistically significant at the 95% confidence level. Consequently, you probably don't want to remove any variables from the model.

ANEXO D

Resultados de resistência à compressão e resistência à tração.

Tabela 1- Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)- idade de referência da escória zero.

adição	0%	5%	10%	25%	40%
a/agl	Testemunho				
0,30	55,0		57,4		47,7
	52,6		56,2		46,5
	57,4		58,6		48,9
0,40		37,5		53,1	
		36,1		52,9	
		38,9		53,3	
0,52	31,7		31,3		20,5
	30,5		30,8		19,6
	32,8		31,8		18,7
0,65		21,1		15,3	
		21,3		15,0	
		20,9		15,6	
0,80	15,0		11,9		9,9
	15,3		12,0		10,2
	14,6		12,0		9,5

Tabela 2- Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)- idade de referência da escória 28 dias.

adição	0%	5%	10%	25%	40%
a/agl	Testemunho				
0,30	58,1		47,8		51,8
	56,5		48,6		52,0
	59,6		46,9		51,5
0,40		38,7		43,8	
		40,1		44,1	
		37,3		43,5	
0,52	31,7		27,9		19,4
	31,5		28,3		19,7
	31,8		27,5		19,1
0,65		16,9		14,7	
		17,0		15,3	
		16,8		14,0	
0,80	15,9		13,3		9,0
	14,9		13,6		8,7
	16,9		12,9		9,3

Tabela 3- Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)- idade de referência da escória 91 dias.

adição	0%	5%	10%	25%	40%
a/agl	Testemunho				
0,30	61,6		66,4		57,7
	62,5		66,2		58,6
	60,6		66,5		56,8
0,40		47,2		43,3	
		47,0		43,0	
		47,4		43,6	
0,52	32,6		35,7		26,9
	32,6		38,3		27,9
	32,5		33,1		26,0
0,65		25,6		21,0	
		25,6		20,9	
		25,7		21,2	
0,80	12,5		14,3		11,1
	12,8		14,4		11,2
	12,3		14,1		11,1

Tabela 4- Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)- idade de referência da escória 360 dias.

adição	0%	5%	10%	25%	40%
a/agl	Testemunho				
0,30	58,2		57,2		52,4
	57,1		55,0		51,0
	58,0		57,5		50,0
0,40		41,1		46,7	
		40,0		47,0	
		38,7		45,6	
0,52	32,0		31,6		22,3
	31,7		32,0		20,0
	32,8		31,4		21,9
0,65		21,2		17,0	
		22,5		16,8	
		21,9		18,0	
0,80	14,5		13,2		10,0
	15,1		13,0		9,5
	14,7		14,0		10,7

Tabela 5- Resistência à compressão aos 91 dias (MPa)- idade de referência da escória zero.

adição	0%	5%	10%	25%	40%
a/agl	Testemunho				
0,30	58,3		59,3		53,8
	57,9		58,6		52,3
	58,7		60,0		55,2
0,40		40,2		67,6	
		39,6		67,9	
		40,7		67,3	
0,52	35,5		37,6		23,5
	35,0		37,2		22,6
	36,0		38,0		24,3
0,65		22,5		19,4	
		22,9		20,0	
		22,1		18,7	
0,80	17,5		14,3		11,0
	17,9		14,4		10,6
	17,1		14,1		11,3

Tabela 6- Resistência à compressão aos 91 dias (MPa)- idade de referência da escória 28 dias.

adição	0%	5%	10%	25%	40%
a/agl	Testemunho				
0,30	59,9		64,4		52,0
	60,4		71,2		52,3
	59,3		57,6		51,7
0,40		41,0		43,9	
		40,7		44,3	
		41,2		43,5	
0,52	34,9		32,2		21,0
	35,3		32,8		21,6
	34,4		31,6		20,3
0,65		18,2		16,5	
		18,0		16,0	
		18,3		17,0	
0,80	17,0		15,1		10,7
	16,5		15,5		10,6
	17,5		14,7		10,8

Tabela 7- Resistência à compressão aos 91 dias(MPa)- idade de referência da escória 91 dias.

adição	0%	5%	10%	25%	40%
a/agl	Testemunho				
0,30	51,8		62,5		55,6
	49,2		60,6		55,5
	54,3		64,5		55,7
0,40		45,5		40,6	
		48,9		40,0	
		42,1		41,3	
0,52	30,9		31,6		23,7
	30,0		30,6		22,5
	31,7		32,5		24,9
0,65		22,9		20,3	
		21,2		19,8	
		24,9		20,7	
0,80	12,8		14,4		10,4
	13,0		14,4		10,4
	12,6		14,4		10,4

Tabela 8- Resistência à compressão aos 91 dias(MPa)- idade de referência da escória 360 dias.

adição	0%	5%	10%	25%	40%
a/agl	Testemunho				
0,30	56,0		62,0		53,8
	50,0		63,5		52,0
	55,2		61,0		53,5
0,40		42,2		50,7	
		41,7		51,0	
		43,0		49,0	
0,52	33,8		33,8		22,7
	31,7		34,0		21,9
	32,9		33,2		23,0
0,65		21,2		18,7	
		21,0		19,3	
		20,7		18,0	
0,80	15,8		14,6		10,7
	16,0		15,0		10,5
	16,3		15,2		10,9

Tabela 9- Resistência à tração aos 28 dias(MPa)- idade de referência da escória zero.

adição	0%	5%	10%	25%	40%
a/agl	Testemunho				
0,30	2,63		2,59		2,84
	2,81		2,85		2,84
	2,81		2,72		2,84
0,40		1,60		2,69	
		2,16		2,93	
		1,88		2,81	
0,52	1,81		1,52		1,45
	2,07		2,03		1,87
	1,94		1,77		1,66
0,65		1,59		1,21	
		1,62		1,39	
		1,60		1,30	
0,80	1,28		1,05		0,76
	1,53		1,24		1,02
	1,40		1,14		0,89

Tabela 10- Resistência à tração aos 28 dias(MPa)- idade de referência da escória 28 dias.

adição	0%	5%	10%	25%	40%
a/agl	Testemunho				
0,30	2,38		2,44		2,69
	2,84		2,99		2,76
	2,61		2,71		2,72
0,40		1,93		1,88	
		2,21		2,11	
		2,07		1,99	
0,52	1,39		1,77		1,21
	1,95		1,94		1,41
	1,67		1,85		1,31
0,65		1,21		1,26	
		1,38		1,27	
		1,29		1,26	
0,80	1,11		1,27		0,81
	1,53		1,44		0,91
	1,32		1,35		0,86

Tabela 11- Resistência à tração aos 28 dias (MPa)- idade de referência da escória 91 dias.

adição	0%	5%	10%	25%	40%
a/agl	Testemunho				
0,30	2,69 2,72 2,71		2,83 2,64 2,70		2,43 2,52 2,50
0,40		1,87 2,22 2,10		2,19 2,19 2,19	
0,52	1,85 1,85 1,85		2,16 1,94 2,05		1,66 1,90 1,78
0,65		1,73 1,76 1,75		1,41 1,67 1,54	
0,80	0,99 1,19 1,09		1,17 0,99 1,08		0,76 0,84 0,80

Tabela 12- Resistência à tração aos 28 dias (MPa)- idade de referência da escória 360 dias.

adição	0%	5%	10%	25%	40%
a/agl	Testemunho				
0,30	2,73 2,93 2,80		2,61 2,83 2,71		2,85 2,75 2,80
0,40		1,62 2,18 1,91		2,70 2,80 2,92	
0,52	2,04 1,81 1,95		1,51 1,78 2,04		1,50 1,90 1,70
0,65		1,63 1,60 1,59		1,22 1,28 1,40	
0,80	1,51 1,42 1,30		1,06 1,15 1,25		0,82 1,04 0,90

Tabela 13- Resistência à tração aos 91 dias (MPa)- idade de referência da escória zero.

adição	0%	5%	10%	25%	40%
a/agl	Testemunho				
0,30	2,91 2,99 2,95		2,94 3,06 3,00		2,72 3,23 2,97
0,40		2,39 2,41 2,40		3,27 3,30 3,28	
0,52	2,03 2,39 2,21		2,02 2,30 2,16		1,53 2,18 1,85
0,65		1,69 1,86 1,77		1,86 1,60 1,73	
0,80	1,53 1,55 1,54		0,91 1,45 1,18		1,22 0,98 1,10

Tabela 14- Resistência à tração aos 91 dias (MPa)- idade de referência da escória 28 dias.

adição	0%	5%	10%	25%	40%
a/agl	Testemunho				
0,30	3,07 3,19 3,13		2,82 3,08 2,95		3,36 2,82 3,09
0,40		2,46 2,36 2,41		2,49 2,50 2,49	
0,52	2,33 2,22 2,75		1,88 1,96 1,92		1,68 1,71 1,69
0,65		1,43 1,31 1,37		1,50 1,46 1,48	
0,80	1,23 1,37 1,30		1,24 1,28 1,26		0,87 0,89 0,88

Tabela 15- Resistência à tração aos 91 dias (MPa)- idade de referência da escória 91 dias.

adição	0%	5%	10%	25%	40%
a/agl	Testemunho				
0,30	3,36 2,98 3,17		3,13 3,24 3,19		2,81 3,08 2,95
0,40		2,61 2,59 2,60		2,73 2,73 2,73	
0,52	2,41 2,04 2,23		2,57 2,02 2,29		2,07 1,78 1,93
0,65		1,96 1,92 1,94		1,76 1,75 1,76	
0,80	1,47 1,17 1,32		1,57 1,34 1,46		1,07 0,92 1,00

Tabela 16- Resistência à tração aos 91 dias (MPa)- idade de referência da escória 360 dias.

adição	0%	5%	10%	25%	40%
a/agl	Testemunho				
0,30	3,00 3,15 3,16		2,80 3,12 2,98		3,30 2,91 3,10
0,40		2,50 2,35 2,45		2,51 2,48 2,49	
0,52	2,35 2,27 2,63		1,90 1,92 1,93		1,70 1,75 1,68
0,65		1,45 1,32 1,36		1,52 1,48 1,47	
0,80	1,25 1,40 1,33		1,23 1,30 1,25		0,86 0,89 0,90

ANEXO E

Resultados do módulo de deformação e do coeficiente de Poisson

Tabela 1 Módulo de deformação de concretos com 28 dias, em GPa.

adição	0%	5%	10%	25%	40%
a/agl	Testemunho				
0,30	29,55		31,15		25,66
	30,52		31,20		26,21
	30,04		31,10		26,76
0,40		25,66		25,23	
		25,44		25,68	
		25,55		26,12	
0,52	19,72		18,04		22,15
	18,89		17,84		21,70
	18,23		17,64		21,24
0,65		15,65		18,73	
		14,00		19,36	
		12,35		19,05	
0,80	18,89		17,46		11,84
	21,05		16,95		12,33
	16,72		17,96		12,81

Tabela 2 Coeficiente de Poisson de concretos aos 28 dias.

adição	0%	5%	10%	25%	40%
a/agl	Testemunho				
0,30	0,20		0,20		0,18
	0,15		0,18		0,17
	0,16		0,12		0,14
0,40		0,17		0,14	
		0,16		0,16	
		0,15		0,12	
0,52	0,18		0,16		0,15
	0,13		0,14		0,17
	0,17		0,12		0,15
0,65		0,18		0,21	
		0,22		0,15	
		0,14		0,17	
0,80	0,07		0,07		0,14
	0,10		0,13		0,13
	0,13		0,16		0,15