



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL



RICARDO ANDRADE FERNANDES FARIA

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS
E DA DURABILIDADE DE CONCRETOS COM ESCÓRIA DE
ACIARIA ELÉTRICA (EAF) COMO AGREGADO GRAÚDO**

Dissertação apresentada ao curso de mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Goiânia

2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

RICARDO ANDRADE FERNANDES FARIA

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS
E DA DURABILIDADE DE CONCRETOS COM ESCÓRIA DE
ACIARIA ELÉTRICA (EAF) COMO AGREGADO GRAÚDO**

Dissertação apresentada ao curso de mestrado em
Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás
para obtenção do título de mestre em Engenharia
Civil

Área de Concentração: Estruturas e Materiais

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Rejane Maria Candiota
Tubino

Goiânia

2007

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS
E DA DURABILIDADE DE CONCRETOS COM ESCÓRIA DE
ACIARIA ELÉTRICA (EAF) COMO AGREGADO GRAÚDO**

RICARDO ANDRADE FERNANDES FARIA

**Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 17 de outubro de
2007, pela Banca Examinadora constituída pelos professores:**

Prof^ª. Dr^ª. Rejane Maria Candiota Tubino
(ORIENTADORA - UFG)

Prof. Dr. Enio José Pazini Figueiredo
(EXAMINADOR INTERNO - UFG)

Prof^ª. Dr^ª. Maristela Gomes da Silva
(EXAMINADORA EXTERNA - UFES)

Aos meus queridos pais,
Ivandesny Ricardo e Milza Maria
Cujo carinho, força e sacrifício permitiram
que eu alcançasse mais este sonho.

“ Até aqui nos tem ajudado o Senhor ! ”, I SAM. 7:12;
“Obstáculos são coisas assustadoras que vemos quando
desviamos nossos olhos de nosso objetivo”
Henry Ford (1863-1947)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por em todos os momentos me proporcionar capacidade para superar obstáculos.

A minha amiga e orientadora Prof^ª. Dr^ª. Rejane Maria Candiota Tubino, por toda experiência e conhecimento que foram essenciais para concretização de mais uma etapa, tão almejada, o título de mestre.

Ao Prof. Dr. Enio Pazini, pelo apoio, acompanhamento, incentivo, sugestões e auxílio durante a realização desta pesquisa.

Ao Eng^º. Vicente Souto Junior, proprietário da empresa Marsou Engenharia Ltda, pela compreensão e por proporcionar flexibilidade no horário de trabalho permitindo a realização deste sonho.

A minha irmã Priscila Andrade pelo incentivo e respeito ao meu sonho.

A minha querida amiga Renata Moreira, pela ajuda em todos os momentos e por ser uma pessoa com quem sempre posso contar e confiar.

A minha querida Cristiane Nóbrega pela compreensão de minhas ausências, pelo carinho e amor que foram fundamentais nessa jornada.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais de Construção da UFG, Sr. Aguinaldo e Eng^º Deusair, pelo apoio nos ensaios.

Aos colegas do Curso de Mestrado, pelo companheirismo e amizade durante todo andamento do curso. Agradeço, especialmente aos amigos Izelman Oliveira, Raphael Duarte e Keillon Cabral.

Enfim, a todos aqueles que permitiram e colaboraram para que mais este projeto se tornasse realidade, meu muito obrigado!

Ricardo Andrade

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE FIGURAS	xiv
ABREVIATURAS, SIGLAS E SIMBOLOS	xviii
RESUMO	xix
ABSTRACT	xx
CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	1
1.1 HISTÓRICO	2
1.2 REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS	3
1.3 JUSTIFICATIVA DO TEMA	5
1.4 OBJETIVOS	7
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	8
CAPÍTULO II – ESCÓRIA DE ACIARIA	9
2.1 ORIGEM	9
2.2 GERAÇÃO E BENEFICIAMENTO DAS ESCÓRIAS	10
2.3 TIPOS DE RESFRIAMENTO DAS ESCÓRIAS	14
2.3.1 Resfriamento ao ar	15
2.3.2 Resfriamento por pelotização	15
2.3.3 Resfriamento brusco	16
2.4 PROCESSOS DE BENEFICIAMENTO DA ESCÓRIA NA INDÚSTRIA	17
2.5 CARACTERIZAÇÃO DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA	18
2.5.1 Composição Química e Mineralógica	18
2.5.2 Propriedades Físicas e Mecânicas	21

2.5.3	Reatividade das Escórias	22
2.5.4	Estrutura das Escórias	23
2.5.5	Hidratação das Escórias	24
CAPÍTULO III – REAPROVEITAMENTO DA ESCÓRIA DE ACIARIA		26
3.1	UTILIZAÇÃO NA PRODUÇÃO DE CIMENTO	27
3.2	UTILIZAÇÃO COMO ADIÇÃO AOS MATERIAIS À BASE DE CIMENTO	29
3.3	OUTRAS POSSIBILIDADES DE UTILIZAÇÃO	32
3.4	UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIAS COMO AGREGADO	33
CAPÍTULO IV – PROBLEMAS NA UTILIZAÇÃO DA ESCÓRIA		36
4.1	FENÔMENO DA EXPANSIBILIDADE DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA	36
4.1.1	Expansão do Óxido de Cálcio (CaO)	39
4.1.2	Expansão do Óxido de Magnésio (MgO)	41
4.1.3	Expansão Originada da Oxidação do Ferro Metálico (Fe ^o)	42
4.1.4	Expansão por Transformação Alotrópica do C ₂ S	42
4.2	PARÂMETROS QUE CONTROLAM A EXPANSÃO	43
4.2.1	Controle da expansão pelo CaO e MgO	43
4.2.2	Controle da expansão do ferro metálico (Fe ^o)	44
4.2.3	Controle da expansão das transformações alotrópicas do C ₂ S	44
4.3	MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA EXPANSIBILIDADE DA ESCÓRIA DE ACIARIA	45
4.3.1	Ensaio adaptados a partir de ensaios em solos compactados (ASTM D 1883 e ASTM D 698)	46
4.3.2	ASTM D 4792 – Determinação da expansão potencial de agregados devido a reações de hidratação	47

4.3.3	JIS A 5015/92 – Método de ensaio de dilatação em água para escória siderúrgica	48
4.3.4	PTM 130 – Método de ensaio para avaliação do potencial de expansão de escória de aciaria (adaptado pelo DMA-1/DER-MG/92)	49
4.3.5	Ensaio de agulhas de Le Chatelier – NBR 11582/91	50
4.3.6	Ensaio de autoclave	51
4.3.7	Ensaio a vapor – Steam Test (EM 1744: 1/98)	52
4.4	FENÔMENOS QUE PROVOCAM CORROSÃO NAS ARMADURAS	52
4.4.1	Corrosão provocada por íons cloretos	52
4.4.2	Corrosão provocada por carbonatação	53
4.4.3	Ensaio para avaliar a profundidade de carbonatação	54
4.5	TÉCNICAS QUE CONSTATAM E AVALIAM A CORROSÃO	54
4.5.1	Velocidade de Corrosão	55
4.5.2	Potencial de Corrosão (E_{corr})	57
4.5.3	Resistividade	58
	CAPÍTULO V – MATERIAIS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL	60
5.1	CIMENTO	60
5.2	AREIA	60
5.3	BRITA	61
5.4	ESCÓRIA DE ACIARIA ELÉTRICA (EAF)	62
5.5	ÁGUA	62
5.6	VARIÁVEIS DA PESQUISA EXPERIMENTAL	62
5.7	CORPOS-DE-PROVA	65
5.8	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	67

5.8.1	Expansibilidade	70
5.8.1.1	Metodologia a ser Utilizada para o Ensaio de Expansibilidade	72
5.8.2	Dosagem dos Materiais	73
5.8.3	Produção e Preparo dos Corpos-de-Prova	74
5.8.4	Consistência (Abatimento do Tronco de Cone)	75
5.8.5	Resistência a Compressão	76
5.8.6	Resistência a Tração por Compressão Diametral	77
5.8.7	Módulo de Deformação	79
5.8.8	Profundidade de Carbonatação	81
5.8.9	Resistência à Penetração de Cloretos	82
5.8.10	Medidas Eletroquímicas	83
CAPÍTULO VI – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS		85
6.1	ANÁLISE QUÍMICA DA ESCÓRIA DE ACIARIA ELÉTRICA UTILIZADA	85
6.2	EXPANSIBILIDADE – POR AGULHAS DE LE CHATELIER	86
6.3	ENSAIO DE ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE	88
6.4	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	89
6.5	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	95
6.6	MÓDULO DE DEFORMAÇÃO	97
6.7	CARBONATAÇÃO	99
6.8	PENETRAÇÃO DE CLORETOS	106
6.8.1	Potencial de corrosão	106
6.8.2	Resistência de polarização icorr (Intensidade de Corrosão)	109

6.8.3	Resistividade do Concreto	112
CAPÍTULO VII – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS		116
7.1	CONCLUSÕES	116
7.2	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	118
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		120

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 -	Comparativa das características do clínquer Portland e do cimento Portland em relação à escória de aciaria LD ou a oxigênio e à escória de alto-forno (Taylor, 1997)	10
Tabela 2.2 -	Características da granulação seca e úmida (FEATHERSTONE, 1998)	17
Tabela 2.3 -	Composição química básica das escórias LD geradas em alguns países (LIMA, 1999)	19
Tabela 2.4 -	Composição química básica das escórias de aciaria de forno elétrico geradas em alguns países (TUBINO GEYER et al., 1994)	19
Tabela 2.5 -	Comparação das escórias produzidas por vários tipos de fornos (Filev, s.d.)	20
Tabela 2.6 -	Propriedades físicas e mecânicas das escórias de aciaria elétrica (MASUERO, 2001)	22
Tabela 3.1 -	Campo de aplicação de escórias de diferentes origens (BRUN & YUAN, 1994)	26
Tabela 4.1 -	Características das espécies químicas isoladas antes e após a hidratação (Weast, 1971)	37
Tabela 4.2 -	Produtos formados na oxidação do ferro metálico presente na escória de aciaria (Machado, 2000)	42
Tabela 4.3 -	Transformações do C ₂ S em função da temperatura de resfriamento (Taylor, 1997)	43
Tabela 4.4 -	Classificação do grau de corrosão de acordo com os valores de i_{corr}	56
Tabela 4.5 -	Critérios de avaliação da probabilidade de corrosão pelo potencial de corrosão (ASTM C-876)	58
Tabela 4.6 -	Critérios de avaliação da probabilidade de corrosão pela resistividade (CEB 192)	59
Tabela 5.1 -	Característica do agregado miúdo	60
Tabela 5.2 -	Análise granulométrica do agregado miúdo utilizado	61
Tabela 5.3 -	Característica do agregado graúdo	61

Tabela 5.4 -	Análise granulométrica do agregado graúdo utilizado	61
Tabela 5.5 -	Relação a/c (água/cimento) e teor de substituição de cada corpo-de-prova	64
Tabela 5.6 -	Quantitativo de Corpos-de-Prova x Experimentos	66
Tabela 5.7 -	Proporcionamento dos materiais utilizados na confecção dos concretos, em massa	73
Tabela 6.1 -	Características da escória de aciaria utilizada nos ensaios atuais	85
Tabela 6.2 -	Resultados absolutos dos ensaios com agulhas de Le Chatelier	86
Tabela 6.3 -	Ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone realizado conforme a NBR 7223 (ABNT 1992)	89
Tabela 6.4 -	Resistência à compressão dos corpos-de-prova	90
Tabela 6.5 -	Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias	96
Tabela 6.6 -	Módulo de deformação de concreto com 28 dias (GPa)	98
Tabela 6.7 -	Resultados do ensaio de carbonatação	102
Tabela 6.8 -	Resultados do potencial de corrosão	107
Tabela 6.9 -	Resultados de resistência de polarização i_{corr} (Intensidade de Corrosão)	110
Tabela 6.10 -	Critérios de avaliação da corrosão pela resistividade elétrica. Segundo o CEB 192	113
Tabela 6.11 -	Resultados de resistência ôhmica	113

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 -	Aplicações diversas da escória de aciaria (PENA, 2004)	2
Figura 1.2 -	Vista parcial de uma concreteira na região de Juiz de Fora, podendo-se notar a presença de dois silos de aglomerantes, um CP V ARI RS e o outro de escória de alto-forno (POLISSENI, 2005)	5
Figura 2.1 -	Esquema simplificado da geração de escórias na aciaria elétrica (EAF) e a oxigênio (LD) (GEYER et al, 1996)	11
Figura 2.2 -	Forno elétrico a arco	12
Figura 2.3 -	Conversor a oxigênio	12
Figura 2.4 -	Representação esquemática do processo de refino do aço por meio de forno elétrico a arco (MASUERO, 2001)	13
Figura 2.5 -	Processo de refino do aço através de conversor LD (MOORE e MARSHALL apud MASUERO, 2001)	14
Figura. 2.6 -	Resfriamento ao ar da escória de aciaria: pequenos jatos de água arrefecendo a escória (POLISSENI, 2005)	15
Figura 2.7 -	Variação da composição química da escória de aciaria elétrica oxidada em função da corrida de produção (USIBA, 1998 apud MACHADO, 2000)	21
Figura 2.8 -	Representação esquemática do tetraedro Si-O e estrutura da sílica no estado (a) sólido (b) líquido (MILLS apud MASUERO, 2001)	23
Figura 2.9 -	Representação esquemática da estrutura após adição sucessiva de cátions (JEFFES apud MASUERO, 2001)	24
Figura 3.1 -	Usos correntes e usos potenciais da escória de aciaria (TUBINO GEYER, 1997)	32
Figura 5.1 -	Escória de aciaria elétrica e micaxisto. (Lado esquerdo – Micaxisto; Lado direito – Escória)	62
Figura 5.2 -	Perspectiva do corpo-de-prova prismático	63
Figura 5.3 -	Armadura com os espaçadores	64

Figura 5.4 -	(a) Fôrma preenchida com concreto. (b) Vigas de concreto	65
Figura 5.5 -	Moldagem dos CPs cilíndricos	66
Figura 5.6 -	CPs cilíndricos	67
Figura 5.7 -	Fluxograma de execução dos ensaios	69
Figura 5.8 -	Agulha de Le Chatelier (NBR 11.582, ABNT, 1991)	70
Figura 5.9 -	Agulha de Le Chatelier (PENA, 2004)	71
Figura 5.10 -	Esquema de metodologia - Expansibilidade	73
Figura 5.11 -	Mistura dos materiais na betoneira: agregado graúdo (brita – micaxisto, escória de aciaria elétrica ou ambos), parte da água junto com o plastificante, quando necessário.	74
Figura 5.12 -	(a) Cone de Abrams sobre a chapa nivelada. (b) Demais instrumentos (haste, colher, régua ou trena). (c) Adensamento. (d) Retirada do cone. (e) Medição. (UEPG)	75
Figura 5.13 -	CPs capeados com enxofre para ensaio	77
Figura 5.14 -	Disposição do corpo-de-prova 0(NBR 7222, ABNT 1994)	78
Figura 5.15 -	Relação tensão-deformação elástica (à esquerda) e plástica (à direita) (VAN VLACK, 1970)	79
Figura 5.16 -	Tanque de molhagem com solução de 2% de NaCl	83
Figura 5.17 -	GECOR6 – aparelho utilizado para realizar leituras eletroquímicas nas vigas de concreto	84
Figura 6.1 -	Agulhas de Le Chatelier – Período de cura	87
Figura 6.2 -	Seis dias após o período de cura inicial ($20 \pm 4h$)	87
Figura 6.3 -	Medição de abatimento	88
Figura 6.4 -	Relatório da equação de regressão gerada pelo programa TS-Sisreg	91
Figura 6.5 -	Análise de resíduos do modelo de regressão	91
Figura 6.6 -	Modelo de regressão obtido após a eliminação dos dados discrepantes	92

Figura 6.7 -	Resistência à compressão x Idade ($a/c = 0,30$)	93
Figura 6.8 -	Resistência à compressão x Idade ($a/c = 0,52$)	93
Figura 6.9 -	Resistência à compressão x Idade ($a/c = 0,80$)	94
Figura 6.10 -	Resistência à compressão x Teor de substituição	94
Figura 6.11 -	Resistência à tração por compressão diametral x Teor de substituição	96
Figura 6.12 -	a/b - Medição da deformação transversal	97
Figura 6.13 -	Módulo de deformação x Relação água/cimento	98
Figura 6.14 -	Aplicação de fenolftaleína	100
Figura 6.15 -	Leitura da profundidade carbonatada	100
Figura 6.16 -	Profundidade de carbonatação medida em três pontos diferentes dos corpos-de-prova	101
Figura 6.17 -	Profundidade máxima de carbonatação	101
Figura 6.18 -	Relatório da melhor equação – utilizando-se todas as variáveis	104
Figura 6.19 -	Relatório da melhor equação – desconsiderando Teor de substituição	105
Figura 6.20 -	Potenciais de corrosão versus tempo para vigas V1*, V2 e V3 que têm relação a/c de 0,30	107
Figura 6.21 -	Potenciais de corrosão versus tempo para vigas V4*, V5 e V6 que têm relação a/c de 0,52	108
Figura 6.22 -	Potenciais de corrosão versus tempo para vigas V7*, V8 e V9 que têm relação a/c de 0,80	108
Figura 6.23 -	Velocidade de corrosão (resistência de polarização) versus tempo. Vigas V1*, V2 e V3 têm relação a/c de 0,30	110
Figura 6.24 -	Velocidade de corrosão (resistência de polarização) versus tempo. Vigas V4*, V5 e V6 têm relação a/c de 0,52	111
Figura 6.25 -	Velocidade de corrosão (resistência de polarização) versus tempo. Vigas V7*, V8 e V9 têm relação a/c de 0,80	111

Figura 6.26 -	Resistência ôhmica versus tempo. Vigas V1*, V2 e V3 têm relação a/c de 0,30	114
Figura 6.27 -	Resistência ôhmica versus tempo. Vigas V4*, V5 e V6 têm relação a/c de 0,52	114
Figura 6.28 -	Resistência ôhmica versus tempo. Vigas V7*, V8 e V9 têm relação a/c de 0,80	115

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

DEMET – Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS

EAF – Electric Arc Furnace Slag

F = Fe_2O_3

FEA – Forno Elétrico a 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

RILEM – Réunion Internationale des Laboratoires D'essais et de Recherche sur les Matériaux et les Constructions

S = SiO_2

SANEAGO – Saneamento de Goiás S/A

UFG – Universidade Federal de Goiás

RESUMO

A crescente demanda por agregados para usos em engenharia estimulou a procura por materiais alternativos. Desta forma, a construção civil passou a ser potencialmente uma grande consumidora de resíduos provenientes de outras indústrias, tornando-se uma grande usina recicladora.

A utilização de subprodutos traz benefícios ambientais bastante expressivos em relação à degradação do meio ambiente, como por exemplo, a menor deposição de resíduos em aterros, a diminuição da extração predatória de recursos naturais e a exploração de jazidas de agregados.

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 a 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 específico demonstrar, por meio de estudos, a potencialidade do uso das escórias de aciaria elétrica (escórias FEA) como agregado graúdo.

Foram realizados ensaios de expansibilidade, resistência à compressão, à tração por compressão diametral, módulo de deformação e ensaios relacionados à durabilidade, tais como: intensidade de corrente de corrosão, potencial de corrosão, resistência ôhmica e profundidade de carbonatação.

Após o estudo realizado observou-se a semelhança dos resultados dos concretos confeccionados com escória de aciaria elétrica com os concretos confeccionados com agregados convencionais, no caso o micaxisto. Podem-se constatar melhorias nas propriedades dos concretos produzidos com escória, tais como: aumento em suas resistências (compressão / tração) e aumento do módulo de deformação. No que diz respeito à durabilidade verificou-se, de uma maneira geral, que a substituição dos agregados, convencional por siderúrgico, não influenciaram no desempenho dos concretos.

ABSTRACT

The increasing demand for aggregate for uses in engineering stimulated the search for alternative materials. In this way, the civil construction potentially started to be a great consumer of residues from other industries, becoming a great recycle plant.

The use of by-product, brings great environmental benefits in relation to the degradation of the environment, as for example, less settlement of residues in earth fill, the reduction of extraction of natural resources, and the exploration of aggregate ores.

Steel plants from around the world have a common 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 aims to demonstrate related studies to the use of steel slags (EAF slags) in electric steel plants as coarse aggregate.

Expansibility of the steel slag tests had been carried through, compressive strength, tensile strength for diametrical compression, related modulus of deformation and durability tests, such as: intensity of corrosion, potential of corrosion, ohmic resistivity and depth of carbonation.

After this, it was observed the similarity of the results between the concrete made with steel slag and the concrete made with conventional aggregates, natural aggregate known as mica schist. It was observed improvements in the properties of the concrete with steel slag, such as: increase in its strength (compressive / tensile) and increase of the modulus of deformation. Concerning the durability, it was noted, in a general way, that the substitution of the aggregates, conventional for siderurgical, has not influenced in the performance of the concrete.

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(GPT/BC/UFG)

F224c Faria, Ricardo Andrade Fernandes
Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas e da durabilidade de concretos com escória de aciaria elétrica (EAF) como agregado graúdo / Ricardo Andrade Fernandes Faria. – 2008. xx, 125 f.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Rejane Maria Candiota Tubino.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2007

Bibliografia: f. 120-125.

1. Concreto – Aço – Reaproveitamento 2. Concreto – Aço – Resíduos industriais – Reaproveitamento 3. Concreto – Durabilidade 4. Concreto – Resistência I. Tubino, Rejane Maria Candiota II. Universidade Federal de Goiás. **Escola de Engenharia Civil**. III. Título.

CDU: 666.97.01-034.14

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A crescente demanda por agregados para usos em engenharia estimulou a procura por materiais alternativos. Desta forma, a construção civil passou a ser potencialmente uma grande consumidora de resíduos provenientes de outras indústrias, tornando-se uma grande usina recicladora.

A construção civil é um grande gerador de resíduos. O volume de entulho de construção e demolição gerado é até duas vezes maior que o volume de lixo sólido urbano. Para se citar um exemplo, em São Paulo, o volume de entulho gerado é de 2500 caminhões por dia (JOHN, s.d.).

Assim, a reciclagem de resíduos, próprios ou gerados pelos demais setores industriais, torna-se uma das tendências para diminuição do impacto ambiental deste setor, particularmente diminuindo o consumo de recursos naturais.

Diferentemente das escórias de alto-forno, que são utilizadas como matéria-prima para a fabricação de cimento, as escórias de aciaria têm seu emprego limitado como material de construção civil, não tendo destinação bem definida e sendo, às vezes, acumuladas nos pátios de estocagem (RAPOSO, 2005). Na Europa, de uma produção anual de cerca de 12 milhões de toneladas de escória de aciaria, apenas 65% desse total são aproveitados, sendo o restante enviado a aterros industriais como rejeito (MOTZ, GEISELER, 2001).

Por outro lado, a utilização de subprodutos traz benefícios ambientais bastante expressivos em relação à degradação do meio ambiente, como por exemplo, a não deposição de resíduos em aterros, a diminuição da extração predatória de recursos naturais, e a exploração de jazidas de agregados.

A escória de aciaria é um dos resíduos sólidos de maior volume produzido durante a fabricação do aço. De acordo com John (2002), para cada tonelada de aço produzida, as siderúrgicas brasileiras produzem cerca de 150 kg da escória de aciaria, uma mistura de

silicatos de cálcio, óxido de silício, ferrita cálcica, magnésia e traços de numerosos outros minerais, que constituem impurezas.

Além disso, a ampliação do mercado das escórias de aciaria interessa tanto às siderúrgicas quanto à sociedade em geral. As siderúrgicas têm a possibilidade de agregar valor ao seu subproduto, demonstrando compromisso social e com o meio ambiente. Já a sociedade tem a possibilidade de ganhos ambientais e econômicos (PENA, 2004).

Dessa forma, a grande quantidade de escória de aciaria gerada, associada às preocupações ambientais, fizeram com que surgissem muitas aplicações para a escória de aciaria (Figura 1. 1).



Figura 1.1 – Aplicações diversas da escória de aciaria (PENA, 2004).

Dentro desta gama de aplicabilidade das escórias de aciaria, percebe-se uma carência de estudos com relação ao seu reaproveitamento como agregado graúdo.

1.1 Histórico

A primeira utilização de escória siderúrgica data de 1589 (SILVA et al, 1991), com a fabricação de balas de canhão para as tropas do Duque Júlio de Brauschweig.

Como material de construção começou a ser empregado na Inglaterra em 1728, seguida pela Suécia em 1761 (SILVA et al, 1991).

Larriot, em 1774, na Alemanha, foi o primeiro a verificar as propriedades aglomerantes da escória, misturando-a com cal e argila, obtendo um produto semelhante ao cimento fabricado na época.

Em 1862, com o objetivo de facilitar a saída do alto-forno, E. Langen, granulou o material, resfriando-o bruscamente. Verificou que o produto, quando moído e misturado com a cal, apresentava pega e endurecimento dentro da água.

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 o 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). O cimento formado recebeu em 1901 o nome de cimento ferro-portland (CINCOTTO et al, 1990).

No Reino Unido, há registros de utilizações bem sucedidas de escória de aciaria em pavimentação no início da década de 30 (LEDEZMA et al., 1992; GEISELER, 1999; THOMAS, 2000).

Observa-se que existem inúmeras fontes a serem pesquisadas relacionadas à escória de alto-forno podendo também ser denominada de escória de refino oxidante. No entanto, o escopo deste trabalho refere-se à escória de aciaria ou escória de refino redutor cujas fontes históricas são difíceis de serem coletadas, em função de poucas pesquisas relacionadas à mesma (escória de aciaria).

1.2 Reaproveitamento de Resíduos

Muitos setores produtivos da sociedade, que utilizam qualquer tipo de matéria-prima como insumo para produzir o seu produto, geram um determinado tipo de resíduo, que é inerente ao processo de produção.

Os gastos com o manejo do resíduo (transporte, bota-fora, sistema de segurança, cumprimento de legislação ambiental, entre outros) geram para a indústria significativos desembolsos financeiros, bem como desgastes de ordem psicológica dos profissionais diretamente envolvidos com o problema, além de, em inúmeros casos, gerarem conflitos desta indústria com populações vizinhas que estão sendo afetadas diretamente pela poluição do resíduo (contaminação do ar, da água, do lençol freático, dos rios, além de poluição visual, e inúmeros outros).

Desta forma, nos últimos anos, é crescente a tendência do setor produtivo, que gera um determinado resíduo, ofertar este resíduo a outro setor produtivo que poderá utilizá-lo como insumo, minimizando assim um de seus problemas no processo de produção.

O setor da construção civil, por consumir grandes quantidades de materiais, é vislumbrado como um setor que tem grande potencial para consumir os resíduos gerados por outros setores.

Esta parceria já vem acontecendo entre o setor siderúrgico e o setor da construção civil. As escórias de alto-forno, geradas no processo de fabricação do ferro-gusa, são consumidas em larga escala para a produção dos cimentos Portland composto (CP II E) e de alto-forno (CP III). O mesmo ocorre com as cinzas volantes geradas nas usinas termoeletricas, que são utilizadas na produção do cimento Portland pozolânico (CP IV) e Portland composto (CP II Z).

Outro fato inovador vem ocorrendo especificamente com as empresas que prestam serviços de concretagem, as concreteiras, onde é comum ser observado nas usinas dois silos de aglomerantes, ou seja, um de cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI RS) e outro de escória de alto-forno, destinados à produção de concretos (Figura 1.2).



Figura 1.2 – Vista parcial de uma concreteira na região de Juiz de Fora, podendo-se notar a presença de dois silos de aglomerantes, um CP V ARI RS e o outro de escória de alto-forno (POLISSENI, 2005).

A utilização da escória de aciaria, sozinha ou combinada, como agregado em revestimentos asfálticos já vem sendo realizada desde 1970 em vários países, como Estados Unidos, Inglaterra, Japão, Canadá, França, Alemanha, Polônia e Rússia. No Brasil, as cidades de Vitória e Vila Velha, no estado do Espírito Santo, utilizam este rejeito nas camadas de seus pavimentos e em vias não pavimentadas desde de 1980 (SILVA, 1994).

1.3 Justificativa do Tema

Segundo LYLE (1994), o homem começa a tomar consciência que o desenvolvimento industrial convencional praticado desde a revolução industrial, iniciada no século XIX, é inerentemente insustentável. Sendo assim, cria-se um grande paradoxo para a humanidade: como conciliar “desenvolvimento tecnológico” com “desenvolvimento sustentável”?

Querendo ou não, existe a necessidade de atendimento às demandas crescentes da população mundial e de buscar soluções para redirecionar os desequilíbrios ecológicos causados pelo homem à natureza (LYLE, 1994).

Uma alternativa para o problema de geração de resíduos seria a sua reciclagem, que possibilita a conservação de recursos naturais e permite uma economia de energia, sobretudo na área de construção civil, que é um dos setores que mais consome recursos

naturais. Para se ter uma idéia, a substituição de parte do clínquer por cinzas volantes e escórias possibilitou uma redução de 28% no consumo de combustível na indústria cimenteira (YAMAMOTO et al., citados por JOHN e AGOPYAN, 2000).

Desta forma, 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 (TUBINO GEYER, 2001).

Porém, a escória de aciaria elétrica gerada pelo setor siderúrgico ainda não encontrou o seu espaço de utilização no mercado. A atribuição a esse material de desenvolver instabilidade volumétrica e ausência de propriedades hidráulicas, associado à carência de estudos e pesquisas que efetivamente comprovem que tais problemas possam ser solucionados por meio do uso de tecnologias inovadoras, tem deixado de lado a oportunidade do uso deste tipo de escória pelo setor da construção civil.

Isoladamente são vistas ações de empresas que utilizam a escória de aciaria em rodovias e ferrovias.

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 (TUBINO GEYER, 2001).

Assim sendo, é oportuno o estudo das potencialidades de utilização da escória de aciaria, evitando o seu descarte linear em bota-fora e agregando valor comercial a este produto.

Segundo TUBINO GEYER (2001), 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 a oxigênio tenha uma solução de aproveitamento melhor do que vem sendo feito atualmente.

É neste contexto, buscando uma destinação final a este tipo de escória de aciaria elétrica e ainda tentando desenvolver uma forma de adequar o desenvolvimento tecnológico ao desenvolvimento sustentável, que desenvolve-se esta pesquisa.

1.4 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo geral demonstrar estudos relacionados à utilização das escórias de aciaria elétrica (EAF) como agregado graúdo.

Busca-se dessa forma, verificar a viabilidade técnica da substituição do agregado convencional por escória de aciaria, visando uma maior utilização deste resíduo abundantemente gerado pelas siderúrgicas.

Desta forma, os objetivos específicos desta pesquisa referem-se a:

- verificar a expansão das escórias de aciaria em estudo, por meio de ensaio de expansibilidade, avaliando-se o fator tempo de estocagem, que contribui para a estabilidade deste;
- avaliar o desempenho mecânico do material por meio de ensaios de resistência à compressão, à tração por compressão diametral e módulo de deformação;
- definir a viabilidade técnica da utilização das escórias de aciaria na confecção de concreto, avaliando, sempre que possível, questões relativas à durabilidade do concreto, dentre elas verificar a probabilidade de corrosão das armaduras, resistência de polarização i_{corr} , resistividade do concreto e o tempo de despassivação da armadura pela carbonatação;
- inserir dados bibliográficos e experimentais aos estudos já existentes no que se refere à escória de aciaria, a fim de fornecer subsídios para futuras pesquisas, bem como possíveis aplicações deste resíduo;
- fornecer informações às siderúrgicas com intuito de que as mesmas possam melhor reaproveitar estas escórias (de aciaria), melhorando assim as condições ambientais.

1.5 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação é composta de oito capítulos. Neste primeiro capítulo, pôde-se introduzir a pesquisa, apresentando a justificativa do trabalho e os seus objetivos.

O capítulo 2 – ESCÓRIA DE ACIARIA apresenta a geração desta e de outras escórias de aciaria elétrica e à oxigênio, tipos de resfriamento, caracterização das escórias de aciaria (química e física) e reatividade das mesmas.

No capítulo 3 – REAPROVEITAMENTO DA ESCÓRIA DE ACIARIA descreve a geração de resíduos de diversos setores produtivos da sociedade e que estes apresentam gastos com o seu manejo. Faz-se também uma revisão bibliográfica a respeito das possibilidades já existentes de utilização desta escória em diversos campos, tais como Ferroviário, Rodoviário, Construção Civil, Agricultura, Fabricação de Cimento e vários outros

No capítulo 4 – PROBLEMAS NA UTILIZAÇÃO DA ESCÓRIA, este apresenta um dos maiores problemas para a utilização das escórias de aciaria, o fenômeno da expansão. Apresenta também fatores que propiciam a corrosão nas armaduras e técnicas que avaliam a mesma.

No capítulo 5 – MATERIAIS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL é descrito os diversos materiais utilizados nesta pesquisa, bem como os ensaios e métodos empregados para a obtenção dos resultados.

No capítulo 6 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS - são apresentados os resultados obtidos durante o programa experimental, bem como as análises e discussões.

As conclusões, considerações finais e referências bibliográficas são apresentadas no capítulo 7, fazendo assim o fechamento do trabalho.

CAPÍTULO II

ESCÓRIA DE ACIARIA

Os rejeitos siderúrgicos são oriundos do processo industrial para beneficiamento do aço. Dentre outros, é possível citar como rejeito da indústria do aço: escória de alto-forno, lama de alto-forno, escória de dessulfuração, escória de aciaria elétrica (EAF), lama grossa de aciaria, lama fina de aciaria e carepa (TUBINO GEYER, 2001). As escórias são os resíduos de maior geração (mais de 60% da geração de resíduos) neste tipo de processo.

2.1. Origem

As escórias de aciaria são geradas no processo de fabricação do aço, podendo ser oriundas de diferentes processos. Destacam-se as geradas nos conversores a oxigênio (LD) e em fornos elétricos a arco (EAF).

As escórias de conversores LD ou aciarias a oxigênio – as iniciais referem-se às aciarias austríacas Linz e Donawitz (LD), que utilizaram pela primeira vez este processo em escala industrial no mundo – são formadas durante as operações de refino do ferro-gusa (RUBIO e CARRETERO apud MOURA, 2000).

As principais características da escória de aciaria em comparação com o clínquer de cimento Portland, o cimento Portland e a escória de alto-forno são mostradas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Tabela comparativa das características do clínquer Portland e do cimento Portland em relação à escória de aciaria LD ou a oxigênio e à escória de alto-forno (Taylor, 1997).

Produto	Características Principais e Composições
Clínquer de cimento Portland	C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF *
	Elevada atividade hidráulica
Cimento Portland	C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF + Sulfatos
	Elevada atividade hidráulica
Escória de Alto-Forno	Totalmente vítrea
	Óxidos: SiO_2 , CaO , Fe_2O_3 , Al_2O_3
	Reativa desde que sejam utilizados ativadores como Cal (CaO - do cimento Portland), silicatos e carbonatos.
Escória de Aciaria (LD)	Baixo teor de C_2S
	Não vítrea
	Baixa hidraulicidade

(*) Obs.: Na química do cimento $C = CaO$, $S = SiO_2$, $A = Al_2O_3$ e $F = Fe_2O_3$

2.2. Geração e Beneficiamento das Escórias

A geração das escórias pode ser tanto na fusão redutora dos minérios para obtenção do ferro-gusa, como na etapa subsequente, na produção do aço, resultando nas escórias de alto-forno e aciaria, respectivamente.

Segundo Machado (2000), os diferentes processos utilizados na produção ou refino do aço, influenciam a composição química e as demais propriedades físico-químicas da escória. Esses processos baseiam-se nas reações de oxidação de elementos, tais como o carbono, o manganês, o fósforo e a sílica, até os níveis especificados no produto final.

A Figura 2.1 mostra, simplificada, os principais processos de produção do aço e as respectivas etapas de geração de escórias.

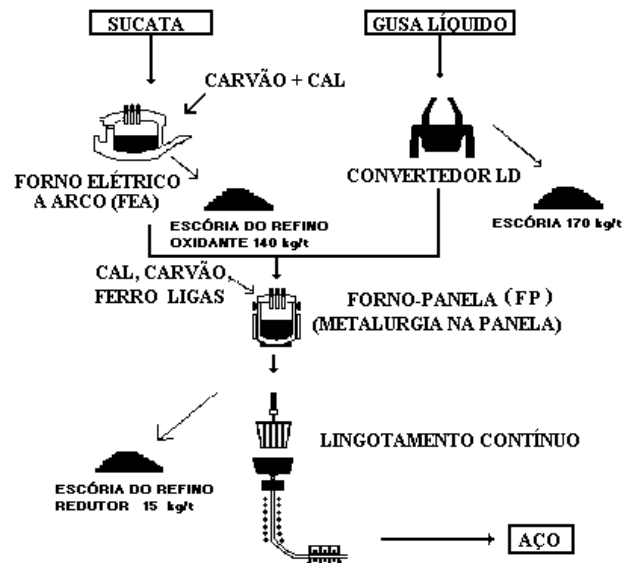


Figura 2.1 – Esquema simplificado da geração de escórias na aciaria elétrica (FEA) e a oxigênio (LD) (GEYER et al, 1996).

A grande variação presente na composição química e mineralógica da escória de aciaria é atribuída aos principais fatores: a qualidade da matéria-prima, ao processo de produção empregado para a obtenção do aço, a forma de resfriamento e ao manejo de sua estocagem nos bota-foras (MONTGOMERY e WANG, 1991; COOMARASAMY e WALSAK, 1995, ambos citados por POLISSENI, 2005).

Existem basicamente três processos de produção do aço, caracterizados pelo emprego de diferentes fornos de refino: o Siemens-Martin (OH), o conversor a oxigênio (LD ou BOF) e o forno elétrico a arco (FEA).

No processo do tipo OH, praticamente em desuso, adiciona-se à sucata metálica o calcário e o minério de ferro e injeta-se oxigênio para provocar a fusão e agitação do banho metálico. Na fase do refino, adiciona-se o CaO principalmente para remoção do fósforo. A produtividade deste processo é baixa, da ordem de 300 t de aço em um período de 5 a 14 horas (MACHADO, 2000).

A aciaria básica a oxigênio (BOF) foi desenvolvida no início da década de 1950, pela siderúrgica austríaca Vöest-Alpine. O principal insumo deste processo é o ferro-gusa, produzido em altos-fornos. No ano 2000, nada menos que 58,6% de todo o aço produzido no mundo utilizou-se da tecnologia conversor básico a oxigênio (LD ou BOF – Basic Oxygen Furnace). Já a aciaria elétrica, embora seja um processo bem antigo (inventada por Heroult na França, em 1899), somente teve uma difusão considerável a partir de meados da década de 1960. A aciaria elétrica, que utiliza a sucata como insumo principal, vem apresentando uma crescente difusão em termos mundiais. Em 1970, ela representava 16,3% da produção, tendo evoluído para 22,0% (1980), 27,5% (1990) e ainda para 33,0% (2000) (PAULA, 2001).

Os fornos elétricos a arco (FEA) vêm sendo utilizados para produção, principalmente, de produtos longos, como por exemplo vergalhões para a construção civil e barras e perfis para a indústria metal mecânica. Os conversores a oxigênio (LD ou BOF) são tipicamente empregados para a produção de grandes quantidades de aço, destacando-se na produção de produtos planos, como por exemplo chapas para a indústria automobilística (MASUERO, 2001). As Figuras 2.2 e 2.3 mostram estes dois tipos de fornos.

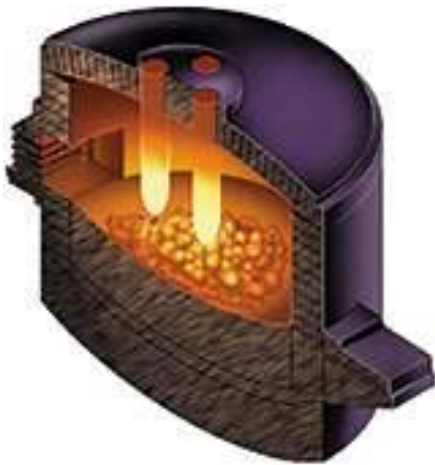


Figura 2.2 – Forno elétrico a arco



Figura 2.3 – Conversor a oxigênio

Da mesma forma que os fornos, as escórias de aciaria são classificadas basicamente em escória de forno elétrico, formada quando da transformação de sucata metálica em aço num forno elétrico a arco e escória de conversor, formada quando da transformação do ferro-gusa em aço (MASUERO, 2001).

As operações de carregamento, fusão, refino oxidante e de vazamento no FEA estão, esquematicamente, representadas na Figura 2.4.

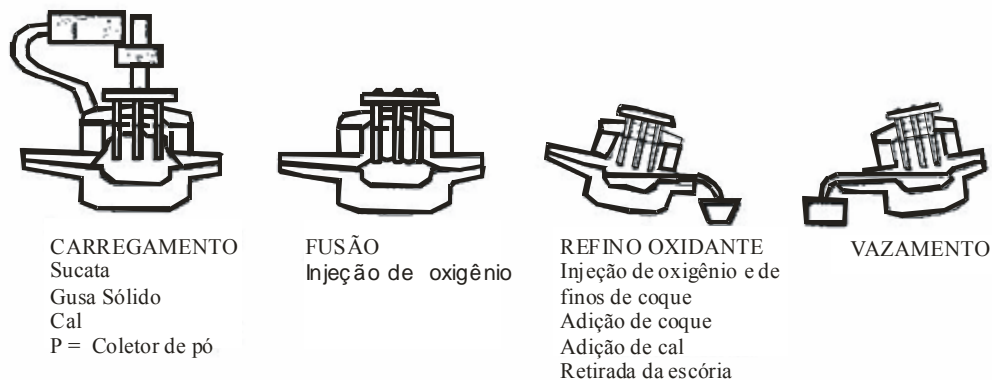


Figura 2.4 – Representação esquemática do processo de refino do aço por meio de forno elétrico a arco (MASUERO, 2001).

A escória de EAF é chamada de escória de refino oxidante. Esta escória é produzida durante a fusão da carga sólida, com a cal adicionada e pela descarburagem com oxigênio do aço no estado líquido, que provoca a oxidação de diversos elementos do banho (MASUERO, 2001).

O aço líquido possui uma densidade duas vezes maior que a escória líquida. A escória, sendo mais leve, flutua na superfície do aço líquido a aproximadamente 1650°C. No final do processo de fusão, o forno é basculado e a escória líquida escorre para um leito de escória, no qual solidifica (MASUERO, 2001).

A Figura 2.5 mostra esquematicamente a seqüência do refino do aço em um conversor LD.



Figura 2.5 – Processo de refino do aço através de conversor LD (MOORE e MARSHALL apud MASUERO, 2001).

O aço líquido vazado no forno de fusão é conduzido para uma estação de refino secundário, que pode ser um forno-panela. Há a formação de uma nova escória, a partir da adição de desoxidantes e de cal – chamada de escória de refino redutor – que tem como objetivo a eliminação do oxigênio e do enxofre do aço líquido e o ajuste da composição do aço, pela adição de ferro-ligas (MASUERO, 2001).

No processo LD o gusa líquido, a sucata metálica e o fundente (CaO) são carregados no conversor. O oxigênio soprado a alta pressão provoca uma violenta reação de oxidação, fazendo com que as temperaturas locais sejam da ordem de 2500 a 3000 °C. Parte do silício, fósforo e ferro gusa líquido se oxidam, os quais combinando com o CaO, formam a escória de conversor LD. O aço líquido e a escória separam-se pela diferença de massa específica e são vazados do conversor, separadamente (MASUERO, 2001).

2.3. Tipos de Resfriamento das Escórias

Existem três métodos de resfriamento da escória, gerando características físicas distintas: resfriamento ao ar, resfriamento por pelletização e resfriamento brusco com água ou granulada.

2.3.1. Resfriamento ao ar

Segundo Gumieri (2002), neste processo a escória é vertida no pátio de resfriamento, no qual naturalmente se solidifica na forma cristalina (Figura 2.6). Quando sua temperatura atinge aproximadamente 600 °C pode-se acelerar o resfriamento final mediante jatos de baixa vazão de água. Depois de solidificada, a escória é fragmentada e levada para a planta de beneficiamento, onde ocorre a britagem e a separação magnética.

As escórias de aciaria resfriadas ao ar geralmente apresentam coloração cinza escura, têm maior densidade, resistência mecânica e maior coeficiente de atrito em relação às escórias de alto-forno. Normalmente, apresentam boa resistência ao desgaste e ao polimento, tornando-as adequadas ao uso como agregados em rodovias. As escórias de aciaria geralmente sofrem resfriamento lento ao ar (GUMIERI, 2002).

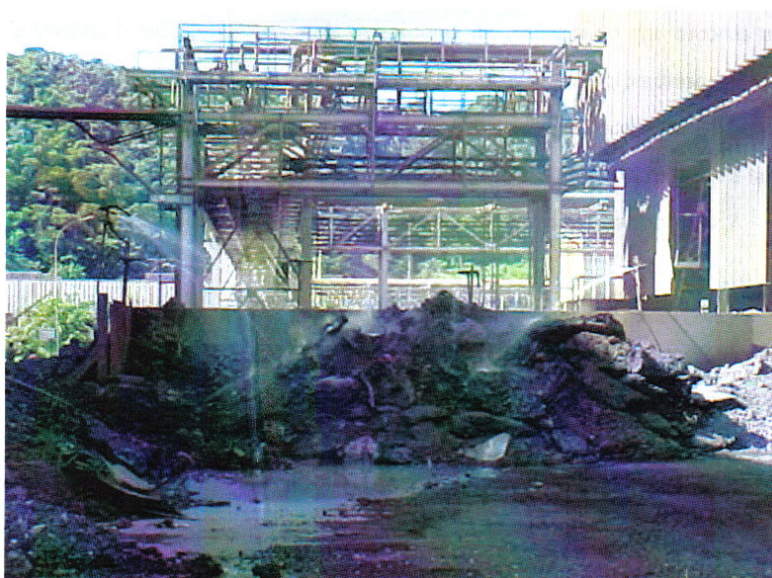


Figura 2.6 – Resfriamento ao ar da escória de aciaria: pequenos jatos de água arrefecendo a escória (POLISSENI, 2005).

2.3.2. Resfriamento por pelotização

No processo de resfriamento por pelotização ou resfriamento controlado com água, a escória é resfriada rapidamente pela aplicação de uma quantidade controlada de água ou vapor. A escória líquida cai sobre um cilindro dentado giratório, refrigerado por jatos de água. Geralmente, a escória possui forma esférica, apresentando estrutura alveolar no seu

interior, devido à incorporação de gases durante o resfriamento, tornando sua densidade menor em relação à escória resfriada lentamente ao ar. A escória resfriada por este processo é conhecida como escória expandida (GUMIERI, 2002).

De acordo com Masuero (2001), por meio do controle do processo de refrigeração, podem ser formadas pelotas cristalinas, as quais são consideradas como agregados.

Segundo Polisseni (2005), depois de britada e separada em diferentes granulometrias, é utilizada como agregado leve em concretos (IBS, 1999).

2.3.3. Resfriamento brusco

Neste processo, a escória líquida é resfriada bruscamente, sendo fragmentada por jatos de água com alta vazão e pressão (10 m³ de água / tonelada de escória) sob a escória ainda líquida. O choque entre a escória e a água provoca o resfriamento brusco. Nestas condições, a escória normalmente se solidifica na forma vítrea, apresentando estrutura amorfa. Segundo Polisseni (2005) com este processo evita-se a recristalização da fase vítrea e a precipitação de fases cristalinas, tais como a mervinita. As escórias resfriadas por este processo são conhecidas como escórias granuladas. Geralmente possuem baixa densidade e boas propriedades hidráulicas, ou seja, endurece quando do seu contato com a água (IBS, 1999).

As escórias de alto-forno são resfriadas por este processo (GUMIERI, 2002).

Featherstone (1998) apresenta um sistema de resfriamento das escórias por meio do processo de granulação por via seca e compara este processo com o processo de resfriamento brusco com água (granulação). Durante o processo de granulação da escória de alto-forno por jatos de água, grandes quantidades de vapor d'água, contendo H₂S e SO₂, são gerados e lançados ao meio ambiente, o que não ocorre com a granulação via seca, como mostra a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Características da granulação seca e úmida (FEATHERSTONE, 1998).

CRITÉRIOS	MÉTODOS DE GRANULAÇÃO	
	SECO	ÚMIDO
Investimento de Capital	Alto	Médio
Custo de Operação	Alto	Baixo
Risco de Operação	Alto	Baixo
Simplicidade do Processo	Complexo	Simple
Simplicidade de Operação	Complexo	Simple
Resistência do Produto	Média	Alta
Resistência do Cimento	Boa	Boa
Efluentes Gerados	Inexistente (somente ar quente)	Água, Vapor e Produtos Tóxicos

2.4. Processos de Beneficiamento da Escória na Indústria

A escória permanece na baía onde é vertida, por tempo suficiente para solidificar-se e poder ser transportada em caminhão tipo escavadeira, e então é levada para uma área onde é feito o seu completo resfriamento. Nesta região são colocadas tanto as escórias oxidantes como as redutoras. As escórias são depositadas em local dotado de dispositivos aspersores de água, os quais auxiliam no resfriamento da escória. No caso de nem toda a escória ficar exposta à água, pode ocorrer a formação de placas de grandes dimensões. O tratamento de resfriamento dado varia de 48 a 72 horas (MASUERO, 2001).

Decorrido o tempo de resfriamento, inicia-se o processo de beneficiamento das escórias, através da britagem. O sistema é composto por um ciclo fechado de um eletroímã, correias transportadoras e britadores. Inicialmente, a escória passa por uma correia composta por um eletroímã, com a finalidade de recuperar a maior parte possível da fração de fase metálica ainda presente nas escórias. O ferro captado pelo eletroímã é transportado por meio de uma esteira até um britador e armazenado separadamente para posterior reutilização na

aciaria da siderúrgica, sendo chamada de sucata recuperada ou sucata C (TUBINO GEYER, 2001).

Segundo Masuero (2001), por uma questão de processo, as escórias redutoras precisam, no caso de serem britadas, serem misturadas com a escória oxidante, uma vez que se desagregam com muita facilidade, acarretando problemas no momento da britagem. A proporção aproximada da mistura das escórias é de 90% de escória oxidante e 10% de escória redutora, conforme dados da empresa beneficiadora.

A escória britada é levada para área de armazenamento a céu aberto, onde é deixada por um período mínimo de seis meses para ser curada.

2.5. Caracterização das Escórias de Aciaria

2.5.1. Composição Química e Mineralógica

Como mencionado anteriormente, a escória de aciaria é um resíduo originado no processo do refino do aço. Portanto, é constituída por uma mistura de óxidos de cálcio e de magnésio, silicatos de cálcio, ferro metálico, além de outras espécies químicas que aparecem em menor escala.

As escórias de aciaria LD geralmente são formadas predominantemente por óxidos de cálcio, silício e ferro, mas sua composição varia em função do tipo de forno, das matérias-primas utilizadas, e tipos de aço fabricados.

Na Tabela 2.3 está apresentada a composição química básica das escórias LD que são geradas em alguns países do mundo.

Tabela 2.3 – Composição química básica das escórias LD geradas em alguns países (LIMA, 1999).

Composto	Brasil (%)	Austrália (%)	China (%)	Espanha (%)	França (%)
CaO	6 - 45	> 35	4,5	48	47
SiO ₂	7 - 16	< 20	10,5	16	13
Al ₂ O ₃	1 - 4	< 5	2,7	1,2	1
FeO	8 - 30	<25	35	16	25
P ₂ O ₅	-	Traços	1,05	0,5	2

As escórias de aciarias elétricas são geradas na fusão da sucata, em fornos elétricos a arco e nas operações de refino do aço na metalurgia da panela. Essas escórias geralmente são mais homogêneas e possuem menor quantidade de cal livre, em relação às escórias de conversores (MOURA, 2000).

Na Tabela 2.4 está apresentada a composição química básica das escórias de aciarias de forno elétrico que são geradas em alguns países do mundo.

No Brasil, a geração de escória de aciaria, em 1999, foi de 24 milhões de toneladas, sendo 76,5% deste total proveniente do processo LD (TUBINO GEYER, 2001).

Em 2006 foram produzidas 30.910,1 x 10³ toneladas de aço. Aproximadamente 75% pelo processo LD e 25% pelo processo EAF (IBS, 2007).

Tabela 2.4 – Composição química básica das escórias de aciaria de forno elétrico geradas em alguns países (TUBINO GEYER et al., 1994).

Composto	Brasil (%)	EUA (%)	Japão (%)	Itália (%)	Alemanha (%)
CaO	33	41	40	41	32
SiO ₂	18	17	25	14	15
Al ₂ O ₃	6	8	5	7	4
FeO	30	18	19	20	31
MgO	10	10	4	8	10
MnO	5	4	7	6	4
SiO ₂	-	0,2	0,06	0,1	0,1
P ₂ O ₅	-	0,6	-	0,9	1,4

Segundo Machado (2000), no final do processo de refino, após a oxidação do fósforo e do silício, parte da cal e do magnésio presentes na escória precipitam, ao ultrapassar os limites de solubilidade da escória fundida. O fato explica os elevados teores de CaO e MgO reativos presentes na escória. Do ponto de vista mineralógico, as escórias são compostas, em média, por β -silicato dicálcico (larnita), ferrita cálcica, wüstita (FeO), cal livre (CaO), periclásio (MgO), portlandita (Ca(OH)₂) e calcita (CaCO₃), entre outras espécies químicas.

Ainda segundo Machado (2000), além das fases metálicas, a escória contém uma grande quantidade de partículas de aço ou ferro metálico que ficam incorporadas à escória no sopro de oxigênio. Estas partículas também podem contribuir para a instabilidade volumétrica das escórias, através da geração de produtos de corrosão e oxidação, além de reduzirem o rendimento do processo de produção do aço.

Na Tabela 2.5 é mostrada a composição química típica das escórias de aciaria geradas por diferentes processos de produção do aço.

Tabela 2.5 – Comparação das escórias produzidas por vários tipos de fornos (Filev, s.d.)

Tipo		Composição (%)							
		SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe total	MgO	S	MnO	TiO ₂
Escória de conversor (LD)		13.8	44.3	B1.5	17.5	6.4	0.07	5.3	1.5
Escória de Forno elétrico	Esc. Oxidada	19.0	38.0	7.0	15.2	6.0	0.38	6.0	0.7
	Esc. Reduzida	27.0	51.0	9.0	1.5	7.0	0.50	1.0	0.7

Conforme pode ser observado na Tabela 2.5, a composição química das escórias de aciaria varia em função dos processos de produção e da matéria-prima utilizada em cada processo. Para exemplificar, a Figura 2.7 mostra o intervalo de variação da composição química da escória de aciaria elétrica produzida pela USIBA-BA em forno elétrico a arco. Os dados apresentados são referentes a uma seqüência de 12 corridas num dia típico de produção

e destacam a elevada variação na composição química, principalmente quanto aos teores de CaO, SiO₂ e FeO (MACHADO, 2000).

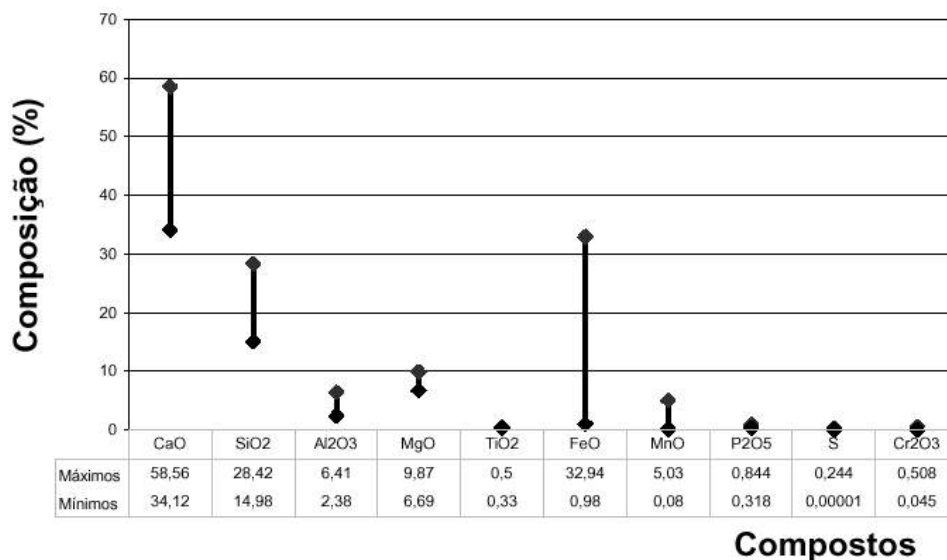


Figura 2.7 – Variação da composição química da escória de aciaria elétrica oxidada em função da corrida de produção (USIBA, 1998 apud MACHADO, 2000).

Assim, pode-se concluir que as escórias de aciaria possuem uma elevada variação na sua composição química e mineralógica decorrentes das variações ocorridas nos processos de refino do aço, da forma de resfriamento da escória e da sua armazenagem após o resfriamento.

2.5.2. Propriedades Físicas e Mecânicas

Na Tabela 2.6 encontram-se as principais propriedades físicas e mecânicas das escórias de aciaria elétrica.

Tabela 2.6 – Propriedades físicas e mecânicas das escórias de aciaria elétrica (MASUERO, 2001).

Propriedades Físicas	
Massa Específica (kg/dm ³)	3,2 - 3,6
Massa Unitária (kg/m ³)	1600 - 1900
Absorção (%)	< 3,0
Propriedades Mecânicas	
Abrasão Los Angeles (ASTM C131)	20 - 25
Ataque por sulfato de sódio	< 12
Dureza (medida pela escala de Moh's)	6 - 7
CBR (California Bearing Ratio)	> 300
Ângulo de Fricção interna	40° - 50°

2.5.3. Reatividade das Escórias

Segundo Masuero (2001) quando a escória é submetida ao resfriamento lento, a sua estrutura é caracterizada por fases cristalinas, as quais, do ponto de vista de aplicação em cimento, não atribuem características hidráulicas. Nesta categoria, encontram-se, na sua maioria, todos os tipos de escória de aciaria, as quais são empregadas como agregados.

Se o resfriamento se der rapidamente, não há tempo para os íons se organizarem ordenadamente e a escória se solidificará como um produto vítreo, apresentando características hidráulicas latentes, sendo extensivamente utilizadas como matéria-prima na fabricação de cimentos. É o sistema usualmente adotado para as escórias de alto-forno (MASUERO, 2001).

A utilização da escória em cimentos dependerá de sua reatividade, a qual é função da sua finura, superfície específica, teor da fase vítrea e sua composição química (TAYLOR, 1997).

De acordo com Masuero (2001), uma série de índices, em função da composição química das escórias, são estabelecidos para estimar a qualidade das escórias com vistas a sua utilização em cimento.

2.5.4. Estrutura das Escórias

Segundo Masuero (2001), as escórias líquidas são constituídas tanto de cátions como Ca^{+2} , Mg^{+2} , Fe^{+2} como de ânions tais como O^{-2} , SiO_4^{-4} , PO_4^{-3} .

Os átomos de silício são conectados a quatro átomos de oxigênio até se obter SiO_4^{-4} , arranjados sob a forma de um tetraedro. Na coordenação tetraédrica da sílica sólida, qualquer que seja a forma da mesma, quartzo, tridimita ou cristobalita, cada átomo de silício está rodeado por quatro de oxigênio, de modo que o silício pode ser considerado como o centro do tetraedro com os átomos de oxigênio nos vértices. Cada oxigênio está ligado a no máximo dois átomos de silício e a estrutura deve ser considerada como se estendendo em todas as direções, formando, em decorrência dos tetraedros estarem ligados entre si, uma rede espacial de células hexagonais, conforme pode ser visto na Figura 2.8. A adição de cátions, tais como Ca^{+2} , Mg^{+2} , Fe^{+2} , Na^+ , tendem a quebrar as ligações da cadeia de Si-O-Si, ocorrendo uma separação dos vértices de dois tetraedros. À medida que os óxidos básicos são progressivamente acrescentados, a estrutura tridimensional é quebrada até produzir-se uma estrutura pura de SiO_4^{-4} , contendo íons Ca^{+2} , conforme mostra a Figura 2.9 (MASUERO, 2001).

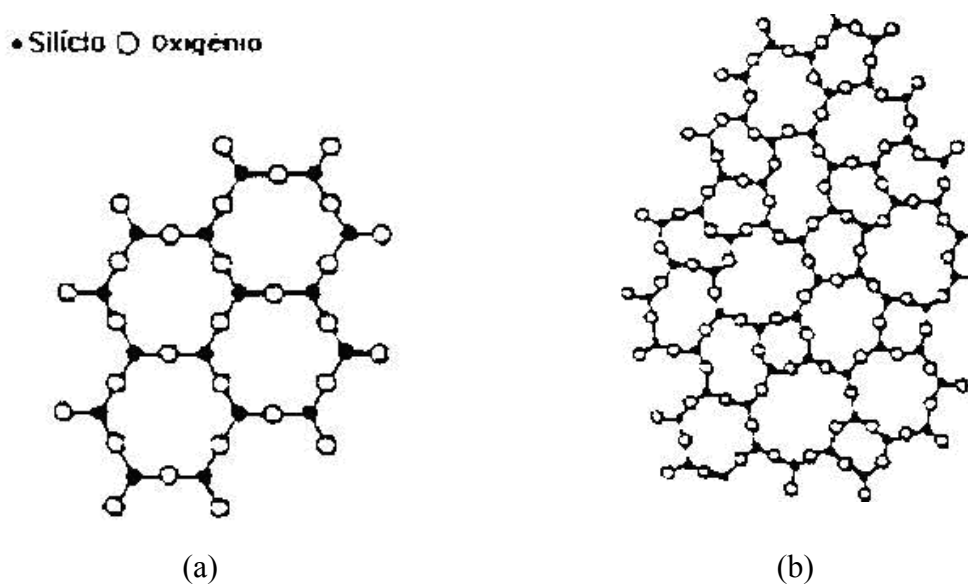


Figura 2.8 – Representação esquemática do tetraedro Si-O e estrutura da sílica no estado (a) sólido (b) líquido (MILLS apud MASUERO, 2001).

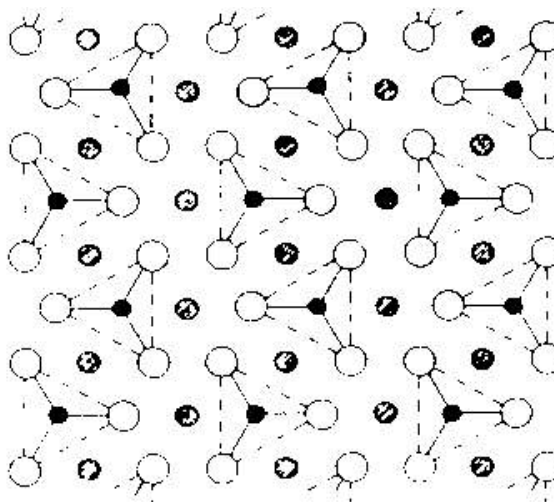


Figura 2.9 – Representação esquemática da estrutura após adição sucessiva de cátions (JEFFES apud MASUERO, 2001).

Como os cátions adicionados alteram a estrutura básica da cadeia, são chamados de modificadores de cadeia, ao passo que o silício é chamado de formador de cadeia. Na escória, o íon Ca^{+2} , com o número de coordenação 6, é o modificador de cadeia mais típico. A quantidade e as características dos cátions modificadores afetam de maneira notável o comportamento dos vidros, como a solubilidade e o ponto de fusão (JOHN apud MASUERO, 2001).

2.5.5. Hidratação das Escórias

A atividade hidráulica da escória de alto-forno é bem mais lenta que a do cimento, sendo em condições normais, de 6 a 8,5%, aos 28 dias. Ao entrar em contato com a água, a escória começa a dissolver-se, liberando íons Ca^{+2} . Uma envoltória de baixíssima permeabilidade de hidróxido de alumínio é formada ao redor do grão da escória, impedindo a penetração da água e a dissolução dos íons. A dissolução desta camada, a posterior dissolução dos íons de Si e Al da fase vítrea e a hidratação da escória só são possíveis com a elevação do pH, sendo inevitável a utilização de um ativador (MASUERO, 2001).

Ainda segundo Masuero (2001), no momento em que se coloca a escória em contato com uma solução de pH alto, aumenta-se a velocidade de dissolução da escória e formam-se produtos hidratados estáveis.

Os produtos de hidratação da escória são similares aos encontrados em pastas hidratadas de cimento, entretanto há uma alteração nas relações *C/S (do C-S-H) e *C/A (TAYLOR, 1997).

*C/S – Hidróxido de cálcio e sílica

*C/A – Hidróxido de cálcio e alumina

CAPÍTULO III

REAPROVEITAMENTO DA ESCÓRIA DE ACIARIA

Brun & Yuan (1994) apontam os vários campos de aplicação de escórias de diferentes origens, o que pode ser observado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Campo de aplicação de escórias de diferentes origens (BRUN & YUAN, 1994).

CAMPOS DE APLICAÇÃO		PROCEDÊNCIA DA ESCÓRIA		
		Aciaaria	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
Construção Civil	meio-fio	X	X	X
	piso de concreto	X	X	X
	pré-moldados	X	X	X
Agricultura	manilhas/tubos	X	X	X
	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 Kruger (1995) apud Castelo Branco (2004), 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 elas devem 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 conversor e granulada no vazamento. O processo se revelou tecnicamente viável, mas a competitividade do produto depende do preço do cimento (Silva et al, 1991).

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 (EAF), em relação a de conversor (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 conversor.

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

3.1. 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 começaram 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 CemStarTM, 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 (2005) estudaram as melhorias das propriedades cimentícias devidas à adição de escória de aciaria. Nesse 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 à 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.

3.2. Utilização como Adição aos Materiais à Base de Cimento

Como já foi descrito, 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.

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.

3.3. Outras Possibilidades de Utilização

Tem-se, na Figura 3.1, aspectos potenciais do uso da escória de aciaria e o que já existe.

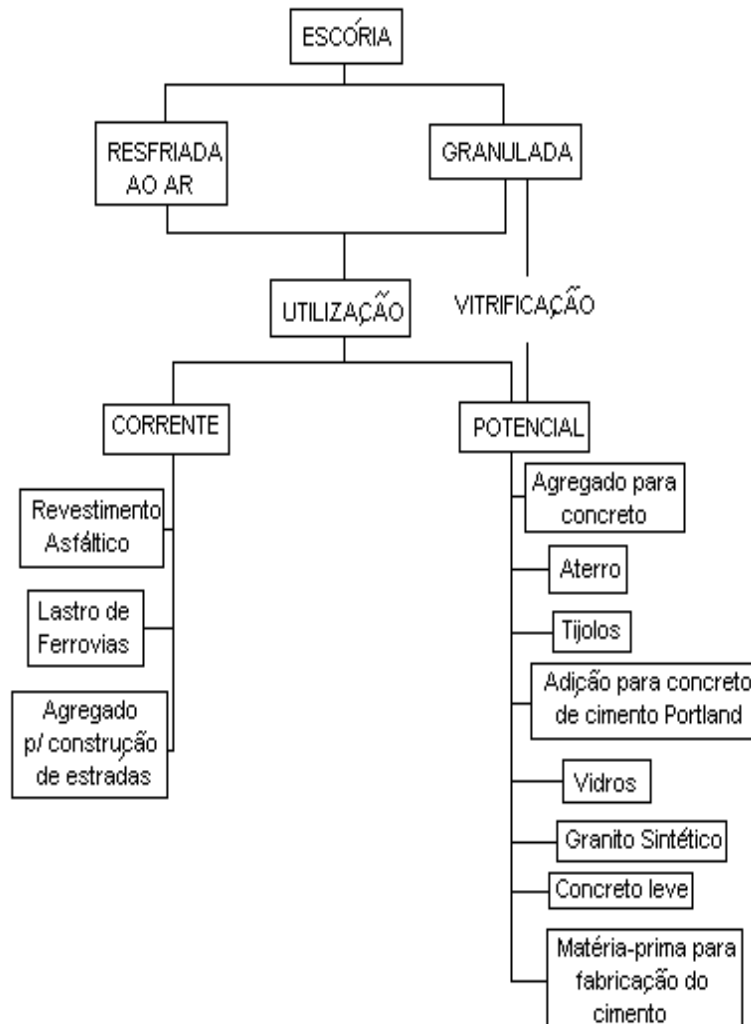


Figura 3.1 – Usos correntes e usos potenciais da escória de aciaria (TUBINO GEYER, 1997).

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”.

Segundo Machado et.al (s.d), o uso da escória de aciaria em pavimentação viária justifica-se por essa apresentar um custo reduzido por ser um subproduto que se localiza a pequenas distâncias de transporte, principalmente para obras urbanas; por poder ser utilizada

em diversas camadas do pavimento, no reforço do subleito, na base e no revestimento betuminoso em substituição dos agregados pétreos e, a utilização de qualquer tipo de rejeito, em particular os industriais, é uma prática preservacionista e restauradora de elevado sentido ambiental e ecológico.

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, 1992). 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.

3.4. Utilização de Escórias como Agregado

A utilização de escórias como agregado em argamassas e concretos é citada em vários trabalhos no Brasil e no Mundo.

Na ex-União Soviética, Gromov apud Tubino Geyer (1997) cita o emprego de escória de aciaria como agregado leve para a produção de concreto.

Scandiuzzi e Battagin (1990) mostraram que é viável tecnicamente a utilização de escória de alto-forno como agregado miúdo em concretos, competindo em termos de desempenho com as areias naturais ou artificiais oriundas da britagem de rochas. O estudo teve sua origem na necessidade de se consumir grandes quantidades de escória de alto-forno, que estavam estocadas na Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), que foram produzidas na década de 80 e não foram consumidas pela indústria cimenteira.

Lima (1999), em sua tese de doutorado, estudou a substituição de agregados miúdo e graúdo utilizados para produzir concreto, por escória de aciaria elétrica. A autora concluiu que os concretos produzidos com escória apresentaram resistência mecânica à compressão superior a dos concretos de referência, atribuindo a melhoria de desempenho à hidraulicidade da escória. Em relação à durabilidade, as propriedades de carbonatação, absorção e ataque íons cloretos dos concretos produzidos com escória apresentaram melhor desempenho do que do concreto referência.

Amaral e Vázquez (2002) utilizaram escórias de aciaria de forno elétrico, provenientes de uma siderurgia, localizada em Barcelona, na Espanha. Foram fabricados quatro tipos de concreto: concreto com escória como agregado graúdo e concreto com escória como agregado miúdo, concreto de referência para escória como agregado graúdo e outro de referência para o agregado miúdo. Os concretos com escória apresentaram resistências à compressão superiores as dos concretos de referência, devido provavelmente à melhoria que ocorreu na zona de transição, concluíram os autores. Os estudos de microscopias mostraram que a pasta penetra nos poros abertos da escória, proporcionando um melhor travamento mecânico. A zona de transição dos concretos com escória como agregado graúdo é menor que a dos concretos de referência.

Louzada (1991) estudou a utilização de escória LD como agregado na fabricação de blocos pré-moldados.

Tubino Geyer, Vieira, Junior, Costa, Rocha e Paiva (2002) estudaram a utilização de escória de aciaria elétrica na produção de tijolos de solo-cimento-escória. Foram estudados

traços, variando-se o percentual de escória em 0% (testemunho), 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60% e 80% em relação à massa de solo. O traço utilizado foi de 1:15, constituído de uma parte de cimento e 15 partes de solo misturado com escória. O estudo concluiu que é viável técnica e economicamente a produção de tijolos maciços constituído de cimento e solo misturado com escória.

Na construção da Rodoviária da Cidade de Volta Redonda – RJ, quando da execução do sistema de drenagem superficial dos taludes, nas canaletas foi utilizado o seguinte traço de concreto: um saco de cimento (CP II E 32), 122 litros de areia natural, 122 litros de escória de aciaria LD, gerada na Companhia Siderúrgica Nacional e 25 litros de água, acrescidos de 100 ml de aditivo plastificante de pega normal. A resistência à compressão média, obtida aos 28 dias de idade, foi de 15,32 MPa. O fck de projeto era 11,0 MPa.

CAPÍTULO IV

PROBLEMAS NA UTILIZAÇÃO DA ESCÓRIA

A reciclagem de escória de aciaria e de alto-forno é de grande interesse na construção civil, pois, pode ser usada na produção de cimento, como substituto parcial de clínquer Portland. Usa-se também a escória de alto-forno como base para pavimentos e como agregados. O problema resulta na expansibilidade de seus óxidos, o que limita seu uso. É por esta razão que muita pesquisa é feita a fim de se entender melhor o fenômeno da expansibilidade.

4.1. Fenômeno da Expansibilidade das Escórias de Aciaria

Uma das grandes preocupações que afligem pesquisadores e engenheiros é a utilização de produtos tais como cimentos, escórias, agregados de origem natural, que possam vir a comprometer a durabilidade de uma obra em função da instabilidade volumétrica de algum constituinte químico presente. Este fenômeno é caracterizado pelo aumento de volume, causando o fenômeno de expansão (POLISSENI, 2005).

Quando do processo de produção do aço, durante o sopro do oxigênio, a reação química ocorre entre os óxidos básicos (CaO e MgO) e os óxidos de silício, fósforo e ferro, que são incorporados com a finalidade de promover as reações de refino do aço e evitar o desgaste prematuro do refratário, geram óxido de cálcio e óxido de magnésio no estado livre. A escória gerada no processo retém parte desses óxidos livres (TUBINO GEYER, 2001).

Desta forma, as escórias de aciaria adquirem características expansivas causadas principalmente pelos seguintes mecanismos (PANIS, 1975; KAMON et al. 1993; HEATON, 1989; RUBIO e CARRETERO, 1991; MACHADO, 2000, mencionados por POLISSENI, 2005):

- A hidratação da cal livre (CaO) e do periclásio (MgO);
- Mudanças das formas alotrópicas do C_2S ;
- Corrosão e oxidação da fração metálica incrustada na escória.

O fenômeno de expansão é influenciado pelo constituinte químico existente no material. LEA (1970) apud POLISSENI (2005) menciona que cimentos contendo 1% de óxido de magnésio livre, cujo cristal possui partículas com dimensões entre 30µm e 60µm, ocasionam expansões similares a cimentos que contenham 4% de óxido de magnésio livre e cujos cristais possuem partículas com dimensões inferiores a 5µm.

Na Tabela 4.1 são apresentadas as variações volumétricas em função das transformações ocorridas nas principais espécies químicas presentes na escória de aciaria.

Tabela 4.1 – Características das espécies químicas isoladas antes e após a hidratação (Weast, 1971).

Nº	Fórmula	Nome	Densidade (g/cm ³)	M. mol (g/mol)	Vol. Molar (cm ³ /mol)	Varição de Volume(%)
1	MgO	Periclásio	3,58	40,31	11,56	Em relação ao MgO
2	Mg(OH) ₂	Brucita	2,36	58,33	24,72	119,54
3	CaO	Cal	3,38	56,08	16,59	Em relação ao CaO
4	Ca(OH) ₂	Portlandita	2,24	74,09	33,08	99,40
5	CaCO ₃	Calcita	2,93	100,09	34,16	105,90
6	CaCO ₃ .MgCO ₃	Dolomita	2,87	184,41	64,25	287,30
7	Fe ⁰	Ferro (metálico)	7,86	55,85	7,11	Em relação ao Fe⁰
8	FeO	Wüstita	5,70	71,85	12,61	77,04
9	Fe ₂ O ₃	Hematita	5,24	159,69	30,48	328,7
10	Fe(OH) ₂	Hidróxido de Ferro	3,40	89,86	26,43	271,7
11	FeO(OH)	Geotita	4,28	88,85	20,76	192,0

Observa-se na Tabela 4.1 que, nas transformações, seja por hidratação (2, 4, 10 e 11) e carbonatação (5), seja por oxidação (8 e 9), ocorre um significativo aumento do volume em relação às dimensões originais dos cristais. Este fenômeno conduz à expansão destrutiva na escória de aciaria.

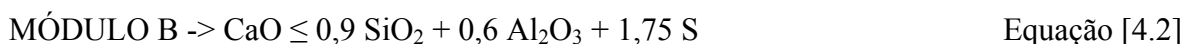
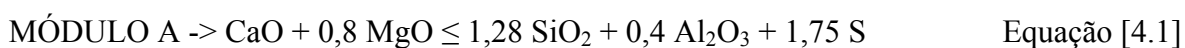
Emery (1978), Pera (1997), Rubio e Carreteiro (1999) citados por Polisseni (2005), citam que o óxido de cálcio livre e o óxido de magnésio livre, nas escórias de aciaria, hidratam-se mais rapidamente e mais lentamente, respectivamente, sendo responsáveis pela instabilidade volumétrica da escória. O óxido de cálcio livre hidrata-se em poucas semanas e a hidratação do óxido de magnésio livre pode levar anos.

A instabilidade volumétrica que ocorre na escória de aciaria não está associada somente à quantidade de óxido de cálcio livre, mas também é função da forma em que se encontra e da dimensão do grão (MONTGOMERY e WANG, 1991).

As portas de entrada para os agentes agressivos que vão gerar a instabilidade volumétrica das escórias são: sua porosidade e as fissuras nelas existentes. Os mecanismos que tornam as escórias de aciaria porosas e com fissuras, e que facilitam as reações químicas de hidratação, carbonatação e corrosão, são (WACHSMUTH et al. 1981):

- Gases liberados durante o processo de resfriamento quando da solidificação da escória, bem como fissuras geradas devido ao fenômeno de retração, causado pela diminuição da temperatura;
- Fissuras provocadas no processo de britagem, quando da recuperação de fração metálica incrustada na escória que são oriundas de impactos para a quebra da escória.

Em estudos feitos por Gumieri, apud Tubino Geyer 2001, 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 equações [4.1] e [4.2], uma escória cuja análise química apresentar uma composição que atenda aos módulos A ou B, segundo Gumeri, 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 a 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 por meio das equações [4.3] e [4.4], descritas a seguir:

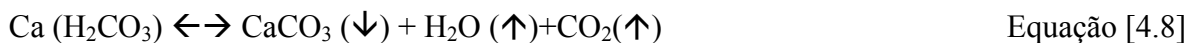
$$\text{MgO estável} \rightarrow \text{MgO} / (\text{FeO} + \text{MnO}) < 1 \quad \text{Equação [4.3]}$$

$$\text{MgO instável} \rightarrow \text{MgO} / (\text{FeO} + \text{MnO}) > 1 \quad \text{Equação [4.4]}$$

Para a maioria das escórias esta relação é menor que 1, apresentando o MgO sob a forma estável. Estas equações são baseadas na premissa de que o MgO pode formar soluções sólidas com o 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.

4.1.1. Expansão do Óxido de Cálcio (CaO)

Ao se hidratar e/ou carbonatar, o óxido de cálcio livre (CaO) forma o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) e/ou Ca(H₂CO₃) + H₂O, cujo cristal tem maior volume. O processo de hidratação e/ou carbonatação ocorre conforme são mostrados nas reações químicas de 4.5 a 4.8 (GUPTA et al. 1994):



Na hidratação do CaO, há um aumento de 99% em volume e de 54% em superfície. A variação de volume, em alguns casos, leva à pulverização do material devido às tensões criadas pelas diferenças de volume molar (CINCOTTO apud MACHADO, 2000).

A principal causa disso é a expansão volumétrica que ocorre devido à transformação da cal livre (CaO livre) em hidróxido de cálcio (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 fenômeno da expansão da escória LD. Presume-se que a transformação

volumétrica ocorra devido à uma série de reações de hidratação difíceis de serem esclarecidas (DAIDO, 1993 apud TUBINO GEYER, 2001).

Segundo Machado (2000), a cal livre é a principal responsável pela expansibilidade nas escórias de aciaria. A quantidade de CaO total presente na escória de aciaria do tipo LD varia entre 39 e 50% da massa de escória, dos quais 7% se encontram no estado livre.

Adicionalmente, observa-se que existem nas escórias de aciaria duas formas de cal (CaO): residual e precipitada – esta última aparece durante o resfriamento e solidificação da escória (MACHADO, 2000).

Como o elevado teor da cal livre é o principal responsável pelo problema da expansão das escórias de aciaria LD, existem diversos estudos que visam limitar o seu teor como critério de classificação e aplicação das escórias. Tem-se mostrado que, em teores menores que 7%, a cal livre não é prejudicial à durabilidade de pavimentos que utilizam a escória de aciaria (Machado, 2000). Para o cimento Portland, por exemplo, a quantidade de cal livre (CaO) está limitada ao intervalo de 3 a 5% para que não ocorra uma expansão destrutiva do concreto endurecido (TAYLOR, 1997).

Mehta & Monteiro (1994) observam que o óxido de cálcio livre raramente está presente em quantidades significativas no cimento Portland, porém quando isto ocorre, é consequência do mau proporcionamento das matérias-primas ou deficiência do processo de produção do cimento. Contudo, o que se tem verificado na prática, é que as escórias de aciaria exibem uma elevada instabilidade dimensional gerada, principalmente, por elevados teores da cal livre – acima de 7% (MACHADO, 2000).

As técnicas utilizadas para se detectar o óxido de cálcio de acordo com Polisseni (2005) são:

- método de Franke combinado com análise térmica (GRAFITTI, 2002);
- termogravimetria (TG) e termogravimetria derivada (DTG) (MATOS, 1994);
- difração de raio X (MACHADO, 2000; MASUERO, 2001; GUMIERI, 2002);

- cimento Portland: determinação de óxido de cálcio livre etilenoglicol (NBR NM 13, 2004);
- cimento Portland: determinação da expansibilidade Le Chatelier (NBR 11582, 1991).

4.1.2. Expansão do Óxido de Magnésio (MgO)

No processo de refino do aço, o uso do dolomito ou o desgaste do revestimento refratário do forno promovem a presença de MgO na escória que, em contato com a umidade, hidrata-se lentamente conforme a equação [4.9] (MACHADO, 2000):



Ao se hidratar, o MgO forma o hidróxido de magnésio ou brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$). Segundo Weast apud Machado (2000), nesta transformação, o cristalito do hidróxido de magnésio pode aumentar de volume em até 119,54% do volume inicial do cristalito de MgO. Este aumento volumétrico gera expansão devido às tensões criadas pela diferença de volume molar entre o óxido e o hidróxido.

A escória de aciaria possui um teor de magnésio que pode variar até 10%. Esta espécie química pode se apresentar na forma livre, como periclásio (MgO), ou quimicamente combinado em solução sólida com outros óxidos. Quando a fração de MgO, presente na escória de aciaria, está quimicamente combinada na forma de monticelita ($\text{CMS} = \text{CaO.MgO.SiO}_2$) e da merwinita ($\text{C}_3\text{MS}_2 = 3\text{CaO}_3.\text{MgO.SiO}_2$) é quimicamente estável (TAYLOR, 1997).

Normalmente, o teor de MgO livre em uma matéria-prima é limitado em função das especificações e da aplicação final do produto. Como exemplo, pode-se citar que, a fim de evitar a expansão do MgO livre na produção de clínquer, a quantidade de MgO é usualmente limitada entre 4 e 5%, podendo chegar até 6,5%, conforme a NBR 5732 (ABNT, 1991). Uma parte substitui o cálcio nos compostos do clínquer, e o excesso acima de 2% cristaliza-se como periclásio (MgO livre). Este último, através de reação com a água na hidratação do cimento, causa expansão destrutiva do material (TAYLOR, 1997).

4.1.3. Expansão Originada da Oxidação do Ferro Metálico (Fe^0)

A escória de aciaria possui em sua composição um alto teor de ferro metálico que fica retido no sopro ou no vazamento do aço líquido. Este metal, após os processos de corrosão e oxidação, inicialmente pode aparecer sob a forma dos íons Fe^{+2} , Fe^{+3} (LEE & LEE apud MACHADO, 2000). As principais reações de corrosão ou oxidação e a formação básica destes produtos de oxidação podem ser vistas nas equações da Tabela 4.2.

TABELA 4.2 – Produtos formados na oxidação do ferro metálico presente na escória de aciaria (Machado, 2000).

Formação	Produto formado
Reações de Oxidação	
$\text{Fe}^0 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{FeO}$	Wustita
$2\text{Fe}^0 + 3/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$	Hematita
$3\text{Fe}^0 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$	Magnetita
Reações de Corrosão	
$\text{Fe}^{2+} + \text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$	Hidróxido ferroso
$4\text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{Fe}(\text{OH})_3$	Hidróxido férrico

Os estados de oxidação e corrosão mais comuns são +2 (ferroso) e +3 (férrico). Os estágios de corrosão e oxidação do ferro metálico contribuem para transformações volumétricas na escória pelas diferenças de volume molar dos produtos de oxidação e corrosão. Esta variação de volume molar pode gerar uma expansão de 77 a 329% em relação à forma metálica (Fe^0) (MACHADO, 2000).

Ainda de acordo com Machado (2000), o teor de ferro total na escória representa cerca de 15 a 20% da sua composição média. Este teor elevado de ferro favorece a formação da solução sólida com o Mg ou com o Mn.

4.1.4. Expansão por Transformação Alotrópica do C_2S

O silicato dicálcico ou ortosilicato de cálcio ($2\text{CaO}_2.\text{SiO}_2$ ou C_2S) ocorre em quatro tipos cristalinos distintos. As fases polimorfas do C_2S são conhecidas como do tipo α , α' , β e γ . A relação entre esta seqüência de transformações é mostrada na Tabela 4.3. Há uma mudança volumétrica associada a estas alterações de fase que são derivadas do $\alpha\text{-C}_2\text{S}$, com progressiva redução da simetria, a qual surge pelas mudanças de orientação do SiO_4^{-4}

com pequeno movimento dos íons Ca^{+2} . As mudanças da fase $\beta \rightarrow \gamma$ podem promover uma elevada expansão volumétrica da escória, gerando a pulverização desta fase não metálica (TAYLOR, 1997).

TABELA 4.3 – Transformações do C_2S em função da temperatura de resfriamento (Taylor, 1997).

Fase Líquida		Densidade (δ)	Aumento de Volume (%)	Sistema cristalino	Temperatura (°C)	
					Transformação	Estabilização
Transformação	A	3,07	0	Trigonal	2130	>1425
	A'	3,31	-7,82	Ortorrômico	1425	1425 - 1160
	B	3,28	0,91	Monoclínico	1160 – 680	680 - 500
	γ	2,97	10,44	Ortorrômico	< 500	< 500

4.2. Parâmetros que Controlam a Expansão

4.2.1. Controle da expansão pelo CaO e MgO

Na estabilização da cal livre e do MgO reativo nas escórias de aciaria, destaca-se o efeito da umidade, da temperatura, do teor de CO_2 do ambiente, do tamanho dos grãos de escória, do tempo de estocagem do material, além do teor dos óxidos de cálcio e magnésio (MACHADO, 2000).

A estabilização da escória de aciaria está diretamente associada à formação de produtos estáveis, seja por hidratação do CaO e MgO ou carbonatação dos produtos hidratados gerados por estes óxidos. A hidratação e a carbonatação nas escórias de aciaria geram estabilidade volumétrica, visto que os compostos formados são volumetricamente estáveis, em virtude do tempo de estocagem e do grau de exposição do material à umidade, temperatura e teor de CO_2 . Desta forma, o material deve estar sujeito a condições que permitam, ao longo do tempo, a hidratação completa destas espécies químicas (THOMAS, 1978; REGOURD, 1980 apud MACHADO, 2000).

Neste sentido, o tempo de estocagem, ou tempo de envelhecimento do material em ambiente com umidade, são fatores principais que influenciam na estabilização do CaO e MgO reativos. O tempo de envelhecimento da escória de aciaria refere-se, principalmente, ao tempo de exposição da escória na pilha de estocagem (MACHADO, 2000).

Entretanto, Machado (2000) também afirma que os fatores mais importantes de estabilização da escória de aciaria são: o teor de CaO e MgO e as transformações ocorridas na hidratação do material. Gupta et. al. apud Machado (2000) verificaram que, por exemplo, a ação da umidade e do CO₂ na pilha de estoque não é uniforme e não permite que toda a cal livre seja estabilizada durante o tempo de estocagem. Neste caso, inclusive, podem ocorrer variações no teor de cal livre em função da profundidade da pilha de estocagem.

O tamanho dos grãos de escória de aciaria também têm influência sobre esta atividade de estabilização, devido ao grão mais fino facilitar a interação escória-ar (MONTGOMERY & WANG, 1991).

4.2.2. Controle da expansão do ferro metálico (Fe⁰)

Para o controle da expansão do ferro metálico, é necessário verificar as condições de exposição da escória, já que a oxidação e a corrosão do ferro metálico estão associadas a condições como: o tempo de exposição ao ar, o teor de oxigênio no resfriamento e o tamanho dos grãos da escória (MACHADO, 2000).

4.2.3. Controle da expansão das transformações alotrópicas do C₂S

Para controlar a transformação alotrópica $\beta \rightarrow \gamma$ do C₂S, podem-se destacar alguns fatores que impedem a formação da fase γ e o efeito deletério gerado nesta transformação. Entre eles destacam-se: a velocidade de resfriamento da escória e a presença de outras espécies químicas neste fenômeno (MACHADO, 2000).

No resfriamento lento das escórias de aciaria, ocorrem transformações alotrópicas α , α' , β e γ , segundo esta ordem de transformação. No resfriamento rápido da escória, não ocorre a completa formação do C₂S, impedindo a nucleação dos cristais e dificultando a formação da fase γ .

A forma alotrópica β apresenta expansão na solidificação. Portanto, é necessário manter a forma β estável e, para tanto, além de um resfriamento brusco da escória, podem-se adicionar íons que funcionam como estabilizadores na estrutura cristalina deste silicato, tais como Al^{+3} , Ba^{+2} , P^{+5} , B^{+3} , Mo^{+4} ou mesmo o Fe^{+3} (MACHADO, 2000).

4.3. Métodos de Avaliação da Expansibilidade da Escória de Aciaria

Para a avaliação da expansibilidade da escória de aciaria, alguns métodos de ensaio foram propostos tomando como base o ensaio de compactação de solos, conhecido como CBR – *Califórnia Bearing Ratio*, ou Índice Suporte Califórnia, utilizando o procedimento descrito na norma ASTM D 1883 – Método de ensaio padronizado para determinação do Índice de Suporte Califórnia para solos compactados em laboratório.

Os principais ensaios destinados à avaliação da expansibilidade da escória com base no ensaio CBR são (MACHADO, 2000):

- método de ensaio da *JIS – JAPANESE INDUSTRIAL STANDARDS*, na norma JIS A 5015/92 – Escória siderúrgica para construção de estradas;
- método de ensaio da *ASTM – American Society for Testing and Materials*, a norma ASTM D 4792/95 – *Potential expansion of aggregates from hydration reactions*;
- método de ensaio do Departamento de Transportes da Pensilvânia (PTM 130/78), adaptado pelo Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais (DMA-1/DER-MG/92), de acordo com o DNER – DPT 46/64 – Método de ensaio para avaliação do potencial de expansão da escória de aciaria – Adaptação do PTM 130.

Além dos métodos com base no ensaio de compactação, outros métodos são utilizados para a determinação experimental da expansibilidade da escória de aciaria, tais como:

- ensaio utilizando agulha de Le Chatelier – segundo o método da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 11582/91 – Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de Le Chatelier;
- ensaio de autoclave, que pode ser conduzido segundo as condições estabelecidas pela JIS – *JAPANESE INDUSTRIAL STANDARDS*, na norma JIS R2211 – *Test method for hydration resistance of basic bricks*; ou sob as condições da ASTM – *American Society for Testing and Materials*, na norma ASTM C151/74a – Ensaio de expansão por autoclave em cimento Portland;
- teste a vapor da DIN – *Deutsches Institut für Normung* (Instituto alemão de normalização), segundo a norma EN 1744-1 – Testes para propriedades químicas de agregados – análises químicas.

Existem ainda outros métodos que são encontrados na literatura, mas com menor frequência e que não serão abordados neste capítulo.

4.3.1. Ensaio adaptados a partir de ensaios em solos compactados (ASTM D 1883 e ASTM D 698)

O método de ensaio D 1883 é o procedimento da ASTM – *American Society for Testing and Materials* para determinação do Índice de Suporte Califórnia de solos compactados em laboratório para fins de pavimentação. Os ensaios de determinação do potencial de expansão da escória de aciaria prescritos na ASTM D 4792, na JIS A 5012 e no PTM 130 são com base no procedimento de compactação determinado por este método.

A norma ASTM D 1883 especifica que deve ser usado um cilindro de compactação de diâmetro interno igual a 152,4 mm e que os corpos-de-prova devem ser preparados de acordo com a norma ASTM D 696 – Método de ensaio padronizado para características de compactação em laboratório de solos usando energia padronizada (600 KN-m/m³).

O ensaio ASTM D 698 é um ensaio de compactação de solos. Nele, determina-se a relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca de um determinado tipo de solo compactado. A umidade ótima é também determinada pela análise da curva de compactação de um solo.

Este ensaio sofreu algumas adaptações para que se tornasse possível realizar a avaliação da expansibilidade da escória de aciaria (EMERY, 1984; FARRAND; EMERY, 1995; KANDHAL; HOFFMAN, 1997; MACHADO, 2000 apud POLESE, 2007).

4.3.2. ASTM D 4792 – Determinação da expansão potencial de agregados devido a reações de hidratação

O método de ensaio ASTM D 4792/95 é o procedimento da ASTM – American Society for Testing and Materials para determinação do potencial de expansão volumétrica de agregados densamente compactados que contêm componentes susceptíveis à hidratação e aumento de volume. O método cita que alguns destes constituintes são óxidos de cálcio e magnésio, comuns em alguns co-produtos industriais.

O método consiste na medida da expansão volumétrica de amostras compactadas conforme o procedimento geral da norma ASTM D 1883 – Método de ensaio para determinação do Índice de Suporte Califórnia de solos compactados em laboratório.

Este ensaio, denominado “Potencial de expansão de agregados em reações de hidratação”, tem por objetivo avaliar as características expansivas da escória de aciaria visando seu uso em pavimentação.

A granulometria das amostras deve ser preparada da seguinte forma:

- se todo o material passa na peneira de 19,0 mm, este deve ser usado integralmente para preparação de corpos-de-prova para compactação, sem modificação em relação ao procedimento da ASTM D 698/00;
- se há material retido na peneira de 19,0 mm, este deve ser removido e substituído por quantidade igual que passa na peneira 19,0 mm, fica retido

na peneira de 4,75 mm, e não tenha sido utilizado anteriormente para testes.

Três corpos-de-prova são moldados com escória de aciaria (cilindro de $152,4 \pm 0,7$ mm de diâmetro e, $116,4 \pm 0,5$ mm de altura).

Após a compactação, a escória é submersa em água a $70 \pm 3^\circ\text{C}$, por no mínimo 7 dias. Se não ocorrer queda na taxa de expansão nesse prazo, mantém-se o ensaio para obter dados adicionais por mais 7 dias.

Ao final do ensaio, após o acompanhamento da variação de altura, é calculado o valor da expansão em relação ao volume inicial. A norma ASTM D 2940/03 – *Standard specification for graded aggregate material for base or subbase for highways or airports* estabelece o limite para agregados que contenham compostos sujeitos à hidratação, como é o caso da escória de aciaria, seja de 0,5% de expansão aos 7 dias quando testados de acordo com o método ASTM D 4792/00.

4.3.3. JIS A 5015/92 – Método de ensaio de dilatação em água para escória siderúrgica

A norma japonesa JIS (Japanese Industrial Standard) A 5015/92 foi estabelecida com o objetivo de fixar condições qualitativas e quantitativas para a escória siderúrgica aplicada em leito de estradas e misturas asfálticas a quente, tais como absorção, granulometria e massa específica.

Quanto à avaliação da expansibilidade, há um anexo à norma que trata de um ensaio adaptado do método ASTM D 698, em um equipamento semelhante. O procedimento utiliza um molde de 15 cm que é descrito de forma mais aprofundada na norma JIS A 1210. O tanque de água deve ter capacidade para receber no mínimo 3 moldes, conservando a temperatura de água a $80 \pm 3^\circ\text{C}$ por 6 horas.

Neste ensaio são utilizados 3 corpos-de-prova cilíndricos, obtidos por meio do ensaio de compactação em molde semelhante ao da norma ASTM D 1883. a granulometria da amostra a ser utilizada deve atender ao especificado na norma JIS A 5015, conforme mostra o Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Distribuição granulométrica de amostras para ensaio JIS A 5015

Malha da peneira	31,5 mm	26,5 mm	13,2 mm	4,75 mm	2,36 mm	425 (μm)	75 (μm)
Peso que passa (%)	100	97,5	70	47,3	35	20	6

A amostra é preparada tomando-se aproximadamente 30 Kg de material e adicionado-se a água. A umidade, próxima à umidade ideal, deve ser mantida por 24 horas. Após esse período de repouso, a amostra é quarteada para formação de 3 corpos-de-prova. Os corpos-de-prova são submersos em água e sujeitos a ciclos de aquecimento diários de 6 horas, com temperatura de 80 °C, repetindo-se o processo por 10 dias. A expansão é medida por meio da variação da altura do corpo-de-prova. O critério para considerar a escória adequada para o uso em pavimentação adotado pela norma JIS A 5015 é que a expansão máxima seja de até 2%.

4.3.4. PTM 130 – Método de ensaio para avaliação do potencial de expansão de escória de aciaria (adaptado pelo DMA-1/DER-MG/92)

O ensaio de expansão PTM 130 foi desenvolvido por Emery (1984), em Ontario, Canadá na MacMaster University. A temperatura de cura do corpo-de-prova foi alterada, originando a norma ASTM D 4792/2000. Posteriormente, o Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais fez nova adaptação, resultando na norma DMA-1/DER-MG/92.

No método PTM, a amostra é compactada, seguindo o ensaio de compactação ASTM D 698, em três camadas, em um molde cilíndrico com diâmetro de 15,24 cm e altura de 17,78 cm. São utilizados três corpos-de-prova distintos.

A partir da etapa de compactação, a amostra é submersa em água na temperatura de $71 \pm 3^\circ\text{C}$ e instala-se um relógio comparador no topo da amostra para acompanhar a expansão vertical. Durante os sete primeiros dias são feitas leituras diárias com a amostra ainda imersa. É, então, retirada e mantida em condição quase saturada, e fazem-se as leituras de expansão por mais sete dias.

Este ensaio demanda um total de 14 dias para ser realizado. O limite estabelecido no Brasil, de acordo com a especificação da norma DNER-PRO 263/94 é de 3%. Segundo o documento a especificação do Departamento de Transportes da Pensilvânia na Publication 408/2003 – Highway Construction Specifications, o limite do potencial de expansão, determinado pelo PTM 130, é 0,5% (PennDOT, 2003).

Os ensaios com base na ASTM D 698, apesar de serem bastante utilizados, são questionados por alguns autores. Machado (2000) comenta que os métodos que têm como base o ensaio de compactação, com penetração de água no material, além de serem mais lentos e de difícil execução, possuem grande dispersão de resultados, o que seria atribuído à diversidade de condições experimentais dos métodos de ensaio e à grande heterogeneidade do material, assim como à variação nos critérios de obtenção dos corpos-de-prova como, por exemplo, faixa granulométrica, umidade inicial e massa específica.

Apesar das críticas, esses métodos são muito citados na literatura (EMERY, 1984; FARRAND e EMERY, 1995; KANDHAL e HOFFMAN, 1997; e MACHADO, 2000) e normalizados em vários países, como EUA e Canadá (ASTM), Japão (JIS) e Brasil (DER-MG).

4.3.5. Ensaio de agulhas de Le Chatelier – NBR 11582/91

Este ensaio é utilizado para determinação acelerada da expansibilidade em cimento Portland provocada pela hidratação de óxido de cálcio e de magnésio, por meio das agulhas de Le Chatelier.

Na adaptação deste ensaio para avaliação da expansão da escória de aciaria, é elaborado um traço de pasta de cimento com escória. São necessários 6 corpos-de-prova. A expansibilidade é determinada pelo afastamento das extremidades das agulhas, o que ocorre em função do aumento de diâmetro do cilindro. O ensaio pode ser realizado a frio ou a quente, sendo que o ensaio a quente exige menor duração que o ensaio a frio (TUBINO GEYER et al., 1998; GUMIERI et al., 2000; MACHADO, 2000; MANCIO et al., 2000; MASUERO et al., 2000; TUBINO GEYER et al., 2001; MACHADO et al., 2002; SILVA FILHO et al., 2002).

No ensaio de expansibilidade a quente, os corpos-de-prova são inicialmente imersos em água a temperatura ambiente por 24h e, posteriormente, imersos em água a 100°C por um período de 3h a 5h. Há repetições deste ciclo até que a abertura das agulhas permaneça constante. No ensaio a frio, não ocorre a imersão em água a 100°C e a duração aumenta para 7 dias.

Machado (2002) comenta que, apesar de ser um método de ensaio relativamente simples, seus resultados são poucos precisos. Outro questionamento é a respeito da carbonatação da amostra, que, para a realização do ensaio, é britada e moída, expondo compostos anidros do interior do grão. **De qualquer forma, é mais apropriado para utilização quando a aplicação é em argamassa ou concreto, mas para base e sub-base não é indicado.**

Além disso, como não existe normalização adaptada à escória de aciaria, os pesquisadores usam diferentes teores de escória, cimento e água na pasta que compõe os corpos-de-prova nos ensaios, o que pode levar a diferentes resultados.

4.3.6. Ensaio de autoclave

De acordo com Okamoto et al. (1981), este ensaio pode ser realizado segundo a norma JIS R2211 ou a norma ASTM C151/74a. No entanto, na maioria das vezes, a escória de aciaria é testada de acordo com a norma da ASTM C151/74a.

As amostras são tratadas com vapor na autoclave, mas a influência das condições do teste (pressão, tempo) na hidratação da escória não estão bem determinadas e, em 1981, Okamoto et al. afirmavam que estudos estavam sendo desenvolvidos com intuito de estabelecer tais condições. O procedimento geral do ensaio consiste em: conformação do corpo-de-prova (40 mm de diâmetro por 55 mm de altura) sob pressão de 2×10^6 kg/m²; cura do corpo-de-prova por 16 horas em estado úmido, determinação do volume inicial; tratamento em autoclave com aumento de pressão por 1 hora, seguida de redução por 2 horas; medição do volume final.

Motz e Geiseler (2001) consideram que o ensaio em autoclave, utilizado para medição de expansibilidade de escórias de aciaria, foi o precursor do *Steam Test*, mas que as condições do ensaio (alta temperatura e pressão) são extremamente irreais. Além disso, as investigações concluíram que sob as condições da autoclave ocorriam reações minerais nunca vistas antes em campo, sob condições naturais.

4.3.7. Ensaio a vapor – Steam Test (EM 1744: 1/98)

Motz e Geiseler (2001), após a comprovação de que o ensaio de autoclave não atendia a necessidade de verificação da expansibilidade, realizaram ensaios de imersão em água. Esses autores observaram que os efeitos do Cão e MgO livres, que apareciam em ensaios em câmara úmida, eram inibidos sob condições de imersão.

Assim, foi o início do desenvolvimento do *steam test* ou vapor, um método de ensaio introduzido na normalização européia, com base no princípio de que a expansibilidade da escória de aciaria, no caso da utilização em pavimentação, se deve, principalmente, à reação entre o vapor d' água e o CaO livre e/ou o MgO livre (MOTZ; GEISELER, 2001). Morishita et al. (1995) explica que o método a vapor é mais rápido que o de imersão em água devido à aceleração das reações com o aumento de temperatura. Além disso, as moléculas de vapor entram mais rapidamente nos grãos do que as moléculas de água, que ao maiores e assim alcançam o CaO livre.

4.4. Fenômenos que Provocam Corrosão nas Armaduras

4.4.1. Corrosão provocada por íons cloretos

Atualmente, muitos pesquisadores têm dedicado boa parte de seus estudos à área de durabilidade das estruturas de concreto. Isto se explica pelos inúmeros problemas que vêm ocorrendo nessas estruturas. A grande relevância destes estudos está, primeiramente, em saber de que maneira os danos evoluem. Em seguida, além de divulgar as manifestações patológicas mais preponderantes ao meio técnico, deve-se ter o cuidado de compará-las a outras manifestações do mesmo tipo, porém, observando sempre as condições de contorno.

A corrosão de armaduras é um fenômeno patológico que tem como principal agravante a redução da seção da barra e a perda da sua aderência ao concreto, além de fissuração e posterior deslocamento do cobrimento em consequência da formação de produtos de corrosão. Este assunto merece atenção especial uma vez que a corrosão das armaduras pode ter como consequência desde pequenas fissuras no concreto, até a redução da capacidade portante de peças estruturais, podendo chegar à sua ruptura. O caso de ataque por cloretos é ainda mais nocivo, por gerar ataques por pite ao aço.

4.4.2. Corrosão provocada por carbonatação

O fenômeno da carbonatação é um fator inevitável às estruturas expostas ao ar. Assim sendo, todas as estruturas ao ar carbonatam, com maior ou menor intensidade.

Segundo autores consagrados, Mehta & Monteiro (1994), Neville (1997), o dióxido de carbono, presente no ar atmosférico, reage com os hidratos da pasta, especialmente com a Portlandita em solução, formando o carbonato de cálcio:



A carbonatação é um fator preponderante no desencadeamento da corrosão das estruturas de concreto armado. Apesar do fenômeno ser estudado há mais de três décadas, os problemas decorrentes continuam acontecendo em larga escala. O uso de concretos mais adequados, de maior resistência e menor porosidade, e de cobrimentos compatíveis com as condições de exposição, previstos em referencial normativo adequado, são elementos efetivos para o controle da carbonatação (SOUZA; RIPPER, 1998).

O grau de carbonatação das peças ou estruturas de concretos e argamassas depende de vários fatores:

- Porosidade da matriz;
- Grau de umidade da peça;
- Tipo de cimento;
- Atmosfera em que está inserida a peça.

4.4.3. Ensaio para avaliar a profundidade de carbonatação

A profundidade de carbonatação, geralmente, é verificada in loco através de indicadores químicos à base de solução de fenolftaleína ou timolftaleína ou outro produto que indique a mudança de pH entre 8 e 11. O pH de mudança de cor da fenolftaleína é de 8,3 a 10, acima do qual torna-se vermelho-carmim e incolor abaixo desta faixa. Por outro lado, o pH de mudança de cor da timolftaleína é de 8,3 a 10,5, acima do qual torna-se azul escuro e incolor abaixo desta faixa.

De acordo com as recomendações da RILEM, CPC 18 (1988), a solução de ambos os indicadores, fenolftaleína ou timolftaleína, pode ser obtida por meio da dissolução de 1 g de reagente em 99 g de álcool etílico. Porém, no caso da fenolftaleína é comum o uso de uma solução mais econômica de 1 g de reagente em 49 g de álcool etílico e 50 g de água.

A profundidade de carbonatação é expressa em mm ou cm e, na maior parte dos casos, é tomado um valor médio representativo da amostra.

4.5. Técnicas que Constatam e Avaliam a Corrosão

Várias são as técnicas empregadas para a constatação e avaliação da corrosão; e entre as mais utilizadas encontram-se as técnicas eletroquímicas.

Estas técnicas, além de analisarem a corrosão como um fenômeno eletroquímico, e por isso, apresentarem maior confiabilidade, possuem a vantagem de serem rápidas e não

acarretarem sérios danos à estrutura no momento da sua aplicação; além do advento de poderem ser utilizadas tanto em laboratório como em campo.

Dentre o leque das técnicas eletroquímicas, destacam-se a intensidade de corrosão, obtida pela resistência de polarização; o potencial de corrosão; a resistência ôhmica; as curvas de polarização; a impedância eletroquímica; a intensidade galvânica; o ruído eletroquímico; entre outras. Em virtude da falta de algumas das ferramentas necessárias para a realização de todas estas medidas, opta-se pelo estudo da velocidade de corrosão (i_{corr}), do potencial de corrosão (E_{corr}) e da resistência ôhmica (R_{ohm}), as quais fornecem os subsídios necessários para uma caracterização confiável do processo de corrosão.

Para a realização destas medidas eletroquímicas é utilizado um aparelho medidor do grau de corrosão do aço quando embebido no concreto, o GECOR6. Este aparelho foi desenvolvido pela GEOCISA, empresa espanhola, em convênio com o Instituto de Ciências de la Construcción Eduardo Torroja e o CENIM (GEOCISA, 1993). Atualmente, o GECOR6 é comercializado pela James Instruments.

Suas medidas são realizadas por meio da técnica de resistência de polarização, a qual tem sido aplicada regularmente desde o início da década de 70 por Andrade e González, que adaptaram e desenvolveram as técnicas originalmente empregadas no fim da década de 50 por Kaesche e Baumel & Engell (HELENE, 1993).

Esta é uma técnica não destrutiva que é fundamentada na aplicação de uma pequena corrente contínua na barra de aço analisada, medindo as mudanças de potencial na pilha eletroquímica, através de uma pequena polarização da barra de aço. Com a vantagem de inferir sobre o estado passivo ou ativo da armadura, bem como sobre a velocidade de corrosão.

4.5.1. Velocidade de Corrosão

A velocidade de corrosão (ou taxa de corrosão) é obtida a partir da resistência de polarização (R_p), por meio da divisão da intensidade de corrosão instantânea (I_{corr}) pela área de estudo.

A intensidade de corrosão instantânea é obtida através da equação [4.14] de STERN & GEARY (1957) :

$$I_{\text{corr}} = \frac{B}{R_p} \quad \text{Equação [4.14]}$$

onde:

B é uma constante que varia em função das características do sistema metal/meio.

Enquanto que a velocidade de corrosão (i_{corr}) é conseguida pela aplicação da Equação [4.15]:

$$i_{\text{corr}} = \frac{B}{R_p \times A} \quad \text{Equação [4.15]}$$

onde:

i_{corr} é dada em $\mu\text{A}/\text{cm}^2$;

B é dada em mV;

R_p é dada em $\text{K}\Omega$; e

A é dada em cm^2 .

Como critério de avaliação dos resultados obtidos com a técnica, tem-se uma classificação mostrada por Alonso & Andrade (1990) apud Azevedo (2001), com base na i_{corr} encontrada (Tabela 4.4).

TABELA 4.4 – Classificação do grau de corrosão de acordo com os valores de i_{corr}

$I_{\text{corr}} (\mu\text{A}/\text{cm}^2)$	Classificação
< 0,1 – 0,2	Corrosão desprezível
>0,1 – 0,2	Início de corrosão ativa
~1	Corrosão significativa mas não severa
~10	Ataque severo de corrosão

A velocidade de corrosão representa um instrumento essencial para análises e diagnósticos confiáveis de estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão das armaduras.

4.5.2. Potencial de Corrosão (E_{corr})

Segundo Figueiredo (1994), o potencial de equilíbrio é aquele 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 correspondida uma densidade de corrente de intercâmbio equivalente à velocidade de dissolução anódica ou de depósito de cátions.

O método do potencial de corrosão ou de eletrodo é um ensaio padrão normalizado pela *ASTM C 876 Standard Test Method for Half Cell Potential of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*.

Para a utilização dos potenciais de corrosão é necessário apenas um eletrodo de referência (os mais comuns são o cobre/sulfato de cobre e o calomelano saturado), em relação ao qual os potenciais são verificados, e um voltímetro. O ensaio é realizado com o contato do eletrodo de referência com a superfície do concreto, onde se interpõe entre estes uma esponja umedecida para fechar o circuito. Estes equipamentos são de fácil manuseio e podem ser utilizados tanto no laboratório, em corpos-de-prova, como nas estruturas reais de concreto.

Com estes equipamentos faz-se a medida da diferença de potencial de eletrodo do sistema armadura-concreto comparativamente ao potencial do eletrodo de referência secundário, em regiões próximas ao ponto de aplicação do eletrodo de referência na superfície do concreto (HELENE, 1993).

Como critério de avaliação do fenômeno da corrosão, a ASTM C-876 apresenta uma correlação entre intervalos de potenciais e a probabilidade da ocorrência da mesma (Tabela 4.5), tomando-se como eletrodo de referência o de cobre/sulfato de cobre.

TABELA 4.5 – Critérios de avaliação da probabilidade de corrosão pelo potencial de corrosão (ASTM C-876)

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

4.5.3. Resistividade

A resistência ôhmica ou resistência elétrica, é obtida pelo quociente da resistividade elétrica pela área da seção em estudo, ou ainda, através do quociente da diferença de potencial pela corrente elétrica e geralmente é dada em ohms.

De acordo com Figueiredo (1994), a resistividade do eletrólito influi no processo de corrosão, pois, um eletrólito que permite maior movimentação iônica não exerce uma forma resistiva do controle da corrosão. Seguindo este raciocínio, Andrade (1992) relata a resistividade elétrica do concreto como sendo, juntamente com a disponibilidade de oxigênio, um dos parâmetros controladores da velocidade de corrosão da armadura no concreto.

Inicialmente, a metodologia de ensaio foi desenvolvida por Vassie com base na alteração da resistência elétrica de um metal em função da redução da sua seção transversal (HELENE, 1993), onde a equação utilizada para achar a resistência ôhmica é:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{E}{i} \quad \text{Equação [4.16]}$$

onde:

R é a resistência ôhmica, em ohms;
 ρ é a resistividade elétrica em ohms.m;
l é o comprimento, em m;
A é a área da seção transversal, em m²;
E é a diferença de potencial, em V;
i é a corrente elétrica em A.

Esta resistividade é influenciada por diversos fatores, tais como o teor de umidade, a permeabilidade e o grau de ionização do eletrólito do concreto.

Como critério de avaliação dos resultados obtidos de resistividade, levando em consideração o risco de corrosão das armaduras, tem-se a interpretação dada pela Tabela 4.6.

TABELA 4.6 – Critérios de avaliação da probabilidade de corrosão pela resistividade (CEB 192)

Resistividade (ohm.cm)	Risco de Corrosão
<5.000	Muito Alto
5.000 a 10.000	Alto
10.000 a 20.000	Moderado/Baixo
>20.000	Baixo

CAPÍTULO V

MATERIAIS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para obtenção de parâmetros que caracterizem o concreto com adição de escória de aciaria elétrica como agregado graúdo e possibilitem sua utilização com maior segurança, foram realizados ensaios de expansibilidade (Le Chatelier), mecânicos (resistência à compressão, à tração e módulo de deformação) e de durabilidade (potencial de corrosão, intensidade de corrosão, resistividade ôhmica e profundidade de carbonatação).

Com intuito de verificar tais parâmetros foram utilizados neste programa experimental materiais comuns na confecção de concreto. O que diferencia é uso da escória de aciaria elétrica como agregado graúdo. Tais materiais estão descritos neste capítulo.

5.1. Cimento

Foi utilizado o cimento CP II F-32 (Cimento Portland com Fíler), por ser o cimento mais utilizado na região do estado de Goiás.

5.2. Areia

A areia utilizada nesta pesquisa é proveniente da região de Faina, Rio do Peixe-Go, nas proximidades da cidade de Goiás, no estado de Goiás.

As Tabelas 5.1 e 5.2 mostram as características e a análise granulométrica do agregado miúdo utilizado nos ensaios. Estes ensaios foram realizados nos laboratórios da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás.

TABELA 5.1 – Característica do agregado miúdo

Agregado	Tipo	Massa unitária (kg/dm ³)	Massa específica (kg/dm ³)	Dimensão máxima característica (mm)	Módulo de Finura
Miúdo	Areia natural	1,51	2,62	4,8	2,79

TABELA 5.2 – Análise granulométrica do agregado miúdo utilizado

Peneira (mm)	Massas Retidas (g)	% retida	% acumulada
9,5	0	0	0
6,3	11,0	1,10	1,10
4,8	14,2	1,42	2,52
2,4	68,4	6,84	9,36
1,2	192,4	19,24	28,60
0,6	278,8	27,88	56,48
0,3	277,8	27,78	84,26
0,15	133,0	13,30	97,56
<0,15	24,4	2,44	100,00
Somatório	1000,0	100,00	

5.3. Brita

A Brita utilizada foi o micaxisto, por ser de uso mais comum na região.

As Tabelas 5.3 e 5.4 mostram as características e a análise granulométrica do agregado graúdo utilizado nos ensaios. Estes ensaios também foram realizados nos laboratórios da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás.

TABELA 5.3 – Característica do agregado graúdo

Agregado	Tipo	Massa unitária (kg/dm ³)	Massa específica (kg/dm ³)	Dimensão máxima característica (mm)
Graúdo	Brita micaxisto	1,48	2,77	19,0

TABELA 5.4 – Análise granulométrica do agregado graúdo utilizado

Peneira (mm)	Massas Retidas (g)	% retida	% acumulada
19	40,0	0,40	0,40
12,7	5520,0	55,20	55,60
9,5	3140,0	31,40	87,0
4,8	1020,0	10,20	97,20
2,4	120,0	1,20	98,40
<0,15	160,0	1,60	100,00
Somatório	1000,0	100,00	

5.4. Escória de Aciaria Elétrica (EAF)

A escória de aciaria utilizada nestes ensaios é proveniente de uma única corrida de forno panela de uma siderúrgica do estado do Rio Grande do Sul, composta exclusivamente da escória do forno panela (escória do refino redutor – FP). É uma escória envelhecida naturalmente, a céu aberto, com idade superior a 5 anos, o que significa que teoricamente é um material que não apresenta risco de expansão.



FIGURA 5.1 – Escória de aciaria elétrica e micaxisto. (Lado esquerdo – Micaxisto; Lado direito – Escória)

5.5. Água

A água utilizada na composição das amostras de concreto é proveniente da rede de abastecimento pública de Goiânia, SANEAGO.

5.6. Variáveis da Pesquisa Experimental

Para a realização dos ensaios de desempenho quanto à durabilidade (penetração de íons cloreto e carbonatação), foram confeccionados corpos-de-prova prismáticos de concreto (vigas), nas dimensões 15 x 15 x 50 cm, armados com barras de aço CA 50 de 8,0 mm de diâmetro e envolvidas por estribos de 5,0 mm de diâmetro, tendo estes corpos-de-prova um cobrimento de 2,5 cm, conforme recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2004) para estruturas

de concreto aparente expostas ao ar livre. Para a perfeita obtenção desse cobrimento foram utilizados espaçadores plásticos. A Figura 5.2 ilustra o corpo-de-prova descrito.

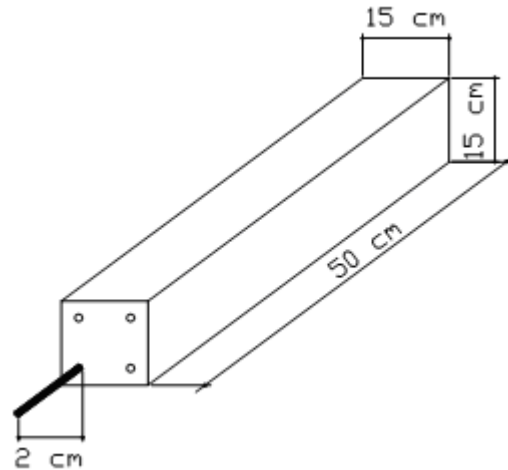


FIGURA 5.2 – Perspectiva do corpo-de-prova prismático.

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 hexametenotetramina 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.

As vigas de concreto armado foram moldadas variando-se a relação água/cimento e o teor de adição de escória em substituição ao agregado graúdo convencional de acordo com a Tabela 5.5. Moldou-se também uma viga testemunho, sem substituição (0%), para cada relação a/c.

TABELA 5.5 – Relação a/c (água/cimento) e teor de substituição de cada corpo-de-prova.

a/c	% agregado graúdo - escória de aciaria elétrica		
	0%	50%	100%
0,3	V1	V2	V3
0,52	V4	V5	V6
0,8	V7	V8	V9

Para uma melhor compreensão dos corpos-de-prova prismáticos (15 x 15 x 50cm), a Figura 5.3 mostra a armação com os espaçadores e a fôrma utilizada na concretagem e a Figura 5.4 apresenta a fôrma já preenchida de concreto e as vigas em questão já curadas.



FIGURA 5.3 – Armadura com os espaçadores.



FIGURA 5.4 – (a) Fôrma preenchida com concreto. (b) Vigas de concreto.

5.7. Corpos-de-Prova

Para a caracterização da resistência à compressão, tração por compressão diametral e módulo de deformação foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de $\phi 10 \times 20$ cm, seguindo a norma NBR – 5738 (ABNT, 1984) (Figuras 5.5 e 5.6).

Para obtenção dos resultados finais foram confeccionados um total de 135 corpos-de-prova cilíndricos e 9 prismáticos (vigas).

Para melhor entendimento do quantitativo de corpos-de-prova tem-se a Tabela 5.6.

TABELA 5.6 – Quantitativo de Corpos-de-Prova x Experimentos.

EXPERIMENTOS	CORPOS-DE-PROVA									CP's Cilíndricos (Total)	CP's Prismáticos (Total)
	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9		
	QUANTIDADE DE CORPOS-DE-PROVA										
Resistência à Compressão (NBR 5739/94)	9	9	9	9	9	9	9	9	9	81	X
Resistência à Tração por Compressão Diametral (NBR 7222/94)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	18	X
Módulo de Deformação (NBR 8522/84)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	36	X
Potencial de Corrosão (Ecorr) - ASTM C-876	1*	1*	1*	1*	1*	1*	1*	1*	1*	135	9
Intensidade de Corrosão (icorr)											
Resistência Ôhmica (Rohm) (CEB 192)											
Profundidade de Carbonatação (RILEM CPC 18/88)											

(*)Corpo-de-prova prismático



FIGURA 5.5 – Moldagem dos CPs cilíndricos.



FIGURA 5.6 – CPs cilíndricos

5.8. Metodologia Experimental

Este item descreve as atividades desenvolvidas na parte experimental deste trabalho.

As variáveis dependentes consideradas na referente pesquisa são listadas a seguir:

- Análise química da escória de aciaria elétrica;
- Resistência à compressão;
- Resistência à tração por compressão diametral;
- Módulo de deformação;
- Intensidade de corrosão (icorr);
- Potencial de corrosão (E_{corr});
- Resistência ôhmica (Rohm); e
- Profundidade de carbonatação.

A avaliação de desempenho anticorrosivo do concreto foi feita utilizando-se técnicas eletroquímicas, conforme descritos acima. Tal avaliação deve-se ao fato do material em estudo, escória de aciaria, possuir características expansivas.

Compostos volumetricamente instáveis, principalmente CaO e MgO são responsáveis pela desintegração e enfraquecimento por diferença de volume molar nas suas reações e, por conseqüência, originam trincas que provavelmente facilitam a entrada de agentes agressivos, favorecendo assim a corrosão.

As variáveis independentes desta pesquisa são aquelas inerentes à constituição do concreto e da argamassa. São elas:

- Relação água/cimento;
- Idade dos ensaios;
- Tipo de aço empregado;
- Tipo de agregado graúdo e miúdo empregado;
- Tempo de cura.

Para um maior entendimento da metodologia utilizada nos ensaios experimentais, desenvolveu-se um fluxograma. Este fluxograma pode ser observado na Figura 5.7.

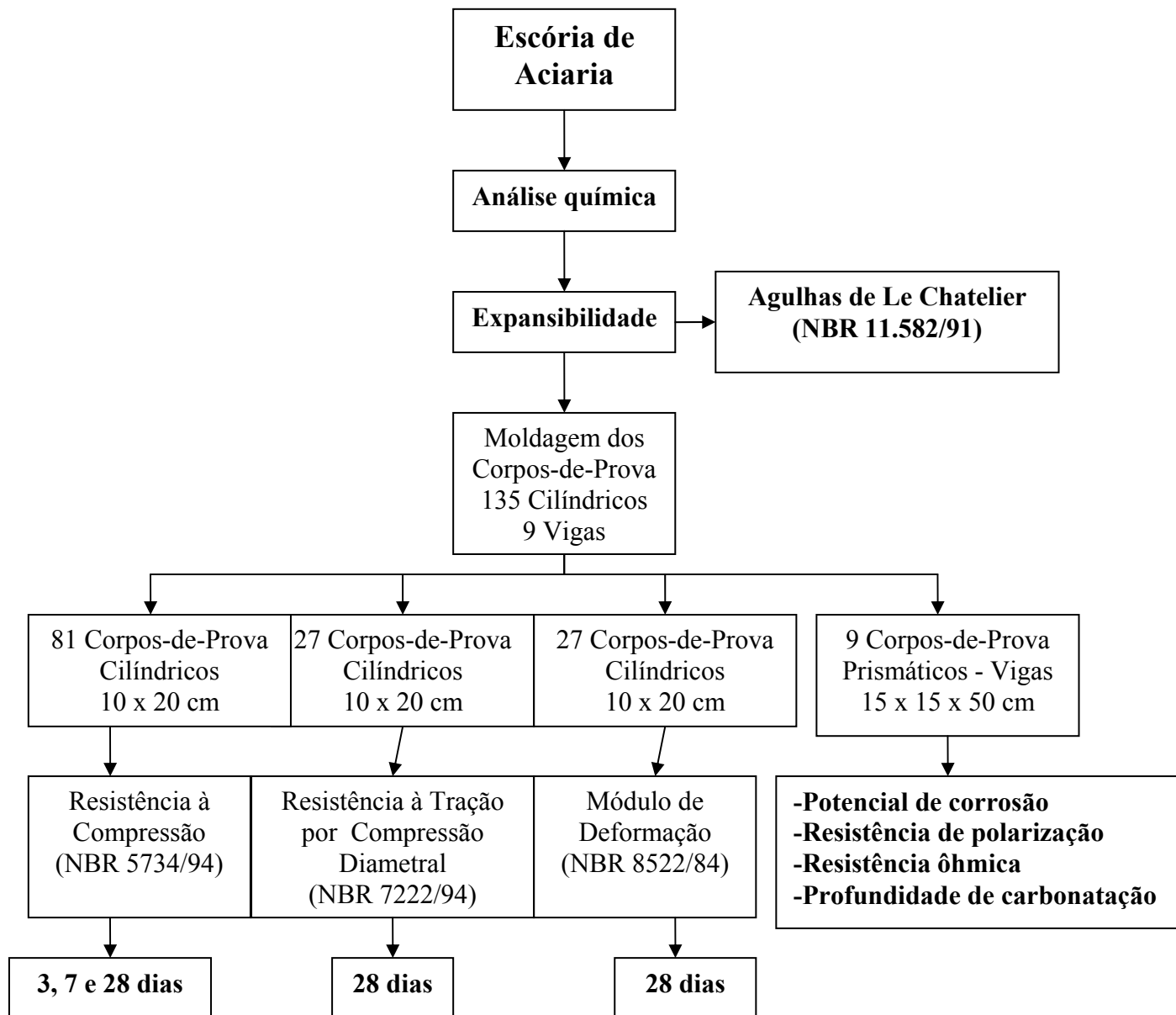


FIGURA 5.7 – Fluxograma de execução dos ensaios.

5.8.1. Expansibilidade

Como já descrito neste trabalho, o principal problema da escória de aciaria é a expansão que esta sofre quando em contato com a umidade.

Para avaliação da expansibilidade, a revisão bibliográfica aponta os ensaios com agulhas de Le Chatelier, expansão em autoclave e expansão pelo método da norma japonesa JIS A 5015.

Neste trabalho a avaliação de expansibilidade desta escória foi realizada por meio através das agulhas de Le Chatelier NBR 11582 (ABNT, 1981).

Diferentemente dos demais ensaios, neste 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 fíler, de acordo com a NBR 5753/91, não interferindo de forma significativa nos resultados dos ensaios.

Para a realização do ensaio que mede a expansibilidade da pasta de cimento serão empregadas “agulhas de Le Chatelier”, de chapa de latão de 0,5 mm de espessura (NBR 11.582, ABNT, 1991), que se encontra nas Figuras 5.8 e 5.9.

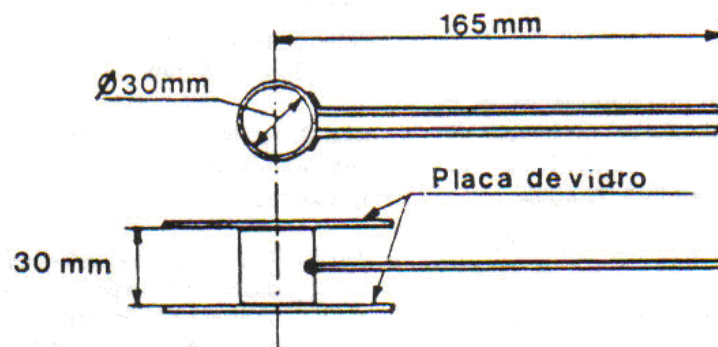


FIGURA 5.8 – Agulha de Le Chatelier (NBR 11.582, ABNT, 1991).

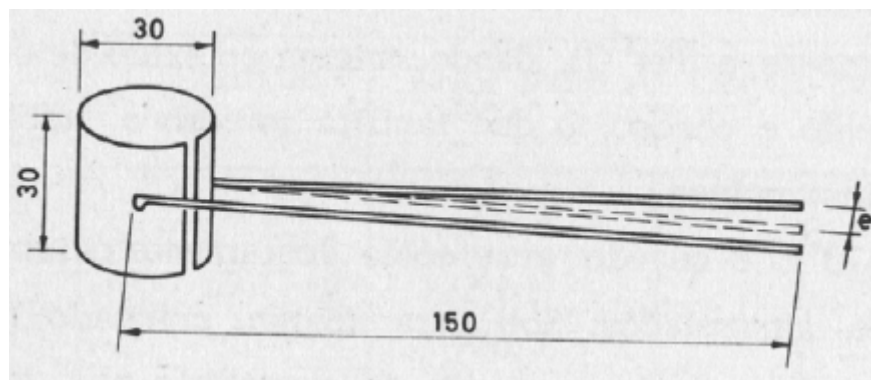


FIGURA 5.9 – Agulha de Le Chatelier (PENA, 2004).

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 a NBR 7215 (ABNT, 1982) item 4.2.5.2). Após a moldagem 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:

- momentos antes da colocação dos corpos-de-prova na água quente;
- após 3 horas de ebulição;
- 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, sendo um dia de cura inicial. O afastamento das extremidades das agulhas, em mm, deve ser medido:

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

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

Cada resultado deve ser a média de três determinações.

5.8.1.1. Metodologia a ser Utilizada para o Ensaio de Expansibilidade

Um resumo da metodologia para realização do ensaio de expansibilidade encontra-se no esquema da Figura 5.10 Para este ensaio a escória de aciaria foi moída em moinho de bolas (Abrasão Los Angeles) e peneirada, utilizando assim o material passante na peneira # 200 – Série Tyler, de malha 0,075mm de lado quadrado (finura próxima a do cimento Portland).

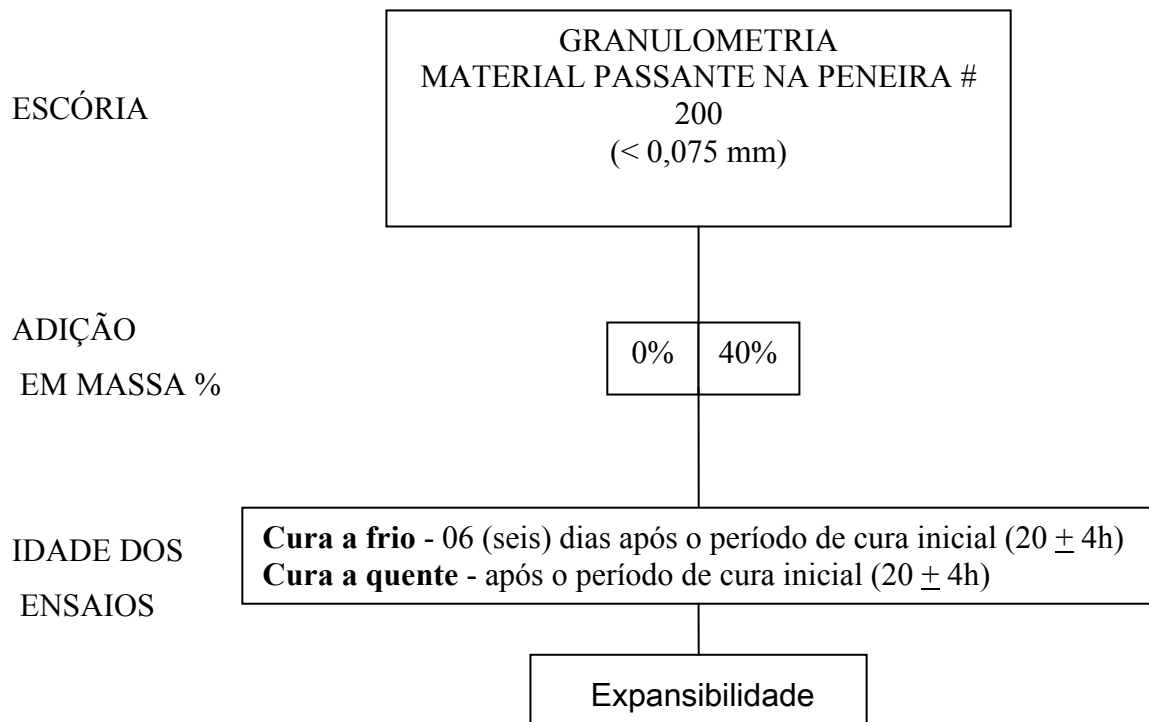


FIGURA 5.10 – Esquema de metodologia - Expansibilidade.

5.8.2. Dosagem dos Materiais

A Tabela 5.7 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 ± 2 cm para todos os traços e o teor de argamassa em torno de 50%.

TABELA 5.7 – Proporcionamento dos materiais utilizados na confecção dos concretos, em massa.

a/c	Cimento	Areia	Brita/Escória	Aditivo (%)	Consumo cimento (kg/m ³)	Teor de Argamassa (%)
0,30	1	0,88	1,7	1,1	617	52,51
0,52	1	1,52	2,6	-	369	49,22
0,80	1	3,27	4,64	-	265	47,92

Conforme descrito na Tabela 5.7 o proporcionamento dos materiais foi feito em massa. O teor de substituição do agregado convencional por escória de aciaria também foi feito em massa, ou seja, de acordo com a Tabela 5.7 tem-se para a/c 0,30 uma quantidade de agregado graúdo igual a 2,6 kg, se o teor de substituição for de 50% haverá 1,3 kg de agregado convencional e 1,3 kg de escória de aciaria.

5.8.3. 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: agregado graúdo (brita – micaxisto, escória de aciaria elétrica ou ambos), parte da água junto com o plastificante, quando necessário, conforme a Figura 5.11 e em seguida cimento, areia e o restante da água.



FIGURA 5.11 – Mistura dos materiais na betoneira: agregado graúdo (brita – micaxisto, escória de aciaria elétrica ou ambos), parte da água junto com o plastificante, quando necessário.

O processo de adensamento adotado foi mecânico para os corpos-de-prova prismáticos e manual para os cilíndricos, segundo a norma NBR 5739 (ABNT, 1980). Após a moldagem, os corpos-de-prova cilíndricos 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).

5.8.4. Consistência (Abatimento do Tronco de Cone)

Este ensaio é normalizado pela NBR 7223 (ABNT, 1982). Tendo como objetivo verificar a uniformidade do abatimento entre uma remessa e outra de concreto, e sendo aplicado a concretos cuja consistência seja plástica.

Vale ressaltar que o abatimento foi fixado em $10 \pm 2\text{cm}$ para todos os traços e o teor de argamassa em torno de 50%.

A metodologia deste ensaio é bastante simples, o abatimento do tronco de cone é obtido pela diferença da altura do concreto e do molde do tronco de cone. Esse ensaio não é aplicado para concretos que desmoronem, ou deslizem após a retirada da forma de tronco de cone, embora o considere como uma medida da consistência, mas o ensaio é muito útil para detecção de variações da uniformidade de uma mistura com determinadas proporções nominais (MEHTA & MONTEIRO, 1994). Nas Figuras 5.12 (a, b, c, d, e) são esquematizadas as seqüências deste método e como se procede quando ensaiados concretos convencionais.



FIGURAS 5.12 – (a) Cone de Abrams sobre a chapa nivelada. (b) Demais instrumentos (haste, colher, régua ou trena). (c) Adensamento. (d) Retirada do cone. (e) Medição. (UEPG)

5.8.5. 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 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.

Este ensaio foi executado segundo a norma NBR 5739 (ABNT, 1994), que consiste em determinar a resistência à compressão de corpos-de-prova de concreto.

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados em corpos-de-prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura. Foram confeccionados em número de três para cada adição para cada idade.

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

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



FIGURA 5.13 – CPs capeados com enxofre para ensaio.

5.8.6. Resistência a Tração por Compressão Diametral

ANDRILO & SGARBOZA, (1993) afirmam que embora a resistência à compressão seja a propriedade mais utilizada nos cálculos de estruturas de concreto, ou explorada como parâmetro de qualidade do mesmo, tem-se que em determinadas estruturas, armadas ou não, as solicitações de tração passam a ser determinantes, para tanto é verificado como exemplo clássico os blocos de concreto massa tracionados por gradientes térmicos e os pavimentos.

Em projetos estruturais de concreto armado, o aço é o elemento proposto a absorver aos esforços de tração. A resistência à tração é importante para verificação de fissuração no concreto, quando a estrutura é submetida às condições de serviço. Em estruturas de concreto maciço, tais como barragens, é impraticável o uso de barras de aço. No entanto, uma estimativa confiável da resistência à tração do concreto é necessária, especialmente para se avaliar a segurança da barragem sob abalos sísmicos e retração. (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

A resistência à tração para concretos convencionais é em torno de 0,1 a 0,15 (10 a 15 %) da resistência à compressão. Esta grande diferença é atribuída à estrutura heterogênea e

complexa do concreto. Quanto maior a resistência à compressão do concreto, maiores são as relações (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Vale salientar que os parâmetros que influenciam nas características da microestrutura da matriz de cimento e da zona de transição dos agregados com a pasta de cimento, são fatores decisivos no valor da resistência à tração do concreto.

Neste ensaio os corpos-de-prova foram submetidos a cargas de compressão ao longo de duas linhas axiais, as quais devem ser diametralmente opostas. A carga é aplicada de forma contínua a uma velocidade constante dentro de um intervalo de tensão de ruptura de 0,70 a 1,40 MPa, até a ruptura do corpo-de-prova. A tensão de compressão produz uma tensão transversal que é uniforme ao longo do diâmetro vertical. A resistência à tração determinada pelo ensaio de compressão diametral é calculada pela Equação [5.1]:

$$T = 2P / \pi l d \quad \text{Equação [5.1]}$$

Onde **T** é a resistência de tração, **P** a carga de ruptura, **l** o comprimento e **d** o diâmetro do testemunho e π valor constante igual a 3,1416.

A Figura 5.14 apresenta as dimensões, de acordo com a norma NBR 7222/94, aceitáveis para a realização deste ensaio.

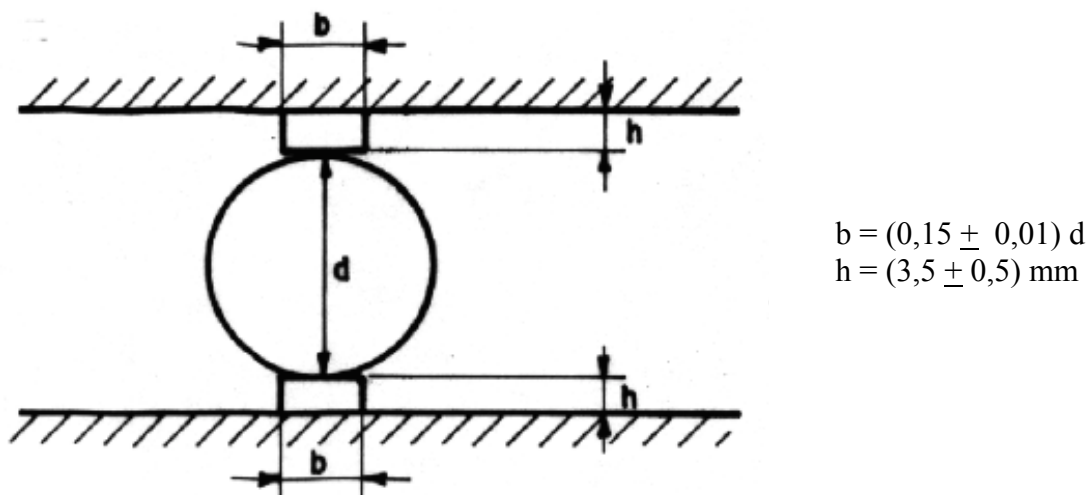


FIGURA 5.14 – Disposição do corpo-de-prova. (NBR 7222, ABNT 1994)

Ademais das correlações entre as resistências à tração e à compressão axial simples, é conclusivo que todos os fatores que influem na resistência à compressão influem também na resistência à tração. Há, no entanto, um agravante com relação à resistência à tração e que se refere à textura do agregado. Para concretos de mesmo consumo e quantidade de pasta, agregados com textura lisa, em geral seixos rolados, podem proporcionar concretos menos resistentes à tração que quando se usados agregados com textura mais rugosa, devido a sua aderência com a pasta. (ANDRILO; SGARBOZA, 1993).

Embora o concreto não seja projetado para resistir à tração, o conhecimento desta propriedade é útil para estimar a carga à qual ocorre a fissuração. Neville (1997), afirma que a ausência de fissuração é muito importante para se conservar a continuidade de uma estrutura de concreto e, em muitos casos, para prevenção de corrosão da armadura.

5.8.7. Módulo de Deformação

De um modo geral, todos os materiais, quando submetidos a tensões, podem apresentar deformações elásticas ou plásticas. No primeiro caso, a deformação desaparece quando a tensão é removida. No caso das deformações plásticas, ocorre um deslocamento permanente dos átomos que constituem o material. Este tipo de deformação é irreversível e praticamente proporcional à tensão aplicada (VAN VLACK, 1970). Na Figura 5.15 mostram-se gráficos típicos de relações tensão-deformação elástica e plástica.

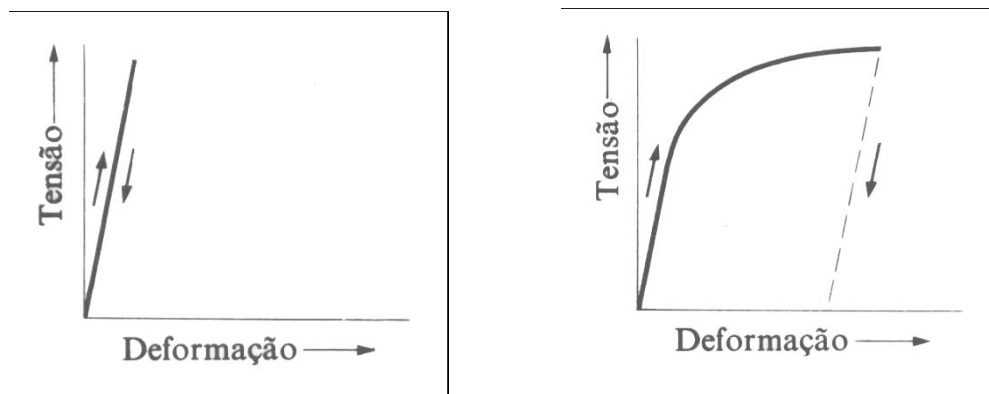


FIGURA 5.15 – Relação tensão-deformação elástica (à esquerda) e plástica (à direita) (VAN VLACK, 1970).

Para o caso particular do concreto, as deformações plásticas se iniciam em patamares de tensão menores do que 50% da carga de ruptura. Baseados nesse aspecto, Vasconcelos & Giammusso (1998) citam a preferência pela utilização do termo módulo de deformação, visto que o conceito de elasticidade pressupõe que, cessada a solitação, a deformação desaparece em qualquer nível de carregamento.

O conhecimento do módulo de deformação é fundamental na análise das deformações no concreto. Isso porque as estruturas devem ser projetadas de modo a sofrerem apenas pequenas deformações, que não ultrapassem os valores de tensão-deformação correspondentes ao trecho reto do diagrama (deformação elástica), embora o concreto não seja um material tipicamente elástico para qualquer estágio de carregamento a que esteja submetido (BEER & JOHNSTON, 1995).

Os materiais podem ser classificados, ainda, segundo as características da deformação decorrente da aplicação de carga. Quando o material não se deforma plasticamente antes da ruptura, considera-se que o material tem um comportamento frágil. Um material que se comporta de modo contrário, ou seja, deforma plasticamente antes da ruptura é considerado dúctil. Vale salientar que um material dúctil também tem um limite elástico (limite de proporcionalidade), além do qual ocorre deformação permanente (VAN VLACK, 1970).

Com relação aos constituintes do concreto, vale ressaltar que a porosidade, módulo de deformação, dimensão máxima, forma, textura superficial, granulometria e composição mineralógica do agregado gráudo são de relevante importância. Neville (1982) afirma que o módulo de deformação do concreto é afetado tanto pelo módulo de deformação do agregado como por seu conteúdo volumétrico dentro do concreto.

De acordo com Mehta & Monteiro (1994), dentre as características do agregado gráudo que afetam o módulo de deformação do concreto, a porosidade é a mais importante, visto que determina a rigidez do agregado. Sabendo que a rigidez controla a capacidade do agregado em restringir deformações do concreto, pressupõe-se que agregados densos, com alto módulo de deformação, resultarão em concretos com módulos de deformação maiores. No entanto, a influência dos agregados no valor do módulo de deformação do concreto

somente é evidenciada em idades mais avançadas já que às primeiras idades, a pasta de cimento, por ser o ligante dos agregados e por apresentar módulo baixo, exerce grande influência no módulo de deformação da mistura.

5.8.8. Profundidade de Carbonatação

Existem diferentes formas de avaliar o avanço da frente de carbonatação. Nos ensaios realizados nessa pesquisa de mestrado foi utilizada a fenolftaleína como indicador. Esta técnica é o processo mais comum, prático e mais econômico para a determinação da profundidade de carbonatação. A solução é preparada conforme a norma RILEM CPC-18 (1988).

O procedimento de execução deste ensaio seguiu as recomendações do RILEM CPC-18 (1988).

Após a moldagem e cura (7 dias) dos corpos-de-prova prismáticos em câmara úmida, eles foram armazenados no laboratório em sala de umidade relativa entre $50 \pm 10\%$, permanecendo nessa sala até o dia da realização do ensaio. Os ensaios foram realizados após 115 dias.

Após as medidas serem executadas foram feitos os cálculos para a determinação do tempo em que a profundidade de carbonatação levará para atingir a armadura. Para realização dos cálculos foram adotadas as Equações 5.2, 5.3 e 5.4:

$$\bullet \quad e_{\text{CO}_2} = K(t)^{1/2} \quad \text{Equação [5.2]}$$

$$\bullet \quad X = K (t')^{1/2} \quad \text{Equação [5.3]}$$

$$\bullet \quad T = t' - t \quad \text{Equação [5.4]}$$

Onde:

e_{CO_2} é a profundidade carbonatada;

K é uma constante relacionada às condições ambientais e características do concreto;

t é o tempo em anos que o concreto possui;

X é o cobrimento do concreto;

t' é o tempo em que a frente de carbonatação levará para atingir à armadura;

T é o tempo que ainda falta para a carbonatação chegar à armadura.

Os resultados foram apresentados de duas maneiras para melhor visualização. Primeiramente são mostradas as profundidades de carbonatação nos 3 pontos distintos de cada corpo-de-prova e, em seguida, as profundidades máximas para cada tipo de concreto. Para o cálculo do tempo de despassivação devido à carbonatação empregou-se a média dos 3 pontos medidos e a profundidade máxima de carbonatação em cada tipo de concreto.

5.8.9. Resistência à Penetração de Cloretos

A metodologia realizada nesta pesquisa para avaliar a resistência dos corpos-de-prova com substituição do agregado graúdo convencional, neste caso micaxisto, por escória de aciaria elétrica ao ingresso dos íons cloreto, como também, verificar o processo de iniciação da despassivação da armadura do concreto devido à corrosão, foi realizada através de ciclos de molhagem em solução com 2% de NaCl e secagem (Figura 5.16). O tempo deste ciclo era de 07 (sete) dias, ou seja, uma semana.

Após a moldagem e cura (7 dias) dos corpos-de-prova prismáticos (vigas de concreto armado) em câmara úmida, eles foram armazenados no laboratório em sala de umidade relativa controlada $50 \pm 10\%$. Para constatação de como os materiais estavam se comportando em relação ao processo corrosivo, durante o período dos ensaios, foram utilizadas técnicas eletroquímicas, com o uso do GECOR6 (GEOCISA), equipamento empregado para medir o Potencial de corrosão (E_{corr}), a Intensidade de corrosão (i_{corr}) e a Resistência ôhmica (R_{ohm}). Os ensaios de penetração dos cloretos foram realizados com simulação de situações de real agressividade, através de métodos acelerados



FIGURA 5.16 – Tanque de molhagem com solução de 2% de NaCl.

5.8.10. Medidas Eletroquímicas

A metodologia utilizada para a realização das medidas eletroquímicas possui aplicação relativamente fácil, devido a sua grande praticidade.

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) (Figura 5.17).



FIGURA 5.17 – GECOR6 – aparelho utilizado para realizar leituras eletroquímicas nas vigas de concreto.

Após a conexão dos cabos, coloca-se o anel de guarda na superfície do concreto com uma esponja umedecida, para garantir uma boa conexão elétrica na superfície, além de eliminar possíveis erros de leitura provocados por pequenas deformações (GEOCISA, 1993).

Feito isto, realiza-se uma conexão elétrica entre o aparelho e a armadura por meio de um cabo e um conector metálico. E em seguida, inicia-se o manuseio do aparelho de forma digital, através de entrada e saída de dados.

CAPÍTULO VI

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nesta pesquisa.

6.1. Análise Química da Escória de Aciaria Elétrica Utilizada

Trata-se de uma escória de aciaria proveniente de uma única corrida de forno panela de uma Siderúrgica do estado do Rio Grande do Sul (escória do refino redutor – FP).

As características desta escória encontram-se na Tabela 6.1. 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.

TABELA 6.1 – Características da escória de aciaria utilizada nos ensaios

Composição química	Escória de aciaria (%)
CaO	22,15
SiO ₂	38,54
Al ₂ O ₃	6,40
MgO	6,04
FeO	21,53
Na ₂ O	0,09
K ₂ O	0,30
SO ₃	0,29
Perda ao fogo	4,58
Resíduo insolúvel	11,19
i = CaO/SiO ₂	0,57
Massa específica	3,56 kg/dm ³

Pode-se considerar que esta escória é ácida, apresentando índice de basicidade (CaO/SiO₂) abaixo de 1,00 (valor de 0,57 para a escória estudada). Cabe salientar que esta

escória encontrava-se armazenada em tambores ao ar livre há aproximadamente 05 (cinco) anos, sendo portanto uma escória estável, sem possibilidade de expansão.

6.2. Expansibilidade – Por Agulhas de Le Chatelier

A Tabela 6.2 mostra todas as leituras feitas neste ensaio com seus valores médios. As figuras 6.1 e 6.2 mostram os ensaios sendo realizados.

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 ≤ 5 mm. Esta norma estabelece ainda como exigência física e mecânica facultativa a expansibilidade a frio em ≤ 5 mm.

Nos ensaios realizados a frio e a quente, a expansão manteve-se abaixo dos 5 mm para todos os casos. O que pode ser visualizado na Tabela 6.2.

Os resultados apontam uma semelhança entre a influência do óxido de magnésio e do óxido de cálcio, no caso da pasta com 40% de escória, pois a expansibilidade foi a mesma em ambos, a quente e a frio.

TABELA 6.2 - Resultados absolutos dos ensaios com agulhas de Le Chatelier

Elemento Testado	Expansão a frio (mm)	Média Expansão a frio (mm)	Expansão a quente (mm)	Média Expansão a quente (mm)	Limite NBR 11578/91 (mm)
Referência	0,50	0,17	0,50	0,17	Exigência obrigatória a quente ≤ 5
	0		0		
	0		0		
Escória (40%)	0	0,33	0	0,33	Exigência facultativa a fria ≤ 5
	0,50		0,50		
	0,50		0,50		

Foi escolhido a proporção de 40% de substituição do cimento por escória por tratar-se da pior situação estudada. Novamente ressalta-se o fato desta escória já ter uma idade

de aproximadamente cinco anos. Por isso a expansão detectada está de acordo com o esperado.



FIGURA 6.1 – Agulhas de Le Chatelier – Período de cura.



FIGURA 6.2 – Seis dias após o período de cura inicial (20 ± 4 h).

6.3. Ensaio de Abatimento do Tronco de Cone

Após a mistura de cada tipo de concreto foram realizadas as medições do abatimento de tronco de cone, segundo a NBR 7223 (ABNT, 1982). A Figura 6.3 mostra a realização deste ensaio.



FIGURA 6.3 – Medição de abatimento.

Observou-se que as características reológicas pertinentes à consistência pelo abatimento do tronco de cone estabelecido inicialmente, foram atendidas. Na Tabela 6.3 encontram-se os resultados dos ensaios de abatimento de tronco de cone nos concretos executados com relações água/cimento de 0,30, 0,52 e 0,80.

TABELA 6.3 – Ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone realizado conforme a NBR 7223 (ABNT 1992).

Consistência pelo abatimento do tronco de cone (mm)			
Relação a/c	Substituição - AGC / AEA		
	0%	50%	100%
0,30	1*	2	3
	85,0	90,0	100,0
0,52	4*	5	6
	85,0	80,0	80,0
0,80	7*	8	9
	120,0	95,0	80,0

* Traço de referência

AGC - Agregado Graúdo Convencional

AEA – Agregado Escória de Aciaria Elétrica

6.4. Resistência à Compressão

De acordo com o que foi descrito no capítulo 5, para os ensaios de determinação de resistência à compressão foram moldados 81 corpos-de-prova e as resistências determinadas aos 3, 7 e 28 dias das datas de cada moldagem, 3 cp's por idade, avaliando-se a influência das relações a/c e os diferentes teores de substituição ao agregado convencional.

Na Tabela 6.4 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão, dos concretos de referência e dos concretos com substituições de agregados convencionais (micaxisto), por escória de aciaria elétrica.

TABELA 6.4 – Resistência à compressão dos corpos-de-prova. (Média de 3 determinações)

Substituição (%) a/c	0%			50%			100%		
	Resistência (MPa)			Resistência (MPa)			Resistência (MPa)		
	3 DIAS	7 DIAS	28 DIAS	3 DIAS	7 DIAS	28 DIAS	3 DIAS	7 DIAS	28 DIAS
0,30	CP 1*			CP 2			CP 3		
	35,27	37,18	45,20	34,76	43,61	52,84	39,85	42,97	56,02
0,52	CP 4*			CP 5			CP 6		
	16,55	15,41	19,16	17,19	17,06	19,61	17,63	20,63	23,55
0,80	CP 7*			CP 8			CP 9		
	8,34	8,97	10,12	7,77	8,10	11,60	4,46	5,93	12,54

(*) Corpos-de-prova de referência

Para a análise dos resultados mostrados na Tabela 6.4, utilizou-se o programa computacional de regressão linear múltipla, TS-Sisreg. Foram consideradas as seguintes variáveis: Teor de substituição de agregado, relação água/cimento, idade do corpo-de-prova e valor da resistência, sendo esta última a variável dependente e as demais, independentes.

Foram realizadas combinações de transformações das variáveis com a intenção de linearizar curvas. As transformações aplicadas foram a inversa, o quadrado da inversa, o quadrado, a logarítmica, a raiz quadrada e o inverso da raiz quadrada de cada variável, respeitando as limitações das transformações da variável teor de substituição de agregado, que apresenta valores iguais a zero e, por isso, não pôde utilizar transformações inversa e logarítmica. A combinação de transformações resultou em 1029 equações de regressão. Para a primeira análise, considerando todas as variáveis, utilizou-se somente a equação que apresentou o maior valor de correlação linear (0,971024), cujo relatório está apresentado na Figura 6.4.

Como pode ser observado na Figura 6.4, a variável Substituição apresenta uma significância bem maior que as demais variáveis independentes e, após a análise gráfica dos resíduos do modelo de regressão (Figura 6.5), constatou-se a existência de um dado discrepante com relação aos demais, o dado 25, cujo resíduo foi maior do que duas vezes o desvio padrão do modelo de regressão.

MODELO: Resistência à compressão DATA: 13/2/2008

DADOS		VARIÁVEIS		COEFICIENTES			FISHER SNEDECOR		NORMALIDADE DOS RESÍDUOS (%)		
TOTAL	USADOS	TOTAL	USADAS	CORRELAÇÃO	DETERMINAÇÃO	AJUSTADO	F-CALC.	SIGNIFICÂNCIA	-1 a +1	-1,64 a +1,64	-1,96 a +1,96
27	27	4	4	0,987100	0,974367	0,971024	291,43	0,01	70	96	96

Padrão

68	90	95
----	----	----

MODELO DE REGRESSÃO

Resistência à compressão = $-3,635211 + 5,130583 * 1/\text{Relação A/C} + 0,204931 * \text{Substituição} + 0,215812 * \text{Idade (dias)}^2$

GRÁFICO DE ADERÊNCIA



DEFINIÇÕES BÁSICAS

- DETERMINAÇÃO : Percentual da Variação dos valores em torno do valor médio da Variável Dependente do Modelo de Regressão Linear que é causado pela variação das variáveis independentes utilizadas;
- CORRELAÇÃO : Grau de relação entre o conjunto de variáveis independentes e a Variável Dependente do Modelo;

N	Variável	Tipo	Definição	Amplitude	Escala	T-Student	Signific.	Determ. Ajustado
	Relação A/C	Quantitativa		0,30 a 0,80	1/x%	28,85	0,01	-0,032417
	Substituição	Quantitativa		0,00 a 1,00	x%	1,66	11,09	0,968912
	Idade (dias)	Quantitativa		3 a 28	x%	6,28	0,01	0,924834
	Resistência à compressão	Dependente		4,46 a 56,02	y%			

* Variável Não Utilizada

Determinação Ajustado: Calculado em Modelo Linear sem a presença da Variável. Deve ser inferior ao Coeficiente Ajustado do Modelo Linear com a presença da Variável: [0,971024](#)

FIGURA 6.4 – Relatório da equação de regressão gerada pelo programa TS-Sisreg

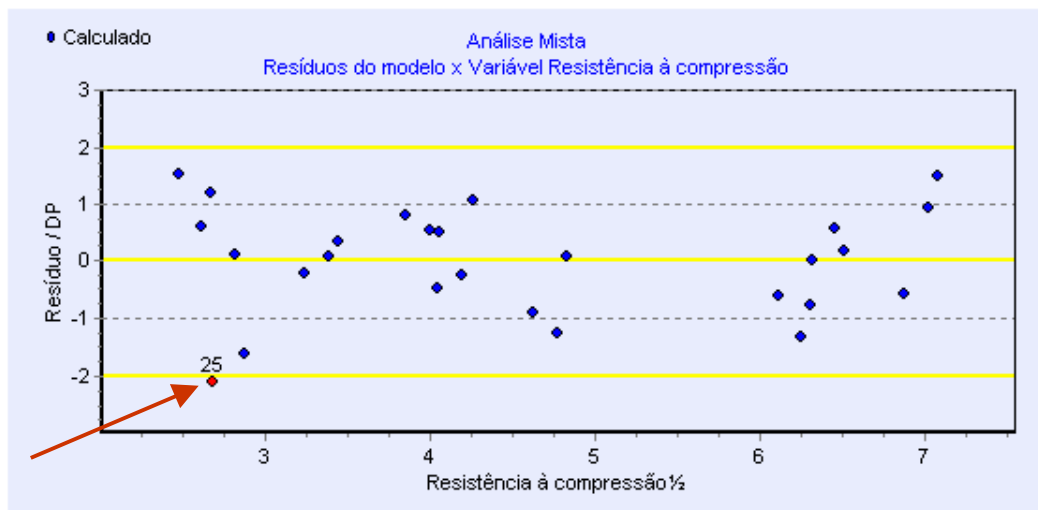


FIGURA 6.5 – Análise de resíduos do modelo de regressão.

O dado discrepante destacado na Figura 6.5 refere-se ao corpo-de-prova com 100% dos seus agregados substituídos pela escória de aciaria, relação água/cimento de 0,80 e ensaiado com idade de três dias. Esta discrepância, muito provavelmente, foi causada por

fatores aleatórios alheios ao controle das operações de dosagem, moldagem, cura e ruptura da peça. Desta forma, este dado foi desconsiderado e foi realizada uma nova análise, através da qual foi observado um outro dado discrepante, referente ao corpo-de-prova com 100% dos seus agregados substituídos pela escória de aciaria, relação água/cimento de 0,80 e ensaiado com idade de sete dias. Da mesma forma, este dado também foi eliminado.

Somente após a eliminação dos dois dados discrepantes é que se obteve um modelo de regressão com índices estatísticos satisfatórios, onde o coeficiente de determinação passou para 0,990184, como mostrado no relatório da Figura 6.6:

MODELO: Resistência à compressão									DATA: 14/2/2008			
DADOS		VARIÁVEIS		COEFICIENTES			FISHER SNEDECOR		NORMALIDADE DOS RESÍDUOS (%)			
TOTAL	USADOS	TOTAL	USADAS	CORRELAÇÃO	DETERMINAÇÃO	AJUSTADO	F-CALC.	SIGNIFICÂNCIA	-1 a +1	-1,64 a +1,64	-1,96 a +1,96	
27	25	4	4	0,995696	0,991411	0,990184	807,97	0,01	84	96	100	
									Padrão	88	90	95

MODELO DE REGRESSÃO

Resistência à compressão = 4,853713 *

$$e^{(0,160560 * \text{Substituição})} * e^{(0,077661 * \text{Idade (dias)}^{1/2})}$$

GRÁFICO DE ADERÊNCIA



DEFINIÇÕES BÁSICAS

- DETERMINAÇÃO : Percentual da Variação dos valores em torno do valor médio da Variável Dependente do Modelo de Regressão Linear que é causado pela variação das variáveis independentes utilizadas;
- CORRELAÇÃO : Grau de relação entre o conjunto de variáveis independentes e a Variável Dependente do Modelo;

N	Variável	Tipo	Definição	Amplitude	Escala	T-Student	Signific.	Determ. Ajustado
	Relação A/C	Quantitativa		0,30 a 0,80	ln(x)	-47,41	0,01	-0,012210
	Substituição	Quantitativa		0,00 a 1,00	x	5,03	0,01	0,979324
	Idade (dias)	Quantitativa		3 a 28	x ^{1/2}	9,44	0,01	0,950886
	Resistência à compressão	Dependente		7,77 a 56,02	ln(y)			

* Variável Não Utilizada

Determinação Ajustado: Calculado em Modelo Linear sem a presença da Variável. Deve ser inferior ao Coeficiente Ajustado do Modelo Linear com a presença da Variável: 0,990184

FIGURA 6.6 – Modelo de regressão obtido após a eliminação dos dados discrepantes.

Conforme relatório mostrado na Figura 6.6, todas as variáveis independentes, inclusive o teor de substituição apresentam significâncias isoladas iguais a 0,01%, indicando que a probabilidade destas variáveis influenciarem no valor da resistência à compressão dos corpos-de-prova ensaiados é igual a 99,99%.

Nas Figuras 6.7, 6.8 e 6.9 são mostrados graficamente os resultados de resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias, respectivamente.

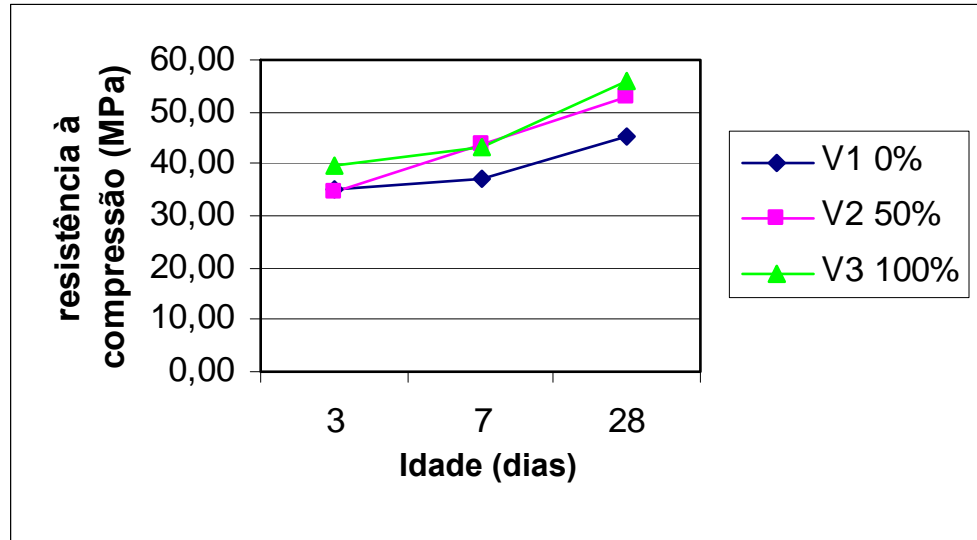


FIGURA 6.7 – Resistência à compressão x Idade ($a/c = 0,30$)

Utilizou-se nos concretos com relação $a/c = 0,30$ 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. O uso do mesmo foi de manter uma mesma consistência para os concretos em estudo.

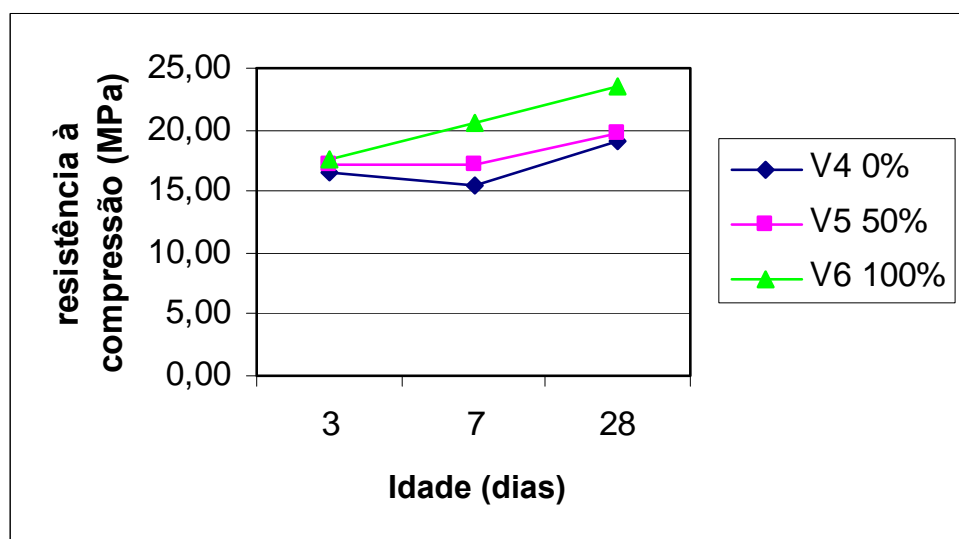


FIGURA 6.8 – Resistência à compressão x Idade ($a/c = 0,52$)

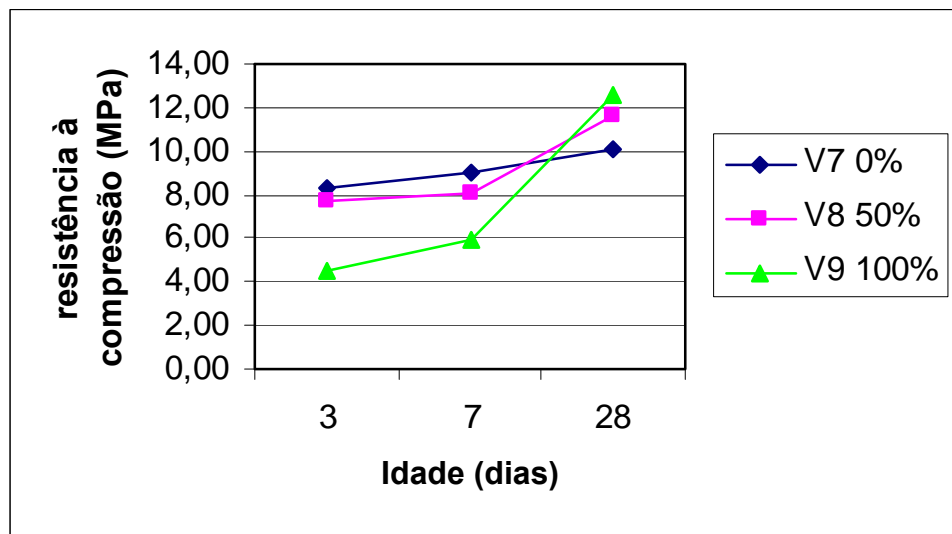


FIGURA 6.9 – Resistência à compressão x Idade ($a/c = 0,80$)

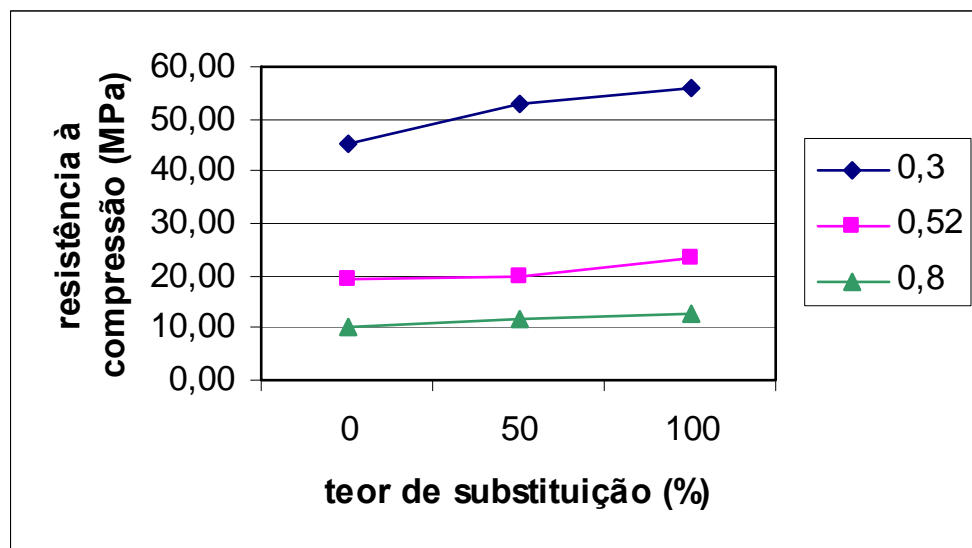


FIGURA 6.10 – Resistência à compressão x Teor de substituição

No gráfico da Figura 6.7 observa-se uma evolução das resistências dos 3 para os 7 e para os 28 dias, conforme o esperado, mostrando uma ligeira alta nestes valores para 100% de agregado siderúrgico aos 28 dias de idade. Os valores, para as três possibilidades (agregado convencional, substituição de 50% e 100% de agregado siderúrgico) para esta condição ($a/c = 0,30$), estão muito próximos, indicando que, para uma matriz cimentícia mais compacta, com um mínimo de água de hidratação, a influência do agregado não é significativa.

Na Figura 6.8 os valores de compressão são todos mais baixos que os apresentados na Figura 6.7, já que a relação a/c é mais alta. O mesmo ocorrendo na Figura 6.9, para relação a/c = 0,80.

Houve uma ligeira queda na resistência à compressão aos 7 dias (Figura 6.8), recuperando-se aos 28 dias de idade. Não há uma explicação clara para o fenômeno, podendo ter havido algum problema na moldagem desses Cp's.

Segundo Neville (1982), ainda não é completamente conhecido o papel da forma e da textura do agregado na evolução da resistência do concreto, mas possivelmente uma textura mais áspera resulte em maiores forças de aderência entre as partículas e a matriz de cimento. Tal fato pode ser observado nas Figuras 6.7 a 6.9, onde os concretos Cp 3, Cp 6 e Cp 9, ambos com 100% de substituição (convencional por siderúrgico), apresentaram as maiores resistências à compressão aos 28 dias. O que mostra também o gráfico da Figura 6.10.

6.5. Resistência à Tração por Compressão Diametral

A resistência à compressão do concreto é a propriedade geralmente usada em projetos estruturais mas, para algumas finalidades, se tem interesse na resistência à tração; exemplos desse caso são os projetos de placas de rodovias e de aeroportos, resistência ao cisalhamento e resistência à fissuração.

O ensaio de tração por compressão diametral é considerado de simples execução e de resultados mais uniformes do que o de tração direta. Neville (1982) afirma que a resistência obtida no ensaio de tração por compressão diametral apresenta valores próximos aos de ensaio de resistência à tração direta do concreto, sendo maiores que estes entre 5 e 12%. A Tabela 6.5 e a Figura 6.11 apresentam os resultados deste ensaio.

TABELA 6.5 – Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias.

Substituição(%) a/c	Resistência (MPa)		
	0%	50%	100%
0,30	CP 1* 4,07	CP 2 3,95	CP 3 4,42
0,52	CP 4* 2,32	CP 5 2,64	CP 6 2,8
0,80	CP 7* 1,72	CP 8 1,27	CP 9 1,75

* Valores de referência

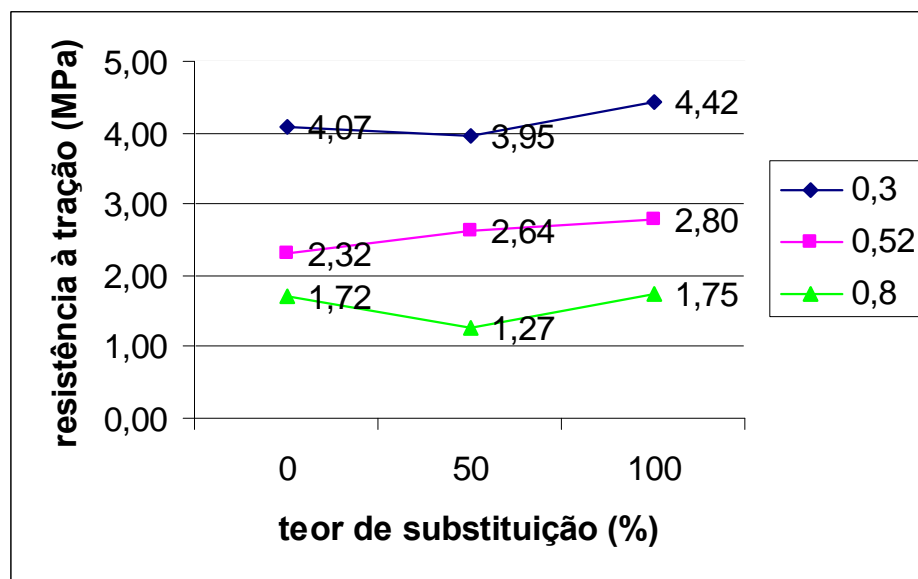


FIGURA 6.11 – Resistência à tração por compressão diametral x Teor de substituição.

De acordo com os resultados apresentados, nas Tabelas 6.4 e 6.5, verifica-se que os concretos V1*, V2 e V3, que possuem a menor relação $a/c = 0,30$, são os que apresentam as menores razões resistência tração/compressão variando entre 7,89% a 9,0%. Em seguida, os concretos V4*, V5 e V6, que possuem relação $a/c = 0,52$, apresentam razões variando entre 11,89% a 13,46%. Os concretos V7*, V8 e V9 que possuem a maior relação $a/c = 0,80$ são os que apresentam as maiores razões, variando entre 10,95% a 17,0%.

Observa-se que as resistências à compressão e à tração estão intimamente relacionadas, contudo, não há uma proporcionalidade direta. À medida que a resistência à compressão do concreto aumenta, a resistência à tração também aumenta, mas a uma velocidade decrescente. Em outras palavras, a razão resistência à tração/compressão depende do nível geral da resistência à compressão: quanto maior a resistência à compressão, menor será a relação.

A bibliografia aponta que esta relação é, em média, 10% (MEHTA & MONTEIRO, 1994). Portanto, os resultados são coerentes com a teoria.

Outro resultado interessante é o fato das resistências serem sempre maiores quando utilizado 100% de agregado siderúrgico. Como o material utilizado para todos estes ensaios já encontrava-se estável o problema da expansibilidade não foi preocupação nesta pesquisa.

Provavelmente a forma mais rugosa deste agregado tenha contribuído para o fenômeno. Vale ressaltar que o micaxisto é mais lamelar, além de ser mais liso.

6.6. Módulo de Deformação

O conhecimento do módulo de deformação de um concreto é muito importante do ponto de vista do projeto, quando se deve calcular as deformações dos diferentes elementos estruturais que compõem a estrutura (AİTCIN apud SENA, 2002).

A Figura 6.12 mostra o ensaio do módulo de deformação sendo realizado.

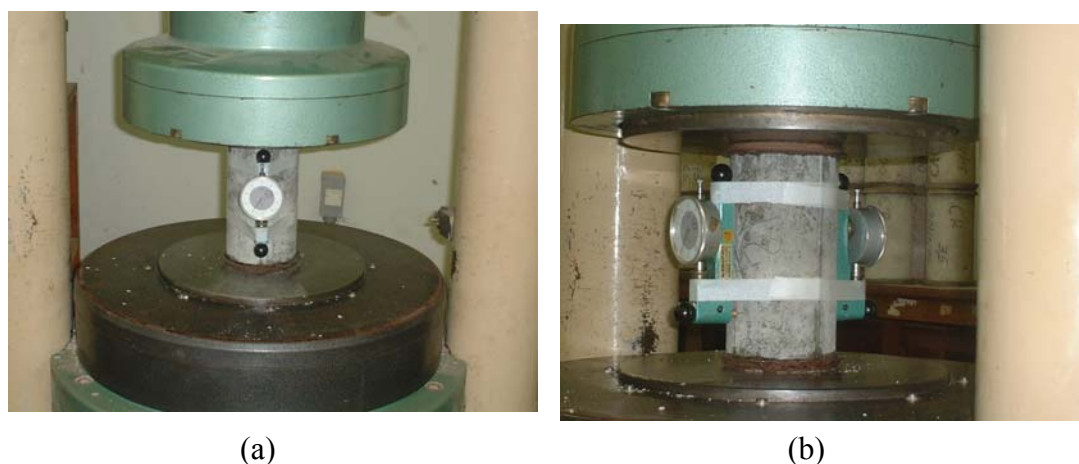


FIGURA 6.12 – a/b - Medição da deformação transversal.

Na Tabela 6.6 e na Figura 6.13 são apresentados os resultados do ensaio de módulo de deformação aos 28 dias.

TABELA 6.6 – Módulo de deformação de concreto com 28 dias (GPa).

Relação a/c	Substituição - AGC / AEA		
	0%	50%	100%
0,30	34,50	30,10	42,50
0,52	20,40	25,00	34,00
0,80	19,70	21,10	27,40

AGC - Agregado Graúdo Convencional

AEA – Agregado Escória de Aciaria Elétrica

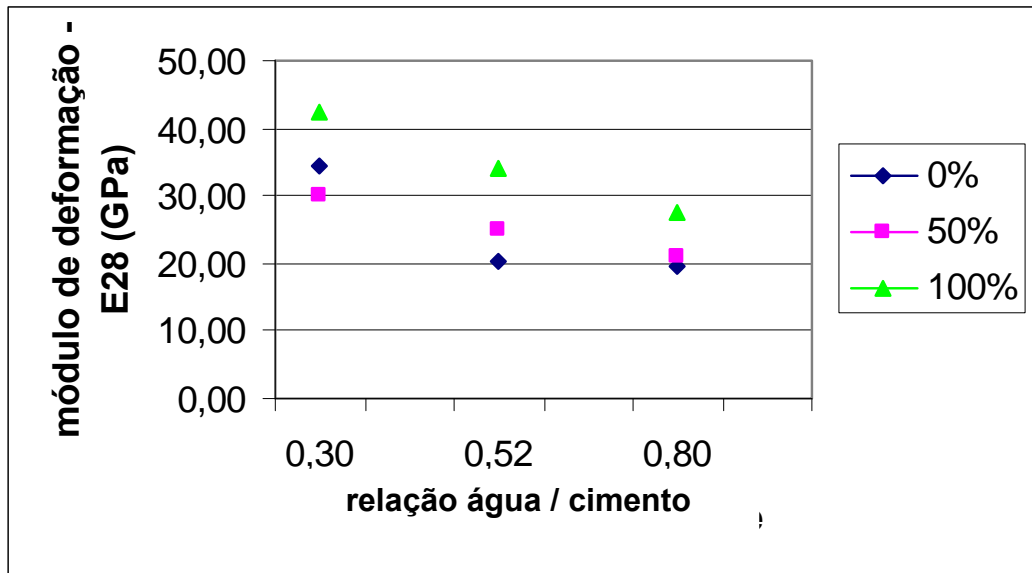


FIGURA 6.13 – Módulo de deformação x Relação água/cimento.

Pelos resultados mostrados na Tabela 6.6, pode-se concluir que o módulo de deformação de um concreto, em todos os casos das amostras estudadas, é inversamente proporcional à relação água/cimento, como esperado, já que é função da resistência à compressão do concreto.

Com exceção do corpo-de-prova V2 (50% de substituição do agregado convencional por agregado de escória de aciaria elétrica e relação a/c 0,30) todos os concretos, V1* a V9, obtiveram aumento do módulo de deformação com a substituição do agregado graúdo convencional por agregado graúdo de escória de aciaria elétrica. Tal fato se deve provavelmente a maior massa específica do agregado graúdo de escória de aciaria em relação ao agregado graúdo convencional (micaxisto), além de que o agregado graúdo de escória possui uma superfície vesicular o que permite um melhor intertravamento entre a pasta e o agregado, melhorando assim a sua zona de transição.

Segundo Mehta & Monteiro (1994) em materiais homogêneos existe uma relação direta entre massa específica e módulo de deformação. Em materiais heterogêneos e multifásicos como o concreto, a fração volumétrica, a massa específica e o módulo de deformação dos principais constituintes e as características da zona de transição determinam o comportamento elástico do compósito.

6.7. Carbonatação

Ação da fenolftaleína foi feita logo após limpeza das superfícies e fratura de 3 locais diferentes dos corpos-de-prova. Nas regiões de pH superior a 9,0 o concreto passou a apresentar uma tonalidade vermelho-carmim. Nas regiões onde, devido à carbonatação, o pH passa a apresentar valores inferiores a 9,0, o concreto manteve-se incolor. A leitura da profundidade de carbonatação foi feita logo após a aplicação do indicador e medida com auxílio do paquímetro. As Figuras 6.14 e 6.15 mostram um dos corpos-de-prova com aplicação da fenolftaleína e a posterior medição da profundidade carbonatada com a utilização do paquímetro.

As medições das profundidades carbonatadas foram realizadas 115 dias de idade dos corpos-de-prova. Vale ressaltar que os mesmos foram envelhecidos naturalmente, ou seja, não houve aceleração da carbonatação.



FIGURA 6.14 – Aplicação de fenolftaleína.



FIGURA 6.15 – Leitura da profundidade carbonatada.

Os resultados de profundidade de carbonatação são apresentados de duas formas. A primeira (Figura 6.16) mostra a profundidade de carbonatação obtida em três pontos distintos dos corpos-de-prova de concreto de referência e com substituições do agregado graúdo. A segunda, mostrada na Figura 6.17, utiliza-se o valor máximo de profundidade de carbonatação obtida em cada tipo de concreto. Para efeitos de avaliação da corrosão, deve-se

registrar o valor máximo alcançado pela frente de carbonatação, uma vez que neste ponto já se teria a despassivação da armadura.

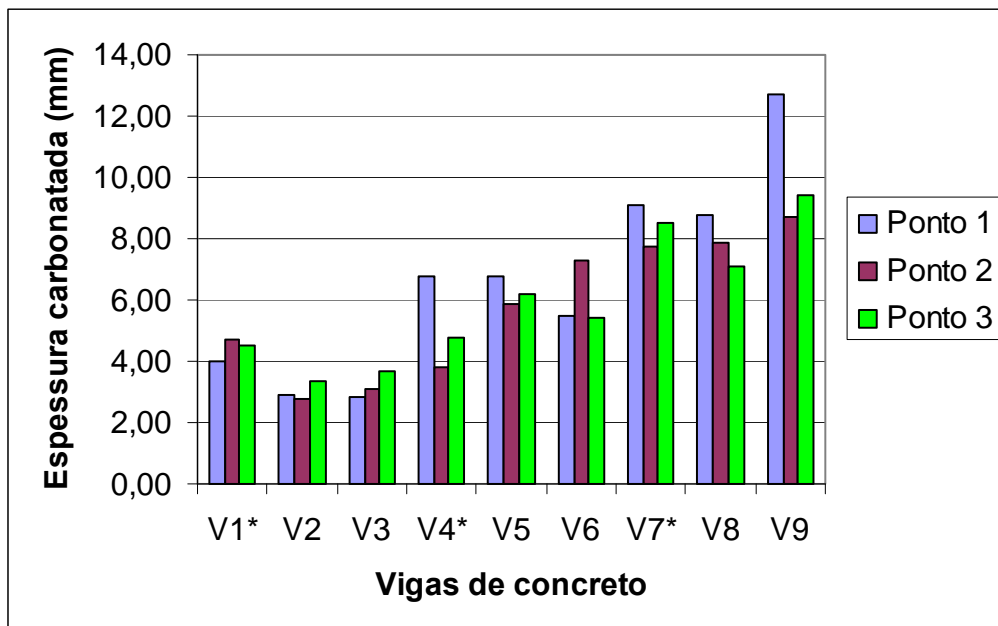


FIGURA 6.16 – Profundidade de carbonatação medida em três pontos diferentes dos corpos-de-prova.

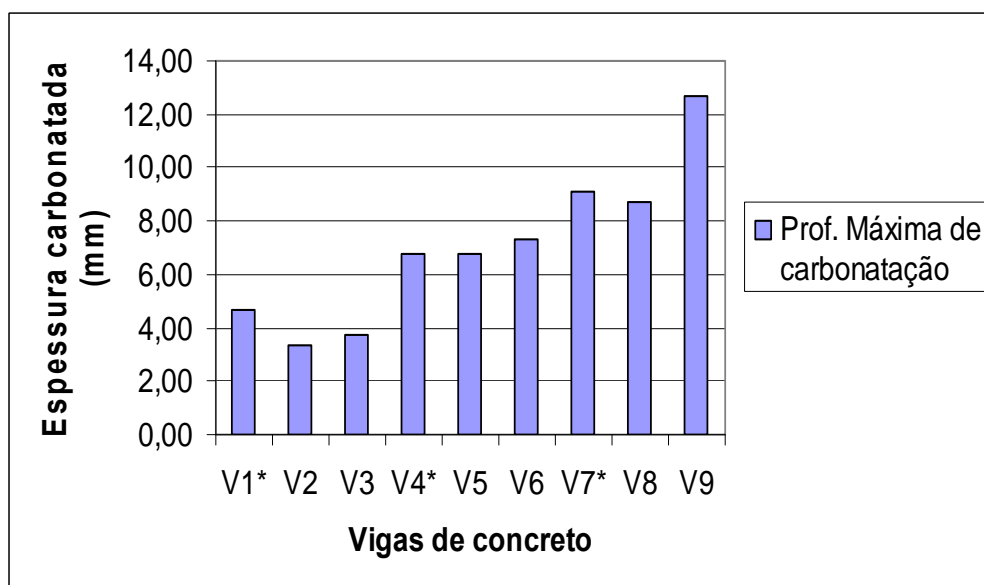


FIGURA 6.17 – Profundidade máxima de carbonatação.

Com os valores encontrados de profundidade de carbonatação é possível calcular o tempo em que a frente de carbonatação levará para alcançar a armadura. Dessa maneira pode-se estimar o tempo de vida útil residual de uma estrutura, devido à carbonatação.

Com a utilização das equações apresentadas no item 5.8.8 encontra-se o tempo que a frente de carbonatação levará para atingir a armadura, ocasionando o início do processo da corrosão.

Na Tabela 6.7, encontram-se a espessura do cobrimento, a média da profundidade carbonatada, a profundidade máxima da carbonatação e os tempos que a carbonatação levará para chegar na armadura do concreto empregando-se a profundidade média para os três pontos avaliados e a profundidade máxima de carbonatação. E_{CO_2}

TABELA 6.7 – Resultados do ensaio de carbonatação.

Concretos	Cobrimento X (mm)	Média da profundidade carbonatada E_{CO_2} (mm)	Profundidade máxima de carbonatação E_{CO_2} (mm)	Tempo para carbonatação chegar na armadura T (anos)	
				Média	Ponto máximo
V1*	25	4,40	4,70	9,85	8,60
V2		3,01	3,33	21,41	17,44
V3		3,22	3,70	18,67	14,07
V4*		5,11	6,75	7,22	4,00
V5		6,29	6,78	4,66	3,97
V6		6,07	7,30	5,02	3,38
V7*		8,44	9,10	2,45	2,06
V8		7,92	8,75	2,82	2,25
V9		10,27	12,70	1,55	0,91

Segundo Neville (1997), a velocidade de carbonatação do concreto aumenta com o teor de CO_2 , principalmente com relações a/c altas, ocorrendo o transporte do CO_2 por meio do sistema de poros da pasta de cimento endurecida.

A análise dos resultados de carbonatação observados foi realizada estatisticamente, através de regressão linear múltipla, com o auxílio do programa computacional TS-Sisreg. Na análise, foram consideradas as variáveis de relação água/cimento, teor de substituição de agregado e profundidade da carbonatação, sendo esta última a variável dependente, e, as demais, independentes.

Foram realizadas combinações de transformações das variáveis com a intenção de linearizar curvas. As transformações aplicadas foram a inversa, o quadrado da inversa, o quadrado, a logarítmica, a raiz quadrada e o inverso da raiz quadrada de cada variável, respeitando as limitações das transformações da variável teor de substituição de agregado, que apresenta valores iguais a zero e, por isso, não pôde utilizar transformações inversa e logarítmica. A combinação de transformações resultou em 147 equações de regressão. Para a primeira análise, considerando todas as variáveis, utilizou-se somente a equação que apresentou o maior valor de correlação linear, cujo relatório está apresentado na Figura 6.18.

MODELO: Carbonatação

DATA: 13/02/2008

DADOS		VARIÁVEIS		COEFICIENTES			FISHER SNEDECOR		NORMALIDADE DOS RESÍDUOS (%)		
TOTAL	USADOS	TOTAL	USADAS	CORRELAÇÃO	DETERMINAÇÃO	AJUSTADO	F-CALC.	SIGNIFICÂNCIA	-1 a +1	-1,64 a +1,64	-1,96 a +1,96
9	9	3	3	0,952058	0,908414	0,875219	29,08	0,01	77	100	100

Padrão	68	90	95

MODELO DE REGRESSÃO

$$\text{Carbonatação (mm)} = 0,101308 + 3,169948 * \text{Relação A/C} + 0,066513 * \text{Teor de substituição}^2$$

GRÁFICO DE ADERÊNCIA**DEFINIÇÕES BÁSICAS**

- **DETERMINAÇÃO** : Percentual da Variação dos valores em torno do valor médio da Variável Dependente do Modelo de Regressão Linear que é causado pela variação das variáveis independentes utilizadas;
- **CORRELAÇÃO** : Grau de relação entre o conjunto de variáveis independentes e a Variável Dependente do Modelo;

N	Variável	Tipo	Definição	Amplitude	Escala	T-Student	Signific.	Determ. Ajustado
	Relação A/C	Quantitativa		0,30 a 0,80	x	7,61	0,03	-0,139077
	Teor de substituição	Quantitativa		0,00 a 1,00	x ²	0,46	66,14	0,889264
	Carbonatação (mm)	Dependente		3,01 a 10,27	y			

* Variável Não Utilizada

Determinação Ajustado: Calculado em Modelo Linear sem a presença da Variável. Deve ser inferior ao Coeficiente Ajustado do Modelo Linear com a presença da Variável: 0,875219

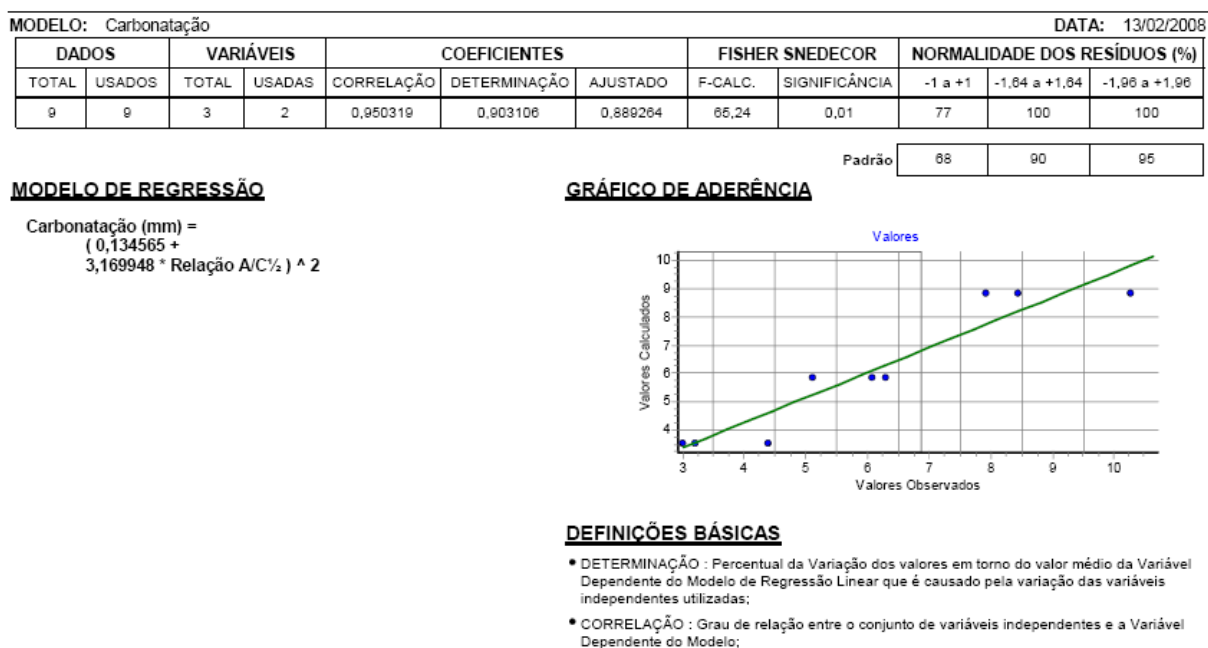
FIGURA 6.18 – Relatório da melhor equação – utilizando-se todas as variáveis.

Como pode ser observado no relatório da Figura 6.18, o valor do coeficiente de determinação ajustado para a variável Teor de substituição é maior que o valor do coeficiente de determinação do modelo de regressão obtido e o valor da significância isolada para a mesma variável é maior que 66%, indicando que a probabilidade da variável influenciar nos valores obtidos para as medidas de carbonatação, para os corpos-de-prova ensaiados, é inferior a 44%. Diante destas observações, verifica-se que a substituição do agregado por escória de aciaria elétrica não teve influência na velocidade de carbonatação.

A variável relação água/cimento, entretanto, apresentou um coeficiente de determinação ajustado bem inferior ao do modelo de regressão e a significância inferior a 0,1%, indicando que a probabilidade desta variável realmente ter influência sobre os valores

obtidos para as medidas de carbonatação é superior a 99,9% para os corpos-de-prova ensaiados.

A Figura 6.19 mostra outro relatório do mesmo programa, mas neste caso, foi desconsiderada a variável Teor de substituição.



N	Variável	Tipo	Definição	Amplitude	Escala	T-Student	Signific.	Determ. Ajustado
	Relação A/C	Quantitativa		0,30 a 0,80	x%	8,08	0,01	0,000000
	Teor de substituição	Quantitativa						
	Carbonatação (mm)	Dependente		3,01 a 10,27	y%			

* Variável Não Utilizada

Determinação Ajustado: Calculado em Modelo Linear sem a presença da Variável. Deve ser inferior ao Coeficiente Ajustado do Modelo Linear com a presença da Variável: 0,889264

FIGURA 6.19 – Relatório da melhor equação – desconsiderando Teor de substituição.

Assim sendo, ao contrário do que ocorre com a variável Teor de substituição, a relação água/cimento influencia na velocidade da carbonatação.

Observa-se para a profundidade de carbonatação média, Tabela 6.7, que os concretos com relação $a/c = 0,80$, V7*, V8 e V9, foram os que apresentaram maiores profundidades de carbonatação. Enfim, a profundidade de carbonatação se apresentou proporcional em relação a/c . Quanto maior a relação a/c , maior a profundidade de carbonatação. Verifica-se, neste caso, que a escória de aciaria elétrica não teve influência na velocidade de carbonatação e sim a relação a/c .

6.8. Penetração de Cloretos

Este ensaio tem como objetivo a avaliação da resistência dos concretos com substituição do agregado graúdo por escória de aciaria elétrica à penetração de íons cloreto.

Para tanto, os concretos foram submetidos a ciclos de molhagem em solução de 2% de NaCl e secagem, conforme metodologia descrita no item 5.8.9.

Os registros dos parâmetros eletroquímicos foram feitos no período de 115 a 220 dias de idade dos corpos-de-prova.

Os gráficos relacionados a seguir mostram os resultados obtidos, fazendo uma comparação entre o concreto de referência e os concretos com substituição dos agregados convencionais por siderúrgicos.

6.8.1. Potencial de corrosão

A *American Society for Testing and Materials C876* (ASTM C876/91) prescreve o método de ensaio para a obtenção dos potenciais de corrosão em concreto e estabelece avaliação da probabilidade de corrosão em armaduras de concreto. Apesar de qualitativo na análise de avaliação de corrosão das armaduras, o levantamento de potenciais de corrosão em estruturas constitui-se, ainda, a técnica mais utilizada para monitorar estruturas de concreto armado com vistas à corrosão das armaduras e constitui-se num instrumento que, se rigorosa e cuidadosamente utilizado, permite identificar de forma não destrutiva as áreas com probabilidade de corrosão (CASCUDO, 1997). A Tabela 4.5 apresenta os critérios de avaliação das medidas dos potenciais de corrosão.

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.

A Tabela 6.8 mostra os resultados obtidos e as Figuras 6.20, 6.21 e 6.22 a sua visualização.

TABELA 6.8 – Resultados do potencial de corrosão.

DATAS MEDIÇÕES	A – AMBIENTE I – IMERSO	DIA S	POTENCIAL DE CORROSÃO - Ecorr (-mV)								
			MEDIÇÕES								
			V1*	V2	V3	V4*	V5	V6	V7*	V8	V9
29/dez	A	115	142,8	169,7	190,1	176,1	162,4	157,1	120,8	35,2	50,1
05/jan	I	122	703,6	676,3	688,7	622,1	665,2	451,9	645,1	671,5	699,3
12/jan	A	129	317,0	156,1	327,4	243,5	240,8	252,3	224,1	251,7	318,1
19/jan	I	136	453,8	507,4	528,4	525,7	507,8	492,2	568,6	567,2	608,0
26/jan	A	143	186,4	172,3	330,8	256,2	248,2	287,1	262,3	278,6	342,6
02/fev	I	150	185,93	548,7	535,2	610,4	513,8	577,2	671,8	589,5	672,8
09/fev	A	157	161,12	194,7	342,6	277,3	307,4	309,6	312,4	384,5	412,9
16/fev	I	164	567,3	634,2	660,5	657,1	634,7	615,2	710,8	709	760
23/fev	A	171	139,67	184,5	372,3	302,5	326,7	655,2	352,3	455,1	522,6
01/mar	I	178	161,57	620,2	638,9	639,5	486,3	630,7	651,9	520,7	632,7
08/mar	A	185	227,4	269,6	325,8	351,3	382	337	339	424,9	417,2
15/mar	I	192	384,7	627,2	583,2	616,6	700,5	682,6	629,1	612,3	649,2
22/mar	A	199	347,6	341,9	382,1	432,3	413,5	413,9	544,2	534,3	565,8
29/mar	I	206	528	617,9	509,6	622,6	493,4	383,7	610,2	509,1	624,3
05/abr	A	213	386,2	359,7	387,5	448,2	401,5	503,6	413,4	436,5	517,4
12/abr	I	220	192,63	499,5	520,1	618,9	466,1	397,6	619,7	586,1	609,4

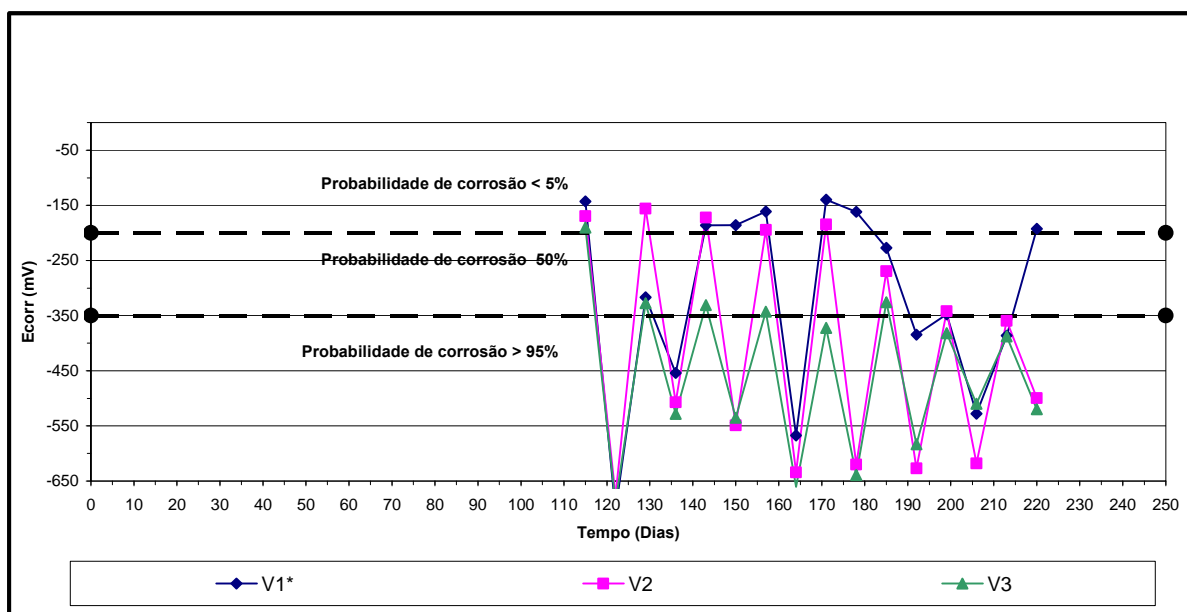


FIGURA 6.20 – Potenciais de corrosão versus tempo para vigas V1*, V2 e V3 que têm relação a/c de 0,30.

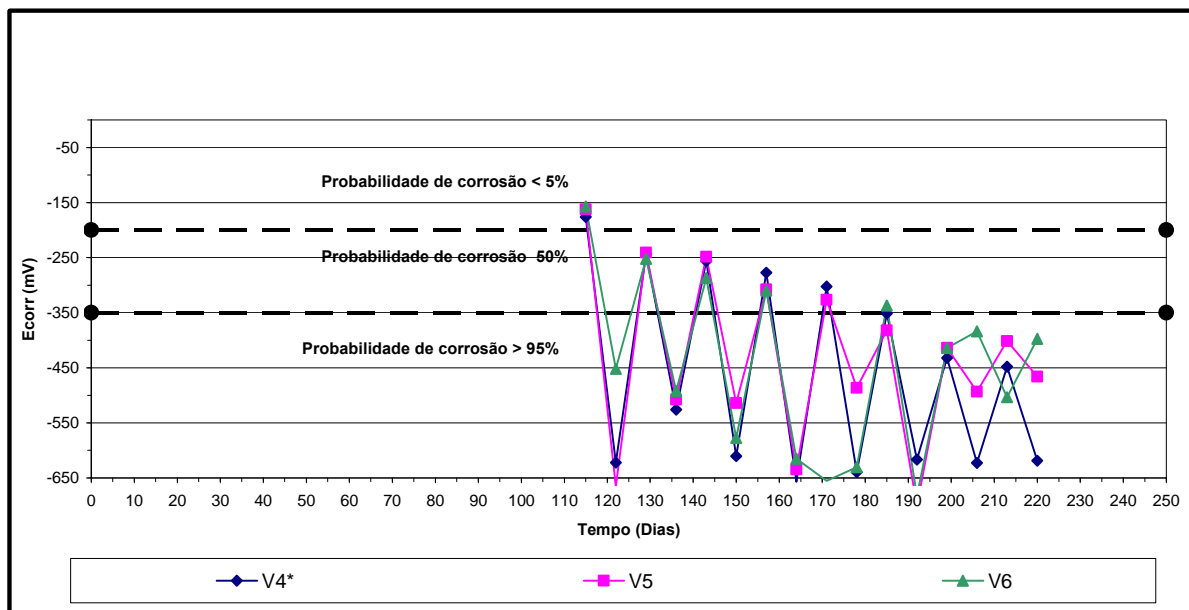


FIGURA 6.21 – Potenciais de corrosão versus tempo para vigas V4*, V5 e V6 que têm relação a/c de 0,52.

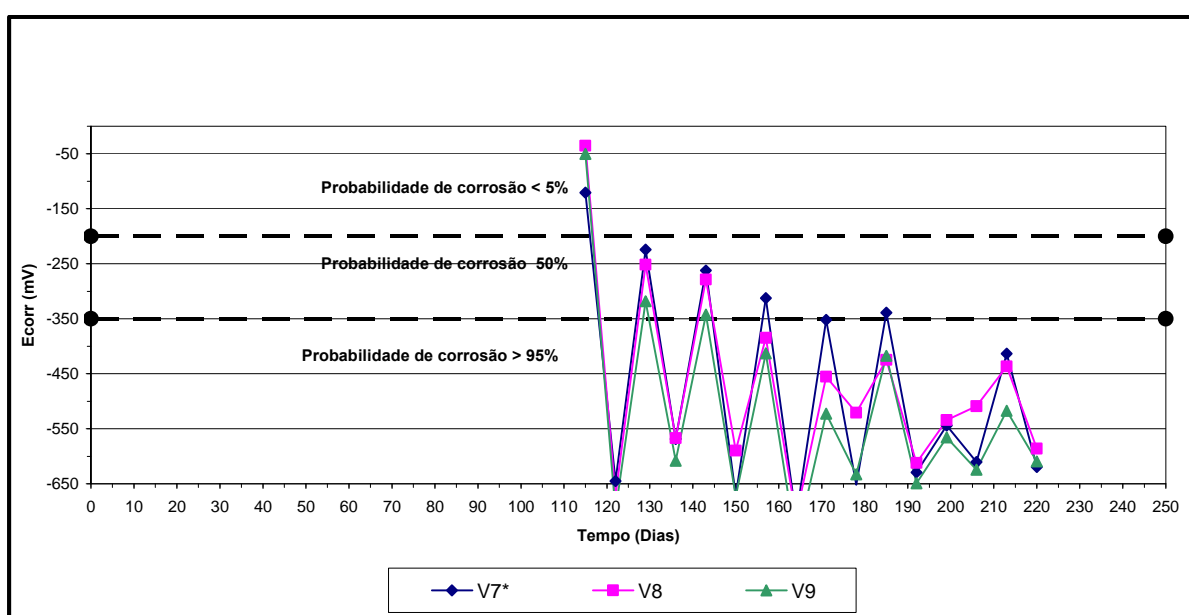


FIGURA 6.22 – Potenciais de corrosão versus tempo para vigas V7*, V8 e V9 que têm relação a/c de 0,80.

Das medições de potenciais de corrosão dos corpos-de-prova observa-se um comportamento aproximadamente igual nos que possuem a mesma relação a/c. Verifica-se também que os corpos-de-prova que apresentam uma maior probabilidade de corrosão são os de maiores relações a/c.

O aumento do potencial, para relações a/c maiores, implica diretamente na porosidade do concreto, uma vez que concretos com grande número de vazios favorecem a propagação da corrosão, pela facilidade com a qual os íons cloreto atingem a armadura e são capazes de despassivá-la.

Define-se, neste caso, que a adição do agregado de escória de aciaria não interferiu nos resultados do ensaio e sim a relação a/c que quanto maior, maior a tendência de despassivação da armadura e conseqüente corrosão.

6.8.2. Resistência de polarização i_{corr} (Intensidade de Corrosão)

A resistência de polarização (i_{corr}) 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 I_{corr} muito maior do que aquele onde há atividade corrosiva. A polarização ocorre aplicando-se sinais em forma de potencial (E) e registrando-se o incremento de corrente (I). A resistência de polarização é definida como sendo o quociente entre os incrementos de potencial e a corrente resultante ($I_{corr} = E/I$).

Alonso & Andrade citado por Azevedo, 2001 propuseram os critérios descritos na Tabela 4.4 para se avaliar a corrosão, com os dados obtidos pela técnica de resistência de polarização.

A Tabela 6.9 e as Figuras 6.18, 6.19 e 6.20 mostram os resultados obtidos.

TABELA 6.9 – Resultados de resistência de polarização i_{corr} (Intensidade de Corrosão).

DATAS MEDIÇÕES	A - AMBIENTE I - IMERSO	DIAS	INTENSIDADE DE CORROSÃO - i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)								
			MEDIÇÕES								
			V1*	V2	V3	V4*	V5	V6	V7*	V8	V9
29/dez	A	115	0,639	1,191	0,513	0,472	0,615	0,592	0,199	0,040	0,031
05/jan	I	122	3,663	1,521	4,609	2,344	2,466	3,492	3,472	4,313	6,466
12/jan	A	129	1,348	0,186	0,552	1,109	2,021	1,073	0,910	0,150	0,214
19/jan	I	136	0,478	1,052	0,712	1,308	1,000	0,100	4,650	0,038	3,834
26/jan	A	143	0,834	0,205	0,600	0,636	0,638	0,625	0,298	0,268	0,226
02/fev	I	150	0,832	1,423	0,823	1,863	1,204	3,207	5,230	1,215	3,648
09/fev	A	157	0,721	0,805	0,592	1,100	0,892	1,062	0,476	0,375	0,268
16/fev	I	164	0,598	1,315	0,890	1,635	1,237	0,125	5,813	0,047	4,793
23/fev	A	171	0,625	0,196	0,648	0,893	0,655	0,650	0,457	0,548	1,215
01/mar	I	178	0,723	1,486	0,893	1,738	1,314	3,530	3,782	1,302	2,035
08/mar	A	185	0,403	0,050	0,802	0,495	0,952	0,671	0,710	0,704	0,315
15/mar	I	192	0,973	3,905	0,948	2,935	0,490	3,041	5,037	1,339	2,537
22/mar	A	199	0,858	0,199	0,630	0,821	2,179	1,087	2,557	1,598	1,335
29/mar	I	206	0,863	1,508	0,458	0,141	2,090	5,604	5,803	0,750	1,665
05/abr	A	213	5,918	0,702	0,582	0,036	0,125	0,029	0,354	0,166	0,236
12/abr	I	220	0,862	0,009	0,875	0,684	0,007	2,980	5,850	1,472	0,247

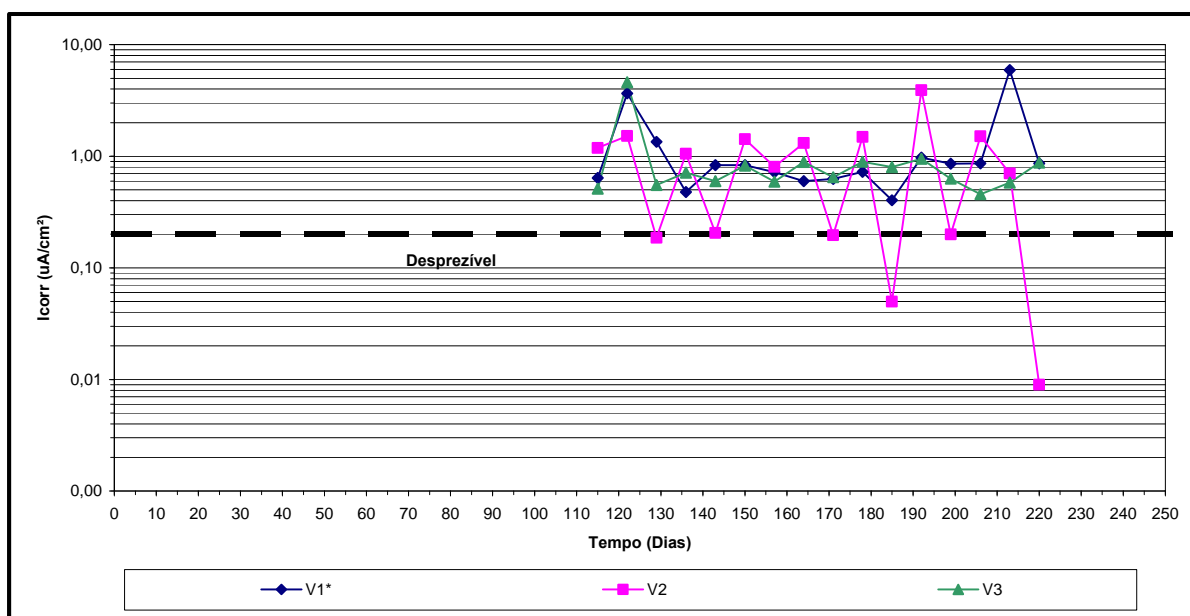


FIGURA 6.23 – Velocidade de corrosão (resistência de polarização) versus tempo. Vigas V1*, V2 e V3 têm relação a/c de 0,30.

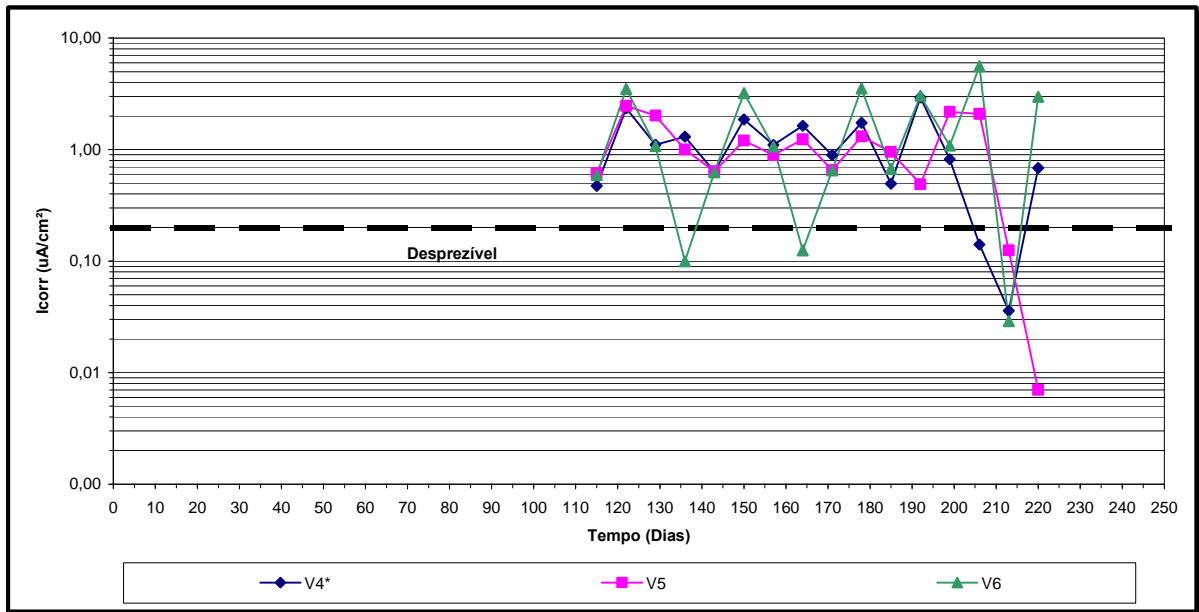


FIGURA 6.24 – Velocidade de corrosão (resistência de polarização) versus tempo. Vigas V4*, V5 e V6 têm relação a/c de 0,52.

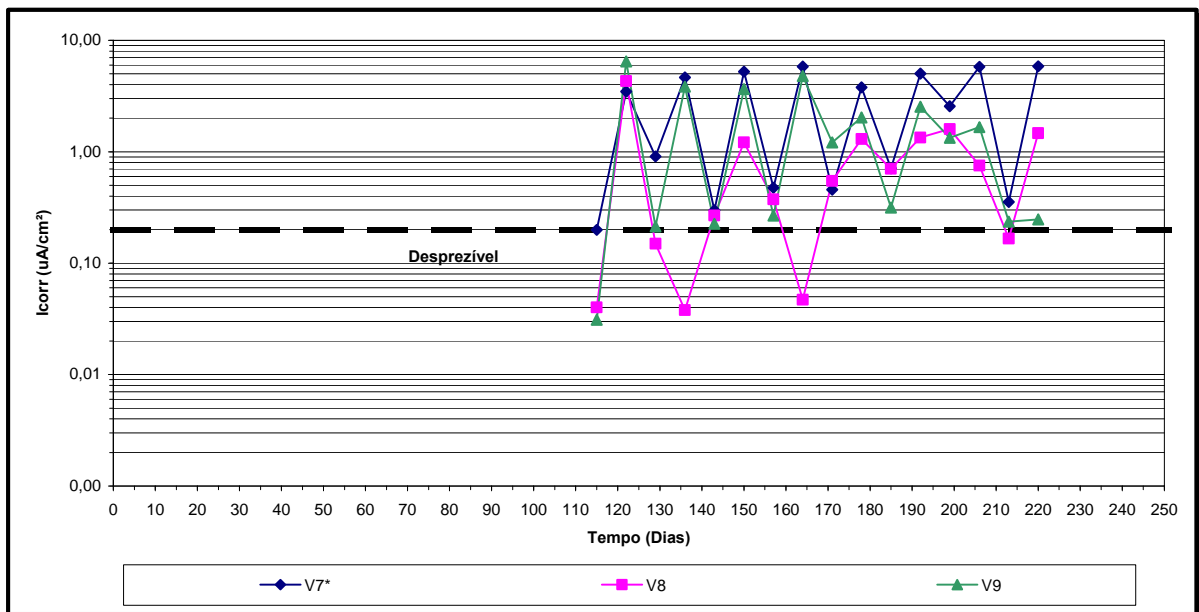


FIGURA 6.25 – Velocidade de corrosão (resistência de polarização) versus tempo. Vigas V7*, V8 e V9 têm relação a/c de 0,80.

Observou-se nas figuras 6.23, 6.24 e 6.25, que as vigas com maior relação a/c apresentaram um maior aumento na intensidade de corrosão.

Para relação a/c de 0,30 (V1*, V2 e V3) as vigas apresentaram, em sua grande maioria, taxas de corrosão (icorr) entre 0,2 a 1,0 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, indicando que tais vigas encontram-se em início de corrosão ativa.

Para relação a/c de 0,52 (V4*, V5 e V6) as vigas apresentaram taxas de corrosão (icorr) próximos ou acima de 1,0 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, indicando assim um ataque importante mas não muito severo.

Para relação a/c de 0,80 (V7*, V8 e V9) as vigas apresentaram comportamento semelhante às vigas cuja relação a/c é igual a 0,52. Porém neste caso observou-se que a viga V8 (50% de ambos os agregados – convencional e siderúrgico) apresentou uma taxa de corrosão inferior a V7* e V9.

Nota-se que o teor de substituição não teve influência na intensidade de corrosão destas vigas, independente da relação a/c, exceto no caso da viga V8.

6.8.3. Resistividade do Concreto – (Ohm.cm)

São muitos os critérios relatados pela bibliografia que tentam correlacionar a resistividade elétrica do concreto com o risco de corrosão. O Comitê Euro-Internacional do Beton – CEB, adota os parâmetros de avaliação relacionados na Tabela 6.10, sendo bastante aceitos no meio técnico-científico. No entanto, ressalta-se que os resultados obtidos com o GECOR 6 não são de resistividade e sim de resistência ôhmica, não sendo possível o uso direto dos critérios da Tabela 6.10. Neste caso, os resultados serão empregados para avaliar a eficiência da barreira representada por cada tipo de concreto em aumentar o tempo de acesso dos íons cloreto através do concreto.

TABELA 6.10 – 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
< 5Kohm.cm	Muito alta

Na Tabela 6.11 encontram-se os resultados destas medições e nas Figuras 6.26 a 6.28 os mesmos encontram-se apresentados graficamente.

TABELA 6.11 – Resultados de resistência ôhmica.

DATAS MEDIÇÕES	A - AMBIENTE I - IMERSO	DIAS	RESISTIVIDADE ÔHMICA - kohm.cm								
			MEDIÇÕES								
			V1*	V2	V3	V4*	V5	V6	V7*	V8	V9
29/dez	A	115	2,390	1,130	0,540	0,570	0,630	0,400	1,470	3,190	1,110
05/jan	I	122	0,220	0,150	0,160	0,190	0,130	0,140	0,150	0,110	0,070
12/jan	A	129	0,500	0,760	0,350	0,490	0,690	0,350	2,160	1,180	0,400
19/jan	I	136	0,304	0,184	0,176	0,120	0,176	0,520	0,104	0,568	0,056
26/jan	A	143	0,522	0,732	0,400	0,520	0,710	0,490	1,210	0,980	0,047
02/fev	I	150	0,289	0,188	0,184	0,160	0,187	0,125	0,127	0,670	0,065
09/fev	A	157	0,603	0,568	0,200	0,590	0,645	0,370	2,200	0,203	0,050
16/fev	I	164	0,380	0,230	0,220	0,150	0,220	0,650	0,130	0,710	0,070
23/fev	A	171	0,622	0,466	0,270	0,440	0,268	0,310	1,113	0,095	0,420
01/mar	I	178	0,502	0,207	0,230	0,100	0,190	0,144	0,116	0,621	0,043
08/mar	A	185	1,840	10,180	0,460	1,430	1,410	0,360	1,080	0,190	0,460
15/mar	I	192	0,750	0,180	0,110	0,090	0,100	0,080	0,100	0,610	0,040
22/mar	A	199	0,610	6,380	0,250	0,340	0,170	0,170	0,140	0,080	0,190
29/mar	I	206	0,430	0,200	0,200	5,260	0,150	0,110	0,090	0,090	0,040
05/abr	A	213	1,440	0,430	0,290	9,260	0,220	7,080	0,360	0,110	0,100
12/abr	I	220	0,478	12,160	0,170	0,200	19,640	11,230	0,227	0,605	0,052

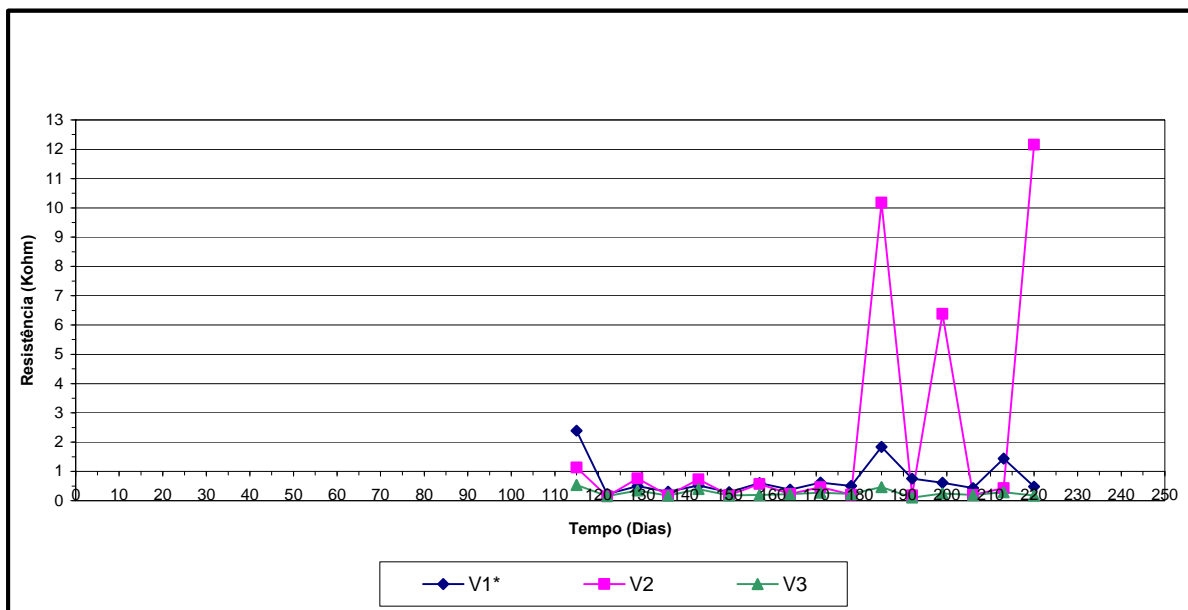


FIGURA 6.26 – Resistência ôhmica versus tempo. Vigas V1*, V2 e V3 têm relação a/c de 0,30.

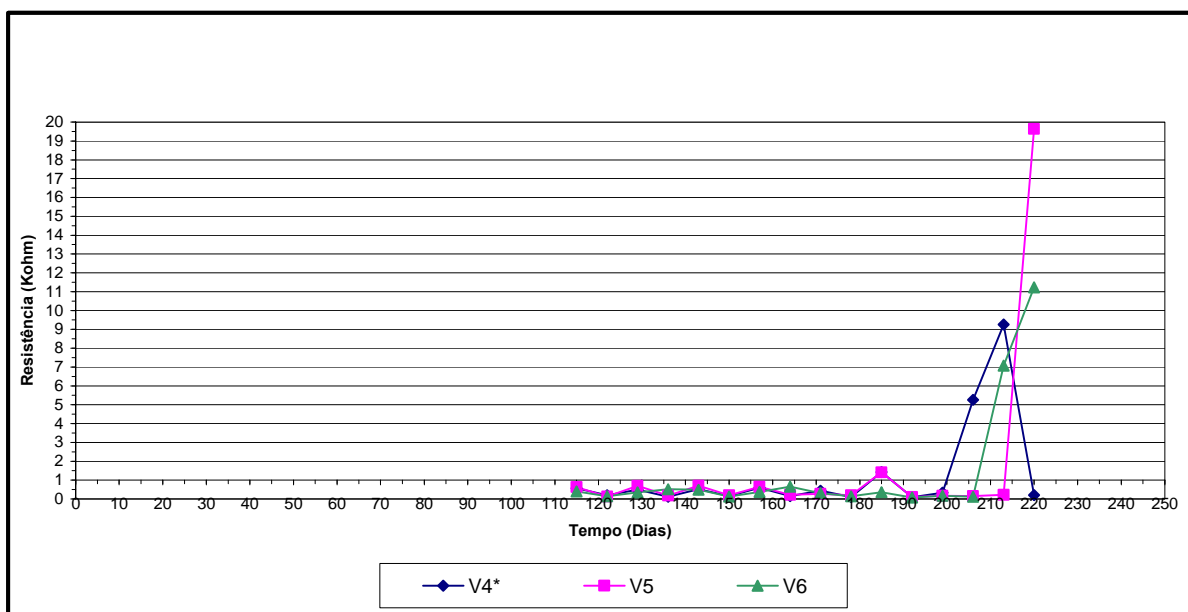


FIGURA 6.27 – Resistência ôhmica versus tempo. Vigas V4*, V5 e V6 têm relação a/c de 0,52.

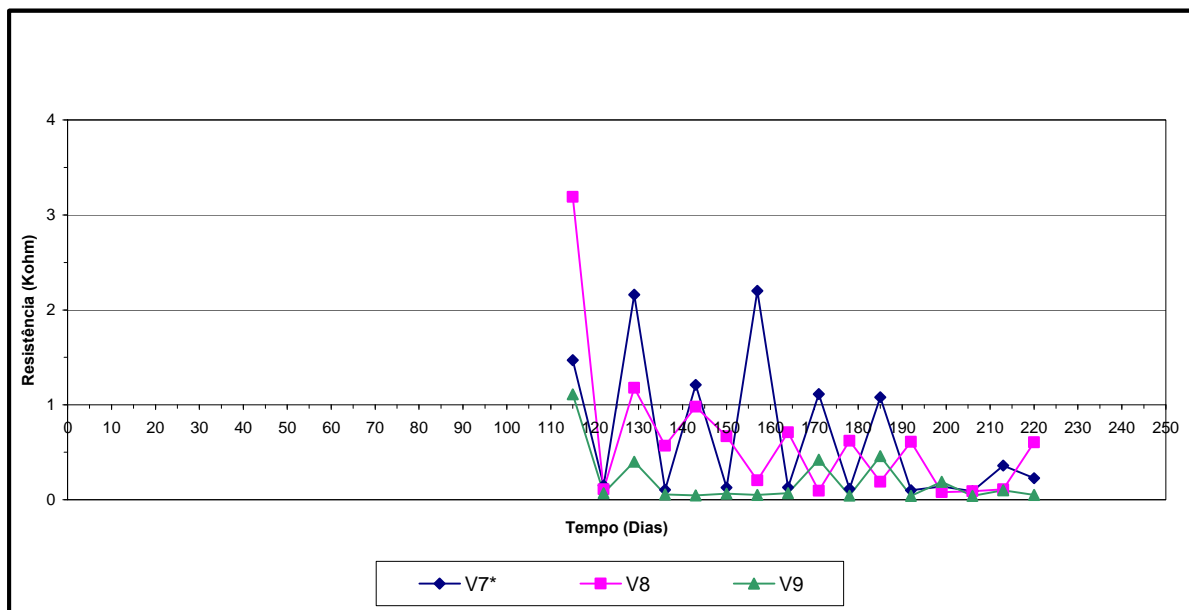


FIGURA 6.28 – Resistência ôhmica versus tempo. Vigas V7*, V8 e V9 têm relação a/c de 0,80.

Com base nas Figuras 6.26, 6.27 e 6.28, observa-se o pior comportamento dos concretos com 100% de substituição (V3, V6 e V9) frente às outras substituições estudadas, no que se refere à penetração dos íons cloreto. Provavelmente por possuir mais poros, captando assim uma maior umidade. Provavelmente o elevado teor de Fe - ferro contido na escória de aciaria (EAF) pode afetar estes resultados.

De acordo com Figueiredo (1994), o conteúdo de umidade no interior do concreto desempenha importante papel sobre a corrosão, uma vez que a umidade é necessária para que ocorra a reação catódica de redução do oxigênio e influencia na resistividade do concreto, na mobilidade iônica e na permeabilidade do oxigênio.

Com o início dos ciclos de molhagem e secagem a umidade interna do concreto aumenta, diminuindo a resistividade do concreto. A R_{ohm} está relacionada com o efeito barreira. Quando a R_{ohm} aumenta, maior é o controle da entrada dos íons cloreto (iniciação do processo corrosivo) e menor será a mobilidade iônica no interior do concreto (propagação da corrosão).

Segundo Lopez e Gonzalez citados por Azevedo, 2001 – a resistividade do concreto depende, em primeiro lugar, do grau de saturação dos poros e depois, com menor importância, do grau de hidratação da pasta (cura) e da presença de sais dissolvidos na fase aquosa do concreto.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

7.1. Conclusões

Com base no programa experimental desta pesquisa são apresentadas neste item as principais conclusões obtidas.

1. No que se refere a análise química pode-se considerar que esta escória é ácida, apresentando índice de basicidade ($\text{CaO} / \text{SiO}_2$) abaixo de 1,00 (valor de 0,57 para a escória estudada).

A revisão bibliográfica (GUMIERI, 2000 apud TUBINO GEYER, 2001) aponta que o material formado com a escória estudada provavelmente está livre de desintegração causada pela hidratação dos óxidos de cálcio e de magnésio uma vez que os módulos A e B (apresentados no item 4.1) são atendidos, ou seja,

$$\text{Módulo A} \rightarrow \text{CaO} + 0,8 \text{ MgO} \leq 1,285 \text{ SiO}_2 + 0,4 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 1,75 \text{ S} \quad \text{Equação [7.1]}$$

$$\text{Módulo B} \rightarrow \text{CaO} \leq 0,9 \text{ SiO}_2 + 0,6 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 1,75 \text{ S} \quad \text{Equação [7.2]}$$

Para esta escória:

$$\text{Módulo A} \rightarrow 26,98 < 52,59$$

$$\text{Módulo B} \rightarrow 22,15 < 39,03$$

Outro motivo que leva a crer que o MgO apresenta-se sob forma estável é o fato de que, nas equações propostas por Luo apud Montgomery e Wang (1991):

$$\text{MgO estável} \rightarrow \text{MgO} / (\text{FeO} + \text{MnO}) < 1 \quad \text{Equação [7.3]}$$

Onde, para o material estudado tem-se:

MgO estável - $> 0,28 < 1$.

2. 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 ≤ 5 mm. Esta norma estabelece ainda como exigência física e mecânica facultativa a frio em ≤ 5 mm. Por meio do ensaio de agulhas de Le Chatelier verificou-se que o material em estudo apresentou expansibilidade a quente e a frio ambas iguais a 0,33 mm. Ou seja, menor que 5 mm, atendendo assim a NBR 11.578/91.
3. Pode-se observar que os concretos com 100% de substituição, independente da relação a/c, apresentaram um aumento em suas resistências à compressão.

Observa-se aos 28 dias que o concreto V3 (a/c = 0,30 e teor de substituição = 100%) obteve um ganho de resistência à compressão de 23,94% em relação ao concreto de referência – V1* (a/c = 0,30 e teor de substituição = 0%). O concreto V6* (a/c = 0,52 e teor de substituição = 100%) aumentou sua resistência à compressão em relação ao concreto de referência – V4* (a/c = 0,52 e teor de substituição = 0%) na ordem de 22,91%. E o concreto V9* (a/c = 0,80 e teor de substituição = 100%) apresentou um aumento de 23,91% ao concreto de referência – V7* (a/c = 0,80 e teor de substituição = 0%).

4. No que diz respeito a resistência à tração por compressão diametral verificou-se que os concretos com menores relações a/c foram os que apresentaram os maiores valores. Similar a resistência à compressão observou-se também que os concretos com 100% de substituição, agregado convencional por agregado siderúrgico, foram os que obtiveram, para um mesmo a/c, os maiores valores de resistência à tração.
5. Para o módulo de deformação pode-se observar através dos resultados que todos os concretos, V1* a V9, exceto V2, obtiveram aumento com a substituição do agregado graúdo convencional por agregado graúdo de

escória de aciaria elétrica, seguindo o que aconteceu a resistência à compressão, já que são parâmetros diretamente proporcionais.

6. Nos ensaios de carbonatação verificou-se que quanto maior a relação a/c, maior a profundidade de carbonatação, o que demonstra que os teores de substituições não influenciam no desempenho dos concretos à carbonatação.
7. De uma maneira geral, a substituição dos agregados, convencional por siderúrgico, não alterou o desempenho do mesmo frente ao ataque corrosivo do agente agressivo analisado (cloretos). Contudo, para concretos com altas relações a/c notou-se uma tendência de queda na resistência anticorrosiva do concreto.

De acordo com as considerações feitas neste trabalho, é possível concluir que o uso da escória de aciaria como agregado graúdo no concreto não afeta a resistência à compressão e, tão pouco, a durabilidade do concreto frente à corrosão das armaduras. Entretanto, é imprescindível que se dê importância para a expansibilidade deste resíduo.

Muitos estudos, porém, ainda precisam ser feitos para sedimentar a utilização desse material nos mais variados tipos de construção. Num momento em que se discute preservação do meio ambiente e seus recursos naturais, a utilização da escória de aciaria elétrica como agregado graúdo se constitui numa saída para minimização desses impactos. Desde que sejam tomadas medidas rigorosas na especificação, normalização e utilização desse material, o seu uso não ficará restrito a utilizações de pouca importância.

7.2. Sugestões para Futuras Pesquisas

- Avaliar o desempenho do material ao longo do tempo. Se não há desintegração das vigas, por exemplo, com a utilização destas escórias;

- Análise no microscópio eletrônico de varredura através de elétrons retroespalhados – MEV, a fim de verificar a zona de transição formada entre o agregado siderúrgico e a pasta cimentícia.

- Avaliar o material, o estudo em questão, ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, J. D. **Materiais de construção**. Goiânia: UFG/CEFET, 1999. 298p.

AMARAL, L.; VÁSQUEZ. E. **Uso de escórias de aciaria de forno elétrico como agregados para concreto**. IN: V SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL. IBRACON, São Paulo. Set. 2002. p. 247-256.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Practice for Preparing, Cleaning and Evaluating Corrosion Test Specimens. ASTM G1**. In: Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, EUA, 1990

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test methods for Half Cell Potential de Uncoated Reinforcing Steel in Concrete - ASTM C876**. In: Annual Book of ASTM Standards, v. 04.02, Sec. 4, p. 429-33. Philadelphia, EUA, 1990.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (Mortar-Bar Method) – ASTM C1260**. 1994.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for potential alkali expansion of aggregates from hydration reactions – ASTM D4792**. 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland; especificação NBR 5732**. 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. **Cimento Portland Pozolânico; Determinação da pozolanicidade NBR 5753**. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de concreto – Procedimento NBR 6118/2004**. Rio de Janeiro, 2004. 221p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Ensaio de cimento Portland; NBR 7215/82 item 4.2.5.2 – Consistência normal**. 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 cilíndrico. NBR 7222/93**. Rio de Janeiro, 1993. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. NBR 7223**. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. NBR 8522/02.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004. Resíduos sólidos – classificação,** Rio de Janeiro, 2004.

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-3455. Rio de Janeiro, 1991. 2p.

AZEVEDO, C. S. **Contribuição das adições minerais para a resistência à corrosão da armadura do concreto.** Goiânia: Dissertação – Mestrado. UFG, 2001. 185 p.

BEER, F. P.; JOHNSTON Jr, E. R. J. **Resistência dos Materiais.** 3. ed. São Paulo: MAKRON Books do Brasil Editora Ltda, 1995. 1255 f.

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 Construccion, Mafrid, n.186, p. 11-38, 1982.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas.** Goiânia: Ed. UFG, 1997.

CASTELO BRANCO, V. T. F.; **Caracterização de misturas Asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado.** Rio de Janeiro, 2004. 135 p. Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE / UFRJ.

CEB. **Durability of Concrete Structures.** Report of CEB – RILEM International Workshop. Copenhagen, 1983; também CEB – Bulletin D' Information, N. 192, 1984.

CINCOTTO et al. **Cimento alternativo à base de escória de alto-forno.** A Construção – Região Sul, n. 259, p.23-26, mai 1990.

FEATHERSTONE, W. B.; HOLLIDAY, K. A. Slag treatment improvement by dry granulation. In: **Iron and Steel Engineer.** P. 42-46. 1998.

FIGUEIREDO, E. J. P. **Avaliação do desempenho de revestimento para proteção da armadura contra a corrosão através de técnicas eletroquímicas – contribuição ao estudo**

de reparo de estruturas de concreto armado. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1994.

Filev, R. Escória de aciaria. São Paulo, s.d. 3 p. Texto técnico.

GEISELER, J. **Slag – Approved Materials for a better future.** Iron and Steel Slags – Properties and utilization – Reports. P. 9 – 23. Marseilles, 1999.

GEISELER, J. **Use of Steelworks Slag in Europe.** *Wast Management*, London, vol. 16, n. 1-3, p.59-63, 1996.

GEOCISA **The GECOR6 corrosion rate meter – for steel in concrete.** Madrid, 1993. 31p.

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 como adição em cimentos.** 2002. 226 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

GUPTA, J. D.; KNELLER, W. A.; TAMIRISA, R.; SKRZYPCZAK-JANKUN, E. Characterization of base and subbase iron and steel slags aggregates causing deposition of calcareous tufa in drains. **Transportation Research Record**, Washington, n. 1434, p. 8-16, jul. 1994.

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

IBS – INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA – **Anuário estatístico da indústria siderúrgica brasileira – 1999.** Rio de Janeiro, 2000. 100p.

JAPAN INSTITUTE STANDARD – JIS A 5015, 1992. **Escória siderúrgica para construção civil de estradas**, 48p. (tradução em português).

JOHN, L. Pesquisa cria alternativa para reciclagem do rejeito de siderúrgicas. *O Estado de São Paulo*, São Paulo, 07 de agosto de 2002. Ciência e meio ambiente, 2 p.

JOHN, V. M. **Desenvolvimento sustentável, construção civil, reciclagem e trabalho multidisciplinar.** São Paulo, s.d. 8 p. Texto técnico

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Reciclagem de escórias de alto-forno no Brasil.** In: SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE REUSO/RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS, 2000, São Paulo. Anais...São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente do estado de São Paulo, 2000. 5p. (cd-rom).

LEDEZMA, R. T.; RUIZ, L. S.; MULLER, G. C. **Las escorias de aceria y su empleo en carreteras y vías férreas.** Multserv intermetal. Caracas, 1992.

LIMA, L. A. de **Hormigones com escorias do forno 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.

LOUZADA, D. M. **Contribuição ao estudo da aplicação das escórias na fabricação de blocos de concreto.** 1991. 85p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro.

LYLE, J. T. **Regenerative Design for Sustainable Development.** Wiley, 1994.

MACHADO, A. T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria.** 2000. 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000

MALHOTRA, V. M. **Supplementary Cementing Materials for Concrete.** Canada. March, 1987.

MASUERO, A. B. **Estabilização das escórias de aciaria elétrica com vistas a sua utilização como substituição ao cimento.** 2001. 268 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001

MEHTA, P. K. & MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** 1ª ed. São Paulo: Editora Pini, 1994. 573 p.

MONTGOMERY, D. G.; WANG, G. Preliminary laboratory study of steel slag for blended cement manufacture. **Materials Forum**, n. 15, p. 374-382, 1991.

MOTZ, H; GEISELER, J. Products of steel slag an opportunity to save natural resources, In: **Waste Management**. 21. p. 285-293. Duisburg, Alemanha, 2001.

MOURA, W. A. **Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto.** 2000. 207p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

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.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** São Paulo: PINI, 1982, 738p.

PAULA, G. M. Desenvolvimento Tecnológico, alianças estratégicas e apoio governamental: o caso Tecored. Uberlândia, p. 1-7, dez. 2001

PENA, D. C. **Avaliação da expansibilidade da escória de aciaria curada a vapor para utilização em peças de concreto para pavimentação.** 2004. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

PENNSYLVANIA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION – PennDot. P. 408 – **Highway Construction Specifications** – Seção 703. 2003.

POLISSENI, A. E. **Estudo da viabilidade técnica da utilização de escória de aciaria elétrica micronizada como material cimentício**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

QUIAN, G. et al. **Autoclave properties of kirschsteinite-based steel slag**. *Cement and Concrete Research*, Singapore, p. 1377-1382, 2002-11-21

RAPOSO, C.O.L. **Estudo experimental de compactação e expansão de uma escória de aciaria LD para uso em pavimentação**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo. 159 p. Vitória, 2005.

RILEM – Recommendations CPC-18. Measurement of Hardened Concrete Carbonation Depth. *Matériaux et constructions*, RILEM, vol. 21, nov/dec. 1988, p. 453-455.

ROSTIK, L. F. **EAF Steel Company on the by-product synegy 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.

SCANDIUZZI, L.; BATTAGIN, A. F. **A Utilização da escória granulada de alto-forno como agregado miúdo**. São Paulo, ABCP, 1990. 35p. ET-95.

SENA, A. M., **Avaliação do comportamento mecânico dos concretos auto-adensáveis em relação aos concretos convencionais**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2002.

SHI, C. & QUIAN, J. **High performance cementing materials from industrial slags – a review**. *Resources Conservation & Recycling*, Canada, p. 195-207, nov. 1999.

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. A., 1994, “**Uso de escoria de acerías tratadas com emulsiones catiónicas em varias pavimentaciones**”. 6º Congreso Ibero-Latino Americano Del Asfalto, Santiago, Tomo I, p. 01-18.

SILVA, E. A. e R.L. MENDONÇA, 2001b, “**Brésil: laitier d’aciérie à tous lês étages, laitiers sidérurgiques**”, n. 81, p. 11-24;

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. 1 ed. São Paulo, Pini, 1998.

TAYLOR, H. F. W. *Cement chemistry*. London: Thomas Telford, 2nd ed., 1997. 459 p.

THOMAZ, G. H. Progress in the utilization of steel slag in the UK. In: **2nd European slag coference** – Euroslag. Dusseldorf, 2000.

TUBINO GEYER, R. M. **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 – PPGEM/UFRGS, 1997. 33p. Proposta de tese de doutorado.

TUBINO GEYER, R. M. **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto**. 2001. 170 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

TUBINO GEYER, R. M. 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.

TUBINO GEYER, R. T.; VIEIRA JUNIOR, A.; COSTA, A. F.; ROCHA, A.; PAIVA JUNIOR, J. A. **Utilização de escória de aciaria elétrica na produção de tijolos de solo-cimento-escória**. IN: V SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL. IBRACON, São Paulo. Set. 2002. p. 257-265.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA – PR
www.uepg.br/denge/canteiro/controle_tecnologico/consistencia.htm acessado em 15/12/2006.

VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciência dos materiais**. 13. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1970.427 f.

VASCONCELOS, A. C.; GIAMMUSSO, S. E. **O misterioso módulo de elasticidade**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 40., 1998, Rio de Janeiro. Anais. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 1998. CD-ROM – Trabalho_090.

WACHSMUTH, F.; GEISELER, J.; WOLFDIETRICH, F.; KOCH, K.; SCHWERDTFEGGER, K. Contribution to the structure of BOF-slugs and its influence on their volume stability. **Canadian Metallurgical Quartely**, Canada, v. 20, n. 3, p. 279-284, 1981.

WEAST, R. C. **Handbook of chemistry and physics**. Cleveland, 1971.