

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

TESE DE DOUTORADO

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE
ESCÓRIA DE ACIARIA ELÉTRICA MICRONIZADA
COMO MATERIAL CIMENTÍCIO**

Antônio Eduardo Polisseni

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Denise Carpena Coitinho Dal Molin

Co-orientador: Prof. Dr. Antônio Cezar Faria Vilela

Porto Alegre

2005

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE
ESCÓRIA DE ACIARIA ELÉTRICA MICRONIZADA
COMO MATERIAL CIMENTÍCIO**

Antônio Eduardo Polisseni

**Tese apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da
Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, como parte dos
requisitos para obtenção do
título de Doutor em Engenharia**

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Denise Carpena Coitinho Dal Molin

Co-orientador: Prof. Dr. Antônio Cezar Faria Vilela

Porto Alegre

2005

P768e Polisseni, Antônio Eduardo

Estudo da viabilidade técnica da utilização de escória de aciaria elétrica micronizada como material cimentício / Antônio Eduardo Polisseni. – 2005.

Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2005.

Orientadora : Prof^a. Dr.^a Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Co-Orientador : Prof. Dr. Antônio Cezar Faria Vilela

1. Escória de aciaria elétrica. 2. Cimento. 3. Materiais de construção – Ensaios. I. Dal Molin, Denise Carpena Coitinho, orient. II. Vilela, Antônio Cezar Faria, co-orient. III. Título.

CDU 691.001.8(043)

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo orientador, co-orientador e pelo Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Profª Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Drª pela Universidade de São Paulo
Orientadora

Prof Antônio Cezar Faria Vilela
Drª pela Universidade Técnica Aachen, Alemanha
Co-orientador

Prof. Américo Campos Filho
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

BANCA EXAMINADORA:

Washington A. Moura (UEFS / BA)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Rejane M. Tubino (UFG / GO)
Drª pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Ivo A. H. Schneider (UPF / RS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Ângela B. Masuero (UFRGS / RS)
Drª pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

“Na natureza, nada se perde nada se cria,
tudo se transforma.”

Antoine Laurent Lavoisier

Aos meus pais, Álvaro e Orita, “*in memoriam*”,
pelos constantes incentivos e ensinamentos de
vida.

À minha esposa Lúcia, pelo amor, dedicação
e companheirismo nestes anos de vida em
comum.

Às minhas queridas filhas, Izabela e Gabriela,
as quais amo muito.

AGRADECIMENTOS

Ao término deste trabalho, após uma longa caminhada com inúmeros desafios vencidos e conhecimentos adquiridos, gostaria de expressar o quanto foi importante a colaboração de um grande número de pessoas para a realização e conclusão deste trabalho e, em especial:

A DEUS, por tudo e pela felicidade do dom da vida.

A minha orientadora, Prof^a Denise Dal Molin, pela amizade, confiança, competência e constantes incentivos e ensinamentos.

Ao meu co-orientador, Prof. Antônio Cezar Faria Vilela, pela amizade e valiosa colaboração a esta pesquisa.

Ao professor e amigo Miguel A. Sattler do PPGEC/UFRGS, pelos valiosos ensinamentos sobre sustentabilidade ambiental.

Às funcionárias do PPGEC/UFRGS, Carmem, Elódia, Liliane e Bernadete, pela atenção e dedicação que sempre me foi dada.

Aos amigos da UFJF, Prof. Arnaldo Surerus de Oliveira, Prof. Evandro Maia Costa e Prof. Luiz Cesar Duarte Pacheco, pelo incentivo e apoio.

A Prof^a Ana Paula Barbosa Sobral, do Departamento de Estatística da UFJF, pela contribuição das análises estatísticas dos resultados desta pesquisa.

A Prof^a Maria Tereza Gomes Barbosa e a Prof^a Thaís Mayra de Oliveira, do Departamento de Construção Civil da UFJF, pela contribuição das análises estatísticas dos resultados desta pesquisa.

Ao bolsista Richarles Jesus dos Santos, pela dedicação, paciência e colaboração durante a realização da pesquisa.

Ao laboratorista Humberto de Lima Nogueira, do Laboratório de Pavimentação da UFJF, pela moagem da escória de aciaria elétrica no aparelho de Abrasão Los Angeles.

Aos estagiários do Laboratório de Materiais de Construção Civil – UFJF, Lucas Henriques e Diegles Simões, pelo acompanhamento dos ensaios de absorção d'água.

Aos amigos da Cimento Tupi, Engenheiro Leandro, Engenheiro Alexandre e ao Técnico Clóvis, pela realização dos ensaios de caracterização física e química das amostras de cimento Portland, escória de aciaria elétrica micronizada e misturas de cimento Portland e escória de aciaria elétrica micronizada.

Ao amigo, Engenheiro Flávio Renato P. Capuruço, assessor técnico da HOLCIM, pelo envio das amostras de cimento Portland para a realização da pesquisa.

Aos amigos da Belgo Mineira, Carlos Alexandre de Miranda e Valdenir Luciano de Souza Lima, pelo apoio e incentivo durante a realização do trabalho.

Ao Sr. Helmut W. Landsberger e Felipe Landsberger, da empresa Micro Service, pela realização das micronizações das amostras de escória e a realização dos ensaios de granulometria a laser.

Aos meus irmãos, sobrinhos, cunhados, sogro e sogra, pelo incentivo para a realização deste trabalho.

A CAPES, pelo apoio financeiro para o desenvolvimento deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE FIGURAS	xviii
LISTA DE SÍMBOLOS	xxvii
RESUMO	xxviii
ABSTRACT	xxix
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSTRUÇÃO CIVIL: DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO COMPARTILHADO COM DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	4
1.3. JUSTIFICATIVA.....	5
1.4. ESTRUTURA DA PESQUISA.....	7
2. PRODUÇÃO DO AÇO E AS ESCÓRIAS DE ACIARIA	9
2.1. HISTÓRICO E ESTATÍSTICAS DA PRODUÇÃO DO AÇO.....	9
2.2. A GERAÇÃO, TIPOS DE RESFRIAMENTO, PROCESSOS DE BENEFICIAMENTO E AS OPORTUNIDADES DE UTILIZAÇÃO DAS ESCÓRIAS.....	14
2.2.1. A geração das escórias.....	14
2.2.1.1. A geração das escórias de aciaria elétrica na BMP Siderúrgica S.A. – Juiz de Fora.....	19
2.2.2. Os tipos de resfriamento das escórias.....	22
2.2.3. Processos de beneficiamento.....	24
2.2.4. As oportunidades de utilizações das escórias de aciaria.....	26
2.2.4.1. Utilização de escória em obras rodoviárias e lastro ferroviário.....	26
2.2.4.2. Utilização de escórias na produção de cimento.....	35
2.2.4.3. Utilização de escórias em concretos e argamassas como substituição ou adição ao cimento.	38
2.2.4.4. Utilização de escórias como agregado.....	39
2.2.4.5. Utilização de escórias na produção de fertilizantes.....	41
3. AS ADIÇÕES MINERAIS EM CIMENTOS OU EM CONCRETOS	43

3.1. A REATIVIDADE POZOLÂNICA.....	44
3.2. A AÇÃO FÍLER.....	48
4. A EXPANSIBILIDADE DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA.....	50
4.1. A EXPANSÃO DO ÓXIDO DE CÁLCIO LIVRE.....	52
4.2. A EXPANSÃO DO ÓXIDO DE MAGNÉSIO LIVRE.....	54
4.3. A EXPANSÃO CAUSADA PELA OXIDAÇÃO DO FERRO METÁLICO (Fe°).....	55
4.4. A EXPANSÃO POR TRANSFORMAÇÃO ALOTRÓPICA DO SILICATO DICÁLCICO.....	56
5. PROGRAMA EXPERIMENTAL: AMOSTRAGEM, O PROCESSO DE MICRONIZAÇÃO, CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E RESULTADOS PRELIMINARES.....	58
5.1. COLETA E PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS.....	58
5.1.1. Escória de aciaria elétrica.....	58
5.1.2. Agregado graúdo e miúdo.....	60
5.1.3. Cimento Portland.....	60
5.1.4. Escória de alto-forno.....	61
5.2. O PROCESSO DE MICRONIZAÇÃO.....	61
5.3. FLUXOGRAMA DE ENSAIOS REALIZADOS NO PROGRAMA EXPERIMENTAL: ESTUDOS PRELIMINARES.....	65
5.3.1. Ensaio de caracterização.....	66
5.3.1.1. Caracterização física.....	66
5.3.1.2. Caracterização química.....	67
5.3.1.3. Caracterização mineralógica.....	68
5.3.1.4. Caracterização microestrutural.....	68
5.3.1.5. Caracterização ambiental.....	68
5.3.1.6. Caracterização quanto à pozolanicidade.....	69
5.3.1.7. Caracterização quanto ao grau de vitrificação.....	69
5.3.1.8. Caracterização quanto à expansão.....	69
5.4. RESULTADOS PRELIMINARES E DISCUSSÕES.....	70

5.4.1. Características dos materiais CPV ARI RS, escória de alto-forno, agregado miúdo e graúdo utilizados nos ensaios.....	70
5.4.1.1. Características do CPV ARI RS.....	70
5.4.1.2. Caracterização da escória granulada de alto-forno.....	73
5.4.1.3. Caracterização dos agregados.....	76
5.4.2. Caracterização das escórias de aciaria elétrica E1, E2 e E3 utilizadas na pesquisa.....	78
5.4.2.1. Caracterização física.....	78
5.4.2.2. Caracterização química.....	82
5.4.2.3. Caracterização mineralógica.....	83
5.4.2.4. Caracterização microestrutural.....	86
5.4.2.5. Caracterização ambiental.....	88
5.4.2.6. Caracterização quanto à atividade pozolânica.....	90
5.4.2.7. Grau de vitrificação.....	96
5.4.2.8. Expansão.....	96
5.4.2.8.1. Expansibilidade Le Chatelier (NBR 11582, 1991)	96
5.4.2.8.2. Expansibilidade pelo método adaptado das barras – ASTM C 1260 (1994)	98
5.4.2.8.3. Expansibilidade pelo método da autoclave ASTM C 151 (1993).....	103
5.4.2.8.4. Expansibilidade das escórias pelo método PTM 130 modificado / DER - MG.....	105
5.5. CONCLUSÕES.....	111
6. AVALIAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA MICRONIZADA COMO MATERIAL CIMENTÍCIO	112
6.1. CONSIDERAÇÕES.....	112
6.2. ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO DE MISTURAS DE CP V ARI RS COM ESCÓRIAS MICRONIZADAS E2 E E3.....	112
6.3. CONCLUSÕES.....	128
7. EFEITO DA GRANULOMETRIA NA ESTABILIZAÇÃO DO FENÔMENO DE EXPANSÃO DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA ELÉTRICA.....	129
7.1. CONSIDERAÇÕES.....	129
7.2. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	129

7.2.1. Caracterização química da escória EA1.....	129
7.2.2. Distribuições granulométricas da escória EA1.....	131
7.3. AVALIAÇÃO DA EXPANSIBILIDADE PELO MÉTODO ADAPTADO DAS BARRAS (ASTM C 1260, 1994).....	133
7.4. AVALIAÇÃO DA EXPANSIBILIDADE PELO MÉTODO DA AUTOCLAVE (ASTM C 151, 1993).....	137
8. VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA ELÉTRICA MICRONIZADA COMO MATERIAL CIMENTÍCIO.....	140
8.1. CONSIDERAÇÕES.....	140
8.2. DESEMPENHO MECÂNICO: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	141
8.2.1. Resultados.....	141
8.2.1.1. Análise e discussão dos resultados.....	148
8.2.1.1.1. Análise e discussão dos resultados da escória EA1.....	148
8.2.1.1.2. Análise e discussão dos resultados de comparação da escória EA1 x escória EGAF	153
8.3. Caracterização das argamassas constituídas de escória de aciaria elétrica micronizada do ponto de vista ambiental.....	160
8.4. Durabilidade das argamassas.....	162
8.4.1. Considerações iniciais.....	162
8.4.2. Ensaio de Absorção de água.....	163
8.4.2.1. Ensaio de penetração de água por sucção capilar.....	163
8.4.2.1.1. Preparação dos corpos-de-prova.....	163
8.4.2.1.2. Realização do ensaio.....	165
8.4.2.1.3. Resultados.....	166
8.4.2.1.3.1. Análise e discussão dos resultados.....	174
8.4.2.2. Ensaio de absorção de água por imersão (NBR 9778, 1987).....	177
8.4.2.2.1. Realização do ensaio.....	177
8.4.2.2.2. Resultados.....	178
8.4.2.2.3. Análise e discussão dos resultados.....	181

8.4.2.3. Ensaio de penetração de íons cloretos (ASTM C 1202 / 1997).....	186
8.4.2.3.1. Preparação dos corpos-de-prova.....	186
8.4.2.4. Realização do ensaio.....	189
8.4.2.5. Resultados.....	190
8.4.2.5.1. Análise e discussão dos resultados.....	191
9. CONCLUSÕES.....	194
9.1. COM RELAÇÃO AO PROCESSO DE MOAGEM POR MICRONIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA ELÉTRICA.....	194
9.2. COM RELAÇÃO ÀS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM ESCÓRIA DE ACIARIA ELÉTRICA MICRONIZADA NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO.....	196
9.3. COM RELAÇÃO À DURABILIDADE.....	197
9.3.1. Para a propriedade de absorção d'água.....	197
9.3.2. Para a propriedade de penetração de íons cloretos.....	198
9.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	198
10. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	200
11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	201
APÊNDICES.....	211
APÊNDICE 1 – Micrografias (MEV) da escória granulada de alto-forno.....	212
APÊNDICE 2 – Pátio de sucata metálica da Siderúrgica Belgo Mineira, em Juiz de Fora – MG.	214
APÊNDICE 3 – Resultados da massa seca, massa saturada e massa submersa do ensaio de absorção e índice de vazios em conformidade com a NBR 9778.....	216
APÊNDICE 4 – Resultados da carga passante em corpos-de-prova de argamassa constituídos de CPV ARI RS e escória micronizada EA1, em conformidade com a ASTM C 1202 (1997).....	218

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 – Consumo de cimento médio mundial per capita por década (JUNIOR, 2003; HELENE, 1993).....	2
TABELA 2.1 – Produção Mundial de Aço Bruto (Unidade: $\times 10^6$ t) (IBS, 2004).....	11
TABELA 2.2 – Produção de Aço Bruto da América Latina (Unidade: $\times 10^3$ t) (IBS, 2004).....	12
TABELA 2.3 – Produção de Aço Bruto por Empresa no Brasil (Unidade: $\times 10^3$ t) (IBS, 2004).....	12
TABELA 2.4 – Produção de aço bruto por processo de aciaria no Brasil (GEYER, 2001; GUMIERI, 2002; IBS, 2003; IBS, 2004).....	13
TABELA 2.5 – Composição Típica de escória de aciaria elétrica, (GEYER, 2001).....	18
TABELA 2.6 - Composição química típica das escórias de refino oxidante (FEA e LD), escórias de refino redutor (FP), escórias de alto-forno (AF), e do cimento Portland comum (CP) no Brasil (GEYER, 2001).....	18
TABELA 2.7 – Características da granulação seca e úmida (FEATHERSTONE, 1998).....	23
TABELA 2.8 – Composição granulométrica da escória de aciaria para uso em pavimento rodoviário (SILVA et al. 2000).....	31
TABELA 2.9 – Composição granulométrica da escória de aciaria para uso como lastro ferroviário (SILVA, et al. 2000).....	32
TABELA 2.10 – Misturas de materiais e resistências à compressão (MPa) aos 28 e 91 dias de idade (MONTGOMERY e WANG, 1991).....	36
TABELA 3.1 – Adições ao cimento portland no Brasil em função da respectiva norma (REVISTA IBRACON, 1992).....	43
TABELA 3.2 – Materiais pozolânicos: exigências químicas e físicas de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 1992).....	46
TABELA 4.1 – Características das espécies químicas isoladas antes e após a hidratação, carbonatação e oxidação (WEAST, 1974).....	51
TABELA 4.2 - Produtos formados na oxidação do ferro metálico presente na escória (MACHADO, 2000).....	56

TABELA 4.3 – Transformações do silicato dicálcico em função da temperatura de resfriamento (TAYLOR, 1977; LEA, 1970).....	57
TABELA 5.1 – Composição química, propriedades físicas e mecânicas do cimento CPV ARI RS utilizado na pesquisa.....	72
TABELA 5.2 – Composição química, propriedades físicas e mecânicas da Escória de Alto Forno utilizada na pesquisa.....	74
TABELA 5.3 – Caracterização do agregado miúdo utilizado na pesquisa (areia do Rio do Peixe).	76
TABELA 5.4 – Caracterização do agregado graúdo utilizado na pesquisa (Pedreira Pedra Sul)....	77
TABELA 5.5 – Composição Granulométrica, Dimensão Máxima Característica, Módulo de Finura, Massa Específica, Abrasão Los Angeles das escórias E1, E2 e E3.....	78
TABELA 5.6 – Finura por peneiramento e Superfície específica das escórias E1, E2 e E3 micronizadas.....	79
TABELA 5.7 – Distribuição Granulométrica das escórias E1, E2 e E3, micronizadas, obtidas por granulometria a laser.....	80
TABELA 5.8 – Composição química, óxido de cal livre, resíduo insolúvel, perda ao fogo e pH das escórias E1, E2, E3 micronizadas.....	82
TABELA 5.9 – Caracterização por difratometria de raios X das amostras de CPV ARI RS, escórias micronizadas E1, E2 e E3.	83
TABELA 5.10 – Ensaio de Lixiviação (NBR – 10005, 2004) das escórias E1, E2 e E3.....	88
TABELA 5.11 – Ensaio de Solubilização (NBR – 10006, 2004) das escórias E1, E2 e E3.....	89
TABELA 5.12 – Propriedades químicas e físicas do CPI S 32.....	91
TABELA 5.13 – Atividade pozolânica da escória micronizada E1 – Método Químico / NBR 5753 (1991).....	92
TABELA 5.14 – Pozolanicidade da escória micronizada E1 – Método da Argamassa de Cimento / NBR 5752 (1992).....	92
TABELA 5.15 – Atividade pozolânica da escória micronizada E2 – Método Químico / NBR 5753 (1991).....	93
TABELA 5.16 – Pozolanicidade da escória micronizada E2 – Método da Argamassa de Cimento / NBR 5752 (1992).....	93

TABELA 5.17 – Atividade pozolânica da escória micronizada E3 – Método Químico / NBR 5753 (1991).....	94
TABELA 5.18 – Pozolanicidade da escória micronizada E3 – Método da Argamassa de Cimento / NBR 5752 (1992).....	94
TABELA 5.19 – Expansibilidade de escórias micronizadas (50% de escória micronizada+ 50% de CPV ARI RS) segundo a NBR 11582 (1991).....	97
TABELA 5.20 – Granulometria do agregado miúdo utilizado para avaliação de expansibilidade das escórias micronizadas E1, E2 e E3 em ensaio de barras de argamassa (ASTM C 1260; 1994).....	98
TABELA 5.21 – Expansibilidade potencial de misturas de “50% de CPV ARI RS e 50% de escória micronizada E1” pelo método adaptado das barras – Escória E1 (50/50).....	100
TABELA 5.22 – Expansibilidade potencial de misturas de “50% de CPV ARI RS e 50% de escória micronizada E2” pelo método adaptado das barras – Escória E2 (50/50).....	101
TABELA 5.23 – Expansibilidade potencial de misturas de “50% de CPV ARI RS e 50% de escória micronizada E3” pelo método adaptado das barras – Escória E3 (50/50).....	102
TABELA 5.24 – Expansibilidade pelo método da autoclave (ASTM C 151, 1993) das escórias micronizadas (50% de CPV ARI RS + 50% de escória micronizada) E1, E2 e E3	104
TABELA 5.25 – Ensaio de expansão pelo método PTM 130 modificado / DER - MG – Escória E1	108
TABELA 5.26 – Ensaio de expansão pelo método PTM 130 modificado / DER - MG – Escória E2	109
TABELA 5.27 – Ensaio de expansão pelo método PTM 130 modificado / DER - MG – Escória E3	110
TABELA 6.1 – Resistência à compressão e desvio relativo máximo obtidos em ensaios de ruptura de corpos-de-prova de argamassa no traço 1 : 3 : 0,48, constituída de CPV ARI RS, escória micronizada E2 e areia normal.....	114
TABELA 6.2 – Resistência à compressão e desvio relativo máximo obtidos em ensaios de ruptura de corpos-de-prova de argamassa no traço 1 : 3 : 0,48, constituída de CPV ARI RS, escória micronizada E3 e areia normal.....	115

TABELA 6.3 – Misturas de escória micronizada E2 e CPV ARI RS: Tempo de pega (NBR 11581, 1991).....	117
TABELA 6.4 – Misturas de escória micronizada E2 e CPV ARI RS: Expansibilidade Le Chatelier (NBR 11582, 1991).....	118
TABELA 6.5 – Misturas de escória micronizada E2 e CPV ARI RS: Composição química, CaO livre, resíduo insolúvel, perda ao fogo, massa específica, finura por peneiramento e área específica (Blaine).....	119
TABELA 6.6 – Distribuição Granulométrica das misturas de escória micronizada E2 e CPV ARI RS obtidas por granulometria a laser.....	122
TABELA 6.7 – Caracterização por difratometria de raios X das amostras de CPV ARI RS e mistura de “CPV ARI RS (50%) e escória micronizada E2 (50%)”.....	123
TABELA 6.8 – Atividade pozolânica da mistura de “CPV ARI RS (50%) e escória micronizada E2 (50%)” – Método Químico / NBR 5753 (1991).....	125
TABELA 6.9 – Pozolanidade da mistura de “CPV ARI RS (50%) e escória micronizada E2 (50%)” – Método da Argamassa de Cimento / NBR 5752 (1992).....	125
TABELA 6.10 – Traço de concreto utilizado por concreteira com uso de mistura de CPV ARI RS e escória de alto-forno na região de Juiz de Fora / MG.....	127
TABELA 6.11 – Resistência à compressão em corpos-de-prova de concreto e consistências medidas em concreto produzido com escória de alto-forno e escória de aciaria elétrica micronizada E2.....	127
TABELA 7.1 – Composição química, óxido de cal livre, resíduo insolúvel, perda ao fogo e pH da escória micronizada EA1.....	130
TABELA 7.2 – Distribuições granulométricas da escória EA1, moída em aparelho de Abrasão Los Angeles (tempo de moagem de 150 minutos e 210 minutos) e micronizada...	131
TABELA 7.3 – Expansibilidade potencial de misturas de “50% de CPV ARI RS e 50% de escória EA1”, moída em moinho de bolas por um período de 150 minutos, com diâmetro médio de 54,37- μ m. Método adaptado das barras (ASTM C 1260, 1994).....	134

TABELA 7.4 – Expansibilidade potencial de misturas de “50% de CPV ARI RS e 50% de escória EA1”, moída em moinho de bolas por um período de 210 minutos, com diâmetro médio de 10,06·µm. Método adaptado das barras (ASTM C 1260, 1994)	135
TABELA 7.5 – Expansibilidade potencial de misturas de “50% de CPV ARI RS e 50% de escória EA1, com diâmetro médio de 3,37·µm. Método adaptado das barras (ASTM C 1260, 1994) – Escória EA1 (50/50).....	136
TABELA 7.6 – Expansibilidade pelo método da autoclave (ASTM C 151, 1993) das escórias (50% de CPV ARI RS + 50% de escória) EA1 (diâmetro médio de 54,37µ.m); EA1 (diâmetro médio de 10,06µ.m) e escória micronizada EA1 (diâmetro médio de 3,37 µm).....	138
TABELA 8.1 – Resultados de resistência à compressão de corpos-de-prova de argamassa constituídos de escória de aciaria elétrica micronizada EA1 no traço 1 : 1,5 aos 7, 28 e 91 dias de idade.....	142
TABELA 8.2 – Resultados de resistência à compressão de corpos-de-prova de argamassa constituídos de escória de aciaria elétrica micronizada EA1 no traço 1 : 3 aos 7, 28 e 91 dias de idade.....	143
TABELA 8.3 – Resultados de resistência à compressão de corpos-de-prova de argamassa constituídos de escória de aciaria elétrica micronizada EA1 no traço 1 : 4,5 aos 7, 28 e 91 dias de idade.....	144
TABELA 8.4 – Resultados de resistência à compressão de corpos-de-prova de argamassa constituídos de escória granulada de alto-forno (EGAF) no traço 1 : 1,5 aos 7, 28 e 91 dias de idade.....	145
TABELA 8.5 – Resultados de resistência à compressão de corpos-de-prova de argamassa constituídos de escória granulada de alto-forno (EGAF) no traço 1 : 3 aos 7, 28 e 91 dias de idade.....	146

TABELA 8.6 – Resultados de resistência à compressão de corpos-de-prova de argamassa constituídos de escória granulada de alto-forno (EGAF) no traço 1 : 4,5 aos 7, 28 e 91 dias de idade.....	147
TABELA 8.7 – Resultados da análise estatística através da ANOVA do efeito da idade, traço e teor de EA1 na resistência à compressão das argamassas com escória de aciaria elétrica micronizada EA1.....	148
TABELA 8.8 – Resultados da análise estatística através da ANOVA do efeito da idade, traço e teor entre EA1 e EGAF na resistência à compressão das argamassas.....	153
TABELA 8.9 – Ensaio de Lixiviação (NBR 10005, 2004) da argamassa de referência (A0) e da escória de aciaria elétrica micronizada EA1 (66/34) no traço 1 : 1,5.....	160
TABELA 8.10 – Ensaio de Solubilização (NBR 10006, 2004) da argamassa de referência (A0) e da com escória de aciaria elétrica micronizada EA1 (66/34) no traço 1 : 1,5.....	161
TABELA 8.11 – Taxas de absorção e resistências capilares de argamassas constituídas com a escória de aciaria elétrica micronizada EA1.....	173
TABELA 8.12 – Resultados da análise estatística através da ANOVA da Taxa de Absorção por sucção capilar das argamassas com escória de aciaria elétrica micronizada EA1.....	174
TABELA 8.13 – Resultados da análise estatística através da ANOVA da Resistência Capilar das argamassas com escória de aciaria elétrica micronizada EA1.....	175
TABELA 8.14 – Resultados de absorção de água por imersão e índice de vazios (NBR 9778, 1987) de argamassas constituídas com a escória de aciaria elétrica micronizada EA1.....	179
TABELA 8.15 – Resultados da análise estatística através da ANOVA do efeito do traço e teor de EA1 na absorção de água por imersão (NBR 9778, 1987) das argamassas.....	181
TABELA 8.16 – Resultados da análise estatística através da ANOVA do efeito do traço e teor de EA1 no índice de vazios (NBR 9778, 1987) das argamassas.....	183
TABELA 8.17 – Critério de classificação para difusibilidade de cloretos (ASTM C 1202, 1997)....	186
TABELA 8.18 – Dosagem das argamassas constituídas de CPV ARI RS e escória de aciaria elétrica micronizada EA1.....	187

TABELA 8.19	Resultados e classificação de penetração de íons cloretos em corpos-de-prova de argamassa segundo os critérios da ASTM C 1202 (1997).....	190
TABELA 8.20	Resultados da análise estatística através da ANOVA do efeito do traço e teor de EA1 na penetração íons cloretos (ASTM C 1202, 1997) das argamassas.....	191

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – Vista parcial de uma concreteira na região de Juiz de Fora, podendo-se notar a presença de dois silos de aglomerantes, um de CPV ARI RS e outro de escória de alto forno.....	6
FIGURA 1.2 – Construção do contorno da cidade de Volta Redonda – RJ utilizando-se escória de aciaria gerada na Companhia Siderúrgica Nacional (CSN): a) carregamento da escória após peneiramento; b) transporte da escória para ser utilizada como base; c) revestimento em CBUQ (concreto betuminoso usinado a quente) executado com escória e d) execução de contenção em gabião utilizando-se escória.....	7
FIGURA 2.1 – Produção mundial média de aço bruto por processo (IBS, 2004).....	13
FIGURA 2.2 – Produção de aço e respectivas escórias geradas: aço bruto, materiais não incorporados ao aço e escórias (IBS, 2004).....	14
FIGURA 2.3 – Geração média dos principais resíduos siderúrgicos (IBS, 2004).....	14
FIGURA 2.4 – Produção de ferro-gusa, produção de aço e respectivas escórias geradas.....	15
FIGURA 2.5 – Produção de Aço Bruto (milhões de toneladas) – Base: 1998 (IBS, 1999).....	17
FIGURA 2.6 – Geração de resíduos na siderúrgica BMP Siderúrgica S.A. - Juiz de Fora.....	19
FIGURA 2.7 – Utilização da escória de aciaria elétrica da BMP Siderúrgica S.A. próximo à cidade de Juiz de Fora – MG.....	20
FIGURA 2.8 – Fluxograma de processo da aciaria e lingotamento da BMP Siderúrgica S.A. - Juiz de Fora – MG.....	21
FIGURA 2.9 – Resfriamento ao ar da escória de aciaria: pequenos jatos de água arrefecendo a escória.....	22
FIGURA 2.10 – Escória de aciaria elétrica: a) vazamento da escória; b) resfriamento lento; c) escória sólida; d) sistema de britagem e recuperação da fração metálica.....	24
FIGURA 2.11 – Manifestação patológica em pavimento asfáltico (“vulcãozinho”) causado pela expansibilidade do uso de escória de aciaria (Acesso Norte em Juiz de Fora – MG).	27
FIGURA 2.12 – Acesso Norte (Juiz de Fora – MG): extração de corpo-de-prova do pavimento:	

a) detalhe da escória de aciaria elétrica utilizada na base; b) manifestação patológica conhecida como “vulcãozinho”; c) pontos esbranquiçados indicando a degradação da escória por expansão.....	29
FIGURA 2.13 – Rodovia no estado do Rio de Janeiro – RJ executada com a base em escória de aciaria LD: a) detalhe do depósito de carbonato de cálcio; b) fissura no revestimento asfáltico; c) extração de testemunhos do revestimento asfáltico e d) testemunho apresentando o detalhe da fração metálica da escória LD e a trinca do testemunho extraído do revestimento asfáltico.....	30
FIGURA 2.14 – Construção do contorno da cidade de Volta Redonda – RJ: a) e b) sistema de peneiramento da escória da aciaria LD; c) escória de aciaria LD lançada como base	33
FIGURA 2.15 – Utilização de escória de aciaria elétrica na região de Juiz de Fora - MG: a) encascalhamento de estradas vicinais; b) encascalhamento de pátios de empresas	34
FIGURA 2.16 – Utilização de escória de aciaria LD gerada na Companhia Siderúrgica Nacional, quando das obras do Contorno Rodoviário da cidade de Volta Redonda – RJ: a) produção do concreto; b) estoque de escória; c) execução de sarjeta e d) sarjeta finalizada	41
FIGURA 3.1 – Velocidade das reações químicas em cimento Portland e cimento Portland pozolânico (MEHTA e MONTEIRO, 1994).....	45
FIGURA 3.2 – Influência da área específica de grãos de escória de alto forno em relação à resistência à compressão em concretos (NIU et al, 2002).....	47
FIGURA 3.3 Redução de expansão das barras (ASTM C 1260) decorrentes de emprego de agregado pulverizado: a) agregado cascalho (cascalho pulverizado de Itaparica); b) agregado siltito (siltito pulverizado da UHE de Formoso) (FURNAS et al. 1997).....	49
FIGURA 5.1 – Regiões virtuais de amostragem da escória nas pilhas de estocagem (MASUERO, 2001).....	59
FIGURA 5.2. – Estocagem das escórias E1, E2 e E3 no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Faculdade de Engenharia da UFJF.....	60
FIGURA 5.3 – Esquema de como ocorre a moagem de produtos pelo sistema de micronização (choque de partículas).....	62

FIGURA 5.4 – Redução dos diâmetros das amostras de escórias: a) moagem em britador de mandíbula e b) moagem em moinho de bolas.....	63
FIGURA 5.5 – Moagem por sistema de micronização: a) equipamento de moagem piloto e b) esquema da moagem industrial.....	64
FIGURA 5.6 – Fluxograma de ensaios de avaliação realizados em escória de aciaria elétrica E1, E2 e E3.....	65
FIGURA 5.7 – Distribuição granulométrica dos grãos do CPV ARI RS obtida por granulometria a laser.....	71
FIGURA 5.8 – Difratoograma de raio x do CPV ARI RS.....	71
FIGURA 5.9 – Distribuição granulométrica dos grãos da escória granulada de alto forno obtida por granulometria a laser.....	73
FIGURA 5.10 – Micrografia (MEV) obtida por varredura com elétrons secundários da escória de alto forno (4000 X).....	75
FIGURA 5.11 – Difratoograma de raio x da escória de alto forno.....	75
FIGURA 5.12 – Distribuição granulométrica a laser dos grãos da escória micronizada E1.....	81
FIGURA 5.13 – Distribuição granulométrica a laser dos grãos da escória micronizada E2.....	81
FIGURA 5.14 – Distribuição granulométrica a laser dos grãos da escória micronizada E3.....	81
FIGURA 5.15 – Difratoograma de raio x : a) CPV ARI RS (estrutura cristalina) e b) escória de auto-forno (estrutura amorfa).....	84
FIGURA 5.16 – Difratoograma de raio x da escória micronizada E1.....	85
FIGURA 5.17 – Difratoograma de raio x da escória micronizada E2.....	85
FIGURA 5.18 – Difratoograma de raio x da escória micronizada E3.....	85
FIGURA 5.19 – Micrografia (MEV) obtida por varredura com elétrons secundários da escória micronizada E1 (2000 X).....	86
FIGURA 5.20 – Micrografia (MEV) obtida por varredura com elétrons secundários da escória micronizada E2 (2000 X).....	86
FIGURA 5.21 – Micrografia (MEV) obtida por varredura com elétrons secundários da escória micronizada E3 (2000).....	87

FIGURA 5.22 – Diagrama de pozolanicidade das escórias micronizadas E1, E2 e E3 de acordo com a NBR 5733 (1991), ilustrando o teor de CaO em função da alcalinidade total, medida aos 7 dias de idade.....	95
FIGURA 5.23 – Expansão medida pelo Método das Barras: a) Barras de argamassa imersas em água a 80°C ± 2°C. e b) Medidor digital de expansão linear.....	99
FIGURA 5.24 – Variação de comprimento (%) de barras submetidas ao ensaio de expansão – Escória E1 (50/50) e CPV ARI RS.....	100
FIGURA 5.25 – Variação de comprimento (%) de barras submetidas ao ensaio de expansão – Escória E2 (50/50) e CPV ARI RS.....	101
FIGURA 5.26 – Variação de comprimento (%) de barras submetidas ao ensaio de expansão – Escória E3 (50/50) e CPV ARI RS.....	102
FIGURA 5.27 – Ensaio de expansibilidade pelo método ASTM C 151, 1993: a) Autoclave e b) Medidor digital de expansão linear.....	103
FIGURA 5.28 – Ensaio de expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG a) ensaio submerso e b) ensaio saturado.....	107
FIGURA 5.29 – Expansão pelo método PTM 130 modificado / DER - MG – Escória E1: a) expansão diária (%) e b) expansão acumulada (%).....	108
FIGURA 5.30 – Expansão pelo método PTM 130 modificado / DER - MG – Escória E2: a) expansão diária (%) e b) expansão acumulada (%).....	109
FIGURA 5.31 – Expansão pelo método PTM 130 modificado / DER - MG – Escória E3: a) expansão diária (%) e b) expansão acumulada (%).....	110
FIGURA 6.1 – Resistência à compressão em corpos-de-prova de argamassa no traço 1 : 3 : 0,48, constituída de CPV ARI RS, escória micronizada E2 e areia normal	113
FIGURA 6.2 – Resistência à compressão em corpos-de-prova de argamassa no traço 1 : 3 : 0,48, constituída de CPV ARI RS, escória micronizada E3 e areia normal.....	114
FIGURA 6.3 – Distribuição granulométrica a laser dos grãos de mistura de CPV ARI RS (94%) e escória micronizada E2 (6%) – A1 (94/6).....	120
FIGURA 6.4 – Distribuição granulométrica a laser dos grãos de mistura de CPV ARI RS (90%)	

	e escória micronizada E2 (10%) – A2 (90/10).....	120
FIGURA 6.5 –	Distribuição granulométrica a laser dos grãos de mistura de CPV ARI RS (80%) e escória micronizada E2 (20%) – A3 (80/20).....	120
FIGURA 6.6 –	Distribuição granulométrica a laser dos grãos de mistura de CPV ARI RS (66%) e escória micronizada E2 (34%) – A4 (66/34).....	121
FIGURA 6.7 –	Distribuição granulométrica a laser dos grãos de mistura de CPV ARI RS (50%) e escória micronizada E2 (50%) – A5 (50/50).....	121
FIGURA 6.8 –	Difratograma de Raio X da mistura de “CPV ARI RS (50%) e escória micronizada E2 (50%)”	124
FIGURA 6.9 –	Diagrama de pozolanidade da mistura de escória micronizada E2 (50/50), de acordo com a NBR 5753 (1991), ilustrando o teor de CaO em função da alcalinidade total, medida aos 7 dias de idade.....	126
FIGURA 7.1 –	Distribuição granulométrica a laser dos grãos da escória EA1 (diâmetro médio = 54,37 μ m) moída em aparelho de Abrasão Los Angeles (150 minutos).....	132
FIGURA 7.2 –	Distribuição granulométrica a laser dos grãos da escória EA1 (diâmetro médio = 10,06 μ m) moída em aparelho de Abrasão Los Angeles (210 minutos).....	132
FIGURA 7.3 –	Distribuição granulométrica a laser dos grãos da escória EA1 (diâmetro médio = 3,37 μ m) moída pelo processo de micronização.....	132
FIGURA 7.4 –	Ensaio da Expansibilidade pelo método adaptado das barras.....	133
FIGURA 7.5 –	Variação de comprimento (%) de barras submetidas ao ensaio de expansão, – Escória EA1 moída em moinho de bolas por um período de 150 minutos, com diâmetro médio de 54,37 μ m. Ensaio de expansão – Escória EA1 (50/50) e CPV ARI RS.....	134
FIGURA 7.6 –	Variação de comprimento (%) de barras submetidas ao ensaio de expansão, – Escória EA1 moída em moinho de bolas por um período de 210 minutos, com diâmetro médio de 10,06 μ m. Ensaio de expansão – Escória EA1 (50/50) e CPV ARI RS.....	135

FIGURA 7.7 – Variação de comprimento (%) de barras submetidas ao ensaio de expansão, – Escória EA1 moída pelo processo de micronização, com diâmetro médio de 3,37 μ m. Ensaio de expansão – Escória EA1 (50/50) e CPV ARI RS.....	136
FIGURA 8.1 – Fluxogramas de avaliação de propriedades de argamassas constituídas de escória de aciaria elétrica micronizada EA1: a) resistência mecânica à compressão e b) durabilidade (absorção e ataque de cloretos).....	141
FIGURA 8.2 – Resistência à compressão de argamassas no traço 1 : 1,5, constituído de CPV ARI RS, escória de aciaria elétrica micronizada EA1 e areia normal.....	142
FIGURA 8.3 – Resistência à compressão de argamassas no traço 1 : 3, constituído de CPV ARI RS, escória de aciaria elétrica micronizada EA1 e areia normal.....	143
FIGURA 8.4 – Resistência à compressão de argamassas no traço 1 : 4,5, constituído de CPV ARI RS, escória de aciaria elétrica micronizada EA1 e areia normal.....	144
FIGURA 8.5 – Resistência à compressão de argamassas no traço 1 : 1,5, constituído de CPV ARI RS, escória granulada de alto-forno (EGAF) e areia normal.....	145
FIGURA 8.6 – Resistência à compressão de argamassas no traço 1 : 3, constituído de CPV ARI RS, escória granulada de alto-forno (EGAF) e areia normal.....	146
FIGURA 8.7 – Resistência à compressão de argamassas no traço 1 : 4,5, constituído de CPV ARI RS, escória de aciaria elétrica micronizada EGAF e areia normal.....	147
FIGURA 8.8 – Comportamento das argamassas quanto à resistência à compressão em função dos diferentes teores da escória de aciaria elétrica micronizada (EA1).....	149
FIGURA 8.9 – Comportamento das argamassas quanto à resistência à compressão em função dos diferentes traços.....	149
FIGURA 8.10 – Comportamento das argamassas quanto à resistência à compressão em função das diferentes idades.....	150
FIGURA 8.11 – Efeito da interação entre idade e traço na resistência à compressão das argamassas	150
FIGURA 8.12 – Efeito da interação entre idade e teor de EA1 na resistência à compressão das argamassas.....	151

FIGURA 8.13 – Efeito da interação entre traço e teor de EA1 na resistência à compressão das argamassas.....	152
FIGURA 8.14 – Resistência à compressão de argamassas em função do tipo de escória utilizada.....	154
FIGURA 8.15 – Influência da interação do teor e do tipo de escória na resistência à compressão.....	154
FIGURA 8.16 – Influência da interação do traço e do tipo de escória na resistência à compressão.....	155
FIGURA 8.17 – Influência da interação da idade e do tipo de escória na resistência à compressão.....	156
FIGURA 8.18 – Influência da interação da idade, do traço e do tipo de escória na resistência à compressão: a) EA1 e b) EGAF.....	156
FIGURA 8.19 – Influência da interação da idade, do teor e do tipo de escória na resistência à compressão: a) EA1 e b) EGAF.....	157
FIGURA 8.20 – Influência da interação do traço, do teor e do tipo de escória na resistência à compressão: a) EA1 e b) EGAF.....	158
FIGURA 8.21 – Influência da interação do teor, da idade e do traço e do tipo de escória na resistência à compressão: a) EA1 (90/10), b) EGAF (90/10), c) EA1 (66/34) e d) EGAF (66/34)..	159
FIGURA 8.22 – Ensaio de penetração de água por sucção capilar: a) preparação do corpo-de-prova, b) impermeabilização das faces laterais do corpo-de-prova e c) equipamentos e dispositivos utilizados no ensaio.....	165
FIGURA 8.23 – Realização do ensaio de penetração de água por sucção capilar.....	166
FIGURA 8.24 – Ganho de massa em função da \sqrt{t} para argamassas no traço 1 : 1,5, com EA1 (90/10) e A0 (100) – 1º Exemplar.....	167
FIGURA 8.25 – Ganho de massa em função da \sqrt{t} para argamassas no traço 1 : 1,5, com EA1 (90/10) e A0 (100) – 2º Exemplar.....	167
FIGURA 8.26 – Ganho de massa em função da \sqrt{t} para argamassas no traço 1 : 1,5, com EA1 (66/34) e A0 (100) – 1º Exemplar.....	168

FIGURA 8.27 – Ganho de massa em função da \sqrt{t} para argamassas no traço 1 : 1,5, com EA1 (66/34) e A0 (100) – 2º Exemplar.....	168
FIGURA 8.28 – Ganho de massa em função da \sqrt{t} para argamassas no traço 1 : 3, com EA1 (90/10) e A0 (100) – 1º Exemplar.....	169
FIGURA 8.29 – Ganho de massa em função da \sqrt{t} para argamassas no traço 1 : 3, com EA1 (90/10) e A0 (100) – 2º Exemplar.....	169
FIGURA 8.30 – Ganho de massa em função da \sqrt{t} para argamassas no traço 1 : 3, com EA1 (66/34) e A0 (100) – 1º Exemplar.....	170
FIGURA 8.31 – Ganho de massa em função da \sqrt{t} para argamassas no traço 1 : 3, com EA1 (66/34) e A0 (100) – 2º Exemplar.....	170
FIGURA 8.32 – Ganho de massa em função da \sqrt{t} para argamassas no traço 1 : 4,5, com EA1 (90/10) e A0 (100) – 1º Exemplar.....	171
FIGURA 8.33 – Ganho de massa em função da \sqrt{t} para argamassas no traço 1 : 4,5, com EA1 (90/10) e A0 (100) – 2º Exemplar.....	171
FIGURA 8.34 – Ganho de massa em função da \sqrt{t} para argamassas no traço 1 : 4,5, com EA1 (66/34) e A0 (100) – 1º Exemplar.....	172
FIGURA 8.35 – Ganho de massa em função da \sqrt{t} para argamassas no traço 1 : 4,5, com EA1 (66/34) e A0 (100) – 2º Exemplar.....	172
FIGURA 8.36 – Efeito do traço na taxa de absorção das argamassas.....	174
FIGURA 8.37 – Efeito do teor de EA1 na taxa de absorção das argamassas.....	175
FIGURA 8.38 – Efeito do traço na resistência capilar das argamassas.....	176
FIGURA 8.39 – Realização do ensaio de absorção de água por imersão (NBR 9778, 1987).....	177
FIGURA 8.40 – Absorção de água por imersão (NBR 9778, 1987) de argamassas de referência e com escória de aciaria elétrica micronizada EA1.....	180
FIGURA 8.41 – Índice de vazios por imersão em água (NBR 9778, 1987) de argamassas de referência e com escória de aciaria elétrica micronizada EA1.....	180
FIGURA 8.42 – Efeito do traço na absorção de água por imersão (NBR 9778, 1987) nas argamassas.....	181

FIGURA 8.43 – Efeito do teor de EA1 na absorção de água por imersão (NBR 9778, 1987) nas argamassas.....	182
FIGURA 8.44 – Efeito da interação entre traço e teor de EA1 na absorção de água por imersão (NBR 9778, 1987) nas argamassas.....	183
FIGURA 8.45 – Efeito do traço no índice de vazios (NBR 9778, 1987) nas argamassas.....	184
FIGURA 8.46 – Efeito do teor de EA1 no índice de vazios (NBR 9778, 1987) nas argamassas.....	184
FIGURA 8.47 – Efeito da interação entre traço e teor de EA1 no índice de vazios (NBR 9778, 1987) nas argamassas.....	185
FIGURA 8.48 – Ensaio de migração íons cloreto: a) selagem da superfície lateral do corpo-de-prova com silicone e b) saturação com água destilada dos corpos-de-prova.....	188
FIGURA 8.49 – Ensaio de migração íons cloreto: fixação do corpo-de-prova nas células com selante neutro de alta viscosidade.....	188
FIGURA 8.50 – Ensaio de migração íons cloretos (ASTM C 1202, 1997) a) vista geral e b) detalhe da medição da carga passante.....	189
FIGURA 8.51 – Resultados do ensaio de penetração íons cloretos (ASTM C 1202, 1997) em corpos-de-prova de argamassa constituídos com escória de aciaria elétrica micronizada: carga total passante (C).....	190
FIGURA 8.52 – Efeito do traço na penetração de íons cloretos (ASTM C 1202, 1997) nas argamassas.....	191
FIGURA 8.53 – Efeito do teor de EA1 na penetração de íons cloretos (ASTM C 1202, 1997) nas argamassas.....	192
FIGURA 8.54 – Efeito da interação entre traço e teor de EA1 na penetração de íons cloretos (ASTM C 1202, 1997) das argamassas.....	193

LISTA DE SÍMBOLOS

C_2S – $2CaOSiO_2$ – Silicato dicálcico

C_3S – $3CaOSiO_2$ – Silicato tricálcico

C_3A – $3CaOAl_2O_3$ – Aluminato tricálcico

C_4AF – $4CaOAl_2O_3Fe_2O_3$ – Ferro aluminato tetracálcio

C-S-H – Silicato hidratado de cálcio

CH – Hidróxido de cálcio

- Malha de peneira

d – Distância interplanar

f_{cm} – Resistência média à compressão

DRM – Desvio relativo máximo

f_c – Resistência à compressão

EGAF – Escória granulada de alto-forno

E1 – Escória de aciaria elétrica recém estocada

E2 – Escória de aciaria elétrica estocada há seis meses

E3 – Escória de aciaria elétrica estocada há vinte e quatro meses

EA1 – Escória de aciaria elétrica micronizada (recém estocada)

∅ - Diâmetro das partículas

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DE UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE ACIARIA ELÉTRICA
MICRONIZADA COMO MATERIAL CIMENTÍCIO**

Antônio Eduardo Polisseni

RESUMO

A compatibilização do desenvolvimento tecnológico com desenvolvimento sustentável é um dos desafios para o meio técnico-científico nos dias atuais. Dentro deste contexto, a reciclagem de resíduos, tal como a escória de aciaria elétrica, oriunda da indústria siderúrgica e que poderá ser reciclada pela indústria cimenteira, é vista como uma oportunidade de preservação de recursos naturais e do meio ambiente, uma vez que ao substituir o cimento Portland por escória micronizada, ocorrerá, principalmente, a economia de jazidas de pedra calcária, menos poluição de gás carbônico para a atmosfera, além de se evitar a estocagem em bota-foras de pilhas de escória na siderúrgica, o que pode causar, em função de um inadequado manejo ambiental, contaminação ao meio ambiente. Porém, um dos desafios tecnológicos da utilização da escória de aciaria elétrica como material cimentício é a sua expansibilidade. Esta pesquisa tem como objetivo estudar a viabilidade técnica da utilização da escória de aciaria elétrica micronizada como material cimentício, obtido através do processo de moagem por micronização, visando garantir a estabilização da escória em relação ao fenômeno de expansão, bem como melhorias nas características do resíduo. Principalmente através dos ensaios de granulometria a laser e de avaliação de expansão, ficou evidenciado que a moagem da escória de aciaria elétrica pelo processo de micronização garantiu a sua estabilidade. Foram estudadas argamassas de traços 1 : 1,5, 1 : 3,0 e 1 : 4,5 com substituição de 0%, 10% e 34% de cimento Portland por escória de aciaria elétrica micronizada. Em relação à resistência mecânica à compressão, o desempenho apresentado pelas argamassas que utilizaram a escória de aciaria elétrica micronizada foram inferiores às argamassas de referência, porém os resultados encontrados nos ensaios são satisfatórios para atender às exigências de um cimento Portland. Em relação aos aspectos de durabilidade, foram avaliados o desempenho em relação à absorção de água e à penetração de íons cloretos. Para a propriedade de absorção de água, a substituição nos mesmos traços de argamassas e teores de escória de aciaria elétrica micronizada mencionadas anteriormente, os resultados obtidos apresentaram desempenho superior às argamassas de referência. Do ponto de vista de penetração íons cloretos (ASTM C 1202, 1997), verifica-se que para os traços mais pobres (1 : 3,0 e 1 : 4,5) e que requerem respectivamente maiores relações água/aglomerantes, a adição de escória de aciaria elétrica micronizada ao CPV ARI RS nos teores de 10% e 34%, respectivamente, é o principal fator que contribui para o aumento da carga passante das argamassas e conseqüentemente a redução da capacidade de resistir à penetração de íons cloretos. Já para o traço mais rico (1 : 1,5) que requer menor relação água/aglomerante, a adição de escória de aciaria elétrica micronizada ao CPV ARI RS, no teor de 10%, é o principal fator que contribuiu para a diminuição da carga passante, em relação à argamassa referência, conseqüentemente aumentando a capacidade da argamassa de resistir à penetração de íons cloretos. Para o teor de substituição de 34% de escória de aciaria elétrica micronizada ao CPV ARI RS, houve aumento da carga passante de 16,72% em relação à argamassa referência. De acordo com os critérios da ASTM C 1202, a substituição de 10% e 34% de escória de aciaria elétrica micronizada ao CPV ARI RS, classificou o traço 1 : 1,5 e os traços 1 : 3,0 e 1 : 4,5, respectivamente, como sendo de moderada e de elevada penetração de íons cloretos.

**THE STUDY ON TECHNICAL VIABILITY TO USE THE MICRONIZED ELECTRICAL STEEL MAKING SLAG
AS A CEMENT MATERIAL**

Antônio Eduardo Polisseni

ABSTRACT

The combination of technological development with sustainable development has been one of the challenges of technical scientific environment nowadays. Considering this context, the recycling of residuals, such as electrical steel making slag, derived from steel metallurgy industry and that can be recycled by cement industry, has been seen as an opportunity to preserve natural resources and the environment, seeing that once the Portland cement is substituted by the micronized slag, it will happen, principally, saving of limestone beds, less carbonic gas pollution to the atmosphere, besides avoiding storage of large quantity of slag send-offs in steel metallurgy, what can cause, due to inadequate environment control, the contamination to the environment. However, one of the technological challenges for the use of electrical steel making slag as a cement material is its expansibility. This work has had as its objective the study of the technical viability to use the micronized electrical steel making slag as a cement material, obtained through the process of micronization grinding, aiming the guarantee of stabilization of the slag in relation to the expansion phenomenon, as well as the improvement on the residual characteristics. Mainly through the testing on laser granulometry and expansion evaluation, it has become evident that the grinding of electrical steel making slag by the process of micronization has guaranteed its stability. It has been studied mortars mixing 1:1.5, 1:3.0 and 1:4.5 with substitution of 0%, 10% and 34% of Portland cement by micronized electrical steel making slag. In relation to the mechanical resistance to pressure, the performance presented by mortars that used the micronized electrical steel making slag has been inferior to the reference mortars, but the results found in the assays have been satisfactory to attend the requirements on Portland cement. In relation to the aspects on durability, it has been evaluated the performance in relation to the absorption of water and the penetration of chloride ions. For water absorption property, the substitution in the same mixtures of mortars and contents of micronized electrical steel making slag mentioned previously, the results obtained have presented performance superior to those of reference mortars. Considering the penetration of chloride ions (ASTM C 1202, 1997), it has been verified that for poorer mixtures (1: 3.0 and 1: 4.5) and that require respectively greater relations of water/agglomerative, the addition of micronized electrical steel making slag to CPV ARI RS in contents of 10% and 34%, respectively, has been the main factor that has contributed to the increase of mortars passing charge and consequently the reduction of resisting the ion chloride penetration. Considering the richest mixture (1: 1.5) which requires smaller relation water/agglomerative, the addition of micronized electrical steel making slag to CPV ARI RS, in the content of 10%, has been the main factor that has contributed to the decrease of passing charge, in relation to the reference mortar, consequently, increasing the capacity of the mortar to resist the penetration of chloride ions. For the substitution content of 34% of micronized electrical steel making slag to CPV ARI RS, there has been an increase of passing charge of 16.72% in relation to reference mortar. According to ASTM C 1202 criteria, the substitution on 10% and 34% of micronized electrical steel making slag to CPV ARI RS, has classified the 1: 1.5 mixture and the mixtures 1: 3.0 and 1: 4.5, respectively, as being those with moderate and high penetration of chloride ions.

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSTRUÇÃO CIVIL: DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO COMPARTILHADO COM DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Na década de 80, quando a Assembléia Geral das Nações Unidas criou a WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT (WCED) com finalidade de formular uma “agenda para o futuro”, o mundo tomou consciência dos problemas ambientais gerados pelo homem.

Os problemas ambientais são causados pela poluição do ar e das águas, pela exploração desenfreada dos recursos naturais do planeta, bem como pela geração de lixo e resíduos, que estão poluindo e contaminando o meio ambiente.

A WCED definiu desenvolvimento sustentável como “desenvolvimento que atende as necessidades do presente sem comprometer a habilidade das futuras gerações de atender às suas próprias necessidades” (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.

Desta forma 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. Dados das Nações Unidas mostram que em 1990 habitavam o planeta 5,5 bilhões de seres humanos e que, em um dado momento do século XXI, atingirá 8 bilhões, sendo que o nível de “stress” do planeta é de 14 bilhões (LYLE, 1994).

O “desenvolvimento sustentável”, para a situação atual e futura, pressupõe que o meio ambiente não é um fator de menor importância comparado com a “produção” para atender as necessidades dos homens. Existe a necessidade de se dar um enfoque sistêmico entre “sustentabilidade” e “produção”, que conseqüentemente trará harmonia entre homem e meio ambiente (LYLE, 1994; JOHN et al., 2000; MASUERO et al. 2000; LARANJEIRAS, 2002).

Inserido neste contexto, para a produção de 1t de clínquer Portland utilizado na fabricação do cimento, são lançados na atmosfera uma tonelada de gás carbônico, as custas de um consumo energético de 4GJ. A produção mundial de cimento, ao atingir 1,6 bilhões de toneladas anuais, é responsável pela expressiva parcela de 7% de todo o dióxido de carbono lançado na atmosfera do

planeta. Para a produção de concretos e argamassas no mundo, estima-se anualmente um consumo de agregados na faixa de 10 a 11 bilhões de toneladas e de água potável em torno de 1 trilhão de litros. A exploração, processamento e o transporte dessas grandes quantidades de matérias-primas extraídas da natureza consomem muita quantidade de energia e afetam o meio ambiente (LARANJEIRAS, 2002).

JULIBONI (2002), de acordo com dados da Associação Brasileira de Cimento Portland, publicou que o Brasil, no ano de 2000, produziu 39,6 milhões de toneladas de cimento e consumiu 39,4 milhões de toneladas, ocupando a colocação de sexto maior produtor mundial. No período de janeiro a setembro de 2001, a produção brasileira foi de 28,703 milhões de toneladas, assim distribuídas: 28,4% foram parar nos consumidores industriais (concreteiras e fabricantes de artefatos de cimento, pré-moldados, produtos à base de fibrocimento e argamassas industrializadas), 29,3% nos consumidores finais (construtores, empresas privadas, órgãos públicos, entre outros) e 42,3% terminaram no consumidor particular (pedreiros, empreiteiros e consumidores individuais).

O consumo de cimento no mundo vem crescendo a cada ano como é mostrado na tabela 1.

TABELA 1.1 Consumo de cimento médio mundial per capita por década (JUNIOR, 2003; HELENE, 1993)

ANO	1920	1930	1940	1950	1960	1970	1980	1990	2000*
Consumo em kg/hab/decada	19	38	40	55	104	158	203	210	355

* estimativa para a década de 2000.

Particularmente para o ano de 2000, o país e o respectivo consumo per capita de cimento por habitante foi: Cingapura (1486 kg), Portugal (1024 kg), Coréia do Sul (970 kg), Japão (562 kg), Estados Unidos (384 kg), México (287 kg) e Brasil (232 kg) (LARANJEIRAS, 2002).

A grande oportunidade da indústria cimenteira em participar do “desenvolvimento sustentável global” está embasada na política de redução da produção do clínquer, que trará como consequência a conservação da matéria-prima natural (rocha calcária, argila, dentre outros) contribuindo de forma significativa para a diminuição do consumo de energia e da descarga do dióxido de carbono para a atmosfera.

Estima-se que em 2010 o consumo mundial de cimento seja de 2 bilhões de toneladas (LARANJEIRAS, 2002).

As adições minerais ao cimento Portland, tais como as escórias e as pozolanas, são soluções adequadas para a obtenção de cimentos com qualidade técnica e econômica para uso em obras de engenharia.

MEHTA e MONTEIRO (1994) comparam o cimento Portland ao Deus Hindu Shiva, que é o Deus da transformação, pois o cimento tem a potencialidade técnica de absorver grandes quantidades de resíduos oriundos de outros segmentos industriais, tais como os do setor siderúrgico.

Tradicionalmente a indústria do cimento já recicla anualmente mais de cinco milhões de toneladas de escória de alto-forno a coque, oriunda da produção do ferro-gusa (IBS, 1998).

Uma nova oportunidade de reciclagem de resíduos, pela indústria cimenteira, oriundos do setor siderúrgico, surge com o aproveitamento das escórias de aciarias geradas através dos processos LD (Linz – Donawitz) e aciaria elétrica (forno elétrico a arco), conforme são apresentados nos trabalhos de CECATTO (2003), GUMIERI (2002); MASUERO (2001) e ALBERNAZ et al. (2000).

Assim sendo, a indústria cimenteira, consorciada com o setor siderúrgico, agrega grandes potencialidades para a contribuição do “desenvolvimento sustentável global” dentro da indústria da construção civil.

ODA (2000) cita que a indústria cimenteira, quando da produção do clínquer, já utiliza como fonte energética no forno rotativo, pneus. Cerca de 5000 pneus por ano já são consumidos pela indústria cimenteira, proporcionando uma economia de 12.000 toneladas de óleo.

A visão de reciclar resíduos está em conformidade com o que preconiza a Regulamentação 91/156 dos países membros da “Comunidade Econômica Européia” (VÀZQUEZ, 1997), que se baseia no trinômio estratégico: preservação ambiental, redução do consumo de energia e reciclagem, que conseqüentemente trará novas oportunidades para empregá-los ou transformá-los, sem causar danos à saúde humana e ao meio ambiente.

No Brasil, KPAZ (2003), que é o deputado federal relator da comissão especial responsável pela elaboração da Política Nacional de Resíduos Sólidos, disse em palestra proferida no “V Seminário de Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil” que: “A Política Nacional de Resíduos tem como principal meta a formação de uma consciência comunitária sobre a importância do consumo de produtos e serviços não poluentes, estimulando as atividades de coleta de resíduos reutilizáveis e recicláveis. Para isso, trabalha-se com a hipótese de lixo zero, assumindo

a inclusão de catadores no processo de gerenciamento de resíduos e com a participação responsável e solidária do setor empresarial”.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo do trabalho é o de estudar a viabilidade técnica da utilização de escória de aciaria elétrica micronizada como material cimentício.

Os objetivos específicos do trabalho são:

- caracterizar e qualificar as escórias de aciaria elétrica, que estão estocadas em botaforas em uma siderúrgica na região de Juiz de Fora – MG, com três períodos distintos de estocagem, ou seja, recém estocada, estocada há 6 meses e com estocagem superior a 24 meses, do ponto de vista físico, químico, microestrutural e ambiental com objetivo de identificar as transformações ocorridas nas propriedades da escória em função destes períodos de estocagem;
- caracterizar e quantificar a expansão das escórias de aciaria em estudo, por meio de ensaios de expansibilidade, avaliando-se os diversos fatores (tempo de estocagem e distribuição granulométrica) que contribuem para o surgimento deste fenômeno;
- avaliar a influência que a dimensão do grão e sua distribuição granulométrica exercem sobre a propriedade de expansibilidade de uma escória de aciaria recém-gerada;
- comparar a propriedade de resistência mecânica entre argamassa produzida com escória de aciaria elétrica micronizada e argamassa produzida com escória de alto-forno, cujo uso já é consagrado no mercado;
- avaliar e validar o emprego da escória micronizada, como material cimentício em argamassa, sobre a ótica dos ensaios de durabilidade:
 - absorção de água;
 - penetração de íons cloretos;
- contribuir com dados bibliográficos e experimentais, referentes à escória de aciaria elétrica, que poderão ser utilizados como subsídios em futuras pesquisas, bem como possíveis aplicações deste resíduo;
- oportunizar empresas de siderurgia a reciclar escórias geradas, melhorando as condições ambientais na própria empresa, bem como possibilitar que a empresa siderúrgica saiba para

onde o seu resíduo gerado está sendo utilizado, exercitando desta forma o princípio da rastreabilidade.

1.3 JUSTIFICATIVA

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, de lençol freático, dos rios, poluição visual, entre 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 a coque, geradas no processo de fabricação do ferro-gusa, são consumidas em larga escala para a produção dos cimentos Portland composto (CPII E) e de alto-forno (CPIII). O mesmo ocorre com as cinzas volantes geradas nas usinas termoelétricas, que são utilizadas na produção do cimento Portland pozolânico (CPIV).

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 (CPV ARI RS) e outro de escória de alto-forno, destinados à produção de concretos (figura 1.1).



Figura 1.1 Vista parcial de uma concreteira na região de Juiz de Fora, podendo-se notar a presença de dois silos de aglomerantes, um de CPV ARI RS e outro de escória de alto-forno

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 através 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 em ferrovias (figura 1.2).

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

A proposta deste trabalho está em conformidade com a linha de pesquisa do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, através do NORIE (Núcleo Orientado para Inovação das Edificações), que pesquisa e potencializa a viabilidade da utilização de novos materiais de construção no setor da construção civil.



Figura 1.2 Construção do contorno da cidade de Volta Redonda – RJ utilizando-se escória de aciaria gerada na Companhia Siderúrgica Nacional (CSN): a) carregamento da escória após peneiramento; b) transporte da escória para ser utilizada como base; c) revestimento em CBUQ (concreto betuminoso usinado a quente) executado com escória e d) execução de contenção em gabião utilizando-se escória

1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA

A estrutura da pesquisa está fundamentada em dez capítulos, sendo:

- no primeiro capítulo, é apresentada a contextualização do tema sob a ótica ambiental, ressaltando sua importância na atualidade, bem como os objetivos da pesquisa e a sua estrutura;
- no segundo capítulo, é feita uma revisão bibliográfica sobre a produção do aço, geração de escórias, bem como beneficiamento e as oportunidades de utilização das escórias;
- no capítulo três, é abordado o tema das adições minerais a cimentos e a concretos;

- no capítulo quatro, são apresentados os mecanismos responsáveis pelo surgimento do fenômeno de expansão das escórias de aciaria;
- no capítulo cinco é apresentado o embasamento para a utilização da escória de aciaria elétrica micronizada como material cimentício, fundamentado em ensaios de caracterização: física, química, mineralógica, estrutural, ambiental, atividade pozolânica, grau de vitrificação e expansibilidade;
- no capítulo seis é apresentado o desempenho da escória de aciaria elétrica micronizada como material cimentício. Os ensaios realizados em misturas constituídas dessas escórias com cimento Portland (CPV ARI RS) seguiram os mesmos ensaios que normalmente caracterizam os cimentos Portland nacionais do ponto de vista químico e físico;
- no capítulo sete é feita uma abordagem de como a distribuição granulométrica e a dimensão dos grãos, influenciada pelo processo de moagem, interfere no fenômeno de expansão das escórias de aciaria elétrica, contribuindo ou não para a sua estabilização. Foram comparados os processos de moagem tradicional de escórias em moinhos de bola com o processo de moagem por micronização;
- no capítulo oito, é apresentada a viabilidade técnica da utilização da escória de aciaria elétrica micronizada como material cimentício, onde, inicialmente, comparou-se o desempenho mecânico (compressão axial) de argamassas com adição de escória de aciaria elétrica micronizada com as de escória de alto-forno, que é largamente empregada no meio técnico, bem como avaliou-se o comportamento de mistura de cimento Portland (CPV ARI RS) com escória de aciaria elétrica em relação à durabilidade (absorção de água e penetração de íons cloretos);
- no nono capítulo, são apresentadas as conclusões obtidas na pesquisa;
- no décimo capítulo são recomendadas algumas sugestões para futuros trabalhos.

2 PRODUÇÃO DO AÇO E AS ESCÓRIAS DE ACIARIA

2.1 HISTÓRICO E ESTATÍSTICAS DA PRODUÇÃO DO AÇO

Em 1856, Henry Bessemer idealizou o processo de produção do aço por conversor a oxigênio, que inicialmente teve dificuldades de implementação por não conseguir a obtenção de oxigênio puro em quantidades industriais. Mais tarde, em 1938, Durrer e Schartz iniciaram as primeiras experiências de sopro de oxigênio em conversor na superfície de metais fundidos. Em 1947, na Suíça, Durrer e Helbrugge utilizaram sopro de oxigênio em metais fundidos, por meio de lanças refrigeradas, culminando em 1948 com a primeira produção de aço neste processo. No ano de 1952, na Áustria, na cidade de Linz, entrou em operação uma usina com capacidade de produção de 250 mil toneladas / ano, e em 1953, também na cidade austríaca de Donawitz, iniciou-se a produção de aço por igual processo e conseqüentemente disseminou-se por diversos países do mundo, ficando conhecido este processo de produção do aço como “LD” (Linz – Donawitz) ou BOF (Basic Oxigen Furnace, denominação também utilizada para se referir aos conversores a oxigênio) (MUNDIN, 1985).

No Brasil, apesar da evidenciada existência de ferro ainda quando o país era colônia de Portugal, passaram-se séculos sem que surgisse nenhum projeto de caráter industrial para a produção do aço. Em 1910, quando em Estocolmo, no congresso internacional de geologia, as nações industrializadas tomaram conhecimento das imensas jazidas ferríferas brasileiras, as empresas internacionais do setor de produção de aço visitaram o país. Em 1920, o governo do Brasil assinou contrato com a Itabira “Iron Ore Company”, que se propunha à extração dos minérios das minas situadas em Itabira do Mato Dentro, em Minas Gerais, sendo seu transporte realizado pela estrada de ferro Vitória a Minas, até o porto de Santa Cruz, no estado do Espírito Santo, para exportação. No ano de 1938, o país contava com onze pequenas empresas siderúrgicas, trabalhando com carvão vegetal, que produziam anualmente 92,4 mil toneladas de aço. Em 1939, com o término do contrato com a Itabira Iron Ore Company, surge a idéia de se implementar a siderurgia nacional. Em 1940, através do decreto lei 1108, é criada a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN). Em 1º de Janeiro de 1941, iniciou-se a construção da CSN, que começou sua produção à base de coque em 1944, em caráter experimental, operando plenamente a partir de 1946 (ENCICLOPÉDIA, 1991).

Também no Brasil, a Companhia Belgo Mineira, situada na cidade mineira de João Monlevade, no ano de 1957, iniciou a produção de aço. A seguir, em 1963, entram em operação a Companhia

Siderúrgica Manesmann em Belo Horizonte e a Usiminas, na cidade de Ipatinga, ambas produzindo aço por processo LD (MUNDIN, 1985).

GEYER (2001), MASUERO (2001) e GUMIERI (2002) apresentam resultados estatísticos da produção mundial de aço, divulgados pelo INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA e INSTITUTO LATINO AMERICANO DEL FIERRO Y EL ACERO, identificando que a maior produção de aço se dá pelo processo LD, seguida pelo processo de forno elétrico a arco.

O Brasil é um dos grandes produtores mundiais de aço. O anuário estatístico, divulgado pelo Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS, 2004), apontou que a produção brasileira de aço bruto, em 2002, foi de 29,604 Mt. A produção brasileira de aço bruto, em 2003, alcançou 31,14 Mt, um recorde histórico que representa 5,2% de acréscimo sobre o ano de 2002 (IBS, 2003). O país ocupa a nona posição relativa no mundo e nos últimos anos vem se mantendo como principal produtor na América Latina, com cerca de 50% do total da produção.

A Ásia foi o principal mercado externo para o aço brasileiro, no ano de 2003, respondendo por 42% do total, sendo 13Mt exportadas. A América Latina situou-se em segundo lugar, alcançando 21,3%, seguindo-se, pela ordem, a América do Norte – exclusive México (19%), Europa (12,5%), África (3,1%), Oriente Médio (1,8%) e Oceania (0,3%). A posição destacada da Ásia como destino do aço brasileiro deve-se principalmente ao crescimento exponencial do consumo da China. Esse país, no ano passado, produziu 220 Mt de aço bruto (25% da produção global) e importou 28,5 Mt de produtos, o que equivale aproximadamente ao total da produção brasileira (IBS, 2004).

A tabela 2.1 mostra a produção mundial de aço bruto, evidenciando o Brasil como o nono produtor.

TABELA 2.1 Produção Mundial de Aço Bruto (Unidade: x10⁶ t) (IBS, 2004)

PAÍS	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
China	108,9	114,6	124,0	127,2	150,9	181,6	220,1
Japão	104,5	93,5	94,2	106,4	102,9	107,7	110,5
EUA	98,5	98,7	97,4	101,8	90,1	92,2	90,4
Rússia	48,5	43,8	51,5	59,1	59,0	59,8	62,7
Coréia do Sul	42,6	39,9	41,0	43,1	43,9	45,4	46,3
Alemanha	45,0	44,0	42,1	46,4	44,8	45,0	44,8
Ucrânia	25,6	25,8	25,0	27,9	26,7	29,6	36,9
Índia	24,4	23,5	24,3	26,9	27,3	28,8	31,8
Brasil	26,2	25,8	25,0	27,9	26,7	29,6	31,1
Itália	25,8	25,7	24,9	26,8	26,5	26,1	26,7
França	19,8	20,1	20,2	21,0	19,3	20,3	19,8
Formosa	16,0	16,9	15,4	16,9	17,3	18,2	18,9
Turquia	14,5	14,1	14,3	14,3	15,0	16,5	18,3
Espanha	13,7	14,8	14,9	15,9	16,5	16,4	16,5
Canadá	15,6	15,9	16,2	16,6	15,3	16,0	15,9
México	14,2	14,2	15,3	15,6	13,3	14,1	15,1
Reino Unido	18,5	17,3	16,3	15,2	13,5	11,7	13,0
Bélgica	10,7	11,4	10,9	11,6	10,8	11,3	11,1
África do Sul	8,3	8,0	7,9	8,5	8,8	9,1	9,5
Polônia	11,6	9,9	8,8	10,5	8,8	8,4	9,1
Austrália	8,8	8,9	8,2	7,1	7,0	7,5	7,5
Irã	6,3	5,6	6,1	6,6	6,9	7,3	7,9
Rep. Tcheca	6,8	6,5	5,6	6,2	6,3	6,5	6,8
Áustria	5,2	5,3	5,2	5,7	5,9	6,2	6,3
Holanda	6,6	6,4	6,1	5,7	6,0	6,1	6,6
Suécia	5,1	5,2	5,1	5,2	5,5	5,8	5,7
Romênia	6,7	6,4	4,4	4,8	4,9	5,5	5,7
Cazaquistão	3,9	3,1	4,1	4,8	4,7	4,8	4,9
Argentina	4,2	4,2	3,8	4,5	4,1	4,4	5,0
Rep. Eslovaca	3,8	3,4	3,6	3,7	4,0	4,3	4,6
Venezuela	4,0	3,6	3,3	3,8	3,8	4,2	3,9
Finlândia	3,7	4,0	4,0	4,1	3,9	4,0	4,8
Indonésia	3,8	2,7	2,9	2,8	2,8	2,8	4,8
Outros	37,1	35,4	34,0	39,1	40,6	41,2	41,7
TOTAL	798,9	777,2	788,5	847,6	850,2	902,2	964,7

FONTE: Instituto Latino Americano Del Fierro y el Azero (ILAFA) / Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS) / International Iron and Steel Institute (IISI)

A tabela 2.2 mostra a produção de aço bruto na América Latina, evidenciando o Brasil como o maior produtor.

TABELA 2.2 Produção de Aço Bruto da América Latina (Unidade: $\times 10^3$ t) (IBS, 2004)

PAÍS	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Brasil	26.153	25.760	24.996	27.865	26.717	29.604	31.147
México	14.246	14.218	15.274	15.631	13.300	14.051	15.128
Argentina	4.169	4.216	3.805	4.479	4.112	4.363	5.033
Venezuela	3.987	3.553	3.261	3.835	3.813	4.164	3.930
Chile	1.167	1.1771	1.291	1.352	1.247	1.280	1.377
Trinidad e Tobago	736	777	729	742	668	817	903
Colômbia	734	636	534	660	638	663	614
Peru	607	631	559	751	690	611	668
Cuba	342	283	303	336	270	268	210
América Central	274	108	156	246	240	265	283
Paraguai	65	56	56	77	71	80	91
Equador	44	46	53	58	60	67	80
Uruguai	39	52	45	38	31	34	41
TOTAL	52.563	51.507	51.062	56.070	51.857	56.267	59.505

FONTE: Instituto Latino Americano Del Fierro y el Azero (ILAFA) / Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS).

A tabela 2.3 mostra a produção de aço bruto no Brasil por empresa.

TABELA 2.3 Produção de Aço Bruto por Empresa no Brasil (Unidade: $\times 10^3$ t) (IBS, 2004)

Empresa (Estado)	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Acesita (MG)	687	786	856	786	709	749
Aços Vilarés (SP)	625	632	660	602	700	774
Barra Mansa (RJ)	346	390	393	392	387	421
Belgo-Mineira (MG)	2.229	2.300	2.571	2.668	2.827	2.889
CBAço (SP)	41	40	8	-	-	-
Cosipa (SP)	3.519	2.593	2.746	2.460	3.873	4.097
CSN (RJ)	4.708	4.851	4.782	4.048	5.107	5.318
CST (ES)	3.818	4.414	4.752	4.784	4.904	4.812
Gerdau Açominas (MG)	5.294	5.614	6.116	5.826	5.999	.976
MWL Brasil (SP)	37	31	24	31	24	36
V & M do Brasil (MG)	433	365	519	500	500	551
Usiminas (MG)	4.023	2.980	4.438	4.620	4.574	4.524
TOTAL	25.760	24.996	27.865	26.717	29.604	31.147

FONTE: Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS).

A tabela 2.4 mostra a crescente produção brasileira de aço bruto por processo nos últimos cinco anos em relação aos processos de aciaria.

TABELA 2.4 Produção de aço bruto por processo de aciaria no Brasil (GEYER, 2001; GUMIERI, 2002; IBS, 2003; IBS, 2004)

Processo de Aciaria	Aço Produzido (x10 ³ t)					
	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Oxigênio (LD)	20.413	19.115	21.677	20.831	23.093	23.986
Elétrico (FEA)	4.981	5.476	5.745	5.403	5.985	6.589
Siemens – Martin (SM/OH)	366	405	443	483	526	572
TOTAL	25.760	24.996	27.865	26.717	29.604	31.147

A figura 2.1 mostra a participação percentual da produção de aço bruto através dos processos: conversor a oxigênio (LD), forno elétrico a arco (FEA) e outros no ano de 2003.

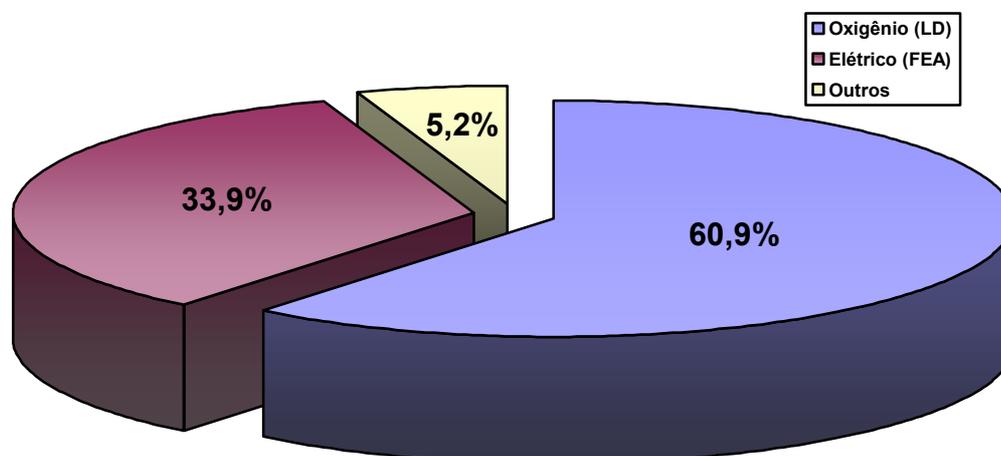


Figura 2.1 Produção mundial média de aço bruto por processo (IBS, 2004)

Com o crescente aumento da produção de aço no Brasil, é de suma importância que seja oportunizada a reciclagem das escórias de aciaria geradas.

Sequencialmente serão discutidas a geração, os tipos de resfriamento, processo de beneficiamento e as oportunidades de utilização das escórias de aciaria.

2.2 A GERAÇÃO, TIPOS DE RESFRIAMENTO, PROCESSOS DE BENEFICIAMENTO E AS OPORTUNIDADES DE UTILIZAÇÃO DAS ESCÓRIAS

2.2.1 A GERAÇÃO DAS ESCÓRIAS

A escória é um resíduo inerente à produção do aço, sendo que se apresenta nas formas de escória de alto-forno, escória LD e escória de aciaria elétrica (forno elétrico a arco e forno-panela), possuindo características bem distintas umas das outras. A figura 2.2 mostra a produção da siderurgia brasileira no ano de 2003. O IBS (2004) aponta que as escórias são os resíduos de maior geração na indústria siderúrgica, seguidas respectivamente pelas lamas e pós (figura 2.3).

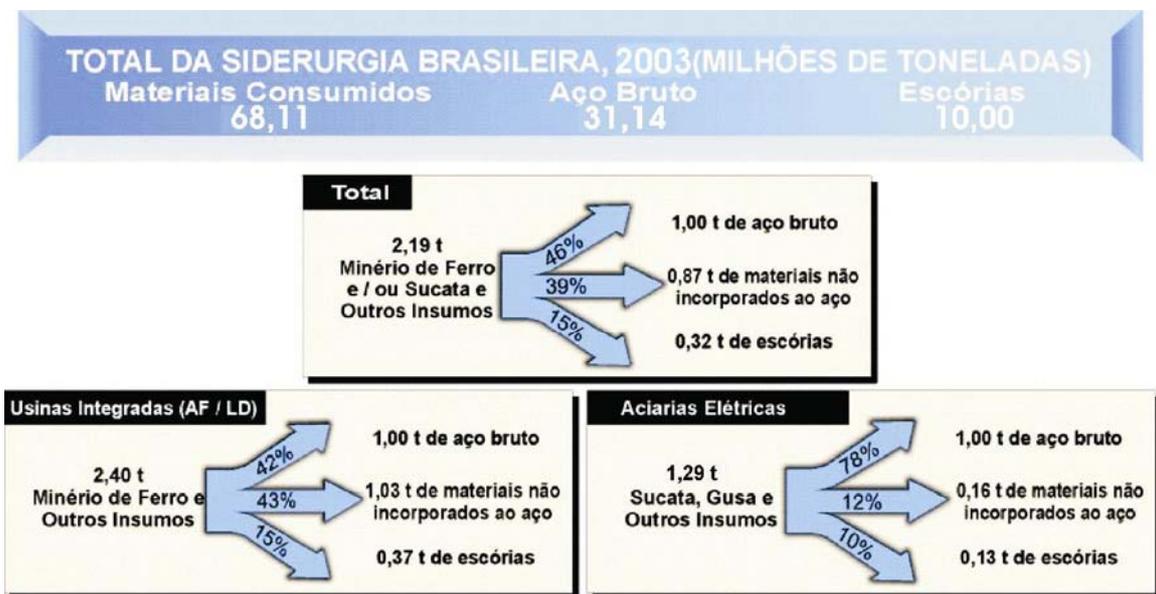


Figura 2.2 Produção de aço e respectivas escórias geradas: aço bruto, materiais não incorporados ao aço e escórias (IBS, 2004)

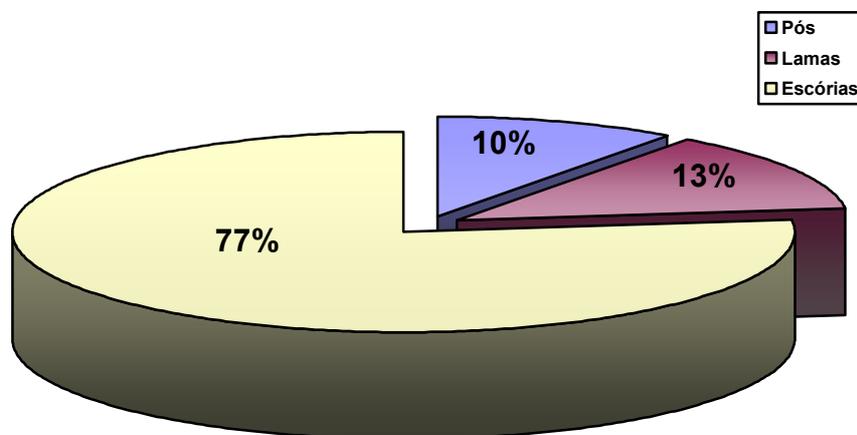


Figura 2.3 Geração média dos principais resíduos siderúrgicos (IBS, 2004)

Para a produção do aço, o ferro-gusa é muito utilizado como insumo básico. Pelo processo com forno elétrico a arco, o ferro-gusa é normalmente utilizado no estado sólido e sempre que houver disponibilidade, conseqüentemente, possibilitando vantagens econômicas. Pelo processo LD, o ferro-gusa é sempre utilizado no estado líquido.

Durante a fusão redutora do minério de ferro e dos fundentes no alto-forno, para dar origem ao ferro-gusa, ocorre a geração da escória de alto-forno.

Quando o gusa líquido segue para a aciaria, onde é carregado no conversor LD e recebe pequenas quantidades de cargas de sucatas de aço e ferro, onde também recebe o sopro de oxigênio para completar a operação de refino, durante o processo é gerada a escória LD.

Quando grandes quantidades de sucatas de aço, ferro e uma pequena carga de gusa sólido são carregados no forno elétrico e, após fundidos, recebem o sopro de oxigênio para completar a operação de produção do aço, durante esse processo, geram-se dois tipos de escória. A primeira, a escória oxidante gerada no forno elétrico a arco e a segunda, a escória redutora, gerada numa etapa posterior, no forno-panela. A figura 2.4 mostra, respectivamente, a produção de ferro-gusa, produção de aço e respectivas escórias geradas. Há aciarias LD que também operam com forno-panela.

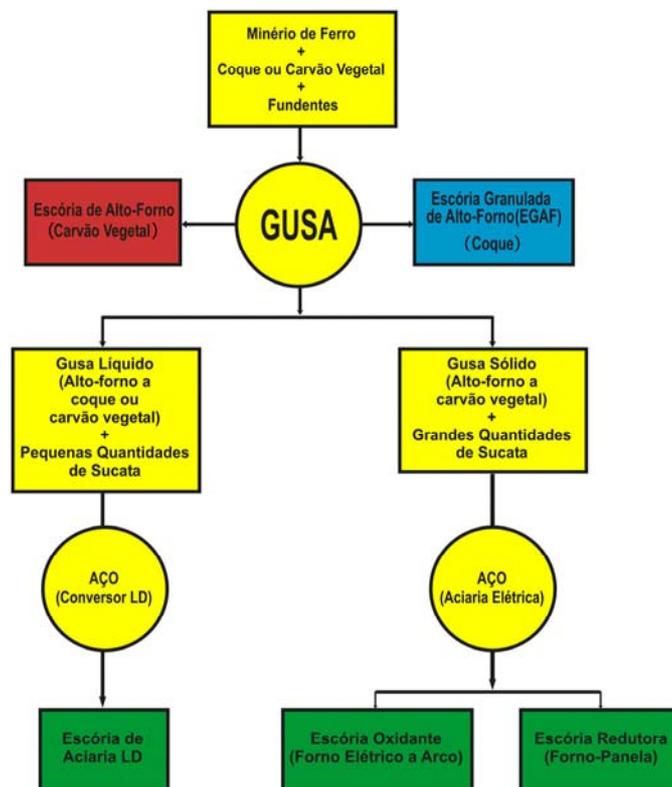


Figura 2.4 Produção de ferro-gusa, produção de aço e respectivas escórias geradas

O INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA (1999) encomendou às empresas SETEPLA TECHNOMETAL e ATHUR D. LITTLE Ltd. uma pesquisa que teve por objetivo diagnosticar a prática de gestão e as oportunidades de aplicações das escórias siderúrgicas nos seguintes países: Brasil, Estados Unidos, Canadá, Reino Unido, França, Alemanha, Itália, Japão e Coréia do Sul. Os principais pontos que se destacaram na pesquisa foram:

- mundialmente as aplicações mais usuais para a escória de alto-forno são: a fabricação de cimento, a produção de concreto e a construção de estradas. Os principais usos da escória de aciaria são: a construção de estradas, a reciclagem como carga de alto-forno e a preparação, recuperação e nivelamento de terrenos;
- a escória pode ser usada, com retorno econômico para as siderúrgicas, como alternativa a agregados naturais (brita e areia) ou como matéria-prima para a produção industrial de cimento, lã mineral e fertilizantes;
- as aplicações com maiores potenciais de atratividade para a siderurgia brasileira são:
 - escória granulada de alto-forno: fabricação de cimento e produção de concreto;
 - escória de alto-forno resfriada ao ar: produção de lã mineral e construção de estradas;
 - escórias de aciaria: construção de estradas, lastro de ferrovias e usos agrônômicos (corretivo de solos ou produção de fertilizantes fosfatados).
- em nenhum dos países pesquisados, as escórias são classificadas como resíduos perigosos ou não passíveis de reciclagem. A utilização intensiva das escórias siderúrgicas em aplicações industriais vem determinando a própria adequação do material em termos técnicos e ambientais;
- as normas técnicas e procedimentos referentes às principais aplicações da escória a consideram matéria-prima ou agregado de uso corrente, ao mesmo nível do que é especificado para os materiais concorrentes;
- em alguns países há regulamentos e incentivos para evitar a disposição de escórias em aterros. No Reino Unido, são produzidos cimentos com 100% da escória – o “slag cement”, e nos países asiáticos há subsídios ao transporte e entrega das escórias nos locais onde serão utilizadas.

- a quantidade de escória produzida é significativa. No total dos nove países pesquisados, inclusive o Brasil, há uma produção anual de 71 milhões de toneladas de escória de alto-forno e de 47 milhões de toneladas de escória de aciaria (figura 2.5);

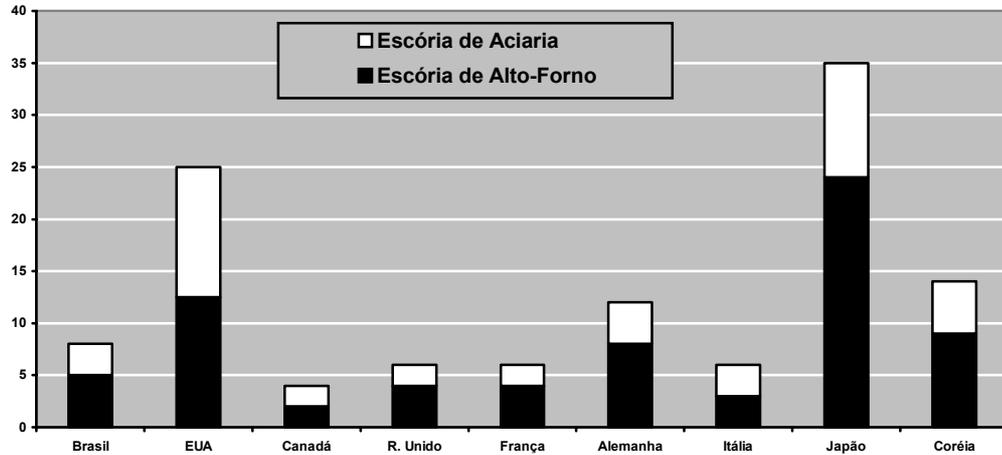


Figura 2.5 Produção de Aço Bruto (milhões de toneladas) – Base: 1998 (IBS, 1999)

- a escória ainda é uma “commodity” de pequeno valor agregado. Assim, os custos de transporte impactam significativamente o preço do material. Como resultado, sua utilização tem caráter regional e concorre com a oferta local de materiais naturais (brita, areia, calcário);
- a adoção de políticas governamentais de incentivo à reciclagem e utilização de resíduos adotada por alguns dos países pesquisados alavancou o consumo e a valorização das escórias siderúrgicas.

As escórias consistem basicamente de CaO, MgO, SiO₂ e Al₂O₃, óxidos de ferro e traços de outros elementos químicos.

A escória de alto-forno difere quimicamente da escória de aciaria principalmente no que diz respeito ao pequeno teor de ferro contido e no menor índice de basicidade, conforme mostram as tabelas 2.5 e 2.6.

Tabela 2.5 Composição Típica de escória de aciaria elétrica, (GEYER, 2001)

País	Geração (kg / t)	Ca O (%)	Mg O (%)	Si O ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	P ₂ O ₅ (%)	S (%)
Japão	127	40	4	25	5	19	7	-	0,06
Suécia	100	46	5	11	5	28	4	0,7	-
EUA	160	41	10	17	8	18	4	0,6	0,2
Alemanha	120	32	10	15	4	31	4	1,4	0,1
Brasil	150	33	10	18	6	30	5	-	-
Itália	120	41	8	14	7	20	6	0,9	0,1
Média	100-160	32-46	4-10	11-25	4-8	18-31	4-7	0,6-1,4	0,1-0,2

Tabela 2.6 Composição química típica das escórias de refino oxidante (FEA e LD), escórias de refino redutor (FP), escórias de alto-forno (AF), e do cimento Portland comum (CP) no Brasil (GEYER, 2001)

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

As características das escórias são afetadas pela sua composição química e pelo método de resfriamento empregado. Em função de grandes quantidades de sucatas utilizadas para se produzir o aço na aciaria elétrica, essas escórias apresentam maior quantidade de impureza (Cr, Ni, Cu, Sn e Mn) que as escórias geradas no conversor LD (IBS, 1999).

2.1.1.1 A GERAÇÃO DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA ELÉTRICA NA BMP SIDERÚRGICA S.A. - JUIZ DE FORA

A BMP Siderúrgica S.A. - Juiz de Fora, situada no município de Juiz de Fora, Minas Gerais, produz aço através da fusão e refino de sucatas metálicas em forno elétrico a arco. Mensalmente, são produzidas cerca de 75.000 toneladas de aço. A figura 2.6 mostra a geração dos resíduos na siderúrgica, sendo que das 15.100 toneladas geradas mensalmente, cerca de 10.000 toneladas (66,20 %) são escórias.

O processo de produção de aço em forno elétrico consiste na fusão de sucata de aço, gerada por um arco elétrico, formado entre o aço e os eletrodos de grafita ou carvão amorfo. Após a fusão da sucata, injeta-se oxigênio através de uma lança, a fim de promover as reações de oxidação do CaO, do SiO₂ e P₂O₅ (MACHADO, 2000).

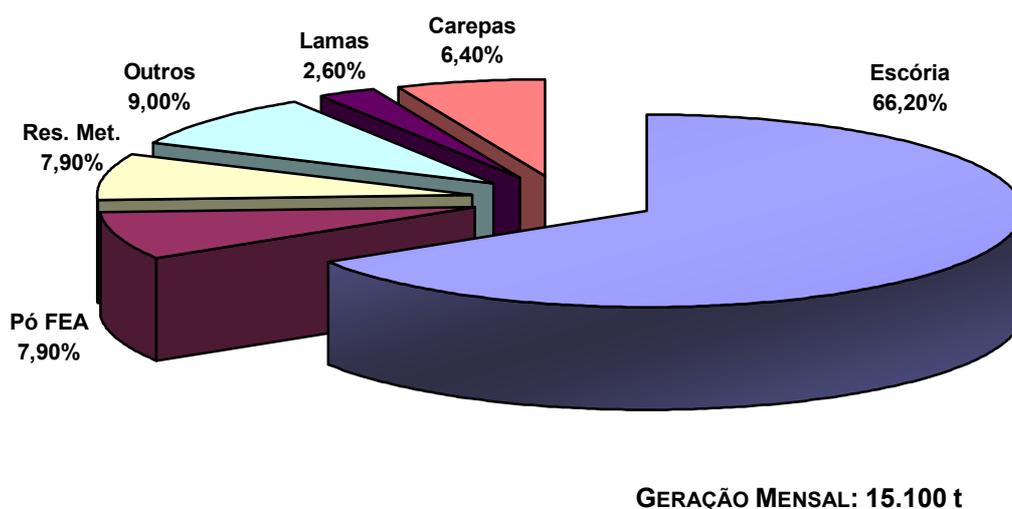


Figura 2.6 Geração de resíduos na siderúrgica BMP Siderúrgica S.A. - Juiz de Fora

A geração da escória de aciaria elétrica é inerente ao processo da produção do aço e se apresenta de duas formas: a escória de refino oxidante e a escória de refino redutor.

Quando se injeta oxigênio no aço fundido para gerar a oxidação das impurezas, tais como do carbono, fósforo, silício, manganês, etc, tem-se a geração da escória de refino oxidante. A escória oxidada incorpora também o CaO e MgO que são adicionadas no forno elétrico a arco. O aço produzido no forno elétrico a arco é transportado para o forno-panela sem a escória do refino oxidante. Nesta fase, ocorre a geração da escória de refino redutor.

Na siderúrgica BMP Siderúrgica S.A. - Juiz de Fora, a escória, tanto de refino oxidante quanto de refino redutor, é vazada em panela e descarregada em local onde se resfria lentamente, solidificando-se na forma cristalina. Após o resfriamento, uma pá-mecânica transporta a escória para uma planta de britagem, onde nesta etapa ocorre a diminuição da granulometria e a recuperação da fração metálica, comumente denominada de sucata de retorno ou sucata recuperada, sendo que esta retorna ao processo de produção do aço. A escória britada é estocada em pilhas onde aguarda sua retirada por caminhões basculantes. Geralmente o destino desta escória é a utilização como lastro de rodovias vicinais do município de Juiz de Fora e região ou como camada de regularização de pátios de empresas. Atualmente o passivo existente de escória estocada é de 40.000 m³. A figura 2.7 mostra a utilização da escória de aciaria elétrica da BMP Siderúrgica S.A. como encascalhamento de acostamento em uma rodovia próxima à cidade de Juiz de Fora – MG.



Figura 2.7 Utilização da escória de aciaria elétrica da BMP Siderúrgica S.A. próximo à cidade de Juiz de Fora – MG.

A figura 2.8 mostra o fluxograma de processo da aciaria e lingotamento da BMP Siderúrgica S.A. - Juiz de Fora – MG.

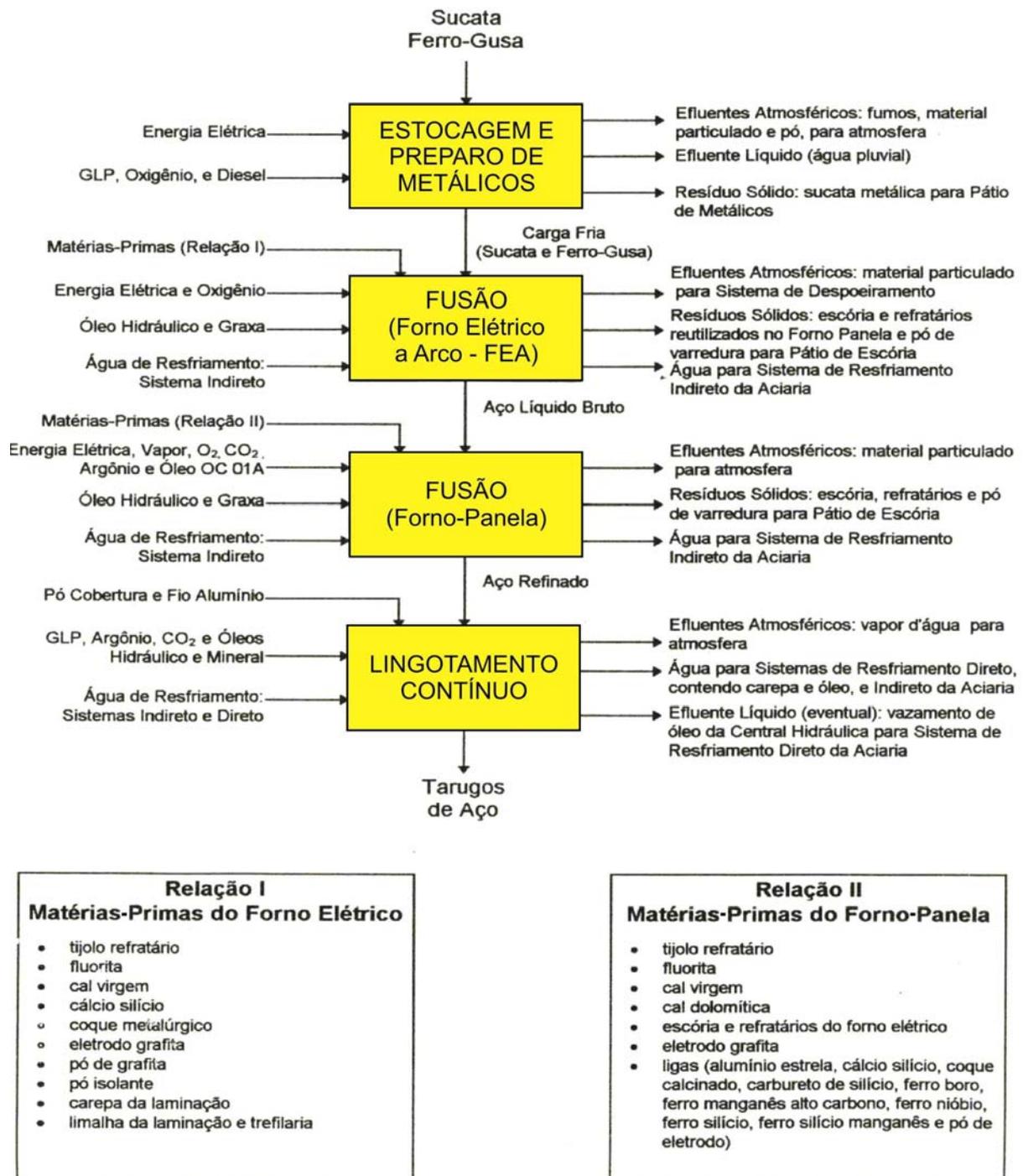


Figura 2.8 Fluxograma de processo da aciaria e lingotamento da BMP Siderúrgica S.A. - Juiz de Fora – MG.

2.2.2 OS TIPOS DE RESFRIAMENTOS DAS ESCÓRIAS

Quanto aos métodos de resfriamento, as escórias podem ser resfriadas por três maneiras distintas:

- resfriamento ao ar: a escória passa, lentamente, do estado líquido para o estado sólido sob condições do ambiente. Acelera-se o processo de resfriamento através de molhagem por pequenos jatos de água. Este processo de resfriamento é largamente utilizado para resfriar as escórias de aciaria (figura 2.9);



Figura 2.9 Resfriamento ao ar da escória de aciaria: pequenos jatos de água arrefecendo a escória

- resfriamento controlado com água: formado pelo vazamento rápido da escória líquida em poços com fundo umedecido, conseqüentemente decorrente da ação da água e do vapor gerado, a escória incorpora ar e expande, apresentando uma estrutura alveolar e de baixa massa específica. Este processo gera a chamada escória expandida, que depois de britada e separada em diferentes granulometrias, é utilizada como agregado leve em concretos. Estas escórias são geradas nos EUA, França e Canadá (IBS, 1999);

- resfriamento brusco com água: a escória líquida recebe jatos de grande quantidade de água sob alta pressão (10m³ de água / tonelada de escória). Com este processo evita-se a recristalização da fase vítrea e a precipitação de fases cristalinas, tais como a mervinita. A escória gerada é de pequena dimensão, sua estrutura é amorfa, conseqüentemente apresentando propriedade de hidraulicidade, ou seja, endurece quando do seu contato com água (IBS, 1999). No Brasil, as escórias geradas neste processo de resfriamento são denominadas escórias granuladas, como, por exemplo, a escória granulada de alto-forno (EGAF).

FEATHERSTONE (1998) apresenta um sistema de resfriamento das escórias através 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 2.7.

Tabela 2.7 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	Simples
Simplicidade de Operação	Complexo	Simples
Resistência do Produto	Média	Alta
Resistência do Cimento	Boa	Boa
Efluentes Gerados	Inexistente (somente ar quente)	Água, Vapor e Produtos Tóxicos

2.2.3 PROCESSOS DE BENEFICIAMENTO

As escórias de aciaria, LD ou elétrica, têm o seu resfriamento de forma lenta, como mostra a figura 2.9. Após o seu resfriamento, elas são transportadas para a planta de britagem, onde se inicia o processo de recuperação da fração metálica através do eletroímã, denominada de “sucata de retorno” ou “sucata recuperada”, que retorna ao processo de produção do aço. Posteriormente são descartadas em bota-foras, conforme a figura 2.10. Estas escórias possuem as seguintes características: dimensões variadas de grãos, alguns fragmentos ainda permanecem com a fração metálica incorporada, grande massa específica, estrutura cristalina, podendo apresentar expansibilidade.



Figura 2.10 Escória de aciaria elétrica: a) vazamento da escória; b) resfriamento lento; c) escória sólida; d) sistema de britagem e recuperação da fração metálica.

A Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST), no município de Serra, Espírito Santo, comercializa dois tipos de escória LD: a “ACERITA” e a escória de aciaria “In Natura” (LANA, 2003a).

LANA (2003b) cita que a “ACERITA” está sendo tratada, em caráter experimental, com vapor d’água gerado na operação da Companhia Siderúrgica de Tubarão. Este produto curado será comercializado com o nome de “ACERITA – PLUS”.

ROSSI (2003) mostra que a “ACERITA” é um material (escória de aciaria) que durante o seu período de estocagem em bota-fora, recebe jatos de água constantes durante o dia, com o objetivo de acelerar as reações químicas do óxido de cálcio existentes na escória. Através de gradeamento contínuo durante o dia, toda camada de escória fica em contato com água. Aos quarenta e um dias de tratamento, a “ACERITA” está pronta para ser comercializada. Durante o período de tratamento, são realizados ensaios de laboratório que garantem uma expansão residual abaixo de 3%, que atendem as exigências do DNER. Este ensaio é realizado segundo o método PTM 130 da Universidade da Pensilvânia (EUA), modificado pelo DER – MG. Também é exigido que a “ACERITA” quando ensaiada pelo método do DNER (ME 74 e ME 50 – 64) apresente expansão máxima de 0,5%. A “ACERITA” é comercializada para a utilização em obras de pavimentação e drenagem. A “ACERITA” é comercializada pela CST com certificado de controle de expansão.

ROSSI (2003) mostra que a escória de aciaria “In Natura” é aquela que foi estocada logo após a sua geração, podendo ter sido britada posteriormente, mas não foi submetida a nenhum tratamento para a redução da expansão, não sendo recomendada para a utilização em locais confinados. A escória de aciaria “In Natura” pode ser utilizada:

- em camadas de aterro que não possuam contenção lateral, isto é, possam permitir a expansão sem prejuízo da camada final do aterro;
- em aterros de regiões cujo nível da água é bastante elevado e não possuam qualquer confinamento;
- na execução de revestimento primário de ruas e avenidas onde o material aplicado ficará exposto sem confinamento;
- na execução de pátios para manobra de veículos, não sendo recomendada para áreas de estocagem de produtos acabados.

Conforme mostrado anteriormente, já é uma realidade em alguns locais do Brasil, a comercialização da escória de aciaria para uso em pavimentos e aterros. Porém, a escória de aciaria pode encontrar outras aplicações, conforme será visto a seguir.

2.2.4 AS OPORTUNIDADES DE UTILIZAÇÃO DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA

As oportunidades de utilização das escórias de aciaria são:

- em obras rodoviárias e lastros ferroviários;
- na produção de cimento;
- em concretos e argamassas como substituição ou adição ao cimento;
- como agregado;
- como fertilizante e corretivo do solo.

2.2.4.1 UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA EM OBRAS RODOVIÁRIAS E LASTRO FERROVIÁRIO

A reciclagem de escória é comum desde o início do século XX. Em 1903 na Inglaterra, E. Purnell Hooley utilizou escória de alto-forno como agregado em misturas asfálticas. As escórias de aciaria são utilizadas como agregado em bases e sub-bases de rodovias há mais de 90 anos e em misturas asfálticas desde 1937 (FEATHERSTONE, 1999).

Países como Brasil, Estados Unidos, Canadá, Reino Unido, França, Alemanha, Itália, Japão e Coreia do Sul já utilizaram escórias de aciaria em sub-bases, bases e pavimentação asfáltica como alternativa a agregados naturais como brita e areia de rio.

As vantagens da utilização das escórias de aciaria em substituição aos agregados naturais são: não requerem custos de britagem após a saída da siderúrgica, necessitando apenas de peneiramento com o intuito de adequar a granulometria, possuem alta resistência à abrasão e boa adesividade ao asfalto (ALBERNAZ et al. 2000).

Uma grande barreira que deve ser superada, para viabilizar o uso das escórias de aciaria em obras de engenharia, é o fenômeno de sua expansibilidade.

Um outro impedimento para o uso das escórias de aciaria é o alto custo do transporte, sendo que para se viabilizar economicamente a sua utilização, a distância média de transporte não deve ultrapassar 50 km (SOLOMON, 1994; SILVA et al. 2000).

ALBERNAZ et al. (2000) ressaltam que para o uso das escórias de aciaria em sub-bases e base de rodovias estas deverão estar envelhecidas, ou seja, curadas, evitando assim o fenômeno de expansão, que trará como manifestação patológica a sobrelevação e fissuração do revestimento asfáltico, vulgarmente conhecida como “vulcãozinho” (figura 2.11).



Figura 2.11 Manifestação patológica em pavimento asfáltico (“vulcãozinho”) causado pela expansibilidade do uso de escória de aciaria (Acesso Norte em Juiz de Fora – MG).

Para uso em rodovias, alguns países preconizam que para garantir a estabilidade dimensional da escória de aciaria, esta deve ficar exposta ao intemperismo pelo menos:

- Japão: diâmetro de até 20 mm – superior a 3 meses / diâmetro maior que 20 mm – superior a 6 meses. (DAIDO STEEL, 1993; JIS A 5015, 1992);
- Brasil: maior que 6 meses (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1994; BRASIL, 1998; PENNSYLVANIA TESTING METHOD, 1982);
- Espanha: 12 a 18 meses (RUBIO E CARRETERO, 1991).

Em nível mundial são relatadas inúmeras obras rodoviárias e ferroviárias que utilizaram escórias de aciaria, com sucesso, principalmente em regiões próximas às usinas onde foram geradas (NOUMAN et al. 1992; KRASS, 1978, HIRANO, 1984).

Também é relatado na literatura algum insucesso sobre o uso de escórias em obras rodoviárias:

- em 1991, o órgão canadense MTO (Ontario Ministry of Transportation) identificou que pavimentos que foram construídos com escória apresentavam deterioração precoce e necessitavam de manutenção, o que gerou como consequência a proibição do uso de escória de aciaria (HAJEK e BRADBURY, 1996).

No Brasil são registrados, com sucesso, algumas obras de engenharia rodoviária utilizando a escória de aciaria:

- Aeroporto da Usiminas – MG – Pátio de pouso e decolagem (2,0 km) (ALBERNAZ et al. 2000);
- Acesso a Ipaba – MG (5,0 km) (ALBERNAZ et al. 2000);
- Construção do Porto Seco em Juiz de Fora – MG (PACHECO e MARANGON, 1997).
- Construção do contorno rodoviário da cidade de Volta Redonda – RJ (FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE JUIZ DE FORA, 2002).
- Acesso ao Porto de Praia Mole – Vitória – ES (ROSSI, 2003).
- Aterro sobre solo mole, sub-base e capas asfálticas na BR 303 – Vitória – ES (SILVA, 2003).
- Experiências com agregado siderúrgico na cidade de Praia Grande – SP (FILHO, 2003).
- Pavimentos de alto desempenho estrutural executados com escória de aciaria – DER MG / USIMINAS (NASCIMENTO e ALBERNAZ, 2003).
- Avenidas internas da Companhia Siderúrgica de Tubarão – Vitória – ES (LANA, 2003c).
- Qualidade e economia no pavimento de ruas do município de Serra – ES (DADALTO, 2003).
- Pavimentação urbana em Mogi das Cruzes – SP, Volta Redonda – RJ e Três Rios – RJ (COSIPA, 2003).
- Revestimento do pátio de “containers” da COSIPA – SP (COSIPA, 2003).
- Pavimentação da terceira zona residencial de Praia Grande – SP (COSIPA, 2003).
- Regularização de solo e aplicação do pavimento econômico do condomínio Guaratuba – SP (COSIPA, 2003).
- Pavimentação de estradas vicinais e vias públicas DERSA / DNER – SP (aproximadamente 300 km) (COSIPA, 2002).
- Pavimentação da Via Dutra (trecho de Resende – RJ) (COSIPA, 2003).

Também são relatados, no Brasil, alguns insucessos devido à expansibilidade volumétrica da escória de aciaria elétrica ou LD:

- Acesso a São Domingos da Prata a BR 262 / MG, em Minas Gerais, o trecho apresentou problemas de expansão (GUMIERI, 2002). A escória utilizada foi a LD.
- Acesso Norte, na cidade de Juiz de Fora – MG, o trecho apresentou problemas de expansão no pavimento asfáltico (POLISSENI e PACHECO, 2002), conforme mostra a figura 2.12. A escória utilizada foi a de aciaria elétrica.

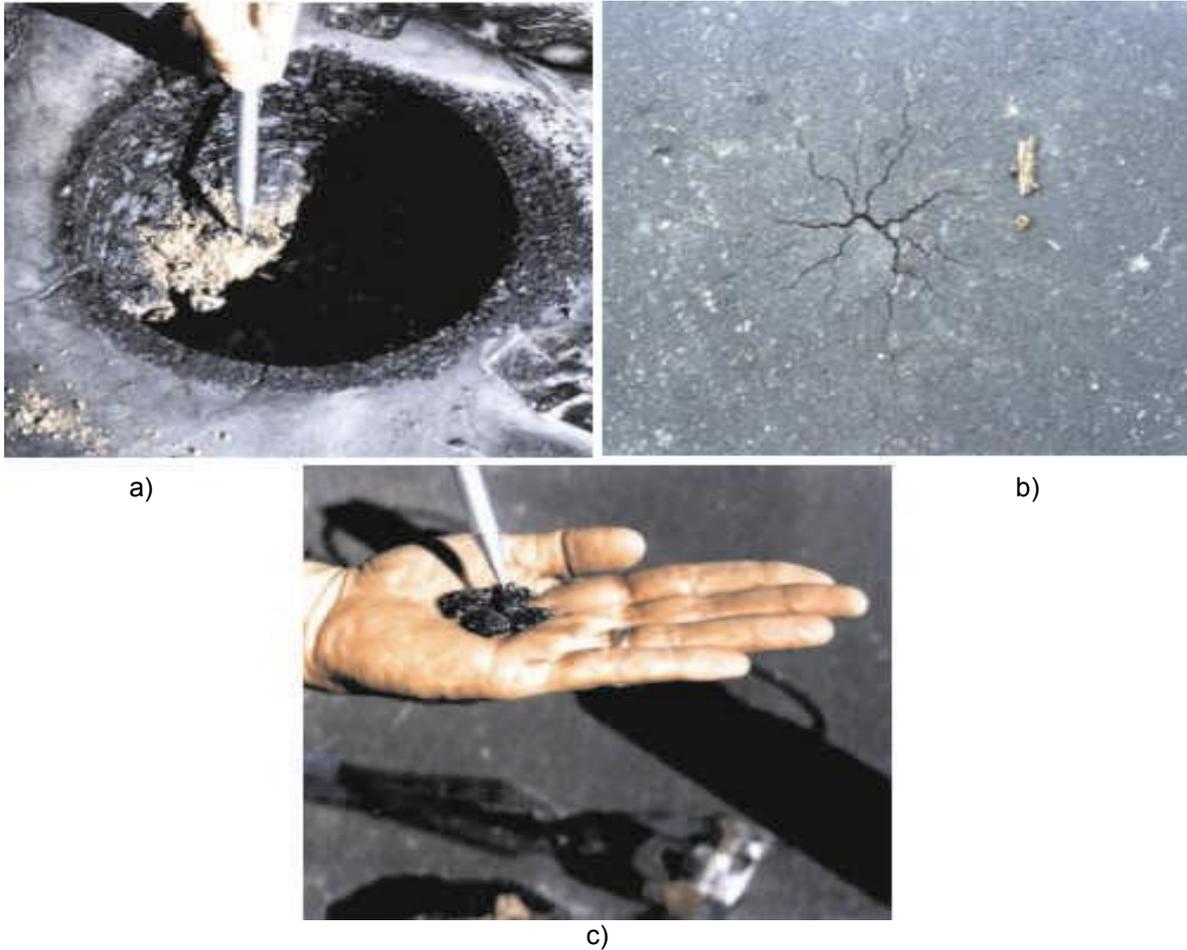


Figura 2.12 Acesso Norte (Juiz de Fora – MG): extração de corpo-de-prova do pavimento: a) detalhe da escória de aciaria elétrica utilizada na base; b) manifestação patológica conhecida como “vulcãozinho”; c) pontos esbranquiçados indicando a degradação da escória por expansão

GUPTA et al. (1995) e HURD (1996) chamam a atenção para o aparecimento da tufa, que é um depósito poroso de carbonato de cálcio nos drenos, causando entupimentos. Conseqüentemente, pela falta de drenagem, ocorrerão manifestações patológicas no pavimento tais como fissuras.

MURPHY et al. (1997) criticam a utilização da escória de aciaria como agregado em rodovias, por serem causadoras de fissuração do pavimento, lixiviação do cimento asfáltico de petróleo e possuírem baixa estabilidade volumétrica.

A figura 2.13 apresenta as manifestações patológicas descritas por GUPTA et al (1995) e HURD (1996) em rodovias brasileiras.



Figura 2.13 Rodovia no estado do Rio de Janeiro – RJ executada com a base em escória de aciaria LD: a) detalhe do depósito de carbonato de cálcio; b) fissura no revestimento asfáltico; c) extração de testemunhos do revestimento asfáltico e d) testemunho apresentando o detalhe da fração metálica da escória LD e a trinca do testemunho extraído do revestimento asfáltico

Para pavimento rodoviário a especificação DNER – EM – 262 (1994) – Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários - preconiza que a escória de aciaria deve atender aos seguintes requisitos:

- a) Absorção de água: 1 – 2% - NBR – 9937 / 1987;
- b) Massa específica: 3 – 3,5 g/cm³ - NBR – 9937 / 1987;
- c) Massa unitária: 1,5 – 1,7 g/cm³ - NBR – 7251 / 1982;
- d) Desgaste por abrasão Los Angeles: máximo 25% - NBR – 6465 / 1984;
- e) Durabilidade ao sulfato de sódio: 0 – 5% - ASTM – C – 88 / 1983;
- f) Avaliação potencial de expansão: máximo 3% - Método PTM – 130 (Pennsylvania Testing Method) (1992);
- g) Teor de impurezas: isento de impurezas orgânicas, de contaminação com escória de alto-forno, solos e outros materiais;
- h) Granulometria de acordo com a especificação da Tabela 2.8

Para se adaptar às exigências do Mercosul, algumas dessas normas sofreram modificações¹.

Tabela 2.8 Composição granulométrica da escória de aciaria para uso em pavimento rodoviário (SILVA et al. 2000)

Peneira (mm)	% Passante	% Retida
50,8	100	0
12,7	40	60
< 12,7	40	100

Para lastros ferroviários, a especificação ABNT – EB – 655 (1991) preconiza que a escória de aciaria deve atender aos seguintes requisitos:

- a) Absorção de água: máximo 1% - NBR – 9937 / 1987;
- b) Massa específica: máximo 2,4 g/cm³ - NBR – 9937 / 1987;
- c) Porosidade aparente: máximo 1% - NBR 7418 / 1987
- d) Desgaste por abrasão Los Angeles: máximo 40% - NBR – 6465 / 1984;
- e) Resistência ao choque: Índice de tenacidade Treton: máximo 20% - NBR 8938 / 1985;
- f) Formato de partícula: cúbica MB – 894 / 1989;
- g) Resistência à compressão simples axial: mínimo 80 MPa – MB – 892 / 1989
- h) Partículas lamelares: máximo 10% MB – 894 / 1989;

¹ Para atender as exigências do Mercosul, muitas das normas NBR se transformaram em NM ou NBRNM.

- i) Material pulverulento: máximo 1% NBR 7219 / 1987
- j) Torrões de argila: máximo de 0,5% NBR 7218 / 1987;
- k) Fragmentos macios e friáveis: máximo 5% - NBR 8697 / 1984;
- l) Granulometria de acordo com a especificação da Tabela 2.9.

Tabela 2.9 Composição granulométrica da escória de aciaria para uso como lastro ferroviário (SILVA, et al. 2000)

Peneira (mm)	% Passante	% Retida
76,2	0 – 0	100
63,5	0 – 10	90 – 100
38,0	40 – 75	25 – 60
19,0	90 – 100	0 – 10
12,7	95 – 100	0 – 5

Um aspecto importante a ser considerado quando do uso de escória de aciaria como lastro de via férrea é a resistividade elétrica do material a qual pode interferir no sistema de sinalização da via férrea. A norma ABNT – EB – 655 (1991) não aborda esta questão, porém a American Railway Engineering Association (AREA) estabelece um método de ensaio para avaliar a resistividade elétrica da escória e estabelece que o valor mínimo seja de 300 Ω m. (SILVA et al. 2000).

TONELLI e TONELLI (2002) realizaram estudos em escórias de aciaria LD oriunda da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), em relação à resistividade elétrica, com finalidade de utilização em lastro de ferrovia da MRS LOGÍSTICA. Os valores encontrados no ensaio de resistividade elétrica estavam em conformidade com o critério preconizado pela American Railway Engineering Association (AREA), oportunizando sua utilização como lastro de ferrovia.

A sub-base, a base e o revestimento asfáltico do contorno rodoviário da cidade de Volta Redonda – RJ foram executadas com escória de aciaria LD da Companhia Siderúrgica Nacional (figura 2.14). A obra possui 13 km de extensão, consumiu cerca de 90.000 t de escória e a distância média de transporte foi de 20 km (FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE JUIZ DE FORA, 2002).



Figura 2.14 Construção do contorno da cidade de Volta Redonda – RJ: a) e b) sistema de peneiramento da escória da aciaria LD; c) escória de aciaria LD lançada como base

Uma prática bastante usual adotada por prefeituras situadas próximas às usinas siderúrgicas é a de encascalhamento de acessos ou estradas vicinais com a utilização da escória de aciaria (figura 2.15). Porém esta prática tem despertado a atenção de órgãos ambientais para tal procedimento. Estes órgãos alertam que principalmente os particulados podem causar problemas de saúde às pessoas que moram próximas a estes acessos e estradas. Em 20/09/2002, a COSIPA realizou na cidade de São Paulo, na Assembléia Legislativa, no Auditório Franco Montoro, um seminário que expunha à CETESB, vereadores e representantes da sociedade e de prefeitos da Baixada Santista, os benefícios do uso do “AGREGADO SIDERÚRGICO” comercializado por ela para as prefeituras locais. No seminário a COSIPA, através de seus especialistas e consultores contratados, expuseram trabalhos de análise e concluíram que não existem problemas com o uso do “AGREGADO SIDERÚRGICO” quando de sua utilização em acessos ou estradas.

JUNIOR et al. (1992), em relatório técnico, especificaram que para a escória de aciaria ser utilizada como “encascalhamento” de estradas, sem nenhum revestimento, tal como o revestimento asfáltico, é importante que o local que receberá a escória seja predominantemente siltoso e que o “encascalhamento” seja seguido de molhagem e compactação.



a)



b)

Figura 2.15 Utilização de escória de aciaria elétrica na região de Juiz de Fora - MG: a) encascalhamento de estradas vicinais; b) encascalhamento de pátios de empresas

2.2.4.2 UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIAS NA PRODUÇÃO DE CIMENTO

MASUERO (2001), citando Taylor, diz que a utilização de escórias em cimento dependerá de sua reatividade, que é função da finura, da área específica, do teor da fase vítrea e da sua composição química.

A composição química da escória de aciaria é semelhante à encontrada no cimento Portland (silício, alumínio, ferro, cálcio, entre outros), porém a quantidade dos óxidos formados por esses elementos químicos difere substancialmente.

Na escória de aciaria o óxido de ferro encontra-se o nas formas bivalente (Fe^{2+}), trivalente (Fe^{3+}) e principalmente em seu estado elementar (Fe^0). A fase ferrosa Wüstita (FeO) encontrada na escória de aciaria e não encontrada no cimento Portland, quando reage com o cálcio, inibe a formação do silicato tricálcio, que é responsável pela atividade hidráulica do cimento Portland (MONTGOMERY e WANG, 1991; MURPHY et al. 1997; TAYLOR, 1997; SHI e QIAN, 2000).

Desta forma, a utilização da escória de aciaria na composição da farinha que originará o cimento Portland, quando parte do calcário é substituído por escória, tem sido objeto de estudo, visando principalmente a diminuição de gastos energéticos. Para se produzir uma tonelada de cimento, consome-se 4 GJ de energia e descarta-se para a atmosfera uma tonelada de CO_2 (MURPHY et al. 1997).

O programa STAR ("System and Technology for Advanced Recycling"), desenvolvido pela empresa americana Chaparral Steel, responsável pela produção anual de 2 milhões de toneladas de aço, tem por objetivo reciclar 100% da escória gerada em aciaria elétrica em parceria com indústrias cimenteiras do grupo a que ela pertence. São substituídos de 10% a 15% do calcário que entra na fabricação do cimento por escória, embasada na idéia de que a escória é um material que já tem estrutura pozolânica criada pelo imenso calor produzido no forno elétrico (ROSTIK, 1999).

Na China, a combinação de escória de aciaria, escória de alto-forno e cimento Portland já é comercializada em um tipo de cimento há mais de 20 anos e tem como principal atrativo o baixo custo energético (para cada tonelada deste cimento produzido são consumidos a menos 10kwh de energia e 25 kg de carvão), quando comparado com a produção convencional do cimento Portland. As propriedades deste cimento são: baixo calor de hidratação, ganho de resistência lento ao longo do tempo e alta resistência à abrasão (SUN et al. 1993; SHI e QIAN, 2000).

Trabalho de DONGXUE et al. (1997) mostrou que argamassas produzidas com cimento (clínquer + escória de alto-forno + escória de aciaria LD) com finura de 25µm, comparadas com argamassas produzidas com cimento Portland sem adição, apresentaram soluções para os problemas de baixa resistência nas primeiras idades, bem como, para o tempo de pega. As propriedades de durabilidade das argamassas (resistência a sulfato, carbonatação e reação álcalis-agregado) produzidas com o cimento que continha escória tiveram desempenho superior, quando comparadas com as de referência.

MONTGOMERY e WANG (1991) utilizaram a combinação da escória LD com a escória de alto-forno e clínquer, para a fabricação de cimento, que foram estudados como pasta. A TABELA 2.6 apresenta as misturas estudadas, sendo que as misturas 1 e 3 continham escórias que não sofreram cura e as misturas 2 e 4 continham escórias que passaram por um período de cura de um ano ao ar livre. O tempo de pega das pastas que não continham clínquer (misturas 1 e 2) foram bastante retardados, pois as desfôrmas dos corpos-de-prova só puderam ser realizadas após os três dias de idade. A tabela 2.10. mostra a proporção das misturas e as respectivas resistências à compressão alcançadas aos 28 e 91 dias de idade.

TABELA 2.10 Misturas de materiais e resistências à compressão (MPa) aos 28 e 91 dias de idade (MONTGOMERY e WANG, 1991)

MISTURA	Água (% dos materiais sólidos).	Proporção dos materiais (% em massa)				(Resistência à compressão MPa)	
		Escória LD	Escória de Alto- Forno	Clínquer	Gesso	28 Dias	91 Dias
1	21,0	45	45	0	10	22,5	31,2
2	21,4	45	45	0	10	31,0	36,4
3	22,0	40,5	40,5	10	9	34,5	35,7
4	22,0	40,5	40,5	10	9	26,5	38,7

Também é citado por DONGXUE et al. (1997) que a finura da escória influencia a sua atividade hidráulica, sendo que com a redução do diâmetro das partículas (25µm), elas se tornam mais ativas e melhoram as propriedades mecânicas das argamassas que foram estudadas.

SMOLCZYK (1980) cita que partículas de escórias, mesmo no estado cristalino, mas com alta finura, propiciam melhoria nas resistências de concretos e argamassas.

HUANG et al. (2003) desenvolveram um método de moagem com o objetivo de se obter partículas de cimento mais finas e torná-las aptas a serem utilizadas em injeções em fissuras menores que 0,2 mm. Os diâmetros das partículas após a moagem ficaram abaixo de 40 μm , sendo que o diâmetro médio encontrado foi de 10 μm . Os autores citam que foram injetadas natas de cimento Portland, com o objetivo de consolidar maciços rochosos que apresentavam fissuras, na construção da Barragem de Três Gargantas na China.

LEE et al. (2003) concluíram que ao diminuir o tamanho das partículas de cinza volante e combiná-las com cimento Portland produziram pastas de grande fluidez. A área específica de cinza volante utilizada na pesquisa foi de 729 m^2/kg e diâmetro médio das partículas de 3,74 μm .

No Brasil, já é comercializado, por uma indústria cimenteira, um microcimento constituído de clínquer Portland e escória granulada de alto-forno (EGAF), cujo diâmetro médio das partículas é inferior a 8 μm , sendo recomendada sua utilização em recuperação de estruturas com falhas de concretagem, injeções em microestacas, injeções em maciços rochosos fissurados, dentre outros (CAPURUÇO, et al. 2004).

GUMIERI (2002) granulou na usina e estudou uma escória de aciaria LD, gerada em uma siderúrgica no estado de Minas Gerais. A escória granulada apresentou estrutura cristalina com pequenos halos de amorfismo nas regiões dos silicatos dicálcicos e tricálcicos. Quando da avaliação da resistência à compressão axial em corpos-de-prova de argamassa, produzida com cimento composto com escória, a pesquisadora obteve:

- argamassas com teor de 6% de substituição de clínquer por escória:
mesmo nível de resistência das argamassas de referência para as idades de 28 e 91 dias, respectivamente.
- argamassas com teor de 20% de substituição de clínquer por escória:
redução de 15,8% e 14,7% para as idades de 28 e 91 dias, respectivamente.
- argamassas com teor de 34% de substituição de clínquer por escória:
redução de 19,0% e 17,4% para as idades de 28 e 91 dias, respectivamente.

Apesar da redução das resistências mecânicas das argamassas confeccionadas com substituição do clínquer por escória LD granulada, os resultados mostraram que as argamassas

atingiram as resistências mínimas exigidas para o cimento Portland composto (NBR 11578, 1991), concluindo ser uma alternativa viável para uso deste tipo de escória na indústria cimenteira.

2.2.4.3 UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIAS EM CONCRETOS E ARGAMASSAS COMO SUBSTITUIÇÃO OU ADIÇÃO AO CIMENTO

Uma maneira de se reduzir custo em argamassas e concretos é promover a substituição do cimento Portland por materiais que tenham propriedades cimentícias ou pozolânicas (SHI e QUIAN, 2000).

GEYER (2001) cita que em 1865 produziu-se o primeiro aglomerante hidráulico a base de escória ativada por cal, porém o aproveitamento em misturas com o cimento Portland só se deu em 1882. Nos Estados Unidos, em 1886, devido à escassez de cimento na época, produziu-se cimento Portland combinado com escória e foi denominado de cimento ferro-Portland.

Na Alemanha, em 1909, foi editada a primeira norma sobre cimento Portland com adição de escória de alto-forno. Inicialmente era permitida a adição de até 30%, sendo que em 1917 já era permitida, por norma, a adição de até 85%. Em 1952, a normalização na Bélgica, Inglaterra, França, Alemanha e Estados Unidos permitiam a adição de 65% de escória de alto-forno ao cimento Portland. No Brasil a fabricação do cimento Portland com escória de alto-forno data de 1952 (JOHN, 1995).

LI e DING. (2003) concluíram que a mistura composta de adição de 10% de metacaulim e de 20% a 30% de escória de alto-forno ultrafinas, em combinação com o cimento Portland no traço 1 : 2,5 (mistura : areia), melhoraram sensivelmente as propriedades da argamassa em relação à referência constituída somente de cimento Portland e areia no mesmo traço. Os ganhos significativos de desempenho foram: menor retração autógena, controle da reação álcali-agregado, redução da permeabilidade e melhoria da resistência mecânica aos 28 dias de idade.

LIMA (1999) avaliou o desempenho de resistência de pastas produzidas com escória de aciaria elétrica. Uma pasta contendo 50% em volume de escória, em substituição ao cimento Portland, foi comparada com uma pasta referência constituída somente de cimento Portland. Os resultados de resistência à compressão para as idades de 7 dias, 28 dias e 91 dias foram inferiores em 46%, 53% e 89%, respectivamente, quando comparados com os da pasta de referência.

LI e DING (2003) pesquisaram a influência da substituição de cimento Portland por metacaulim (10%) e escória ultrafina (20% a 30%), resultando em misturas com melhor trabalhabilidade,

resistência mecânica e durabilidade em relação à mistura referência constituída de cimento Portland. Os diâmetros médios dos grãos dos materiais utilizados na pesquisa foram: cimento Portland (19,63 μ m), metacaulim (20,96 μ m) e escória ultrafina (5,70 μ m).

GEYER (2001) mostrou que adições de até 10% de escória de aciaria elétrica a cimento Portland, quando da produção de concretos, causam melhorias nas propriedades do concreto produzido (resistência à compressão, carbonatação e ataque de cloretos), independente do tempo de estocagem da escória.

MASUERO (2001) granulou uma escória de aciaria elétrica gerada em uma siderúrgica do Rio Grande do Sul, a qual denominou ACIGRAN, e comparou-a com a escória de alto-forno quando adicionada em argamassas. Na pesquisa, o tempo de moagem para as duas escórias foi o mesmo, porém, os diâmetros médios dos grãos foram diferentes. Constatou que para a idade de 28 dias ocorreu um acréscimo de 26% na resistência à compressão para a argamassa produzida com ACIGRAN. Em relação à durabilidade, foi constatado que a argamassa produzida com ACIGRAN apresentou desempenho superior à argamassa de referência, quando submetido à avaliação em relação à resistência a sulfato, absorção por imersão e ataque de íons cloretos.

2.2.4.4 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 (1984) cita o emprego de escória 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. 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 o do concreto referência.

AMARAL e VÁZQUEZ (2002) utilizaram escórias de aciaria de forno elétrico, provenientes de uma siderúrgica, 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.

GEYER et al. (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 cimento e 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 do Rodoviário 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 de 11 MPa. A figura 2.16 ilustra a produção do concreto produzido com escória e a sarjeta em execução (FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE JUIZ DE FORA, 2002).



Figura 2.16 Utilização de escória de aciaria LD gerada na Companhia Siderúrgica Nacional, quando das obras do Contorno Rodoviário da cidade de Volta Redonda – RJ: a) produção do concreto; b) estoque de escória; c) execução de sarjeta e d) sarjeta finalizada

MOURA (2000), ao pesquisar a utilização da escória de cobre como agregado miúdo para concreto, concluiu que é possível substituir em até 40% em volume o agregado miúdo de origem natural pela escória de cobre, o que proporcionou a melhoria das propriedades mecânicas (resistência à compressão, resistência à tração, tração por compressão diametral e tração na flexão) do concreto em relação ao concreto referência.

2.2.4.5 UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIAS NA PRODUÇÃO DE FERTILIZANTES

Quando as escórias de aciaria são moídas com diâmetros inferiores a 150 μm , elas estão aptas a serem utilizadas na agricultura como corretivo de solo, devido principalmente à presença de óxidos

de cálcio e como fertilizantes devido à presença de óxidos de fósforo e magnésio (FEATHERSTONE 1998; BLUNCK, 1998).

GOMES et al. (1988) estudaram o comportamento de solos espanhóis oriundos das províncias de Leon e Valencia e que apresentavam as seguintes características em comum: pH ácido e deficiências em cálcio e magnésio. O trabalho concluiu que para melhorar a produtividade na área plantada, os solos com pH entre 4 e 5, caso fosse plantado cereais, deveriam ser corrigidos com o lançamento de 1600 a 3200 kg de escória moída por hectare e que para cultivo de alfafa a utilização de escória moída, a ser lançada no terreno, deveria ser de 3000 kg a 4000 kg por hectare plantado. A escória utilizada na pesquisa foi a gerada pelo processo LD.

CRISTIN (2002) mostra que a composição da grande maioria dos solos brasileiros é ácida, necessitando de sofrer correção. O trabalho aponta como a utilização de escórias de aciaria (LD) podem contribuir para a solução deste problema. O trabalho conclui que a utilização de escórias com granulometria inferior a 1 mm é eficaz para corrigir a acidez do solo e neutralizar o alumínio livre presente no solo e que durante os estudos não ocorreram contaminações do solo ou das plantas. Desta forma, o estudo preconiza a utilização de escória de aciaria (LD) na agricultura do Brasil.

AGRIZZI (2003) mostrou no 9º Encontro Regional do Instituto “Latinoamericano Del Fiero y el Acero”, que a Companhia Siderúrgica de Tubarão já comercializa a utilização da escória de aciaria como corretivo de solos ácidos.

3. AS ADIÇÕES MINERAIS EM CIMENTOS OU EM CONCRETOS

Os principais materiais que constituem as adições ao cimento são: escória, pozolana e filer (tabela 3.1).

TABELA 3.1 – Adições ao cimento Portland no Brasil em função da respectiva norma (REVISTA IBRACON, 1992)

Tipo de cimento Portland	Sigla	Clínquer + Gesso (%)	Adições			Norma da ABNT
			E (escória - %)	Z (pozolana - %)	F (filer - %)	
Comum	CPI	100	0	0	0	NBR 5732
	CPI – S	95-99	0	0	1-5	
Composto	CP II – E	56-94	6-34	0	0-10	NBR 11578
	CP II – Z	76-94	0	6-14	0-10	
	CP II – F	90-94	0	0	0-10	
Alto-forno	CP III	25-65	35-70	0	0-5	NBR 5735
Pozolânico	CP IV	45-85	0	15-50	0-5	NBR 5736
Alta resistência inicial	CPV - ARI	95-100	0	0	0-5	NBR 5733

Normalmente, estas adições são resíduos oriundos de outras indústrias, que seriam descartados de forma linear em aterros, ou utilizados como agregado em obras rodoviárias ou ferroviárias, e que encontram na indústria cimenteira uma aplicação com maior valor agregado, pois trazem incorporados três importantes benefícios, ou seja, benefícios nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido, benefícios de ordem econômica e benefícios de ordem ambiental (MEHTA e MALHOTRA, 1996).

Geralmente, ao serem incorporadas partículas finas aos concretos, ocorrerá a melhoria da trabalhabilidade, que trará aumento da quantidade de água de amassamento, conseqüentemente diminuição da resistência, aumento da permeabilidade e diminuição da durabilidade ao ataque químico. Para reverter essa situação, é necessária a utilização de aditivos plastificantes.

Nos concretos, a substituição do cimento Portland por um resíduo tem impacto diretamente em seu custo, diminuindo-o.

Quanto menos clínquer for produzido, menor será a descarga de CO₂ para a atmosfera e quanto maior o consumo de resíduo pela indústria cimenteira, menor será o nível de poluição, o que acarretará ganho de ordem ambiental.

FURNAS et al. (1997) definem que todo material composto de cimento e material pozolânico ou com características pozolânicas, mesmo que com baixo índice de atividade pozolânica, é denominado de material cimentício.

3.1 A REATIVIDADE POZOLÂNICA

Uma pozolana é definida como um material silicoso ou sílico-aluminoso que em si mesmo possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas numa forma finamente dividida e na presença de umidade reage quimicamente com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades cimentantes (MEHTA e MONTEIRO, 1994; NBR 12653, 1992).

As pozolanas modificam o equilíbrio químico no interior do cimento (COUTINHO, 1973), promovendo:

- a fixação do hidróxido de cálcio combinando-se com ele, dando origem a substâncias químicas menos ricas em cálcio do que as provenientes da hidratação do cimento Portland, porém, com propriedades aglomerantes tão boas como as do cimento Portland;
- diminuição da alcalinidade, gerando como consequência a extinção de possíveis reações de expansão;
- diminuição do calor de hidratação e conseqüentemente redução de fissuras de origem térmica;
- ganho de resistência mecânica e química, quando comparada com concretos produzidos somente com cimento Portland.

Portanto, a reação entre a pozolana e o hidróxido de cálcio é chamada de reação pozolânica que tem três características fundamentais: é lenta, consome hidróxido de cálcio e os produtos químicos oriundos da reação são eficientes para preencher os espaços capilares, promovendo ganho de resistência mecânica e química (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

As pozolanas podem ser de origem (COUTINHO, 1973; MEHTA e MONTEIRO, 1994):

- naturais: rochas vulcânicas alteradas por meteorização;
- artificiais: argilas de qualquer tipo depois de serem submetidas a temperaturas suficientes para promover a sua desidratação, mas em temperaturas inferiores ao início de fusão;
- resíduos industriais: os resíduos industriais podem ou não requerer processamentos como secagem e moagem para serem utilizados.

Os principais materiais que desenvolvem atividades pozolânicas são: a cinza volante, a sílica ativa, a cinza de casca de arroz e o metacaulim.

MEHTA e MONTEIRO (1994) mostram como se processam as reações químicas em um cimento Portland e um cimento Portland pozolânico (figura 3.1):



FIGURA 3.1 Velocidade das reações químicas em cimento Portland e cimento Portland pozolânico (MEHTA e MONTEIRO, 1994)

A norma NBR 12653 – Materiais Pozolânicos (ABNT, 1992) classifica as pozolanas quanto à origem em:

- naturais: materiais de origem vulcânica, geralmente de caráter petrográfico ácido ($\geq 65\%$ de SiO_2) ou de origem sedimentar com atividade pozolânica.
- artificiais: materiais provenientes de tratamento térmico ou sub-produtos industriais com atividade pozolânica, tais como as argilas calcinadas e as cinzas volantes.
 - argilas calcinadas: são materiais provenientes de calcinação de certas argilas submetidas à temperatura, em geral entre $500^\circ C$ e $900^\circ C$, de modo a garantir sua reatividade com o hidróxido de cálcio;
 - cinzas volantes: resíduos finamente divididos que resultam da combustão de carvão mineral pulverizado ou granulado com atividade pozolânica.
- outros materiais: materiais não tradicionais, tais como: escórias siderúrgicas ácidas, cinzas de resíduos vegetais, rejeito de carvão mineral.

De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 1992), as pozolanas são classificadas em três classes: N, C e E, como mostra a tabela 3.2.

TABELA 3.2 Materiais pozolânicos: exigências químicas e físicas de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 1992)

EXIGÊNCIAS / MATERIAL POZOLÂNICO							
Químicas	Classes			Físicas	Classes		
	N	C	E		N	C	E
SiO₂+Al₂O₃+FeO (% min)	70	70	50	Material retido na peneira 45µm (% max)	34	34	34
SO₃ (% max)	4,0	5,0	5,0				
Teor de umidade (% max)	3,0	3,0	3,0	Índice de atividade pozolânica: a) cimento aos 28 dias (% min). b) cal aos 7 dias, em MPa.	75	75	75
Perda ao fogo (% max)	10,0	6,0	6,0				
Álcalis disponíveis em Na₂O (% max)	1,5	1,5	1,5	Água requerida (% max)	115	110	110
CLASSE	N	Pozolanas Naturais que obedecem aos requisitos aplicados nesta norma, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, terras diatomáceas e argilas calcinadas.					
	C	Cinza volante produzida pela queima de carvão mineral em usinas termo-elétricas que obedecem aos requisitos desta norma.					
	E	Qualquer pozolana cujos requisitos diferem das classes anteriores, conforme estabelecido nesta norma.					

NIU et al. (2002) estudaram os efeitos de escória de alto-forno superfina nas propriedades do cimento. A escória foi moída com diâmetro médio inferior a $10\mu\text{m}$, e foi utilizada na produção de concretos (figura 3.2). A pesquisa concluiu que:

- a adição de escória pulverizada melhora o efeito de empacotamento que é responsável pela diminuição da permeabilidade e conseqüentemente aumento da durabilidade. Foram estudadas escórias com superfícies específicas de 300 a $800\text{ m}^2/\text{kg}$;
- a escória pulverizada tem a capacidade de reduzir a alcalinidade e aumentar a quantidade de C – S – H por absorção do CH do cimento hidratado:



- com a diminuição do diâmetro das partículas, torna-se maior o seu grau de hidratação, bem como a indução da reatividade, sendo que para partículas com diâmetros inferiores a $1\mu\text{m}$, estas propriedades são bastante significativas.

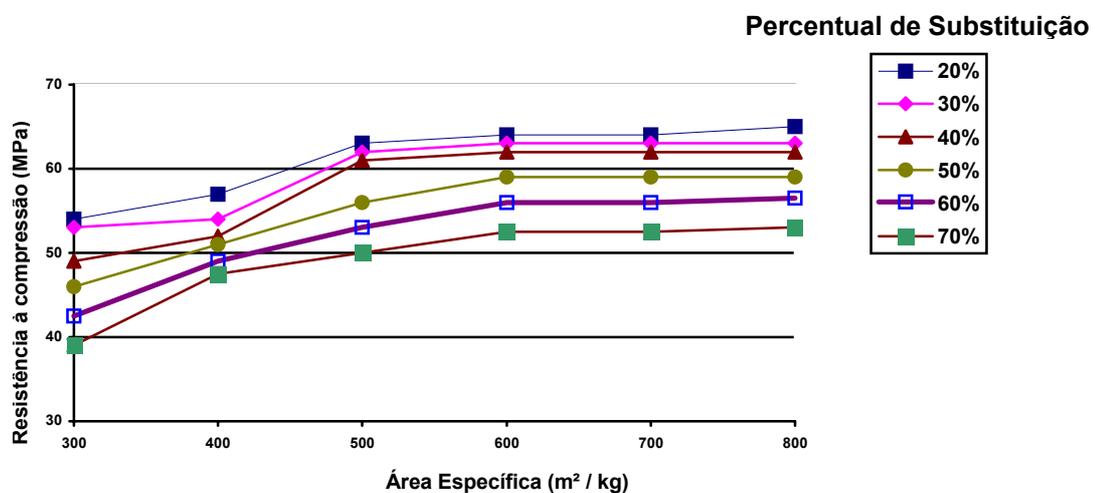


Figura 3.2 – Influência da área específica de grãos de escória de alto-forno em relação à resistência à compressão em concretos (NIU et al. 2002).

Desta forma, nota-se que as adições que têm características de desenvolver reações químicas pozolânicas, exercem papel fundamental nas propriedades de concretos e argamassas, uma vez que contribuem para a melhoria das propriedades de resistência mecânica e de durabilidade.

3.2 A AÇÃO FÍLER

Os fílers são materiais pulverulentos, de origem natural ou artificial, que passam na peneira de 75 μ m, sendo que suas partículas estão compreendidas entre 5 μ m e 75 μ m. Quando empregados como adições ao cimento Portland melhoram suas propriedades, tais como trabalhabilidade ou a retenção de água. Podem ser inertes ou possuírem baixa característica de hidraulicidade (PETRUCCI, 1978; CANOVAS, 1996).

FURNAS et al. (1997) citam que o uso de agregado pulverizado, na finura do cimento, mesmo que com baixo índice de pozolanicidade, tem sido uma alternativa para suprir a falta de material cimentício convencional. Esta tecnologia foi apresentada pelo engenheiro soviético, Albert Osipov, e aplicada na produção do concreto compactado com rolo na Barragem de Capanda, em Angola, na África.

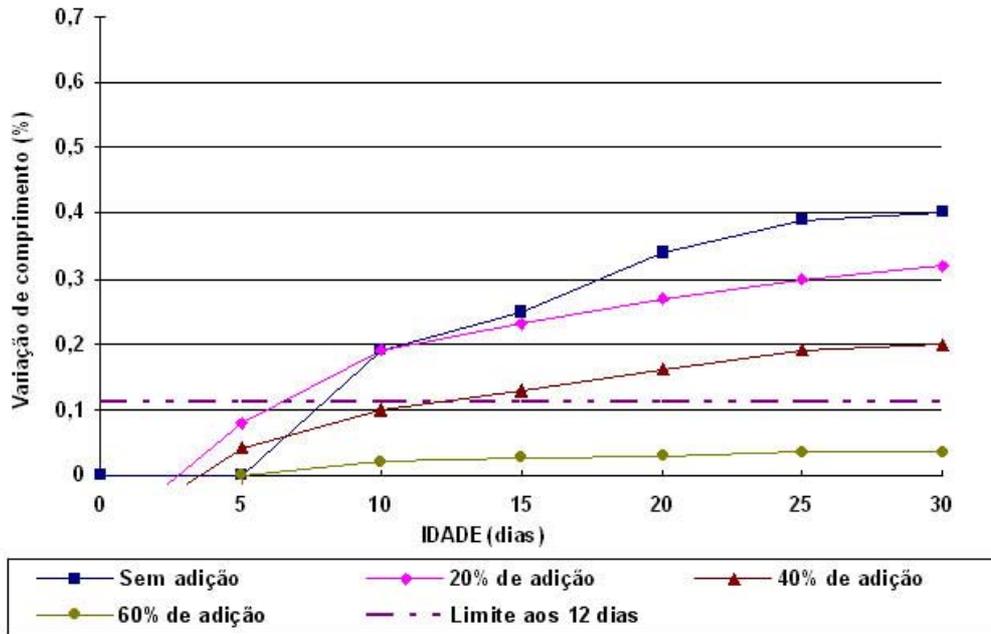
Osipov, apud FURNAS et al. (1997), fundamenta-se na hipótese de que os finos das areias britadas se tornariam aglomerantes, em função da energia eletrostática liberada pela quebra das moléculas na britagem.

PAVLENKO (1992) pulverizou escória com superfície específica de 4000 a 4500 cm²/kg, eliminando a ação expansiva da escória.

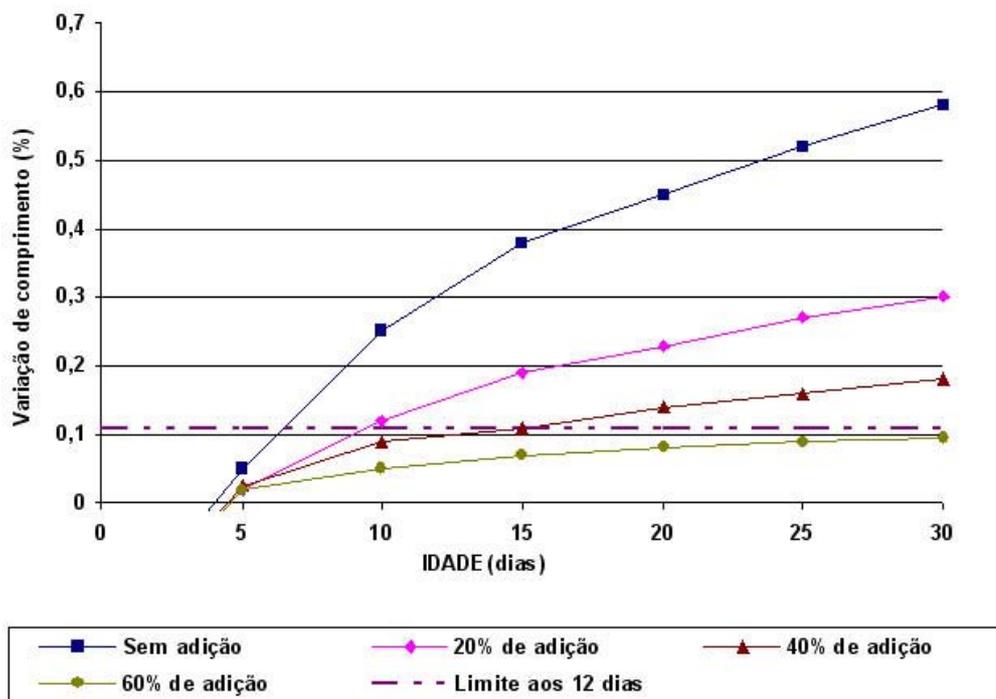
No Brasil, FURNAS et al. (1997), utilizando o método das barras (ASTM C 1260), mostraram que o cascalho de Itaparica e o siltito (UHE de Formoso), por terem apresentado elevada expansibilidade, não poderiam ser utilizados em obras de construção de barragens. Porém, ao serem pulverizados e utilizados como substituição parcial ao cimento, tornaram-se eficazes, pois eliminaram o fenômeno de expansão.

A figura 3.3 apresenta os resultados da redução da expansão do agregado quando pulverizado e respectivos percentuais de adições.

ANDRIOLO e SCANDIUZZI (1986) citam que em concretos compactados com rolo e massa, quando utilizam agregados pulverizados que possuem diâmetro médio das partículas próximas a 25 μ m e forma de grãos equidimensionais, quando observados em microscópio eletrônico de varredura, têm suas propriedades melhoradas. Para alguns tipos de fílers testados, a atividade pozolânica aumenta com a finura e comprova-se sua ação pozolânica em função da redução da expansão devido à reação álcali-agregado.



a)



b)

Figura 3.3

Redução de expansão das barras (ASTM C 1260) decorrentes de emprego de agregado pulverizado: a) agregado cascalho (cascalho pulverizado de Itaparica); b) agregado siltito (siltito pulverizado da UHE de Formoso) (FURNAS et al. 1997)

4. A 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.

O fenômeno de expansão é influenciado pelo constituinte químico existente no material, bem como pela sua quantidade e também pela dimensão do seu grão. LEA (1970) menciona que cimentos contendo 1% de óxido de magnésio livre, cujo cristal possui partículas com dimensões entre 30 μ m e 60 μ m, ocasionam expansões similares a cimentos que contenham 4% de óxido de magnésio livre e cujos cristais possuem partículas com dimensões inferiores a 5 μ m.

As normas brasileiras e mundiais, para a produção de cimento, limitam a presença dos óxidos de cálcio e magnésio no estado livre, bem como dos álcalis, que poderiam causar degradação de argamassas e concretos.

Em relação às escórias de aciaria, tanto LD como as escórias geradas em forno elétrico a arco, existe a necessidade de se estudar o fenômeno de expansão, de forma que estas escórias possam ser utilizadas em obras de engenharia.

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).

Quando do processo de produção do aço, durante o sopro do oxigênio, as reações químicas que ocorrem entre os óxidos básicos (CaO e MgO), com 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 cal e óxido de magnésio no estado livre. A escória gerada no processo retém parte desses óxidos livres (CRUZ et al., 2000 e 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):

- a hidratação da cal livre (CaO) e do periclásio (MgO);
- mudanças das formas alotrópicas do C₂S;
- corrosão e oxidação da fração metálica incrustada na escória.

WEAST (1971) apresenta as características das espécies químicas isoladas que ocorrem antes e após a hidratação, com a correspondente variação de volume (tabela 4.1).

TABELA 4.1 Características das espécies químicas isoladas antes e após a hidratação, carbonatação e oxidação (WEAST, 1971)

Nº	Fórmula	Nome	Densidade (g/cm ³)	Massa Molecular (g/mol)	Volume Molar (cm ³ /mol)	Variação de volume (%)
1	MgO	Periclásio	3,58	40,31	11,26	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 ^o	Ferro (metálico)	7,86	55,85	7,11	Em relação ao Fe ^o
8	FeO	Wüstita	5,40	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

A TABELA 4.1 mostra que as mudanças volumétricas que ocorrem com os cristais por hidratação (2,4,10 e 11), por carbonatação (5) e por oxidação (8 e 9) geram instabilidade volumétrica em função do aumento de volume, causando o fenômeno de expansão.

LEA (1970) cita que a instabilidade volumétrica causa expansão que é responsável pela ação destrutiva de concretos e argamassas.

EMERY (1978), PERA (1997), RUBIO e CARRETEIRO (1999) 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.

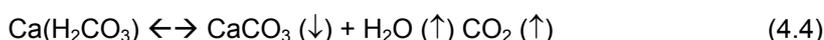
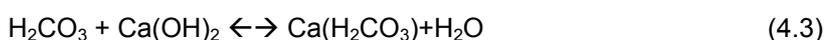
A instabilidade volumétrica que ocorre na escória de aciaria não está associada somente à quantidade de óxido de cálcio livre, mas também é função da forma em que se encontra e da dimensão do grão (MONTGOMERY e WANG, 1991).

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.

4.1 A EXPANSÃO DO ÓXIDO DE CÁLCIO LIVRE

Os fenômenos de hidratação e/ou carbonatação do óxido de cálcio livre nas escórias de aciaria ocorre pela migração de água e/ou de CO₂ pela estrutura porosa da escória, conforme são mostrados nas reações químicas (GUPTA et al. 1994):



A TABELA 4.1 mostra que o CaO livre, ao hidratar-se, gera o cristal de Ca(OH)_2 e ao carbonatar-se gera o cristal de CaCO_3 , com volume de 99,4% e 105,8% superior ao do cristal de CaO, respectivamente, o que causa, conseqüentemente, a instabilidade volumétrica da escória de aciaria, causando sua expansão.

Para NOUMAN et al. (1992) o óxido de cálcio livre é a principal causa da expansão nas escórias de aciaria.

Nas escórias de aciaria, o óxido de cálcio pode apresentar-se na forma livre ou na forma de combinação com silicatos ou em solução sólida combinadas com o Mn, o Fe e com o Mg (NÜRNBERG, 1981).

Observa-se que na escória de aciaria ocorrem duas formas de cal livre, a precipitada e a residual. A cal precipitada é encontrada principalmente nos contornos do C_2F ou nos cristais de C_3S , possuindo partículas de dimensões de $4\mu\text{m}$. A cal residual aparece durante o resfriamento e solidificação da escória. Existem dois tipos de cal residual, as denominadas “granuly lime”, possuindo partículas de dimensões entre $3\mu\text{m}$ e $10\mu\text{m}$, e as denominadas “spongy lime”, que possuem partículas de dimensões entre $6\mu\text{m}$ e $50\mu\text{m}$ (GEISELER e SCHLOSSER, 1998).

As técnicas utilizadas para se detectar o óxido de cálcio livre 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 etileno glicol (NBR 7227,1989);
- cimento Portland: determinação da expansibilidade Le Chatelier (NBR 11582,1991);

Para o cimento Portland, o ensaio de expansibilidade, utilizando-se as agulhas de “Le Chatelier”, pode ser realizado tanto a frio como a quente, sendo que para NEVILLE (1982) o ensaio de expansibilidade realizado a quente somente possibilita detectar o óxido de cal livre.

A colmatção de drenos de estradas rodoviárias, devido ao fenômeno de formação da “tufa”, é causado pela hidratação e carbonatação do óxido de cálcio livre presente na escória de aciaria, gerando, como conseqüência, fissuras na pista de rolamento devido à falta de drenagem (GUPTA et al. 1994).

GEISELER e SCHLOSSER (1998) admitem que o teor de 7% de óxido de cal livre não é prejudicial às escórias de aciaria para serem utilizadas em pavimentos rodoviários.

TAYLOR (1997) admite que para o cimento Portland, o teor máximo de óxido de cálcio livre, para não afetar a durabilidade de argamassas e concretos por expansão, deve estar compreendido entre 3% a 5%.

4.2 A EXPANSÃO DO ÓXIDO DE MAGNÉSIO LIVRE

O fenômeno de hidratação do óxido de magnésio livre nas escórias de aciaria ocorre pela migração de água pela estrutura porosa da escória, conforme mostra a reação química:



A TABELA 4.1 mostra que o cristal de MgO, ao hidratar-se, gera o cristal de Mg(OH)₂ com volume de 119,54% superior, o que causa, conseqüentemente, a instabilidade volumétrica da escória de aciaria, gerando sua expansão.

Nas escórias de aciaria, o óxido de magnésio pode se apresentar nas formas livre, quimicamente combinada ou em solução sólida com FeO e MnO.

As formas monticelita (CMS = CaO.MgO.SiO₂) e merwinita (C₃MS₂ = 3CaO.MgO.2SiO₂) são quimicamente estáveis (SHOUSUN, 1980; TAYLOR, 1997).

Segundo LUO apud MONTGOMERY e WANG (1981), a estabilidade do MgO é verificada pela relação:

$$\text{ESTABILIDADE} = \frac{\text{MgO}}{\text{FeO} + \text{MnO}} \quad (4.6)$$

Sendo que quando a ESTABILIDADE > 1, o MgO não é estável e quando a ESTABILIDADE <1, o MgO é estável.

Pablo Gabrois, apud GUMIERI (2002), cita que uma escória, para ser considerada estável em relação à expansão, deve atender as equações de equilíbrio entre os óxidos de cálcio livres e magnésio ou do óxido de cálcio isoladamente com outros constituintes da escória, ou seja:

- Módulo A: $\text{CaO} + 0,8 \text{MgO} \leq 1,28 \text{SiO}_2 + 0,4 \text{Al}_2\text{O}_3 + 1,75 \text{S}$ (4.7)

- Módulo B: $\text{CaO} \leq 0,9 \text{SiO}_2 + 0,6 \text{Al}_2\text{O}_3 + 1,75 \text{S}$ (4.8)

As técnicas utilizadas para se detectar o óxido de magnésio livre são:

- termogravimetria (TG) e termogravimetria derivada (DTG) (MATOS, 1994);

- difração de raio-X (MACHADO, 2000; MASUERO, 2001; GUMIERI, 2002);
- cimento Portland: determinação de expansibilidade Le Chatelier (NBR 11582/1991);

Para PETRUCCI (1998), o ensaio de expansibilidade “Le Chatelier” evidencia a possibilidade da determinação do MgO quando o ensaio é realizado a frio.

Não somente a quantidade de óxido de magnésio livre, mas também as dimensões de suas partículas influenciam o fenômeno de expansão. KEIL, citado por CHATTERJI (1995), analisando escórias de aciaria em autoclave, detectou que 4% de MgO, com partículas de diâmetros menores que 5 μ m, tem a capacidade de ocasionar a mesma expansão em autoclave que 1% de MgO com partículas de diâmetros entre 30 μ m e 60 μ m.

Para TAYLOR (1997), quando no cimento Portland a quantidade de óxido de magnésio livre é superior a 2%, ao hidratar-se, o fenômeno de expansão é inevitável, causando a ação destrutiva da argamassa ou concreto produzido com este cimento.

A NBR 5732 (1991) limita a quantidade de MgO, quando da produção do clínquer, em no máximo de 6,5%, para evitar a formação de óxido de magnésio livre.

4.3 A EXPANSÃO CAUSADA PELA OXIDAÇÃO DO FERRO METÁLICO (FE°)

Durante a produção do aço pelos processos conversor a oxigênio LD ou forno elétrico a arco, um alto teor de ferro metálico fica incorporado à escória no sopro ou no vazamento do aço líquido. As reações químicas de oxidação e de corrosão geram produtos que são responsáveis pela instabilidade volumétrica da escória em função da variação do volume molar em relação ao volume molar da forma original que é o ferro metálico (LEE e LEE, 1995).

A TABELA 4.1 apresenta as variações volumétricas que ocorrem com os principais produtos gerados pela oxidação e corrosão do ferro metálico e a TABELA 4.2 mostra estas reações químicas.

TABELA 4.2 Produtos formados na oxidação do ferro metálico presente na escória (MACHADO, 2000)

FORMAÇÃO	PRODUTO FORMADO
REAÇÕES DE OXIDAÇÃO	
$\text{Fe}^0 + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{FeO}$	Wüstita
$2\text{Fe}^0 + 3/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$	Hematita
$3\text{Fe}^0 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$	Magnetita
REAÇÕES DE CORROSÃO	
$\text{Fe}^{2+} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$	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 Ferroso

Uma característica marcante na escória de aciaria elétrica é a presença de grandes quantidades de óxido de ferro (GEISELER, 1996).

O elevado teor de ferro na escória favorece a formação sólida com o Mg ou com o Mn. Quando a relação $\text{MgO}/(\text{FeO}+\text{MnO})$ é menor que um, predomina o Fe ou o Mn, o que gera um aumento nas dimensões e no espaçamento basal do cristal. Quando esta relação é maior que um, predomina o periclásio ou periclásio ferroso, que são volumetricamente instável. Todavia, quando a proporção é menor que um, forma-se a wüstita, Mg-Wüstita ou Mg-Mn-Wüstita, que possui comportamento estável, o que não é comum nas escórias de aciaria (MACHADO, 2000).

Quando ocorre o fenômeno de corrosão do aço, o cristal originado ($\text{FeO} \cdot (\text{H}_2\text{O})_x$) pode atingir até 600% do volume do cristal do ferro metálico, causando a desintegração da barra de aço (METHA e MONTEIRO, 1994). Este raciocínio pode ser estendido para o fenômeno de corrosão da fração metálica contida na escória de aciaria, que será responsável pela sua expansão.

4.4 A EXPANSÃO POR TRANSFORMAÇÃO ALOTRÓPICA DO SILICATO DICÁLCICO

O silicato dicálcico ou ortossilicato dicálcico (2CaO SiO_2 ou C_2S) pode ser encontrado sob quatro diferentes sistemas cristalinos, conhecidos como fases polimorfas do tipo α , α' , β e γ . As transformações originadas do $\alpha\text{C}_2\text{S}$ ocorrem com mudança volumétrica e com progressiva redução da simetria do sistema cristalino, que é causada pelas mudanças de orientação do SiO_4^{4-} , com pequeno movimento dos íons Ca^{2+} . A mudança de forma β para γ pode ocorrer com variações

volumétricas de 10% a 14%, causando o aparecimento de um pó branco e fino (LEA, 1970; MACHADO, 2000).

A TABELA 4.3 mostra as transformações que ocorrem com as formas polimorfas do C_2S .

TABELA 4.3 Transformações do silicato dicálcico em função da temperatura de resfriamento (TAYLOR, 1977; LEA, 1970)

FASE LÍQUIDA	DENSIDADE (δ)	AUMENTO DE VOLUME (%)	SISTEMA CRISTALINO	TEMPERATURA (°C)		
				Transformação	Estabilização	
TRANSFORMAÇÃO ↓	α	3,07	0	Trigonal	2130	>1425
	α'	3,31	-7,82	Ortorrombico	1425	1425-1160
	β	3,28	0,91	Monoclínico	1160-680	680-500
	γ	2,97	10,44	Ortorrombico	<500	<500

Quando a escória está no estado líquido, com temperatura superior a 1425 °C, o C_2S pode ser encontrado na forma α . Quando ocorre o resfriamento da escória, para temperatura próxima a 680°C, o C_2S pode assumir a forma α' ou β . Logo após, abaixo de 500°C, o C_2S pode assumir a forma β , que em alguns casos é considerada metaestável. Já no estado sólido a uma temperatura próxima de 725°C, a forma β altera-se para a forma γ , implicando em uma transformação volumétrica, com aumento de volume de 10% a 14% (MACHADO, 2000).

A taxa de resfriamento da escória e a presença de outras substâncias em estado de solução sólida influenciam a estabilidade do C_2S presente na escória. Caso a escória seja resfriada rapidamente, o C_2S pode-se tornar estável indefinidamente, sem sofrer instabilidade de volume e também adquirir propriedades hidráulicas (GUMIERI, 2002).

O clínquer de cimento Portland é considerado metaestável, pois o βC_2S contido nele possui quantidades suficientes de íons estabilizantes que evitam a transformação da forma $\beta \rightarrow \gamma$ (TAYLOR, 1997).

Desta forma, fica evidenciado que para se garantir que a escória de aciaria seja estabilizada volumetricamente, é necessário adotar procedimentos de resfriamento, cura que permita ocorrer as reações químicas dos óxidos de cálcio e magnésio, bem como a retirada da fração metálica.

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL: AMOSTRAGEM, O PROCESSO DE MICRONIZAÇÃO, CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E RESULTADOS PRELIMINARES

O principal fenômeno que preocupa pesquisadores e engenheiros, quando da utilização de escória de aciaria em obras de engenharia, é sua expansibilidade.

O programa experimental foi estabelecido de forma a viabilizar a utilização das escórias de aciaria que estão estocadas em bota-foras nas siderúrgicas em diversas regiões do país.

Pretende-se apresentar a caracterização da escória de aciaria elétrica, gerada em uma siderúrgica na cidade de Juiz de Fora – MG, sob os seguintes aspectos: físicos, químicos, mineralógicos e ambientais, bem como propor um processo de moagem da escória, por micronização, que poderá ser responsável pela viabilidade da utilização da escória como material cimentício.

5.1 COLETA E PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS

5.1.1 ESCÓRIA DE ACIARIA ELÉTRICA

A NBR 10007 (2004) – Amostragem de resíduos preconiza que para a formação de uma amostra composta de um resíduo, esta deverá ser representada pela soma de parcelas individuais do resíduo, retiradas de diferentes pontos e profundidades de uma pilha, e posterior mistura, homogeneização e quarteamento. No entanto, MANCIO (2001) ressalta que este procedimento, estabelecido pela NBR 10007 (2004), não é eficiente para a amostragem de escória de aciaria elétrica, particularmente em função de dois aspectos, ou seja, o primeiro ligado ao fato das pilhas de estocagem de escória serem de grandes dimensões e o segundo em função dos diâmetros dos grãos da escória, desta forma, inviabilizando a utilização de amostrador padrão, especificado na referida norma, para amostragem de resíduos em pilhas.

A coleta de amostras de escórias, que estavam estocadas em pilhas, seguiu a metodologia preconizada por MASUERO (2001), onde as regiões de coletas levam em consideração uma divisão virtual da pilha em seis quadrantes e duas alturas, o que totalizou doze regiões de amostragem na pilha de cada escória (figura 5.1), sendo que este procedimento atende ao que se refere à NBR 10007 (2004) em função de coletas individuais em diversos pontos da pilha de estocagem.

Em 30/08/2002 foram coletadas, em conformidade com a NBR 10007 (2004), três tipos de escórias de aciaria com distintos tempos de estocagem, sendo:

- E1: escória recém estocada, ou seja, decorridos aproximadamente 72 horas desde a sua geração, transporte para a planta de britagem, processamento para a retirada da fração metálica e descarte em pilha de estocagem;
- E2: escória estocada há 6 meses;
- E3: escória estocada há 24 meses.

As escórias foram acondicionadas em “bombonas plásticas”, sendo que para cada tipo de escória foram coletados cerca de 500 kg (figura 5.2).

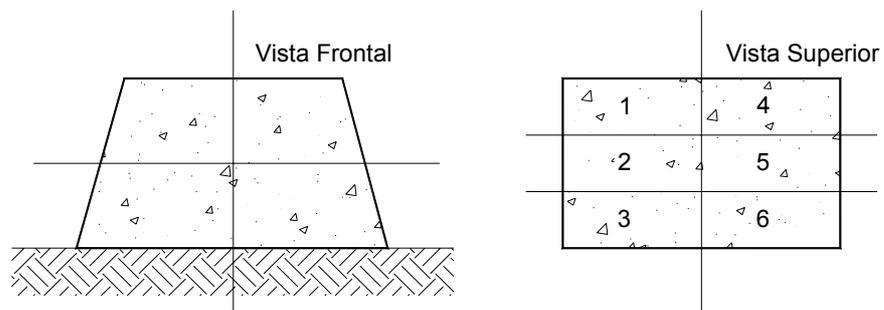


Figura 5.1 Regiões virtuais de amostragem da escória nas pilhas de estocagem (MASUERO, 2001)

Quando da coleta das escórias, estas já tinham passado pelo processo de beneficiamento para a retirada da fração metálica.

A seguir, foram transportadas para o Laboratório de Materiais de Construção Civil da Faculdade de Engenharia da UFJF.

Antes da realização de cada ensaio, era retirada e preparada uma amostra de acordo com o que preconiza a NBR 9941 (1997) – Redução de amostra de campo de agregados para ensaio em laboratório.



Figura 5.2 Estocagem das escórias E1, E2 e E3 no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Faculdade de Engenharia da UFJF

5.1.2 AGREGADO GRAÚDO E MIÚDO

Os agregados graúdos e miúdos utilizados na produção de concretos e argamassas são oriundos da Pedreira Pedra Sul Ltda. e do Rio do Peixe, respectivamente, sendo de larga utilização nas obras da cidade de Juiz de Fora – MG e região.

A coleta das amostras de agregados ocorreu em pilha de estoque de fornecedores da cidade: agregado graúdo (500kg), agregado miúdo (500kg).

Os agregados ficaram acondicionados em bombonas plásticas no interior do laboratório, sendo que posteriormente, antes da realização de cada ensaio, era preparada uma amostra de acordo com o que preconiza a NBR 9941 (1997).

5.1.3 CIMENTO PORTLAND

O cimento utilizado na pesquisa foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV ARI RS), por ser largamente empregado, na região de Juiz de Fora – MG, por concreteiras em combinação com a escória de alto-forno.

5.1.4 ESCÓRIA DE ALTO-FORNO

A escória de alto-forno que foi utilizada na pesquisa é comercializada pela empresa Insumos Básicos para Construção – IBEC, com usina de moagem situada na cidade de Matosinhos – MG.

5.2 O PROCESSO DE MICRONIZAÇÃO

Quando da utilização de processos de moagem das escórias por meios tradicionais, tais como moinhos de bolas, panelas ou jarros (esferas de alumínio), existe o contato físico entre a escória e materiais abrasivos, que têm por objetivo quebrar suas partículas. Durante estes processos de moagem não se consegue uniformidade na forma e no tamanho dos grãos.

No processo de micronização, a redução das dimensões das partículas da escória é obtida através de sucessivos choques entre elas, dentro do moinho. Para isto, é utilizado ar comprimido filtrado em alta pressão, que transfere energia para a colisão das partículas, propiciando a obtenção de produtos com granulometria muito reduzida e uniformidade na forma e no tamanho dos grãos. A velocidade das partículas no interior do moinho chega a atingir 500 m/s. Neste sistema de moagem, o diâmetro médio obtido para os grãos é inferior a 10 μ m (LOWRISON, 1974).

Um das vantagens da moagem que utiliza o processo de micronização sobre os processos tradicionais (moinho de bolas, panelas, etc.) é que este processo possui um sistema de classificação dos diâmetros das partículas, possibilitando desta forma, que partículas com dimensões fora do especificado, retornem ao micronizador para serem novamente moídas.

ATRITOR LIMITED (2003) mostra que, comercialmente, pode ser adquirida no mercado uma planta de moagem por micronização com capacidade de moer até duas toneladas por hora. Normalmente os materiais moídos pelo processo de micronização são:

- mica;
- sílica;
- quartzo;
- alumínio;
- pigmentos de ferro;
- dióxido de titânio;
- escória de alto-forno.

A figura 5.3, fotografada de um quadro na empresa MICROSERVICE, em São Paulo, e datada da década de cinquenta, mostra o esquema de como ocorre o processo de moagem de produtos por micronização, onde é percebido o choque entre partículas e, conseqüentemente, a redução de diâmetros.

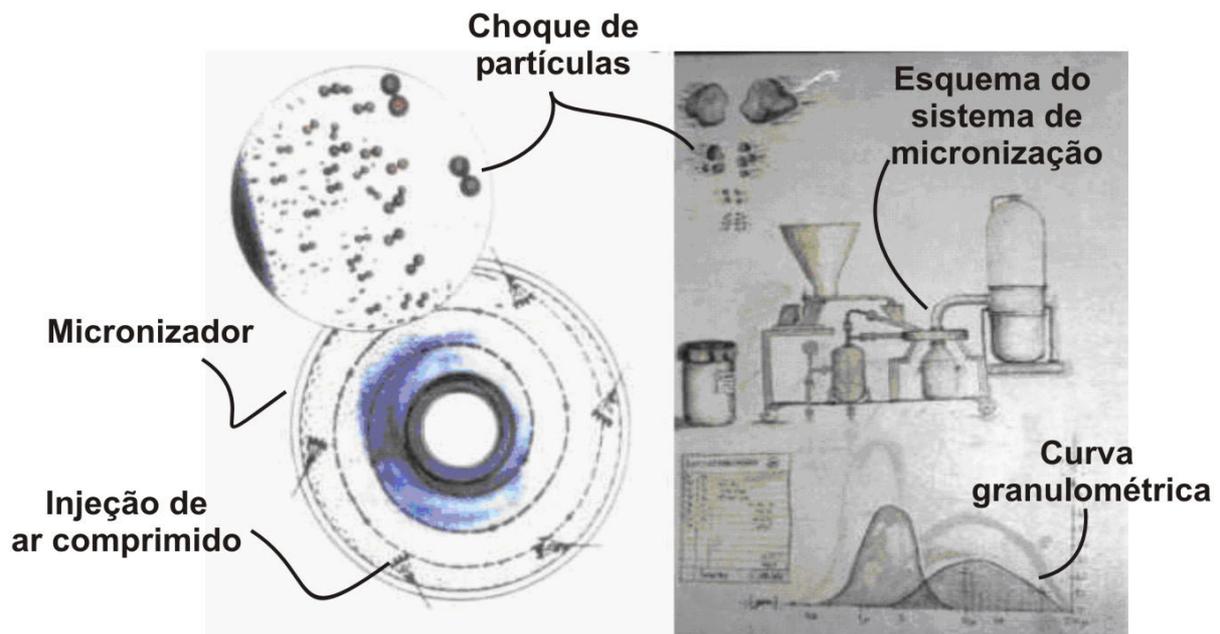


FIGURA 5.3 Esquema de como ocorre a moagem de produtos pelo sistema de micronização (choque de partículas)

A estrutura do sistema de moagem por micronização é composta de:

- rosca dosadora;
- micronizador;
- filtro de manga;
- válvula rotativa.

Antes de iniciar o processo de micronização das escórias E1, E2 e E3, estas tiveram seus diâmetros reduzidos por britadores de mandíbula, sendo a seguir colocadas em moinhos de bolas (aparelho de Abrasão Los Angeles) para redução da granulometria em partículas de diâmetros menores que 0,6 mm (figura 5.4).

A figura 5.5 mostra o processo de micronização em equipamentos de moagem piloto e industrial sendo que:

- i) equipamento piloto: capacidade de micronizar 30 a 40 kg de material por hora;
- ii) equipamento industrial: capacidade de micronizar 350 a 500 kg de material por hora.

Para a pesquisa, foram moídos 150 kg de cada escória de aciaria elétrica E2 e escória de aciaria elétrica E3. O tempo de moagem por micronização foi de 40 minutos para cada escória.

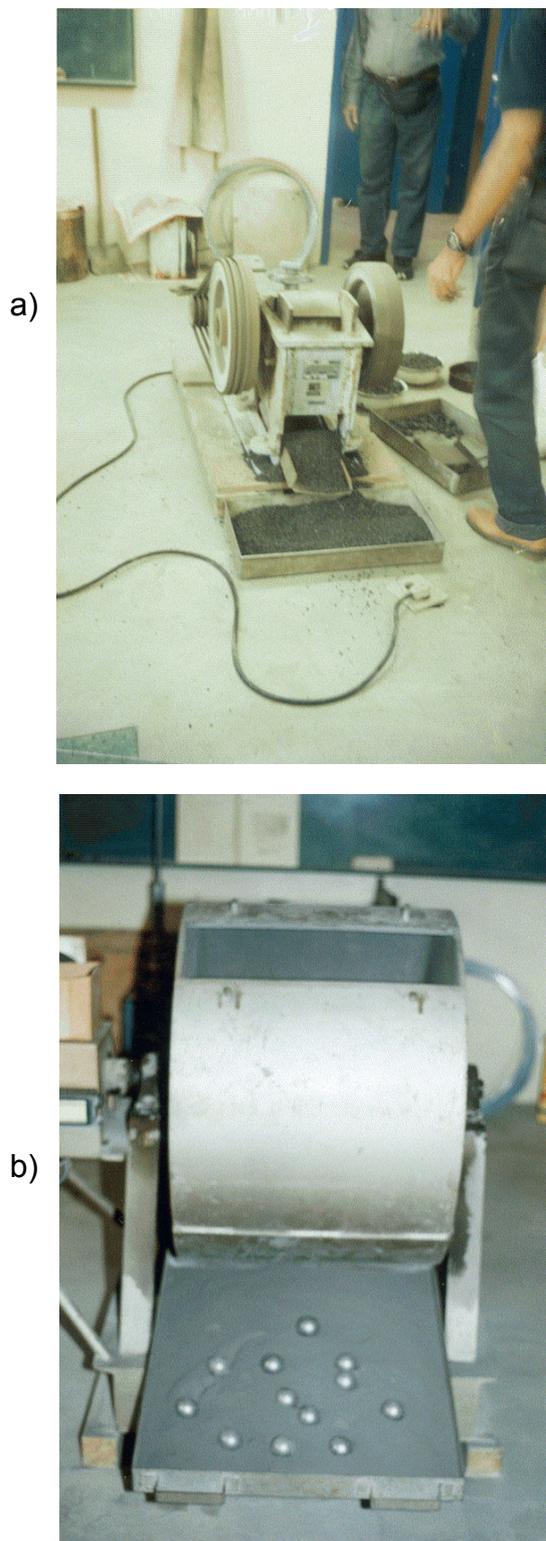


FIGURA 5.4 Redução dos diâmetros das amostras de escórias: a) moagem em britador de mandíbula e b) moagem em moinho de bolas

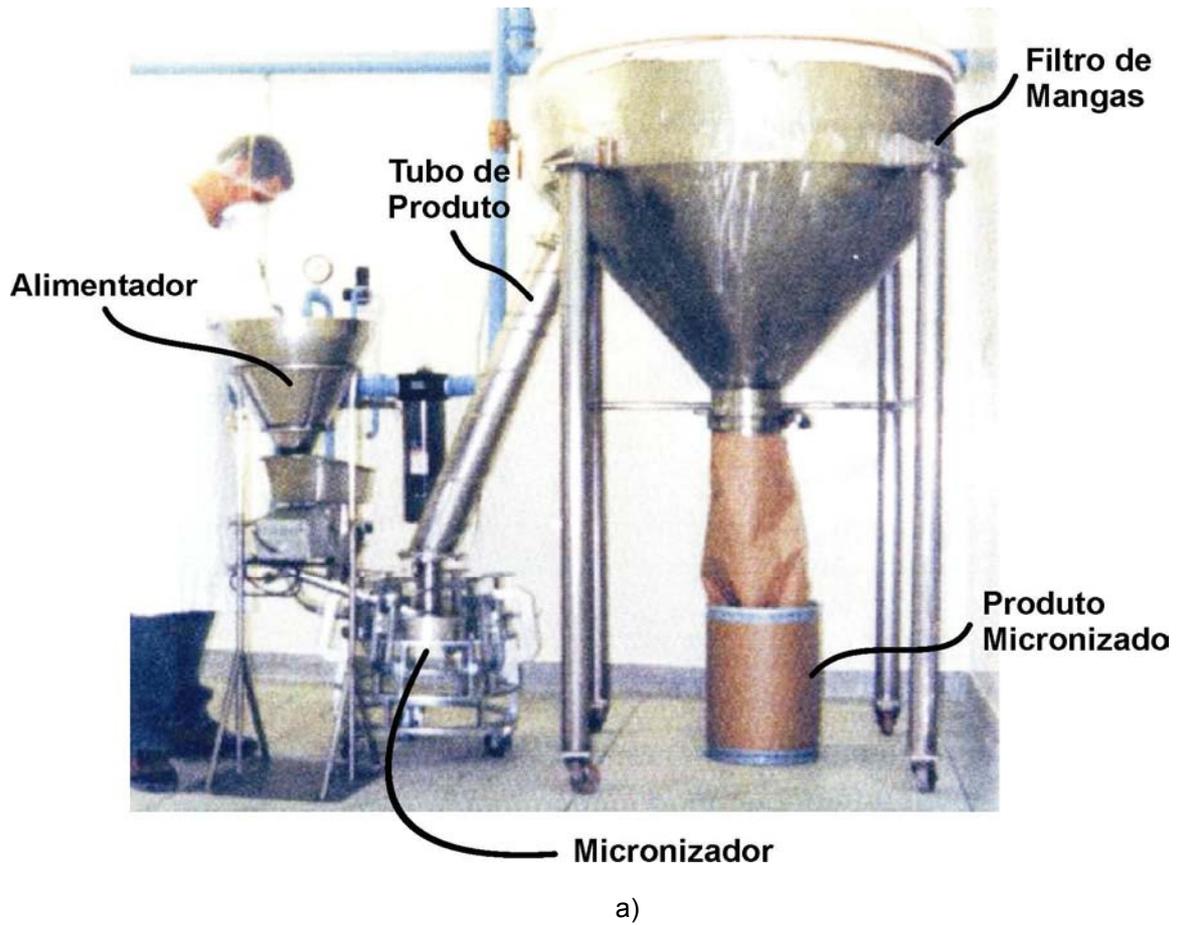


FIGURA 5.5 Moagem por sistema de micronização: a) equipamento de moagem piloto e b) esquema da moagem industrial

5.3 FLUXOGRAMA DE ENSAIOS REALIZADOS NO PROGRAMA EXPERIMENTAL: ESTUDOS PRELIMINARES

Com o objetivo de se avaliar o desempenho da escória de aciaria elétrica como material cimentício, bem como o seu comportamento em relação à expansibilidade, foram realizados ensaios de caracterização conforme é mostrado na Figura 5.6.

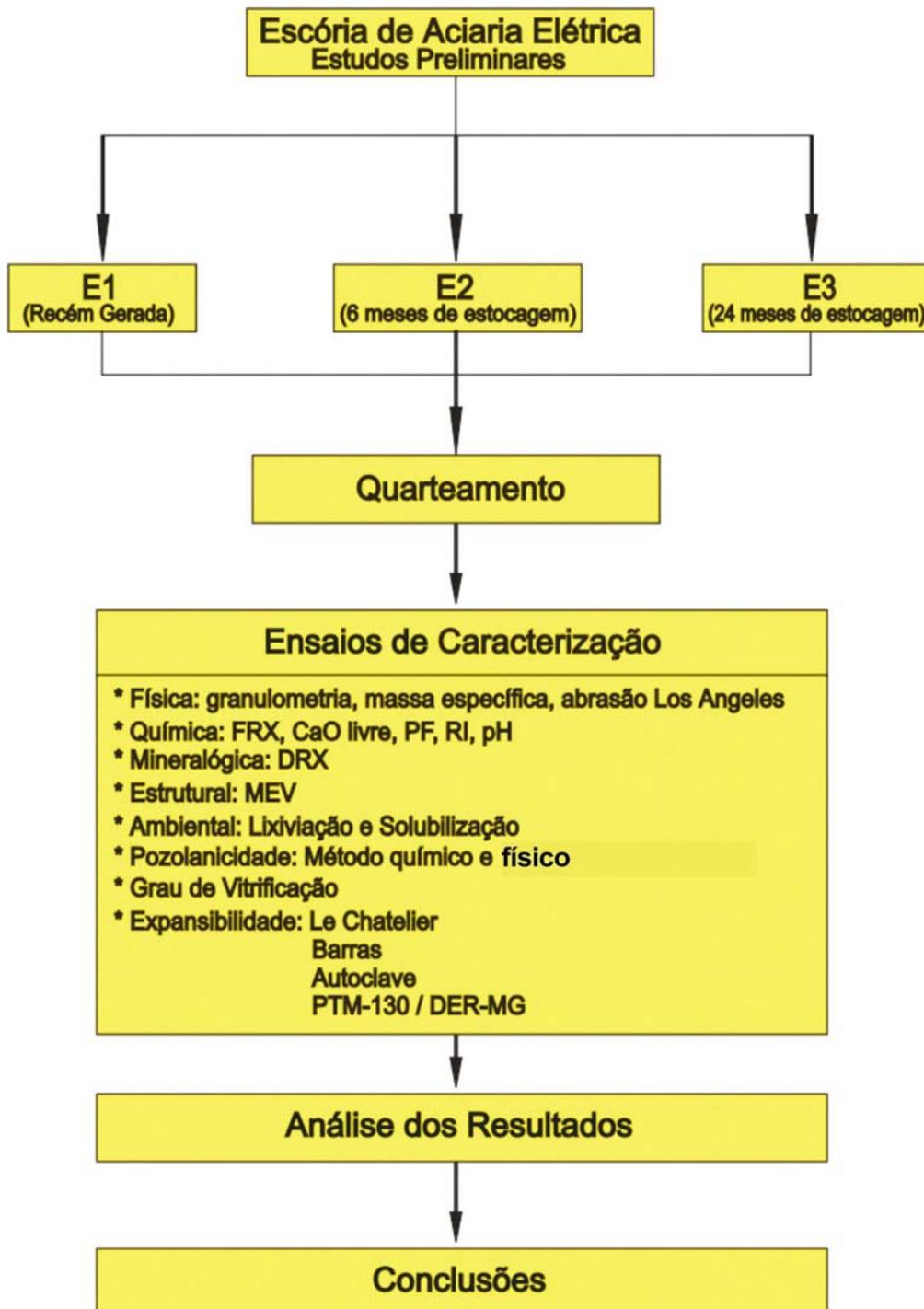


Figura 5.6 Fluxograma de ensaios de avaliação realizados em escória de aciaria elétrica E1, E2 e E3

5.3.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Antes da realização dos ensaios de caracterização das escórias E1, E2 e E3, estas foram preparadas de acordo com a NBR 9941 (1987), sendo micronizadas ou utilizadas conforme coletadas, em função da especificidade de cada ensaio.

A maioria dos ensaios foi realizada com escórias micronizadas, com exceção do ensaio de expansibilidade, preconizado pelo PTM 130 (1982), pois este ensaio especifica uma dada granulometria para a sua realização, e do ensaio de caracterização ambiental (lixiviação e solubilização).

Nos ensaios de expansibilidade, conforme discussão técnica e recomendação preconizada pelo professor METHA, foi adotada a substituição em massa de 50% de cimento Portland de alta resistência inicial (CPV ARI RS) por escória micronizada, tanto para os corpos-de-prova de argamassa como para os de pastas. Caso o material apresente características expansivas, este teor de substituição seria suficiente para o fenômeno de expansibilidade manifestar-se no ensaio (MASUERO, 2001; METHA, 1999).

5.3.1.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Os ensaios de caracterização física das amostras de escória foram realizados seguindo as metodologias preconizadas pelos métodos de ensaios utilizados para agregados. A seguir são apresentados os respectivos métodos de ensaios e locais onde foram realizados:

- i) Granulometria por peneiramento da escória no estado bruto:
 - NBR 7217 – Agregados – determinação da composição granulométrica: ensaios realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Faculdade de Engenharia da UFJF / MG.
- ii) Granulometria a laser da escória micronizada utilizando-se um granulômetro CILAS modelo 920 / MICROSERVICE – SP: ensaios realizados nos laboratórios da empresa MICROSERVICE, em São Paulo – SP.
- iii) Finura:
 - Por peneiramento:
 - NBR 11579 – Cimento Portland – determinação da finura por meio da peneira nº 200.

- NBR 9202 – Cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da finura por meio da peneira 0,044mm (Nº 325).

Ensaio realizado no laboratório da CIMENTO TUPI, em Pedra do Sino, na cidade de Carandaí – MG.

- iv) Superfície específica: NBR NM 76 – Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine): ensaios realizados no laboratório da CIMENTO TUPI, em Pedra do Sino, na cidade de Carandaí – MG.
- v) Massa específica:
 - Massa específica da escória no estado bruto:
 - NBR 9937 – Agregados – determinação da absorção e massa específica do agregado graúdo: ensaios realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Faculdade de Engenharia da UFJF / MG.
 - Massa específica da escória micronizada:
 - NBR 6474 – Cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica: ensaios realizados no laboratório da CIMENTO TUPI, em Pedra do Sino, na cidade de Carandaí – MG.
- vi) Abrasão Los Angeles:
 - NBR 6465 – Agregados – Desgaste por Abrasão Los Angeles: ensaios realizados no Laboratório de Pavimentação da Faculdade de Engenharia da UFJF.

5.3.1.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

Os ensaios de caracterização química das amostras de escória foram realizados seguindo as metodologias preconizadas pelos métodos de ensaios utilizados para cimento Portland. A seguir são apresentados os respectivos métodos de ensaios e locais onde foram realizados:

- i) Óxidos: Fluorescência de Raio X (FRX), utilizando-se o equipamento: PW2400 X RAY SPECTROMETER da marca PHILIPS.
- ii) Perda ao Fogo: NBR 5743 – Análise química de cimento Portland – determinação de perda ao fogo.
- iii) Cal Livre: NBR 7227 – Cimento Portland – determinação de óxido de cálcio livre pelo etilenoglicol.

- iv) Resíduo Insolúvel: NBR 5744 – Cimento Portland – determinação de resíduo insolúvel.
- v) pH: para a determinação do pH das amostras, foi utilizado um “PH-metro digital”, modelo 374 da marca MICRONAL.

Todos os ensaios de caracterização química foram realizados nos laboratórios da CIMENTO TUPI, em Pedra do Sino, na cidade de Carandaí – MG.

5.3.1.3 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

As fases mineralógicas das escórias foram obtidas por difração de raio-x. A difração de Raio X (DRX) foi determinada utilizando-se o equipamento da Marca SIEMENS, modelo D5000, radiação CuK_{α} , tensão de 36V, corrente 20 mA e varredura com passo 0,02 2 θ .

Os ensaios foram realizados no laboratório de Difractometria de Raio X do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e na Associação Brasileira de Cimento Portland.

5.3.1.4 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

Para a caracterização microestrutural das escórias foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura (MEV) por elétrons secundários. As análises foram realizadas no Centro de Microscopia Eletrônica da UFRGS, através de um microscópio eletrônica de varredura, marca JEOL, modelo JSM 5800.

5.3.1.5 CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL

A caracterização ambiental das escórias seguiu as recomendações preconizadas pelas respectivas normas:

- i) ensaio de solubilização: NBR 10006 (2004).
- ii) ensaio de lixiviação: NBR 10005 (2004).
- iii) classificação de resíduos sólidos: NBR 10004 (2004).

A caracterização ambiental das escórias foi realizada no laboratório da empresa Ecolabor Comercial Consultoria e Análises Ltda., na cidade de São Paulo – SP.

5.3.1.6 CARACTERIZAÇÃO QUANTO À POZOLANICIDADE

- i) Método da argamassa de cimento: NBR 5752 – Materiais pozolânicos – determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – índice de atividade pozolânica com cimento: ensaios realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Faculdade de Engenharia da UFJF.
- ii) Método químico / Fratini: NBR 5753 – Cimentos – método de determinação de atividade pozolânica em cimento Portland pozolânico: ensaios realizados na Associação Brasileira de Cimento Portland, em São Paulo – SP.

5.3.1.7 CARACTERIZAÇÃO QUANTO AO GRAU DE VITRIFICAÇÃO

Ensaio realizado na Associação Brasileira de Cimento Portland (Método MAC MASTER).

5.3.1.8 CARACTERIZAÇÃO QUANTO À EXPANSÃO

- i) Agulhas de Le Chatelier: NBR 11582 – Cimento Portland – determinação da expansibilidade de Le Chatelier: ensaios realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Faculdade de Engenharia da UFJF.
- ii) Método das Barras: O ensaio das barras foi realizado segundo o método preconizado pelo “National Building Research” do Instituto da África do Sul – NBRI (FURNAS, 1997): ensaios realizados na Associação Brasileira de Cimento Portland, em São Paulo – SP.
- iii) Autoclave: ASTM C 151 – Standard test method for autoclave expansion of Portland cement: ensaios realizados na Associação Brasileira de Cimento Portland, em São Paulo – SP.
- iv) PTM 130. Método de Ensaio para Avaliação do Potencial de Expansão de Escória de Aciaria. Método adaptado pelo Departamento de Estradas e Rodagem de Minas Gerais: ensaios realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Faculdade de Engenharia da UFJF / MG.

5.4 RESULTADOS PRELIMINARES E DISCUSSÕES

Nesta parte do trabalho são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios, quando se utilizou as escórias de aciaria elétrica, bem como as caracterizações dos seguintes materiais utilizados na pesquisa: CPV ARI RS, escória granulada de alto-forno e agregados graúdo e miúdo.

5.4.1 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS CPV ARI RS, ESCÓRIA DE ALTO-FORNO, AGREGADO MIÚDO E GRAÚDO UTILIZADOS NOS ENSAIOS

5.4.1.1 CARACTERIZAÇÃO DO CPV ARI RS

A caracterização do CPV ARI RS foi realizada em relação à composição química, propriedades físicas e mecânicas, granulometria a laser e difração de raio-X.

A Figura 5.7 apresenta a distribuição granulométrica dos grãos do CPV ARI RS, obtidos por granulometria a laser.

Os diâmetros dos grãos das amostras de CPV ARI RS estão assim distribuídos:

- i) 10% dos grãos possuem diâmetros menores que 0,9 μm ;
- ii) 50% dos grãos possuem diâmetros menores que 9,79 μm ;
- iii) 100% dos grãos possuem diâmetros menores que 90,0 μm .

O diâmetro médio das partículas é de 12,33 μm .

A Tabela 5.1 apresenta os ensaios de caracterização realizados em amostras do cimento CPV ARI RS que foi utilizado na pesquisa. A análise da composição química revela que os índices de SO_3 e resíduo insolúvel, estão ligeiramente superiores aos exigidos pela norma NBR 5733 que trata do cimento Portland de alta resistência inicial, provavelmente em função da adição de escória de alto-forno a este tipo de cimento.

A Figura 5.8 apresenta o difratograma de Raio-X do CPV ARI RS.

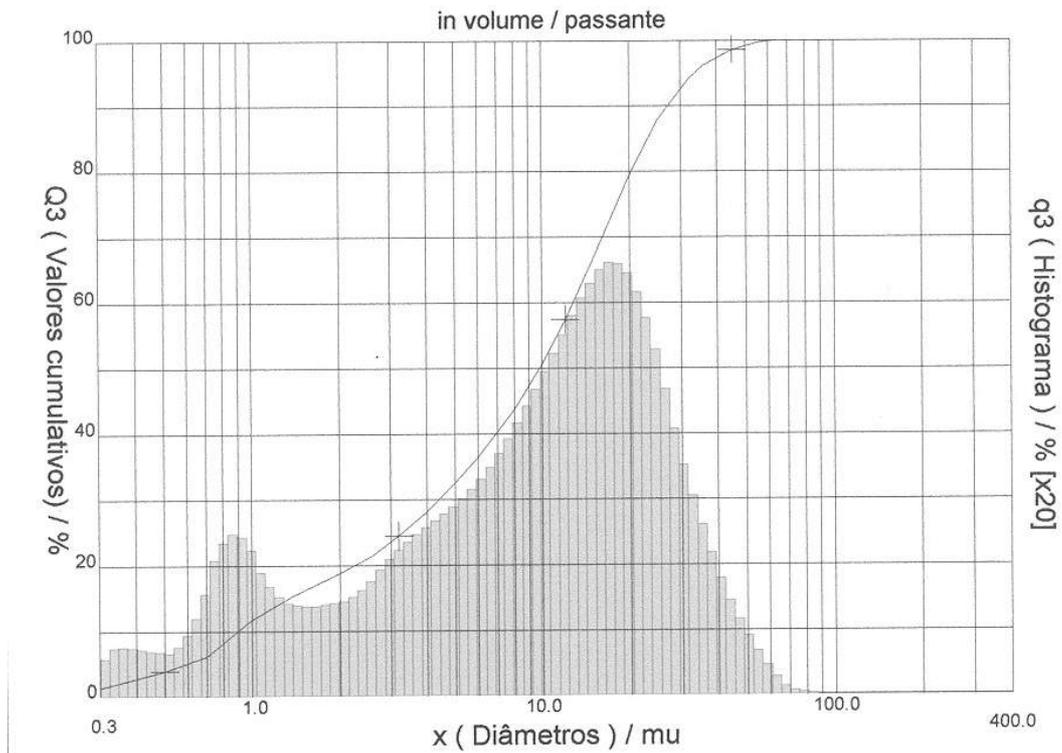


Figura 5.7 Distribuição granulométrica dos grãos do CPV ARI RS obtida por granulometria a laser

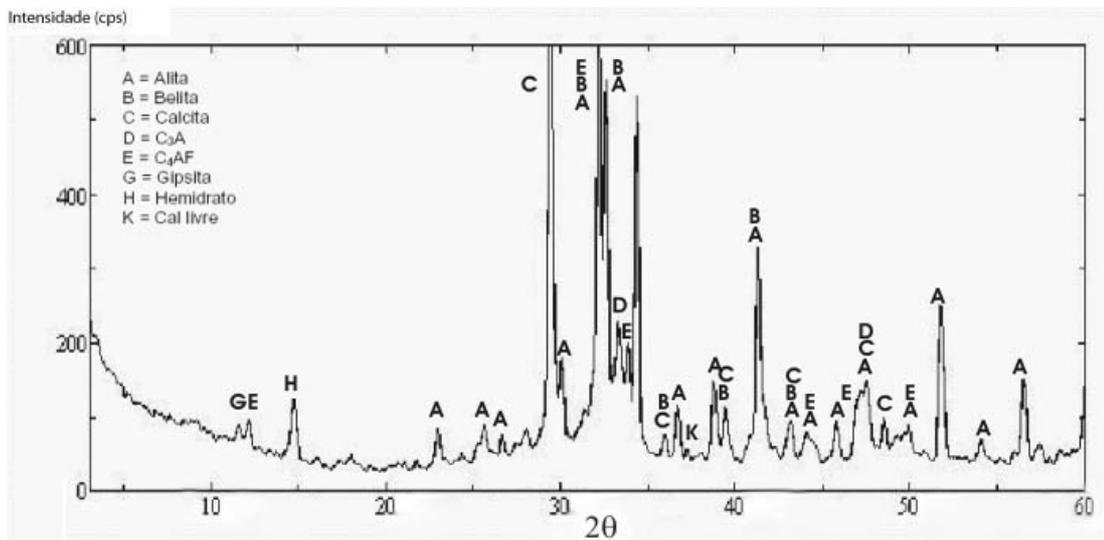


Figura 5.8 Difratoograma de raios-X do CPV ARI RS

Observa-se que a estrutura do CPV ARI RS é tipicamente cristalina, com a presença de cristais de alita, belita, calcita, C_3A , C_4AF , gipsita, hemidrato e cal livre.

TABELA 5.1 Composição química, propriedades físicas e mecânicas do cimento CPV ARI RS utilizado na pesquisa

Composição Química (%)		Cimento Utilizado CPV ARI RS		Limites (NBR 5733,1991)	
CaO		56,41		-	
FeO		2,32		-	
SiO ₂		21,40		-	
MgO		3,48		≤ 6,5	
Al ₂ O ₃		6,45		-	
SO ₃		4,19		≤ 3,5	
K ₂ O		0,69		-	
Na ₂ O		0,56		-	
CaO (Livre) (NBR 7227, 1989)		1,87		-	
RI (NBR 5744, 1989)		1,20		≤ 1	
Perda ao Fogo (NBR 5743, 1977)		3,58		≤ 4,5	
pH		12,90		-	
Massa Específica (g/cm ³) (NBR 6474, 1984)		3,02		-	
Tempo de Pega (NBR 11581, 1991)	Início	2h e 22 min		≥ 1	
	Fim	3h e 10 min		≤ 10	
Expansibilidade à quente (mm) (NBR 11582, 1991)		0		≤ 5	
Finura	# 200 (0,075mm) (%) (NBR 11579, 1991)	0,6		-	
	#325 (0,045 mm) (%) (NBR 9202, 1985)	1,9		-	
Área Específica (cm ² /g) (NBR NM 76)		4360		≥ 3000	
Resistência Mecânica à Compressão (MPa) (NBR 7215, 1996)		DIAS	1	18,90	≥ 14
			3	35,77	≥ 24
			7	44,09	≥ 34
			28	57,39	-
			91	60,98	-

5.4.1.2 CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO-FORNO

A Tabela 5.2 apresenta os ensaios de caracterização realizados em amostras da escória de alto-forno que foi utilizada na pesquisa.

A Figura 5.9 apresenta a distribuição granulométrica dos grãos da escória granulada de alto-forno, obtidas por granulometria a laser.

Os diâmetros dos grãos da amostras de escória granulada de alto-forno estão assim distribuídos:

- i) 10% dos grãos possuem diâmetros menores que 2,39 μm ;
- ii) 50% dos grãos possuem diâmetros menores que 26,29 μm ;
- iii) 100% dos grãos possuem diâmetros menores que 180,00 μm .

O diâmetro médio das partículas é de 35,70 μm .

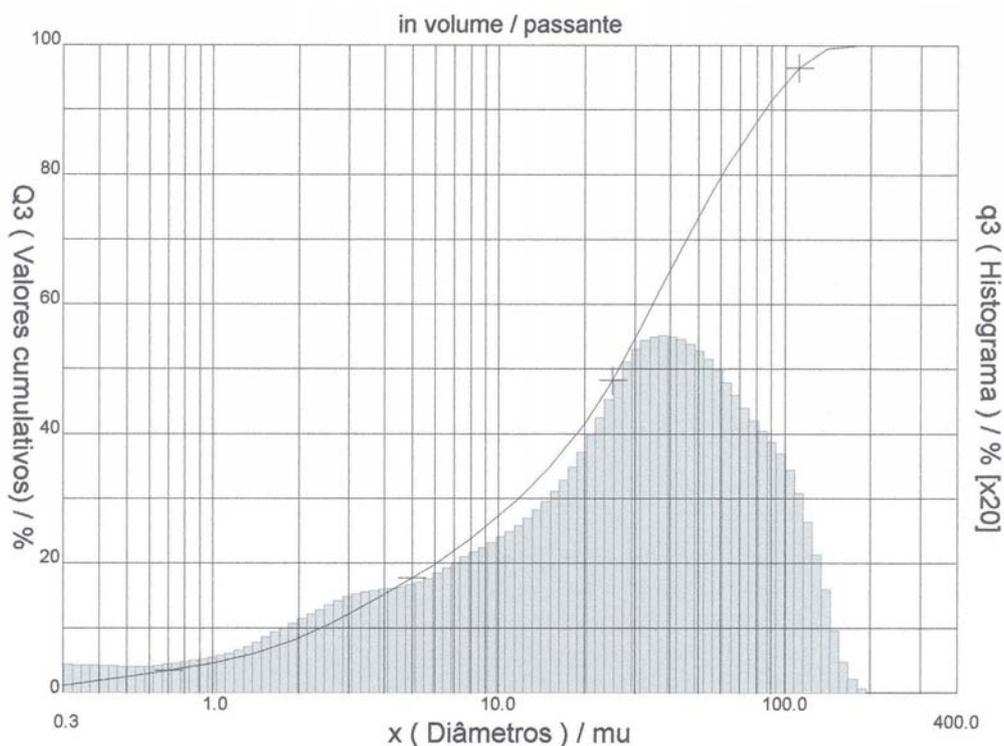


Figura 5.9 Distribuição granulométrica dos grãos da escória granulada de alto-forno obtida por granulometria a laser

TABELA 5.2

Composição química, propriedades físicas e mecânicas da Escória de Alto-forno utilizada na pesquisa

Composição Química (%)		Escória de Alto-forno utilizada
CaO		44,70
FeO		0,64
SiO ₂		32,13
MgO		6,50
Al ₂ O ₃		11,79
SO ₃		2,03
K ₂ O		0,56
Na ₂ O		**
CaO (Livre) (NBR 7227, 1989)		0,16
RI (NBR 5744, 1989)		0,58
Perda ao Fogo (NBR 5743, 1977)		0,33
pH		12,20
Massa Específica (g/cm ³) NBR 6474, 1984		2,90
Finura	# 200 (0,075mm) (NBR 11579)	3,2
	#325 (0,045 mm) (NBR 9202)	19,9
Área específica (cm ² /g) (NBR NM 76)		2990

A figura 5.10 mostra a micrografia da escória de alto-forno, onde se observa a existência de várias formas e tamanhos diferentes de grãos.

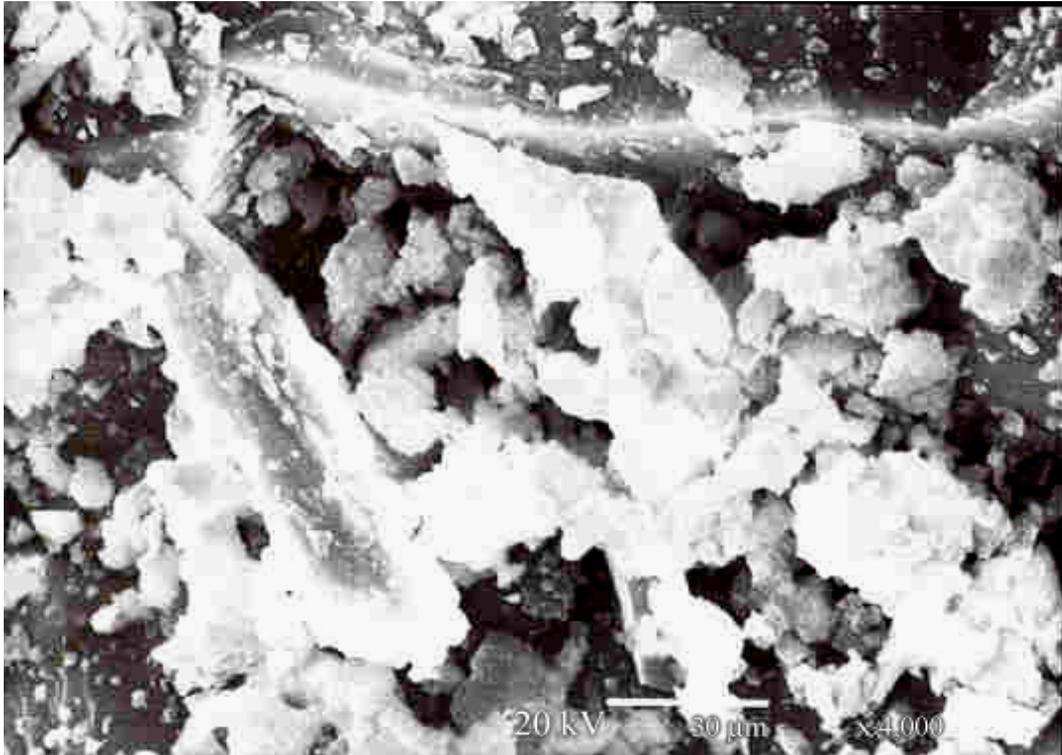


Figura 5.10 Micrografia (MEV) obtida por varredura com elétrons secundários da escória de alto-forno (4000 X)

A figura 5.11 mostra que a escória de alto-forno apresenta uma estrutura amorfa.

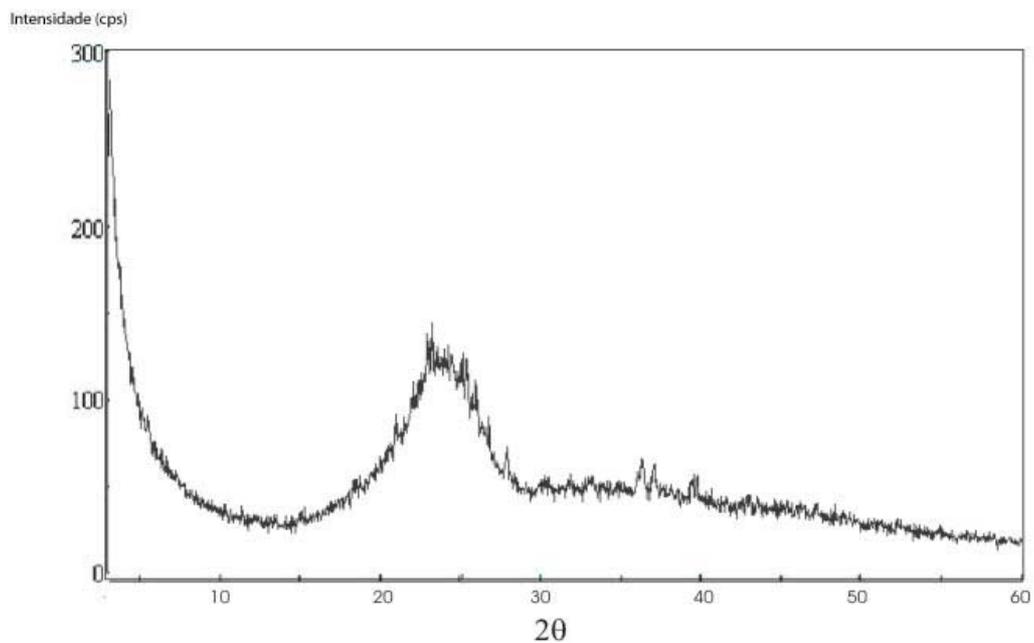


Figura 5.11 Difratograma de raios-X da escória de alto-forno

5.4.1.3 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

As Tabelas 5.3 e 5.4 apresentam a caracterização dos agregados miúdo e graúdo, respectivamente, utilizados na pesquisa.

TABELA 5.3 Caracterização do agregado miúdo utilizado na pesquisa (areia do Rio do Peixe)

Abertura Peneira (mm)	% Retida Acumulada
76	0
50	0
38	0
32	0
25	0
19	0
12,5	0
9,5	0
6,3	0
4,8	0
2,4	2
1,2	14
0,6	46
0,3	83
0,15	99
Fundo	100
Dimensão máxima característica (mm) (NBR 7211, 1983)	2,4
Módulo de finura (NBR 7211, 1983)	2,44
Massa específica (g/cm ³) (NBR 9776, 1987)	2,612
Massa unitária no estado solto (g/cm ³) (NBR 7251, 1982)	1,380
Torrões de argila (%) (NBR 7218, 1987)	0,1
Material pulverulento (%) (NBR 7219, 1987)	0,1
Matéria orgânica (ppm) (NBR 7220, 1987)	<300
Coefficiente médio de inchamento (NBR 6467, 1987)	1,26

De acordo com a NBR 7211, a areia do Rio do Peixe é classificada como sendo uma “areia média / zona 3” e atende as especificações para uso em obras de engenharia.

TABELA 5.4 – Caracterização do agregado graúdo utilizado na pesquisa (Pedreira Pedra Sul)

Abertura Peneira (mm)	% Retida Acumulada
76	0
50	0
38	0
32	0
25	0
19	3
12,5	39
9,5	95
6,3	99
4,8	99
2,4	99
1,2	99
0,6	99
0,3	99
0,15	99
Fundo	100
Dimensão máxima característica (mm) (NBR 7211, 1983)	19
Módulo de finura (NBR 7211, 1983)	6,92
Massa específica (g/cm³) (NBR 9776, 1987)	2,746
Massa unitária no estado solto (g/cm³) (NBR 7251, 1982)	1,410
Torrões de argila (%) (NBR 7218, 1987)	Inexistente
Material pulverulento (%) (NBR 7219, 1987)	0,2
Abrasão Los Angeles (%) (NBR 6465, 1984)	25,7

De acordo com a NBR 7211, a brita da Pedreira Pedra Sul é classificada como “graduação 1” e atende as especificações para uso em obras de engenharia.

A seguir, serão apresentados os resultados experimentais, quanto a caracterização (física, química, microestrutural, ambiental), grau de vitrificação, atividade pozolânica e expansibilidade das escórias de aciaria elétrica utilizadas na pesquisa.

5.4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA ELÉTRICA E1, E2 E E3 UTILIZADAS NA PESQUISA

5.4.2.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

As tabelas 5.5, 5.6 e 5.7 apresentam a caracterização, a finura por peneiramento e área específica e a distribuição granulométrica dos grãos das escórias E1, E2 e E3, respectivamente.

Tabela 5.5 Composição Granulométrica, Dimensão Máxima Característica, Módulo de Finura, Massa Específica, Abrasão Los Angeles das escórias E1, E2 e E3

Peneira (mm)		E1 (% Retido Acumulado)	E2 (% Retido Acumulado)	E3 (% Retido Acumulado)
76		-	-	-
50		-	-	-
38		-	-	-
32		2	3	2
25		23	24	29
19		56	41	46
12,5		78	80	83
9,5		94	92	90
6,3		96	96	95
4,8		98	97	97
2,4		98	99	97
1,2		98	99	97
0,6		98	99	97
0,3		98	99	97
0,15		98	99	97
<0,15		100	100	100
DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA (mm) (NBR 7211, 1983)		32	32	32
MÓDULO DE FINURA: (NBR 7211, 1983)		7,38	7,25	7,18
ABRASÃO LOS ANGELES: (%) (NBR 6465, 1984)		21,12	19,74	20,10
MASSA ESPECÍFICA	Balança Hidrostática (g/cm³) (NBR 9937, 1986)	3,71	3,74	3,74
	Le Chatelier: (g/cm³) (NBR 6474, 1984)	3,82	3,84	3,86

Com base nos resultados dos ensaios realizados nas amostras coletadas das escórias E1, E2 e E3, pode-se dizer:

- i) são caracterizadas granulometricamente como agregado graúdo;
- ii) possuem grande dureza, pois apresentam valores de desgaste por Abrasão Los Angeles baixos ($\leq 25\%$), conforme é citado pelo IBS (1999);
- iii) a massa específica das escórias é alta quando comparada com a massa específica de britas de origem natural pois possuem, em sua composição mineralógica, grandes quantidades de óxido de ferro, conforme citado por GEISELER e SCHLOSSER (1998) e IBS (1999), dentre outros autores. A diferença de resultados da massa específica apresentada nos ensaios preconizados pela NBR 9937 (1996) e NBR 6474 (1984) é atribuída à condição granulométrica da amostra, sendo que quando se utiliza a balança hidrostática para determinação da massa específica, a amostra é ensaiada na forma granular, conforme foi coletada, e quando se utiliza o frasco de Le Chatelier, a amostra de escória é analisada na forma pulverulenta, ou seja, micronizada.

Tabela 5.6 Finura por peneiramento e Superfície específica das escórias E1, E2 e E3 micronizadas.

AMOSTRAS	# 200 (0,075mm) (NBR 11579) (%)	# 325 (0,045 mm) (NBR 9202) (%)	Área específica (NBR NM 76) (cm²/g)
E1	0,3	0,7	5820
E2	0,2	0,7	5840
E3	0,4	0,9	5860

O percentual de grãos retidos nas peneiras de 75 μ m e 45 μ m é baixo.

Tabela 5.7 Distribuição Granulométrica das escórias E1, E2 e E3, micronizadas, obtida por granulometria a laser

AMOSTRAS	Incidência de grãos com diâmetros inferiores a:			Diâmetro Médio (μm)
	10% (μm)	50% (μm)	100% (μm)	
E1	0,56	2,80	12,00	3,17
E2	0,78	3,89	15,00	4,36
E3	0,65	3,35	12,00	3,68

A distribuição granulométrica medida por processo a laser comprova a eficácia da moagem pelo sistema de micronização, indicando, além do diâmetro médio das partículas, a sua incidência de grãos com diâmetros inferiores a 10%, 50% e 100%. Nas figuras 5.12, 5.13 e 5.14 são mostradas as respectivas curvas de distribuição granulométrica dos grãos das escórias micronizadas E1, E2 e E3.

Pode-se notar que as curvas de distribuição granulométrica, obtidas a laser (figuras 5.12, 5.13 e 5.14) são mais uniformes do que as obtidas pelo mesmo processo do CPV ARI RS e da escória de alto-forno (figuras 5.7 e 5.9), respectivamente.

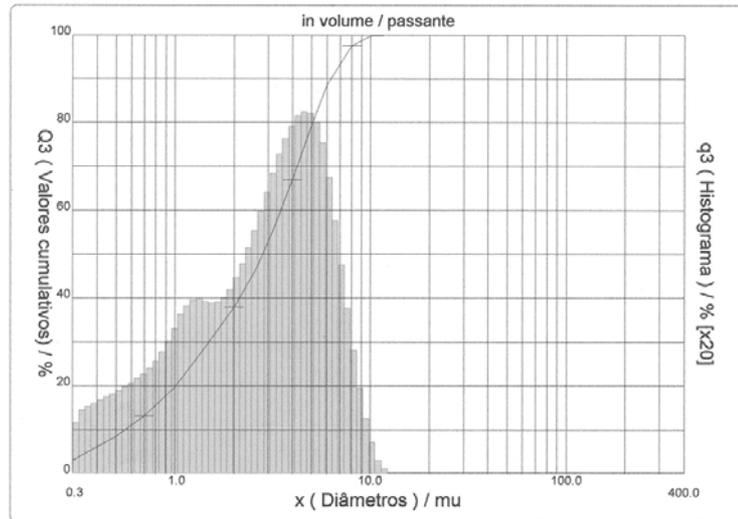


Figura 5.12 Distribuição granulométrica a laser dos grãos da escória micronizada E1

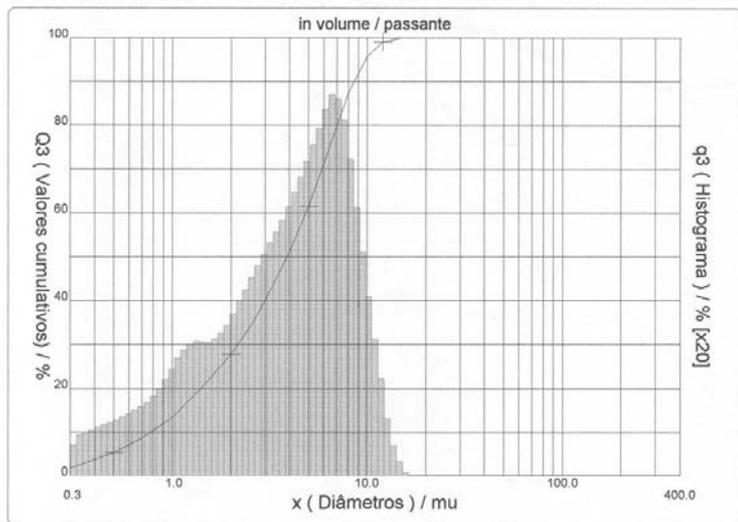


Figura 5.13 Distribuição granulométrica a laser dos grãos da escória micronizada E2

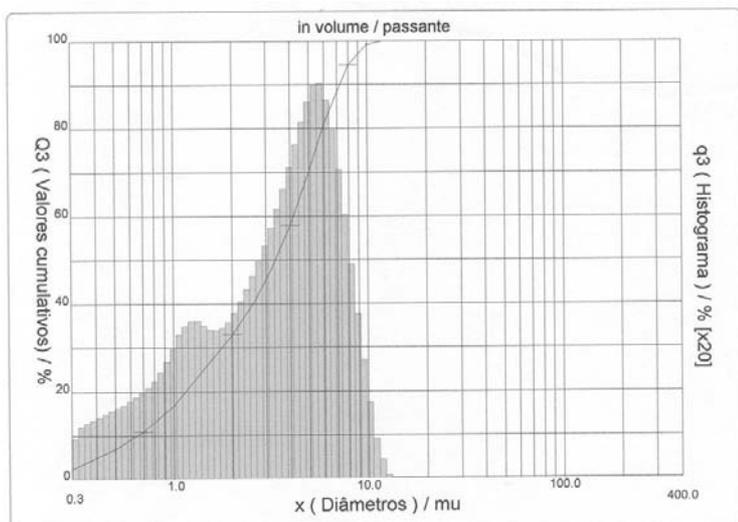


Figura 5.14 Distribuição granulométrica a laser dos grãos da escória micronizada E3

5.4.2.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

A Tabela 5.8 mostra que a constituição química das escórias E1, E2 e E3 é semelhante à composição química do cimento Portland (tabela 5.1), porém difere quantitativamente. Nota-se um grande percentual de óxido de ferro nas amostras.

O teor de óxido de cal livre nas três escórias é baixo, indicando que quando da possível reação de hidratação dessas escórias, provavelmente não ocorrerá o fenômeno de expansão de forma tão intensa. Porém, a presença de óxido de ferro e a transformação alotrópica do C_2S também podem provocar a expansão das escórias.

Tabela 5.8 Composição química, óxido de cal livre, resíduo insolúvel, perda ao fogo e pH das escórias E1, E2, E3 micronizadas.

Composição Química (%)	E1	E2	E3
CaO	24,70	36,40	31,80
FeO	38,40	25,22	24,72
SiO ₂	18,90	21,30	24,30
MgO	4,53	6,40	5,34
MnO	4,26	3,54	4,78
Al ₂ O ₃	4,00	3,40	4,40
P ₂ O ₅	0,99	0,39	0,61
TiO ₂	0,67	0,41	0,46
Cr ₂ O ₃	1,29	0,49	0,43
SO ₃	0,32	0,78	0,94
K ₂ O	-	-	-
Na ₂ O	-	-	-
CaO (Livre) (NBR 7227 / 1989)	0,47	0,39	0,31
RI (NBR 5744 / 1989)	1,74	1,69	1,63
Perda ao Fogo (NBR 5743 / 1977)	0,00	0,00	0,00
pH	12,70	12,40	12,30
Basicidade (CaO/SiO ₂)	1,31	1,71	1,31

5.4.2.3 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

A Tabela 5.9 apresenta os compostos mineralógicos cristalizados presentes nas amostras de cimento (CPV ARI RS) e de escórias micronizadas E1, E2 e E3.

A amostra de cimento CP V-ARI é constituída principalmente por alita, belita, C₃A, C₄AF e, secundariamente, por gipsita, bassanita e cal livre.

As amostras de escória são constituídas por magnésio ferrita, wustita, hematita, calcita, quartzo, melilita, belita e Portlandita. A Portlandita corresponde à hidratação da CaO livre e a calcita é decorrente de sua carbonatação.

Tabela 5.9 Caracterização por difratometria de raios X das amostras de CPV ARI RS, escórias micronizadas E1, E2 e E3

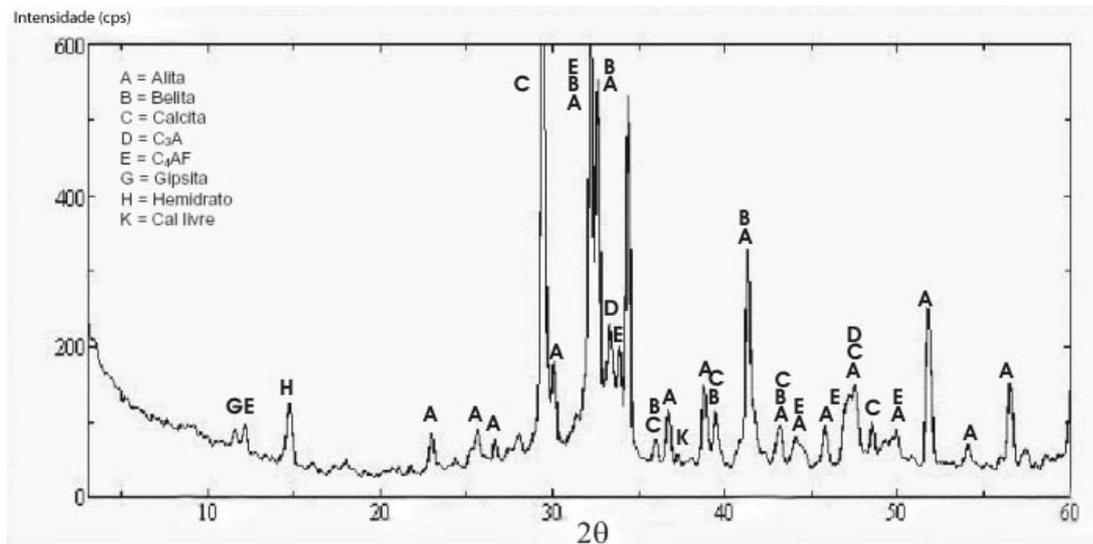
MINERAIS	FÓRMULA QUÍMICA	DISTÂNCIA INTERPLANAR PRINCIPAL (Å)	Frequência Relativa			
			CPV ARI RS	E1	E2	E3
Alita	Ca ₃ SiO ₅	2,78	++++	nd	nd	nd
Belita	Ca ₂ SiO ₄	2,75	++	++	++	++
Calcita	CaCO ₃	3,03	+++	++	+++	++
C ₃ A	Ca ₃ Al ₂ O ₆	2,69	++	nd	nd	nd
C ₄ AF	Ca ₄ Al ₂ Fe ₂ O ₁₀	2,65	++	nd	nd	nd
Cal Livre	CaO	2,41	tr	nd	nd	nd
Portlandita	Ca(OH) ₂	4,96	nd	tr	tr	++
Gipsita	CaSO ₄ .2H ₂ O	7,64	+	nd	nd	nd
Bassanita	CaSO ₄ . ¹ / ₂ H ₂ O	6,05	+	nd	nd	nd
Magnésio Ferrita	MgFe ₂ O ₄	2,54	nd	++++	+++	+++
Melilita	Ca ₂ MgSi ₂ O ₇	2,88	nd	+++	++	++
Quartzo	SiO ₂	3,34	nd	nd	++	++++
Hematita	Fe ₂ O ₃	2,70	nd	++	++	+++
Wustita	FeO	2,14	nd	+++	+	+

Simbologia: nd = não detectado
tr = traços
+ = presente
++ = pouco freqüente
+++ = freqüente
++++ = muito freqüente

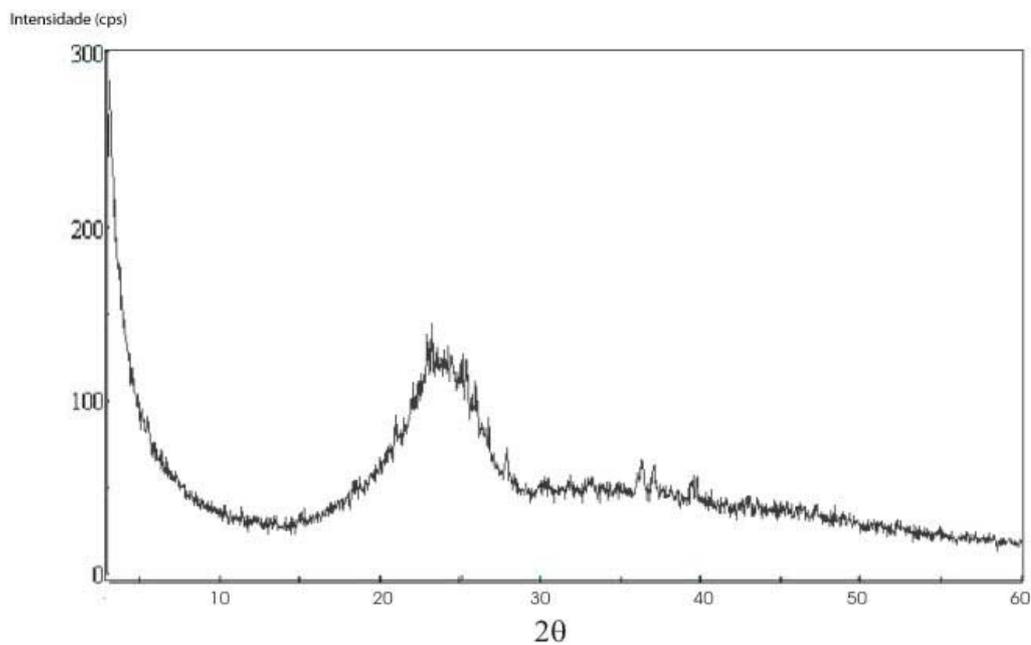
Nota: A frequência relativa das fases está fundamentada na altura dos picos de difração, cuja intensidade é função do teor, da simetria e do grau de cristalinidade dos constituintes

Os difratogramas da figura 5.15 mostram, para o CPV ARI RS, estrutura cristalina e para a escória de alto-forno, estrutura amorfa.

Os difratogramas da figura 5.16, 5.17 e 5.18 indicam que as escórias E1, E2 e E3 apresentam estruturas cristalinas.



a)



b)

Figura 5.15 Difratograma de raios-X: a) CPV ARI RS (estrutura cristalina) e b) escória de alto-forno (estrutura amorfa)

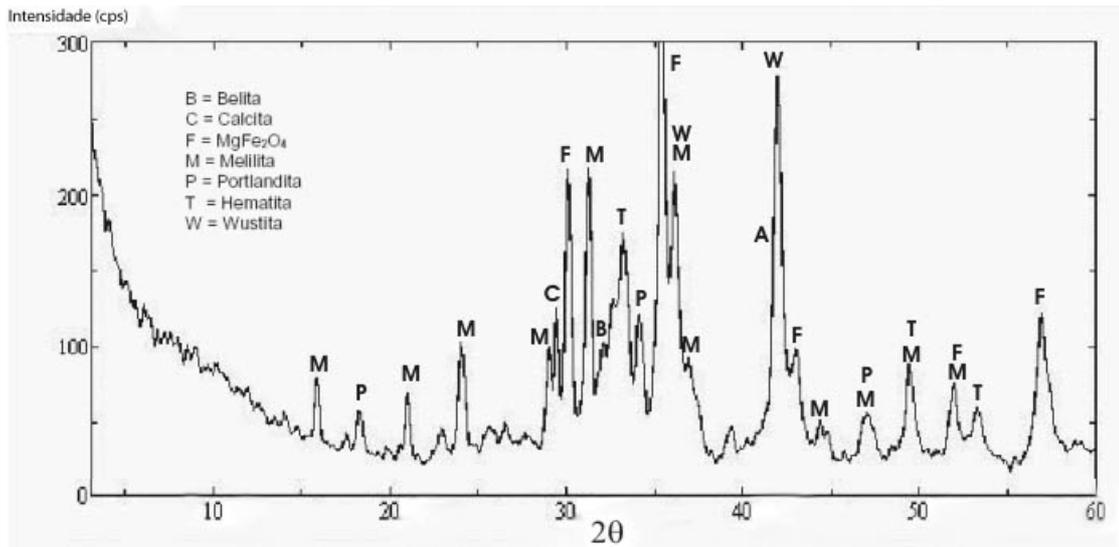


Figura 5.16 Difratograma de raios-X da escória micronizada E1

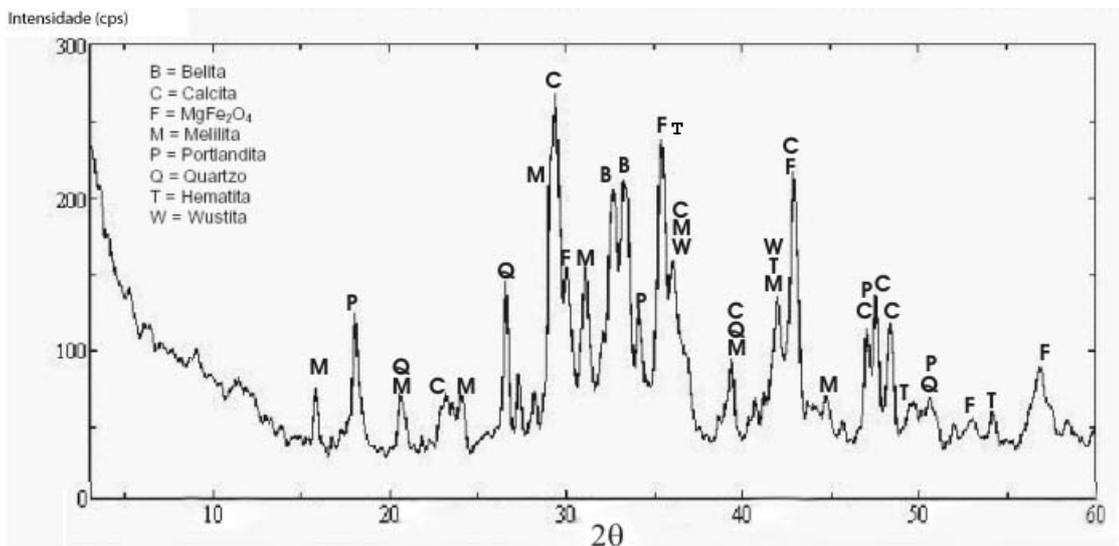


Figura 5.17 Difratograma de raios-X da escória micronizada E2

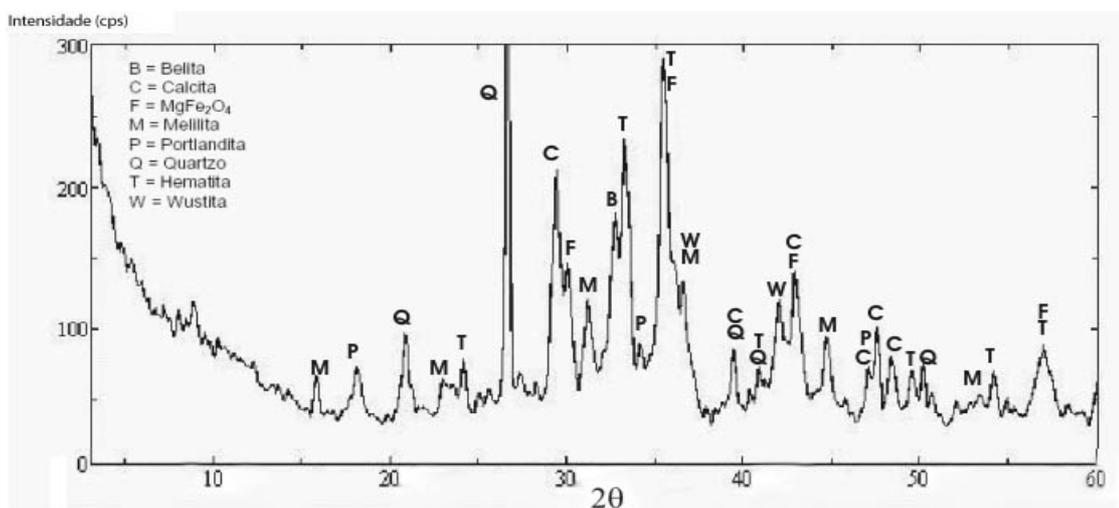


Figura 5.18 Difratograma de raio x da escória micronizada E3

5.4.2.4 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

As figuras 5.19, 5.20 e 5.21 apresentam micrografias das escórias E1, E2 e E3 (2000 x).

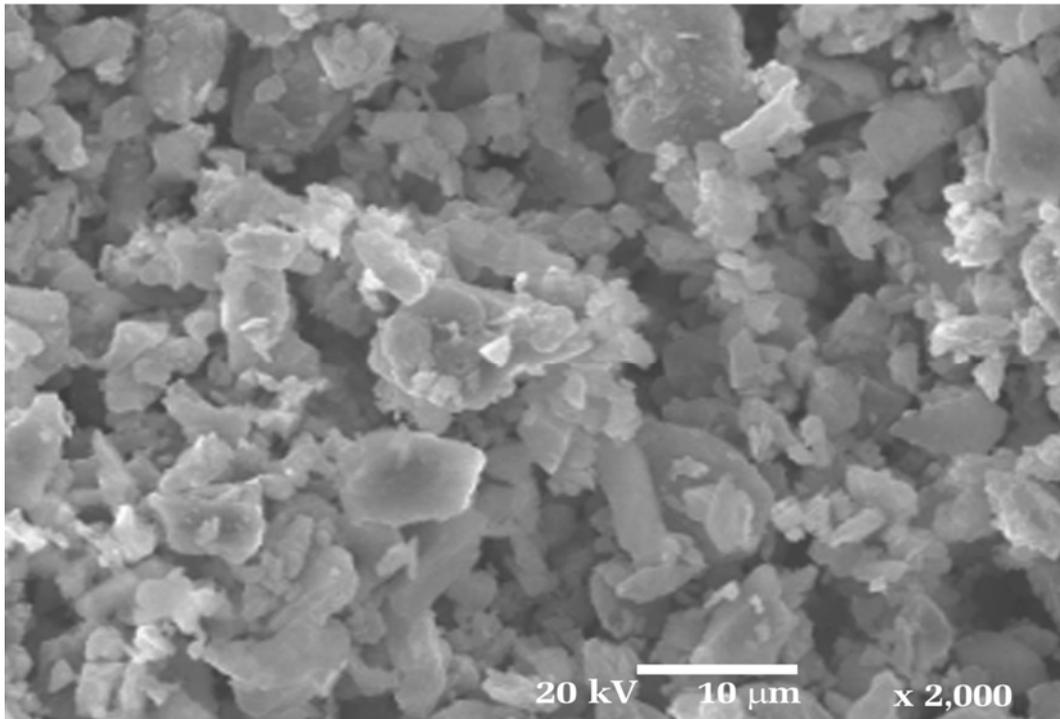


Figura 5.19 Micrografia (MEV) obtida por varredura com elétrons secundários da escória micronizada E1 (2000 X)

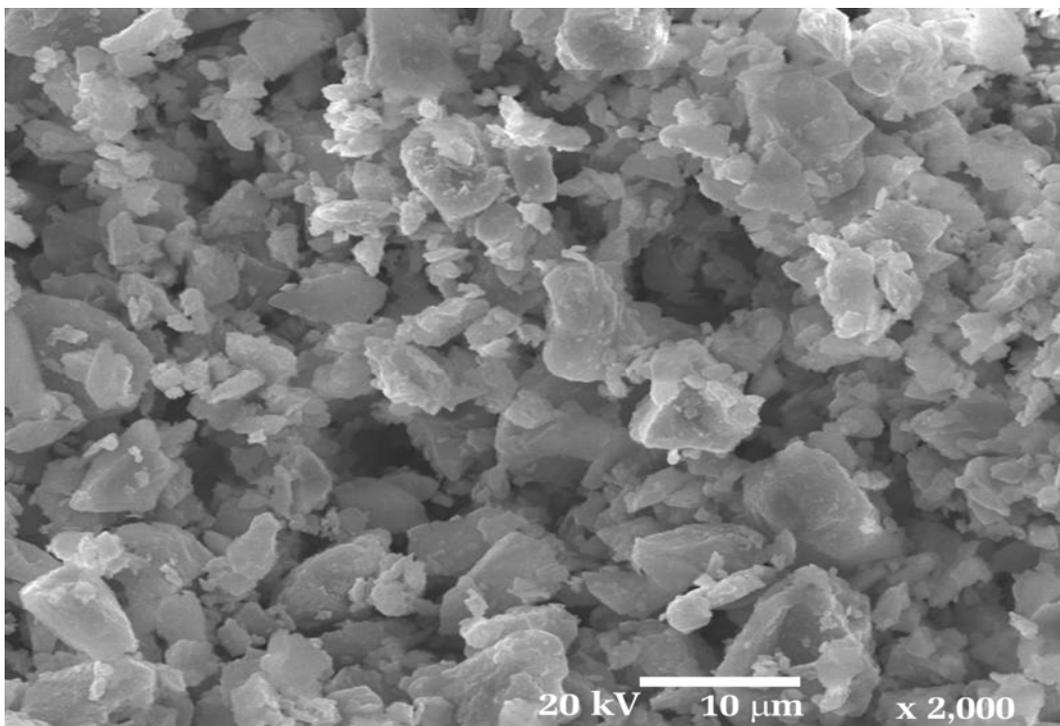


Figura 5.20 Micrografia (MEV) obtida por varredura com elétrons secundários da escória micronizada E2 (2000 X)

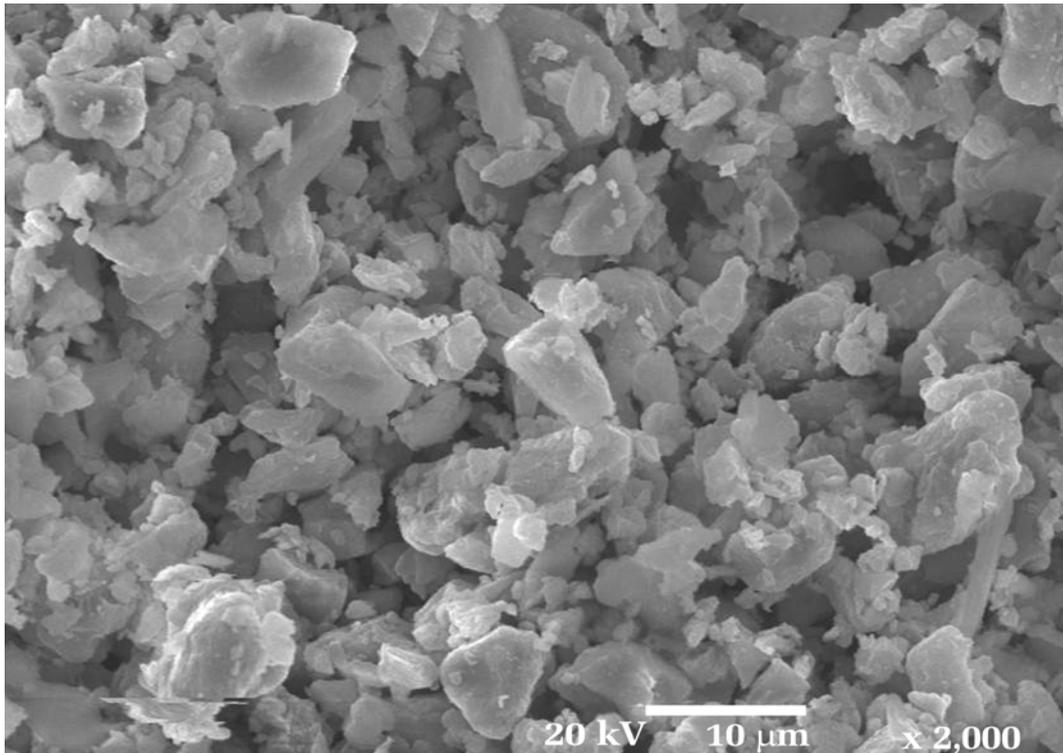


Figura 5.21 Micrografia (MEV) obtida por varredura com elétrons secundários da escória micronizada E3 (2000 X)

As micrografias das figuras 5.19, 5.20 e 5.21 mostram predominantemente para os grãos das escórias micronizadas E1, E2 e E3, formas não-lamelares e distribuição granulométrica com predominância de mais de 50% dos grãos das amostras com diâmetros inferiores a $4\mu\text{m}$ e diâmetro médio de $3,17\mu\text{m}$, $4,36\mu\text{m}$ e $3,68\mu\text{m}$, respectivamente, para as escórias micronizadas E1, E2 e E3, conforme são mostrados os resultados de granulometria a laser na tabela 5.7.

5.4.2.5 CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL

A caracterização ambiental de um resíduo sólido é definida pelos critérios mostrados na NBR 10004 (2004). Foram realizados ensaios de lixiviação e de solubilização.

As tabelas 5.10 e 5.11 apresentam a caracterização das escórias E1, E2 e E3 em relação aos ensaios ambientais de Lixiviação (NBR 10005, 2004) e Solubilidade (NBR 10006, 2004).

Nota-se na tabela 5.11 que os valores diferenciados para as escórias E1, E2 e E3 em relação ao alumínio, sódio, fluoreto e sulfato são atribuídos às variações da composição química da sucata que entra para a produção do aço. Os demais constituintes químicos, para as três escórias, apresentam concentrações semelhantes.

Tabela 5.10 Ensaio de Lixiviação (NBR – 10005, 2004) das escórias E1, E2 e E3

PARÂMETROS	UNIDADES	LIMITE MÁXIMO NO EXTRATO (mg / L) ANEXO G – LISTAGEM Nº 7 DA NBR 10004 (2004)	EXTRATO DE LIXIVIADO (mg / L)		
			E1	E2	E3
Arsênio	mg As/L	5,0	< 0,010	< 0,010	< 0,010
Bário	mg Ba/L	100	1,57	0,87	0,71
Cádmio	mg Cd/L	0,5	< 0,013	< 0,004	< 0,004
Chumbo Total	mg Pb/L	5,0	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Cromo Total	mg Cr/L	5,0	< 0,016	< 0,016	< 0,016
Mercúrio	mg Hg/L	0,1	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Prata	mg Ag/L	5,0	< 0,009	< 0,009	< 0,009
Selênio	mg Se/L	1,0	< 0,003	< 0,003	< 0,003
Fluoreto	mg F/L	150	2,23	4,82	2,17

Tabela 5.11 – Ensaio de Solubilização (NBR – 10006, 2004) das escórias E1, E2 e E3.

PARÂMETROS	UNIDADES	LIMITE MÁXIMO NO EXTRATO (mg / L) ANEXO H – LISTAGEM Nº 8 DA NBR 10004(2004)	RESULTADOS (mg / L)		
			E1	E2	E3
Alumínio	mg Al/L	0,2	5,70	<0,20	<0,20
Arsênio	mg As/L	0,05	< 0,010	< 0,010	< 0,010
Bário	mg Ba/L	1,0	<0,30	< 0,30	< 0,41
Cádmio	mg Cd/L	0,005	<0,004	< 0,004	< 0,004
Chumbo Total	mg Pb/L	0,05	0,029	< 0,05	< 0,05
Cobre	mg Cu/L	1,0	<0,010	< 0,010	< 0,010
Cromo Total	mg Cr/L	0,05	< 0,016	< 0,016	< 0,016
Ferro	mg Fe/L	0,3	<0,012	0,170	0,210
Manganês	mg Mn/L	0,1	<0,012	< 0,012	< 0,012
Mercúrio	mg Hg/L	0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Prata	mg Ag/L	0,05	< 0,009	< 0,009	< 0,009
Selênio	mg Se/L	0,01	< 0,003	< 0,003	< 0,003
Sódio	mg Na/L	200,0	2,65	0,578	1,16
Zinco	mg Zn/L	5,0	0,020	< 0,001	< 0,001
Cianeto	mg CN/L	0,1	<0,017	<0,017	< 0,017
Cloreto	mg Cl/L	250,0	32	28	24
Dureza	mg CaCO3/L	500,0	121	56	60
Fenóis	mg C6H5OH/L	0,001	< 0,001	<0,001	<0,001
Fluoreto	mg F/L	1,5	2,64	2,74	2,46
Nitrato	mg N/L	10,0	< 0,017	< 0,017	< 0,017
Sulfato	mg SO4/L	400,0	12	<2	<2
Surfactantes	mg LAS/L	0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2

A caracterização ambiental das escórias foi realizada segundo os métodos de ensaios de lixiviação (NBR 10005, 2004) e solubilização (NBR 10006, 2004), sendo que os resultados encontrados nos respectivos ensaios foram analisados por meio da NBR 10004 (2004), a qual classifica se um resíduo é considerado perigoso ou não, bem como o seu comportamento em relação a ser inerte ou não. Baseado nestes critérios classifica-se a escória em relação ao seu desempenho ambiental.

Pela NBR 10004 (2004), os valores listados nas tabelas 5.10 e 5.11 indicam que as escórias E1, E2 e E3 são classificadas como sendo resíduos sólidos, classe IIA, não perigosos e não inertes.

5.4.2.6 CARACTERIZAÇÃO QUANTO À ATIVIDADE POZOLÂNICA

A caracterização das escórias micronizadas E1, E2 e E3, quanto à atividade pozolânica, foi determinada baseada em dois métodos de ensaio: método químico (NBR 5753 (1991) – Cimentos – método de determinação da atividade pozolânica em cimento Portland pozolânico) e método das argamassas de cimento (NBR 5752 (1992) – Materiais pozolânicos – determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento).

No método químico preconizado pela NBR 5753 (1991), também conhecido como FRATINI, a atividade pozolânica é avaliada comparando a quantidade de Ca(OH)_2 presente na fase líquida em contato com o cimento hidratado, com a quantidade de Ca(OH)_2 que poderia saturar um meio de mesma alcalinidade.

No método das argamassas de cimento, o índice de atividade pozolânica é obtido pela relação, em percentagem, da resistência à compressão aos 28 dias de idade de argamassa moldada com a mistura de cimento e material pozolânico e de argamassas moldadas somente com o cimento. Para a produção das argamassas foi utilizada areia normal do IPT (NBR 7214, 1990). Para as argamassas moldadas com mistura de cimento e escória, o teor de substituição de cimento foi de 35%, em volume, conforme preconiza a NBR 5752 (1992). As quantidades de água necessárias para produzir argamassa com índice de consistência de (225 ± 5) mm, conforme preconiza a NBR 5752 (1992), foram determinadas conforme estabelece a NBR 7215 (1996) – Cimento Portland – determinação da resistência à compressão.

A tabela 5.12 apresenta as propriedades físicas e químicas do CPI S 32 utilizado na pesquisa, sendo que os dados foram fornecidos pelo fabricante. Neste ensaio, foi utilizado o cimento Portland CP I S 32, pelo fato deste cimento não conter adições.

TABELA 5.12 Propriedades químicas e físicas do CPI S 32

Propriedades químicas (%)		Propriedades físicas		
CaO	61,12	Finura	(#200)	1,12 %
SiO₂	19,62		(#325)	6,8 %
Fe₂O₃	2,14	Área Específica		330 m ² /kg
MgO	4,13	Pega	Início	190 mm
Al₂O₃	4,42		Fim	240 mm
SO₃	2,64	Expansibilidade à quente		0,5 mm
Perda ao Fogo	3,14	Resistência à compressão (MPa)	1 dia	14,5
Resíduo Insolúvel	0,64		3 dias	28,6
Cal Livre	1,56		7 dias	33,7
Equivalente Alcalino	0,65		28 dias	39,2

TABELA 5.13 Atividade pozolânica da escória micronizada E1 – Método Químico / NBR 5753 (1991)

MÉTODO QUÍMICO (NBR 5753, 1991)			
AMOSTRA	Milimoles (OH ⁻ /L)	Milimoles (CaO/L)	Pozolanicidade
E 1	10,20	3,76	SIM

TABELA 5.14 Pozolanicidade da escória micronizada E1 – Método da Argamassa de Cimento / NBR 5752 (1992)

MÉTODO DAS ARGAMASSAS DE CIMENTO (NBR 5752, 1992)					
AMOSTRA	Água / (cimento + escória)	Água requerida (%)	Consistência (mm)	Tensões (MPa)	Índice de Atividade Pozolânica (%)
35% E1+ 65% CPI S 32 (em volume)	0,48	97	229	31,19	91,30
100% CPI S 32	0,50	100	226	34,16	100,00
Especifica ções da NBR 12653 (1992)	-	<110	(225 ± 5)	-	≥ 75

A tabela 5.13 indica que a escória E1 apresenta atividade pozolânica quando avaliada pelo método químico NBR 5753 (1991).

A tabela 5.14 indica que a escória E1 apresenta atividade pozolânica quando avaliada pelo método das argamassas de cimento NBR 5752 (1992).

TABELA 5.15 Atividade pozolânica da escória micronizada E2 – Método Químico / NBR 5753 (1991)

MÉTODO QUÍMICO (NBR 5753, 1991)			
AMOSTRA	Milimoles (OH ⁻ /L)	Milimoles (CaO/L)	Pozolanidade
E2	22,00	6,60	SIM

TABELA 5.16 Pozolanidade da escória micronizada E2 – Método da Argamassa de Cimento / NBR 5752 (1992)

MÉTODO DAS ARGAMASSAS DE CIMENTO (NBR 5752, 1992)					
AMOSTRA	Água / (cimento + escória)	Água requerida (%)	Consistência (mm)	Tensões (MPa)	Índice de Atividade Pozolânica (%)
35% E2+ 65% CPI S 32 (em volume)	0,47	98	227	32,74	95,84
100% CPI S 32	0,50	100	226	34,16	100,00
Especificações da NBR 12653 (1992)	-	<110	(225 ± 5)	-	≥75

A tabela 5.15 indica que a escória E2 apresenta atividade pozolânica quando avaliada pelo método químico NBR 5753 (1991).

A tabela 5.16 indica que a escória E2 apresenta atividade pozolânica quando avaliada pelo método das argamassas de cimento NBR 5752 (1992).

TABELA 5.17 Atividade pozolânica da escória micronizada E3 – Método Químico / NBR 5753 (1991)

MÉTODO QUÍMICO (NBR 5753, 1991)			
AMOSTRA	Milimoles (OH ⁻ /L)	Milimoles (CaO/L)	Pozolanidade
E3	11,40	3,06	SIM

TABELA 5.18 Pozolanidade da escória micronizada E3 – Método da Argamassa de Cimento / NBR 5752 (1992)

MÉTODO DAS ARGAMASSAS DE CIMENTO (NBR 5752, 1992)					
AMOSTRA	Água / (cimento + escória)	Água requerida (%)	Consistência (mm)	Tensões (MPa)	Índice de Atividade Pozolânica (%)
35% E3 + 65% CPI S 32 (em volume)	0,47	98	228	32,33	94,64
100% CPI S 32	0,50	100	226	34,16	100,00
Especificações da NBR 12653 (1992)	-	<110	(225 ± 5)	-	≥75

A tabela 5.17 indica que a escória E3 apresenta atividade pozolânica quando avaliada pelo método químico NBR 5753 (1991).

A tabela 5.18 indica que a escória E3 apresenta atividade pozolânica quando avaliada pelo método das argamassas de cimento NBR 5752 (1992).

Os resultados dos ensaios encontrados para as escórias micronizadas E1, E2 e E3, pelo método químico (NBR 5753, 1991) e método das argamassas de cimento (NBR 5752, 1992), estão em conformidade com o que preconiza a especificação da NBR 12653 (1992) – Materiais pozolânicos.

A figura 5.22 mostra o diagrama de pozolanicidade, ilustrando o teor de CaO em função da alcalinidade total, obtida aos 7 dias

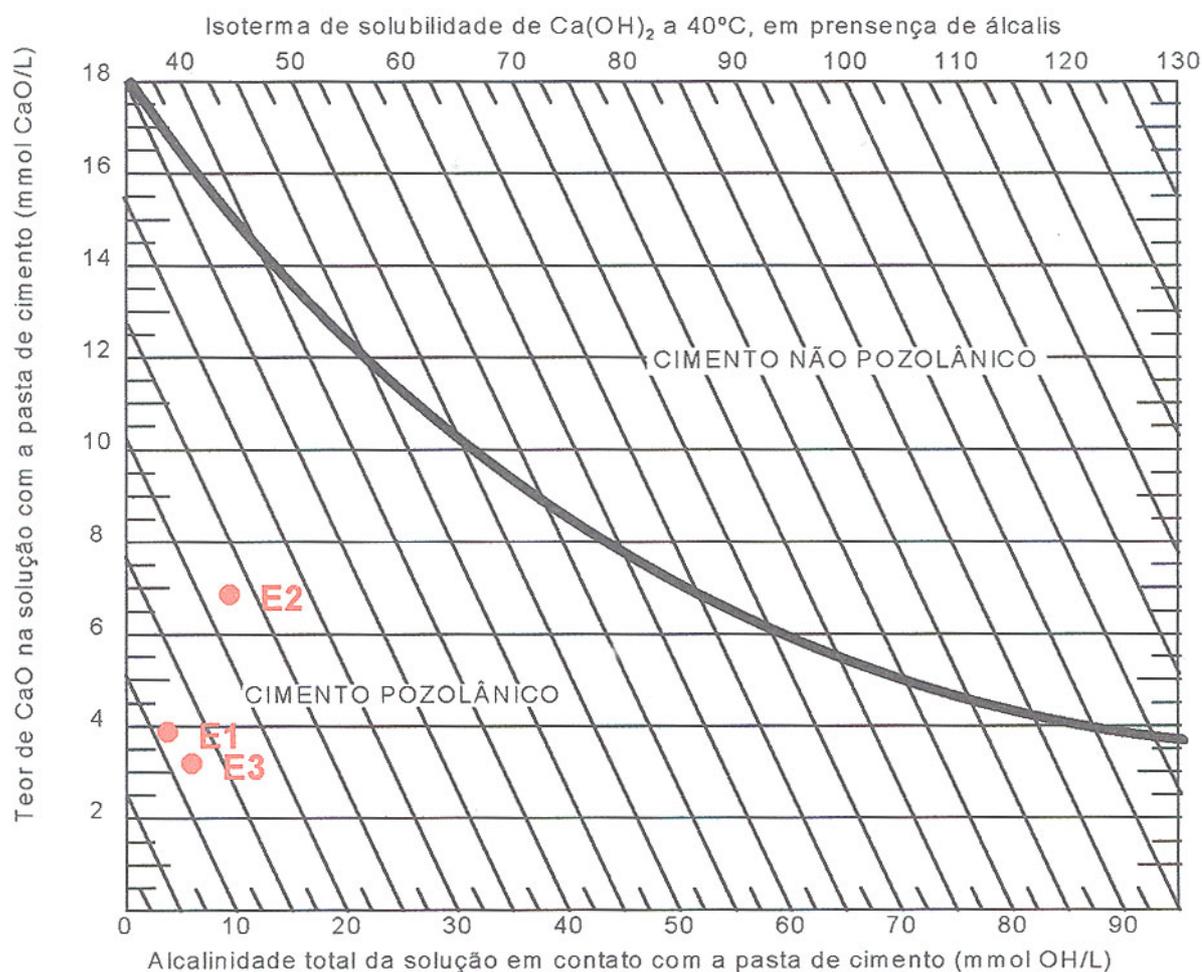


Figura 5.22 Diagrama de pozolanicidade das escórias micronizadas E1, E2, E3 de acordo com a NBR 5753 (1991), ilustrando o teor de CaO em função da alcalinidade total medida aos 7 dias de idade

Estudos realizados por GEYER (2001) e MASUERO (2001), pesquisando a pozolanicidade de escórias de aciaria elétrica geradas por uma siderúrgica do estado do Rio Grande do Sul, indicaram pelo método químico (NBR 5753) que as escórias não apresentaram atividade pozolânica. O mesmo resultado ocorreu quando GUMIERI (2002) pesquisou uma escória LD gerada por uma siderúrgica do estado de Minas Gerais. Tanto para o trabalho de MASUERO (2001) como o de GUMIERI (2002), mostram que as respectivas escórias de aciaria só desenvolveram atividade pozolânica após sofrerem processo de resfriamento brusco.

5.4.2.7 GRAU DE VITRIFICAÇÃO

O grau de vitrificação foi determinado pelo método MAC MASTER, realizado no laboratório da Associação Brasileira de Cimento Portland. A análise do grau de vitrificação de uma escória, através de microscópio óptico de luz transmitida, consiste em observar na amostra a existência de luminescência, a qual indica a presença de fase cristalina. Quanto mais escura a luminescência, menor será o seu grau de vitrificação (MASUERO, 2001).

As amostras de escória micronizada E1, E2 e E3 revelaram-se 100% cristalizadas, não apresentando porções vítreas ou amorfas.

MASUERO (2001), ao resfriar bruscamente uma escória de aciaria elétrica (ACIGRAN), procedente de uma siderúrgica do Rio Grande do Sul, obteve um grau de vitrificação de 98,38%. Este valor é considerado elevado em termos de vitrificação quando comparado com dados médios obtidos para a escória granulada de alto-forno (EGAF), que deve ser superior a 90%.

GUMIERI (2002), após resfriar bruscamente uma escória de aciaria LD procedente de uma siderúrgica de Minas Gerais, encontrou que 82% da amostra ainda encontravam-se cristalizada.

LEA (1970) cita que as escórias granuladas de alto-forno possuem grau de vitrificação superior a 95%.

5.4.2.8 EXPANSÃO

5.4.2.8.1 EXPANSIBILIDADE LE CHATELIER (NBR 11582, 1991)

A tabela 5.19 mostra os resultados obtidos pelo ensaio de expansibilidade preconizado pela NBR 11582 (1991).

Tanto nos ensaios a frio quanto a quente, a conformidade máxima de 5 mm para abertura das agulhas foi atendida.

Tabela 5.19 Expansibilidade de escórias micronizadas (50% de escória micronizada+ 50% de CPV ARI RS) segundo a NBR 11582 (1991)

Ensaio	Amostras								
	Leitura Final (mm)								
	E1			E2			E3		
À Frio (mm)	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	1,4	1,2	1,6	0	0	0	0	0	0
	Valor Médio (mm)								
	1,4			0			0		
À Quente (mm)	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	1,4	1,6	1,8	1,2	1,4	1,2	0	1,2	1,4
	Valor Médio (mm)								
	1,6			1,27			0,87		

GUMIERI (2001), ao pesquisar a expansibilidade Le Chatelier (NBR 11582, 1991) de uma escória LD resfriada lentamente, que substituiu parte do cimento Portland por escória, em massa, obteve quando da realização do ensaio pelo método a quente os seguintes valores de expansibilidade:

- 70% de escória + 30% de cimento: expansão 24 mm (idade da escória de 9 meses);
- 70% de escória + 30% de cimento: expansão 27 mm (idade da escória de 3 meses);
- 70% de escória + 30% de cimento: expansão 4 mm (idade da escória de 3 meses);
- 70% de escória + 30% de cimento: expansão 0 mm (idade da escória de 3 meses);
- 100% de cimento 0 mm.

MASUERO (2001), ao estudar a expansibilidade Le Chatelier, para escória de aciaria elétrica, resfriada lentamente, encontrou um valor médio de expansibilidade de 1,01%, para o ensaio a quente e um valor médio de 0% para o ensaio a frio. Para a ACIGRAN, que foi a escória de aciaria resfriada bruscamente, o valor médio de expansibilidade foi de 0,1%.

GEYER (2001), ao estudar a expansibilidade Le Chatelier para escórias resfriadas lentamente com idade superior a seis meses, encontrou valor inferior a 5 mm de expansão.

Os resultados de expansibilidade Le Chatelier, encontrados por GUMIERI (2001), foram superiores os encontrados por MASUERO (2001) e GEYER (2001) em função das escórias de aciaria LD apresentarem maior teor de óxido de cálcio livre que as escórias de aciaria elétrica.

5.4.2.8.2 EXPANSIBILIDADE PELO MÉTODO ADAPTADO DAS BARRAS – ASTM C 1260 (1994)

O ensaio das barras foi realizado segundo o método preconizado pelo National Building Research do Instituto da África do Sul – NBRI (FURNAS, 1997) e normalizado como ASTM C 1260 (1994) – “Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates – mortar – bar – method”.

O método é proposto originalmente para avaliar a reação álcali-agregado, através da variação de comprimento de barras de argamassa, sendo que, neste estudo, foi adaptada para avaliações de escórias de aciaria elétrica.

Conforme sugerido por diversos pesquisadores (MACHADO, 2000; MANCIO, 2001; MASUERO, 2001 e GUMIERI, 2002), foi feita em relação ao método original do NBRI uma adaptação onde a imersão das barras durante o ensaio foi em água e não em hidróxido de sódio.

Foram moldadas barras de referência com CPV ARI RS e barras com 50% de CP ARI RS e 50% de escória micronizada E1, E2 e E3, respectivamente.

Para moldagem das barras de argamassas (2,5 cm x 2,5 cm x 28,0 cm) foi utilizado o traço: 1 : 2,25, com relação água/cimento fixa igual a 0,47. A areia utilizada no traço foi peneirada até atingir as faixas granulométricas indicadas na Tabela 5.20.

Tabela 5.20 Granulometria do agregado miúdo utilizado para avaliação de expansibilidade das escórias micronizadas E1, E2 e E3 em ensaio de barras de argamassa (ASTM C 1260; 1994)

Material retido entre as peneiras (mm)	% retida
4,8 – 2,4	10
2,4 – 1,2	25
1,2 – 0,6	25
0,6 – 0,3	25
0,3 – 0,15	15

Após 24 horas, as barras são desformadas e colocadas em um recipiente para cura em água, o qual é gradualmente aquecido desde a temperatura ambiente até atingir 75° a 80°C. As barras são conservadas nestas condições por 24 horas.

Após esse período de estabilização, as barras são removidas do recipiente de cura, uma de cada vez, e rapidamente medidos seus comprimentos em sala climatizada (23±2°C) para estabelecer a leitura inicial a 80°C. Cada medida, feita com precisão de 0,001mm, leva menos de 20 segundos, com o objetivo de não resfriar significativamente a argamassa, conforme preconiza o método (figura 5.23).

Após a leitura inicial as barras retornam ao recipiente com água a 80°C ± 2°C, sendo medidos seus comprimentos periodicamente e calculadas suas expansões lineares. A metodologia estabelece que a expansão média de 3 prismas deve ser calculada para cada idade.

Pelo método acelerado das barras o aglomerante é considerado potencialmente reativo, levando uma barra à expansão, quando aos 12 dias de ensaio o valor da expansão medida é superior a 0,11% (FURNAS, 1997).

Neste estudo, procurou-se avaliar a expansão que a escória micronizada poderia sofrer quando submetida ao ensaio.

As tabelas 5.21 a 5.23 e as figuras 5.24 a 5.26 indicam que as respectivas adições de escórias não contribuíram para um aumento expressivo da expansão da argamassa pela metodologia aplicada, indicando, em relação à expansibilidade, serem inócuos.



Figura 5.23

Expansão medida pelo Método das Barras: a) Barras de argamassa, imersas em água a 80°C ± 2°C e b) Medidor digital de expansão linear

Tabela 5.21

Expansibilidade potencial de misturas de “50% de CPV ARI RS e 50% de escória micronizada E1” pelo método adaptado das barras – Escória E1 (50/50)

Amostra	Idade (dias) / Variação de comprimento (%)															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
CPV ARI RS	0,006	0,009	0,009	0,011	0,008	0,008	0,007	0,009	0,007	0,007	0,006	0,002	0,014	0,012	0,009	0,010
E1 (50/50)	0,032	0,043	0,040	0,052	0,040	0,052	0,040	0,043	0,052	0,050	0,052	0,062	0,050	0,052	0,050	0,052

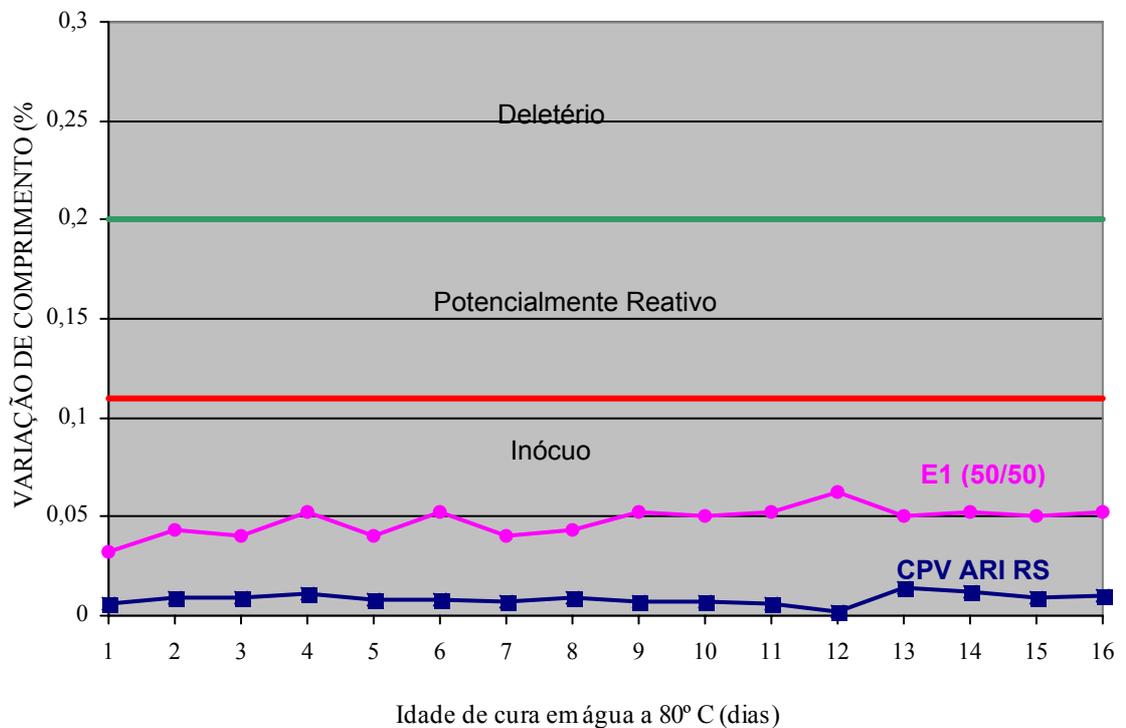


Figura 5.24 Variação de comprimento (%) de barras submetidas ao ensaio de expansão – Escória E1 (50/50) e CPV ARI RS.

Tabela 5.22

Expansibilidade potencial de misturas de “50% de CPV ARI RS e 50% de escória micronizada E2” pelo método adaptado das barras – Escória E2 (50/50)

Amostra	Idade (dias) / Variação de comprimento (%)															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
CPV ARI RS	0,006	0,009	0,009	0,011	0,008	0,008	0,007	0,009	0,007	0,007	0,006	0,002	0,014	0,012	0,009	0,010
E2 (50/50)	0,009	0,013	0,015	0,017	0,015	0,015	0,013	0,015	0,015	0,014	0,013	0,010	0,022	0,018	0,016	0,017

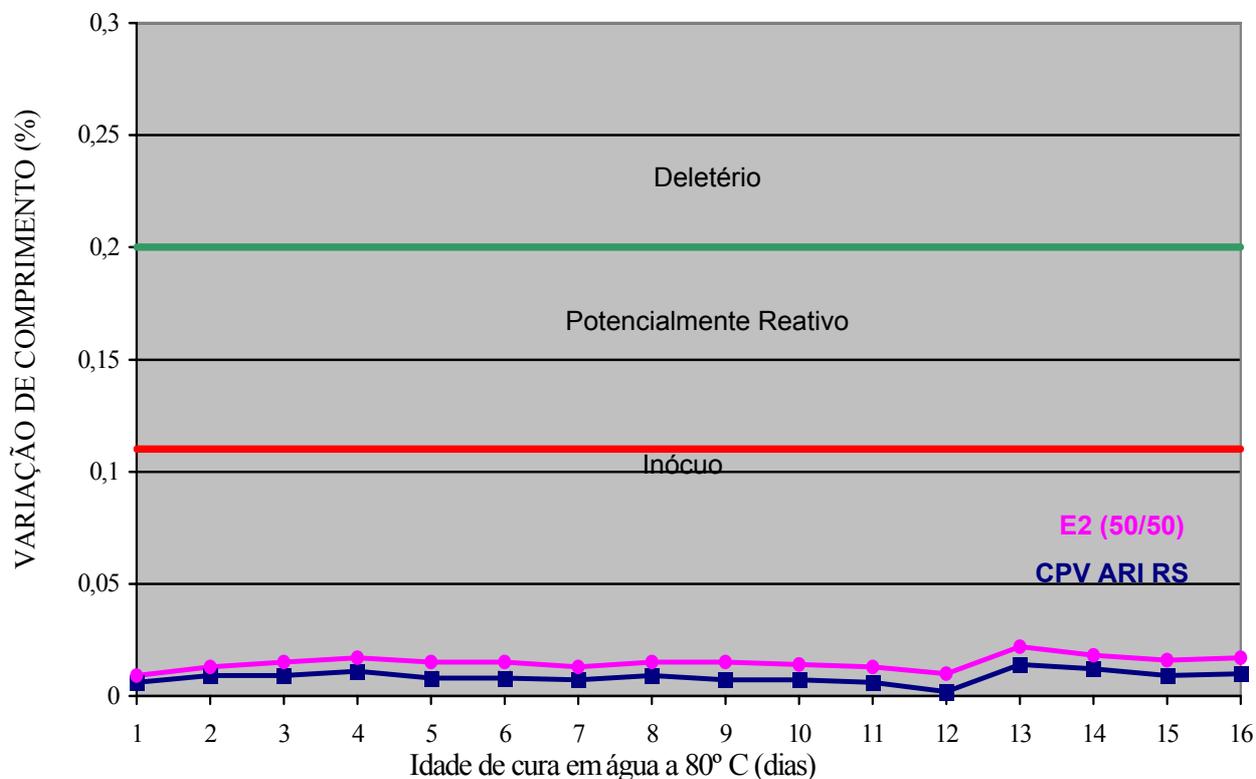


Figura 5.25 Variação de comprimento (%) de barras submetidas ao ensaio de expansão – Escória E2 (50/50) e CPV ARI RS

Tabela 5.23

Expansibilidade potencial de misturas de “50% de CPV ARI RS e 50% de escória micronizada E3” pelo método adaptado das barras – Escória E3 (50/50)

Amostra	Idade (dias) / Variação de comprimento (%)															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
CPV ARI RS	0,006	0,009	0,009	0,011	0,008	0,008	0,007	0,009	0,007	0,007	0,006	0,002	0,014	0,012	0,009	0,010
E3 (50/50)	0,008	0,012	0,010	0,009	0,012	0,015	0,015	0,015	0,013	0,014	0,012	0,010	0,015	0,017	0,018	0,019

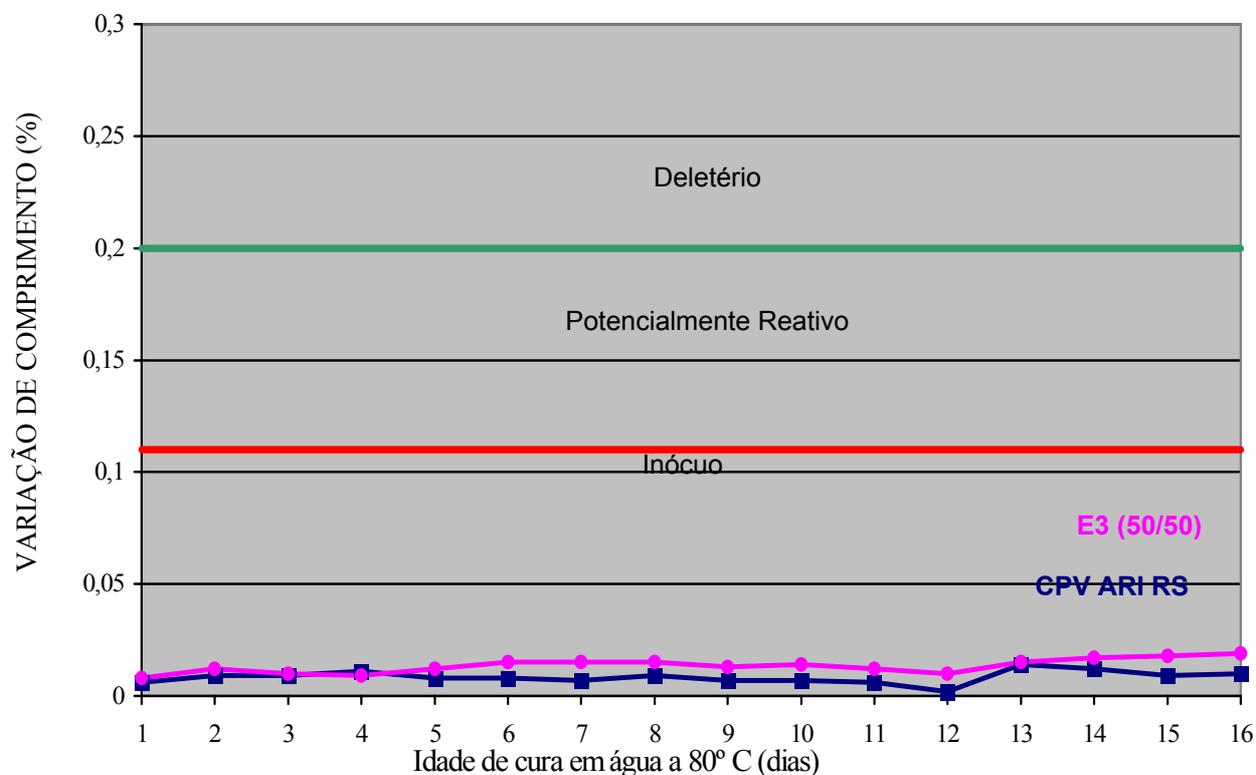


Figura 5.26 Variação de comprimento (%) de barras submetidas ao ensaio de expansão – Escória E3 (50/50) e CPV ARI RS.

MASUERO (2002), realizando o ensaio pelo método adaptado das barras, em uma escória verde, ou seja, recém-gerada, encontrou valores de expansão, aos 12 dias de idade, de 0,89%, indicando que esta escória tinha comportamento deletério. Porém, ao granulá-la, o seu comportamento passou a ser inócuo em relação à expansão.

A escória LD pesquisada por GUMIERI (2002), e que foi resfriada lentamente, indicou expansões inferiores ao limite preconizado pelo método adaptado das barras, que é de 0,11% aos 12 dias de idade.

5.4.2.8.3 EXPANSIBILIDADE PELO MÉTODO DA AUTOCLAVE ASTM C 151 (1993)

Neste ensaio são moldados três corpos-de-prova prismáticos de dimensões 2,5 cm x 2,5 cm x 25 cm constituídos de 50% de CPV ARI RS e 50% de escória micronizada. Com um dia de idade, estes corpos-de-prova são colocados em autoclave e submetidos à pressão de 2MPa e temperatura de 216°C, durante o período de três horas. Após o tratamento, o comprimento final é comparado com o inicial. A figura 5.27 mostra a autoclave e o medidor digital de expansão linear.

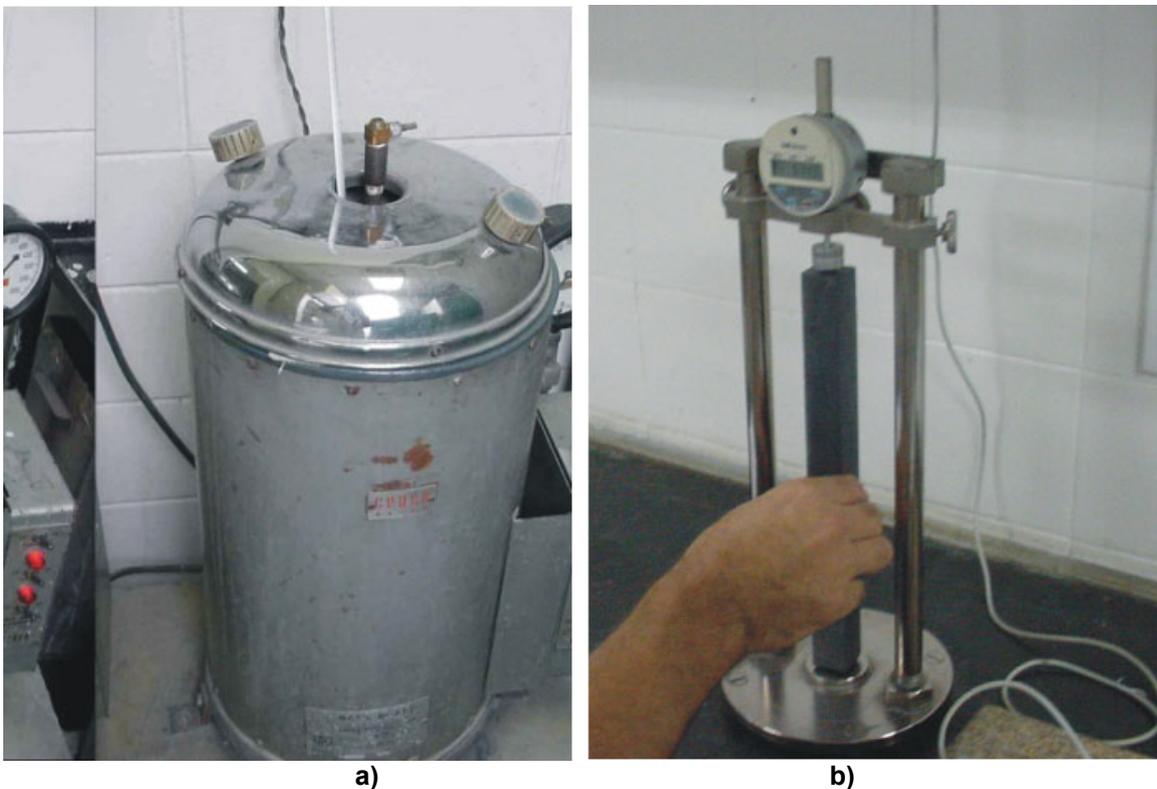


Figura 5.27 Ensaio de expansibilidade pelo método ASTM C 151, 1993: a) Autoclave e b) Medidor digital de expansão linear.

A norma ASTM C 1157 – “Standard Performance Specification for Blended Hydraulic Cement” preconiza o critério máximo de 0,8% como limite de estabilidade para um cimento ser considerado não expansivo.

O ensaio pelo método da autoclave sofre severas críticas de pesquisadores por entenderem que as condições de ensaio não condizem com a realidade das condições de exposição dos materiais quando do uso em obras correntes de engenharia (METHA e MONTEIRO, 1994).

A tabela 5.24 mostra os valores obtidos para as expansões, em corpos-de-prova de pastas moldados com o CPV ARI RS e as escórias micronizadas E1, E2 e E3, respectivamente.

Tabela 5.24 Expansibilidade pelo método da autoclave (ASTM C 151, 1993) das escórias micronizadas (50% de CPV ARI RS + 50% de escória micronizada) E1, E2 e E3.

AMOSTRA	ÁGUA DE CONSISTÊNCIA	
	NORMAL (%)	EXPANSÃO (%)
CPV ARI RS	28,60	0,027
E1 (50/50)	30,15	0,379
E2 (50/50)	30,20	0,158
E3 (50/50)	30,18	0,134

As expansões nos corpos-de-prova de pastas constituídas de misturas de 50% de CPV ARI RS e 50% das escórias micronizadas E1, E2 e E3 foram, respectivamente:

- E1 (50/50): 14 vezes superior a da argamassa elaborada com CPV ARI RS;
- E2 (50/50): 6 vezes superior a da argamassa elaborada com CPV ARI RS;
- E3 (50/50): 5 vezes superior a da argamassa elaborada com CPV ARI RS.

Os resultados mostram que os valores das expansões estão abaixo do limite máximo de 0,8% preconizado pela ASTM C 1157 – Standard Performance Specification for Blended Hydraulic Cement.

MASUERO (2002), ao pesquisar a expansibilidade de uma escória de aciaria elétrica recém-gerada, pelo método ASTM C 151 (1993), encontrou um valor de expansão de 2,04%, que é 155 vezes superior ao limite de 0,8% exigido pela ASTM C 1157. Porém, ao granular esta mesma escória,

o índice de expansibilidade caiu para 0,0012%, desta forma atendendo às exigências da ASTM C 1157.

5.4.2.8.4 EXPANSIBILIDADE DAS ESCÓRIAS PELO MÉTODO PTM 130 MODIFICADO / DER – MG

O ensaio de expansão preconizado pelo Departamento de Transporte da Pensilvânia, PENNSYLVANIA TEST METHOD - PTM 130 (1982), e que foi adaptado pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Minas Gerais (DER-MG), tem por objetivo determinar o grau de expansão da escória de aciaria quando compactado e testado em laboratório. O índice de expansão volumétrica máximo, medido aos 14 dias, para uma escória de aciaria, é de 3%.

A aparelhagem utilizada no ensaio é constituída de:

- i) fôrmas cilíndricas com um diâmetro interno de 15,24 cm \pm 0,013 cm e altura de 17,78 cm \pm 0,013 cm). O molde deve ser provido de um colar de extensão metálica de 5,08 cm de altura e uma base perfurada de metal (prato) de 0,95 cm de altura;
- ii) disco espaçador de metal com diâmetro de 15,08 cm e 6,14 cm de altura;
- iii) soquete metálico cilíndrico de 5,10 cm de diâmetro de face inferior plana, e peso de 2,49 kg, equipado com dispositivo para controle de altura de queda igual a 30,48 cm;
- iv) aparelhos medidores de expansão constituído de uma haste de metal ajustável e prato perfurado, com perfurações não excedendo 1,59 mm de diâmetro e um tripé metálico para suportar o extensômetro medidor da expansão vertical acumulada;
- v) dois pesos metálicos anelares ou quatro pesos metálicos providos de ranhuras, totalizando 4,54 kg, com diâmetro de 14,92 cm e um orifício central de 5,40 cm de diâmetro;
- vi) extensômetro: dial com leitura de 0,025 mm;
- vii) outros aparelhos: bandeja para mistura, esquadro, escala, tanque de imersão ou balde, papel filtro, pratos e estufa com temperatura de 71° C \pm 3° C.

Para o ensaio a amostra é constituída de material preliminarmente passante na peneira de 50 mm, desprezando a fração retida nessa peneira. A fração passada na peneira de 50 mm constituirá a amostra total, da qual serão retiradas as amostras para os ensaios de compactação e expansão.

Essa amostra será chamada amostra inicial. Da amostra inicial é obtida, com o auxílio do repartidor de amostra e por quarteamento, uma amostra representativa de no mínimo 6,36 kg. A seguir passa-se esta amostra representativa na peneira de 19 mm. Havendo material retido nessa peneira, procede-se a substituição do mesmo por igual quantidade em massa do material passando na peneira de 19 mm e retido na peneira de 4,8 mm.

Para a realização do ensaio é determinada a curva de umidade ótima e a densidade máxima de acordo com o método DNER-DPT 49/64, observando, entretanto, que a escória será compactada em três camadas iguais com 56 golpes por camada.

Foram utilizados no teste de expansão três corpos-de-prova, com umidade próxima à ótima, sendo que um deles se situa no ramo seco, outro ramo úmido e o outro entre os anteriores.

O procedimento de ensaio consiste preliminarmente em anotar a leitura inicial, tomada 30 minutos após a colocação na estufa com temperatura $71^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$. Esta medida é a “leitura base” e permite a expansão térmica dos aparelhos. As medidas de expansão devem ser anotadas no mínimo uma vez por dia (preferência à mesma hora do dia) por um período de sete dias. Adicionar água suficiente para que a amostra de teste permaneça completamente submersa. Esta água deve ser adicionada pelo menos duas horas antes da leitura do dia. Após o período de sete dias, a água deve ser removida do tanque ou do balde, e mantida a estufa à temperatura $71^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ e a condição de saturação (não submersa) deverá ser mantida por mais 7 dias. No mínimo 500 mL de água, deve ser adicionado à parte de cima da amostra todos o dia, a fim de que esta se mantenha completamente saturada.

A percentagem de expansão volumétrica é calculada dividindo-se a “leitura feita no extensômetro” menos a “leitura base” pela altura inicial da amostra 11,64 cm.

A figura 5.28 ilustra a realização do ensaio em escória de aciaria elétrica pelo Método PTM 130, e que foi adaptado pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Minas Gerais.

A amostra da escória E1 apresentou, aos 14 dias de ensaio, uma expansão de 4,06%, que é superior à especificação do ensaio (tabela 5.25 e figura 5.29). Este resultado é atribuído ao fato da escória E1 não ter passado por processo de envelhecimento no bota-fora.



a)



b)

Figura 5.28 Ensaio de expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG
a) ensaio submerso e b) ensaio saturado

Já as escórias E2 e E3 apresentam expansões aos 14 dias de ensaio, valores de 1,82% e 1,33%, respectivamente (tabelas 5.26 e 5.27 e figuras 5.30 e 5.31). Estes valores indicam que o tempo de envelhecimento influencia o fenômeno de expansibilidade da escória, contribuindo para sua estabilidade. Estes valores estão em conformidade com o que é preconizado pelas especificações da DAIDO STEEL (1993), RUBIO e CARRETERO (1991) e DNER (1994).

Tabela 5.25 Ensaio de expansão pelo método PTM 130 modificado / DER - MG – Escória E1

DIA	EXP. DIÁRIA	EXP. ACUMULADA
1	0,27	0,27
2	0,36	0,63
3	0,31	0,94
4	0,38	1,32
5	0,10	1,42
6	0,44	1,86
7	0,18	2,04
8	0,17	2,21
9	0,26	2,47
10	0,73	3,20
11	0,22	3,42
12	0,43	3,85
13	0,11	3,96
14	0,10	4,06

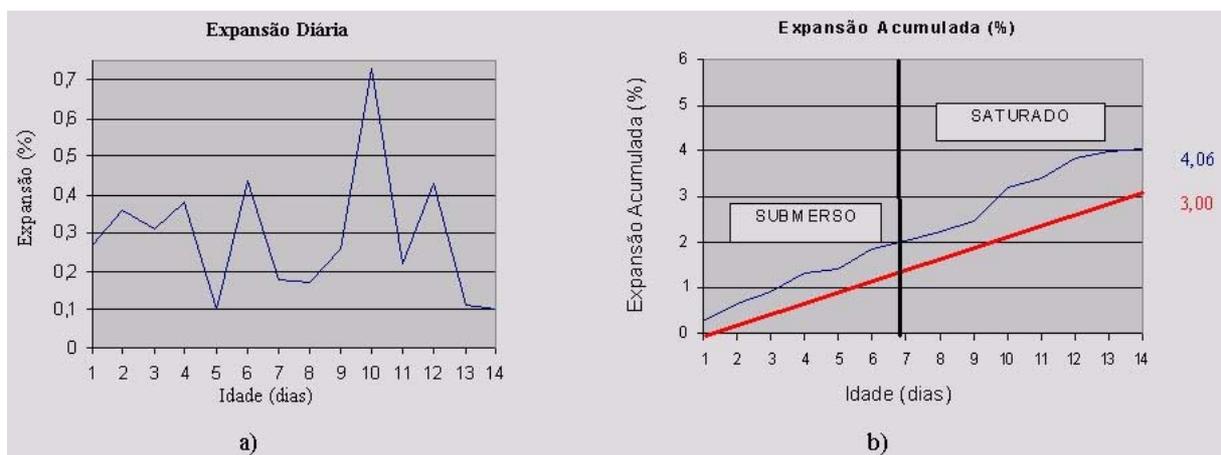


Figura 5.29 Expansão pelo método PTM 130 modificado / DER - MG – Escória E1: a) expansão diária (%) e b) expansão acumulada (%)

Tabela 5.26 Ensaio de expansão pelo método PTM 130 modificado / DER - MG – Escória E2

DIA	EXP. DIÁRIA	EXP. ACUMULADA
1	0,09	0,09
2	0,01	0,10
3	0,14	0,24
4	0,10	0,34
5	0,15	0,49
6	0,21	0,70
7	0,18	0,88
8	0,09	0,97
9	0,14	1,11
10	0,13	1,24
11	0,31	1,55
12	0,06	1,61
13	0,18	1,79
14	0,03	1,82

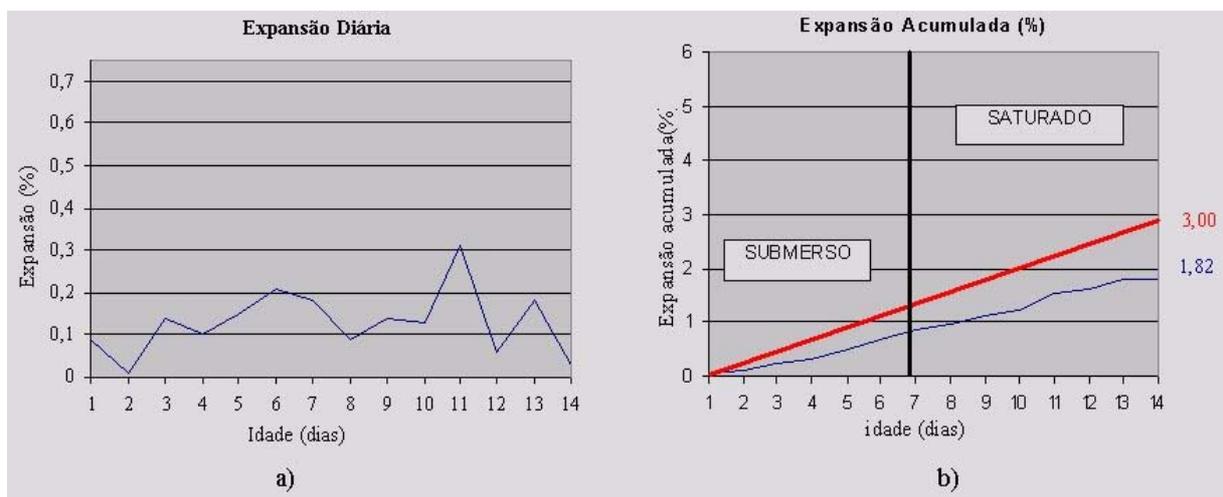


Figura 5.30 Expansão pelo método PTM 130 modificado / DER - MG – Escória E2: a) expansão diária (%) e b) expansão acumulada (%)

Tabela 5.27 Ensaio de expansão pelo método PTM 130 modificado / DER - MG – Escória E3

DIA	EXP. DIÁRIA	EXP. ACUMULADA
1	0,06	0,06
2	0,02	0,08
3	0,13	0,21
4	0,08	0,29
5	0,10	0,39
6	0,13	0,52
7	0,10	0,62
8	0,06	0,68
9	0,09	0,77
10	0,11	0,88
11	0,17	1,05
12	0,09	1,14
13	0,13	1,27
14	0,06	1,33

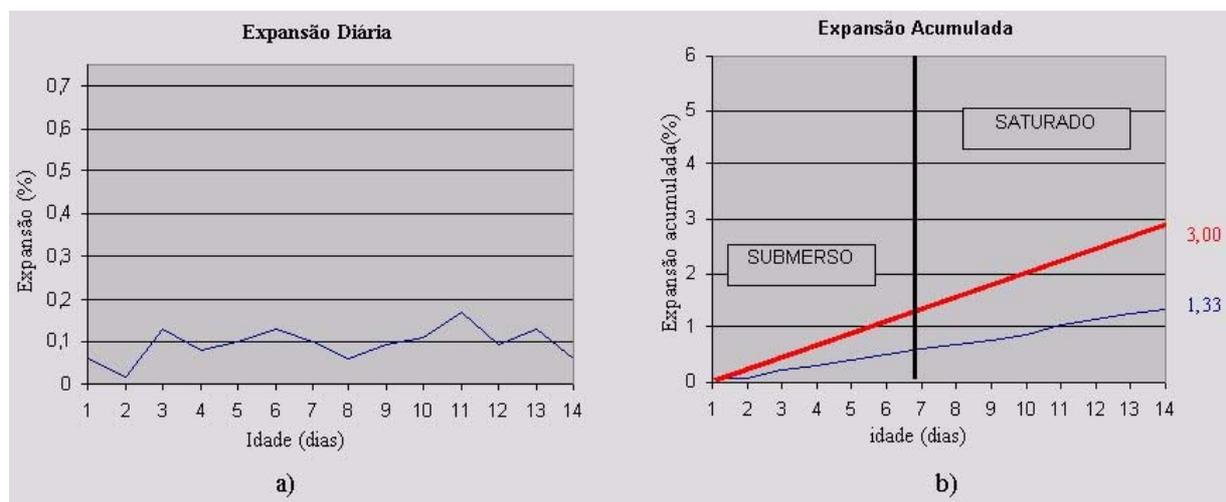


Figura 5.31 Expansão pelo método PTM 130 modificado / DER - MG – Escória E3: a) expansão diária (%) e b) expansão acumulada (%)

5.5 CONCLUSÕES

- i) Os ensaios de caracterização física, química, mineralógica, microestrutural e ambiental estão em conformidade com os dados publicados por pesquisadores nacionais (MACHADO, 2000; MANCIO, 2001; MASUERO, 2001 e GUMIERI, 2002) e internacionais (LIMA, 1999; MOTZ e GEISELER, 2001), dentre outros.
- ii) Nos ensaios de expansibilidade, que é um dos fenômenos que mais preocupa os pesquisadores, quando do uso de escórias de aciaria em obras de engenharia, pode-se dizer:
 - a) o tempo de estocagem da escória em bota-fora influencia o fenômeno de expansão, sendo que quando este tempo de estocagem é superior a 6 meses, o fenômeno de expansão não é significativo para provocar reações expansivas, conforme ficou demonstrado nos ensaios de expansibilidade Le Chatelier, método adaptado das barras NBRI e PTM 130 modificado / DER – MG (1982);
 - b) a pulverização da escória pelo processo de moagem por micronização estabiliza o fenômeno de expansão da escória, conforme também é preconizado pelos autores: FURNAS et al. (1997), NIU et al. (2002) e ANDRIOLO (1998). Os ensaios de expansibilidade realizados pelos métodos:
 - Le Chatelier (NBR 11582, 1991);
 - método adaptado das barras (ASTM C 1260, 1994);
 - método da autoclave (ASTM C 151, 1993);comprovam que o fenômeno de expansão fica substancialmente minimizado.
 - c) no processo de moagem por micronização, obtém-se uma distribuição granulométrica e forma de grãos mais uniformes do que o realizado em processos tradicionais tais como o moinho de bolas.

O programa experimental mostrou que a moagem da escória de aciaria elétrica pelo processo de micronização, garante a estabilidade volumétrica da escória, devido ao fenômeno de expansão. No capítulo seguinte, serão realizados ensaios utilizando misturas de CPV ARI RS e escória micronizada, com o objetivo de avaliar seu desempenho.

6 AVALIAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA MICRONIZADA COMO MATERIAL CIMENTÍCIO

6.1 CONSIDERAÇÕES

Nessa etapa do trabalho, procurou-se estudar o comportamento das escórias micronizadas E2 e E3 como material cimentício. A escória E1 foi descartada preliminarmente de utilização por apresentar no ensaio de expansibilidade, conforme ficou demonstrado no ensaio PTM – 130 / DER – MG, o índice de expansão medido (4,06% - 14 dias) superior ao exigido pela respectiva norma de ensaio (3% - 14 dias de idade).

Conforme preconizam publicações internacionais e nacionais (DAIDO STEEL, 1993; JIS A 5015, 1992; RUBIO E CARRETERO, 1991; DNER, 1994; BRASIL, 1998; DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES DA PENSILVÂNIA, 1982), as escórias, para serem utilizadas em obras de engenharia, devem passar por um período de cura de pelo menos 6 meses, no pátio de estocagem.

6.2 ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO DE MISTURAS DE CPV ARI RS COM ESCÓRIAS MICRONIZADAS E2 E E3

Preliminarmente, foram realizados ensaios de resistência à compressão em corpos-de-prova de argamassa para se avaliar a potencialidade da resistência de misturas utilizando-se as escórias micronizadas E2 e E3 em substituição ao CPV ARI RS, em massa.

Os resultados desses estudos encontram-se nas figuras 6.1 e 6.2 e tabelas 6.1 e 6.2, onde se pode notar um comportamento semelhante para as duas escórias em relação a sua resistência à compressão. Os ensaios seguiram os procedimentos utilizados para avaliar cimento Portland preconizados pela NBR 7215 (1996).

Os percentuais de mistura das escórias micronizadas, tanto para E2 como para E3, em substituição ao CPV ARI RS foram:

- A0 (100): 100% de CPV ARI RS;
- A1 (94/6): 94% de CPV ARI RS e 6% de escória micronizada;
- A2 (90/10): 90% de CPV ARI RS e 10% de escória micronizada;
- A3 (80/20): 80% de CPV ARI RS e 20% de escória micronizada;
- A4 (66/34): 66% de CPV ARI RS e 34% de escória micronizada;
- A5 (50/50): 50% de CPV ARI RS e 50% de escória micronizada.

Os valores percentuais de substituição de cimento Portland por escórias micronizadas foram definidos em função dos critérios apresentados na tabela 3.1, que seguem as normas brasileiras para a produção de cimento Portland, bem como dados de outros pesquisadores (MOURA, 2000; MASUERO, 2001; GUMIERI, 2002).

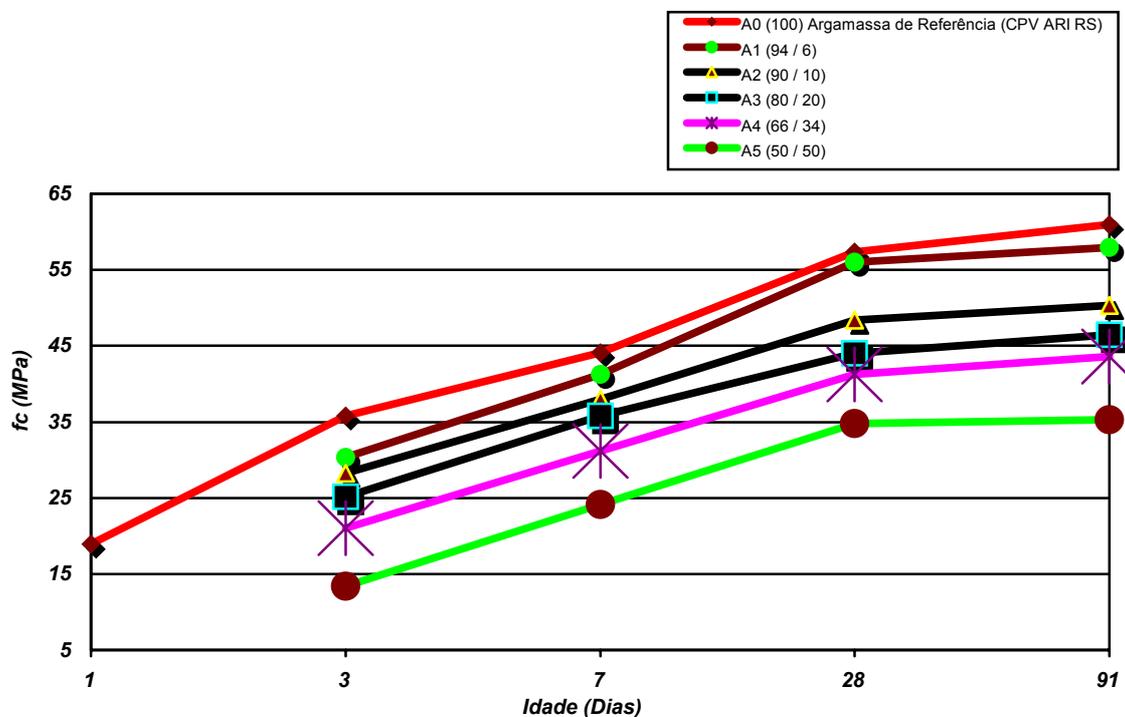


Figura 6.1 Resistência à compressão em corpos-de-prova de argamassa no traço 1:3:0,48, constituída de CPV ARI RS, escória micronizada E2 e areia normal

Pela figura 6.1, nota-se que quando ocorre o aumento percentual de escória micronizada E2, em substituição ao cimento Portland no traço 1:3:0,48, ocorre sistematicamente a diminuição da resistência mecânica dos corpos-de-prova. As substituições percentuais de 6%, 10%, 20%, 34% e 50% causam a redução percentual em relação à argamassa de referência de respectivamente, aos 28 dias de idade, 2,32%, 15,68%, 23,29%, 28,05% e 39,32%.

Tabela 6.1 Resistência à compressão e desvio relativo máximo obtidos em ensaios de ruptura de corpos-de-prova de argamassa no traço 1 : 3 : 0,48, constituída de CPV ARI RS, escória micronizada E2 e areia normal

Aglomerante	1 Dia	3 Dias	7 Dias	28 Dias	91 Dias
A0 (100)	DRM = 4,40 %	DRM = 1,84 %	DRM = 1,99 %	DRM = 1,34 %	DRM = 1,46 %
	fcm = 18,90 MPa	fcm = 35,77 MPa	fcm = 44,09 MPa	fcm = 57,39 MPa	fcm = 60,98 MPa
A1 (94/6)	-	DRM = 1,88 %	DRM = 2,11 %	DRM = 0,46 %	DRM = 2,03 %
	-	fcm = 30,31 MPa	fcm = 41,22 MPa	fcm = 56,06 MPa	fcm = 57,98 MPa
A2 (90/10)	-	DRM = 2,51 %	DRM = 2,13 %	DRM = 1,51 %	DRM = 2,43 %
	-	fcm = 28,25 MPa	fcm = 37,97 MPa	fcm = 48,39 MPa	fcm = 50,34 MPa
A3 (80/20)	-	DRM = 2,14 %	DRM = 1,84 %	DRM = 4,15 %	DRM = 1,63 %
	-	fcm = 25,18 MPa	fcm = 35,77 MPa	fcm = 44,02 MPa	fcm = 46,48 MPa
A4 (66/34)	-	DRM = 1,10 %	DRM = 2,38 %	DRM = 2,69 %	DRM = 3,37 %
	-	fcm = 20,99 MPa	fcm = 31,15 MPa	fcm = 41,28 MPa	fcm = 43,58 MPa
A5 (50/50)	-	DRM = 3,50 %	DRM = 3,94 %	DRM = 2,98 %	DRM = 1,59 %
	-	fcm = 13,41 MPa	fcm = 24,11 MPa	fcm = 34,82 MPa	fcm = 35,28 MPa

DRM: Desvio Relativo Máximo.
fcm: Resistência média à compressão

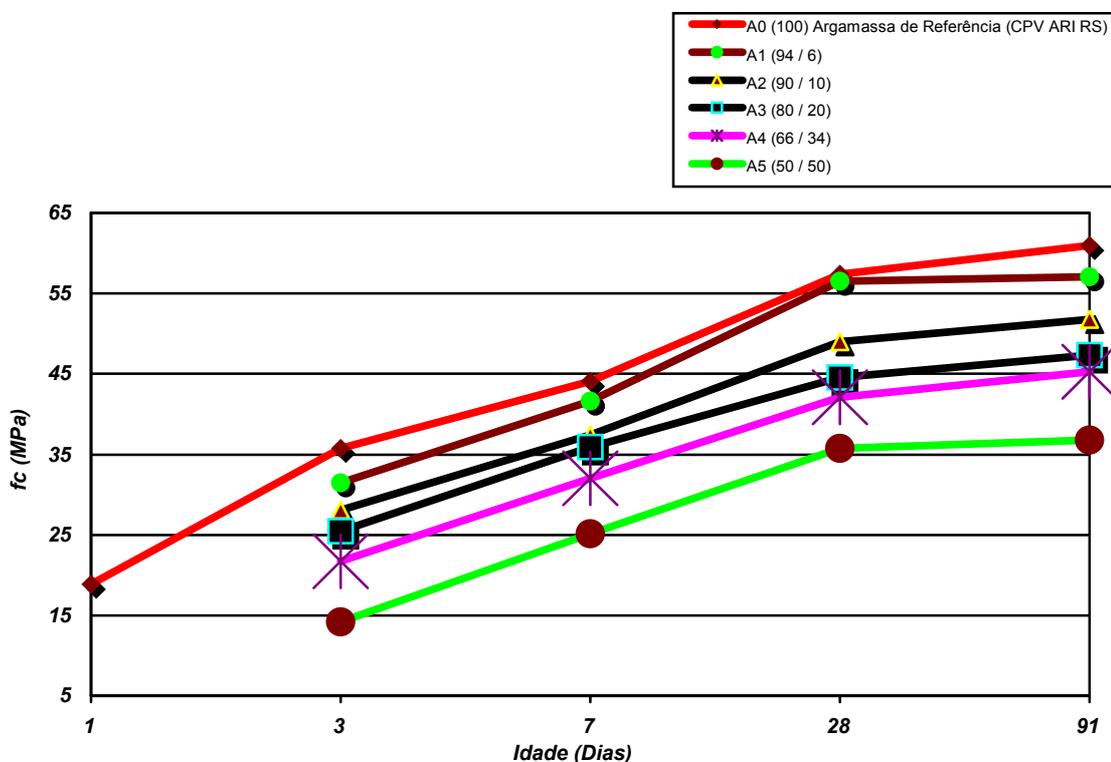


Figura 6.2 Resistência à compressão em corpos-de-prova de argamassa no traço 1 : 3 : 0,48, constituída de CPV ARI RS, escória micronizada E3 e areia normal

Pela figura 6.2, nota-se que quando ocorre o aumento percentual de escória micronizada E3, em substituição ao cimento Portland no traço 1:3:0,48, ocorre sistematicamente a diminuição da resistência mecânica dos corpos-de-prova. As substituições percentuais de 6%, 10%, 20%, 34% e 50% causam a redução percentual em relação à argamassa de referência de respectivamente, aos 28 dias de idade, 1,50%, 14,70%, 22,39%, 26,67% e 37,70%.

Tabela 6.2 Resistência à compressão e desvio relativo máximo, obtidos em ensaios de ruptura de corpos-de-prova de argamassa no traço 1 : 3 : 0,48, constituída de CPV ARI RS, escória micronizada E3 e areia normal

Aglomerante	1 Dia	3 Dias	7 Dias	28 Dias	91 Dias
A0 (100)	DRM = 4,40 %	DRM = 1,84 %	DRM = 1,99 %	DRM = 1,34 %	DRM = 1,46 %
	fcm = 18,90 MPa	fcm = 35,77 MPa	fcm = 44,09 MPa	fcm = 57,39 MPa	fcm = 60,98 MPa
A1 (94/6)	-	DRM = 4,38 %	DRM = 3,57 %	DRM = 1,65 %	DRM = 1,91 %
	-	fcm = 31,48 MPa	fcm = 41,58 MPa	fcm = 56,53 MPa	fcm = 57,11 MPa
A2 (90/10)	-	DRM = 5,59 %	DRM = 3,52 %	DRM = 1,63 %	DRM = 1,84 %
	-	fcm = 28,03 MPa	fcm = 37,44 MPa	fcm = 48,95 MPa	fcm = 51,79 MPa
A3 (80/20)	-	DRM = 2,43 %	DRM = 2,09 %	DRM = 1,30 %	DRM = 2,98 %
	-	fcm = 25,48 MPa	fcm = 35,92 MPa	fcm = 44,54 MPa	fcm = 47,33 MPa
A4 (66/34)	-	DRM = 4,05 %	DRM = 0,75 %	DRM = 2,59 %	DRM = 2,45 %
	-	fcm = 21,72 MPa	fcm = 32,01 MPa	fcm = 42,08 MPa	fcm = 45,30 MPa
A5 (50/50)	-	DRM = 4,51 %	DRM = 3,14 %	DRM = 2,71 %	DRM = 1,74 %
	-	fcm = 14,20 MPa	fcm = 25,15 MPa	fcm = 35,75 MPa	fcm = 36,82 MPa

DRM: Desvio Relativo Máximo.
fcm: Resistência média à compressão

Em função das resistências das misturas de CPV ARI RS com as escórias micronizadas E2 e E3 terem sido bem semelhantes, e E3 já possuir um tempo de estocagem superior a 24 meses, optou-se em realizar somente para as misturas de CPV ARI RS e escória micronizada E2, os seguintes ensaios:

- tempo de pega (NBR 11581, 1991);
- expansibilidade Le Chatelier (NBR 11582, 1991);
- composição química (FRX), resíduo insolúvel (NBR 5744, 1989), perda ao fogo (NBR 5743, 1977), massa específica (NBR 6474, 1984), finura por peneiramento (NBR 11579, 1991 e NBR 9202, 1985);
- superfície específica (NBR NM 76);
- distribuição granulométrica a laser e diâmetro médio dos grãos.

Os percentuais de mistura da escória micronizada E2 em substituição ao CPV ARI RS foram:

- A0 (100): 100% de CPV ARI RS;
- A1 (94/6): 94% de CPV ARI RS e 6% de escória micronizada;
- A2 (90/10): 90% de CPV ARI RS e 10% de escória micronizada;
- A3 (80/20): 80% de CPV ARI RS e 20% de escória micronizada;
- A4 (66/34): 66% de CPV ARI RS e 34% de escória micronizada;
- A5 (50/50): 50% de CPV ARI RS e 50% de escória micronizada;

Foram analisadas para a mistura constituída de 50% de CPV ARI RS e 50% de escória micronizada E2:

- caracterização por difração de raios-X;
- atividade pozolânica pelos métodos: químico (NBR 5753, 1991) e das argamassas de cimento (NBR 5752, 1992).

Foram analisadas resistências de concreto produzido com mistura de CPV ARI RS e escória de alto-forno utilizado na região de Juiz de Fora por concreteira, e resistências de concreto produzido com mistura de CPV ARI RS e escória de aciaria elétrica micronizada E2.

Conforme mostra a tabela 6.3, o tempo de pega das misturas de CPV ARI RS e escória micronizada E2 está em conformidade com as normas brasileiras para cimentos CII (NBR 11578, 1991) e CIII (NBR 5735, 1991), que é de no mínimo uma hora para o início de pega e no máximo de 10 horas para o fim de pega.

Tabela 6.3 Misturas de escória micronizada E2 e CPV ARI RS: Tempo de pega (NBR 11581, 1991)

Aglomerante	Tempo de Início de Pega (TIP)	Tempo de Fim de Pega (TFP)	Água de Pasta Consistência Normal
A0 (100)	2h : 24 min	3h : 30 min	28,0 %
A1 (94/6)	2h : 32 min	3h : 42 min	28,2 %
A2 (90/10)	2h : 48 min	3h :58 min	28,6 %
A3 (80/20)	3h : 20 min	4h : 12 min	29,4 %
A4 (66/34)	3h : 54 min	4h : 48 min	30,10 %
A5 (50/50)	4h : 12 min	5h : 26 min	30,20 %

A expansibilidade Le Chatelier (NBR 11582, 1991) das misturas de CPV ARI RS e escória micronizada E2 está em conformidade com as normas brasileiras para cimentos CII (NBR 11578, 1991) e CIII (NBR 5735, 1991) que preconiza no máximo de abertura da agulha, quando ensaiada a quente ou a frio, em 5mm (conforme mostra a tabela 6.4).

Tabela 6.4 Misturas de escória micronizada E2 e CPV ARI RS: Expansibilidade Le Chatelier (NBR 11582, 1991)

AMOSTRAS	A FRIO (mm)	A QUENTE (mm)
A0 (100)	0	0
A1 (94/6)	0	0
A2 (90/10)	0	0
A3 (80/20)	0	0,12
A4 (66/34)	0	0,12
A5 (50/50)	0	1,27

A tabela 6.5 apresenta os valores da composição química, óxido de cálcio livre, resíduo insolúvel, perda ao fogo, pH, massa específica, finura nas peneiras de 75 μ m e 45 μ m e área específica do CPV ARI – RS e as misturas de CPV ARI RS e escória micronizada E2 nas proporções (94% + 6%), (90% + 10%), (80% + 20%), (66% + 34%) e (50% + 50%).

Tabela 6.5 Misturas de escória micronizada E2 e CPV ARI RS: Composição química, CaO livre, resíduo insolúvel, perda ao fogo, massa específica, finura por peneiramento e área específica (Blaine)

Composição Química (%)	A0 (100)	A1 (94/6)	A2 (90/10)	A3 (80/20)	A4 (66/34)	A5 (50/50)	E2
CaO	56,41	55,30	53,70	52,46	47,80	44,99	36,40
FeO	2,32	4,72	6,00	9,92	16,53	21,72	25,22
SiO ₂	21,40	20,58	21,79	19,94	19,19	18,40	21,30
MgO	3,48	3,65	3,53	3,63	3,77	4,02	6,40
MnO	-	-	-	-	-	-	3,54
Al ₂ O ₃	6,45	6,40	6,06	5,75	5,39	4,80	3,40
P ₂ O ₅	-	-	-	-	-	-	0,39
TiO ₂	-	-	-	-	-	-	0,41
Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	0,49
SO ₃	4,19	3,83	3,58	3,19	2,65	2,18	0,78
K ₂ O	0,69	0,66	0,63	0,60	0,44	0,36	-
Na ₂ O	0,56	0,51	0,55	0,51	0,44	0,31	-
CaO (Livre) (NBR 7227, 1989)	1,87	1,93	1,51	1,43	1,31	1,18	0,39
RI (NBR 5744, 1989)	1,20	0,84	0,64	1,06	1,00	1,10	1,69
Perda ao Fogo (NBR 5743, 1977)	3,58	3,13	2,81	2,16	1,22	0,33	0,00
pH	12,90	12,80	12,80	12,80	12,70	12,40	12,40
Massa Específica (g/cm ³) (NBR 6474, 1984)	3,02	3,05	3,10	3,16	3,27	3,39	3,74
FINURA	#200 (0,075 mm) (NBR 11579, 1991)	0,6	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2
	#325 (0,045 mm) (NBR 9202, 1985)	1,9	1,6	1,8	1,9	1,4	0,75
Área Específica (cm ² /g) (NBRNM 76)	4360	4670	5010	5210	5740	5790	5840

À medida que cresce o teor de adição de E2 ao CPV ARI RS, pode-se notar o aumento da quantidade de óxido de ferro, da massa específica e da superfície específica.

Com o aumento da quantidade de óxido de ferro na mistura, a resistência à compressão de corpos-de-prova em argamassa diminui, conforme é mostrado na figura 6.1.

Os valores de resíduo insolúvel, perda ao fogo e óxido de magnésio das misturas atendem às exigências químicas para os cimentos CII (NBR 11578, 1991) e CP III (NBR 5735, 1991).

As figuras de 6.3 a 6.7 mostram a distribuição granulométrica da mistura de CPV ARI RS e escória micronizada E2, podendo-se perceber que ao crescer o percentual de escória na mistura, a curva torna-se mais uniforme.

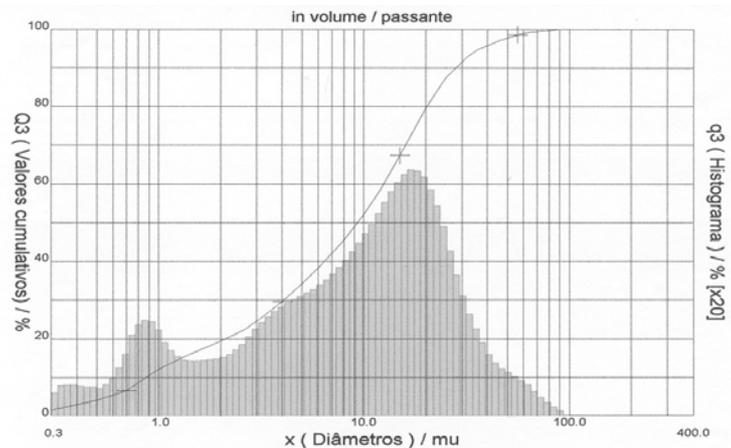


Figura 6.3 Distribuição granulométrica a laser dos grãos de mistura de CPV ARI RS (94%) e escória micronizada E2 (6%) – A1 (94/6)

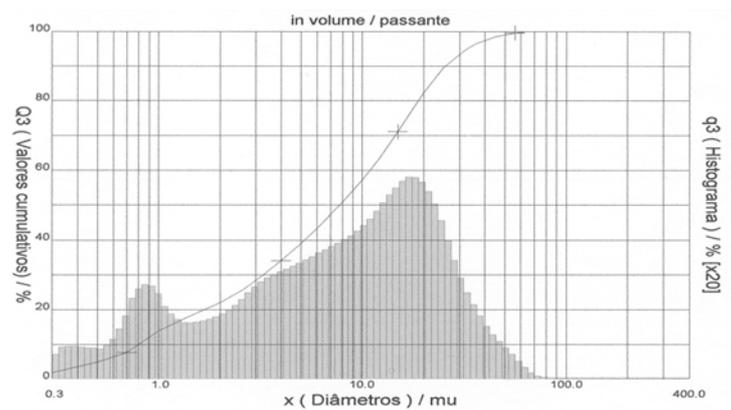


Figura 6.4 Distribuição granulométrica a laser dos grãos de mistura de CPV ARI RS (90%) e escória micronizada E2 (10%) – A2 (90/10)

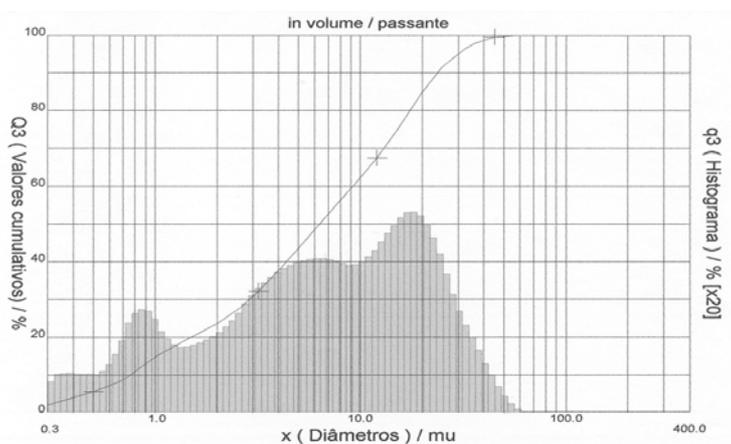


Figura 6.5 Distribuição granulométrica a laser dos grãos de mistura de CPV ARI RS (80%) e escória micronizada E2 (20%) – A3 (80/20)

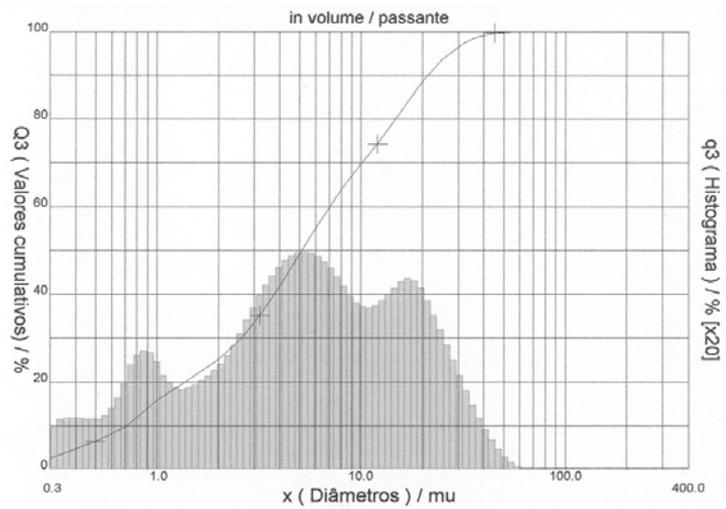


Figura 6.6 Distribuição granulométrica a laser dos grãos de mistura de CPV ARI RS (66%) e escória micronizada E2 (34%) – A4 (66/34)

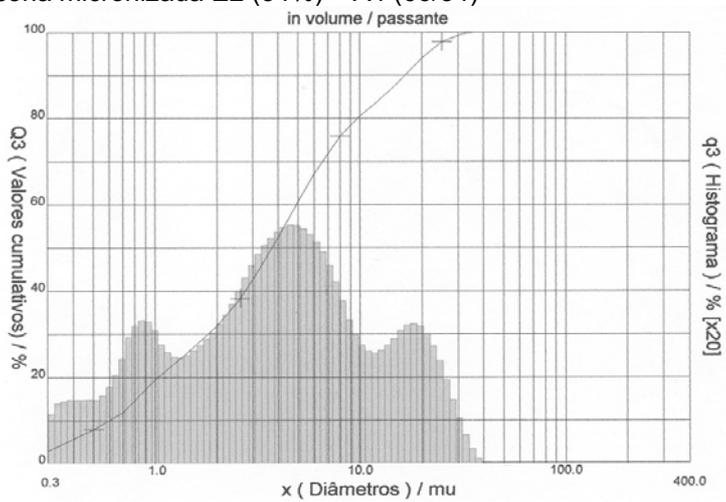


Figura 6.7 Distribuição granulométrica a laser dos grãos de mistura de CPV ARI RS (50%) e escória micronizada E2 (50%) – A5 (50/50)

A tabela 6.6 apresenta os respectivos diâmetros dos grãos das misturas de CPV ARI RS e escória micronizada, bem como o respectivo diâmetro médio de cada mistura. Observa-se que com o aumento do percentual de escória na mistura ocorre uma diminuição dos diâmetros dos grãos nos percentuais: <10%, <50% e <100%, bem como dos respectivos diâmetros médios da respectiva mistura.

Tabela 6.6 Distribuição Granulométrica das misturas de escória micronizada E2 e CPV ARI RS obtidas por granulometria a laser

AMOSTRAS	Incidência de grãos com diâmetros inferiores a:			Diâmetro Médio (μm)
	10% (μm)	50% (μm)	100% (μm)	
A1 (94/6)	0,87	9,32	90,00	12,67
A2 (90/10)	0,80	7,75	90,00	11,12
A3 (80/20)	0,76	6,35	56,00	9,87
A4 (66/34)	0,72	5,14	56,00	8,48
A5 (50/50)	0,60	3,73	36,00	6,14

A tabela 6.7 mostra que a amostra constituída da mistura de “CPV ARI RS (50%) e escória micronizada E2 (50%)” é formada pelos minerais presentes no cimento e na escória analisada (Alita, Belita, Calcita, C₃A, C₄AF, MgF₂O₄, Gipsita, Hemidratado, Melilita, Quartzo e Hematita).

Tabela 6.7 Caracterização por difratometria de raios X das amostras de CPV ARI RS e mistura de “CPV ARI RS (50%) e escória micronizada E2 (50%)”

MINERAIS	FÓRMULA QUÍMICA	DISTÂNCIA INTERPLANAR PRINCIPAL (Å)	Frequência Relativa	
			CPV ARI RS	Mistura de “CPV ARI RS (50%) e escória micronizada E2 (50%)”
Alita	Ca ₃ SiO ₅	2,78	++++	+++
Belita	Ca ₂ SiO ₄	2,75	++	++
Calcita	CaCO ₃	3,03	+++	++
C ₃ A	Ca ₃ Al ₂ O ₆	2,69	++	++
C ₄ AF	Ca ₄ Al ₂ Fe ₂ O ₁₀	2,65	++	++
Cal Livre	CaO	2,41	tr	nd
Portlandita	Ca(OH) ₂	4,96	nd	tr
Gipsita	CaSO ₄ .2H ₂ O	7,64	+	+
Bassanita	CaSO ₄ . ¹ / ₂ H ₂ O	6,05	+	+
Magnésio Ferrita	MgFe ₂ O ₄	2,54	nd	+
Melitita	Ca ₂ MgSi ₂ O ₇	2,88	nd	+
Quartzo	SiO ₂	3,34	nd	tr
Hematita	Fe ₂ O ₃	2,70	nd	tr
Wustita	FeO	2,14	nd	nd

Simbologia: nd = não detectado
tr = traços
+ = presente
++ = pouco freqüente
+++ = freqüente
++++ = muito freqüente

Nota: A freqüência relativa das fases está fundamentada na altura dos picos de difração, cuja intensidade é função do teor, da simetria e do grau de cristalinidade dos constituintes

A amostra constituída da mistura de “CPV ARI (50%) e escória micronizada E2 (50%) apresenta estrutura predominantemente cristalina, conforme difratograma de raios-X apresentado na figura 6.8.

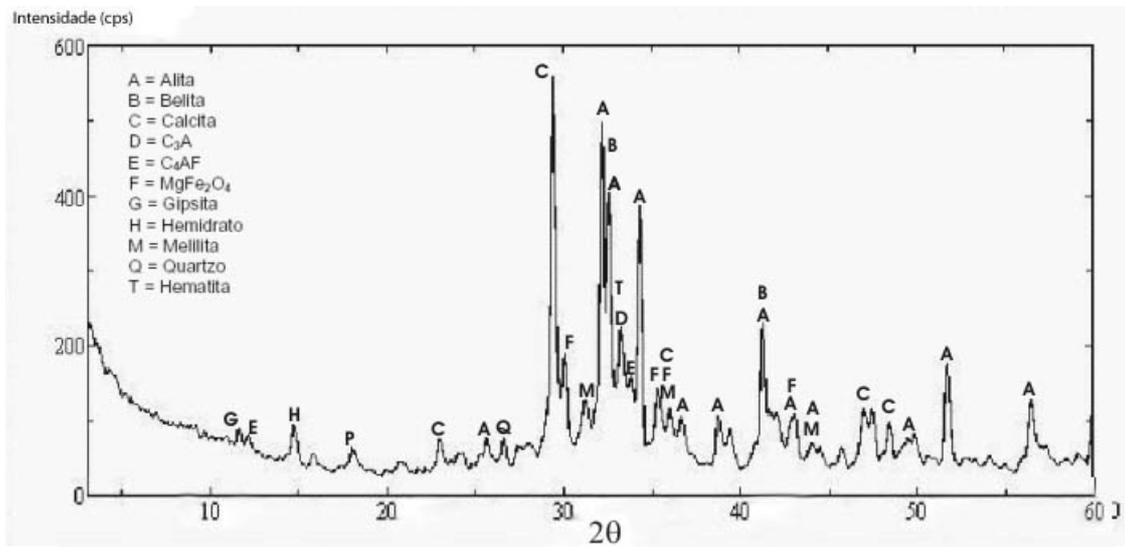


Figura 6.8 Difratograma de Raios-X da mistura de “CPV ARI RS (50%) e escória micronizada E2 (50%)”

As tabelas 6.8 e 6.9 apresentam os resultados dos ensaios de pozolanidade pelo método químico e pelo método da argamassa de cimento, respectivamente, indicando que a mistura “CPV ARI RS (50%) e escória micronizada E2 (50%)” é considerada pozolânica.

TABELA 6.8 Atividade pozolânica da mistura de “CPV ARI RS (50%) e escória micronizada E2 (50%)” – Método Químico / NBR 5753 (1991)

MÉTODO QUÍMICO (NBR 5753, 1991)			
AMOSTRA	Milimoles (OH/L)	Milimoles (CaO/L)	Pozolanidade
E2 (50/50)	49,00	5,20	SIM

TABELA 6.9 Pozolanidade da mistura de “CPV ARI RS (50%) e escória micronizada E2 (50%)” – Método da Argamassa de Cimento / NBR 5752 (1992)

MÉTODO DAS ARGAMASSAS DE CIMENTO (NBR 5752, 1992)					
AMOSTRA	Água / (cimento + escória)	Água requerida (%)	Consistência (mm)	Tensões (MPa)	Índice de Atividade Pozolânica (%)
35% E2 (50/50) + 65% CPI S 32 (em volume)	0,48	97	229	33,21	97,22
100% CPI S 32	0,50	100	226	34,16	100,00
Especificações da NBR 12653 (1992)	-	<110	(225 ± 5)	-	≥ 75

A figura 6.9 confirma a atividade pozolânica na mistura de “CPV ARI RS (50%) e escória micronizada E2 (50%)” pelo Método Químico (NBR 5753, 1991).

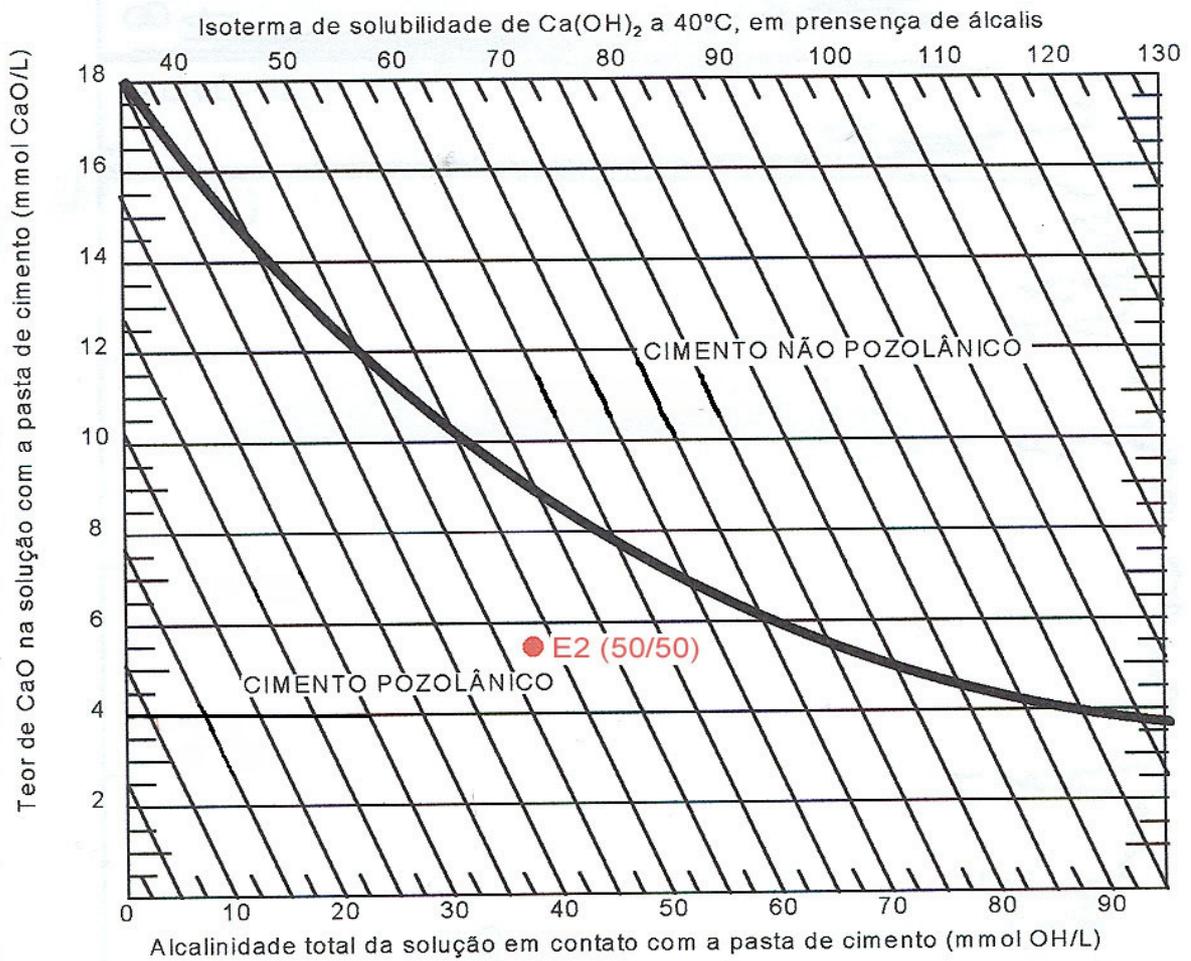


Figura 6.9

Diagrama de pozolanicidade da mistura de escória micronizada E2 (50/50), de acordo com a NBR 5753 (1991), ilustrando o teor de CaO em função da alcalinidade total medida aos 7 dias de idade

As tabelas 6.10 e 6.11 apresentam, respectivamente, o traço de concreto utilizado por concreteira com uso de mistura de CPV ARI RS e escória de alto-forno na região de Juiz de Fora – MG e resultados de resistência à compressão em corpos-de-prova de concreto produzido com escória de alto-forno e concreto produzido com escória de aciaria elétrica micronizada E2.

TABELA 6.10 Traço de concreto utilizado por concreteira com uso de mistura de CPV ARI RS e escória de alto-forno na região de Juiz de Fora / MG

fck = 20 MPa (28 dias) – Traço em massa: 1 : 2,550 : 3,162 : 0,518	
Materiais	Consumo de Materiais / m³ de concreto
CPV ARI RS	256 kg
Escória de alto-forno	64 kg
Areia do Rio do Peixe	816 kg
Brita – Pedreira Pedra Sul	1012 kg
Aditivo Plastificante / Retardador	1630 ml
Água	166 litros
Tipo de Lançamento	Bombeável
Consistência (Slump – Test)	(120 ± 20) mm
Teor de argamassa	53%

TABELA 6.11 Resistência à compressão em corpos-de-prova de concreto e consistências medidas em concreto produzido com escória de alto-forno e escória de aciaria elétrica micronizada E2

Traço	Consistência (Abatimento) (mm)	Resistência à compressão (MPa)					
		3 dias		7 dias		28 dias	
T1 (1:2,550:3,162:0,518)	110	11,2	12,1	19,6	18,7	25,2	26,4
		12,1		19,6		26,4	
T2 (1:2,550:3,162:0,518)	145	10,1	10,1	16,4	17,2	23,4	24,2
		10,1		17,2		24,2	

T1: utilizou escória de alto-forno;

T2: utilizou escória de aciaria elétrica micronizada E2.

O traço de concreto (T1), que utilizou a escória de alto-forno, apresentou resistência mecânica à compressão superior ao traço (T2) produzido com escória de aciaria elétrica micronizada, sendo que o incremento de resistência para as idades de 3 dias, 7 dias e 28 dias foram de 19,80%, 13,95% e 9,09%, respectivamente.

Tanto para o traço T1 como para o traço T2, a quantidade de escória de alto-forno e escória de aciaria elétrica micronizada para a virada do traço foi a mesma, ou seja, 64 kg.

O traço (T2) apresentou maior consistência do que o traço (T1) em função da massa específica da escória de aciaria ser superior à da escória de alto-forno, o que permitiria reduzir a relação água/aglomerante, aumentando, conseqüentemente, a resistência mecânica à compressão do traço com escória de aciaria.

6.3 CONCLUSÕES

Ao comparar os valores obtidos em ensaios de resistência mecânica à compressão, tempo de pega, expansibilidade, finura nas peneiras de 75 μ m e 45 μ m e área específica, as misturas produzidas com CPV ARI RS e escória micronizada E2 estão em conformidade com os critérios definidos pelas normas técnicas nacionais para cimentos Portland de alto-forno (NBR 5735, 1991) e composto (NBR 11578, 1991).

O aumento da área específica, mesmo para a maior quantidade da mistura de “CPV ARI RS (50%) e escória micronizada E2 (50%)”, garantiu resistência mecânica à compressão superior ao exigido para se julgar as classes de resistências de cimento Portland pelas normas nacionais de 25 MPa e 32 MPa.

Desta forma, conclui-se que a escória E2, que passou por um processo de envelhecimento de 6 meses e foi pulverizada pelo processo de moagem por micronização, quando adquiriu distribuição granulométrica e forma de grãos uniformes, pôde ser considerada como material pozolânico, conforme preconiza FURNAS et al. (1997), podendo, conseqüentemente, ser adicionada ao cimento Portland para a produção de concretos e argamassas.

A mistura de “CPV ARI RS (50%) e escória micronizada E2 (50%)”, em relação à pozolanicidade, está em conformidade com a NBR 12653 (1992) pois alcançou os critérios especificados pela respectiva norma quando submetida a ensaios pelo método químico (NBR 5753, 1991) e pelo método das argamassas de cimento (NBR 5752, 1992).

7 EFEITO DA GRANULOMETRIA NA ESTABILIZAÇÃO DO FENÔMENO DE EXPANSÃO DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA ELÉTRICA

7.1 CONSIDERAÇÕES

Comprovado no capítulo anterior, que o processo de moagem por micronização da escória de aciaria elétrica soluciona o problema da expansão, além de agregar propriedades pozolânicas à escória, procurou-se neste capítulo, avaliar a influência da distribuição granulométrica e da dimensão dos grãos sobre a propriedade de expansibilidade da escória de aciaria elétrica, recém estocada. Este tipo de escória se caracteriza por: decorridos aproximadamente 72 horas desde a sua geração, ela é transportada para a planta de britagem, quando é retirada a fração metálica incrustada no seu interior, sendo, a seguir, descartada em bota-fora. A metodologia de coleta da amostra de escória foi a mesma descrita no item 5.1, sendo que esta escória foi denominada de EA1.

Com finalidade de se produzir diferentes distribuições granulométricas, com distintos tamanhos de grãos, foram utilizadas dois tipos de moagem para a amostra EA1, recém gerada.

- i) parte da amostra de EA1 foi moída em moinho de bolas (o aparelho de abrasão Los Angeles serviu como moinho) com dois tempos distintos de moagem, ou seja, 150 minutos e 210 minutos;
- ii) parte da amostra de EA1 foi moída pelo processo de micronização.

Para avaliar o grau de expansão das partes da amostra de escória EA1, com diferentes granulometrias da escória EA1, foram utilizados os seguintes métodos de ensaio: método adaptado das barras (FURNAS et al., 1997) e método da autoclave (ASTM C 151, 1983).

Quando da realização dos ensaios, tanto para as argamassas como para as pastas, foram utilizadas misturas de “50% de CPV ARI RS e 50% de escória EA1”.

7.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.2.1 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA ESCÓRIA EA1

Os ensaios de caracterização química da amostra de escória EA1 foram realizados seguindo as metodologias preconizadas pelos métodos de ensaios utilizados para cimento Portland. A seguir são apresentados os respectivos métodos de ensaios:

- i) Óxidos: Fluorescência de Raios-X (FRX), utilizando-se o equipamento: PW2400 X RAY SPECTROMETER da marca PHILIPS.
- ii) Perda ao Fogo: NBR 5743 – Análise química de cimento Portland – determinação de perda ao fogo.
- iii) Cal Livre: NBR 7227 – Cimento Portland – determinação de óxido de cálcio livre pelo etilenoglicol.
- iv) Resíduo Insolúvel: NBR 5744 – Cimento Portland – determinação de resíduo insolúvel.
- v) pH: para a determinação do pH das amostras, foi utilizado um “PH-metro digital”, modelo 374 da marca MICRONAL.

Todos os ensaios de caracterização química foram realizados nos laboratórios da CIMENTO TUPI, em Pedra do Sino, na cidade de Carandaí – MG.

Tabela 7.1 Composição química, óxido de cal livre, resíduo insolúvel, perda ao fogo e pH da escória micronizada EA1

Composição Química (%)	EA1
CaO	34,17
FeO	26,47
SiO₂	22,13
MgO	4,64
MnO	4,37
Al₂O₃	3,87
P₂O₅	0,58
TiO₂	0,53
Cr₂O₃	0,24
SO₃	0,74
CaO (Livre) (NBR 7227 / 1989)	0,37
RI (NBR 5744 / 1989)	1,62
Perda ao Fogo (NBR 5743 / 1977)	0,01
pH	12,35
Basicidade (CaO/SiO₂)	1,54

7.2.2 DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS DA ESCÓRIA EA1

Para avaliar as distribuições granulométricas e as dimensões dos grãos da escória EA1, foi empregada a técnica de granulometria a laser.

A tabela 7.2 apresenta a distribuição granulométrica da escória EA1, medida pelo processo a laser, que foi moída em aparelho de abrasão Los Angeles com dois diferentes tempos de moagem, ou seja, 150 minutos e 210 minutos, bem como a distribuição granulométrica da escória EA1, obtida pelo processo de moagem por micronização.

Tabela 7.2 Distribuições granulométricas da escória EA1, moída em aparelho de Abrasão Los Angeles (tempo de moagem de 150 minutos e 210 minutos) e micronizada

AMOSTRAS	Incidência de grãos com diâmetros inferiores a:			Diâmetro Médio (μm)
	10% (μm)	50% (μm)	100% (μm)	
EA1 (150 min)	1,75	26,54	400	54,37
EA1 (210 min)	0,58	5,65	90	10,06
EA1 (micronizada)	0,51	2,80	12	3,37

Nota-se pela tabela 7.2 que os diferentes processos e tempos de moagem geraram diferentes diâmetros médios de grãos, onde o diâmetro médio do grão de EA1, que foi moído por um período de 150 minutos, é aproximadamente 5 vezes maior que o diâmetro médio do grão EA1, que foi moído por um período de 210 minutos e aproximadamente 16 vezes maior que o diâmetro médio do grão da escória EA1 que foi micronizada.

As figuras 7.1 e 7.2 mostram a distribuição granulométrica dos grãos da escória EA1, quando moída em aparelho de Abrasão Los Angeles, ressaltando-se que a distribuição de grãos é bem

desuniforme, enquanto que a figura 7.3, onde EA1 foi moída pelo processo de micronização, apresenta uma distribuição de grãos uniforme.

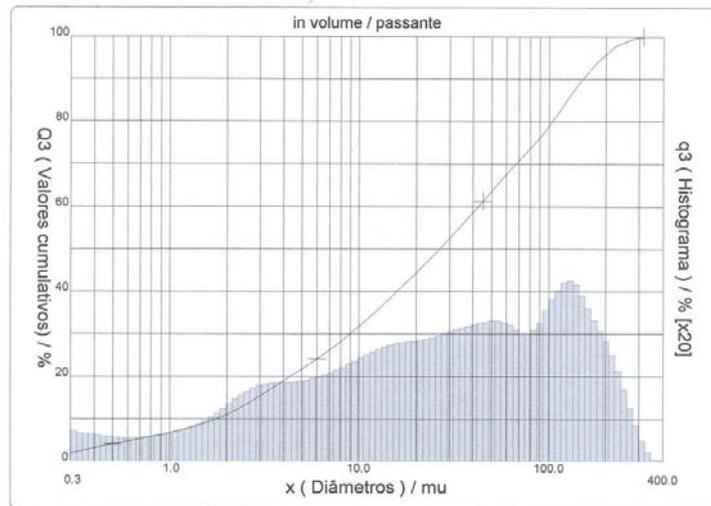


Figura 7.1 Distribuição granulométrica a laser dos grãos da escória EA1 (diâmetro médio = 54,37 μ m) moída em aparelho de Abrasão Los Angeles (150 minutos)

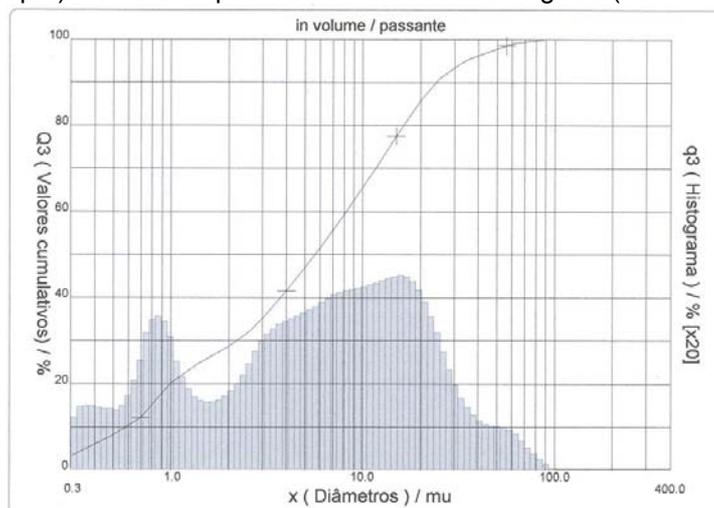


Figura 7.2 Distribuição granulométrica a laser dos grãos da escória EA1 (diâmetro médio = 10,06 μ m) moída em aparelho de Abrasão Los Angeles (210 minutos)

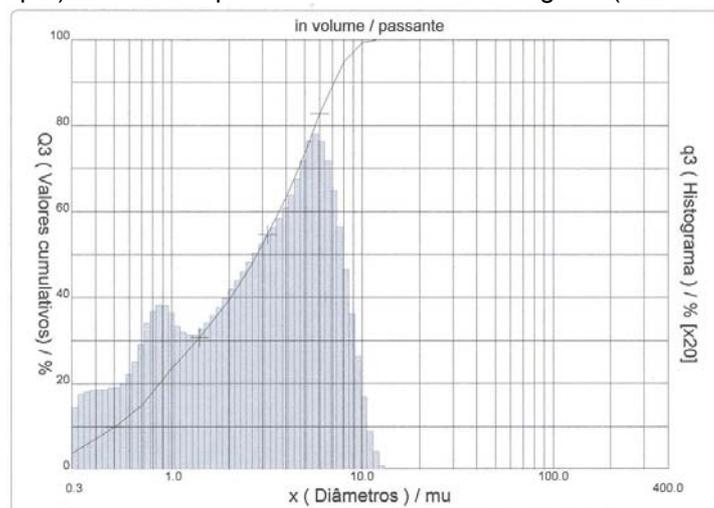


Figura 7.3 Distribuição granulométrica a laser dos grãos da escória EA1 (diâmetro médio = 3,37 μ m) moída pelo processo de micronização

7.3 AVALIAÇÃO DA EXPANSIBILIDADE PELO MÉTODO ADAPTADO DAS BARRAS (ASTM C 1260, 1994)

A figura 7.4 mostra a realização do ensaio de avaliação da expansibilidade pelo método adaptado das barras (ASTM C 1260). As tabelas 7.3, 7.4 e 7.5 e as figuras 7.5, 7.6 e 7.7 apresentam a expansibilidade potencial de misturas constituídas de “50% de CPV ARI RS e 50% de escória EA1”, sendo que a escória EA1 foi moída em moinho de bolas (aparelho de Abrasão Los Angeles) e por processo de micronização.



Figura 7.4 Ensaio da Expansibilidade pelo método adaptado das barras

Tabela 7.3 Expansibilidade potencial de misturas de “50% de CPV ARI RS e 50% de escória EA1”, moída em moinho de bolas por um período de 150 minutos, com diâmetro médio de 54,37- μ m. Método adaptado das barras (ASTM C 1260, 1994)

Amostra	Variação de comprimento (%) / Idade (dias)															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
CPV ARI RS	0,006	0,008	0,008	0,009	0,010	0,009	0,011	0,010	0,010	0,009	0,010	0,009	0,009	0,012	0,010	0,011
EA1 (50/50) recém-gerada	0,060	0,080	0,080	0,090	0,095	0,105	0,115	0,120	0,125	0,130	0,140	0,155	0,185	0,198	0,211	0,212
EA1 (50/50) 45 dias após geração	0,05	0,052	0,054	0,06	0,062	0,068	0,07	0,072	0,074	0,078	0,08	0,082	0,084	0,09	0,092	0,092

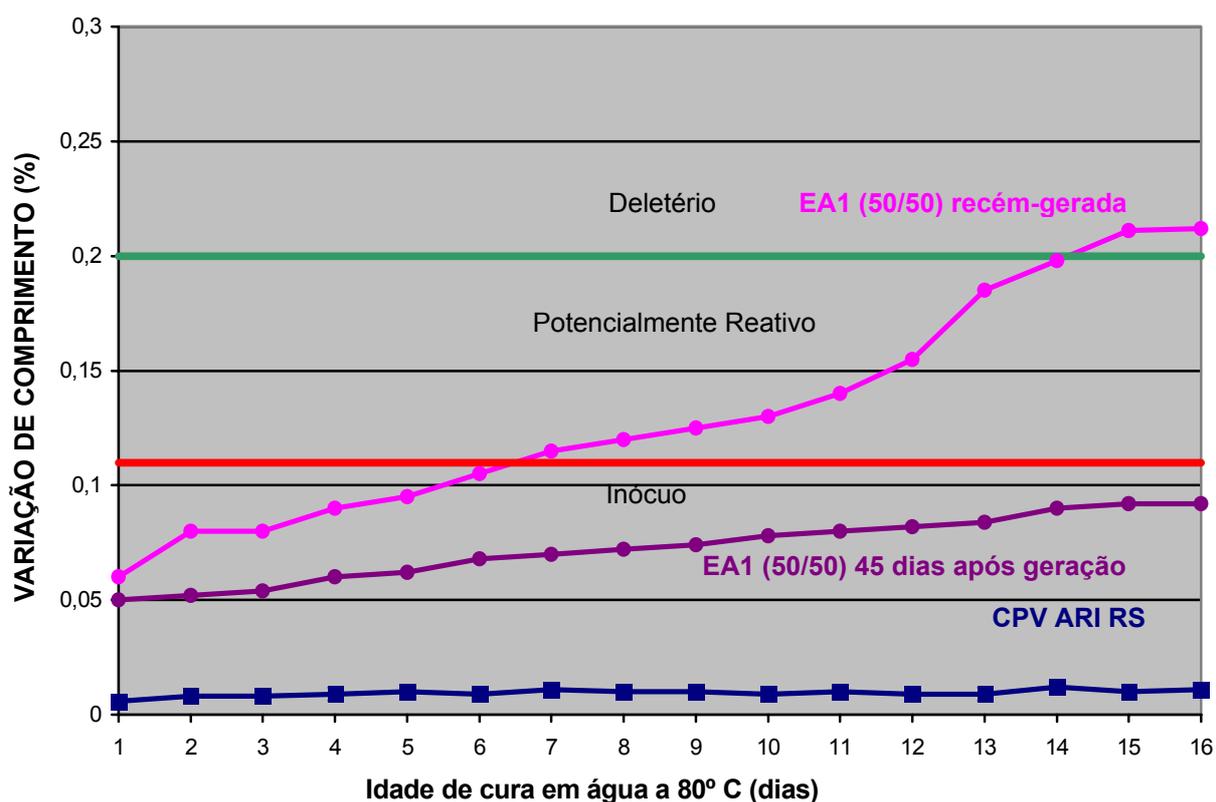


Figura 7.5 Variação de comprimento (%) de barras submetidas ao ensaio de expansão, – Escória EA1 moída em moinho de bolas por um período de 150 minutos, com diâmetro médio de 54,37 μ m. Ensaio de expansão – Escória EA1 (50/50) e CPV ARI RS

Tabela 7.4

Expansibilidade potencial de misturas de “50% de CPV ARI RS e 50% de escória EA1”, moída em moinho de bolas por um período de 210 minutos, com diâmetro médio de 10,06- μ m. Método adaptado das barras (ASTM C 1260, 1994)

Amostra	Variação de comprimento (%) / Idade (dias)															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
CPV ARI RS	0,006	0,008	0,008	0,009	0,010	0,009	0,011	0,010	0,010	0,009	0,010	0,009	0,009	0,012	0,010	0,011
EA1 (50/50) recém-gerada	0,048	0,054	0,080	0,080	0,085	0,095	0,105	0,110	0,120	0,130	0,130	0,140	0,145	0,150	0,155	0,155
EA1 (50/50) 45 dias após geração	0,032	0,040	0,042	0,046	0,048	0,050	0,058	0,062	0,064	0,068	0,070	0,072	0,074	0,074	0,076	0,076

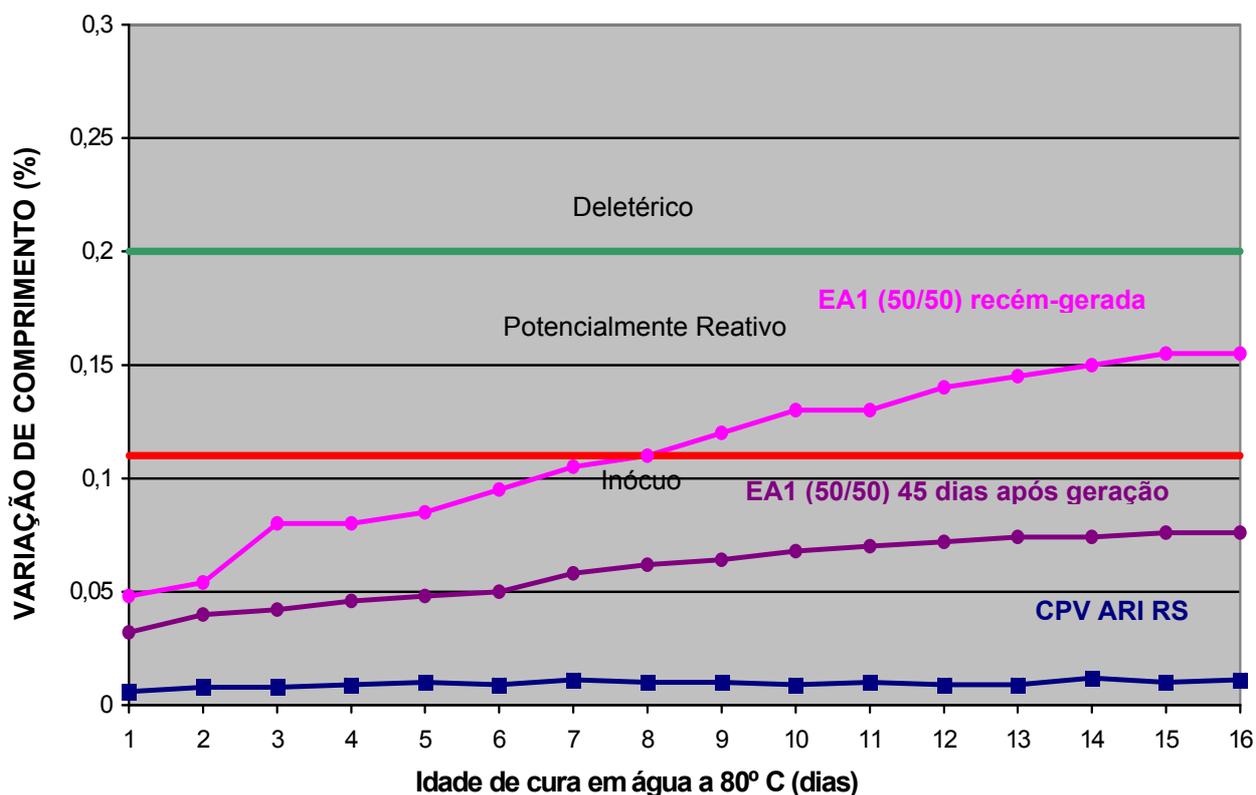


Figura 7.6

Variação de comprimento (%) de barras submetidas ao ensaio de expansão, – Escória EA1 moída em moinho de bolas por um período de 210 minutos, com diâmetro médio de 10,06 μ m. Ensaio de expansão – Escória EA1 (50/50) e CPV ARI RS

Tabela 7.5

Expansibilidade potencial de misturas de “50% de CPV ARI RS e 50% de escória EA1, com diâmetro médio de 3,37·µm. Método adaptado das barras (ASTM C 1260, 1994) – Escória EA1 (50/50).

Amostra	Variação de comprimento (%) / Idade (dias)															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
CPV ARI RS	0,006	0,008	0,008	0,009	0,010	0,009	0,011	0,010	0,010	0,009	0,010	0,009	0,009	0,012	0,010	0,011
EA1 (50/50)	0,03	0,038	0,043	0,048	0,046	0,05	0,048	0,054	0,052	0,054	0,058	0,064	0,064	0,062	0,06	0,062

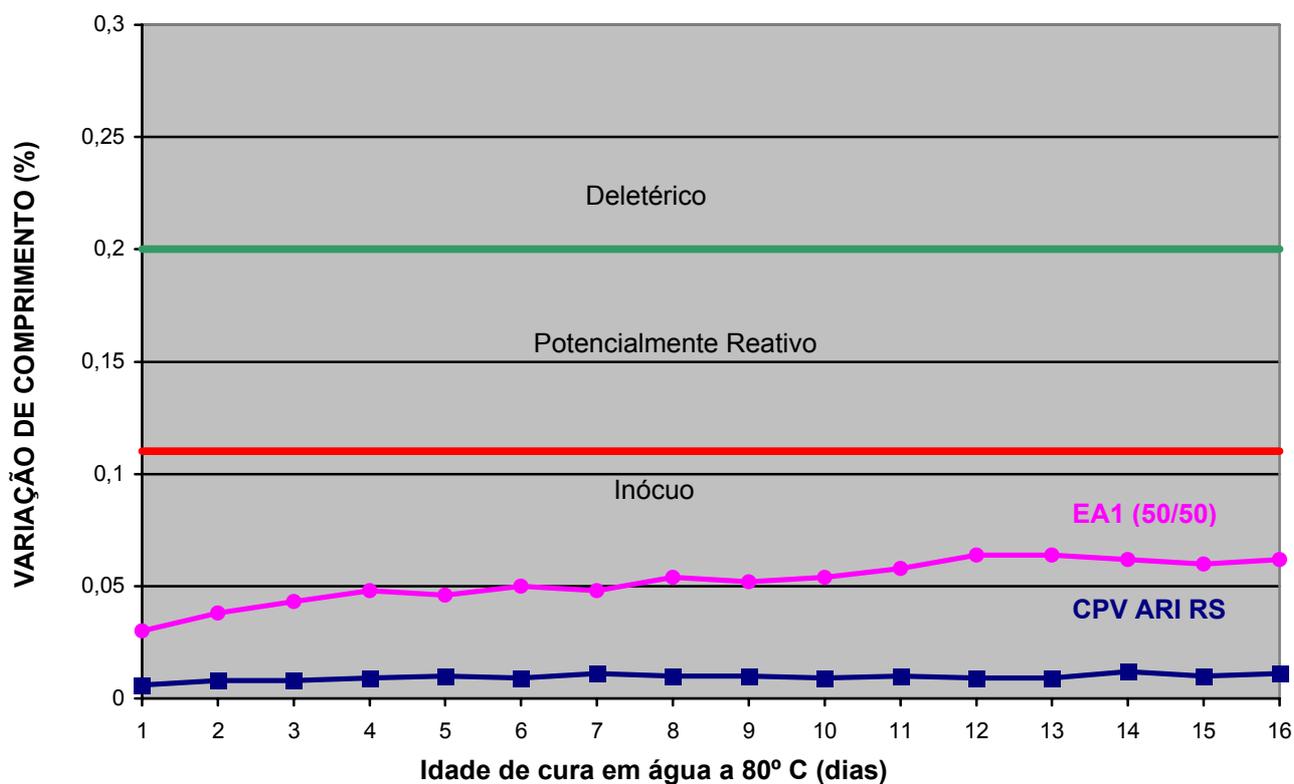


Figura 7.7 Variação de comprimento (%) de barras submetidas ao ensaio de expansão, – Escória EA1 moída pelo processo de micronização, com diâmetro médio de 3,37µm. Ensaio de expansão – Escória EA1 (50/50) e CPV ARI RS

Para MÂNCIO (2001), a expansão de uma escória de aciaria é influenciada pela sua distribuição granulométrica e pela sua superfície específica. Ao pesquisar a expansão pelo método adaptado das barras, de uma escória de aciaria com distribuição granulométrica contínua, ou seja, com diversos tamanhos de grãos, estas apresentam maiores expansões que as escórias com granulometria uniforme.

Também é citado por MONTGOMERY e WANG (1991) que instabilidade volumétrica que ocorre na escória de aciaria é função da constituição química, de sua distribuição granulométrica e também da dimensão do grão.

Os resultados encontrados para o ensaio do método adaptado das barras (figuras 7.5, 7.6 e 7.7) estão em conformidade com o que preconiza MÂNCIO (2001) e MONTGOMERY e WANG (1991).

Uma vez que as escórias moídas no aparelho de Abrasão Los Angeles apresentaram inicialmente instabilidade volumétrica, procurou-se observar o comportamento destas escórias ao longo do tempo em relação à expansibilidade. A escória EA1 (150 min) e EA! (210 min) foram deixadas nas condições ambientais do laboratório e após 45 dias de exposição, foram submetidas novamente ao ensaio de expansão pelo método das barras. Para as duas escórias ocorreu a estabilização, indicando desta forma que a exposição dos grãos às condições ambientais ao longo do tempo influencia o fenômeno de expansão (figuras 7.4 e 7.5).

7.4 AVALIAÇÃO DA EXPANSIBILIDADE PELO MÉTODO DA AUTOCLAVE (ASTM C 151, 1993)

A tabela 7.6 apresenta a expansibilidade potencial de misturas constituídas de “50% de CPV ARI RS e 50% de escória EA1” moídas em moinho de bolas (aparelho de Abrasão Los Angeles) por um período de 150 minutos e 210 minutos, bem como a moagem pelo processo de micronização, quando avaliadas pelo ensaio de autoclave segundo o método de ensaio preconizado pela ASTM C 151 (1993).

Tabela 7.6 Expansibilidade pelo método da autoclave (ASTM C 151, 1993) das escórias (50% de CPV ARI RS + 50% de escória) EA1 (diâmetro médio de 54,37 μ m); EA1 (diâmetro médio de 10,06 μ m) e escória micronizada EA1 (diâmetro médio de 3,37 μ m)

AMOSTRA	ÁGUA DE CONSISTÊNCIA	
	NORMAL (%)	EXPANSÃO MÉDIA (%)
CPV ARI RS ϕ médio = 12,13 μ m	28,6	0,027
EA1 (50/50) ϕ médio = 54,37 μ m	22,1	1,175
EA1 (50/50) ϕ médio = 10,06 μ m	25,2	1,169
EA1 (50/50) ϕ médio = 3,37 μ m	30,1	0,168

Na tabela 7.6 a mistura EA1 (50/50), que usou a escória micronizada com diâmetro médio de 3,37 μ m, apresentou uma expansão média de 0,168%, ficando abaixo do limite máximo de 0,8% que é preconizado pela “ASTM C 1157 – Standard Performance Specification for Blended Hydraulic Cement”. Porém as escórias que foram moídas em aparelho de Abrasão Los Angeles, EA1 (50/50), com diâmetro médio de 54,37 μ m e 10,06 μ m, apresentaram resultados de expansão de 46,88% e 46,13%, respectivamente, superior ao critério de 0,8% preconizado pela ASTM C 1157.

O processo de moagem por micronização possibilita reduzir os diâmetros dos grãos da escória (ϕ médio = 3,37 μ m) e expor sua superfície às reações químicas causadoras da expansão, consequentemente, quando do uso desta escória micronizada em combinação com o cimento Portland em concretos e argamassas, o fenômeno de expansão não estará presente, conforme ficou demonstrado nos ensaios. Desta forma, a utilização da escória micronizada pode se dar tão logo o processo de micronização termine, ficando assim desmistificado o procedimento preconizado por alguns autores, de que se tem que estocar a escória por longos períodos (mínimo de 3 meses e máximo de 6 meses) para garantir sua estabilidade (DAIDO STEEL, 1993; DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1994).

O processo de moagem por micronização garantiu a estabilidade da utilização da escória de aciaria recém gerada, em relação ao fenômeno de expansão.

No capítulo a seguir, será tratado o desempenho desta escória micronizada como material cimentício, focando-se o seu desempenho em relação à resistência mecânica, bem como a sua durabilidade em função das propriedades de absorção d'água e penetração de íons-cloretos.

8 VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA ELÉTRICA MICRONIZADA COMO MATERIAL CIMENTÍCIO

8.1 CONSIDERAÇÕES

Conforme ficou demonstrado nos ensaios de caracterização física, química, microestrutural, ambiental, reatividade pozolânica, resistência mecânica à compressão e expansibilidade, a escória de aciaria elétrica micronizada pode ser utilizada como material cimentício, ressaltando-se, principalmente, que a moagem pelo processo de micronização estabiliza o fenômeno de expansão da escória.

Neste capítulo, procurou-se estudar o desempenho da escória de aciaria elétrica micronizada (EA1), recém-gerada, como material cimentício sob a ótica dos seguintes parâmetros:

- desempenho mecânico: comparação de resistência mecânica à compressão (Escória granulada de alto-forno EGAF x Escória de aciaria elétrica micronizada EA1);
- durabilidade: absorção de água e penetração de íons cloretos.

No ensaio de desempenho mecânico comparou-se a resistência à compressão de corpos-de-prova de argamassas (NBR 7215, 1996), moldados nos traços 1 : 1,5 ; 1 : 3,0 e 1 : 4,5, quando da utilização das misturas de “CPV ARI RS e escória de aciaria elétrica micronizada EA1” com misturas “CPV ARI RS e escória granulada de alto-forno”. Esta comparação é importante uma vez que a escória granulada de alto-forno (EGAF) é produzida comercialmente e já tem seu uso consagrado no meio técnico. As proporções de misturas analisadas foram de 0% (referência), 10%, e 34%, tanto para as argamassas constituídas de escória de aciaria micronizada EA1, bem como para as argamassas constituídas de escória granulada de alto-forno (EGAF), em substituição ao CPV ARI RS, em massa. O limite inferior de 10% foi adotado por ser um valor geralmente usado quando da substituição de resíduos por cimento Portland (MASUERO, 2001). O limite superior de 34% foi utilizado por ser este o valor definido pela especificação de cimento Portland, do tipo composto, citado na NBR 11578 (tabela 3.1).

O índice de consistência (NBR 7215, 1996) adotado na pesquisa foi o de (260 ± 10) mm, sendo determinado na mesa de consistência “flow table” (MASUERO, 2001).

Nos ensaios de durabilidade (absorção e penetração de íons cloretos) foram utilizados os mesmos traços e os mesmos percentuais de substituição de cimento Portland por escória de aciaria elétrica micronizada EA1. A figura 8.1 apresenta o fluxograma dos ensaios realizados.

Todos os traços de argamassa foram moldados com areia normal brasileira (NBR 7214, 1990).

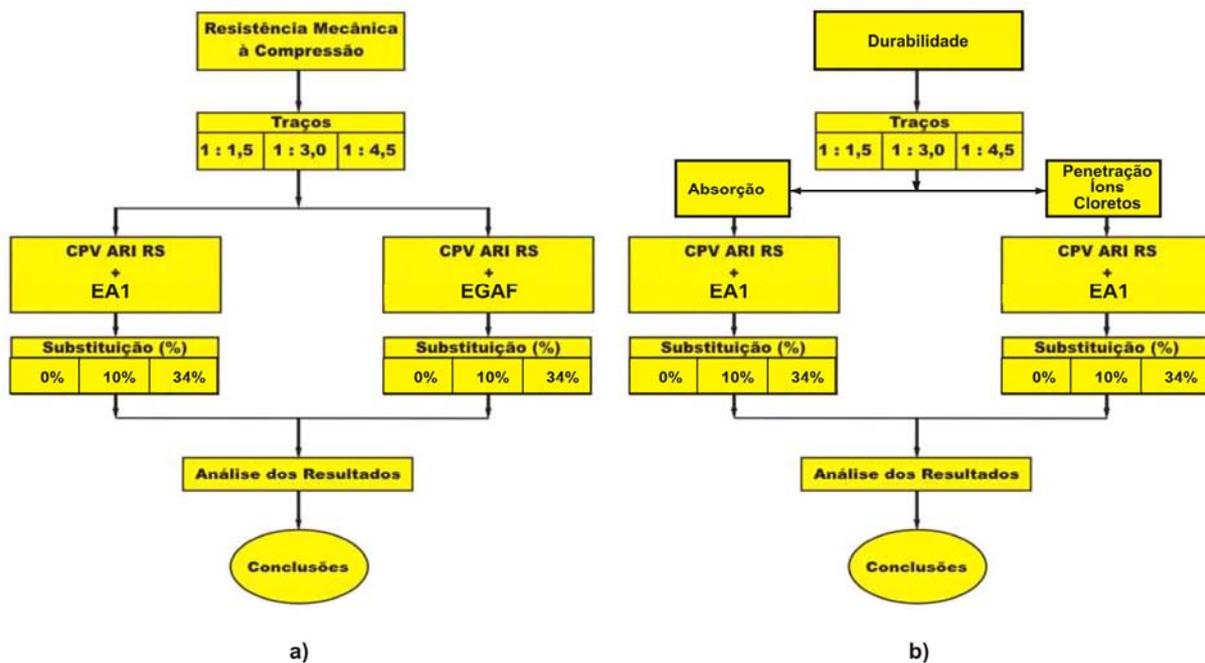


Figura 8.1 Fluxogramas de avaliação de propriedades de argamassas constituídas de escória de aciaria elétrica micronizada EA1: a) resistência mecânica à compressão e b) durabilidade (absorção e penetração íons cloretos).

8.2 DESEMPENHO MECÂNICO: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

A propriedade mecânica de resistência à compressão axial é um dos principais parâmetros para se definir e caracterizar um dado tipo de concreto ou argamassa. As idades de avaliação das resistências mecânicas à compressão foram de 7, 28 e 91 dias.

8.2.1 RESULTADOS

As tabelas 8.1 a 8.3 e figuras 8.2 a 8.4 apresentam os resultados de resistência à compressão de corpos-de-prova de argamassa constituídos de escória de aciaria elétrica micronizada EA1 nos traços 1 : 1,5; 1 : 3,0 e 1 : 4,5 nas idades de 7, 28 e 91 dias.

As tabelas 8.4 a 8.6 e figuras 8.5 a 8.7 apresentam os resultados de resistência à compressão de corpos-de-prova de argamassa constituídos de escória granulada de alto-forno (EGAF) nos traços 1 : 1,5; 1 : 3,0 e 1 : 4,5 nas idades de 7, 28 e 91 dias.

Tabela 8.1 Resultados de resistência à compressão de corpos-de-prova de argamassa constituídos de escória de aciaria elétrica micronizada EA1 no traço 1 : 1,5 aos 7, 28 e 91 dias de idade

TRAÇO	$\frac{a}{c+e}$	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM CORPOS-DE-PROVA DE ARGAMASSA (1 : 1,5) - MPa											
		7 dias				28 dias				91 dias			
A0 (100)	0,31	51,77	50,29	52,83	54,37	64,86	63,82	62,19	63,17	68,87	69,17	69,30	66,12
		DRM = 3,94%				DRM = 2,12%				DRM = 3,29%			
		fcm = 52,31 MPa				fcm = 63,51 MPa				fcm = 68,36 MPa			
EA1 (90/10)	0,30	39,17	38,15	37,16	36,12	51,72	53,10	54,19	51,03	54,12	55,96	53,12	54,74
		DRM = 4,04%				DRM = 3,20%				DRM = 2,70%			
		fcm = 37,65 MPa				fcm = 52,51 MPa				fcm = 54,49 MPa			
EA1 (66/34)	0,29	28,61	29,32	30,12	30,47	39,12	38,17	37,94	38,10	43,12	44,19	42,75	41,19
		DRM = 3,44%				DRM = 2,06%				DRM = 3,78%			
		fcm = 29,63 MPa				fcm = 38,33 MPa				fcm = 42,81 MPa			

$\frac{a}{c+e}$: relação $\frac{\text{água}}{\text{cimento} + \text{escória (EA1)}}$

DRM: Desvio Relativo Máximo
fcm: Resistência média à compressão

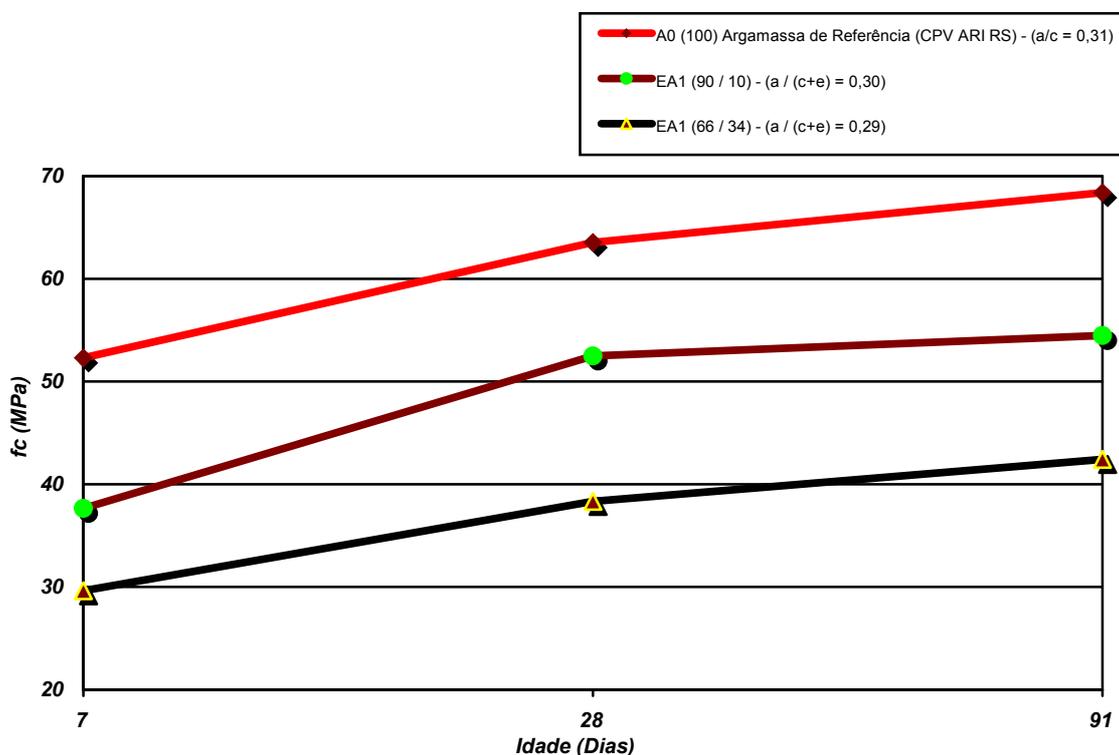


Figura 8.2 Resistência à compressão de argamassas no traço 1 : 1,5, constituído de CPV ARI RS, escória de aciaria elétrica micronizada EA1 e areia normal

Tabela 8.2 Resultados de resistência à compressão de corpos-de-prova de argamassa constituídos de escória de aciaria elétrica micronizada EA1 no traço 1 : 3 aos 7, 28 e 91 dias de idade

TRAÇO	$\frac{a}{c+e}$	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM CORPOS-DE-PROVA DE ARGAMASSA (1 : 3) - MPa											
		7 dias				28 dias				91 dias			
A0 (100)	0,53	42,31	43,12	41,76	43,74	54,12	55,19	54,30	53,12	57,31	56,48	58,17	56,98
		DRM = 2,36%				DRM = 1,96%				DRM = 1,62%			
		fcm = 42,73 MPa				fcm = 54,18 MPa				fcm = 57,24 MPa			
EA1 (90/10)	0,52	35,19	34,12	33,74	32,12	46,97	45,12	44,17	45,89	48,10	46,97	47,38	48,97
		DRM = 4,94%				DRM = 3,16%				DRM = 2,34%			
		fcm = 33,79 MPa				fcm = 45,53 MPa				fcm = 47,85 MPa			
EA1 (66/34)	0,50	28,14	29,36	27,17	26,48	35,28	36,17	38,04	37,16	39,11	37,18	36,12	35,84
		DRM = 5,68%				DRM = 3,76%				DRM = 5,53%			
		fcm = 27,78 MPa				fcm = 36,66 MPa				fcm = 37,06 MPa			

$\frac{a}{c+e}$: relação $\frac{\text{água}}{\text{cimento} + \text{escória (EA1)}}$

DRM: Desvio Relativo Máximo
fcm: Resistência média à compressão

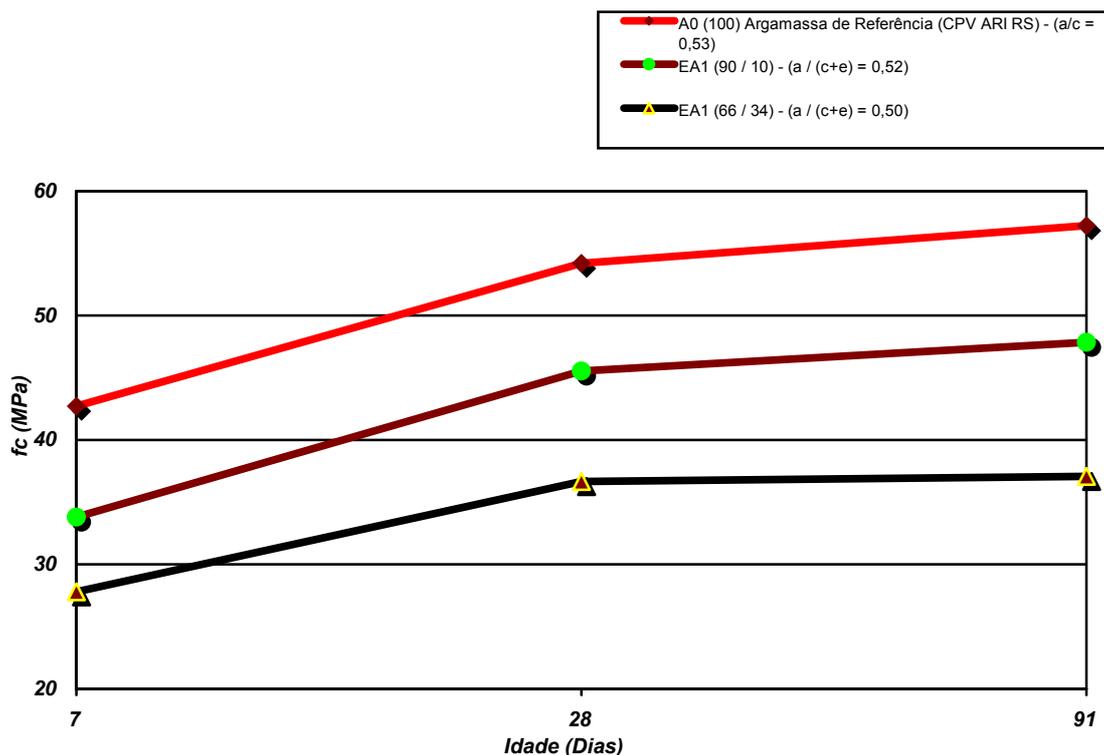


Figura 8.3 Resistência à compressão de argamassas no traço 1 : 3, constituído de CPV ARI RS, escória de aciaria elétrica micronizada EA1 e areia normal

Tabela 8.3 Resultados de resistência à compressão de corpos-de-prova de argamassa constituídos de escória de aciaria elétrica micronizada EA1 no traço 1 : 4,5 aos 7, 28 e 91 dias de idade

TRAÇO	$\frac{a}{c+e}$	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM CORPOS-DE-PROVA DE ARGAMASSA (1 : 4,5) - MPa											
		7 dias				28 dias				91 dias			
A0 (100)	0,79	16,12	17,31	17,94	16,17	22,72	23,92	24,86	22,87	25,12	26,96	27,84	26,03
		DRM = 5,85%				DRM = 5,38%				DRM = 5,09%			
		fcm = 16,88 MPa				fcm = 23,59 MPa				fcm = 26,49 MPa			
EA1 (90/10)	0,77	10,17	9,76	9,80	9,24	17,34	16,90	16,86	16,10	17,47	18,10	18,91	17,12
		DRM = 5,13%				DRM = 3,21%				DRM = 5,76%			
		fcm = 9,74 MPa				fcm = 16,80 MPa				fcm = 17,88 MPa			
EA1 (66/34)	0,76	5,82	6,12	6,07	6,18	9,13	9,53	9,87	10,02	12,94	13,10	12,17	12,04
		DRM = 3,64%				DRM = 5,29%				DRM = 4,29%			
		fcm = 6,04 MPa				fcm = 9,64 MPa				fcm = 12,56 MPa			

$\frac{a}{c+e}$: relação $\frac{\text{água}}{\text{cimento} + \text{escória (EA1)}}$

DRM: Desvio Relativo Máximo
fcm: Resistência média à compressão

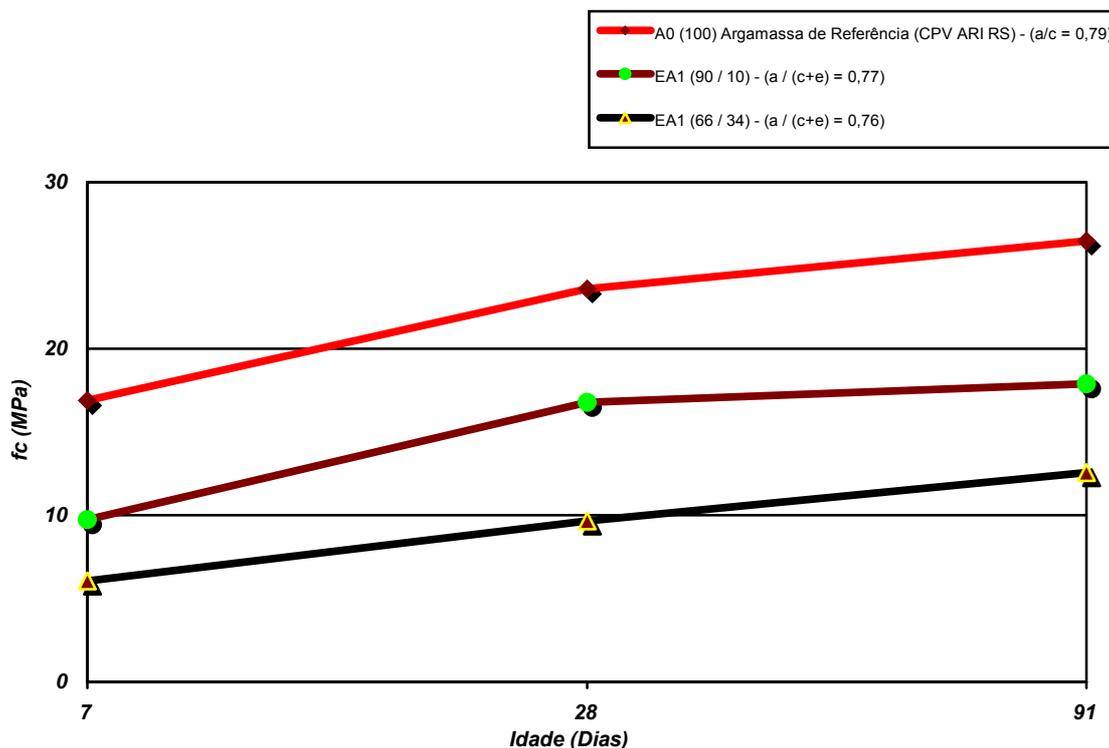


Figura 8.4 Resistência à compressão de argamassas no traço 1 : 4,5, constituído de CPV ARI RS, escória de aciaria elétrica micronizada EA1 e areia normal

Tabela 8.4 Resultados de resistência à compressão de corpos-de-prova de argamassa constituídos de escória granulada de alto-forno (EGAF) no traço 1 : 1,5 aos 7, 28 e 91 dias de idade

TRAÇO	$\frac{a}{c+e}$	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM CORPOS-DE-PROVA DE ARGAMASSA COM EGAF NO TRAÇO 1 : 1,5 (MPa)											
		7 dias				28 dias				91 dias			
A0 (100)	0,31	51,77	50,29	52,83	54,37	64,86	63,82	62,19	63,17	68,87	69,17	69,30	66,12
		DRM = 3,94%				DRM = 2,13%				DRM = 3,28%			
		fcm = 52,31 MPa				fcm = 63,51 MPa				fcm = 68,36 MPa			
EGAF (90/10)	0,32	48,62	46,11	46,17	47,31	54,32	55,17	56,10	55,19	60,17	61,82	62,14	63,94
		DRM = 3,34%				DRM = 3,20%				DRM = 2,70%			
		fcm = 47,05 MPa				fcm = 55,20 MPa				fcm = 62,02 MPa			
EGAF (66/34)	0,33	37,48	39,12	38,47	38,17	43,11	45,86	46,10	45,97	51,74	54,19	53,12	54,74
		DRM = 2,16%				DRM = 4,75%				DRM = 3,18%			
		fcm = 38,31 MPa				fcm = 45,26 MPa				fcm = 53,44 MPa			

$$\frac{a}{c+e} : \text{relação } \frac{\text{água}}{\text{cimento} + \text{escória (EGAF)}}$$

DRM: Desvio Relativo Máximo
fcm: Resistência média à compressão

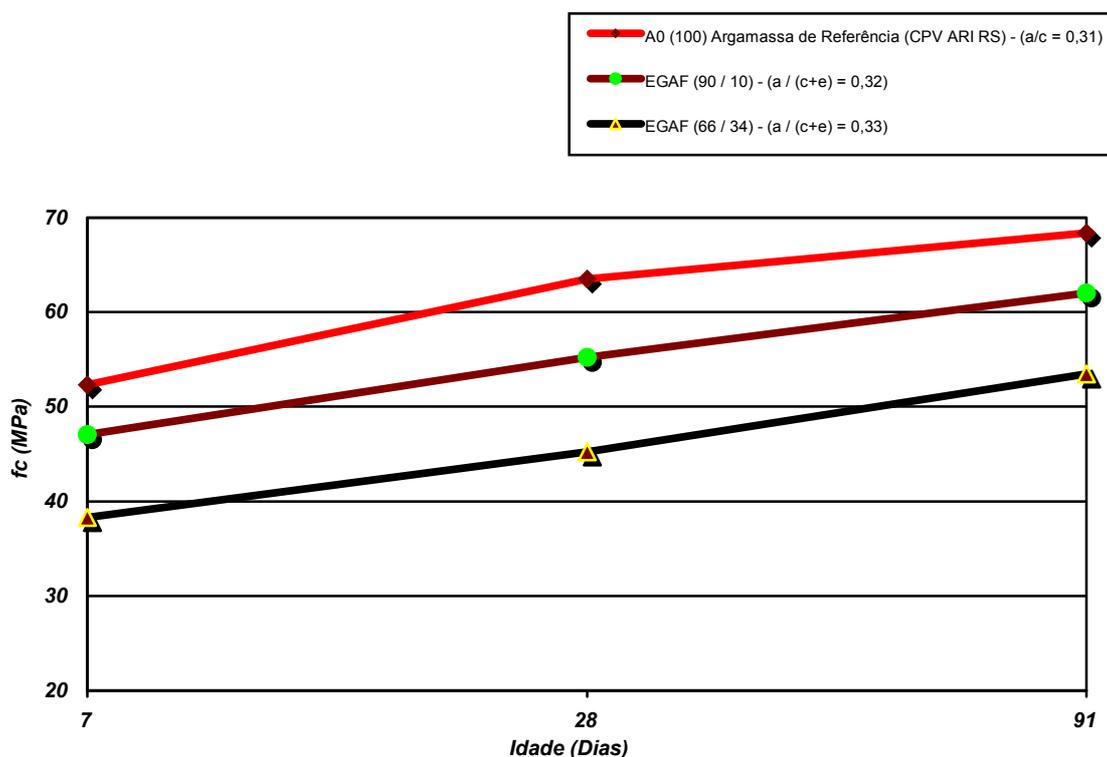


Figura 8.5 Resistência à compressão de argamassas no traço 1 : 1,5, constituído de CPV ARI RS, escória granulada de alto-forno (EGAF) e areia normal

Tabela 8.5 Resultados de resistência à compressão de corpos-de-prova de argamassa constituídos de escória granulada de alto-forno (EGAF) no traço 1 : 3 aos 7, 28 e 91 dias de idade

TRAÇO	$\frac{a}{c+e}$	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM CORPOS-DE-PROVA DE ARGAMASSA COM EGAF NO TRAÇO (1 : 3) - MPa											
		7 dias				28 dias				91 dias			
A0 (100)	0,53	42,31	43,12	41,76	43,74	54,12	55,19	54,30	53,12	57,31	56,48	58,17	56,98
		DRM = 2,36%				DRM = 1,96%				DRM = 1,62%			
		fcm = 42,73 MPa				fcm = 54,18 MPa				fcm = 57,24 MPa			
EGAF (90/10)	0,54	40,72	42,12	41,19	42,74	52,12	53,17	52,92	51,10	56,13	55,19	54,17	55,86
		DRM = 2,51%				DRM = 2,33%				DRM = 2,11%			
		fcm = 41,69 MPa				fcm = 52,32 MPa				fcm = 55,34 MPa			
EGAF (66/34)	0,55	36,47	37,19	38,15	39,86	43,17	44,11	45,17	44,96	49,12	50,12	51,37	52,32
		DRM = 5,14%				DRM = 2,67%				DRM = 3,17%			
		fcm = 37,91 MPa				fcm = 44,35 MPa				fcm = 50,37 MPa			

$\frac{a}{c+e}$: relação $\frac{\text{água}}{\text{cimento} + \text{escória (EGAF)}}$

DRM: Desvio Relativo Máximo
fcm: Resistência média à compressão

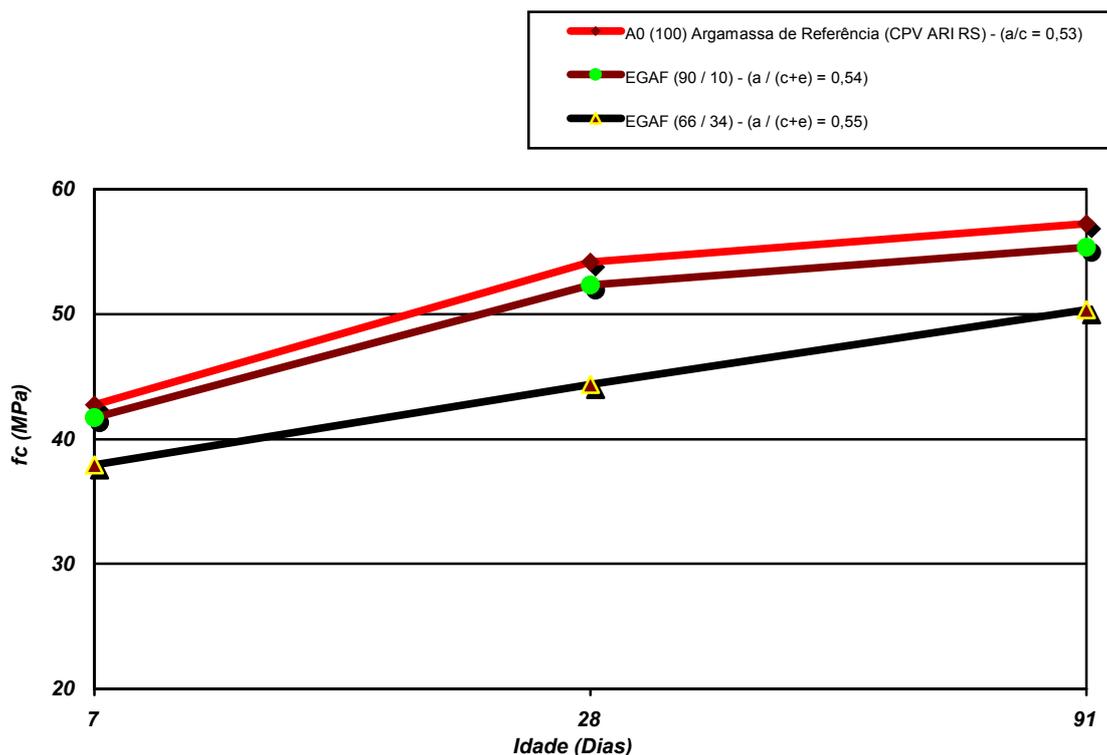


Figura 8.6 Resistência à compressão de argamassas no traço 1 : 3, constituído de CPV ARI RS, escória granulada de alto-forno (EGAF) e areia normal

Tabela 8.6 Resultados de resistência à compressão de corpos-de-prova de argamassa constituídos de escória granulada de alto-forno (EGAF) no traço 1 : 4,5 aos 7, 28 e 91 dias de idade

TRAÇO	$\frac{a}{c+e}$	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM CORPOS-DE-PROVA DE ARGAMASSA COM EGAF NO TRAÇO (1 : 4,5) - MPa											
		7 dias				28 dias				91 dias			
A0 (100)	0,79	16,12	17,31	17,94	16,17	22,72	23,92	24,86	22,87	25,12	26,96	27,84	26,03
		DRM = 5,85%				DRM = 5,38%				DRM = 5,09%			
		fcm = 16,88 MPa				fcm = 23,59 MPa				fcm = 26,49 MPa			
EGAF (90/10)	0,81	14,87	15,84	16,12	14,72	20,84	21,37	22,04	22,72	23,92	22,17	24,12	23,04
		DRM = 4,18%				DRM = 4,51%				DRM = 4,89%			
		fcm = 15,38 MPa				fcm = 21,74 MPa				fcm = 23,31 MPa			
EGAF (66/34)	0,82	10,94	11,75	10,89	12,03	17,42	18,02	16,49	17,13	19,94	20,10	18,72	18,92
		DRM = 5,52%				DRM = 4,52 %				DRM = 3,60 %			
		fcm = 11,40 MPa				fcm = 17,27 MPa				fcm = 19,42 MPa			

$\frac{a}{c+e}$: relação $\frac{\text{água}}{\text{cimento} + \text{escória (EGAF)}}$

DRM: Desvio Relativo Máximo
fcm: Resistência média à compressão

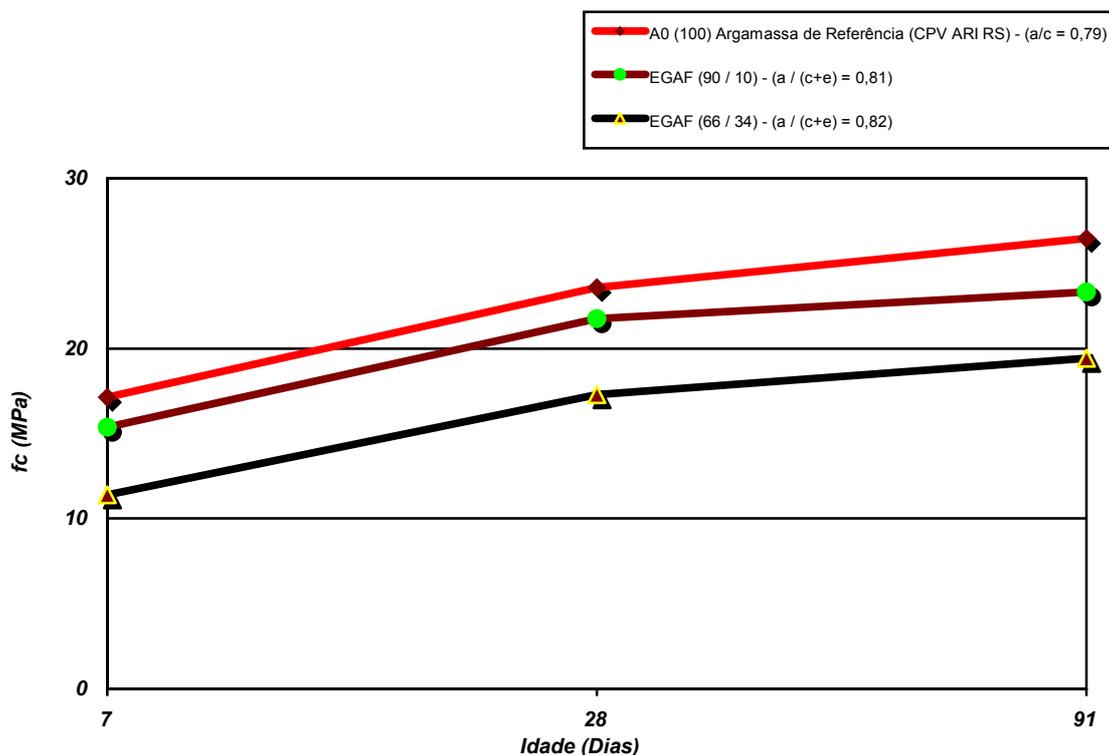


Figura 8.7 Resistência à compressão de argamassas no traço 1 : 4,5, constituído de CPV ARI RS, escória de aciaria elétrica micronizada EGAF e areia normal

8.2.1.1 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A análise estatística dos resultados obtidos nos ensaios foi realizada através da Análise de Variância (ANOVA). A ANOVA tem por objetivo avaliar se os valores das variáveis de respostas, medidos em diferentes níveis, diferem entre si, com um nível de significância de 95% (RIBEIRO, 2000). Para análise estatística dos resultados foi utilizado o pacote estatístico SPSS for Windows – Release 10.0.

O critério utilizado para se considerar que a variável em análise é estatisticamente significativa é definido quando o valor de $F_{\text{calculado}}$ (F_{cal}), que é baseado na distribuição de Fischer, for superior ao valor de F_{tabelado} ($F_{0,05}$).

8.2.1.1.1. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA ESCÓRIA EA1

A tabela 8.7 apresenta os resultados obtidos na análise estatística, quanto à resistência à compressão das argamassas, produzidas com EA1, mostrando as variáveis que apresentam diferenças significativas, ao nível de significância de 5%.

Embásado nos resultados obtidos na ANOVA, observa-se que as variáveis idade, traço e teor exercem influências significativas nos resultados da resistência à compressão das argamassas, bem como, existe interação significativa entre a idade e o traço, a idade e o teor e o traço e o teor. Também existe interação significativa entre a idade, o traço e o teor de EA1 sobre os resultados da resistência à compressão das argamassas.

Tabela 8.7 Resultados da análise estatística através da ANOVA do efeito da idade, traço e teor de EA1 na resistência à compressão das argamassas com escória de aciaria elétrica micronizada EA1

FATOR	GDL	MQ	F _{calc}	F _{0,05}	Significância*
Idade	2	1434,53	1300,43	3,11	S
Traço	2	11284,27	10229,39	3,11	S
Teor	2	3023,12	2740,51	3,109	S
Idade x Traço	4	48,32	43,79	2,48	S
Idade x Teor	4	19,03	17,25	2,48	S
Traço x Teor	4	102,47	92,89	2,48	S
Idade x Traço x Teor	8	2,37	2,15	2,06	S
ERRO	81	1,10			

GDL: Grau de Liberdade

MQ: Média Quadrática

F_{calc}: Valor Calculado de F

F_{0,05}: Valor Tabelado de F para o nível de significância de 5%

S: Significativo

NS: Não Significativo

***Significância:** $F_{\text{calc}} > F_{0,05}$: S

$F_{\text{calc}} < F_{0,05}$: NS

Através das figuras 8.8 a 8.13, pode-se notar que o desempenho das argamassas, em relação à resistência à compressão, aumenta com a idade e decresce quando o teor de EA1 é aumentado no traço.

A resistência à compressão em relação ao teor de adição, para os percentuais de 10% e 34%, em relação à argamassa referência, diminuiu em 21,96% e 40,63%, respectivamente (figura 8.8)

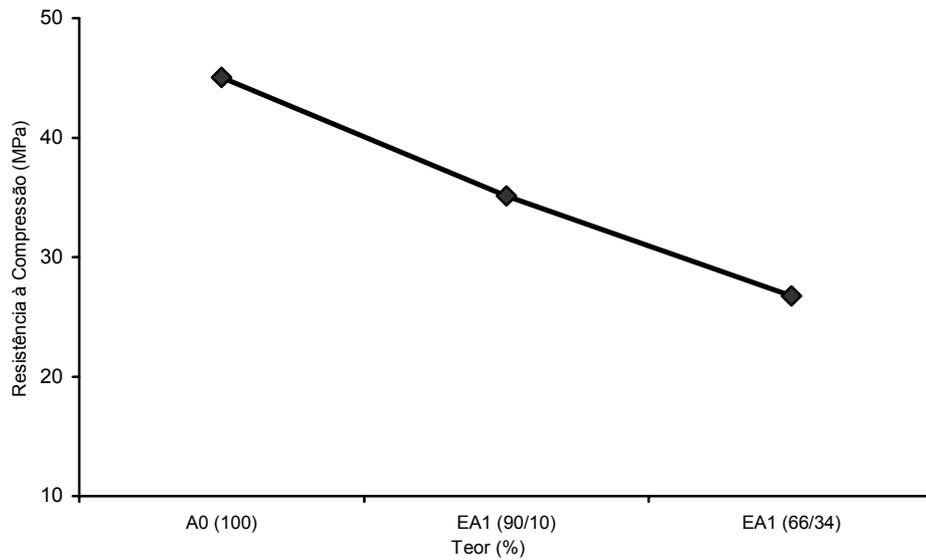


Figura 8.8 Comportamento das argamassas quanto à resistência à compressão em função dos diferentes teores da escória de aciaria elétrica micronizada (EA1)

A resistência à compressão em relação aos traços, para os percentuais de 10% e 34%, em relação à argamassa referência, diminuiu em 12,91% e 68,24%, respectivamente (figura 8.9)

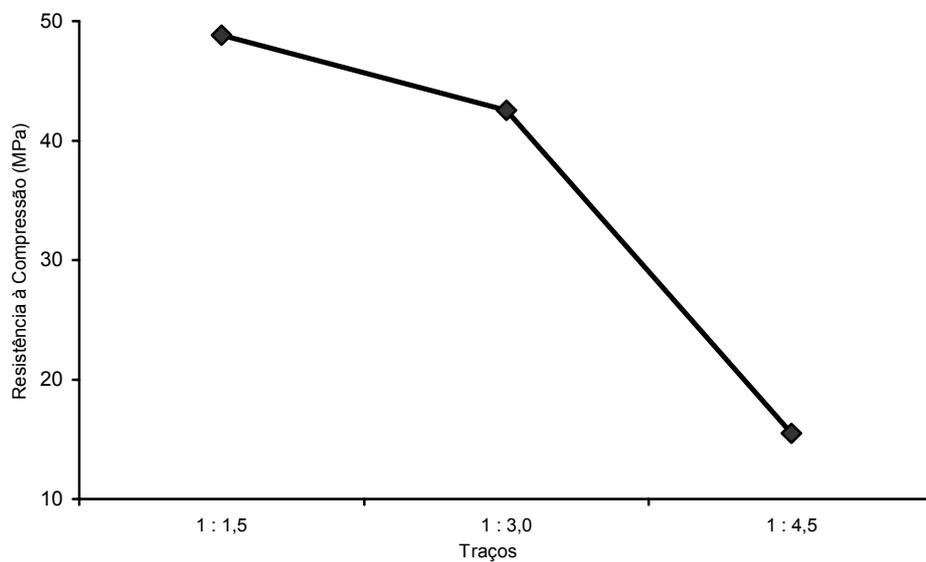


Figura 8.9 Comportamento das argamassas quanto à resistência à compressão em função dos diferentes traços

A resistência à compressão das argamassas em relação à idade de 7 dias, para 28 dias e 91 dias, respectivamente, cresce 32,84% e 42,17% (figura 8.10).

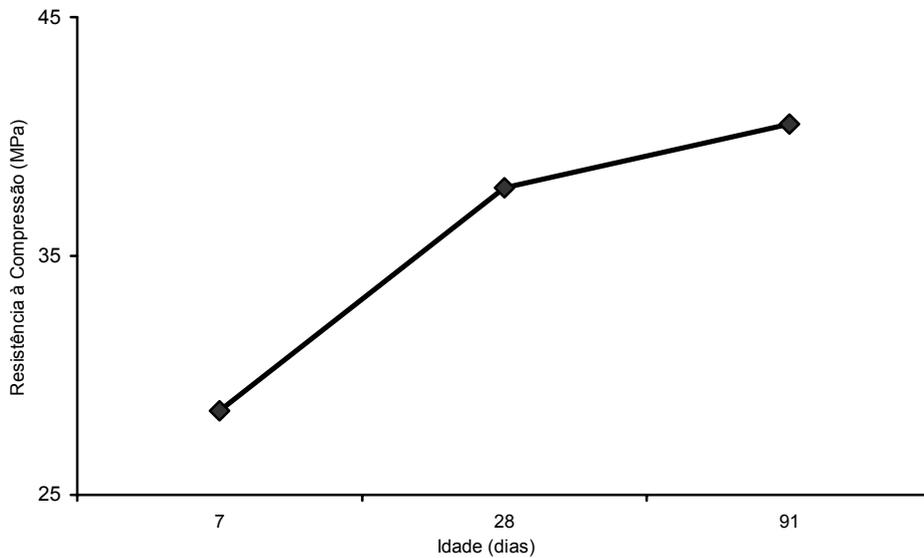


Figura 8.10 Comportamento das argamassas quanto à resistência à compressão em função das diferentes idades

Em relação à interação significativa entre a idade e o traço na resistência à compressão das argamassas (figura 8.11), pode-se dizer:

- para uma mesma idade, a medida que o traço fica mais pobre, ocorre a diminuição da resistência à compressão;
- para o traço 1 : 3, em relação ao traço 1 : 1,5, ocorreu uma redução nas idades de 7, 28 e 91 dias, em 12,77%, 11,64% e 14,19%, respectivamente;
- para o traço 1 : 4,5, em relação ao traço 1 : 1,5, ocorreu uma redução nas idades de 7, 28 e 91 dias, em 72,64%, 67,69% e 65,62%, respectivamente.

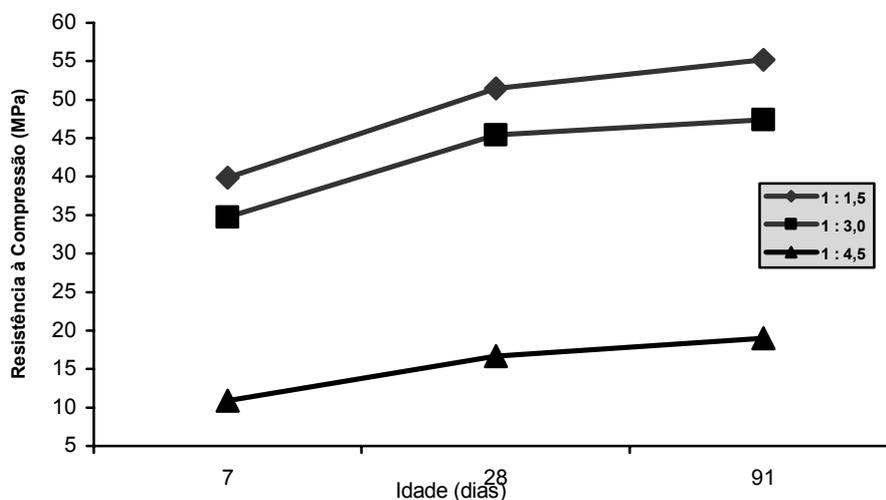


Figura 8.11 Efeito da interação entre idade e traço na resistência à compressão das argamassas

Em relação à interação significativa entre a idade e o teor de escória micronizada na resistência à compressão das argamassas (figura 8.12), pode-se dizer:

- para uma mesma idade, a medida que ocorre o aumento do teor de adição na argamassa, ocorre a diminuição da resistência;
- para a idade de 7 dias, ao substituir 10% e 34% de adição, ocorre redução de 27,47% e 43,31%, respectivamente, em relação ao teor referência (100% CPV ARI RS);
- para a idade de 28 dias, ao substituir 10% e 34% de adição, ocorre redução de 18,70% e 40,09%, respectivamente, em relação ao teor referência (100% CPV ARI RS);
- para a idade de 91 dias, ao substituir 10% e 34% de adição, ocorre redução de 20,93% e 39,21%, respectivamente, em relação ao teor referência (100% CPV ARI RS).

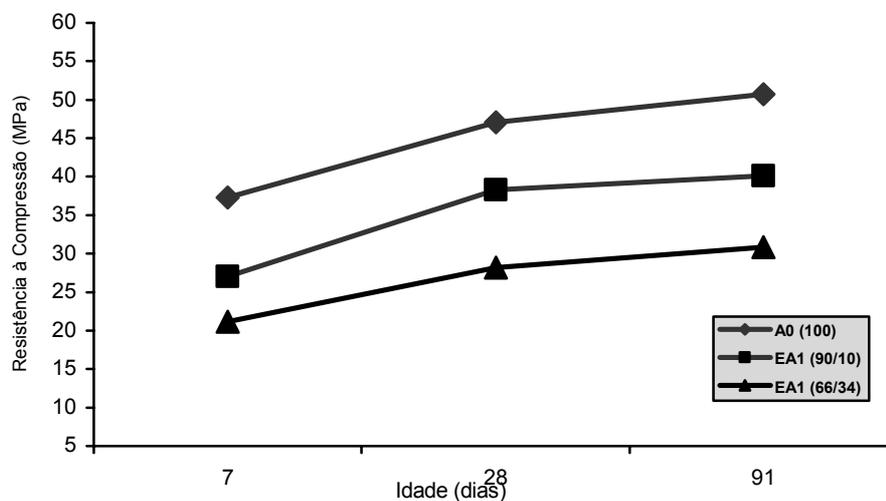


Figura 8.12 Efeito da interação entre idade e teor de EA1 na resistência à compressão das argamassas

Em relação à interação significativa entre o traço e o teor de escória micronizada na resistência à compressão das argamassas (figura 8.13), pode-se dizer:

- para um mesmo traço, a medida que aumenta o teor de adição, ocorre a diminuição da resistência à compressão das argamassas;
- para o traço 1 : 1,5, as adições de 10% e 34% em relação ao traço referência, reduziram as resistências à compressão de 21,47% e 39,85%, respectivamente;
- para o traço 1 : 3,0, as adições de 10% e 34% em relação ao traço referência, reduziram as resistências à compressão de 17,49% e 34,15%, respectivamente;
- para o traço 1 : 4,5, as adições de 10% e 34% em relação ao traço referência, reduziram as resistências à compressão de 33,64% e 57,84%, respectivamente.

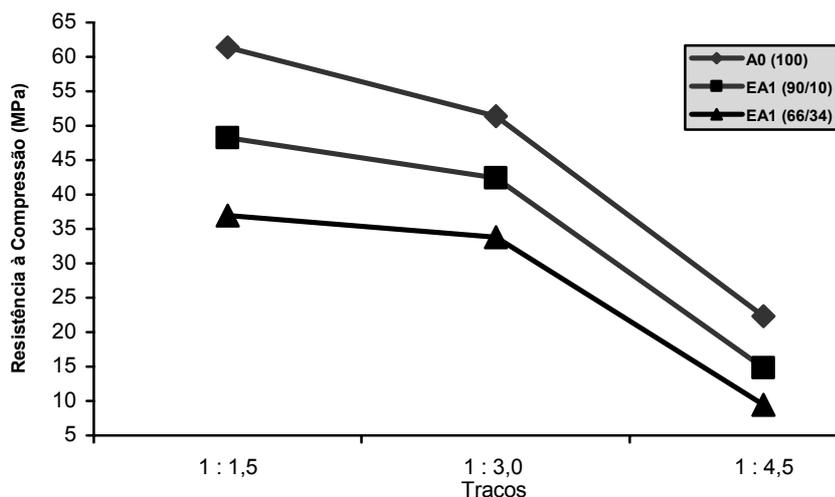


Figura 8.13 Efeito da interação entre traço e teor de EA1 na resistência à compressão das argamassas

O crescimento da resistência à compressão das argamassas, de 28 para 91 dias de idade, pode ser atribuído ao desenvolvimento de atividade pozolânica da escória EA1, devido à sua alta finura, bem como caracterizada pela distribuição granulométrica uniforme e com dimensão média de seus grãos de $3,37\mu\text{m}$ (tabela 7.2).

O “efeito fíler”, também contribui para o aumento da resistência à compressão das argamassas, pois tem como princípio de ação, restringir o crescimento dos produtos de hidratação do cimento, pois ao distribuir seus grãos nos vazios existentes entre os grãos do cimento, favorece o início de reações de hidratação de um maior número de partículas simultaneamente, gerando um grande número de cristais pequenos, ao invés de poucos com grandes dimensões, conseqüentemente, beneficiando o crescimento da resistência à compressão (DAL MOLIN, 1995; NIU et al., 2002).

Mesmo com a redução na resistência das argamassas, em relação ao traço referência, fica evidenciado que ao substituir CPV ARI RS por EA1, há o aparecimento do “efeito fíler”, bem como o de “efeito pozolânico”, uma vez que as argamassas apresentam bons níveis de resistência.

GUMIERI (2002), ao substituir 25% de escória de aciaria LD por cimento Portland, também encontrou uma diminuição de resistência à compressão de 15,8% e 14,7% para as idades de 28 e 91 dias, respectivamente, em relação ao traço referência. Ao substituir 34% da mesma escória por cimento Portland, também encontrou uma diminuição de resistência à compressão de 19,0% e 17,4% para as idades de 28 e 91 dias, respectivamente, em relação ao traço referência.

MASUERO (2001), ao granular uma escória de aciaria elétrica (ACIGRAN), e estudar traços de argamassa 1 : 1,5, 1 : 3,0 e 1 : 4,5, com substituição de 10%, 30% e 50% em relação ao cimento Portland, mostrou que do ponto de vista de resistência à compressão, o desempenho apresentado pelas argamassas com ACIGRAN, foi o mesmo que as argamassas de referência, independentemente do teor de ACIGRAN utilizado. Pode-se notar que a substituição de 50% de ACIGRAN ao cimento Portland utilizado na pesquisa, apresenta menores resultados de resistência à compressão aos 7 dias de idade. Entretanto, aos 91 dias de idade, supera o desempenho das

argamassas com outros teores de ACIGRAN, caracterizando o efeito da reação química da ACIGRAN ao longo do tempo.

8.2.1.1.2. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DE COMPARAÇÃO DA ESCÓRIA EA1 X ESCÓRIA EGAF

Na tabela 8.8 são apresentados os resultados da análise estatística de estudo comparativo entre as escórias EA1 e EGAF.

Existem diferenças significativas nos resultados da resistência à compressão das argamassas com as escórias EA1 e EGAF, sendo que as argamassas constituídas de EGAF apresentam valores superiores (figura 8.14).

Tabela 8.8 Resultados da análise estatística através da ANOVA do efeito da idade, traço e teor entre EA1 e EGAF na resistência à compressão das argamassas

FATOR	GDL	MQ	Fcalc	F _{0,05}	Significância*
Idade	2	2901,92	2666,84	3,05	S
Traço	2	23560,52	21651,89	3,05	S
Teor	2	3504,75	3022,83	3,05	S
Tipo de Escória	1	1339,32	1230,82	3,90	S
Idade x Traço	4	86,52	79,51	2,43	S
Idade x Teor	4	22,37	20,56	2,43	S
Traço x Teor	4	174,62	160,47	2,43	S
Idade x Escória	2	12,70	11,67	3,05	S
Traço x Escória	2	17,65	16,22	3,05	S
Teor x Escória	2	370,15	340,16	3,05	S
Idade x Traço x Teor	8	1,20	1,11	1,99	NS
Idade x Traço x Escória	4	4,90	4,50	2,43	S
Idade x Teor x Escória	4	7,48	6,88	2,43	S
Traço x Teor x Escória	4	5,82	5,35	2,43	S
Idade x Traço x Teor x Escória	8	3,91	3,59	1,99	S
ERRO	162	1,088			

GDL: Grau de Liberdade

MQ: Média Quadrática

Fcalc: Valor Calculado de F

F_{0,05}: Valor Tabelaado de F para o nível de significância de 5%

S: Significativo

NS: Não Significativo

***Significância:** Fcalc > F_{0,05} : S

Fcalc < F_{0,05} : NS

Observa-se nas figuras 8.14 a 8.21 o efeito da interação significativa entre a idade, o traço, o teor de substituição e o tipo de escória, bem como a interação entre estas variáveis sobre a resistência à compressão das argamassas. Para todas as situações apresentadas a substituição de CPV ARI RS por EGAF apresentou melhor desempenho, em relação à resistência à compressão, quando comparada com a substituição do CPV ARI RS por EA1.

A interação significativa entre os tipos de escórias (figura 8.14) mostrou que a adição de EGAF ao CPV ARI RS é 13,97% superior, quando comparada com a adição de EA1 ao CPV ARI RS.

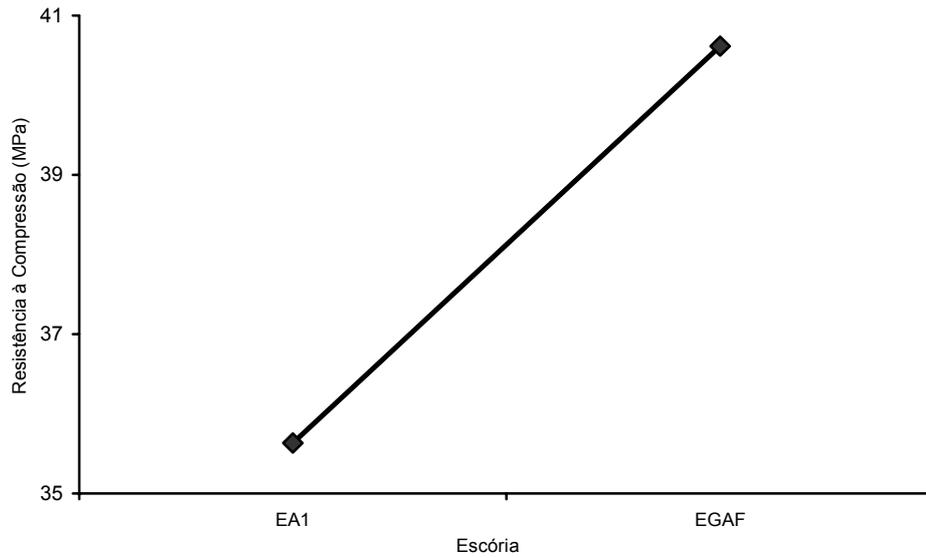


Figura 8.14 Resistência à compressão de argamassas em função do tipo de escória utilizada

Em relação à interação significativa entre o teor e os tipos de escória na resistência à compressão das argamassas (figura 8.15), pode-se dizer:

- para o teor de substituição de 10% ao CPV ARI RS, a adição EGAF é 18,26% maior que a adição EA1;
- para o teor de substituição de 34% ao CPV ARI RS, a adição EGAF é 32,26% maior que a adição EA1.

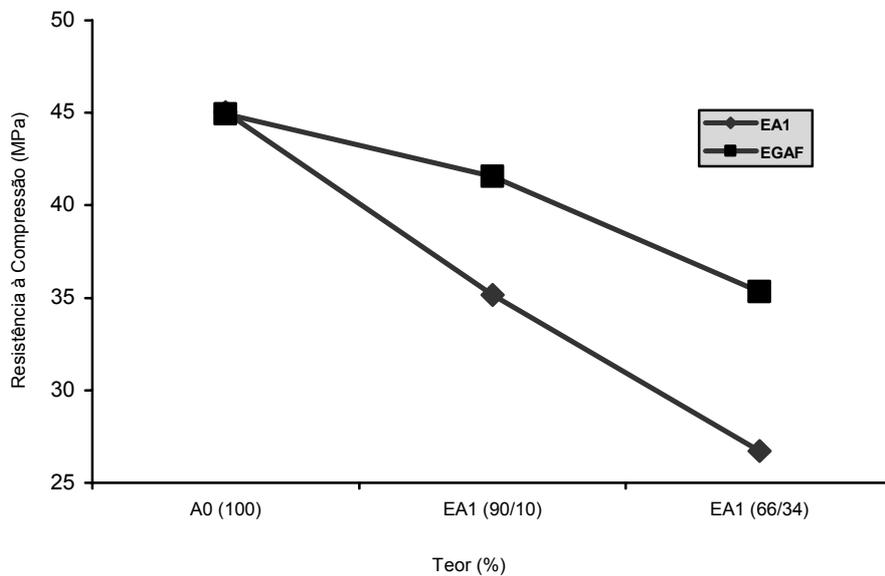


Figura 8.15 Influência da interação do teor e do tipo de escória na resistência à compressão

Em relação à interação significativa entre o traço e os tipos de escória na resistência à compressão das argamassas (figura 8.16), pode-se dizer:

- para o traço 1 : 1,5, quando se substitui EGAF por EA1, ocorre redução de 9,28% na resistência à compressão das argamassas;
- para o traço 1 : 3,0, quando se substitui EGAF por EA1, ocorre redução de 12,31% na resistência à compressão das argamassas;
- para o traço 1 : 4,5, quando se substitui EGAF por EA1, ocorre redução de 20,42% na resistência à compressão das argamassas.

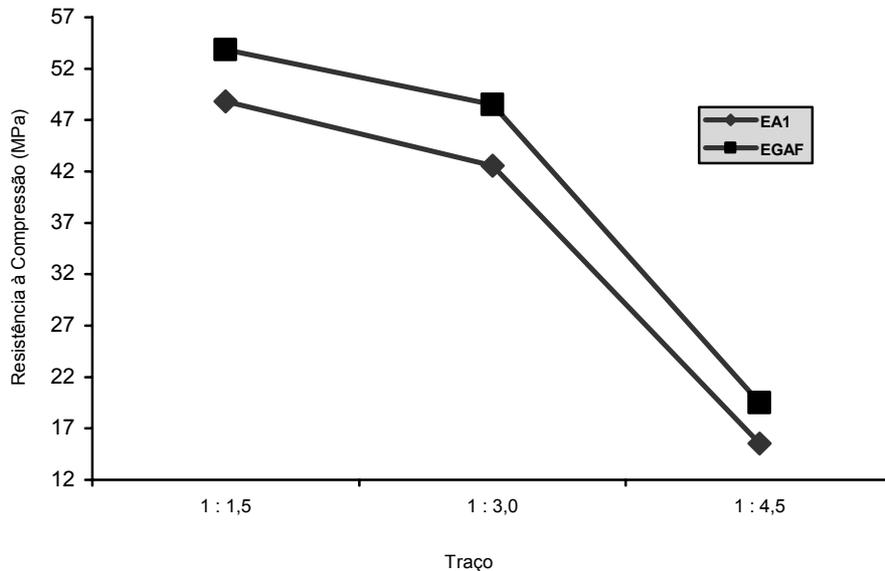


Figura 8.16 Influência da interação do traço e do tipo de escória na resistência à compressão

Em relação à interação significativa entre a idade e os tipos de escória na resistência à compressão das argamassas (figura 8.17), pode-se dizer:

- para as duas escórias, ocorre um aumento da resistência à compressão ao longo do tempo;
- ao se comparar as duas escórias para a idade de 7 dias, EA1 é 15,27% inferior a EGAF;
- ao se comparar as duas escórias para a idade de 28 dias, EA1 é 9,71% inferior a EGAF;
- ao se comparar as duas escórias para a idade de 91 dias, EA1 é 12,41% inferior a EGAF.

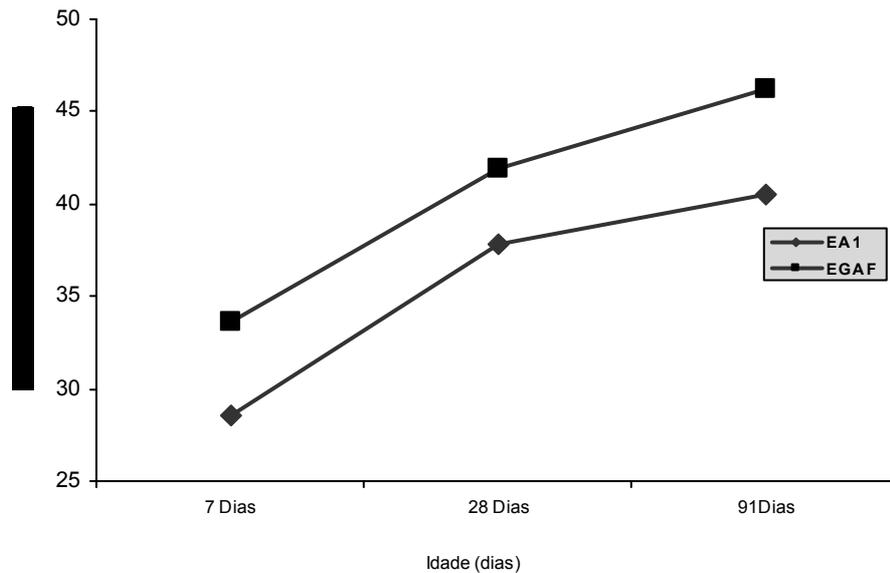


Figura 8.17 Influência da interação da idade e do tipo de escória na resistência à compressão

Em relação à interação significativa entre a idade, o traço e os tipos de escória na resistência à compressão das argamassas (figura 8.18), pode-se dizer:

- para as duas escórias, a medida que o traço torna-se mais pobre, ocorre uma diminuição na resistência à compressão das argamassas;
- aos 7 dias de idade: o traço 1 : 1,5 com a adição de EA1, torna-se 9,89% inferior ao com adição de EGAF; o traço 1 : 3,0 com EA1 torna-se 5,85% inferior ao com EGAF; o traço 1 : 4,5 com EA1 torna-se 12,56% inferior ao com adição de EGAF;
- aos 28 dias de idade: o traço 1 : 1,5 com a adição de EA1, torna-se 12,95% inferior ao com adição de EGAF; o traço 1 : 3,0 com EA1 torna-se 9,58% inferior ao com EGAF; o traço 1 : 4,5 com EA1 torna-se 14,73% inferior ao com adição de EGAF;
- aos 91 dias de idade: o traço 1 : 1,5 com a adição de EA1, torna-se 21,54% inferior ao com adição de EGAF; o traço 1 : 3,0 com EA1 torna-se 20,01% inferior ao com EGAF; o traço 1 : 4,5 com EA1 torna-se 25,15% inferior ao com adição de EGAF.

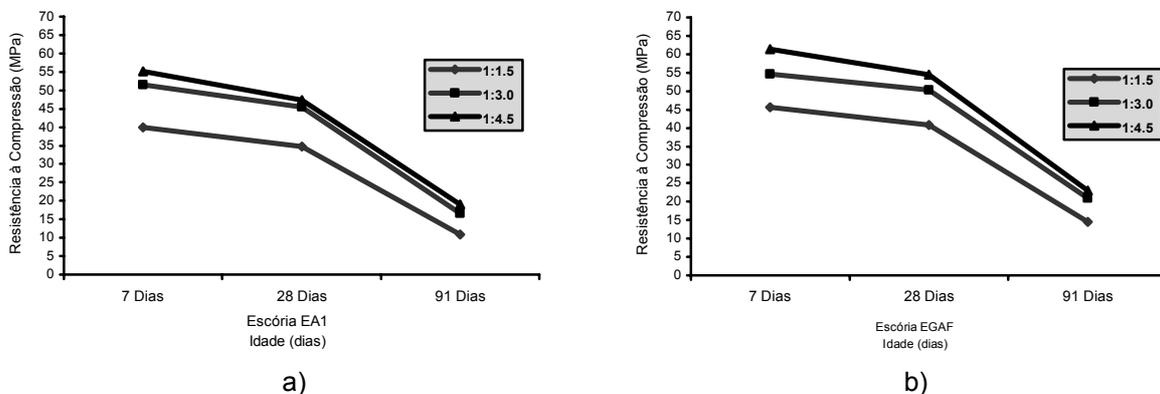


Figura 8.18 Influência da interação da idade, do traço e do tipo de escória na resistência à compressão: a) EA1 e b) EGAF

Em relação à interação significativa entre a idade, o teor e os tipos de escória na resistência à compressão das argamassas (figura 8.19), pode-se dizer:

- para as duas escórias, a medida que se aumenta o teor de adição das duas escórias em substituição ao CPV ARI RS, ao longo do tempo ocorre uma diminuição da resistência à compressão;
- para o teor de adição de 10%: aos 7 dias de idade, a adição EA1 é 14,50% inferior à adição EGAF; aos 28 dias de idade, a adição EA1 é 11,14% inferior à adição EGAF e aos 91 dias de idade, 22,04%;
- para o teor de adição de 34%: aos 7 dias de idade, a adição EA1 é 25,21% inferior à adição EGAF; aos 28 dias de idade, a adição EA1 é 20,80% inferior à adição EGAF e aos 91 dias de idade, 27,59%.

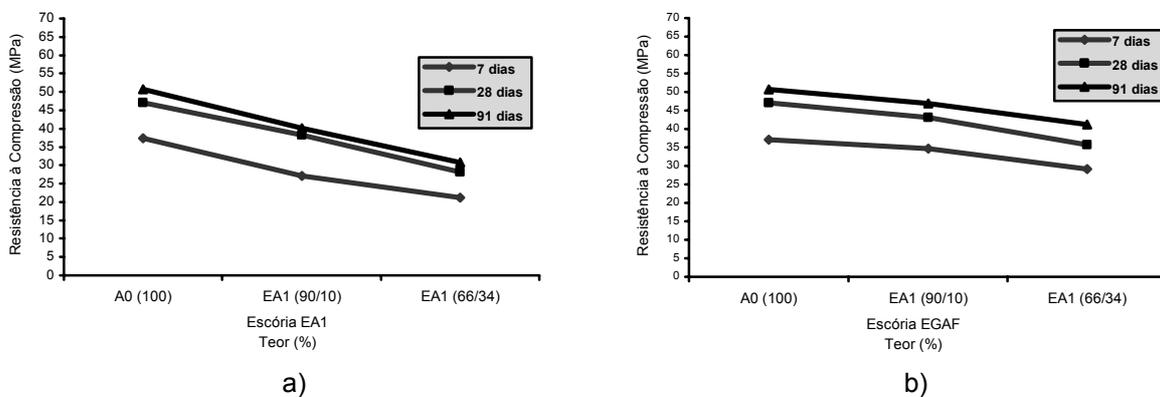


Figura 8.19 Influência da interação da idade, do teor e do tipo de escória na resistência à compressão: a) EA1 e b) EGAF

Em relação à interação significativa entre o traço, o teor e os tipos de escória na resistência à compressão das argamassas (figura 8.20), pode-se dizer:

- para as duas escórias, a medida que o traço torna-se mais pobre e aumenta-se o teor de adição, ocorre uma diminuição da resistência à compressão;
- para o teor de adição de 10%: no traço 1 : 1,5, a adição EA1 é 11,95% inferior à adição EGAF; no traço 1 : 3,0, a adição EA1 é 14,85% inferior à adição EGAF; traço 1 : 4,5, a adição EA1 é 26,46% inferior à adição EGAF;
- para o teor de adição de 34%: no traço 1 : 1,5, a adição EA1 é 19,15% inferior à adição EGAF; no traço 1 : 3,0, a adição EA1 é 23,68% inferior à adição EGAF; traço 1 : 4,5, a adição EA1 é 41,26% inferior à adição EGAF.

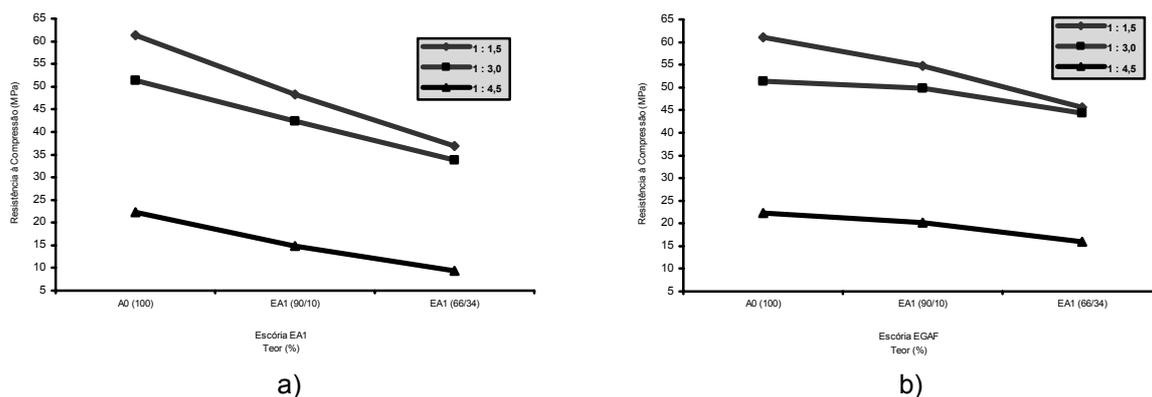


Figura 8.20 Influência da interação do traço, do teor e do tipo de escória na resistência à compressão: a) EA1e b) EGAF

Em relação à interação significativa entre o teor, a idade, o traço e os tipos de escória na resistência à compressão das argamassas (figura 8.21), pode-se dizer:

- para as duas escórias, ao longo do tempo, tanto para o teor de 10% como para o teor de 34% de substituição ao CPV ARI RS, ocorre o aumento da resistência à compressão, porém a medida que o traço torna-se mais pobre, ocorre uma diminuição da resistência à compressão;
- aos 7 dias de idade, para o teor de adição de 10%: para o traço 1 : 1,5 que contém a adição de EA1, ocorre uma diminuição de resistência de 19,97% em relação ao que contém a adição de EGAF; para o traço 1 : 3,0 que contém EA1, ocorre uma diminuição de resistência de 18,94% em relação ao que contém adição de EGAF; para o traço 1 : 4,5 que contém EA1, ocorre uma diminuição de resistência de 36,67% em relação ao que contém adição de EGAF;
- aos 28 dias de idade, para o teor de adição de 10%: para o traço 1 : 1,5 que contém a adição de EA1, ocorre uma diminuição de resistência de 4,85% em relação ao que contém a adição de EGAF; para o traço 1 : 3,0 que contém EA1, ocorre uma diminuição de resistência de 12,97% em relação ao que contém adição de EGAF; para o traço 1 : 4,5 que contém EA1, ocorre uma diminuição de resistência de 22,72% em relação ao que contém adição de EGAF;
- aos 91 dias de idade, para o teor de adição de 10%: para o traço 1 : 1,5 que contém a adição de EA1, ocorre uma diminuição de resistência de 12,14% em relação ao que contém a adição de EGAF; para o traço 1 : 3,0 que contém EA1, ocorre uma diminuição de resistência de 13,50% em relação ao que contém adição de EGAF; para o traço 1 : 4,5 que contém EA1, ocorre uma diminuição de resistência de 23,20% em relação ao que contém adição de EGAF;
- aos 7 dias de idade, para o teor de adição de 34%: para o traço 1 : 1,5 que contém a adição de EA1, ocorre uma diminuição de resistência de 22,65% em relação ao que contém a adição de EGAF; para o traço 1 : 3,0 que contém EA1, ocorre uma diminuição de resistência de 26,67% em relação ao que contém adição de EGAF; para

o traço 1 : 4,5 que contém EA1, ocorre uma diminuição de resistência de 47,01% em relação ao que contém adição de EGAF;

- aos 28 dias de idade, para o teor de adição de 34%: para o traço 1 : 1,5 que contém a adição de EA1, ocorre uma diminuição de resistência de 15,31% em relação ao que contém a adição de EGAF; para o traço 1 : 3,0 que contém EA1, ocorre uma diminuição de resistência de 17,33% em relação ao que contém adição de EGAF; para o traço 1 : 4,5 que contém EA1, ocorre uma diminuição de resistência de 44,38% em relação ao que contém adição de EGAF;
- aos 91 dias de idade, para o teor de adição de 34%: para o traço 1 : 1,5 que contém a adição de EA1, ocorre uma diminuição de resistência de 19,89% em relação ao que contém a adição de EGAF; para o traço 1 : 3,0 que contém EA1, ocorre uma diminuição de resistência de 26,94% em relação ao que contém adição de EGAF; para o traço 1 : 4,5 que contém EA1, ocorre uma diminuição de resistência de 35,32% em relação ao que contém adição de EGAF.

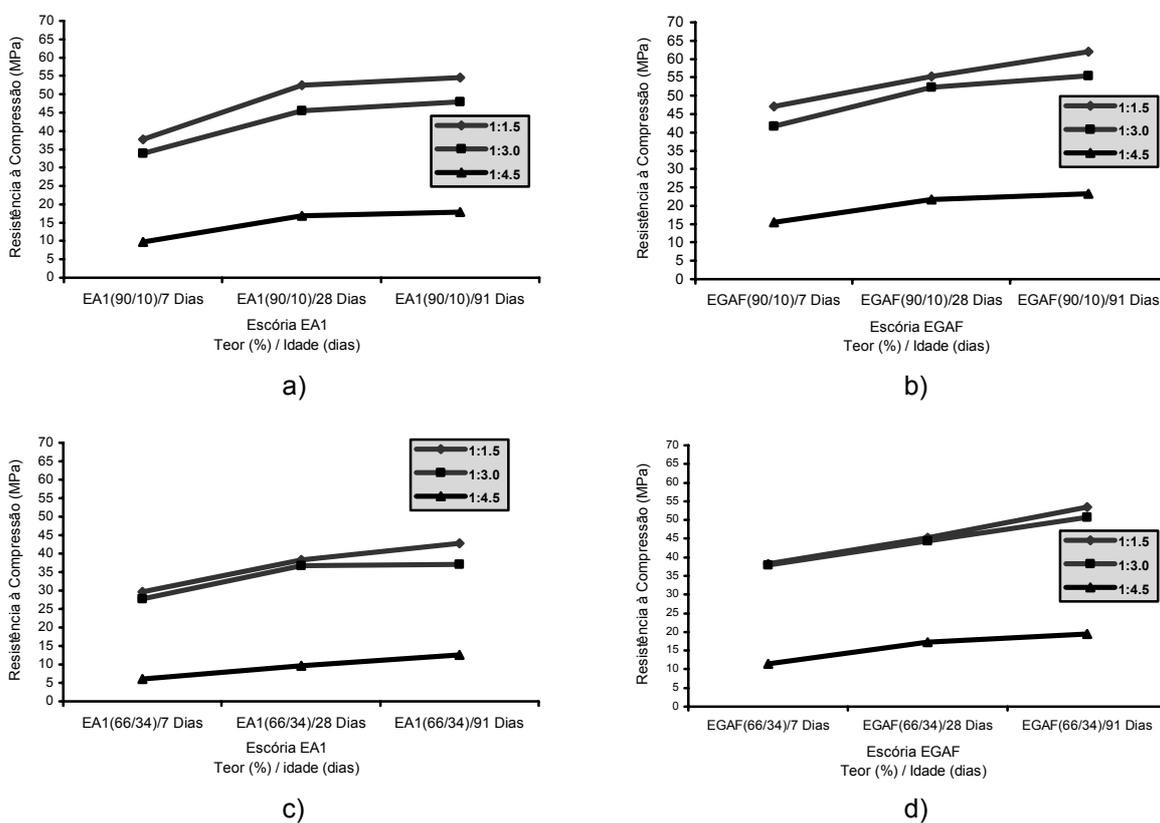


Figura 8.21 Influência da interação do teor, da idade e do traço e do tipo de escória na resistência à compressão: a) EA1 (90/10), b) EGAF (90/10), c) EA1 (66/34) e d) EGAF (66/34)

O desempenho em relação à resistência à compressão das argamassas que tiveram a adição da escória micronizada EA1, foi inferior ao da escória granulada de alto-forno (EGAF) em função de EA1 não ser tão reativa quimicamente quanto EGAF.

MASUERO (2001), ao comparar os traços 1 : 1,5, 1 : 3,0 e 1 : 4,5 de misturas de cimento Portland com escória de aciaria elétrica granulada (ACIGRAN), nos teores de substituição de 10%,

30% e 50% em relação ao teor referência (0% de adição), viu que argamassas com ACIGRAN, quando comparadas com argamassas com escória de alto-forno, apresentaram melhor desempenho em relação à resistência à compressão. Tanto aos 7 dias como aos 28 dias de idade, ocorreu um acréscimo de até 26% nos valores das resistências.

8.3 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS CONSTITUÍDAS DE ESCÓRIA DE ACIARIA ELÉTRICA MICRONIZADA DO PONTO DE VISTA AMBIENTAL

É de suma importância verificar se a escória EA1 que será utilizada como material cimentício possui características que atendam às exigências ambientais.

Desta forma, a caracterização das argamassas constituídas de escória de aciaria elétrica micronizada EA1, do ponto de vista ambiental, foi analisada para o traço 1 : 1,5 onde ocorreu a substituição em massa de 34% de CPV ARI RS por esta escória. Esta mistura foi escolhida tendo em vista o maior teor da escória micronizada EA1 entre os traços em estudo (1 : 1,5, 1 : 3 e 1 : 4,5). Foram analisados os seguintes parâmetros: lixiviação (NBR 10005, 2004) e solubilização (NBR 10006, 2004).

As tabelas 8.9 e 8.10 apresentam os resultados obtidos no ensaio sob a ótica ambiental, onde foram realizados os ensaios de lixiviação e solubilização.

Tabela 8.9 Ensaio de Lixiviação (NBR 10005, 2004) da argamassa de referência (A0) e da escória de aciaria elétrica micronizada EA1 (66/34) no traço 1 : 1,5

PARÂMETROS	UNIDADES	LIMITE MÁXIMO NO EXTRATO (mg / L) ANEXO G – LISTAGEM Nº 7 DA NBR 10004 (2004)	EXTRATO DE LIXIVIADO (mg / L)	
			A0 (100)	EA1 (66/34)
Arsênio	mg As/L	5,0	< 0,010	< 0,010
Bário	mg Ba/L	100,0	0,82	0,94
Cádmio	mg Cd/L	0,5	< 0,003	< 0,005
Chumbo Total	mg Pb/L	5,0	< 0,003	< 0,005
Cromo Total	mg Cr/L	5,0	< 0,014	< 0,016
Mercúrio	mg Hg/L	0,1	< 0,001	< 0,001
Prata	mg Ag/L	5,0	< 0,006	< 0,008
Selênio	mg Se/L	1,0	< 0,003	< 0,003
Fluoreto	mg F/L	150,0	2,52	1,87

Tabela 8.10 Ensaio de Solubilização (NBR 10006, 2004) da argamassa de referência (A0) e da com escória de aciaria elétrica micronizada EA1 (66/34) no traço 1 : 1,5

PARÂMETROS	UNIDADES	LIMITE MÁXIMO NO EXTRATO (mg / L) ANEXO H – LISTAGEM Nº 8 DA NBR 10004(2004)	RESULTADOS (mg / L)	
			A0 (100)	EA1 (66/34)
Alumínio	mg Al/L	0,2	< 0,20	<0,20
Arsênio	mg As/L	0,05	< 0,010	< 0,010
Bário	mg Ba/L	1,0	<0,30	< 0,36
Cádmio	mg Cd/L	0,005	<0,004	< 0,004
Chumbo Total	mg Pb/L	0,05	0,029	< 0,032
Cobre	mg Cu/L	1,0	<0,010	< 0,010
Cromo Total	mg Cr/L	0,05	< 0,016	< 0,016
Ferro	mg Fe/L	0,3	0,18	0,23
Manganês	mg Mn/L	0,1	<0,012	< 0,012
Mercúrio	mg Hg/L	0,001	< 0,001	< 0,001
Prata	mg Ag/L	0,05	< 0,009	< 0,009
Selênio	mg Se/L	0,01	< 0,003	< 0,003
Sódio	mg Na/L	200,0	1,74	1,86
Zinco	mg Zn/L	5,0	< 0,001	< 0,001
Cianeto	mg CN/L	0,1	<0,017	< 0,017
Cloreto	mg Cl/L	250,0	25	34
Dureza	mg CaCO ₃ /L	500,0	486	474
Fenóis	mg C ₆ H ₅ OH/L	0,001	< 0,001	<0,001
Fluoreto	mg F/L	1,5	0,86	0,94
Nitrato	mg N/L	10,0	< 0,017	< 0,017
Sulfato	mg SO ₄ /L	400,0	266	121
Surfactantes	mg LAS/L	0,2	< 0,2	< 0,2

Em relação ao ensaio de lixiviação (NBR 10005, 2004), tanto a argamassa de referência (A0) como a argamassa constituída de escória micronizada EA1 (66/34) são consideradas não perigosas.

Em relação ao ensaio de solubilização (NBR 10006, 2004) tanto a argamassa de referência (A0) como a argamassa constituída de escória micronizada EA1 (66/34) são consideradas inertes.

Desta forma, as argamassas de referência e as constituídas de escória micronizada EA1 (66/34) são classificadas pela NBR 10004 (2004) como sendo resíduos classe IIB (não perigosos e inertes).

8.4 DURABILIDADE DAS ARGAMASSAS

8.4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Atualmente é crescente o estudo de durabilidade das estruturas de concreto, tendo como principal objetivo garantir a sua vida útil. A degradação precoce de estruturas de concreto acarreta, na maioria das vezes, altos custos com manutenção.

Em função das condições de exposição da estrutura e do microclima onde a mesma está edificada (centros urbanos, áreas industriais, regiões litorâneas, dentre outros), esta fica sujeita a diferentes tipos de agressividades. Assim sendo, os agentes deletérios, tais como cloretos, sulfatos, CO₂, ciclos de gelo e degelo, chuva ácida, dentre outros, atuando sobre o concreto, conseqüentemente, podem ocasionar a degradação da estrutura.

Desta forma, não basta avaliar o desempenho de uma estrutura de concreto somente pela ótica de suas propriedades mecânicas, tais como a resistência característica à compressão ou tração na flexão, sendo de vital importância também avaliá-la sob o prisma da durabilidade (condição de exposição, relação “água/aglomerante”, cobrimento de armadura, dentre outros).

Para MEHTA e MONTEIRO (1994) e NEVILLE (1997), o grau de porosidade de uma estrutura de concreto é a principal porta de entrada para os agentes deletérios. A utilização de concretos com menor permeabilidade à água e ao ar aumenta a sua durabilidade. Uma baixa permeabilidade dificulta a mobilidade da água, íons e gases, que porventura possam conter agentes deletérios que seriam conduzidos para o interior do concreto, conseqüentemente, gerando a sua degradação.

A porosidade de um concreto é influenciada, principalmente, pelos seguintes parâmetros: relação “água/cimento”, composição química e finura do cimento, grau de hidratação e pelo tipo e teor de adição mineral utilizada (MOURA, 2000).

Para avaliar a durabilidade de argamassas produzidas com escória de aciaria elétrica micronizada EA1 e CPV ARI RS, foram escolhidas duas propriedades:

- absorção de água: foram realizados dois ensaios – ensaio de penetração de água por sucção capilar (não normalizado), e ensaio de absorção por imersão em água (NBR 9778, 1987);
- penetração de íons cloretos: normalizado pela ASTM C 1202 (1997).

8.4.2 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

A penetração de água líquida para o interior da estrutura de concretos e argamassas pode-se dar por duas maneiras distintas, ou seja, por sucção capilar ou por permeabilidade (PETRUCCI, 1978).

Ocorre a sucção capilar nos materiais, quando os poros abertos ao meio ambiente permitem ascensão de água líquida através deles. A permeabilidade acontece quando existe a penetração de água líquida sob pressão, sendo caracterizada por um gradiente hidráulico, que força a entrada da água pelos concretos ou argamassas (COUTINHO, 1973).

Neste programa experimental, a absorção de água foi avaliada por dois métodos de ensaio:

- Método de KELHAM (não normalizado);
- Argamassas e concretos endurecidos – determinação da absorção de água por imersão – índice de vazios e massa específica (NBR 9778, 1987).

Foram moldados corpos-de-prova de argamassa, constituídos de CPV ARI RS e escória de aciaria elétrica micronizada EA1, sendo que o agregado miúdo utilizado na pesquisa foi a areia normal (NBR 7214, 1990). Os teores de substituição de CPV ARI RS por escória de aciaria elétrica micronizada EA1 foram de: 0% (referência), 10% e 34%. Os traços avaliados foram 1 : 1,5; 1 : 3,0 e 1 : 4,5.

8.4.2.1 ENSAIO DE PENETRAÇÃO DE ÁGUA POR SUCÇÃO CAPILAR

Este método de ensaio segue os procedimentos preconizados por KELHAM (1988) com finalidade de determinar a absorção de água por capilaridade. Apesar de ser um ensaio não-normalizado, este foi escolhido uma vez que a determinação da absorção d'água por sucção capilar ao longo do tempo ser considerada adequada para se avaliar a durabilidade de um concreto, bem como ser um método de ensaio largamente empregado por pesquisadores (BARATA, 1988; MOURA, 2000; GONÇALVES, 2000; MASUERO, 2001, entre outros).

8.4.2.1.1. PREPARAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA

- foram moldados corpos-de-prova prismáticos de dimensões (100x100x150)mm e curados em câmara úmida (umidade relativa superior a 95% e temperatura igual a 23 ± 2 °C) por um período de 28 dias de idade;
- aos 28 dias de idade, os corpos-de-prova foram removidos da câmara úmida e serrados, utilizando-se uma serra de corte diamantado no sentido da menor dimensão, obtendo-se, desta forma, corpos-de-prova de dimensões (100x100x25)mm. Este procedimento tem por objetivo reproduzir o efeito parede de uma fôrma, simulando o que ocorre nas estruturas de concreto de vigas e pilares. A espessura de 25mm é uma adaptação sugerida por GOPALAN (1988) ao método de ensaio que tem por objetivo diminuir o tempo de realização do ensaio (originalmente a espessura do corpo-de-prova proposta por KELHAM (1998) era de 50mm). Foram selecionadas dois corpos-de-prova de 25mm de espessura para cada traço ensaiado;

- com o objetivo de perder parte da água absorvida após a serragem, os corpos-de-prova foram deixados em ambiente de laboratório por um período de aproximadamente uma hora. A seguir, foram pesados e colocados em estufa a $110\pm 10^{\circ}\text{C}$, até atingirem a constância de massa (0,1% de variação da massa, em períodos de pesagem de aproximadamente 24 horas);
- os corpos-de-prova foram resfriados em recipientes com sílica gel, com finalidade de manter a umidade baixa; menos de 0,1% da massa de quando foi removido do ambiente da estufa;
- com os corpos-de-prova secos, foram tomadas medidas da espessura e da área que ficariam em contato com a água. Essas determinações são necessárias para se calcular a taxa de absorção e a resistência capilar de cada corpo-de-prova;
- a seguir procedeu-se à impermeabilização das faces laterais dos corpos-de-prova com material de base epóxi, cuidando para que este material não entrasse em contato com a área do corpo-de-prova que ficaria em contato com a água durante o ensaio. Os quatro cantos dos corpos-de-prova tiveram reforço de material epóxi por serem considerados pontos críticos de penetração de água, bem como, deixou-se um excesso na parte superior da face lateral para servir de apoio da placa de PVC que seria colocada sobre ela;
- na face que continha excesso de material epóxi (face serrada), posicionou-se uma placa de PVC com um furo no centro, sendo que neste furo foi acoplado um tubo plástico transparente de 4mm de diâmetro. Este tubo foi acoplado à placa de PVC por meio de um selante de base poliuretano. A função desse tubo é de fazer o contato com a atmosfera, garantindo o equilíbrio de pressão com a atmosfera e o espaço entre a placa e a face do corpo-de-prova.

A figura 8.22 ilustra as principais fases de procedimento de preparação dos corpos-de-prova para a realização do ensaio de absorção de água por sucção capilar.

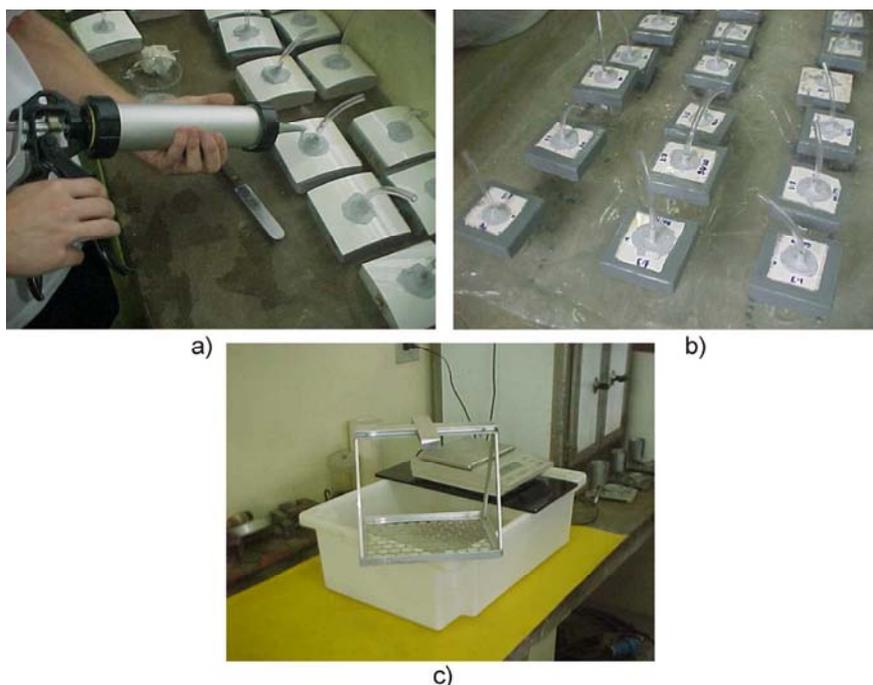


Figura 8.22 Ensaio de penetração de água por sucção capilar: a) preparação do corpo-de-prova, b) impermeabilização das faces laterais do corpo-de-prova e c) equipamentos e dispositivos utilizados no ensaio

8.4.2.1.2. REALIZAÇÃO DO ENSAIO

Os equipamentos utilizados para a realização do ensaio foram uma balança MARTHE, com precisão de centésimo de grama, e um dispositivo acoplado à balança, sobre o qual se posiciona o corpo-de-prova submerso em água. A temperatura do ambiente do laboratório durante a realização do ensaio foi de $23 \pm 2^\circ\text{C}$.

Durante a realização do ensaio, cada corpo-de-prova ficou submerso em água, sendo realizadas determinações de pesagens após 2, 5, 15, 30, 60, 120, 360, 720, 1440, 2880, 4320 e 5760 minutos, até a saturação do corpo-de-prova. Considerou-se que o corpo-de-prova estava saturado quando a variação de massa entre duas pesagens sucessivas era inferior a 0,2%.

A figura 8.23 mostra a realização do ensaio de penetração de água por sucção capilar.

Com os dados de ganho de massa obtidos durante a realização do ensaio e em função da raiz quadrada do tempo, plota-se um gráfico onde é possível interpolar duas retas. A primeira reta refere-se à absorção inicial de água do corpo-de-prova e a segunda à saturação. A interseção destas duas retas é um ponto chamado de “ponto de saturação” ou “nick point”. Considera-se que a partir deste ponto inicia-se a saturação do corpo-de-prova. As retas foram ajustadas segundo os critérios de regressão linear simples. Com os dados do gráfico plotados, é possível determinar a “taxa de absorção” e a “resistência capilar”.

A taxa de absorção ($\text{g}/\text{cm}^2\text{h}^{1/2}$) é determinada em função do coeficiente de inclinação da reta da fase de absorção dividida pela área efetiva do corpo-de-prova.

A resistência capilar (h/m^2) é calculada pelo quadrado da razão entre o valor do ponto de saturação e a espessura do corpo-de-prova em metros.



Figura 8.23 Realização do ensaio de penetração de água por sucção capilar

8.4.2.1.3. RESULTADOS

Nas figuras 8.25 a 8.35 podem ser vistos os gráficos de sucção capilar, apresentando o de ganho de massa em função da \sqrt{t} para os diversos traços e teores de substituição do CPV ARI RS por EA1 nas argamassas estudadas.

A tabela 8.11 apresenta os resultados das taxas de absorção e resistências capilares de argamassas constituídas de misturas “CPV ARI RS e escória de aciaria elétrica micronizada EA1”, bem como de argamassas de referência constituídas somente de CPV ARI RS.

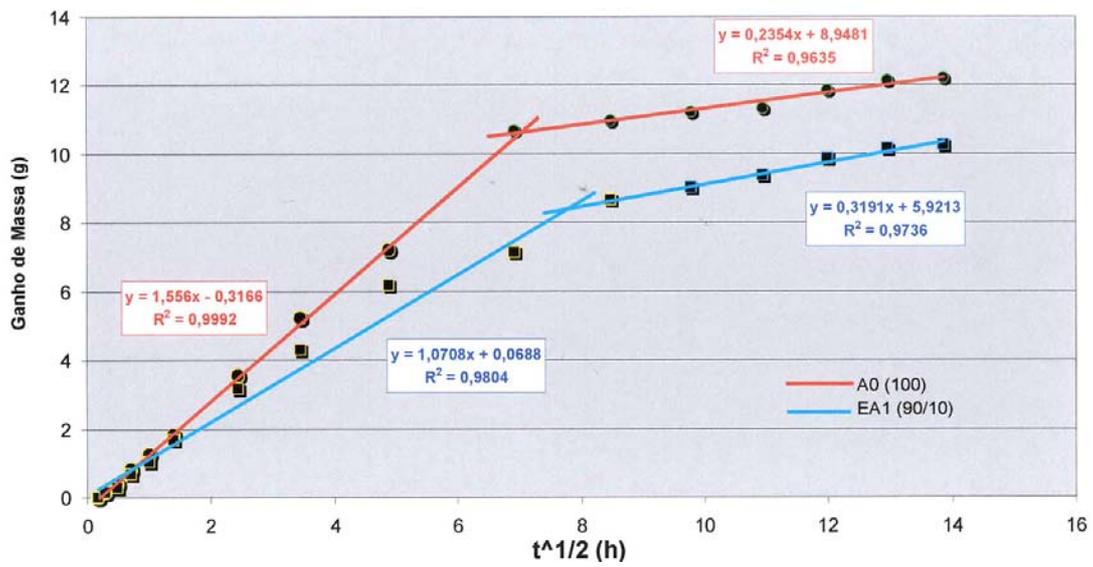


Figura 8.24 Ganho de massa em função da \sqrt{t} para argamassas no traço 1 : 1,5, com EA1 (90/10) e A0 (100) – 1º Exemplar

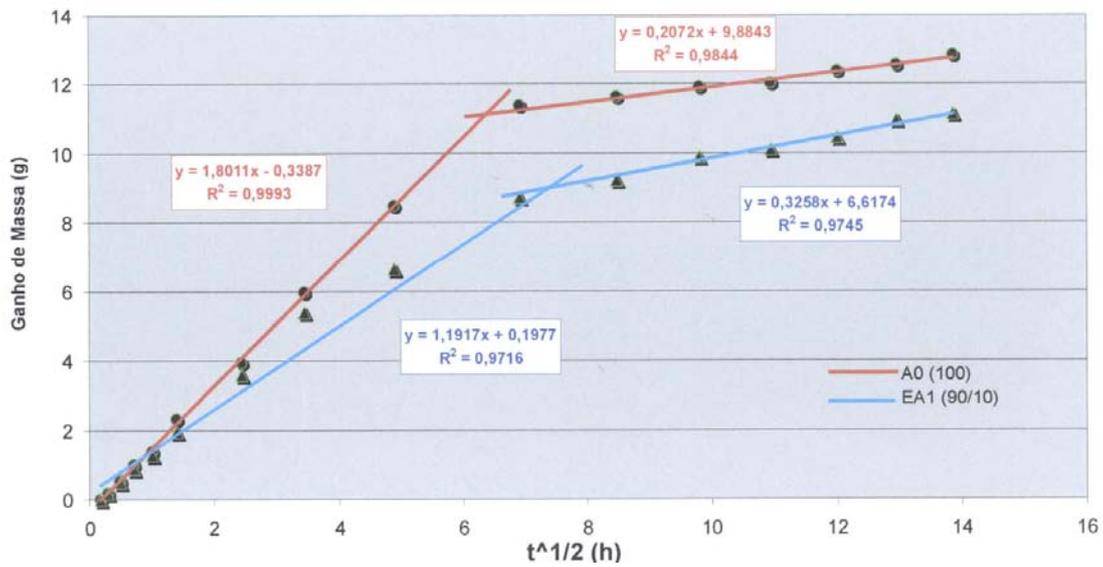


Figura 8.25 Ganho de massa em função da \sqrt{t} para argamassas no traço 1 : 1,5, com EA1 (90/10) e A0 (100) – 2º Exemplar

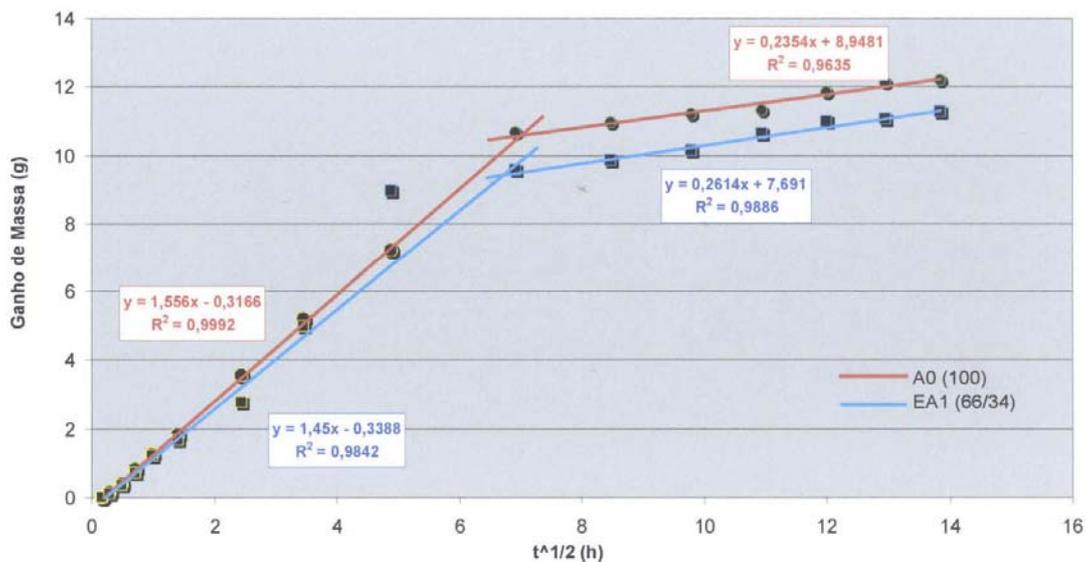


Figura 8.26 Ganho de massa em função da \sqrt{t} para argamassas no traço 1 : 1,5, com EA1 (66/34) e A0 (100) – 1º Exemplar

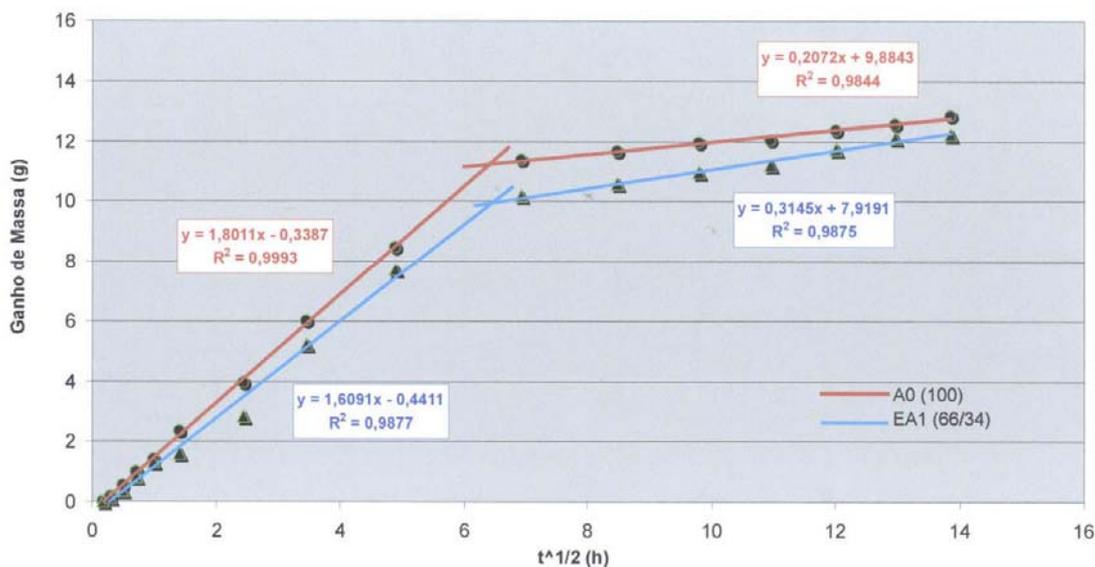


Figura 8.27 Ganho de massa em função da \sqrt{t} para argamassas no traço 1 : 1,5, com EA1 (66/34) e A0 (100) – 2º Exemplar

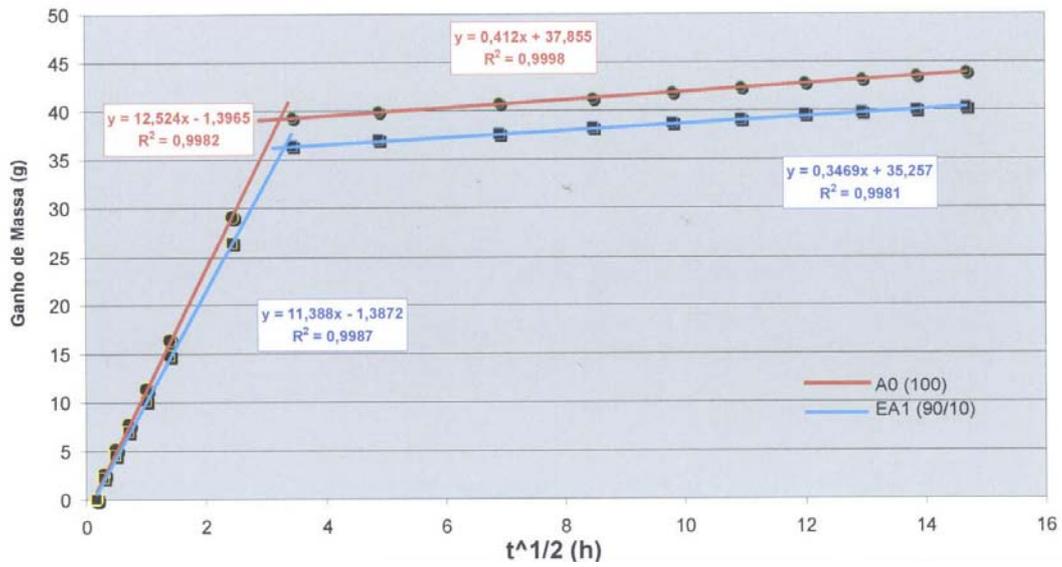


Figura 8.28 Ganho de massa em função da \sqrt{t} para argamassas no traço 1 : 3, com EA1 (90/10) e A0 (100) – 1º Exemplar

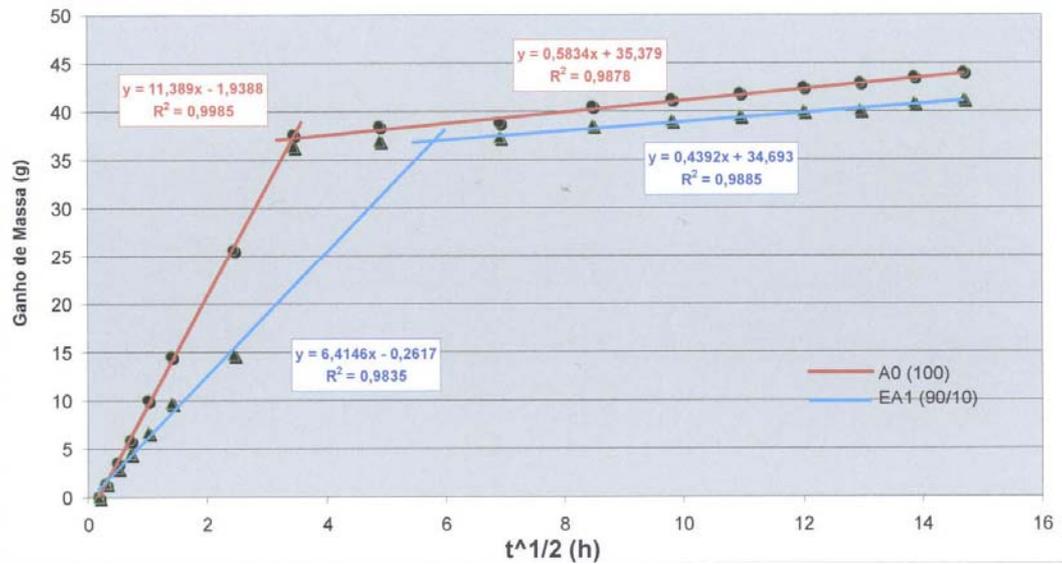


Figura 8.29 Ganho de massa em função da \sqrt{t} para argamassas no traço 1 : 3, com EA1 (90/10) e A0 (100) – 2º Exemplar

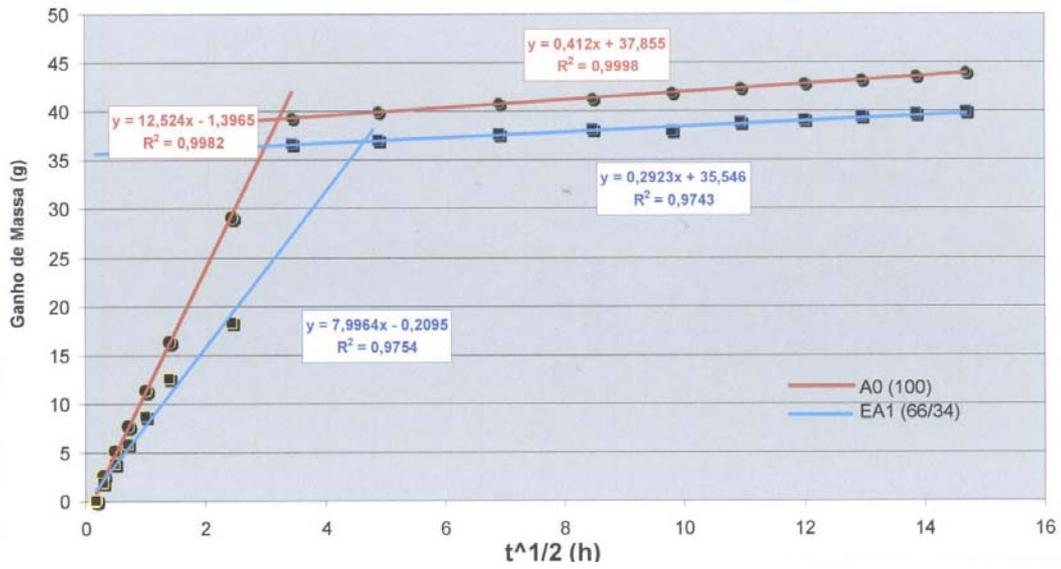


Figura 8.30 Ganho de massa em função da \sqrt{t} para argamassas no traço 1 : 3, com EA1 (66/34) e A0 (100) – 1º Exemplar

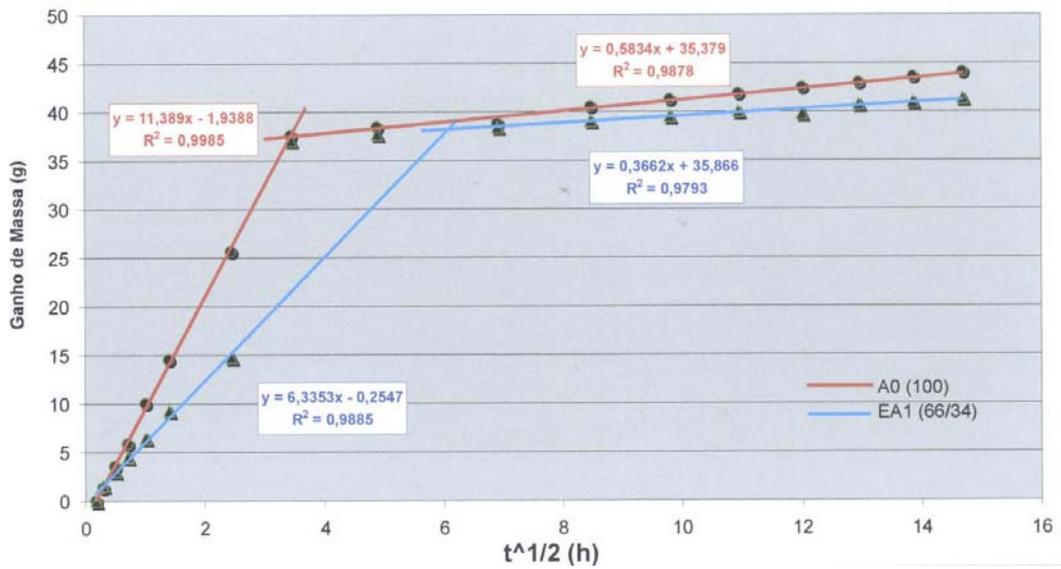


Figura 8.31 Ganho de massa em função da \sqrt{t} para argamassas no traço 1 : 3, com EA1 (66/34) e A0 (100) – 2º Exemplar

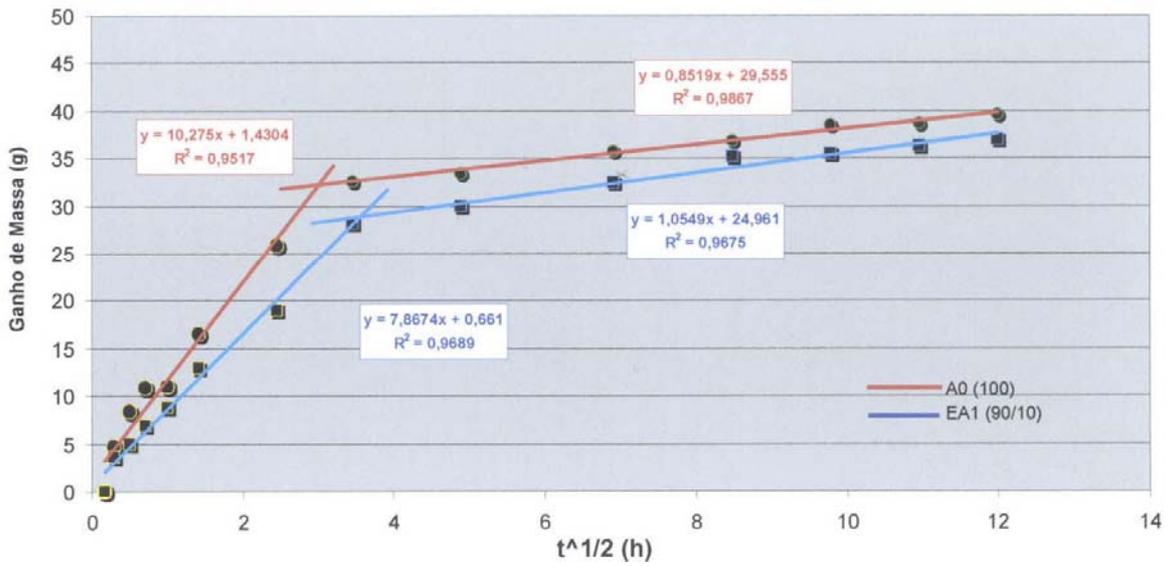


Figura 8.32 Ganho de massa em função da \sqrt{t} para argamassas no traço 1 : 4,5, com EA1 (90/10) e A0 (100) – 1º Exemplar

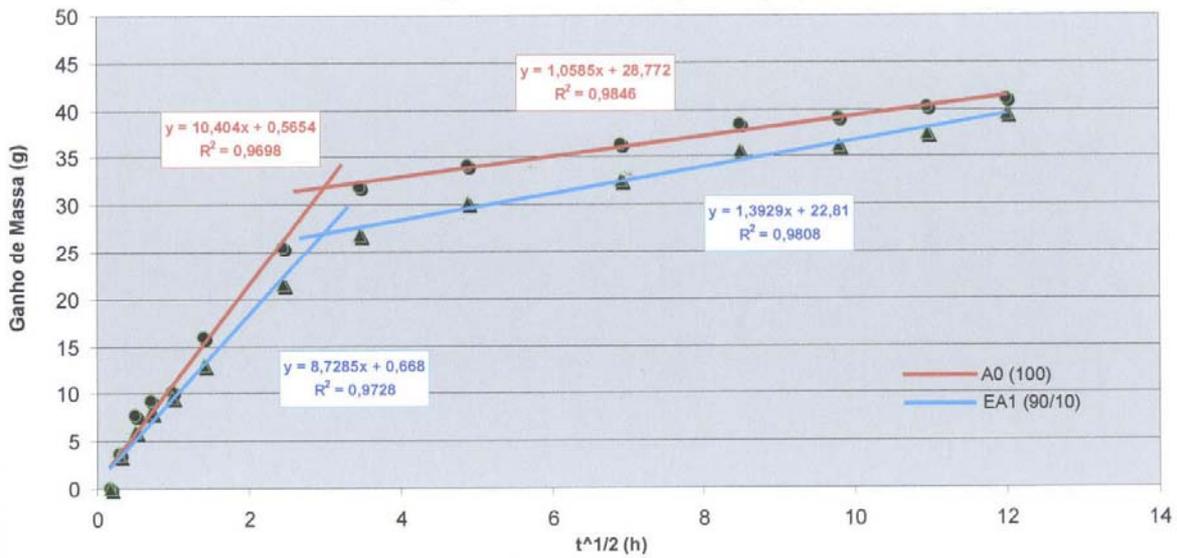


Figura 8.33 Ganho de massa em função da \sqrt{t} para argamassas no traço 1 : 4,5, com EA1 (90/10) e A0 (100) – 2º Exemplar

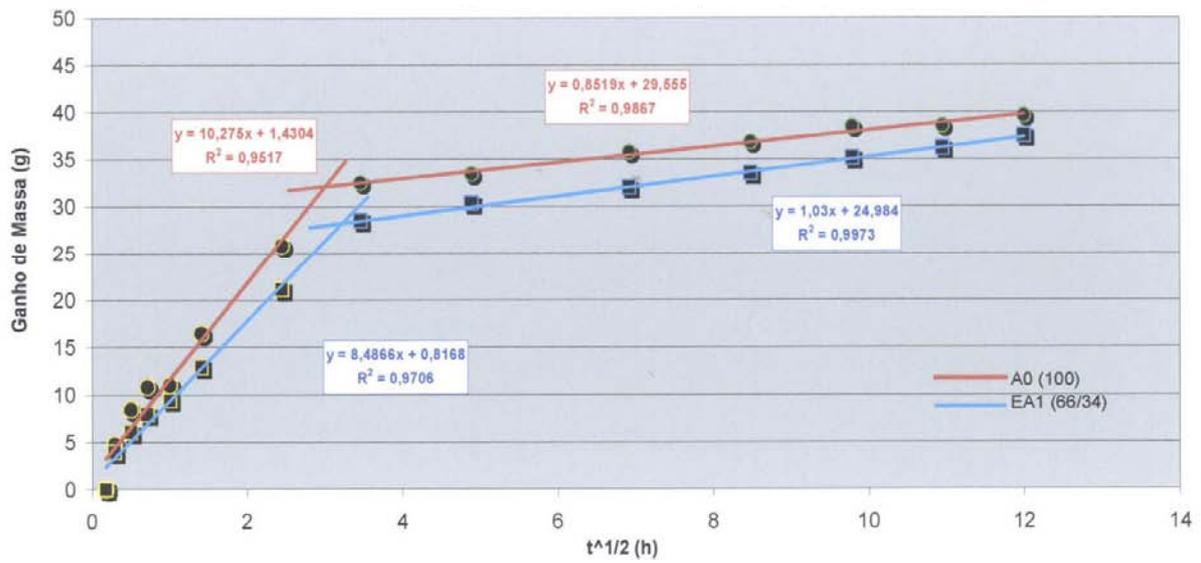


Figura 8.34 Ganho de massa em função da \sqrt{t} para argamassas no traço 1 : 4,5, com EA1 (66/34) e A0 (100) – 1º Exemplar

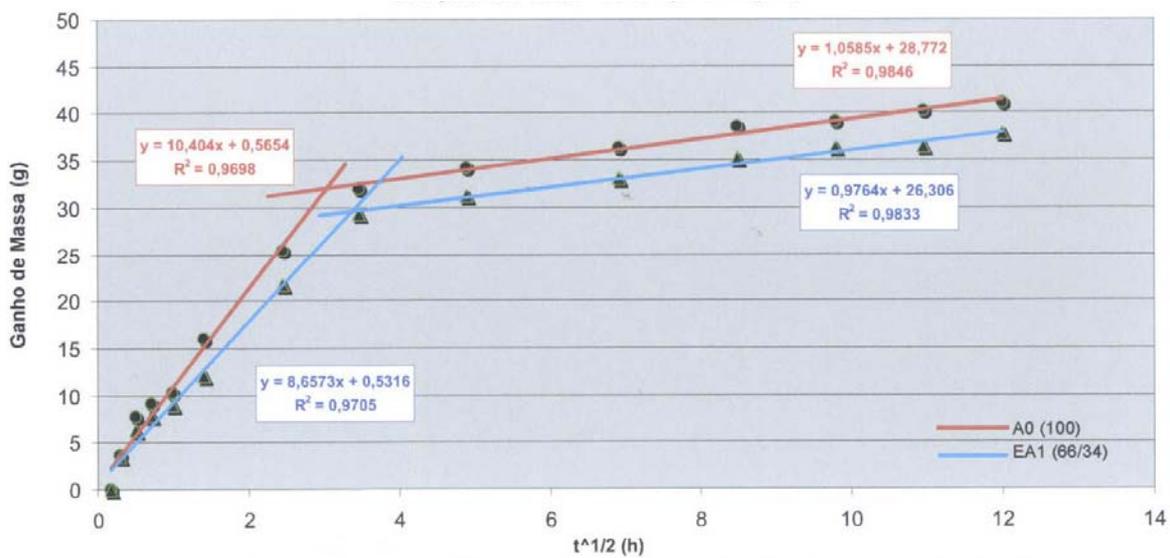


Figura 8.35 Ganho de massa em função da \sqrt{t} para argamassas no traço 1 : 4,5, com EA1 (66/34) e A0 (100) – 2º Exemplar

Tabela 8.11 Taxas de absorção e resistências capilares de argamassas constituídas com a escória de aciaria elétrica micronizada EA1

TRAÇO	TEOR EA1 (%)	RELAÇÃO Água / AGL	TAXA DE ABSORÇÃO ($\text{cm}^2 \times \text{h}^{1/2}) \times 10^{-2}$	TAXA DE ABSORÇÃO MÉDIA ($\text{cm}^2 \times \text{h}^{1/2}) \times 10^{-2}$	RESISTÊNCIA CAPILAR (h / m^2)	RESISTÊNCIA CAPILAR MÉDIA (h / m^2)
1:1,5	A0 (100)	0,31	1,54	1,66	78.748	72.284
			1,78		65.819	
	EA1 (90/10)	0,30	1,06	1,12	101.601	94.773
			1,18		87.945	
	EA1 (66/34)	0,29	1,44	1,52	74.205	71.005
			1,60		67.804	
1:3,0	A0 (100)	0,53	12,40	11,84	17.068	18.320
			11,28		19.392	
	EA1 (90/10)	0,52	11,25	8,82	17.909	36.774
			6,38		55.638	
	EA1 (66/34)	0,50	7,47	6,88	35.021	47.279
			6,28		59.537	
1:4,5	A0 (100)	0,79	10,17	10,24	14.601	14.827
			10,31		15.053	
	EA1 (90/10)	0,77	7,79	8,17	20.854	19.807
			8,55		18.759	
	EA1 (66/34)	0,76	8,39	8,51	17.358	16.144
			8,62		14.929	

8.4.2.1.3.1. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Através da ANOVA, foi avaliada a influência do traço e do teor de adição de EA1 sobre a taxa de absorção por sucção capilar e da resistência capilar das argamassas.

A ANOVA (tabela 8.12) mostra que existe uma influência significativa do traço e do teor de EA1 sobre os resultados da taxa de absorção capilar das argamassas. Porém, quando é considerada a interação dos resultados das variáveis traço e teor, não ocorreu interação significativa sobre a taxa de absorção capilar.

Tabela 8.12 Resultados da análise estatística através da ANOVA da Taxa de Absorção por sucção capilar das argamassas com escória de aciaria elétrica micronizada EA1

FATOR	GDL	MQ	F _{calc}	F _{0,05}	Significância*
Traço	2	116,83	77,50	4,26	S
Teor	2	8,88	5,90	4,26	S
Traço x Teor	4	3,13	2,10	3,63	NS
ERRO	9	1,51			

GDL: Grau de Liberdade

MQ: Média Quadrática

F_{calc}: Valor Calculado de F

F_{0,05}: Valor Tabelaado de F para o nível de significância de 5%

S: Significativo

NS: Não Significativo

***Significância:** F_{calc} > F_{0,05} : S

F_{calc} < F_{0,05} : NS

As figuras 8.36 e 8.37 mostram, respectivamente, a influência do traço e do teor de adição de EA1, sobre a taxa de absorção capilar das argamassas.

Em relação à interação significativa entre o traço na taxa de absorção por sucção capilar das argamassas, (figura 8.36), pode-se dizer:

- a medida que o traço torna-se mais pobre, aumenta a taxa de absorção capilar das argamassas;
- para os traços 1 : 3,0 e 1 : 4,5 em relação ao traço 1 : 1,5, ocorreu um aumento na taxa de absorção capilar de 541% e 527%.

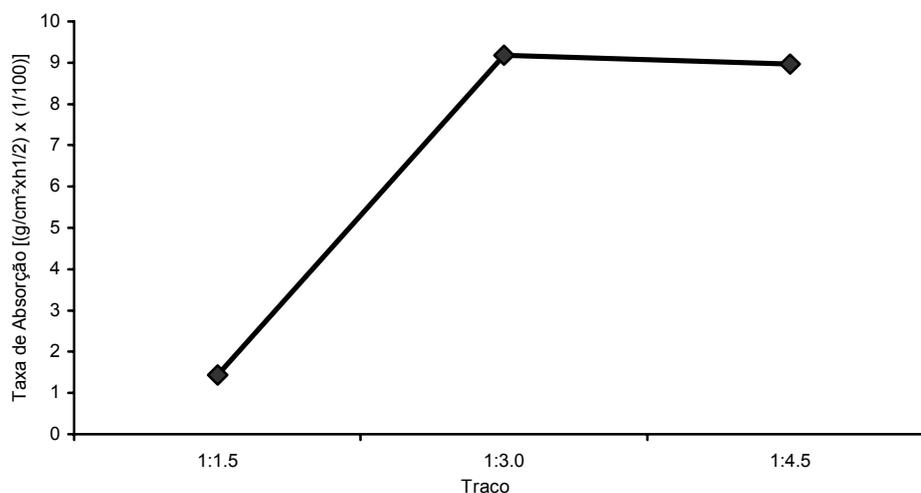


Figura 8.36 Efeito do traço na taxa de absorção das argamassas

Em relação à interação significativa entre o teor de EA1 na taxa de absorção por sucção capilar das argamassas, (figura 8.37), pode-se dizer:

- a medida que aumenta o teor de adição, ocorre uma redução na taxa de absorção capilar das argamassas;
- em relação ao teor referência (100%), ao substituir 10% e 34% de EA1, ocorreu uma redução de 23,76% e 28,82% na taxa de absorção das argamassas, respectivamente.

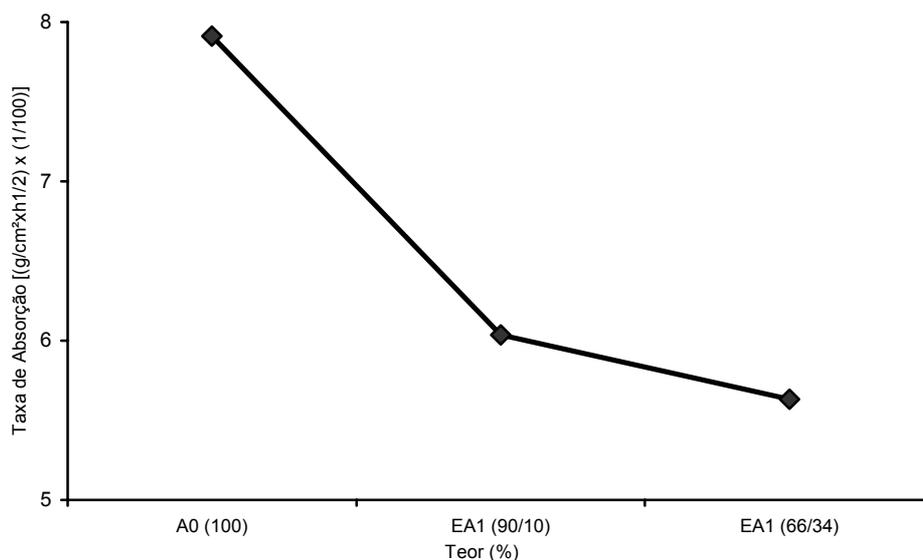


Figura 8.37 Efeito do teor de EA1 na taxa de absorção das argamassas

A ANOVA (tabela 8.13) mostra que existe uma influência significativa do traço sobre os resultados da resistência capilar das argamassas. Para a variável teor e para a interação entre as variáveis traço e teor, não ocorreram influências significativas dessas variáveis sobre os resultados da resistência capilar.

A figura 8.38 mostra a influência do traço sobre a resistência capilar das argamassas.

Tabela 8.13 Resultados da análise estatística através da ANOVA da Resistência Capilar das argamassas com escória de aciaria elétrica micronizada EA1

FATOR	GDL	MQ	Fcalc	F0,05	Significância*
Traço	2	6240,43	43,13	4,26	S
Teor	2	361,10	2,67	4,26	NS
Traço x Teor	4	221,19	1,64	3,63	NS
ERRO	9	135,28			

GDL: Grau de Liberdade

MQ: Média Quadrática

Fcalc: Valor Calculado de F

F_{0,05}: Valor Tabelado de F para o nível de significância de 5%

S: Significativo

NS: Não Significativo

***Significância:** Fcalc > F_{0,05} : S

Fcalc < F_{0,05} : NS

Em relação à significância do traço na resistência capilar das argamassas, (figura 8.38), pode-se dizer:

- a medida que o traço torna-se mais pobre, ocorre a diminuição da resistência capilar nas argamassas;
- em relação ao traço 1 : 1,5, os traços 1 : 3,0 e 1 : 4,5 tiveram uma redução na resistência capilar das argamassas de 57,03% e 78,63%, respectivamente.

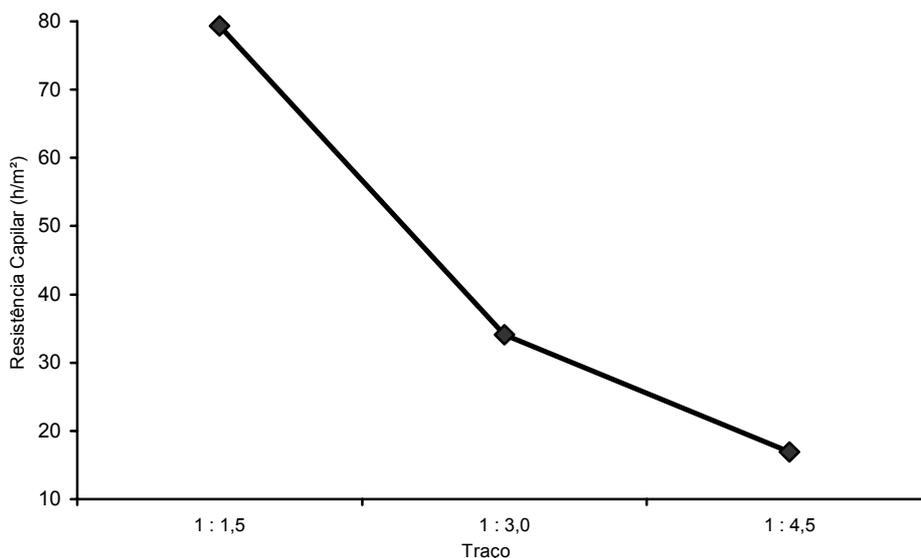


Figura 8.38 Efeito do traço na resistência capilar das argamassas

Para o traço 1 : 1,5, pode ser notado que sempre que se faz a substituição de CPV ARI RS por EA1, ocorre a diminuição da taxa de absorção por sucção capilar. Isto é atribuído principalmente ao “efeito filer” e “efeito pozolânico” que EA1 possibilita à argamassa, uma vez que a sua granulometria é uniforme e contínua e a dimensão média dos seus grãos é pequena ($3,37\mu\text{m}$), proporcionando, assim, um maior refinamento e bloqueio dos poros. Isoladamente, para cada traço, quando ocorreu a substituição de CPV ARI RS por EA1, os resultados da taxa de absorção capilar foram inferiores aos das argamassas de referência (tabela 8.11).

MASUERO (2001), ao estudar a adição de uma escória de aciaria elétrica granulada (ACIGRAN), verificou que a taxa de absorção é inversamente proporcional e a resistência capilar, proporcional ao aumento do consumo de cimento, ou seja, à redução da relação água/cimento. A ACIGRAN, por atuar como pontos de nucleação, proporciona a formação de compostos hidratados que se distribuem, formando uma rede capilar descontínua, além de funcionar como agente de refinamento físico e químico da estrutura, apresentando assim, os mesmos níveis de taxa de absorção e resistência capilar que as argamassas de referência.

Estudos realizados por ISAIA (1995) mostraram que a adição de sílica ativa, cinza de casca de arroz e cinza volante diminuiu a penetração de água em concreto.

BARATA (1998) mostrou que a adição de sílica ativa e metacaulim em concretos, na proporção de 10%, reduziram, respectivamente, em cerca de 80% e 50%, a taxa de sucção capilar, em relação ao concreto-referência.

MOURA (2000), ao adicionar 20% de escória de cobre como adição ao concreto, verificou que esta propicia uma menor taxa de absorção para os concretos estudados. O autor atribui esta melhoria de desempenho ao “efeito fíler” provocado pela adição desta escória.

8.4.2.2 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO (NBR 9778, 1987)

O ensaio de absorção de água por imersão (NBR 9778, 1987) é realizado com a finalidade de se determinar o volume total de poros em traços de argamassas e concretos.

8.4.2.2.1. REALIZAÇÃO DO ENSAIO

Foram moldados 3 corpos-de-prova para cada traço (1 : 1,5; 1 : 3,0 e 1 : 4,5). Os teores de substituição de CPV ARI RS por escória de aciaria elétrica micronizada EA1 foram de: 0% (referência), 10% e 34%. Os traços avaliados foram 1 : 1,5; 1 : 3,0 e 1 : 4,5.

Após moldagem dos corpos-de-prova, estes foram secos em estufa (105 ± 5) °C por um período de 72 horas, com pesagens diárias, e após foram colocados em imersão de água, sendo que esta imersão ocorreu de forma gradual, ou seja, 1/3 nas primeiras quatro horas, 2/3 nas quatro horas subsequentes e imersão completa nas 64 horas restantes.

A figura 8.39 mostra a realização do ensaio quando do instante de imersão total dos corpos-de-prova.



Figura 8.39 Realização do ensaio de absorção de água por imersão (NBR 9778, 1987)

8.4.2.2.2. RESULTADOS

A tabela 8.14 apresenta os resultados de absorção de água por imersão e índice de vazios (NBR 9778, 1987) de argamassas constituídas com a escória de aciaria elétrica micronizada EA1.

As figuras 8.40 e 8.41 apresentam, respectivamente, absorção de água e índice de vazios por imersão (NBR 9778, 1987) de argamassas constituídas com escória de aciaria elétrica micronizada EA1.

A maior redução da absorção de água por imersão (NBR 9778, 1997) pode ser observada para o teor de 10% de EA1, no traço de maior consumo de cimento, onde esta redução foi de 62,7% em relação à argamassa de referência.

A maior redução do índice de vazios (NBR 9778, 1997) pode ser observada para o teor de 10% de EA1, no traço de maior consumo de cimento, onde esta redução foi de 64,5% em relação à argamassa de referência.

Tabela 8.14 Resultados de absorção de água por imersão e índice de vazios (NBR 9778, 1987) de argamassas constituídas com a escória de aciaria elétrica micronizada EA1

TRAÇO	TEOR DE EA1 (%)	ABSORÇÃO (%)	ABSORÇÃO MÉDIA (%)	ÍNDICE DE VAZIOS (%)	ÍNDICE DE VAZIOS MÉDIO (%)
1 : 1,5	A0 (100)	6,50	6,36	13,91	13,70
		6,22		13,45	
		6,37		13,74	
	EA1 (90/10)	3,87	3,99	8,79	8,84
		4,05		8,51	
		4,07		9,22	
	EA1 (66/34)	5,51	5,43	12,52	12,37
		5,44		12,39	
		5,34		12,20	
1 : 3,0	A0 (100)	6,36	6,39	13,85	13,88
		6,31		13,69	
		6,51		14,10	
	EA1 (90/10)	6,15	6,07	13,22	13,05
		5,94		12,80	
		6,12		13,14	
	EA1 (66/34)	6,25	6,24	13,54	13,53
		6,20		13,44	
		6,28		13,60	
1 : 4,5	A0 (100)	9,43	9,35	18,74	18,57
		9,36		18,50	
		9,27		18,49	
	EA1 (90/10)	9,12	8,99	18,17	17,95
		8,97		17,91	
		8,89		17,76	
	EA1 (66/34)	9,00	9,22	17,99	18,36
		9,14		18,20	
		9,51		18,90	

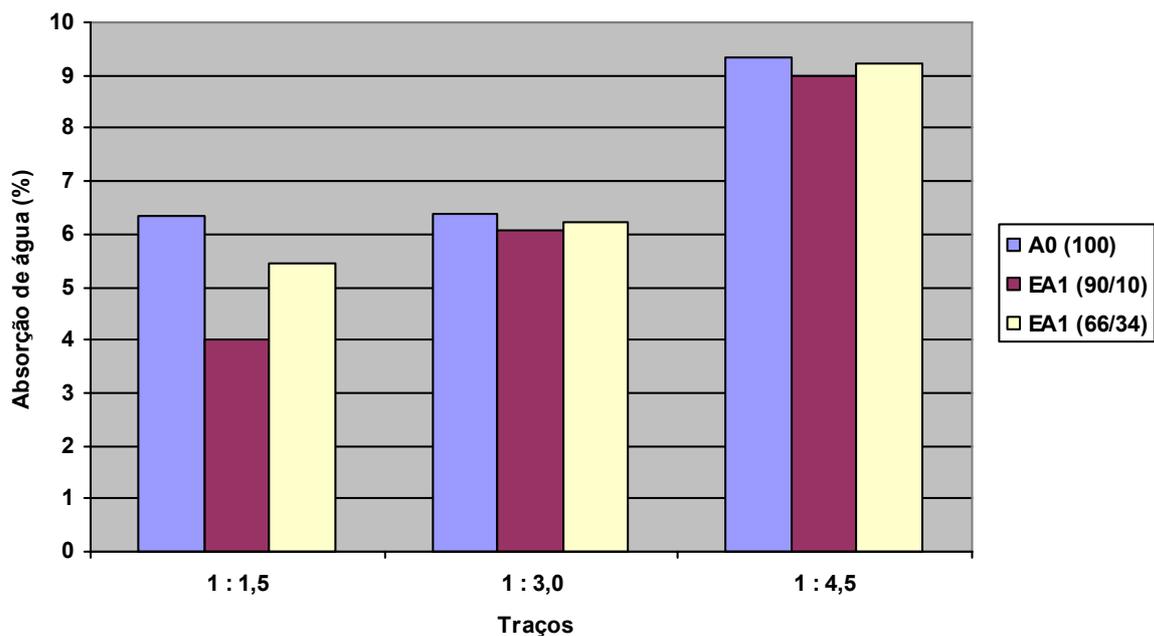


Figura 8.40 Absorção de água por imersão (NBR 9778, 1987) de argamassas de referência e com escória de aciaria elétrica micronizada EA1

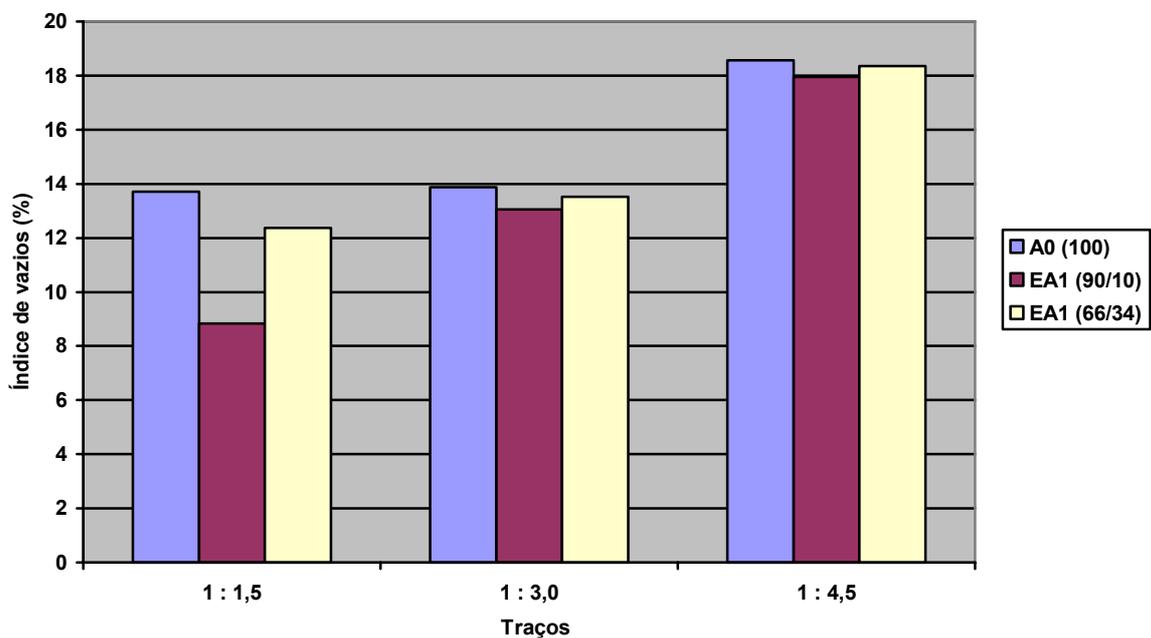


Figura 8.41 Índice de vazios por imersão em água (NBR 9778, 1987) de argamassas de referência e com escória de aciaria elétrica micronizada EA1

8.4.2.2.3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A ANOVA (tabela 8.15) mostra que existe uma influência significativa do teor de EA1, do traço e da interação do teor e traço sobre os resultados da absorção de água por imersão das argamassas.

Tabela 8.15 Resultados da análise estatística através da ANOVA do efeito do traço e teor de EA1 na absorção de água por imersão (NBR 9778, 1987) das argamassas

FATOR	GDL	MQ	F _{calc}	F _{0,05}	Significância*
Traço	2	37,59	2197,95	3,56	S
Teor	2	2,36	137,79	3,56	S
Traço x Teor	4	1,04	60,93	2,93	S
ERRO	18	0,02			

GDL: Grau de Liberdade

MQ: Média Quadrática

F_{calc}: Valor Calculado de F

F_{0,05}: Valor Tabelado de F para o nível de significância de 5%

S: Significativo

NS: Não Significativo

***Significância:** F_{calc} > F_{0,05} : S

F_{calc} < F_{0,05} : NS

As figuras 8.42, 8.43 e 8.44 mostram, respectivamente, a influência do traço, do teor de adição de EA1 e da interação do traço e teor de adição de EA1, sobre a taxa de absorção capilar das argamassas.

Em relação à interação significativa entre o traço na absorção de água por imersão nas argamassas, (figura 8.42), pode-se dizer:

- a medida que o traço torna-se mais pobre, aumenta a absorção de água por imersão;
- para os traços 1 : 3,0 e 1 : 4,5, em relação ao traço 1 : 1,5, o aumento na taxa de absorção de água por imersão foi de 18,44% e 74,52%, respectivamente.

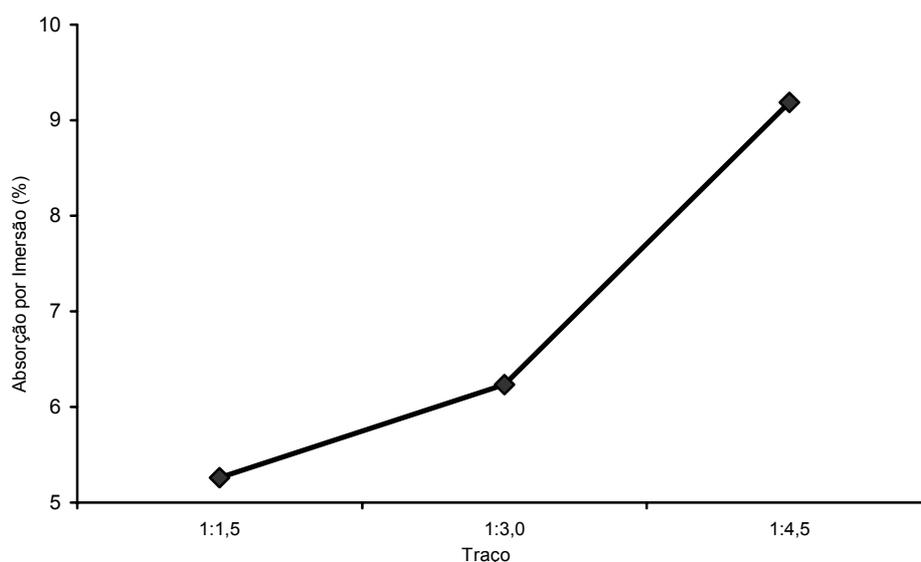


Figura 8.42 Efeito do traço na absorção de água por imersão (NBR 9778, 1987) nas argamassas

Em relação à interação significativa do teor de EA1 na absorção de água por imersão nas argamassas, (figura 8.43), pode-se dizer:

- para 10% e 34% de adição de EA1 em substituição ao CPV ARI RS, ocorreu diminuição na taxa de absorção de água de 13,84% e 5,56%, respectivamente.

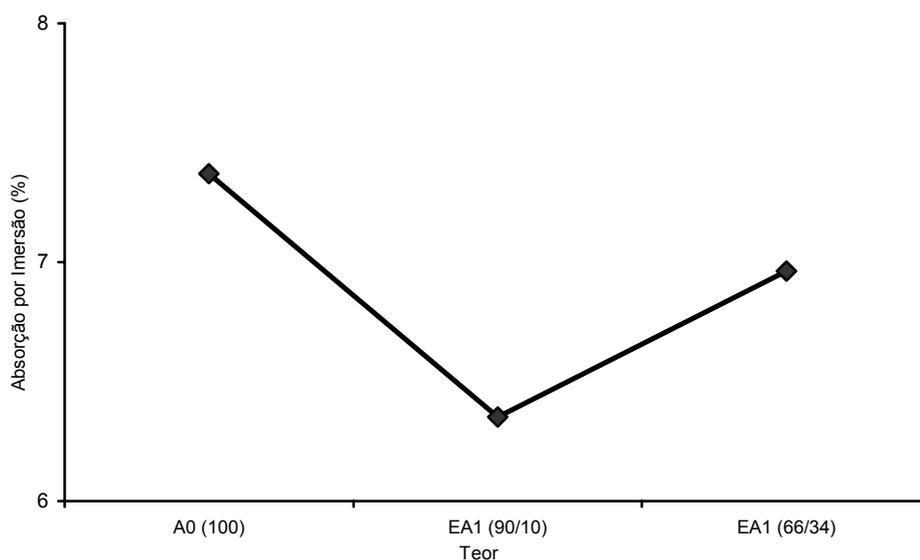


Figura 8.43 Efeito do teor de EA1 na absorção de água por imersão (NBR 9778, 1987) nas argamassas

Em relação à interação significativa entre traço e teor de EA1 na absorção de água por imersão nas argamassas, (figura 8.44), pode-se dizer:

- para o traço 1 : 1,5, ao substituir 10% e 34% de adição de EA1 em substituição ao CPV ARI RS, ocorreu diminuição na taxa de absorção de água de 14,62% e 37,26%, respectivamente;
- para o traço 1 : 3,0, ao substituir 10% e 34% de adição de EA1 em substituição ao CPV ARI RS, ocorreu diminuição na taxa de absorção de água de 2,34% e 5,08%, respectivamente;
- para o traço 1 : 4,5, ao substituir 10% e 34% de adição de EA1 em substituição ao CPV ARI RS, ocorreu diminuição na taxa de absorção de água de 1,49% e 3,85%, respectivamente.

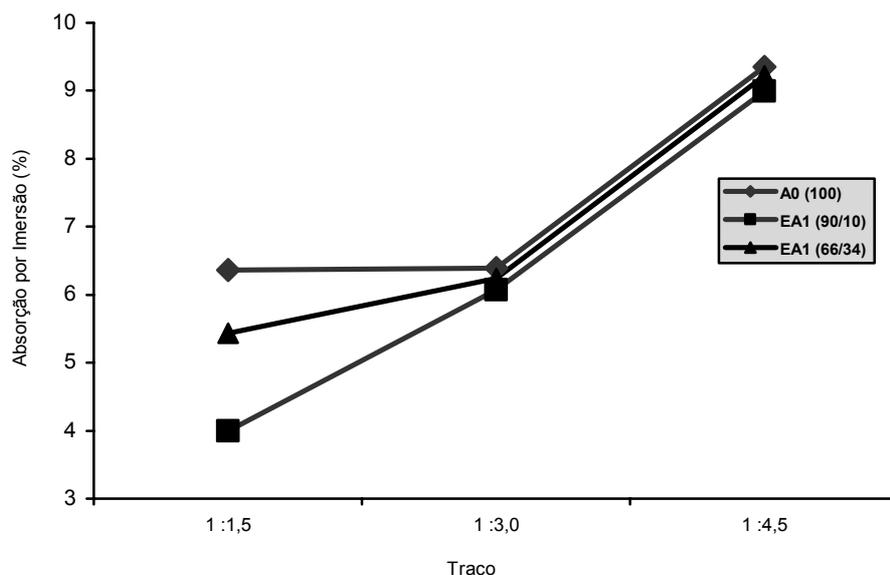


Figura 8.44 Efeito da interação entre traço e teor de EA1 na absorção de água por imersão (NBR 9778, 1987) nas argamassas

Pode ser notado que para um mesmo traço, sempre que se faz a substituição de CPV ARI RS por EA1, conseqüentemente, ocorre a diminuição da absorção de água por imersão. Isto é atribuído, possivelmente, ao “efeito fíler” e “ação pozolânica” que EA1 possibilita à argamassa, uma vez que a sua granulometria é contínua e uniforme e a dimensão média dos seus grãos é pequena ($3,37\mu\text{m}$), proporcionando, assim, um maior refinamento e bloqueio dos poros. Em todos os traços com a adição de EA1, ocorreram resultados de absorção de água por imersão inferiores aos das argamassas de referência (tabela 8.14).

MASUERO (2001), ao estudar a adição de uma escória de aciaria elétrica granulada (ACIGRAN), notou que a maior redução na taxa de absorção foi no traço 1 : 1,5, chegando-se a uma redução de 62% com 30% de adição de ACIGRAN em relação à argamassa referência. Para os traços de maior consumo de cimento, a ACIGRAN reduziu a absorção de água por imersão.

A ANOVA (tabela 8.16) mostra que existe uma influência significativa do traço e da interação traço e teor de adição de EA1 nos resultados do índice de vazios das argamassas.

Tabela 8.16 Resultados da análise estatística através da ANOVA do efeito do traço e teor de EA1 no índice de vazios (NBR 9778, 1987) das argamassas

FATOR	GDL	MQ	F _{calc}	F _{0,05}	Significância*
Traço	2	106,33	1603,10	3,56	S
Teor	2	10,51	158,39	3,56	S
Traço x Teor	4	4,62	69,68	2,93	S
ERRO	18	0,07			

GDL: Grau de Liberdade
MQ: Média Quadrática
F_{calc}: Valor Calculado de F
F_{0,05}: Valor Tabelado de F para o nível de significância de 5%

S: Significativo
NS: Não Significativo
***Significância:** F_{calc} > F_{0,05} : S
 F_{calc} < F_{0,05} : NS

As figuras 8.45, 8.46 e 8.47 mostram, respectivamente, a influência do traço, do teor de adição de EA1 e da interação do traço e teor de adição de EA1, sobre os resultados do índice de vazios das argamassas.

Em relação à interação significativa do traço no índice de vazios das argamassas, (figura 8.45), pode-se dizer:

- a medida que o traço torna-se mais pobre, aumenta a índice de vazios;
- para os traços 1 : 3,0 e 1 : 4,5, em relação ao traço 1 : 1,5, o aumento do índice de vazios das argamassas foi de 15,90% e 57,26%, respectivamente.

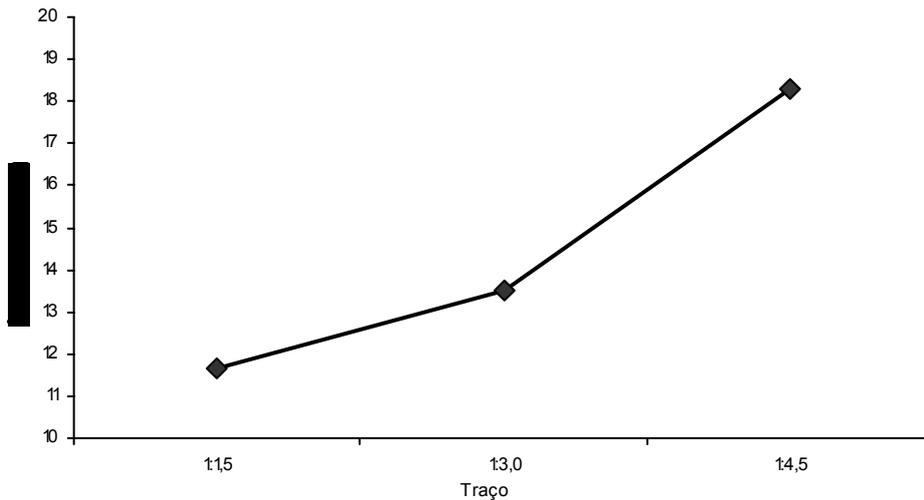


Figura 8.45 Efeito do traço no índice de vazios (NBR 9778, 1987) nas argamassas

Em relação à interação significativa do teor no índice de vazios das argamassas, (figura 8.46), pode-se dizer:

- para 10% e 34% de adição de EA1 em substituição ao CPV ARI RS, ocorreu diminuição do índice de vazios das argamassas de 13,65% e 4,09%, respectivamente.

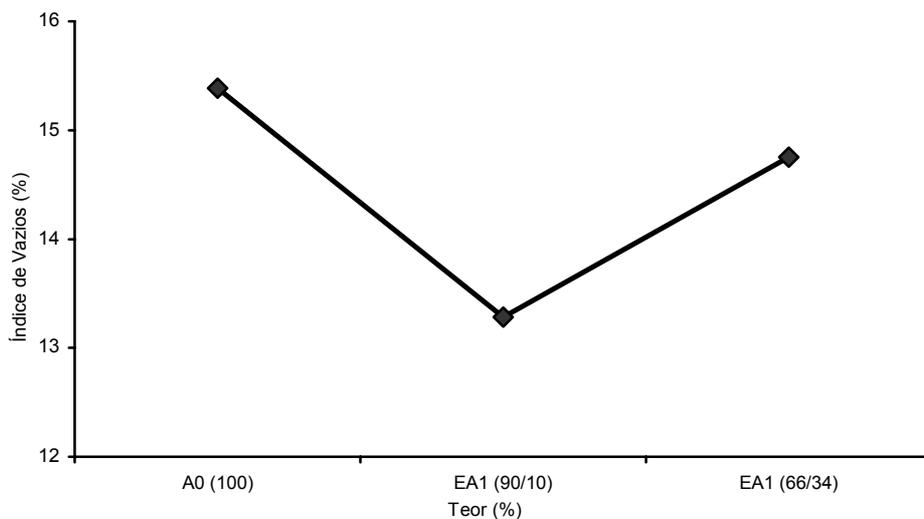


Figura 8.46 Efeito do teor de EA1 no índice de vazios (NBR 9778, 1987) nas argamassas

Em relação à interação significativa entre traço e teor de EA1 no índice de vazios das argamassas, (figura 8.47), pode-se dizer:

- para o traço 1 : 1,5, ao substituir 10% e 34% de adição de EA1 em substituição ao CPV ARI RS, ocorreu diminuição do índice de vazios de 9,71% e 35,47%, respectivamente;
- para o traço 1 : 3,0, ao substituir 10% e 34% de adição de EA1 em substituição ao CPV ARI RS, ocorreu diminuição do índice de vazios de 2,52% e 5,97%, respectivamente;
- para o traço 1 : 4,5, ao substituir 10% e 34% de adição de EA1 em substituição ao CPV ARI RS, ocorreu diminuição do índice de vazios de 1,13% e 3,33%, respectivamente.

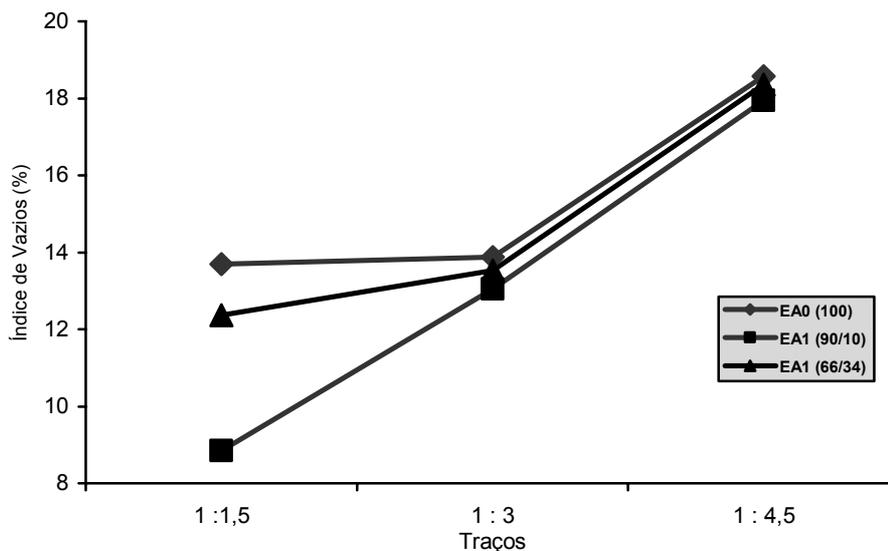


Figura 8.47 Efeito da interação entre traço e teor de EA1 no índice de vazios (NBR 9778, 1987) nas argamassas

Observa-se que para um mesmo traço, sempre que se faz a substituição de CPV ARI RS por EA1, conseqüentemente, ocorre a diminuição no índice de vazios das argamassas. Isto é atribuído, possivelmente, ao “efeito fíler” e “ação pozolânica” que EA1 possibilita à argamassa, uma vez que a sua granulometria é contínua e uniforme e a dimensão média dos seus grãos é pequena ($3,37\mu\text{m}$), proporcionando, assim, um maior refinamento e bloqueio dos poros. Em todos os traços com a adição de EA1, ocorreram resultados de índices de vazios inferiores aos das argamassas de referência (tabela 8.14).

MASUERO (2001) mostrou que a presença de ACIGRAN em argamassas exerce uma influência positiva na propriedade de absorção por imersão, principalmente para os traços mais ricos (1 : 1,5 e 1 : 3,0), onde se tem uma grande quantidade de ACIGRAN, porém para o traço 1 : 4,5, onde o consumo de cimento é menor e, conseqüentemente, também o de ACIGRAN, praticamente não se verificou melhoria no desempenho da propriedade de absorção pelo incorporação de ACIGRAN ao traço. Quanto à propriedade de índice de vazios, a autora, estatisticamente, não encontrou influência significativa das variáveis, teor de substituição de ACIGRAN ou traço e nem da interação destas variáveis nos resultados do índice de vazios das argamassas.

8.4.2.3 ENSAIO DE PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO (ASTM C 1202 / 1997)

Para investigar o comportamento das argamassas confeccionadas com CPV ARI RS e com escória de aciaria elétrica micronizada EA1, frente à difusibilidade dos íons cloreto, adotou-se o método ASTM C – 1202/1997 - “*Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration*”, sendo as medidas feitas após cura de 28 dias.

O método da ASTM C 1202 (1997) consiste em submeter uma amostra de concreto/argamassa com 5cm de altura e 10cm de diâmetro (extraída no terço médio de um corpo-de-prova cilíndrico de 10cm de diâmetro e 20cm de altura) à passagem de corrente elétrica, por um período de 6 horas, sob uma diferença de potencial de 60V. O corpo-de-prova tem uma das faces imersas em solução de hidróxido de sódio e a outra em solução de cloreto de sódio. A carga total passante (C) é relacionada com a resistência do concreto à penetração de íons cloretos. Os resultados obtidos são semi-quantitativos, tendo em vista a amplitude das faixas classificatórias apresentadas na ASTM.

A tabela 8.17 apresenta os critérios de classificação mencionados pela ASTM.

Tabela 8.17 Critério de classificação para difusibilidade de cloretos (ASTM C 1202, 1997)

Carga Passante (Coulombs)	Penetração dos íons cloreto
> 4000	Elevada
2000 – 4000	moderada
1000 – 2000	baixa
100 - 1000	muito baixa
< 100	despresível

Os ensaios de migração de íons cloretos foram realizados no laboratório da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) em São Paulo – SP.

8.4.2.3.1. PREPARAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA

Para realização dos ensaios foram preparados corpos-de-prova de argamassa utilizando-se como agregado miúdo areia normal para ensaio de cimento (NBR 7214, 1982) em proporções iguais nas quatro frações.

Para a realização dos ensaios foram elaborados 9 traços de argamassa utilizando-se CPV ARI RS e escória de aciaria elétrica micronizada EA1, areia normal e água destilada. Os materiais foram dosados em massa e misturados conforme a NBR 7215 (1996). A Tabela 8.18 apresenta a proporção cimento: areia e relação água/aglomerante especificada e a quantidade de material por m³ calculada com base nas massas específicas dos materiais, considerando-se ainda um teor de ar aprisionado de 1%.

Tabela 8.18 Dosagem das argamassas constituídas de CPV ARI RS e escória de aciaria elétrica micronizada EA1

TRAÇO	TEOR EA1 (%)	RELAÇÃO Água / AGL	Traço (kg / m ³)		
			Aglomerante	Areia	Água
1 : 1,5	A0 (100)	0,31	816,4	1224,7	253,1
	EA1 (90/10)	0,30	828,4	1242,7	248,5
	EA1 (66/34)	0,29	846,9	1270,3	245,6
1 : 3,0	A0 (100)	0,53	494,3	1482,8	262,0
	EA1 (90/10)	0,52	498,7	1496,0	259,3
	EA1 (66/34)	0,50	507,9	1523,6	253,9
1 : 4,5	A0 (100)	0,79	349,4	1572,4	276,0
	EA1 (90/10)	0,77	352,9	1587,8	271,7
	EA1 (66/34)	0,76	356,2	1602,7	270,7

Para cada traço de argamassa foram moldados 3 corpos-de-prova cilíndricos (10x20)cm, adensados em duas camadas de 12 golpes cada uma e 30 segundos em mesa vibratória. A cura seguiu as recomendações de procedimento especificadas na norma NBR 5738 (2003). Após 28 dias de cura os corpos-de-prova foram cortados, obtendo-se uma fatia de 5cm de altura do terço médio. Após serem cortados os corpos-de-prova foram secos ao ar e a superfície lateral foi selada com silicone. Após a secagem do silicone os corpos-de-prova foram colocados em um dessecador e aplicado vácuo durante 3 horas.

Após este tempo, o dessecador foi preenchido com água destilada até cobrir os corpos-de-prova e aplicado vácuo durante mais uma hora. Após o período de 1 hora, a bomba de vácuo foi desligada deixando-se entrar o ar, e mantendo os corpos-de-prova imersos por um período de 18h (Figura 8.48).

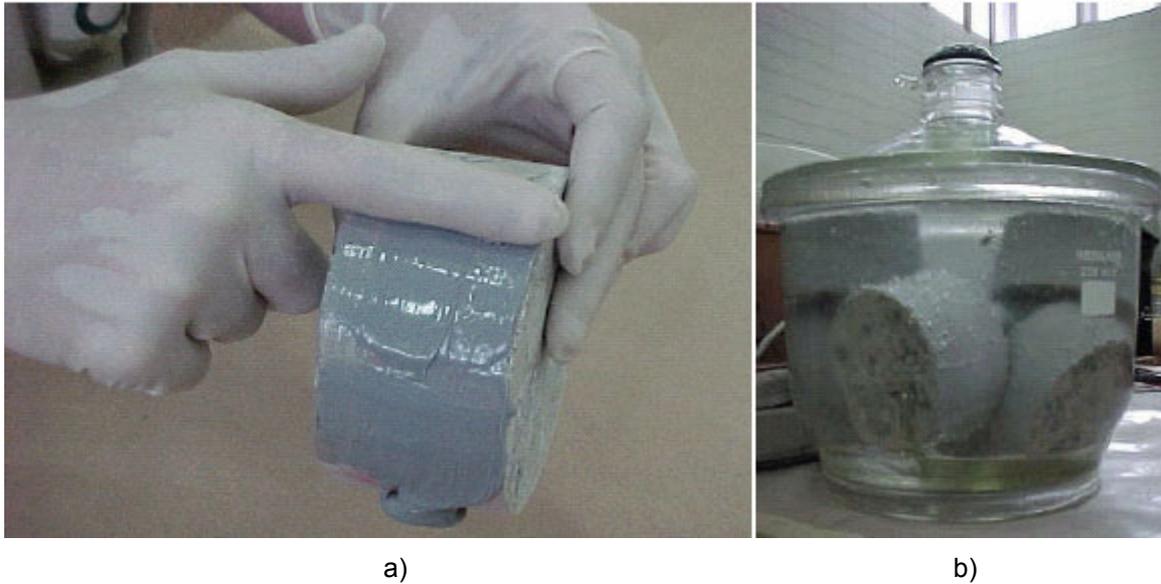


Figura 8.48 Ensaio de migração íons cloreto: a) selagem da superfície lateral do corpo-de-prova com silicone e b) saturação com água destilada dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova foram então retirados e transferidos para um recipiente, mantendo a umidade relativa controlada acima de 95%. Em seguida foram fixados nas células com selante neutro de alta viscosidade (Figura 8.49).



Figura 8.49 Ensaio de migração íons cloreto: fixação do corpo-de-prova nas células com selante neutro de alta viscosidade

8.4.2.4 REALIZAÇÃO DO ENSAIO

Após ter secado o selante, as células foram preenchidas de um lado com solução de NaCl a 3% em massa, conectando este lado ao pólo negativo da fonte de tensão. Do outro lado da célula com solução de NaOH a 0,3N, conectando-o ao pólo positivo da fonte. Os ensaios foram realizados em sala climatizada a $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$.

A carga total passante, medida em Coulombs (C), é relacionada com a resistência do concreto à penetração de íons cloretos. A Figura 8.50 mostra a realização do ensaio.

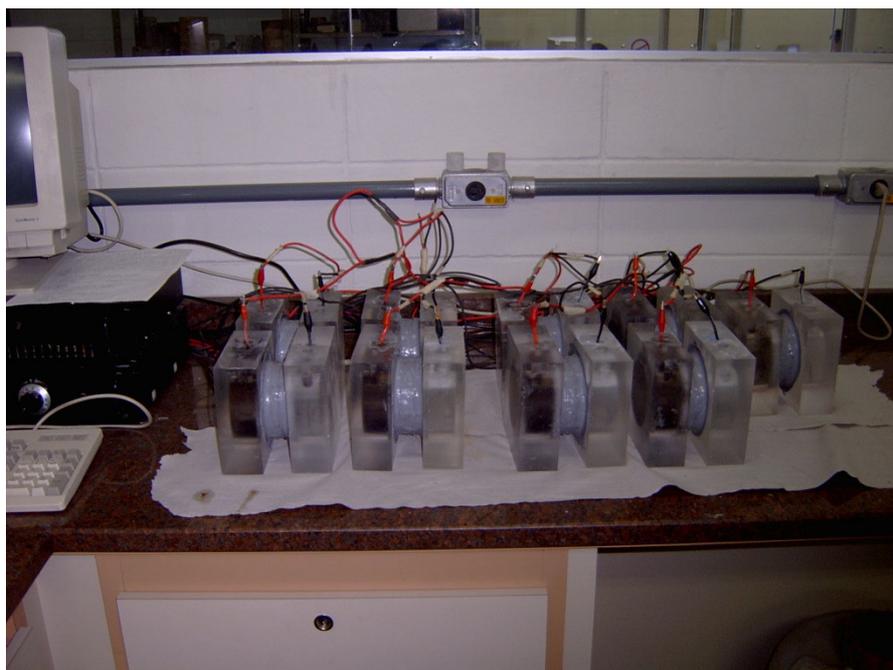


Figura 8.50 Ensaio de migração íons cloretos (ASTM C 1202, 1997) a) vista geral e b) detalhe da medição da carga passante

8.4.2.5 RESULTADOS

A Tabela 8.19 apresenta os resultados de penetração íons cloretos (ASTM C 1202, 1997) obtidos no ensaio realizado nos nove traços de argamassa.

Tabela 8.19 Resultados e classificação de penetração de íons cloretos em corpos-de-prova de argamassa segundo os critérios da ASTM C 1202 (1997)

TRAÇO	TEOR EA1 (%)	RELAÇÃO Água / AGL	CARGA TOTAL PASSANTE (C)	CARGA TOTAL PASSANTE MÉDIA (C)	Penetração dos íons cloretos
1:1,5	A0 (100)	0,31	2525	2488	Moderada
			2451		
	EA1 (90/10)	0,30	2571	2359	Moderada
			2147		
	EA1 (66/34)	0,29	2754	2904	Moderada
			3053		
1:3,0	A0 (100)	0,53	5489	4774	Elevada
			4059		
	EA1 (90/10)	0,52	6226	5827	Elevada
			5428		
	EA1 (66/34)	0,50	10811	10319	Elevada
			9826		
1:4,5	A0 (100)	0,79	5608	5162	Elevada
			4724		
	EA1 (90/10)	0,77	6301	6104	Elevada
			5906		
	EA1 (66/34)	0,76	10716	10965	Elevada
			11214		

A figura 8.51 apresenta os resultados de penetração íons cloretos (ASTM C 1202, 1997) obtidos no ensaio realizado em argamassas constituídas com escória de aciaria elétrica EA1.

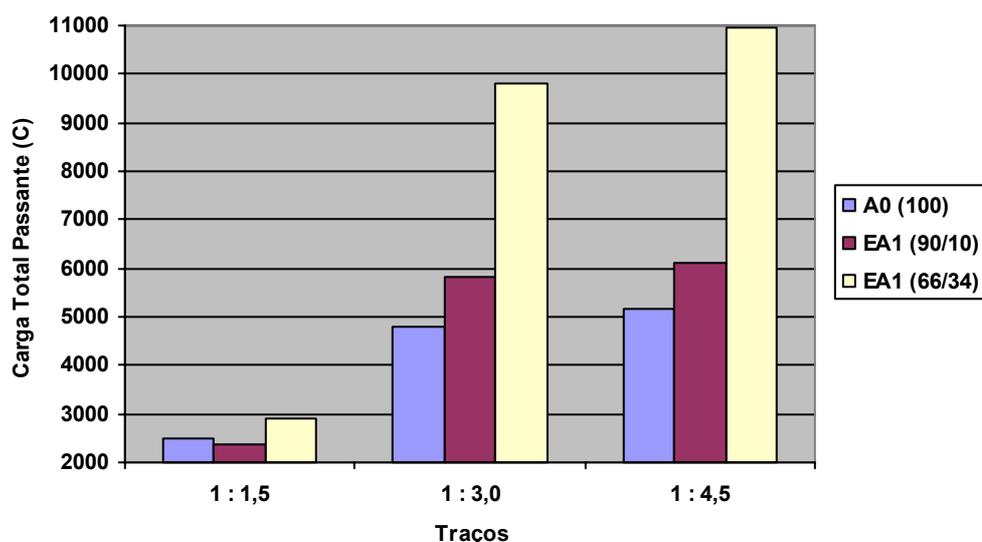


Figura 8.51 Resultados do ensaio de penetração íons cloretos (ASTM C 1202, 1997) em corpos-de-prova de argamassa constituídos com escória de aciaria elétrica micronizada: carga total passante (C)

8.4.2.5.1. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A ANOVA (tabela 8.20) mostra que existe uma influência significativa do teor de EA1, do traço e da interação do teor e traço sobre os resultados da penetração íons cloretos (ASTM C 1202, 1997) das argamassas.

Tabela 8.20 Resultados da análise estatística através da ANOVA do efeito do traço e teor de EA1 na penetração íons cloretos (ASTM C 1202, 1997) das argamassas.

FATOR	GDL	MQ	F _{calc}	F _{0,05}	Significância*
Traço	2	42770893,556	150,600	4,256	S
Teor	2	26633307,722	93,778	4,256	S
Traço x Teor	4	5125198,222	18,046	3,633	S
ERRO	9	284003,722			

GDL: Grau de Liberdade

MQ: Média Quadrática

F_{calc}: Valor Calculado de F

F_{0,05}: Valor Tabelado de F para o nível de significância de 5%

S: Significativo

NS: Não Significativo

***Significância:** F_{calc} > F_{0,05} : S

F_{calc} < F_{0,05} : NS

As figuras 8.52, 8.53 e 8.54 mostram, respectivamente, a influência do traço, do teor de adição de EA1 e da interação do traço e teor de adição de EA1, sobre a taxa a penetração de íons cloretos (ASTM C 1202, 1997) das argamassas.

Em relação à interação significativa do traço na penetração íons cloretos das argamassas, (figura 8.52), pode-se dizer:

- a medida que o traço torna-se mais pobre, aumenta a penetração de íons cloretos;
- para os traços 1 : 3,0 e 1 : 4,5, em relação ao traço 1 : 1,5, o aumento da penetração de íons cloretos das argamassas foi de 170% e 187%, respectivamente.

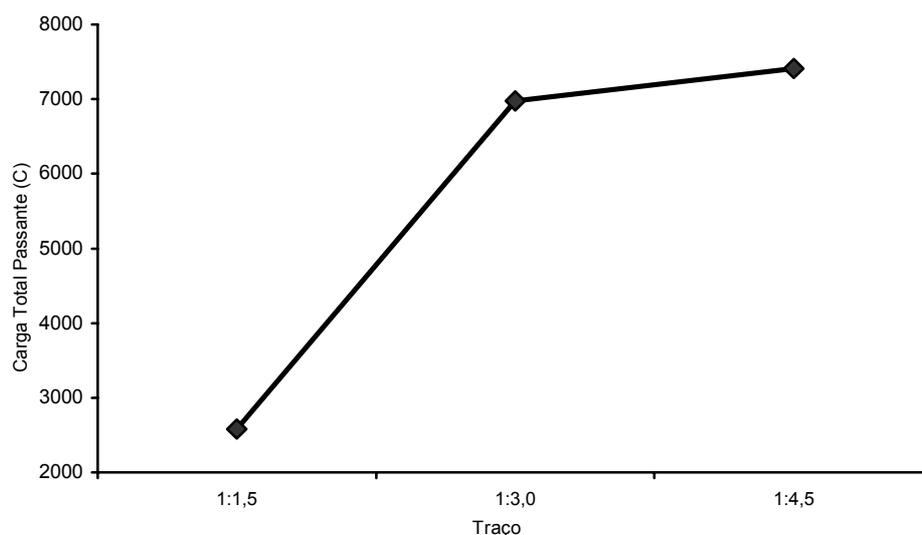


Figura 8.52 Efeito do traço na penetração de íons cloretos (ASTM C 1202, 1997) nas argamassas

Em relação à interação significativa do teor na penetração íons cloretos das argamassas, (figura 8.53), pode-se dizer:

- a medida que aumenta o teor de adição, ocorre o aumento na penetração de íons cloretos;
- para 10% e 34% de adição de EA1 em substituição ao CPV ARI RS, ocorreu aumento na penetração íons cloretos das argamassas de 14,97% e 94,61%, respectivamente.

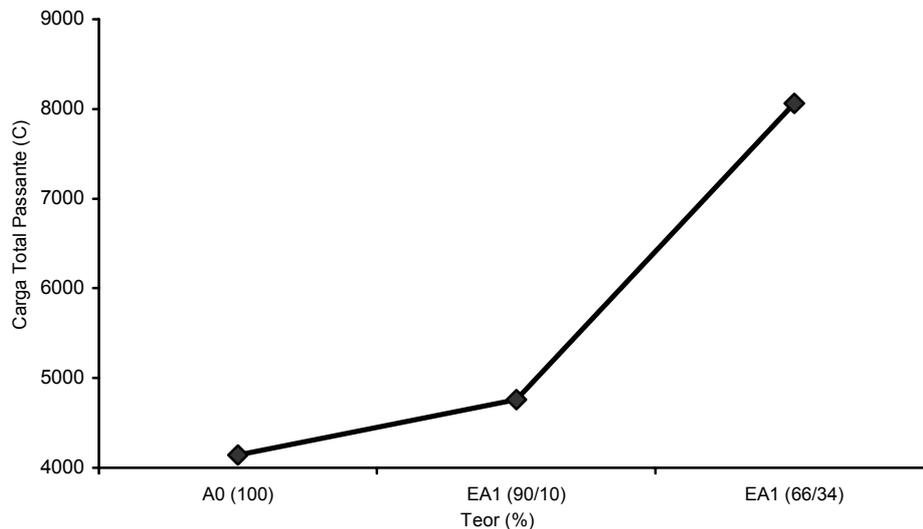


Figura 8.53 Efeito do teor de EA1 na penetração de íons cloretos (ASTM C 1202, 1997) nas argamassas

Em relação à interação significativa entre traço e teor de EA1 na penetração de íons cloretos nas argamassas, (figura 8.54), pode-se dizer:

- para o traço 1 : 1,5, ao substituir 10% de adição de EA1 em substituição ao CPV ARI RS, ocorreu diminuição da penetração de íons cloretos de 5,18%;
- para o traço 1 : 1,5, ao substituir 34% de adição de EA1 em substituição ao CPV ARI RS, ocorreu aumento da penetração de íons cloretos de 16,70%;
- para o traço 1 : 3,0, ao substituir 10% e 34% de adição de EA1 em substituição ao CPV ARI RS, ocorreu aumento da penetração de íons cloretos de 22,06% e 116,13%, respectivamente;
- para o traço 1 : 4,5, ao substituir 10% e 34% de adição de EA1 em substituição ao CPV ARI RS, ocorreu aumento da penetração de íons cloretos de 18,14% e 112,25%, respectivamente.

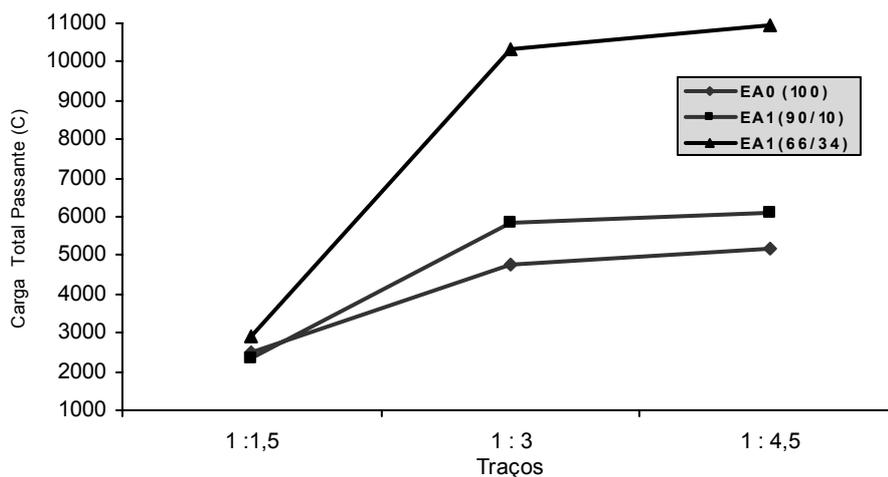


Figura 8.54 Efeito da interação entre traço e teor de EA1 na penetração de íons cloretos (ASTM C 1202, 1997) das argamassas

Para o traço 1 : 1,5 que é o traço mais rico, e com relação água/aglomerante mais baixa, ocorreu uma diminuição na penetração íons cloretos de 5,18% para o teor de 10% de adição de EA1. Para o teor de 34% de adição de EA1, ocorreu um aumento de 16,72% na penetração de íons cloretos. Esses valores baixos de penetração de íons cloretos são causados pela dificuldade da penetração dos íons cloretos pelos vazios da argamassa, possivelmente, em função do “efeito filer” e da “ação pozolânica” propiciada pela adição de EA1 nas argamassas.

À medida que os traços tornam-se mais pobres (1 : 3,0 e 1 :4,5), e ocorre o aumento das respectivas relações água/aglomerante, percebe-se um aumento da penetração de íons cloretos, em função da facilidade do íon cloreto, que tem raio atômico muito pequeno, penetrar pelos vazios das argamassas.

MASUERO (2001) mostrou que após granular uma escória de aciaria elétrica (ACIGRAN) e realizar o ensaio de difusão de íons cloretos em corpos-de-prova de argamassa, ocorreu um maior número de pequenos cristais no interior da estrutura das argamassas, em função da ação pozolânica e filer da ACIGRAN, originando menores quantidades de poros que, conseqüentemente, dificultaram a penetração dos íons cloretos. Verificou-se que a ACIGRAN, para as relações água/aglomerante mais baixas e teores mais elevados de ACIGRAN, promoveu um efeito benéfico, reduzindo o coeficiente de difusão íons cloretos em cerca de 56% para o traço 1 : 1,5, com 50% de adição de ACIGRAN.

A resistência à penetração de íons cloretos em concretos e argamassas é influenciada pela adição de diferentes teores de sílica ativa, cinza volante e escória granulada de alto-forno, pois, normalmente, ocorre a diminuição das dimensões dos poros e uma maior densificação da zona de transição (HISADA et al, 1999; BAUER, 2003; SOUZA, 2004).

Também a utilização de filer possibilita o aumento da resistência da penetração de íons cloretos em função da criação de uma rede de poros descontínuos no interior das argamassas e concretos (HORNIAN, 1995)

O aumento da relação água/aglomerante nos traços de argamassas e concretos diminui a resistência à penetração de íons cloretos (BAUER, 2003; SOUZA, 2004).

9 CONCLUSÕES

Nos tempos atuais o homem precisa aprender a lidar com os problemas de ordem ambiental dentro de uma visão sistêmica, objetivando alcançar o desenvolvimento tecnológico compartilhado com o desenvolvimento sustentável. Desta forma, o desenvolvimento sustentável, tão alardeado pela sociedade e pelo meio técnico, depende, fundamentalmente, de um projeto ambiental, onde a reciclagem de resíduos deve ser vista como uma oportunidade para se encontrar uma destinação ambientalmente correta para a utilização do resíduo e, conseqüentemente, promover a redução do consumo de recursos naturais existentes.

Dentro desse contexto, a reciclagem da escória de aciaria elétrica, gerada pela indústria siderúrgica, encontra na indústria cimenteira uma forma sustentável de contribuir para o projeto ambiental dentro da visão sistêmica, uma vez que este resíduo pode ser utilizado como substituição ao cimento Portland e também atender ao princípio de rastreabilidade dentro da ótica de sustentabilidade.

Neste capítulo são apresentadas as conclusões referentes ao processo de moagem por micronização, que ao garantir a estabilização da escória de aciaria elétrica em relação ao fenômeno de expansão, possibilita a sua utilização como material cimentício, atendendo aos desempenhos de resistência mecânica à compressão e de durabilidade.

As conclusões apresentadas no trabalho referem-se estritamente aos resultados obtidos com os materiais utilizados, técnicas empregadas e propriedades analisadas. A confirmação da representatividade do trabalho deve ser feita através da execução de novas pesquisas, onde por meio dos resultados obtidos, estes possam complementar e confirmar as informações obtidas nesse trabalho.

9.1 COM RELAÇÃO AO PROCESSO DE MOAGEM POR MICRONIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA ELÉTRICA

O processo de moagem por micronização proporciona à escória uniformidade na distribuição granulométrica (diâmetro médio entre 3,17 μ m e 4,36 μ m) e na forma dos grãos, conforme foi revelado pelas avaliações por meio de granulometria a laser e microscopia eletrônica de varredura.

A caracterização da escória micronizada por difração de raio X apontou que os principais minerais presentes na escória são: alita, belita, calcita, C₃A, C₄AF, cal livre, portlandita, gipsita,

bassanita, magnésio ferrita, melilita, quartzo e wüstita. A escória micronizada apresenta estrutura cristalina em função do resfriamento lento ao qual é submetida.

A massa específica da escória micronizada estudada varia de 3,82 a 3,86 g/cm³, sendo que ao substituir parte do cimento Portland (CPV ARI RS) por escória micronizada, particularmente, para os teores de substituição de 10% e 34%, a massa específica da mistura aumenta para 3,10 g/cm³ e 3,27 g/cm³, respectivamente.

A realização dos ensaios de atividade pozolânica, pelos métodos químico (NBR 5753, 1991) e da argamassa de cimento (NBR 5752, 1991), indicou que a escória micronizada tem potencialidade para desenvolver reações químicas pozolânicas.

Segundo a NBR 10004 (2004), a escória utilizada na pesquisa é um resíduo classe IIA e quando da sua utilização em argamassa, esta é classificada como resíduo classe IIB .

Independentemente do tempo de estocagem da escória gerada, ou seja, recém gerada, estocada há 6 meses ou estocada há mais de 24 meses, quando se substitui 50% de CPV ARI RS por estas escórias micronizadas, ao submeter estas misturas aos ensaios de expansibilidade realizados pelo método adaptado das barras (ASTM C 1260, 1994), método da autoclave (ASTM C 151, 1993) e expansibilidade Le Chatelier (NBR 11582, 1991), em todos os ensaios, os resultados encontrados foram inferiores aos critérios preconizados pelas respectivas normas, indicando assim que o processo de moagem por micronização tem a capacidade de estabilizar o fenômeno de expansão.

Ficou evidenciado na pesquisa que diferentes processos de moagem ocasionam distintos comportamentos em relação ao fenômeno de expansão, para uma escória de aciaria elétrica recém gerada.

A escória recém gerada, ao ser moída pelo processo de moagem tradicional (moinho de bolas), em dois diferentes tempos de moagem (150 mm e 210 mm), o que ocasionou duas distintas distribuições granulométricas e dois diferentes tamanhos de grãos (\varnothing médio = 54,37 μ m e \varnothing médio = 10,06 μ m), e ao ser moída pelo processo de micronização, o que ocasionou uniformidade na distribuição granulométrica e no tamanho dos grãos (\varnothing médio = 3,37 μ m), responderam com diferentes comportamentos em relação ao fenômeno de expansão ao serem avaliados pelos métodos adaptado das barras (ASTM C 1260, 1994) e autoclave (ASTM C 151, 1993). Para a escória recém gerada, moída pelo processo de moagem tradicional (moinho de bolas), tanto a de \varnothing médio = 54,37

μm , como a de \varnothing médio = 10,06 μm , quando avaliadas pelo método adaptado das barras (ASTM C 1260, 1994) aos 12 dias de ensaio apresentaram expansão superior a 0,11%, sendo este valor considerado o limite para que o material seja considerado não deletério. Estas mesmas amostras de escória recém gerada, ao serem submetidas ao ensaio de expansão pelo método da autoclave (ASTM C 151, 1994), apresentaram expansão média de 1,175% (\varnothing médio = 54,37 μm) e 1,169% (\varnothing médio = 10,06 μm), valores superiores ao critério de 0,8% especificado como limite para que o material seja considerado não deletério. Já a escória recém gerada, moída pelo processo de micronização (distribuição granulométrica uniforme e \varnothing médio = 3,37 μm), quando avaliada pelos métodos adaptado das barras (ASTM C 1260, 1994) e método da autoclave (ASTM C 151, 1994), atenderam aos critérios destas duas normas, ou seja, pelo método adaptado das barras (ASTM C 1260, 1994), a expansão média aos 12 dias de idade foi inferior a 0,11% e pelo método da autoclave (ASTM C 151, 1994), o valor médio encontrado foi de 0,168%.

As escórias (\varnothing médio = 54,37 μm e \varnothing médio = 10,06 μm), ao serem deixadas expostas às condições ambientais do laboratório durante um período de 45 dias e novamente serem submetidas ao ensaio de expansão pelo método adaptado das barras (ASTM C 1260, 1994) não mais apresentaram expansão, evidenciando que a exposição dos grãos das escórias ao longo do tempo, influencia o fenômeno de expansão.

9.2 COM RELAÇÃO ÀS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM ESCÓRIA DE ACIARIA ELÉTRICA MICRONIZADA NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO

Para os três traços de argamassas estudados, 1 : 1,5, 1 : 3,0 e 1 : 4,5, para um mesmo índice de consistência, quanto maior o teor de substituição de cimento Portland por escória micronizada, menor foi a quantidade de água requerida, evidenciando que a escória micronizada aumenta a trabalhabilidade das argamassas.

Em relação ao traço 1 : 4,5, para 10% e 34% de substituição, verificou-se uma diminuição na relação água/aglomerante de 2,59% e 3,95%, respectivamente.

A escória micronizada, devido à sua alta finura (10% dos grãos possuem diâmetro inferior à 0,51 μm , 50% dos grãos possuem diâmetro inferior à 2,80 μm , 100% dos grãos possuem diâmetro inferior à 12 μm , sendo o diâmetro médio de 3,37 μm) possui potencialidade de desenvolver atividade

pozolânica, ou formar produtos cimentícios, em função das reações com o hidróxido de cálcio, além de propiciar o efeito filler.

Para os traços 1 : 1,5; 1 : 3,0 e 1 : 4,5, tanto para as argamassas que tiveram a substituição do cimento Portland por escória micronizada ou por escória granulada de alto-forno, as resistências aos 7, 28 e 91 dias de idade foram inferiores às do traço referência.

Mesmo com a redução na resistência das argamassas em relação ao traço referência, fica evidenciado que ao substituir cimento Portland por escória micronizada, as argamassas apresentam níveis de resistências compatíveis com às do cimento Portland composto com escória (NBR 11578, 1991).

As argamassas com escória granulada de alto-forno possuem resistência à compressão superior às argamassas com escória micronizada nas idades de 7, 28 e 91 dias.

As argamassas com escória micronizada, em relação à avaliação ambiental, segundo a NBR 10004 (2004), são classificadas como sendo Classe IIB (não perigosas e inertes).

9.3 COM RELAÇÃO À DURABILIDADE

9.3.1 PARA A PROPRIEDADE DE ABSORÇÃO D'ÁGUA

A incorporação de escória micronizada nos teores de 10% e 34% nos traços 1 : 1,5, 1 : 3,0 e 1 : 4,5, reduzem a taxa de absorção e aumentam a resistência capilar das argamassas.

Para o traço 1 : 1,5, que possui maior consumo de cimento Portland, a incorporação de 10% de escória micronizada promoveu uma redução de 67,4% na taxa de absorção média e incremento de 31,1% na resistência capilar média, em relação à argamassa de referência.

Em relação à absorção de água por imersão (NBR 9778, 1997), o teor de incorporação de escória micronizada, na proporção de 10% e 34%, reduziu a absorção e o índice de vazios das argamassas.

Para o traço 1 : 1,5, que possui o maior consumo de cimento Portland, a incorporação de 10% de escória micronizada promoveu uma redução de 62,7% e 64,5% na absorção média e no índice de vazios médio, respectivamente, em relação à argamassa de referência.

9.3.2 PARA A PROPRIEDADE DE PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETOS

Em relação ao traço 1 : 1,5, a incorporação de 10% de escória micronizada reduziu em 5,81% a carga média passante, em relação à argamassa de referência, classificando este traço e teor de argamassa, em relação à penetração de íons cloretos (ASTM C 1202, 1997), como sendo moderada.

Quando no traço 1 : 1,5 ocorreu a substituição de 34% de escória micronizada, aumentou-se em 16,72% a carga média passante em relação à argamassa de referência, classificando este traço e teor de argamassa, em relação à penetração de íons cloretos (ASTM C 1202, 1997), também como sendo moderada.

Em relação ao traço 1 : 3,0, a incorporação de 10% e 34% de escória micronizada aumentou em 22,06% e 116,13%, respectivamente, as cargas médias passantes, em relação à argamassa de referência, classificando este traço e teores de argamassa, em relação à penetração de íons cloretos (ASTM C 1202, 1997), como sendo elevadas.

Em relação ao traço 1 : 4,5, a incorporação de 10% e 34% de escória micronizada aumentou em 18,14% e 112,25%, respectivamente, as cargas médias passantes, em relação à argamassa de referência, classificando este traço e teores de argamassa, em relação à penetração de íons cloretos (ASTM C 1202, 1997), como sendo elevadas.

Portanto, verifica-se que para os traços mais pobres (1 : 3,0 e 1 : 4,5) e que requerem respectivamente maiores relações água/aglomerantes, a adição de escória micronizada ao CPV ARI RS nos teores de 10% e 34%, é o principal fator que contribui para o aumento da carga passante das argamassas e conseqüentemente a redução da capacidade de resistir à penetração de íons cloretos. Já para o traço mais rico (1 : 1,5), que requer menor relação água/aglomerante, a adição de escória micronizada ao CPV ARI RS, no teor de 10%, é o principal fator que contribuiu para a diminuição da carga passante, em relação à argamassa referência, conseqüentemente aumentando a capacidade da argamassa de resistir à penetração de íons cloretos.

9.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O processo de moagem por micronização garante a utilização da escória de aciaria elétrica como material cimentício, uma vez que o fenômeno de expansão dos grãos da escória micronizada

ocorre logo após a moagem, possibilitando que a escória micronizada seja utilizada em argamassas e concretos.

A micronização da escória de aciaria elétrica contribui para a eliminação de áreas de bota-fora nos pátios das siderúrgicas, uma vez que, tão logo seja feita a recuperação da fração metálica, esta poderá ser moída e utilizada, evitando-se longos períodos de estocagem para envelhecimento da escória, com o objetivo de se prevenir do fenômeno de expansão.

De uma maneira geral, a oportunização da moagem da escória de aciaria elétrica pelo processo de micronização contribui para a reciclagem de resíduos gerados pelas siderúrgicas, participando da política de sustentabilidade ambiental, tão necessária à sociedade.

10 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

O processo de moagem por micronização para a escória de aciaria elétrica micronizada como substituição ao cimento Portland mostrou-se viável. Porém não foram contemplados neste trabalho alguns aspectos que oportunizam abrir novas possibilidades de pesquisa. Desta forma, sugere-se que nestas pesquisas sejam levadas em consideração:

- o estudo da influência da moagem pelo processo de micronização da escória de aciaria elétrica em conjunto com o clínquer;
- estudo das propriedades do concreto, tais como, trabalhabilidade, resistência à compressão, a flexão, tração na flexão e módulo de deformação em concretos produzidos com misturas de cimento Portland e escória de aciaria elétrica micronizada.
- estudo da durabilidade de argamassas e concretos em relação às propriedades de carbonatação acelerada e de resistência ao sulfato;
- estudo comparativo de concretos utilizando a escória de aciaria elétrica micronizada e a escória granulada de alto-forno micronizada;
- verificação da influência do teor de substituição da escória de aciaria elétrica micronizada sobre a distribuição dos poros na pasta, por meio da técnica de intrusão de mercúrio;
- estudo do comportamento dos diversos processos de cura sobre os concretos produzidos com escória de aciaria elétrica micronizada.

Em relação a aspectos mais gerais, focando-se a moagem pelo processo de micronização:

- estudo da influência da micronização da escória granulada de alto-forno sobre as propriedades de concretos no estado fresco e endurecido;
- estudo da viabilidade do uso de escória de aciaria elétrica micronizada como substituição ao cimento Portland em concretos e argamassas produzidos com areia artificial;
- estudo da viabilidade do uso de escória de aciaria elétrica micronizada como substituição ao cimento Portland em concretos e argamassas produzidos com agregados reciclados de entulho;
- estudo da influência da moagem por micronização de escórias de cobre, de fundição e LD, quando utilizadas em substituição ao cimento Portland em concretos e argamassas.

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRIZZI, E. J. Avaliação do uso agrícola de uma escória de aciaria, da Companhia Siderúrgica de Tubarão, como corretivo de solos. In: 9º ENCONTRO REGIONAL DO ILAFA – CADIMA – IBS. Vitória. Mai. 2003.

ALBERNAZ, C.A.V.; FILHO, V.P.C.; NASCIMENTO, J.F.; LIMA, N.P. **Pavimento de alto desempenho estrutural executado com escória de aciaria**. Uberlândia, Brasil: 10ª Reunião de Pavimentação Urbana, 2000. 25p.

ANDRIOLLO, F. R.; SCANDIUZZI, L.; **Concreto e seus materiais: Propriedades e ensaios**. São Paulo. PINI, 1986.

AMARAL, L.; VÁZQUEZ, 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 MATERIAL. **ASTM C 151 – Standard test method for autoclave expansion of Portland cement**. Philadelphia, 1993.

----- **ASTM C 1260 - Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method)**. Philadelphia, 1994.

----- **ASTM C 1202 - Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration**. Philadelphia, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732 – Cimento Portland comum**. Rio de Janeiro, 1991.

----- **EB 655 –Via Férrea – Lastro Padrão**. Rio de Janeiro, 1991.

----- **NBR 5732 – Cimento Portland Comum**. Rio de Janeiro, 1991.

----- **NBR 5733 – Cimento Portland de alta resistência inicial**. Rio de Janeiro, 1991.

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

----- **NBR 5736 – Cimento Portland Pozolânico**. Rio de Janeiro, 1991.

----- **NBR 11578 – Cimento Portland composto**. Rio de Janeiro, 1991.

----- **NBR 5738 – Concreto - procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro, 2003

----- **NBR 5739 – Concreto – ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto**. Rio de Janeiro, 1994.

----- **NBR 5743 – Análise química de cimento Portland – determinação de perda ao fogo**. Rio de Janeiro, 1977.

----- **NBR 5744 – Cimento Portland – determinação de resíduo insolúvel**. Rio de Janeiro, 1989.

----- **NBR 5752 – Materiais pozolânicos – determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – índice de atividade pozolânica com cimento**. Rio de Janeiro, 1992.

- **NBR 5753 – Cimentos – método de determinação de atividade pozolânica em cimento Portland pozolânico.** Rio de Janeiro, 1991.
- **NBR 6465 – Agregados – Desgaste por Abrasão Los Angeles.** Rio de Janeiro, 1984.
- **NBR 6474 – Cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 1984.
- **NBR 7211 – Agregado para concreto.** Rio de Janeiro, 1983.
- **NBR 7214 – Areia normal para ensaio de cimento.** Rio de Janeiro, 1990.
- **NBR 7215 – Cimento Portland – determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 1996.
- **NBR 7217 – Agregados – determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 1987.
- **NBR 7222 – Argamassas e concretos – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 1982.
- **NBR 7223 – Concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 1992.
- **NBR 7227 – Cimento Portland – determinação de óxido de cálcio livre pelo etilenoglicol.** Rio de Janeiro, 1989.
- **NBR 9202 – Cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da finura por meio da peneira 0,044mm (Nº 325).** Rio de Janeiro, 1985.
- **NBR 9941 – Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório.** Rio de Janeiro, 1987.
- **NBR 9773 – Agregado – reatividade potencial de álcalis em combinações cimento-agregado.** Rio de Janeiro, 1987.
- **NBR 9776 – Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do Frasco de Chapman.** Rio de Janeiro, 1986.
- **NBR 9778 – Argamassa e concreto endurecido: determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 1987.
- **NBR 9937 – Agregados – determinação da absorção e massa específica dos agregados graúdos.** Rio de Janeiro, 1986.
- **NBR 10004 – Resíduos sólidos - Classificação.** Rio de Janeiro, 2004.
- **NBR 10005 – Procedimento para a obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004.
- **NBR 10006 – Procedimento para a obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004.
- **NBR 10007 – Amostragem de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004.
- **NBR 11578 – Cimento Portland composto.** Rio de Janeiro, 1991.

----- **NBR 11579 – Cimento Portland – determinação da finura por meio da peneira nº 200.** Rio de Janeiro, 1991.

----- **NBR 11580 – Cimento Portland – determinação da água de pasta de consistência normal.** Rio de Janeiro, 1991.

----- **NBR 11581 – Cimento Portland – determinação dos tempos de pega.** Rio de Janeiro, 1991.

----- **NBR 11582 – Cimento Portland – determinação da expansibilidade de Le Chatelier.** Rio de Janeiro, 1991.

----- **NBR 12653 – Materiais pozolânicos.** Rio de Janeiro, 1992.

----- **NBR 12696 – Agregados – verificação do comportamento mediante ciclagem artificial água-estufa.** Rio de Janeiro, 1992.

----- **NBR 12697 – Agregados – avaliação do comportamento mediante ciclagem acelerada com etilenoglicol.** Rio de Janeiro, 1992.

----- **NBR NM 76 – Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine).** Rio de Janeiro, 1996.

ATRITOR LIMITED. Molino de chorros opuestos directos.
In.: URL: [http:// atritor.com/languages/spanish/products/pages/opossed.html](http://atritor.com/languages/spanish/products/pages/opossed.html). Acessado em 29/10/2003

BARATA, M.S. **Concreto de Alto Desempenho no Estado do Pará: Estudo de viabilidade técnica e econômica de produção de CAD com os materiais disponíveis em Belém através da adição de sílica ativa e metacaulim.** 1998. 135 p (Mestrado em Engenharia). Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BAUER, E. Influência da adição de escórias nos processos e mecanismos de corrosão das armaduras em concreto. In: 3º CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO. São Paulo. Nov. 2003. p. 593-599.

BRASIL. Ministério dos Transportes. **Escórias siderúrgicas – material de múltiplas aplicações.** Brasília: DNER – Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1988. 50p.

BLUNCK, G. Utilization of blast furnace slag and steelmaking, in the Federal Republic of Germany. C. R. In: CONFERENCES SOUS-PRODUITS ET DÉCHETS DANS LE GÉNIE CIVIL. Paris. 1978. p. 267-270

CANOVAS, M. F. **Hormigon.** Madrid, 1996.

CAPURUÇO, F. R. P.; CRUZ, L. O. M.; ABREU, J. V. Microcimentos e cimentos especiais para concreto projetado. In: SEMINÁRIO SOBRE CIMENTOS ESPECIAIS. Belo Horizonte. Mar. 2004.

CECCATTO, D.M. **Avaliação da Utilização de Escória Granulada de Fundação (EGF) como Substituição de Parte do Cimento em Concreto – Propriedades Mecânicas.** Porto Alegre, 2003. 261 p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CHATTERJI, S. Mechanism of Expansion of Concrete Due to the Presence of Dead-Burnt CaO and MgO. **Cement and Concrete Research**, vol 25, n1, p 51-56, 1995.

CRISTIN, M. Brésil: Utilization de laitiers d'aciérie pour corriger l'acidité des dols et combattre la toxicité aluminique. **Laitiers Sidérurgiques.** Centre Technique et de Promotion des Laitiers Siderurgiques. nº 83. p 23-30. Déc. 2002.

COOMARASAMY, A.; WALZAK, T.L. Effects of moisture on surface chemistry of steel slag and steel slag-asphalt paving mixes. **Transportation Research Record**, Washington, n. 1492, p. 85-95, 1995.

COUTINHO, A. S. **Fabrico e Propriedades do Betão**. Lisboa, LENEC, v 1, 1973.

COSIPA. Aplicações do agregado siderúrgico. In: SEMINÁRIO: AGREGADO SIDERÚRGICO. São Paulo. Set. 2003.

CRUZ, E.B.; BENEDUCE NETO, F.; TOSETTI, J.P.V.; FERREIRA NETO, J.B. Tratamento pirometalúrgico de escórias de aciaria a oxigênio destinadas à construção civil e fluxos de refino. In: XXXI SEMINÁRIO DE FUSÃO, REFINO E SOLIDIFICAÇÃO DOS METAIS DA ABM, maio 2000. p. 527-540

DAIDO STEEL Aproveitamento da Escória de Forno Elétrico. In: SIMPÓSIO DO GRUPO DE FORNO ELÉTRICO, 39, Comitê de Pesquisa Cooperada da Japan and Steel Association, maio/1993, 13p.

DADALTO, A. E. Qualidade e economia no pavimento de ruas do município de Serra - ES. In: SEMINÁRIO DE ESCÓRIA DE ACIARIA. Vitória. Jul. 2003.

DAL MOLIN, D. C.C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microssilica**. São Paulo, SP. 1995, 286p. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. – DNER - EM 262/94. **Escória de aciaria para pavimentos rodoviários**. 1994.

DING, Z.; LI, Z. Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag. **Cement and Concrete Research**, Volume 33, Issue 4, April 2003, Pages 579-584.

DONGXUE, L.; XINHUA, F.; XUEQUAN, W.; MINGSHU, T. Durability study of steel slag cement. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, N.Y., v. 27, n. 7, p. 983-87, 1997.

EMERY, J.J. Utilisation des scories d'aciérie dans la construction des autoroutes canadiennes. **Revue de Métallurgie**, Paris, p. 303-310, mai., 1978.

ENCICLOPEDIA. Rio de Janeiro: Mirador, 1991. v.2 p 81-82 24-29.

FEATHERSTONE, W. B. Slag treatment improvement by dry granulation. **Iron and Steel Engineer**. July, 1998. Pag. 42-46

FILHO, C. M. S. Utilização da escória de aciaria LD da Belgo Mineira – Usina Monlevade. In: SEMINÁRIO DE ESCÓRIA DE ACIARIA. Vitória. Jul. 2003.

FURNAS. **Concreto: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades**. São Paulo: Walton Pacelli de Andrade – PINI, 1997. Paginação Irregular.

FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE JUIZ DE FORA. **Construção do Contorno de Volta Redonda – RJ**. Juiz de Fora, 2002, 96 p, RT 219

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

GEISELER, J.; SCHLOSSER, R. Investigations concerning struture and properties of steel slags. **Proceedings...** In: 3rd INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOLTEN SLAGS AND FLUXES, Glasgow, Scotland. 1998. p.40-42.

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

GEYER, R. T.; VIERA 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.

GOMES, F. A. L.; PEREZ, Z. C.; GARCIA, F. M.; PREGO, A. F. Revalorización de escorias LD mediante su utilización agrícola. In: **II Jornadas Técnicas**. Buenos Aires, Argentina: Instituto Argentino de Suderurgia. 1988, p III-1 – 23.

GONÇALVES, J.P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para a produção de concretos**. Porto Alegre, 2000. 113 p (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

GOPALAN, M. K. Sorptivity of fly ash concrets. **Cement and Concret Research**. v. 26, n. 8, p. 1189-1197, 1996.

GRAFITTI, D. F. **Avaliação do teor de cal livre em escórias de aciaria elétrica**. 2002. 77p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GROMOV, B.V. Utilización de escorias metalúrgicas en la Union Soviética. **PNUMA Industria y Medio Ambiente**, S.I.s.n., p. 13-18, abr./may./jun., 1984.

GUMIERI A. G. **Estudo da Viabilidade Técnica da Utilização de Escórias de Aciaria do Processo LD como Adição em Cimentos**. 2002. 226p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GUPTA, J.D.; DOLLIMORE, D.; ADAMS, J. Reduction, elimination or encapsulation of free and hydrated limes in steel slags used as subbase aggregates. **American Iron and Steel Institute**, p. 1-11, 1995.

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.

HAJEK, J.J.; BRADBURY, A. Pavement performance modeling using Canadian strategic highway research program bayesian statistical methodology. **Transportation Research Record**, Washington, n. 1524, p. 160-70, 1996.

HEATON, B.S. Steelworks slag road pavement test sections. **Australian Road Research**, v. 19, n.2, p. 145-54, jun. 1989.

HELENE, P.R.L. A Concreto de elevado desempenho, o material do ano 2000. **Construção Minas Centro / Oeste**, PINI, São Paulo, n. 195, p 19-20, jan. 1993.

HIRANO, Y. How to expand the market for BOF slags in Japan. In: COMMITTEE ON ENVIRONMENTAL AFFAIR. **Utilisation of blast furnance and bof slag**. Brussels, Belgium: International Iron and Steel Institute, 1984. section A2, p. 32-43.

HISADA, M. et al. Evaluation of mineral admixtures on the viewpoint of Chloride ion migration throught mortar. **Cement and Concrete Composites**. Elsevier. V21, p. 443-448, 1999.

HORNIAN, H. Diffusion of chloride ions in limestone filler blended cement pastes and mortars. **Cement and Concrete Research**. V.25, n.8, Elsevier Science Ltd. p. 1667-1678. 1995.

HUANG, Z.; CHEN M.; CHEN, X. A developed technology for wet-ground fine cement slurry with its applications. **Cement and Concrete Research**, Pergamon Press, N.Y., v. 33, n. 14, p. 729-732, 2003.

HURD, J. O. Effect of recycled subbase aggregates on pipe undergrains. **TR News – Transportation Research Board National Research Council**. n.184. p. 25. May – June, 1996.

INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA. IBS. **Escórias siderúrgicas – novas tendências**. In: REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 9., 5-7 ago., 1998. Vitória. Associação Brasileira de Pavimentação, 1998. 22p.

----. IBS. **Estudo sobre aplicações de escórias siderúrgicas no Brasil e em outros oito países**. Rio de Janeiro, 1999. 29 p.

----. IBS. **Estudo anuário estatístico da indústria siderúrgica brasileira – 2003**. Rio de Janeiro, 2003.

----. IBS. **Estudo anuário estatístico da indústria siderúrgica brasileira – 2004**. Rio de Janeiro, 2004.

IRASSAR, E. F. Sulfate resistance of blended cement: prediction and relation with flexural strength. **Cement and Concrete Research**. v.2, n. 4, Elsevier Science Ltd, p.209-218, 1990.

ISAIA, G. C. **Efeito de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão de armadura**. São Paulo, 1995. 280 pag. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

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

JOHN, V.M. **Cimentos de escória ativada com silicato de sódio**. 1995. 112 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo.

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).

JULIBONI, M. Estímulo ao crescimento sustentado. **Revista OESP**, São Paulo, P 24-27, Abril, 2002.

JUNIOR, C. B.; SOARES, V. H. P. **Impacto Ambiental do Uso da Escória de Forno Elétrico em Encascalhamento de Estradas**. Volta Redonda, Sobremetal, 1992, 25 p.

JUNIOR, E. M. Sustainable development and the cement concrete industries. In: VI SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL. IBRACON, São Paulo. 27 e 28 de Out. 2003.

KAMON, M.; NONTANANANDH, S.; KATSUMI, T. Utilization of stainless-steel slag by cement hardening. **Japanese Society of soil Mechanics and Foundation Engineering**. v 33, n 3, p 118-129, Sep. 1993.

KAPAZ, E. Por uma política nacional de resíduos sólidos. In: V SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL. IBRACON, São Paulo. Set. 2002. p. 3-4.

KELHAM, S. A. Water absorption test for concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 40, n. 20. Jun/1988, p. 106-110.

- KOCH, A.; STEINNEGGER, H. **A rapid method for testing the resistance of cements to sulphate attack**. Wiesbaden, v.13, n.7, p. 317-324. Jul, 1960.
- KRASS, K. Possibilités et problèmes de valorisation des scories d'aciérie en République Fédérale d'Allemagne. **Revue de Métallurgie**, Paris, p. 315-320, mai., 1978.
- LANA, P. C. G. Escória de aciaria: mitos e realidade e o papel da tecnologia na escória de aciaria. In: SEMINÁRIO DE ESCÓRIA DE ACIARIA. Vitória. Jul. 2003a.
- LANA, P. C. G. Tratamento com vapor da escória de aciaria – Acerita Plus. In: SEMINÁRIO DE ESCÓRIA DE ACIARIA. Vitória. Jul. 2003b.
- LANA, P. C. G. Utilização de escória de aciaria na pavimentação das avenidas internas da Companhia Siderúrgica de Tubarão. In: SEMINÁRIO DE ESCÓRIA DE ACIARIA. Vitória. Jul. 2003c.
- LARANJEIRAS, A. C. R. Estruturas de concreto duráveis – Uma chave para o sucesso do desenvolvimento sustentável. **Revista IBRACON**, São Paulo , p. 68-76, jul/set, 2002.
- LEA, F.M. **The chemistry of cement and concrete**. London: Edward Arnold Ltd., 1970. 727 p. (3^a ed.).
- LEE, F.T.; LEE, C.H. Study on the reduction behavior of FeO in EAF slag. **EAF Steelmaking**, p. 20-25, jan. 1995.
- LEE, S. H.; KIM, H. J.; SAKAI, E.; DAIMON, M. Effect of particle size distribution of fly-ash cement system on the fluidity of cement pastes. **Cement and Concrete Research**, Pergamon Press, N.Y., v. 33, n. 19, p. 763-768, 2003.
- LI, Z.; DING, Z. Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag. **Cement and Concrete Research**, Pergamon Press, N.Y., v. 33, n. 14, p. 579-584, 2003.
- LIMA, L.A. **Hormigones com escorias de forno eléctrico como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental**. 1999. 243 p. Tesis (Doctoral en Ingeniería) - Departament D'Enginyeria de la Construcción, Escola Técnica Superior D'Enginyers de Camins, Canal I Ports, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- 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.
- LOWRISON, G. C. **Crushing and Grinding**. London, Butterworths, 1974, 283p.
- 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) - Escola Politécnica de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- MALHOTRA V.M.; MEHTA, P.K. **Pozzolanic and cementitious materials**. Amsterdam: Advances in Concrete Technology, v. 1, 1996. 191p.
- MANCIO, M. **Contribuição ao estudo do fenômeno da instabilidade volumétrica das escórias de aciaria elétrica**. 2001. 141p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MASUERO A. B. **Estabilização das escórias de aciaria elétrica com vistas a sua utilização como substituição ao cimento.** 2001. 264p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MASUERO, A.B.; VILELA, A.F.; DAL MOLIN, D.C.C. Emprego de escórias de aciaria elétrica como adição a concretos. 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. 19p. (cd-rom).

MATOS, J. R. **Análise Térmica.** Laboratório de Análise Térmica Prof. Dr. Ivo Giolito. USP. São Paulo, 1994, 15p.

MEHTA, P. K.; MALHOTRA, V. M. **Pozzolanic and Cimentitious Materials** - Advances in concrete technology. Amsterdam, 1996. vol. 1.

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

METHA, P.K. Conferência no **HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES.** Gramado, 1999.

MONTGOMERY, D.C. **Design and Analysis of Experiments.** 5ª Edição. Editora IE-Wiley.

MONTGOMERY, D.C.; RUNGER G.C. **Estatística Aplicada e Probabilidades para Engenheiros.** 2ª Edição. Editora LTC.

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 slags na opportunity to save natural resources. **Waste Management**, Pergamon Press, v. 21, p. 285-93, 2001.

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

MUNDIN, M.J. **Tecnologia de fabricação do aço líquido – aciaria LD.** 3ª ed. Belo Horizonte: UFMG, 1985. v. 2, 255p. MURR, L.E. **Electron and ion microscopy and microanalysis: principles and applications.** 2nd ed. New York: Marcel Dekker, Inc., 1991. 837 p.

MURPHY, J.N.; MEADOWCROFT, T.R.; BARR, P.V. Enhancement of the cementitious properties of steelmaking slag. **Canadian Metallurgical Quartely**, Canada, v. 36, n. 5, p. 315-31, 1997.

NASCIMENTO, J. F.; ALBERNAZ, C. A. V. Pavimento de alto desempenho estrutural executados com escória de aciaria – DER MG / USIMINAS. In: SEMINÁRIO DE ESCÓRIA DE ACIARIA. Vitória. Jul. 2003.

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

NIU, Q.; FENG, N.; YANG, J.; ZHENG, X. Effects of superfine slag powder on cement properties. **Cement and Concrete Research.** Pergamon Press, N.Y., v. 32, p. p 615-629, 2002.

NOUMAN, A. A. et al. The use of steel slag in asphaltic concrete. **ASTM – Special – Technical – Publication.** N 1147, Philadelphia, PA, USA. P 3-18. 1992.

NÜRNBERG, K. **Slag Atlas**. Composition and structure of iron and steelmaking slags, Germany. Committee for Fundamental Metallurgy. s. ed. 1981.

ODA, S. **Análise da viabilidade técnica da utilização do ligante asfalto-borracha em obras de pavimentação**. 2002. 233 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – USP – São Carlos

PACHECO, L. C. D.; MARANGON, M. **Utilização de escória de aciaria elétrica em obras de engenharia**. Juiz de Fora, FCT. 1997. 57p, RT 223.

PAGE, C.L., SHORT, N.R., EL TARRAS, A. Difusion of chloride ions in hardened cement pastes. **Cement and Concrete Research**. Pergamon Press, N.Y., v 11, p 395-406, 1981.

PANIS, A. Les scories LD. **Silicates Industriels**, n 4-5, p 253-258. avr / mai, 1975.

PAVLENKO, S.I. Fine-grained concrete on the basis of fly ash and slag from steel works. In: CEMENT INDUSTRY SOLUTIONS TO WASTE MANAGEMENT. 1992. Calgary. **Proceedings...**, Alberta, Canada, p. 647-661

PENNSYLVANIA TESTING METHOD – PTM 130. Método de Ensaio para Avaliação do Potencial de Expansão de Escória de Aciaria. Maio 1978. Adaptado pelo Departamento de Estradas e Rodagem de Minas Gerais – DMA – 1/ DER – MG – 1982.

PERA, J. State of the art report – use of waste materials in construction in Western Europe. In: WORKSHOP SOBRE RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 25-26 nov., 1996, São Paulo. **Anais...** São Paulo: EPUSP/ANTAC, 1997. p. 1-20.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento portland**. 6ed. Atual. e revi. Por Vladimir Antônio Paulon. Porto Alegre: Globo, 1978.

POLISSENI, A. E.; PACHECO, L. C. D. **Falhas existentes no pavimento asfáltico executado com escória de aciaria elétrica no Acesso Norte na Cidade de Juiz de Fora**. Juiz de Fora, FCT. 2002. 14 p, RT 217.

REVISTA BRASILEIRA DO AÇO. **Estatísticas**. São Paulo, p. 49-50, nov/dez. 2002.

REVISTA IBRACON. **Cimento Portland – Atuais especificações e suas aplicações**. São Paulo, p. 81-82, out /dez. 1992.

RIBEIRO, J. L. D. **Projetos de experimentos na otimização de produtos e processos**. Porto Alegre, PPGEP/UFRGS, 2000. Notas de Aula.

ROSTIK, L. F. **EAF Steel Company on th by-product synergy enviroment**. In: REWAS 99 p.1593-1603. San Sebastian, Spain. 5-7 September 1999.

ROSSI, L. A. A escória de aciaria e a política ambiental da CST / Política de destinação de resíduos da CST. In: SEMINÁRIO DE ESCÓRIA DE ACIARIA. Vitória. Jul. 2003.

RUBIO A. R. CARRETERO, J.G. La Aplicación de las escorias de aceria em carreteras. **Ingenieria Civil**, v.80, p. 5-8, 1991.

SOLOMON, C. Slag – Iron and steel. 1994.
In: URL : <http://minerals.er.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron & steel slag/790494.pdf>

SCANDIUZZI, L.; BATTAGIN, A. F. **A Utilização da Escória Granulada de Alto-Forno Como Agregado Miúdo**. São Paulo, ABCP, 1990. 35p. ET-95.

SHI, C.; QIAN, J. High performance cementing materials from industrial slags – a review. **Resources Conservation & Recycling**, v. 29, p. 195-207, 2000.

SHOUNSUN, L. Effect of MgO in steel slag on soundness of cement. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 7 1980, **Proceedings...** Published 1980. VII, p.25-30.

SILVA, S.; JUSTUS, S.; ANDRADE, R.; LONGO, E.; CUNHA, F.; BRITO, H.; BALDUÍNO, F. Aplicação de escória LD como pavimento rodoviário e lastro ferroviário. IN: XXXI SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO. ABM, Santos, São Paulo. Nov. 2000.

SILVA, E. A. Experiência da KAEME (aterro sobre solo mole, sub-base e capas asfálticas na BR 393) utilizando escória de aciaria. In: SEMINÁRIO DE ESCÓRIA DE ACIARIA. Vitória. Jul. 2003.

SMOLCZYK, H.G. Slag structure and identification of slags. In: INTERNATIONAL CONGRESS CHEMISTRY OF CEMENT, 7. Paris, 1980. **Proceedings...** Paris: Septima, 1980. sub-theme III-1, v.1, section 1, p. 1-17.

SOUZA, R. B. BT/PCC/5834. **Migração de íons cloreto no concreto: Influência da qualidade e da quantidade da pasta.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. São Paulo: EPUSP.2004.

SUN, S.; JIANHUA, W.; GUILIN, Z.; YOUNGJUN, L. Steel Slag Cement. IN.: MACMASTER SIMPÓSIO PRETREATMENT AND RECLAMATION OF DUST, SLUDGES AND ACALES IN STEEL PLANTS. Hamilton, Canadá, 1993, p. 253-260.

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

TONELLI, L. C.; TONELLI, P. R. **Resistividade de escória de aciaria da Companhia Siderúrgica Nacional.** Juiz de Fora, FCT, 2002, 21 p, RT 228.

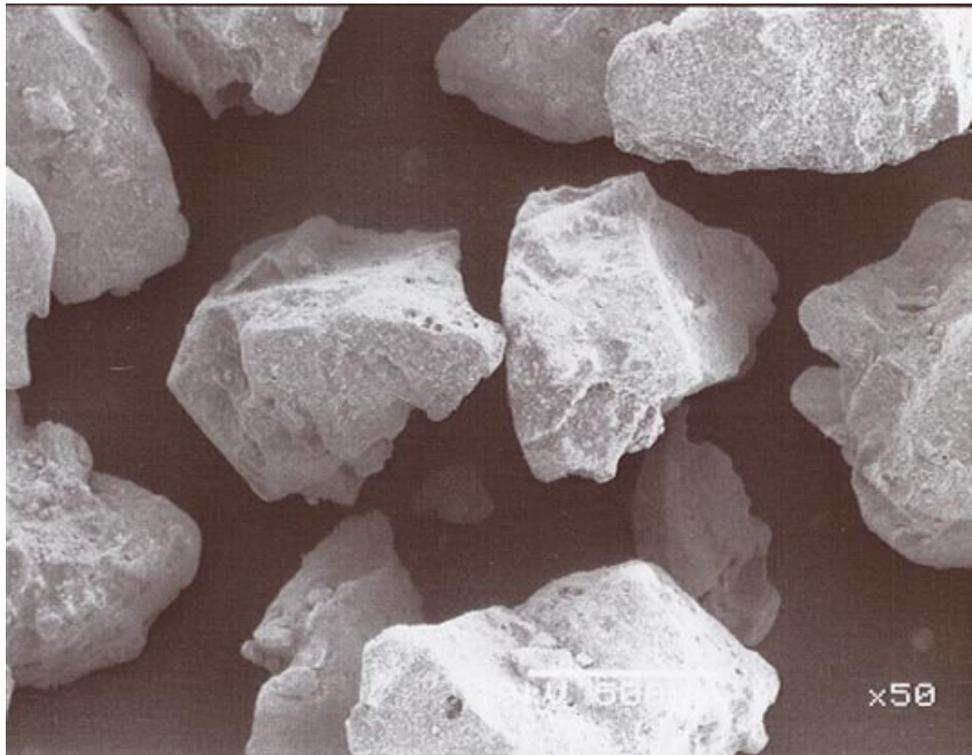
VÁZQUEZ, E. Utilización de resíduos em la C.E.E.: Aspectos políticos e ambientales. Estado del arte y normalización. In: RECICLAGEM DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL, ALTERNATIVA ECONÔMICA PARA PROTEÇÃO AMBIENTAL. **ANAIS.** Abril, 1997. São Paulo. p.64-66.

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

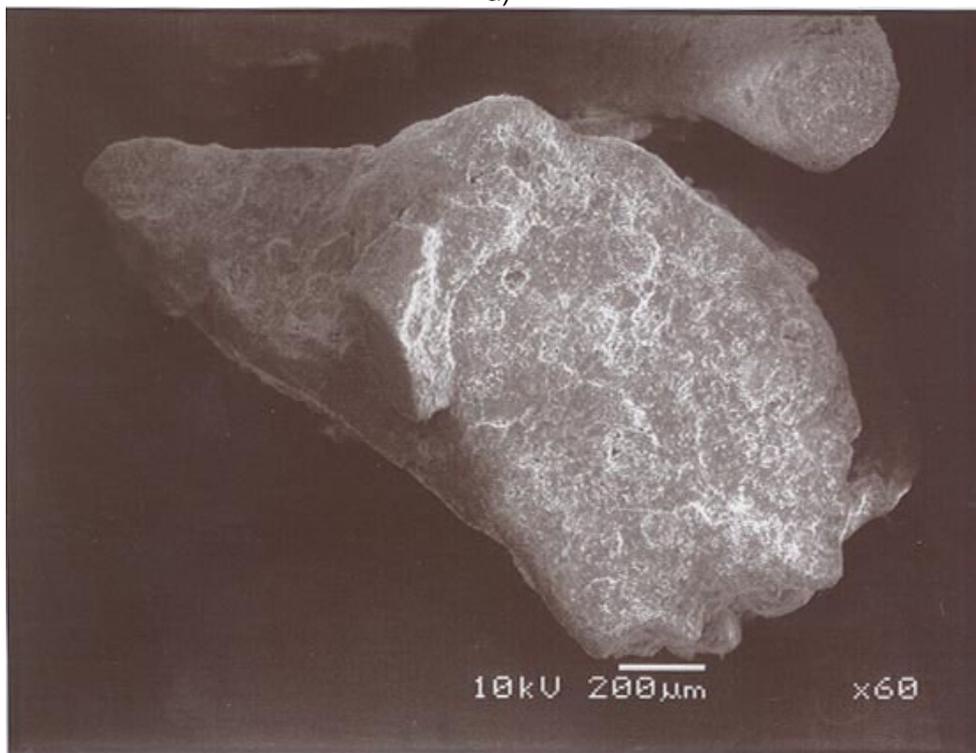
WEAST, R.C. **Handbook of Chemistry and Physics.** 52 nd. Edition. 1971-1972.

APÊNDICES

APÊNDICE 1 – Micrografias (MEV) da escória granulada de alto-forno



a)



b)

Figura A1.1 Micrografias (MEV) obtida por varredura com elétrons secundários da escória granulada de alto-forno antes da moagem: a) 50X; b) 60X

APÊNDICE 2 – Pátio de sucata metálica da Siderúrgica Belgo Mineira,
em Juiz de Fora – MG.



a)



b)

Figura A2.1 Sucata metálica utilizada para a produção do aço pelo processo de forno elétrico a arco

APÊNDICE 3 – Resultados da massa seca, massa saturada e massa submersa do ensaio de absorção e índice de vazios em conformidade com a NBR 9778

Tabela A3.1 Resultados das massas secas (Ms), saturadas (Msat) e submersas (Msub) dos corpos-de-prova de argamassas constituídas de CPV ARI RS e escória micronizada EA1 para a determinação da absorção (A%) e do índice de vazios (lv%) de acordo com a NBR 9778

TRAÇO	TEOR DE EA1	Ms	Msat	Msub	A (%)	lv (%)
1 : 1,5	A0	442,52	471,3	264,37	6,50	13,91
		444,95	472,62	266,95	6,22	13,45
		443,03	471,25	265,84	6,37	13,74
	EA1 (90/10)	456,85	474,51	273,63	3,87	8,79
		455,98	474,43	257,57	4,05	8,51
		444,78	462,87	266,59	4,07	9,22
	EA1 (66/34)	463,36	488,89	284,97	5,51	12,52
		461,72	486,83	284,18	5,44	12,39
		467,84	492,82	288,14	5,34	12,20
1 : 3,0	A0	448,43	476,96	270,91	6,36	13,85
		446,31	474,46	268,91	6,31	13,69
		444,9	473,86	268,53	6,51	14,10
	EA1 (90/10)	423,35	449,38	252,51	6,15	13,22
		419,21	444,11	249,53	5,94	12,80
		418,37	443,97	249,17	6,12	13,14
	EA1 (66/34)	425,45	452,04	255,62	6,25	13,54
		428,55	455,12	257,37	6,20	13,44
		427,69	454,54	257,14	6,28	13,60
1 : 4,5	A0	417,18	456,52	246,54	9,43	18,74
		428,59	468,7	251,92	9,36	18,50
		412,72	450,97	244,05	9,27	18,49
	EA1 (90/10)	407,78	444,96	240,35	9,12	18,17
		405,04	441,36	238,55	8,97	17,91
		407,86	444,12	240,01	8,89	17,76
	EA1 (66/34)	410,95	447,95	242,3	9,00	17,99
		407,19	444,42	239,83	9,14	18,20
		412,11	451,32	243,85	9,51	18,90

APÊNDICE 4 – Resultados da carga passante em corpos-de-prova de argamassa constituídos de CPV ARI RS e escória micronizada EA1, em conformidade com a ASTM C 1202 (1997)

Tabela A4.1 Resultados obtidos nos ensaios de penetração íons cloretos realizados em corpos-de-prova de argamassa constituída de CPV ARI RS e escória micronizada EA1, em conformidade com a ASTM C 1202 (1997)

Traço	Amostra	Água/ aglom.	1º ensaio				2º ensaio				Média Geral
			CP1	CP2	CP3	Média	CP1	CP2	CP3	Média	
1:1,5	A0 (100)	0,31	2327	2785	2463	2525	2771	2238	2343	2451	2488
	EA1 (90/10)	0,30	3005	2497	2211	2571	2281	1605	2555	2147	2359
	EA 1 (66/34)	0,29	2941	2566	1273*	2754	1726*	3130	2976	3053	2904
1:3,0	A0 (100)	0,53	5104	6108	5255	5489	4192	3800	4184	4059	4774
	EA1 (90/10)	0,52	6527	6475	5677	6226	5823	5410	5050	5428	5827
	EA 1 (66/34)	0,50	9995	10817	11622	10811	9144	9867	10467	9826	10319
1:4,5	A0 (100)	0,79	5504	5310	6009	5608	4666	4608	4877	4724	5162
	EA1 (90/10)	0,77	6228	6525	6150	6301	5983	5911	5825	5906	6104
	EA 1 (66/34)	0,76	9729	11189	11230	10716	10987	11386	11270	11214	10965

(*) Valores excluídos do cálculo da média

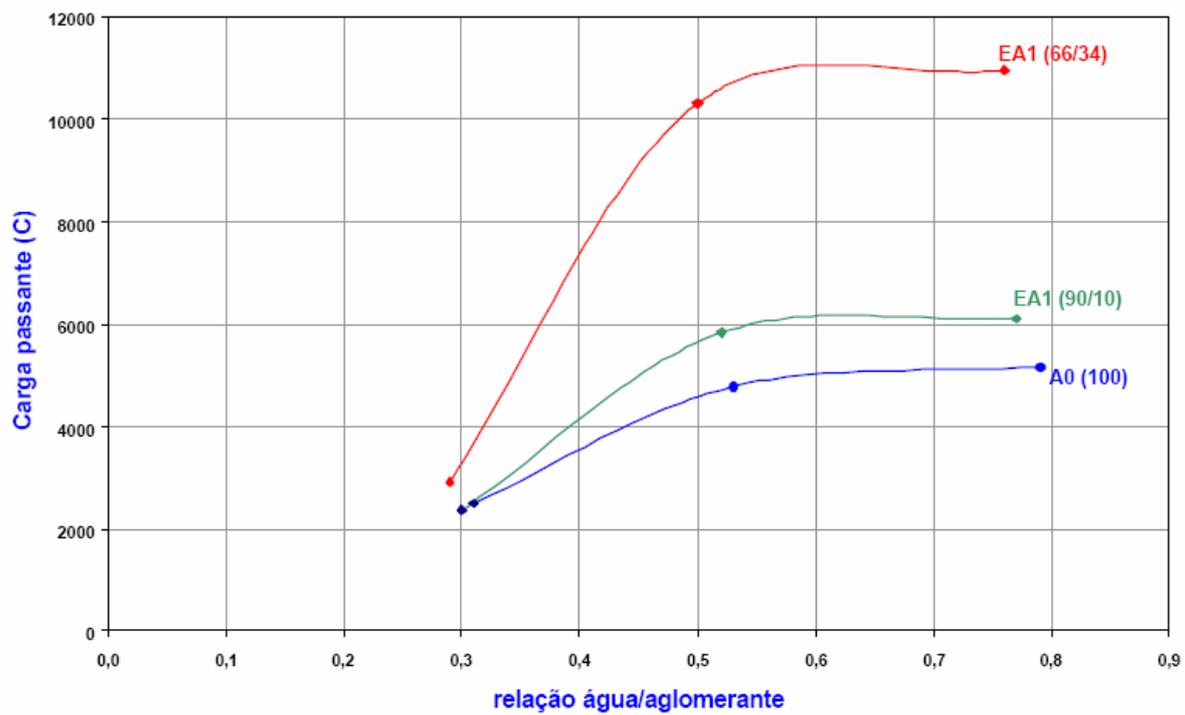


Figura A4.1 Carga passante em função da relação água/aglomerante para as argamassas constituídas de CPV ARI RS e escória micronizada EA1