



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ESTUDO DA EXPANSIBILIDADE E DA
MICROESTRUTURA DE ESCÓRIAS DE ACIARIA LD E
EAF

Marina de Oliveira Polese

Vitória, 2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO DA EXPANSIBILIDADE E DA
MICROESTRUTURA DE ESCÓRIAS DE ACIARIA LD E
EAF**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Marina de Oliveira Polese

Orientadores: Prof^a Dr^a Maristela Gomes da Silva

Prof^a Dr^a Moema Ribas Silva

Prof. MSc. Fernando Lordêllo dos Santos Souza

Prof^a Dr^a Eliana Zandonade

Vitória, 2007

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

P765e Polese, Marina de Oliveira, 1979-
Estudo da expansibilidade e da microestrutura de escórias de aciaria
LD e EAF / Marina de Oliveira Polese. – 2007.
271 f. : il.

Orientadora: Maristela Gomes da Silva.

Co-Orientadores: Moema Ribas Silva, Fernando Lordêllo dos Santos
Souza, Eliana Zandonade.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo,
Centro Tecnológico.

1. Aço. 2. Escória. 3. Microestrutura. 4. Teste a vapor. I. Silva,
Maristela Gomes da. II. Silva, Moema Ribas. III. Souza, Fernando
Lordêllo dos Santos. IV. Zandonade, Eliana. V. Universidade Federal do
Espírito Santo. Centro Tecnológico. VI. Título.


CDU: 624

ESTUDO DA EXPANSIBILIDADE E DA MICROESTRUTURA DE ESCÓRIAS DE ACIARIA LD E EAF

Marina de Oliveira Polese

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil.


Aprovada em: 06/03/2007, por:



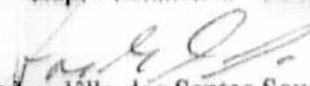
Prof.^a Dr.^a Maristela Gomes da Silva
Orientadora – Dept.^o Eng. Civil/UFES



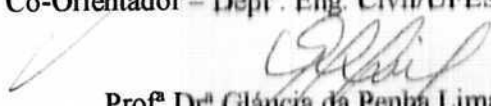
Prof.^a Dr.^a Moema Ribas Silva
Co-Orientadora – Dept.^o Eng. Civil/UFES



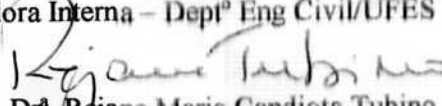
Prof.^a Dr.^a Eliana Zandonade
Co-orientadora – Dept.^o Estatística - UFES



Prof. MSc. Fernando Lordello dos Santos Souza
Co-Orientador – Dept.^o Eng. Civil/UFES



Prof.^a Dr.^a Gláucia da Penha Lima
Examinadora Interna – Dept.^o Eng Civil/UFES



Prof.^a Dr.^a Rejane Maria Candiota Tubino
Examinadora Externa – Escola de Eng Civil/UFES

AGRADECIMENTOS

À Professora Maristela pela oportunidade de aprender e trabalhar com materiais de construção. Pela orientação, dedicação e amizade ao longo de todos esses anos de pesquisa.

À Professora Moema pela atenção e disponibilidade para ajudar a qualquer hora com seu precioso conhecimento. Pela alegria constante que tornou tão saudável a intensa convivência para análise da microestrutura.

À Professora Eliana pela sua ajuda nas questões estatísticas.

Ao querido Professor Fernando Lordêllo por sua incansável vontade de ensinar.

À minha querida amiga Gisele, pela parceria nessa longa caminhada e a Deus por tê-la colocado em minha vida. Sem ela seria muito mais difícil.

Ao meu esposo pelo apoio e incentivo na construção da minha carreira.

Aos amigos e técnicos do Laboratório de Materiais de Construção Civil, Carlos, Márcio, Loriato, Sebastião e Jorge. Em especial ao Roger, pela inestimável disposição demonstrada durante a realização dos ensaios de expansibilidade.

Ao colega de mestrado Paulo Lana, pela sua disposição para ajudar.

Aos meus colegas do NEXES, Prof. Maurício, Prof^a. Kátia Bourguignon, Prof^a. Sayonara, Prof^a. Antonina, Prof^o. Florindo, Prof^o. Robson, Prof^o. Uberecilas, Prof^o. Reno, Prof^a. Kátia Bicalho, Délio, Milton, Carlos, Fábio, Denise, Giliardi, Daniela e Fernanda.

Aos funcionários do Centro Tecnológico, em especial à Marise e ao Sr. Daniel, pelo constante auxílio.

A todos os professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

À CST, FINEP, CNPq e IBS pelo apoio financeiro na realização dos ensaios e por disponibilizarem condições para realização a esta pesquisa.

À CAPES, pelo apoio financeiro com a concessão da bolsa de estudos.

SUMÁRIO

LISTA DE SIGLAS

LISTA DE QUADROS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

RESUMO

ABSTRACT

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	JUSTIFICATIVA	5
1.2	OBJETIVOS	7
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	8
2	ESCÓRIA DE ACIARIA	10
2.1	INTRODUÇÃO	10
2.2	OS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DO AÇO E A FORMAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA	10
2.2.1	ESCÓRIA DE ACIARIA LD	11
2.2.2	ESCÓRIA DE ACIARIA EAF	13
2.2.3	TRANSPORTE, RESFRIAMENTO E BENEFICIAMENTO DA ESCÓRIA DE ACIARIA	14
2.3	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	16
2.4	MECANISMOS DE EXPANSÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA	19
2.4.1	EXPANSÃO DEVIDO AO CaO	20
2.4.2	EXPANSÃO DEVIDO AO MgO	21
2.4.3	A EXPANSÃO DEVIDO AO FERRO METÁLICO	23
2.5	APLICAÇÕES	24
2.5.1	APLICAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA COMO BASE E SUB-BASE	28

2.6	CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO	30
3	<u>MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA EXPANSIBILIDADE E TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA</u>	31
3.1	INTRODUÇÃO	31
3.2	ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL DE EXPANSÃO	31
3.2.1	OS ENSAIOS ADAPTADOS A PARTIR DE ENSAIOS EM SOLOS COMPACTADOS (ASTM D 1883 E ASTM D 698)	32
3.2.1.1	ASTM D 4792 - DETERMINAÇÃO DA EXPANSÃO POTENCIAL DE AGREGADOS DEVIDO A REAÇÕES DE HIDRATAÇÃO	33
3.2.1.2	JIS A 5015/92 - MÉTODO DE ENSAIO DE DILATAÇÃO EM ÁGUA PARA ESCÓRIA SIDERÚRGICA	35
3.2.1.3	PTM 130 – MÉTODO DE ENSAIO PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE EXPANSÃO DE ESCÓRIA DE ACIARIA (ADAPTADO PELO DMA-1/DER-MG/92)	36
3.2.2	O ENSAIO DE AGULHAS DE <i>LE CHATELIER</i> – NBR 11582/91	37
3.2.3	O ENSAIO DE AUTOCLAVE	38
3.2.4	O ENSAIO A VAPOR - <i>STEAM TEST</i> (EN 1744:1/98)	39
3.3	TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA	42
3.3.1	ANÁLISE QUÍMICA (AQ)	42
3.3.2	DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)	44
3.3.3	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA E ANÁLISE POR ENERGIA DISPERSIVA	45
3.3.4	ANÁLISES TÉRMICAS	46
3.4	CARACTERÍSTICAS DA MICROESTRUTURA DA ESCÓRIA DE ACIARIA	46
3.4.1	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA ESCÓRIA DE ACIARIA	47
3.4.2	DIFRAÇÃO DE RAIOS-X	51
3.4.3	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	53

3.4.4	ANÁLISES TÉRMICAS	55
3.5	CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO	56
4	MATERIAIS, MÉTODOS E PROJETO EXPERIMENTAL	61
4.1	INTRODUÇÃO	61
4.2	ESCÓRIAS DE ACIARIA UTILIZADAS	61
4.2.1	GERAÇÃO E PROCESSAMENTO INICIAL	63
4.3	AMOSTRAGEM E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	64
4.3.1	AMOSTRAGEM NAS USINAS	64
4.3.2	QUARTEAMENTO	65
4.4	MÉTODOS E PROJETO EXPERIMENTAL	67
4.4.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA	68
4.4.1.1	GRANULOMETRIA	69
4.4.1.2	ABSORÇÃO	72
4.4.1.3	MASSA ESPECÍFICA	72
4.4.1.4	ABRASÃO LOS ANGELES E ESMAGAMENTO	75
4.4.1.5	MASSA UNITÁRIA	76
4.4.1.6	UMIDADE	78
4.4.2	CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA	78
4.4.2.1	DIFRAÇÃO DE RAIOS X	80
4.4.2.2	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	81
4.4.2.3	ANÁLISE QUÍMICA	82
4.4.3	AVALIAÇÃO DA EXPANSIBILIDADE DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA PELO MÉTODO <i>STEAM TEST</i>	83
4.4.3.1	APARELHAGEM	84

4.4.3.2	PREPARAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA	86
4.4.3.3	DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL DE EXPANSÃO	88
4.4.3.4	CÁLCULO E EXPRESSÃO DOS RESULTADOS DE POTENCIAL DE EXPANSÃO	89
4.4.3.5	LIMITES DO POTENCIAL DE EXPANSÃO	90
4.5	METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS	91
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	92
5.1	INTRODUÇÃO	92
5.2	RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA	92
5.2.1	GRANULOMETRIA	93
5.2.2	ABSORÇÃO	94
5.2.3	MASSA ESPECÍFICA	96
5.2.4	ABRASÃO LOS ANGELES E ESMAGAMENTO	102
5.2.5	MASSA UNITÁRIA	105
5.2.6	UMIDADE	108
5.3	RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA	110
5.3.1	AMOSTRAS DE ESCÓRIA DE ACIARIA LD	110
5.3.1.1	DIFRAÇÃO DE RAIOS - X	110
5.3.1.2	ANÁLISE QUÍMICA	111
5.3.1.3	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	112
5.3.1.4	DISCUSSÕES DOS RESULTADOS	112
5.3.2	AMOSTRAS DE ESCÓRIA DE ACIARIA EAF	114
5.3.2.1	DIFRAÇÃO DE RAIOS-X	114
5.3.2.2	ANÁLISE QUÍMICA	116
5.3.2.3	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	117

5.3.2.4	DISCUSSÕES DOS RESULTADOS	117
5.4	RESULTADOS DO ENSAIO DE EXPANSÃO A VAPOR – <i>STEAM TEST</i>	119
5.4.1	POTENCIAL DE EXPANSÃO DAS AMOSTRAS DE ESCÓRIA DE ACIARIA LD	120
5.4.2	POTENCIAL DE EXPANSÃO DAS AMOSTRAS DE ESCÓRIA DE ACIARIA EAF	124
5.4.3	AVALIAÇÃO DO TEOR DE MgO NO POTENCIAL DE EXPANSÃO	127
5.4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO	129
6	CONCLUSÕES	132
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	138
8	ANEXO I	150
9	ANEXO II	158
10	ANEXO III	161

LISTA DE SIGLAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ALTMAT – Alternative Materials

AQ – Análise Química

ASA – Australian Slag Association

ASTM – American Society for Testing Materials

BOF – Blast Oxygen Furnace

BS – British Standard

CBR – California Bearing Ratio

CEN – European Committee for Standardization

COPPE – Instituto Luis Alberto Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa em Engenharia Civil

CST – Companhia Siderúrgica de Tubarão

CTPL – Centre Technique et de Promotion des Laitiers Siderurgiques

DER – Departamento de Estradas de Rodagem

DIN – Deutsches Institut für Normung - Instituto Alemão de Normalização

DNIT – Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes

DRX – Difração de raios-X

EAF – Electric Arc Furnace

EDS – Energy Dispersive Spectroscopy

FehS – Forschungsgemeinschaft Eisenhuttenschlacken – Associação de pesquisa para escória de alto-forno, escória de aciaria e outros co-produtos siderúrgicos.

IBS – Instituto Brasileiro de Siderurgia

ISC – Índice de Suporte Califórnia

JIS – Japanese Industrial Standard

LD – Lins e Donawitz

LEMAC – Laboratório de Ensaio em Materiais de Construção da UFES

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

NBR – Norma Brasileira Registrada

NEXES – Núcleo de Excelência em Escórias Siderúrgicas

NORIE – Núcleo Orientado a Reciclagem e Inovação da Edificação

NSA – National Slag Association (EUA)

OH – Open Hearth

PCC – Departamento de Engenharia de Construção Civil

RILEM – Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, Systèmes de Construction et Ouvrages

UFBA – Universidade Federal da Bahia

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

UFES – Universidade Federal do Espírito Santo

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

USP – Universidade de São Paulo

C_2F – Ferrita de cálcio

C_3S – Silicato tricálcico

C_2S – Silicato dicálcico

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

C_3MS_2 – $Ca_3Mg[SiO_4]_2$

CFS – $CaFe^{+2}[SiO_4]$

LISTA DE QUADROS

Quadro 1.1 - Linhas dos grupos de pesquisa em escória de aciaria no Brasil	3
Quadro 1.2 - Linhas de pesquisa sobre a escória de aciaria em Universidade no exterior	4
Quadro 1.3 - Linhas de pesquisa das associações que são centros de referência em escória de aciaria no exterior	5
Quadro 2.1 - Parâmetros da norma britânica para agregados para pavimentação (FEATHERSTONE; HOLLIDAY, 1998)	17
Quadro 2.2 - Parâmetros da norma americana para agregados para pavimentação (FEATHERSTONE; HOLLIDAY, 1998; ASTM, 2003; ASTM, 2005)	18
Quadro 2.3 - Características físicas e limites de aceitação de escória de aciaria (DNER-EM 262, 1994)	18
Quadro 2.4 - Comparação entre escória de aciaria, basalto e granito (GEISELER, 1996)	19
Quadro 2.5 - Características das espécies químicas isoladas adaptado de Weast (1971)	20
Quadro 2.6- Principais aplicações de escória de aciaria	27
Quadro 3.1 - Distribuição granulométrica de amostras para o ensaio JIS A 5015	36
Quadro 3.2 - Proporção de massa por granulometria segundo a parábola de Fuller (EN 1744-1/98)	40
Quadro 3.3 - Valores de expansão para escória de aciaria (MOTZ; GEISELER, 2001)	41
Quadro 3.4 - Composição química da escória de aciaria LD (LITTLE; SETEPLA, 1999)	47
Quadro 3.5 - Composição química da escória de aciaria LD	48
Quadro 3.6 - Resultados das análises químicas da escória de aciaria LD de diversas procedências	49
Quadro 3.7 - Composição química de escória de aciaria EAF de Singapura (QIAN ET AL., 2002)	50
Quadro 3.8 - Composições químicas da escória de aciaria EAF (LITTLE; SETEPLA, 1999)	50
Quadro 3.9 - Composição química de escória de aciaria EAF de Taiwan (SHIH et al., 2004)	50

Quadro 3.10 - Resultado da análise química da escória de aciaria EAF	51
Quadro 3.11 - Fases encontradas por alguns pesquisadores na escória de aciaria, por meio da difração de raios X	52
Quadro 3.12 - Espécies identificadas na escória de aciaria, por meio da termogravimetria (MACHADO, 2000)	56
Quadro 3.13 - Características observadas por meio da curva de ATD (MACHADO, 2000)	56
Quadro 3.14 - Características dos principais métodos de determinação do potencial de expansão das escórias de aciaria	57
Quadro 3.15 - Principais ensaios para avaliação da expansibilidade da escória da aciaria	
Quadro 4.1 - Escórias de aciaria não tratadas: tipo e nome das amostras	62
Quadro 4.2 - Data de geração e recebimento das amostras de escória de aciaria	63
Quadro 4.3 - Informações sobre processamento das amostras de escória de aciaria	63
Quadro 4.4 - Data de realização da amostragem nas usinas e de recebimento na UFES das escórias de aciaria	65
Quadro 4.5 - Datas de recebimento e de realização da amostragem das escórias de aciaria	67
Quadro 4.6 - Parâmetros de caracterização física e suas respectivas normas	68
Quadro 4.7 - Número de repetições por ensaio em cada amostra de escória de aciaria	69
Quadro 4.8 - Séries de peneiras (NM 248/03)	70
Quadro 4.9 - Identificação das análises de microestrutura	79
Quadro 4.10 - Preparação de amostras para análise da microestrutura	79
Quadro 4.11 - Laboratórios onde foram realizadas as análises de microestrutura	79
Quadro 4.12 - Fatores e variáveis de controle das análises de microestrutura	80
Quadro 4.13 - Fatores e variáveis de controle - potencial de expansão de escórias LD e EAF pelo <i>Steam Test</i>	84
Quadro 4.14 - Fatores e variáveis de controle - potencial de expansão de escórias LD pelo <i>Steam Test</i>	84
Quadro 4.15 - Proporção de massa por faixa granulométrica (BS EN 1744-1/98)	86
Quadro 4.16 - Categorias para valores máximos de expansão para escória de aciaria - camadas granulares (EN 13242/02)	90

Quadro 5.1 - Determinação da composição granulométrica das escórias de aciaria	93
Quadro 5.2 - Dimensão máxima característica e módulo de finura das escórias de aciaria	93
Quadro 5.3 - Índice de absorção (NBR 9937/87)	95
Quadro 5.4 - Massa específica real do agregado graúdo das amostras de escória de aciaria	96
Quadro 5.5 - Massa específica aparente seca (NBR 9937/87)	98
Quadro 5.6 - Massa específica aparente saturada superfície seca (NBR 9337/87)	99
Quadro 5.7 - Massa específica real do agregado (NBR 9776/87, NBR 9937/87 e NM248/01)	102
Quadro 5.8 - Abrasão Los Angeles das amostras (NBR NM 51/00)	103
Quadro 5.9 - Compostos identificados por DRX nas escórias de aciaria LD	110
Quadro 5.10 - Resultados das análises químicas das amostras de escória de aciaria LD	112
Quadro 5.11 - Minerais detectados por MEV/EDS e DRX nas amostras de escória de aciaria LD	113
Quadro 5.12 - Compostos identificados por DRX nas amostras de escórias de aciaria EAF	115
Quadro 5.13 - Resultados das análises químicas das amostras de escória de aciaria EAF	116
Quadro 5.14 - Minerais detectados por MEV/EDS e DRX nas amostras de escória de aciaria EAF	117
Quadro 5.15 - Porosidade aparente média das amostras de escória de aciaria compactadas	119
Quadro 5.16 - Análise estatística das amostras de escória de aciaria LD	123
Quadro 5.17 - Análise estatísticas das amostras de escória de aciaria EAF	126
Quadro 6.1 - Coeficiente de variação dos resultados de potencial de expansão da escórias de aciaria	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Massa específica do agregado miúdo (NBR 9776/87)	100
Tabela 5.2 - Índice de esmagamento das amostras (NBR 9938/87)	104
Tabela 5.3 - Massa unitária no estado solto das amostras (NBR 7251/82)	105
Tabela 5.4 - Massa unitária compactada (kg/dm ³)	107
Tabela 5.5 - Teor de umidade das amostras (%)	108

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema de produção do aço nas usinas LD e EAF (MASUERO et al., 2004)	11
Figura 2.2 - Processo LD de fabricação de aço (CST, 2005)	12
Figura 2.3 - (a) Componentes do forno a arco elétrico; (b) Injeção de oxigênio (METSOL et al., 2007)	14
Figura 2.4 - Transporte da escória para as baias de resfriamento: (a) em vagão (PENA, 2004); (b) em pote <i>carrier</i> (SOUZA; POLESE, 2003).	14
Figura 2.5 - Processos de resfriamento da escória: (a) por aspensão de água ; (b) por jato de água (SOUZA; POLESE, 2003).	15
Figura 2.6 - Aspecto da escória de aciaria durante o resfriamento com jato de água	15
Figura 2.7 - (a) Separação de grandes placas metálicas da escória de aciaria por eletro-ímã. (b) Planta de britagem e separações magnética e granulométrica da escória de aciaria (SOUZA, POLESE, 2003).	16
Figura 2.8 - O MgO em solução sólida (GEISELER; SCHLOSSER, 1988)	23
Figura 2.9 - Aplicações para escória de aciaria, pavimentação, lastro ferroviário e contenção de encostas (PENA, 2004).	25
Figura 2.10 - Seção transversal típica de um pavimento (SENÇO, 1997)	29
Figura 3.1 - (a) Molde para o ensaio baseado no ASTM D 1883/05 e (b) molde imerso	34
Figura 3.2 - Equipamento para ensaio de expansão em água (JIS A 5015/92)	35
Figura 3.3 - Agulha de Le Chatelier (COUTINHO, 1973)	38
Figura 3.4 - Equipamento do <i>Steam Test</i> (EN 1744-1/98)	40
Figura 3.5 - DRX de escória da aciaria EAF de Singapura (QIAN et al., 2002)	53
Figura 4.1 - Local de geração das amostras de escória de aciaria utilizadas	62
Figura 4.2 - Amostragem da escória de aciaria nas usinas.	64
Figura 4.3 - (a) Chegada de amostras no LEMAC e (b) formação de montes	65
Figura 4.4 - (a) Vista dos cinco montes (b) e coleta de amostra parcial para formar pilha de homogeneização	66
Figura 4.5 - Fluxograma do quarteamento das amostras de escória de aciaria no LEMAC	66
Figura 4.6 - Fluxograma do programa experimental	67

Figura 4.7 - (a) Peneirador mecânico e conjunto de peneiras (b) e execução do ensaio	71
Figura 4.8 - (a) Frações graúda e miúda para realização de ensaios de massa específica e absorção (b) e pesagem hidrostática	73
Figura 4.9 - (a) Preenchimento do frasco com agregado miúdo (b) e leitura do nível atingido pela água	74
Figura 4.10 - Máquina de abrasão Los Angeles, carga abrasiva e material retirado ao final da 500 rotações.	75
Figura 4.11 - (a) Compactação do material e (b) pesagem do material compactado	77
Figura 4.12 - (a) Material disposto na estufa para secagem e (b) pesagem do material seco	78
Figura 4.13 - Fraturas de grãos de escória de aciaria para observação em MEV	81
Figura 4.14 - (a) Colocação da camada de prata nas amostras fixadas em suporte de pino (b) e metalizador	82
Figura 4.15 - (a) Câmara de amostras (b) e microscópio eletrônico de varredura	82
Figura 4.16 - Esquema ilustrativo do cilindro de teste do método <i>Steam Test</i> (BS EN 1744-1/98)	85
Figura 4.17 - Esquema do equipamento <i>Steam Test</i> (BS EN 1744-1/98)	86
Figura 4.18 - Soquete manual tipo Proctor Normal	87
Figura 5.1 - Curvas granulométricas das escórias de aciaria LD	94
Figura 5.2 - Curvas granulométricas das escórias de aciaria EAF	94
Figura 5.3 - Absorção das amostras de escória de aciaria LD	95
Figura 5.4 - Absorção das amostras de escória de aciaria EAF	95
Figura 5.5 - Massa específica real das amostras de escória de aciaria LD	97
Figura 5.6 - Massa específica real das amostras de escória de aciaria EAF	97
Figura 5.7 - Massa específica aparente seca das amostras de escória de aciaria LD	98
Figura 5.8 - Massa específica aparente seca das amostras de escória de aciaria EAF	99
Figura 5.9 - Massa específica aparente saturada superfície seca das amostras de escória de aciaria LD	99
Figura 5.10 - Massa específica aparente saturada superfície seca das amostras de escória de aciaria EAF	100
Figura 5.11 - Massa específica do agregado miúdo das amostras de escória de aciaria LD	101

Figura 5.12 - Massa específica do agregado miúdo das amostras de escória de aciaria EAF	101
Figura 5.13 - Massa específica das amostras de escória de aciaria LD	102
Figura 5.14 - Massa específica das amostras de escória de aciaria EAF	102
Figura 5.15 - Abrasão Los Angeles das amostras de escória de aciaria LD	103
Figura 5.16 - Abrasão Los Angeles das amostras de escória de aciaria EAF	103
Figura 5.17 - Índice de esmagamento das amostras de escória de aciaria LD	104
Figura 5.18 - Índice de esmagamento das amostras de escória de aciaria EAF	105
Figura 5.19 - Massa unitária no estado solto das amostras de escória de aciaria LD	106
Figura 5.20 - Massa unitária no estado solto das amostras de escória de aciaria EAF	106
Figura 5.21 - Massa unitária compactada das amostras de escória de aciaria LD	107
Figura 5.22 - Massa unitária compactada das amostras de escória de aciaria EAF	107
Figura 5.23 - Umidade das amostras de escória de aciaria LD	108
Figura 5.24 - Umidade das amostras de escória de aciaria EAF	109
Figura 5.25 - Portlandita (1) e Silicato tricálcico (2)	113
Figura 5.26 - Carbonato de cálcio (1)	113
Figura 5.27 - Ferroaluminato de cálcio hidratado (1)	114
Figura 5.28 - Ferrita de cálcio hidratada (1), C-S-H (2)	114
Figura 5.29 - Silicato dicálcico (1), Silicato tricálcico (2)	114
Figura 5.30 - Silicato dicálcico	114

LISTA DE EQUAÇÕES

Eq. 3.1	44
Eq. 3.2	55
Eq. 3.3	56
Eq. 4.1	80
Eq. 4.2	87
Eq. 4.3	89
Eq. 4.4	89
Eq. 4.5	89
Eq. 4.6	89

ESTUDO DA EXPANSIBILIDADE E DA MICROESTRUTURA DE ESCÓRIAS DE ACIARIA LD E EAF

Marina de Oliveira Polese¹

Resumo

Atualmente, as aplicações dadas às escórias de aciaria não são suficientes para o consumo de grande parte do volume gerado. Além dos estoques acumulados pelas siderúrgicas ao longo do tempo, uma parcela da geração anual é depositada em aterros sem utilização final. Para o desenvolvimento de mercado desse co-produto é fundamental que a sua microestrutura seja estudada, já que a sua constituição interfere diretamente no seu comportamento em utilização. Para aplicação em base e sub-base de pavimentos, a determinação do potencial de expansão, em conjunto com a caracterização física são necessárias para controle técnico da qualidade e para garantia da durabilidade nas condições de serviço.

Neste estudo, amostras de escória de aciaria LD e EAF, provenientes da região sudeste, são pesquisadas quanto às características microestruturais e físicas e com relação ao potencial de expansão. São utilizadas técnicas de difração de raios-X, análise química e microscopia eletrônica de varredura para identificação qualitativa dos compostos expansivos e outros que constituem a microestrutura da escória de aciaria.

O potencial de expansão é determinado utilizando o método de ensaio a vapor desenvolvido originariamente na Alemanha e normalizado pelo Comitê Europeu de Normalização (EN 1744-1:98). Os resultados mostram que este ensaio é rápido e eficaz, portanto com algumas vantagens em relação aos ensaios de imersão utilizados no Brasil, EUA e Japão. No entanto, a aceleração das reações químicas por meio do vapor deve ser estudada a fim de verificar se ocorrem mudanças nos mecanismos de expansão volumétrica dos compostos da escória de aciaria.

Adicionalmente, é realizada a caracterização física das amostras de escória de aciaria utilizando os métodos especificados pelo DNIT. De maneira geral, os resultados favorecem a utilização para camadas de pavimentos, apesar de alguns parâmetros serem diferentes daqueles encontrados para agregados naturais.

¹ Eng^a Civil, mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFES. E-mail: marinapolese@terra.com.br

EXPANSIBILITY AND MICROSTRUCTURE STUDY OF LD AND EAF STEEL SLAGS

Marina de Oliveira Polese¹

Abstract

The available techniques for applications of steel slag as a construction material are not sufficient to give final destination to most of the generated volume. Thus, the steel plants accumulate stocks through the years. In order to develop this market some characteristics must be studied such as microstructural, since the chemical constitution of the steel slag is directly related to its behavior when applied. For pavement layers, such as base and sub-base, the potential of expansion, added to the physical characterization, is an important instrument to control the material quality and to provide its durability.

In this research, LD and EAF samples from Brazilian South-West region are studied in order to provide information about its physical and microstructural characteristics and expansibility behavior. X-ray diffraction, chemical analysis and scanning electron microscopy are the techniques used for the compounds identification.

The expansion potential is measured using the Steam Test method which was developed in Germany and was standardized by the European Committee for Standardization (EN 1744-1:98). The study results show that the test is faster and more efficient compared to the conventional immersion tests adopted in Brazil, USA and Japan. However, the impact of the chemical reactions acceleration due to the steam must be still investigated in order to verify changes in the expansion mechanism of steel slag compounds.

In addition, physical characteristics of the steel slag samples are studied using the tests recommended by DNIT. The majority of the physical results is very positive and indicates that the use of steel slag is a good option for pavement layers.

¹ Civil Engineer, MSc student of PPGEC/UFES. E-mail: marinapolese@terra.com.br

1 INTRODUÇÃO

A siderurgia está entre as indústrias que têm em seu processo de produção uma fonte de elevados impactos ambientais já que, além de movimentar grandes volumes de matéria-prima e energia, é responsável pela geração de uma expressiva quantidade de resíduos. Em 2006 a produção mundial de aço bruto, de acordo com o *International Iron and Steel Institute* (2007), foi de 1.239,5 milhões de toneladas. Estima-se que, para cada tonelada de aço bruto produzido, 100 kg de escória são gerados na aciaria (LITTLE; SETEPLA, 1999; METSOL et al., 2007). Ou seja, 10% do total de aço produzido equivale a quantidade de escória de aciaria gerada.

O parque siderúrgico brasileiro é composto, atualmente, por 24 usinas administradas por 11 empresas com faturamento, em 2004, de 17.639 bilhões de dólares. São 32,9 milhões de toneladas de aço, que colocam o Brasil como oitavo maior produtor mundial em 2004 (IBS, 2005). Em 2004, considerando a média de 100 kg de escória de aciaria por tonelada de aço bruto, a geração atingiu 3 milhões de toneladas.

O Estado do Espírito Santo está inserido no contexto siderúrgico nacional de forma expressiva com 17,4 % da produção de aço bruto, o que o coloca como terceiro maior estado produtor do Brasil (IBS, 2005). São aproximadamente 5,7 milhões de toneladas de aço, que geram mais de 500 mil toneladas de escória de aciaria anualmente.

Dessa forma, a escória de aciaria é um dos co-produtos de maior volume gerado na siderurgia. Obtida mediante transformação do ferro gusa líquido e sucata em aço, possui características físicas e mecânicas iguais ou superiores aos agregados naturais (PENA, 2004). A escória de aciaria tem sido utilizada como material para algumas aplicações na construção civil e por isso é considerada um co-produto¹. No entanto, sua natureza expansiva e a insuficiência de critérios técnicos para detectar sua estabilização têm causado vários problemas de durabilidade e desempenho.

A aplicação de resíduos na construção civil é fato consagrado, tendo em vista as tendências de sustentabilidade idealizadas mundialmente. A construção civil, além de consumir seus próprios resíduos, é consumidora potencial de resíduos de outras

¹ Neste trabalho, conceitua-se *co-produto* como resultante da produção de um bem, não sendo, objetivo da produção. *Sub-produto* é o co-produto que já possui valorização comercial e, *resíduo* é aquele para o qual não há aproveitamento rentável, no momento.

indústrias, o que diminui não só a poluição ambiental, mas também a extração de recursos naturais. Atualmente, as aplicações dadas à escória de aciaria não são suficientes para o consumo de grande parte do volume gerado. Além dos estoques acumulados pelas siderúrgicas ao longo do tempo, uma parcela da geração anual é depositada em aterros sem utilização final e nem mesmo controle.

Em toda Europa são geradas anualmente cerca de 12 milhões de toneladas de escória de aciaria e, em virtude do estudo de trinta anos, 65% são usados em campos de aplicações qualificados, mas 35% da escória de aciaria ainda são descartados (MOTZ; GEISELER, 1998, MOTZ; GEISELER, 2001).

Na Alemanha, em 1998, 97% da escória de aciaria gerada foi utilizada como agregado em pavimentação (camada superficial, base e sub-base), aterros e estruturas hidráulicas (MOTZ; GEISELER, 1998, MOTZ; GEISELER, 2001). Segundo GHATAORA et al. (2004) aproximadamente um milhão de toneladas de escória de aciaria LD é gerado anualmente no Reino Unido e um estoque de dez milhões de toneladas é exposto à ação do tempo para permitir a hidratação do óxido de cálcio livre.

Para Motz e Geiseler (2001), as escórias de aciaria na Alemanha são bem caracterizadas e já se tem bastante experiência em sua utilização. Os vários campos de aplicação só puderam ser alcançados com a qualificação das escórias, a partir da seleção cuidadosa das matérias-primas e de uma rota de processo apropriada. Além disso, procedimentos subseqüentes, tais como tratamento da escória líquida, aquecimento apropriado e processamento adequado foram desenvolvidos para garantir que a qualidade das escórias de aciaria seja sempre adequada.

Em Dunkerque, na França, há um estoque histórico de escória LD de 4,5 milhões de toneladas, mas há ainda outros estoques em diferentes áreas do país. Eles são usados em obras privadas, mas não são usados em obras públicas (REID, 1999). Na Turquia, a siderúrgica Kardemir possui um estoque de 2,5 milhões de toneladas de escória de aciaria em sua área de resíduos (ALTUN; YILMAZ, 2002).

No Estado do Espírito Santo, as empresas de siderurgia fazem esforço em direção à pesquisa e desenvolvimento de mercado para seus co-produtos e têm procurado o ambiente acadêmico para dar suporte a essa necessidade. A preocupação por parte das siderúrgicas e o desenvolvimento de pesquisas em parceria com entidades acadêmicas é crescente, consequência do custo e da necessidade de controle da disposição de seus

resíduos, da cobrança da sociedade em relação ao impacto ambiental e, atualmente, das políticas de sustentabilidade que são impostas no mercado financeiro.

No Brasil, podem ser citados como alguns dos principais centros de referência em estudos e pesquisas da escória de aciaria, o NORIE (Núcleo Orientado a Reciclagem e Inovação da Edificação), da UFRGS, e o NEXES (Núcleo de Excelência em Escórias Siderúrgicas), da UFES. Outras entidades no Brasil que possuem alguns trabalhos com escória de aciaria são a Reciclar, na UFBA, a COPPE (Instituto Luis Alberto Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa em Engenharia Civil) da UFRJ, o PCC (Departamento de Engenharia de Construção Civil) da USP, e o IPR – Instituto de Pesquisas Rodoviárias do DNIT, entre outros. O Quadro 1.1 mostra as linhas de pesquisa desses centros de referência.

Quadro 1.1 Linhas dos grupos de pesquisa em escória de aciaria no Brasil

Grupos	Linhas de pesquisa
Norie UFRGS	Geral: Desenvolvimento, utilização e análise do comportamento de novos materiais, com ênfase em aspectos ambientais de uso de resíduos.
	Escória de aciaria: Estabilização, utilização em substituição ao cimento, utilização como adição ao concreto, expansão e durabilidade de concretos com adição de escória de aciaria.
NEXES UFES	Geral: Desenvolvimento da utilização para escórias e outros co-produtos siderúrgicos.
	Escória de aciaria: <ul style="list-style-type: none"> - Avaliação da expansibilidade da escória de aciaria LD curada a vapor para utilização em peças de concreto para pavimentação. - Metodologia de avaliação da expansibilidade da escória de aciaria; - Métodos e técnicas de estabilização da escória de aciaria para utilização em construção rodoviária; - Avaliação das tecnologias de tratamento; - Misturas de escória de aciaria com outros materiais para redução da expansão em campo; - Avaliação de desempenho de pavimentos com escória de aciaria; - Avaliação do impacto do meio ambiente e da saúde face ao uso de escórias de aciaria; - Avaliação ambiental, de custo, de resistência e durabilidade do pavimento construído com escória de aciaria; - Avaliação de três métodos de ensaio para determinação do potencial de expansão de escórias de aciaria para uso em pavimentação.
IPR	Escória de aciaria: Construção de pista de testes para verificação do comportamento ambiental e estrutural, com base construída em três segmentos: brita, 100% de escória de aciaria LD com redução de expansão e 80% de escória de aciaria LD com redução de expansão e 20% de argila.
PCC / USP	Geral: Reciclagem de resíduos

O Quadro 1.2 mostra algumas Universidades no exterior que são centros de referência em escória de aciaria.

Quadro 1.2 - Linhas de pesquisa sobre a escória de aciaria em Universidade no exterior

Universidades	Linhas de pesquisa
<i>Carnegie Mellon University</i> Pittsburgh, EUA	- Habilidade das escórias de absorver inclusões sólidas de óxidos.
<i>University of British Columbia</i> Canadá	- Propriedades cimentícias de escórias da produção de aço (escória de alto-forno e escória de aciaria).
<i>Sheffield Hallam University</i> Reino Unido	- Aspectos de durabilidade e desempenho de misturas asfálticas com incorporação de escórias EAF.
<i>University of Birmingham</i> Reino Unido	- Uso de escória de aciaria para estabilização de solos ácidos; - Caracterização da escória de aciaria e identificação de aplicações.
<i>University of Oulu</i> Finlândia	- Utilização de escória de aciaria em pavimentação; - Misturas de escória de aciaria LD com escória de alto-forno.
<i>Lulea University of Technology</i> Suécia	- Propriedades físicas e mineralógicas.
<i>Royal Institute of Technology</i> Suécia	- Avaliação da neutralização de pH ao longo do tempo com uso de escória de aciaria e cinzas de incineração de lixo urbano sólido.
<i>Nanjing University of Chemical Technology /</i> China	- Estudo do cimento Portland composto com escória de aciaria e cinza volante; - Estudo da durabilidade de cimento com escória de aciaria.
<i>Fooyin University</i> China	- Caracterização de tijolos com escória de aciaria.
<i>National Sun Yat-Sen University</i> Taiwan	- Monitoramento da disposição de escória de aciaria em costa litorânea.
<i>Nanyang Technological University</i> Singapura	- Reaproveitamento de resíduos como materiais de construção; - Re-utilização de co-produtos da produção de aço.
<i>King Fahd University of Petroleum and Minerals /</i> Arábia Saudita	- Comparação das propriedades da escória de aciaria com agregados calcários
<i>University of Technology</i> Iran	- Produção de cimento Portland com escórias de alto-forno e aciaria e pedra calcária.
<i>Dokuz Eylul University</i> Turquia	- Uso da escória de aciaria com alto teor de MgO como adição para cimento Portland.
<i>University of the Witwatersrand</i> África do Sul	- Desenvolvimento do uso da escória de aciaria como material estabilizado para utilização em construções rodoviárias

Algumas associações e laboratórios especializados também são centros de referência em escória de aciaria, fora do Brasil, como por exemplo: a NSA (*National Slag Association*) nos Estados Unidos, a FEhS, na Alemanha, a EuroSlag Association, na Europa, a *Nippon Slag*, no Japão, e a *ASA Australian Slag Association*, na Austrália e o

CTPL – *Centre Technique et de Promotion des Laitiers Siderurgiques*, na França. O Quadro 1.3 mostra as suas linhas de pesquisa.

Quadro 1.3 - Linhas de pesquisa das associações que são centros de referência em escória de aciaria no exterior

Centros de referência	Linhas de pesquisa
NSA EUA	Escória de Aciaria: - Desenvolvimento de processos econômicos e eficientes para manuseio e tratamento; - Questões ambientais, características físicas e utilização em misturas asfálticas a quente.
FEhS Alemanha	Escória de aciaria: - Utilização como agregado para concreto; - A estabilização volumétrica e o uso de misturas com escória de alto-forno para construções rodoviárias ou canais; - Aspectos ambientais; - Desenvolvimento de fertilizantes.
EuroSlag Association	Geral: Desenvolver a utilização apropriada da escoria de aciaria, fornecer informações, fortalecer a comunicação entre países para que os avanços tecnológicos sejam adotados em toda Europa e atuar junto aos órgãos de normalização.
Nippon Slag Japão	Escória de aciaria: - Desenvolvimento de tecnologias e da qualidade de produtos com escória de aciaria; - Coleta informações sobre geração, estoque e demanda de produtos com escória de aciaria.
ASA Austrália	Escória de aciaria: - Base de dados de trabalhos realizados ao longo de quinze anos de pesquisa, inclusive sobre escória de aciaria, que tratam das propriedades, características físicas, mineralógicas, aplicações e impacto ambiental. - Classificação das escórias de aciaria LD e EAF ambientalmente segundo a EPA (<i>Environment Protection Authority</i>) e identificação de toda a regulamentação australiana a respeito do uso de escória de aciaria a fim de determinar a sua relevância.
CTPL França	Geral: - Projetos de pesquisa em laboratório e em aplicações de campo, administração de banco de dados e busca de novas aplicações para as escórias, inclusive de aciaria. - Em conjunto com o <i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i> , realiza projetos de pesquisa e desenvolvimento. Escória de aciaria: Desenvolvimento de processo de estabilização dimensional das escórias de aciaria para utilização em construção rodoviária.

1.1 Justificativa

A utilização da escória de aciaria e a conseqüente redução de seu estoque nas siderúrgicas é, atualmente, fator importante para diminuição do impacto ambiental gerado pela indústria de fabricação de aço em todo o mundo. Dessa forma, as empresas

têm desenvolvido projetos para difundir o uso de escória de aciaria. A aplicação correta da escória de aciaria, na construção civil, sem ocorrência de manifestações patológicas, traz benefícios para a indústria siderúrgica, pois agrega valor ao seu co-produto, além de demonstrar compromisso com o meio ambiente e a sociedade, pois possibilita ganhos ambientais e econômicos.

O efeito das reações expansivas da escória de aciaria é um fator limitante na sua utilização como agregado. Elas ocorrem envolvendo certos compostos presentes na escória, gerando tensões internas que originam trincas e resultam até na pulverização do material. Dentre estes compostos volumetricamente instáveis, o CaO e o MgO são os mais importantes e maiores responsáveis por esta desintegração e o enfraquecimento por diferença de volume molar nas suas reações. Outro elemento que também contribui para expansão da escória é o ferro metálico (ALEXANDRE et al, s.d; GEISELER; SCHLOSSER, 1988; MOTZ; GEISELER, 1998; GUMIERI et al, 2000; MACHADO, 2000; SAHAY et al, 2000; ÂNGULO et al, 2001).

A heterogeneidade da escória de aciaria, devido ao processo de geração, aumenta a necessidade de rigoroso controle tecnológico e justifica a realização de estudos de suas características para cada lote de escória antes da aplicação (EMERY, 1984; MURPHY et al, 1997; SBRIGHI; BATTAGIN, 2002; GONTIJO; 2006).

Para melhorar e, conseqüentemente, aumentar a utilização das escórias de aciaria brasileiras é preciso obter informação sobre suas características físicas e microestruturais, bem como melhor conhecimento sobre o mecanismo de expansão e os ensaios de controle.

No Brasil, o método utilizado para determinação do potencial de expansão é uma adaptação feita pelo Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais do método americano PTM-130/78. Neste ensaio, o corpo-de-prova é compactado de acordo com procedimento de compactação para obtenção do Índice de Suporte Califórnia (CBR) e permanece 14 dias, imerso ou saturado, em estufa. No Japão e nos EUA também são utilizados métodos de imersão com base no CBR (JIS 5015/92 e PTM 130/78 respectivamente) para avaliar o potencial de expansão das escórias de aciaria.

Diferente dos métodos de imersão, o *Steam Test*, normalizado pelo Comitê Europeu de Normalização (BS EN 1744-1/98), utiliza vapor d'água para acelerar o mecanismo de expansão da escória de aciaria, com tempo máximo de ensaio de 168 horas. Desde de

1980, o *Steam Test* tem sido utilizado na Alemanha para controle de qualidade das escórias de aciaria e atualmente é um teste de rotina que nos últimos anos tem ajudado a evitar danos causados por agregados de escória de aciaria instáveis (MOTZ; GEISELER, 2001).

Com o uso de técnicas de análise da microestrutura de materiais é possível estudar a mineralogia das escórias de aciaria, assim como a sua composição química. Dessa forma, esta pesquisa tem como objetivo relacionar a caracterização da microestrutura, obtida pelas análises químicas, para determinação de teores de óxidos e resultados de DRX, MEV e EDS, com o mecanismo de expansão e com os resultados de determinação do potencial de expansão em amostras de escória de aciaria.

É importante ressaltar que, pela ausência de experiência com o uso do *Steam Test* no Brasil, neste projeto de pesquisa a sua metodologia é estudada profundamente e algumas adaptações para realização dos ensaios são necessariamente realizadas. A caracterização da microestrutura é realizada de forma criteriosa, mas em função de algumas técnicas serem qualitativas e também das características do material, pode impedir conclusões aprofundadas pela ausência de quantificação.

Esse estudo faz parte de dois projetos que contam com a participação de pesquisadores de diversas áreas e reunidos no NEXES (Núcleo de Excelência em Escórias Siderúrgicas). Um dos projetos é denominado AGSPAVI (Avaliação da expansibilidade e das tecnologias de tratamento visando o desenvolvimento de mercado das escórias de aciaria para fins de pavimentação), resultado de um convênio firmado entre o IBS (Instituto Brasileiro da Siderurgia), a FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos) e a UFES (Universidade Federal do Espírito Santo). Já o outro, projeto PAVIAMB (Avaliação do custo, avaliação ambiental e avaliação da resistência e durabilidade do pavimento construído com escória de aciaria envelhecida), é resultado de convênio firmado entre CST (Companhia Siderúrgica de Tubarão), FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos) e UFES (Universidade Federal do Espírito Santo).

1.2 Objetivos

Esse trabalho tem como objetivo geral avaliar o potencial de expansão de amostras de escória de aciaria para utilização em pavimentação, segundo a metodologia do teste a vapor da norma europeia (BS EN 1744-1/98). Além disso, pretende-se obter

informações sobre composição química (análise química) e mineralógica (difração de raios-X); observar a morfologia dos compostos minerais (microscopia eletrônica de varredura) e sua composição (EDS); e interpretar os resultados de análises químicas, difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura, de forma conjunta.

As amostras de escórias de aciaria estudadas são LD (5 amostras) e EAF (3 amostras), provenientes de siderúrgicas localizadas na região sudeste, que possuem a maior produção de aço e, conseqüentemente, maior geração de escória, no Brasil.

Os objetivos específicos desse trabalho são: realizar revisão bibliográfica sobre os processos de geração de escória de aciaria, suas características e aplicações; levantar as técnicas para avaliação do potencial de expansão e os ensaios para caracterização de microestrutura de materiais; e realizar ensaios de caracterização física das escórias de aciaria utilizadas no estudo.

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está dividida em sete capítulos. No **Capítulo 1**, faz-se uma introdução sobre o volume gerado e a utilização das escórias de aciaria no Brasil e no mundo, os principais centros de pesquisa, a justificativa e os objetivos geral e específicos.

O **Capítulo 2** descreve os processos de geração e beneficiamento da escória de aciaria, o mecanismo de expansão e aplicações.

No **Capítulo 3**, são apresentadas as principais técnicas de caracterização da microestrutura, assim como alguns resultados dessas análises, além dos métodos de determinação do potencial de expansão.

No **Capítulo 4** estão os dados sobre amostragem, recebimento e quarteamento das amostras, assim como a preparação destas para alguns ensaios. Há, também, uma descrição dos métodos de caracterização física (composição granulométrica, absorção, massa específica, massa unitária, abrasão Los Angeles e esmagamento), das análises de microestrutura (DRX, AQ e MEV) e de determinação do potencial de expansão das escórias de aciaria.

No **Capítulo 5**, os resultados da caracterização física e microestrutural, assim como os da determinação do potencial de expansão, são apresentados e discutidos.

No **Capítulo 6** são apresentadas as principais conclusões sobre a avaliação do potencial de expansão das escórias de aciaria LD e EAF segundo a metodologia do teste a vapor da norma europeia pelo método EN 1744-1/98 e sobre o estudo da microestrutura dessas escórias. Além disso, propostas para continuidade das pesquisas para desenvolvimento da utilização e melhor controle tecnológico das escórias de aciaria são também apresentadas.

No **Capítulo 7**, estão as referências bibliográficas consultadas na pesquisa.

2 ESCÓRIA DE ACIARIA

2.1 Introdução

A siderurgia é uma indústria que, além de movimentar grandes volumes de matéria-prima e energia, gera resíduos diversos. Um dos co-produtos de maior volume gerado nas usinas siderúrgicas são as escórias de aciaria, obtidas mediante transformação do ferro gusa líquido e da sucata em aço.

A escória de aciaria possui características físicas e mecânicas iguais ou superiores aos agregados naturais e já vem sendo utilizada para algumas aplicações na construção civil. No entanto, sua natureza expansiva tem causado vários problemas de durabilidade e desempenho. Além disso, a utilização que vem sendo dada à escória de aciaria não tem sido suficiente para que a maior parte do volume gerado seja efetivamente consumido, apesar de haver um aumento da aplicação da escória de aciaria em todo o mundo.

A utilização das escórias de aciaria em pavimentação é uma tendência devido à grande necessidade de redução dos estoques, pois os aterros ambientais têm custo para as usinas e para o meio ambiente. Por outro lado, a aplicação das escórias depende de desenvolvimento tecnológico e do controle das características do material. Para isso, é necessário conhecimento sobre o seu processo de geração, que implicará na sua composição química e sobre as várias etapas de processamento e beneficiamento após a sua geração.

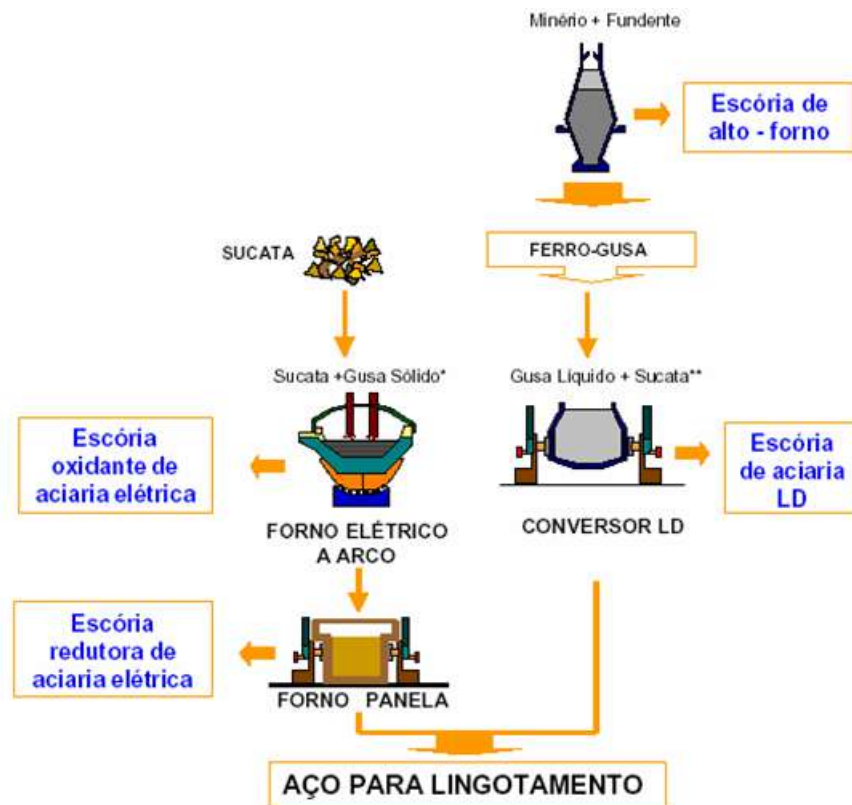
Esse capítulo tem como objetivo descrever os tipos de escória de aciaria, os processos de beneficiamento, o mecanismo de expansão e as aplicações.

2.2 Os processos de fabricação do aço e a formação da escória de aciaria

Os insumos básicos do processo siderúrgico são o minério de ferro, o carvão mineral e o calcáreo. O minério de ferro é aglomerado por processos de sinterização, pelotização e briquetagem. O carvão mineral é transformado em coque a partir da sua destilação a temperaturas de aproximadamente 1000°C. Em usinas integradas, o minério de ferro é reduzido a ferro metálico em altos-fornos. O alto-forno recebe sinter de minério de ferro, coque e ar aquecido, produzindo o gusa e a escória (sistema oxidado líquido que

contém as impurezas do minério de ferro) e o gás de alto-forno (GENTILE; MOURÃO, 2006; TAKANO, 2006).

A aciaria é o setor da usina onde o gusa é refinado e obtém-se o aço. A escória de aciaria é gerada durante o refino que pode ser feito, atualmente, em fornos a oxigênio ou elétricos (Figura 2.1). Os fornos a oxigênio são chamados de conversores, ou fornos LD (*Linz-Donawitz*) ou BOF (*Blast Oxygen Furnace*) e fazem parte de usinas integradas com altos-fornos. Os fornos elétricos são chamados EAF (*Electric Arc Furnace*) e são constituintes de usinas semi-integradas, que não possuem altos-fornos.



* matéria-prima preponderante no processo: sucata de aço

** matéria-prima preponderante no processo: gusa líquido

Figura 2.1 - Esquema de produção do aço nas usinas LD e EAF (MASUERO et al., 2004)

2.2.1 Escória de aciaria LD

Em um conversor a oxigênio os principais insumos são: o gusa líquido, que constitui a parte predominante de carga metálica; a sucata de aço, que constitui a maior parte de carga sólida; e a cal, necessária para a escorificação da sílica formada pela oxidação do

silício da carga metálica para a remoção do fósforo e do enxofre e para proteger o refratário do ataque pelo SiO_2 (MALYNOWSKYJ, 2006).

É também utilizada a fluorita, constituída basicamente por fluoreto de cálcio (CaF_2) como fundente da cal, pois acelera a sua dissolução e aumenta a fluidez de escórias muito viscosas. Outros fundentes, tais como aluminatos (bauxita) e boratos, podem ser utilizados em substituição. Além dos insumos em estado sólido e líquido, é utilizado ainda oxigênio de alta pureza, ou seja, com baixos teores de nitrogênio (MALYNOWSKYJ, 2006).

O ciclo de operações de refino no conversor LD envolve seis etapas: carregamento de carga sólida, carregamento de gusa líquido, sopro supersônico, medição de temperatura e retirada de amostras, vazamento de aço e vazamento de escória (MALYNOWSKYJ, 2006). A sucata e o gusa líquido são adicionados ao conversor. Em seguida, é introduzida uma lança injetando oxigênio gasoso a alta velocidade (ARAÚJO, 1997). A Figura 2.2 mostra o esquema de uma planta siderúrgica de uma usina integrada.

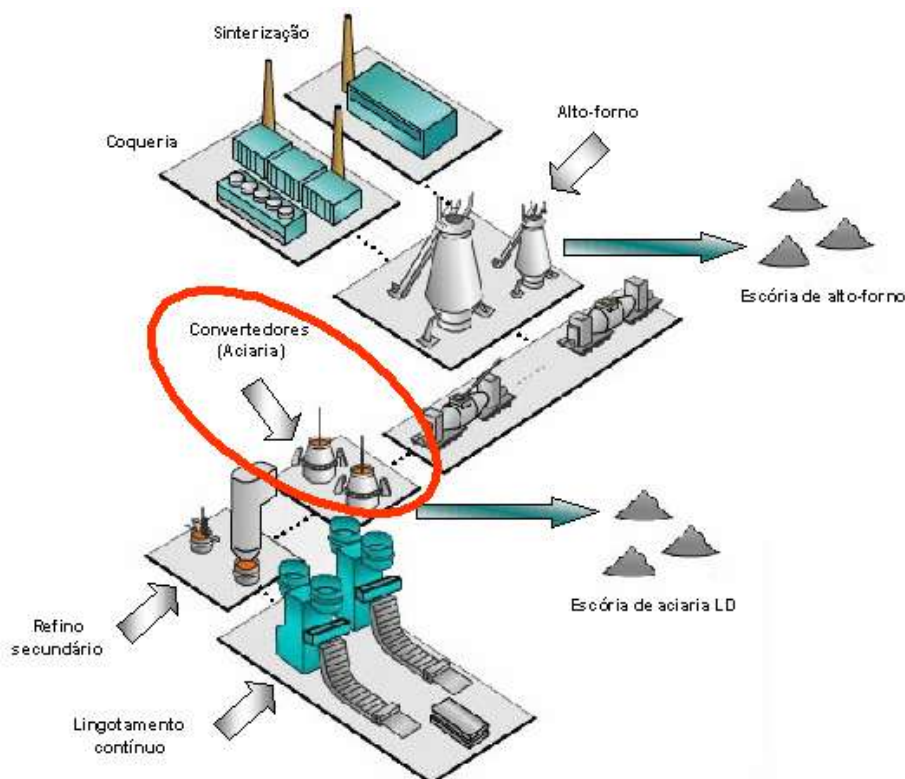


Figura 2.2 - Processo LD de fabricação de aço (CST, 2005)

No forno LD, ocorre o refino primário do gusa que consiste na eliminação de carbono, silício, fósforo, enxofre e até mesmo manganês. O processo de refino baseia-se em

reações de oxidação dessas impurezas encontradas no gusa, que ocorrem em seqüência, de acordo com a afinidade pelo oxigênio. Ingredientes imiscíveis ao metal líquido são adicionados para que neles se fixem as impurezas, removendo-as do metal. A formação de uma escória básica neutraliza os óxidos ácidos formados, protegendo o revestimento refratário do forno (MALYNOWSKYJ, 2006).

A formação da escória envolve principalmente as reações de oxidação do Si, Mn e Fe e a dissolução da cal. Outros componentes são Al_2O_3 , Cr_2O_3 , O_3 , TiO_2 , entre outros, provenientes das adições ou da oxidação de elementos secundários da carga metálica, MgO proveniente do desgaste dos refratários ou de adições, CaF_2 proveniente da fluorita adicionada e P_2O_5 e S provenientes das reações de desfosforação e de dessulfuração. (MALYNOWSKYJ, 2006).

Ao final do processo, a escória está separada do aço por diferença de densidade. Ocorre, então, o vazamento da escória em potes e a escória de aciaria é conduzida a um pátio e lançada nas baias de resfriamento. A partir desta etapa, em siderúrgicas que possuem planta de beneficiamento, a escória de aciaria segue para o processo de fragmentação, britagem, moagem e separações magnética e granulométrica.

Dessa forma, a composição química da escória de aciaria LD varia em função da matéria-prima utilizada, do revestimento do conversor e do tipo de aço produzido. Além desses aspectos, sua composição será influenciada também pela forma de resfriamento e pelas condições de armazenagem.

2.2.2 Escória de Aciaria EAF

O processo de produção de aço em forno elétrico (EAF) consiste na fusão de sucata de aço gerada por um arco elétrico (MACHADO, 2000). O arco-elétrico é aberto entre os eletrodos de grafite e a carga metálica (LEANDRO, 2006).

Após a fusão da sucata, injeta-se oxigênio por meio de uma lança a fim de promover as reações de carbono, silício e fósforo. A adição de CaO e MgO promove as reações de refino que conduzem à formação de escória de aciaria constituída de silicatos e óxidos. Outros óxidos também podem ser encontrados, tais como TiO_2 e Cr_2O_3 , devido ao alto teor dos elementos de liga presentes na sucata de aço (MACHADO, 2000).

A escória de aciaria elétrica pode ser classificada em duas categorias, a oxidante e a redutora, conforme as características do forno durante o refino. A escória oxidante é

produzida pela oxidação do CaO , do SiO_2 e do P_2O_5 , pela injeção do oxigênio no aço fundido. A redutora é gerada após o vazamento da oxidada, pela adição de CaO e CaF_2 para promover a desulfuração do aço líquido e a adição de elementos de liga. (MACHADO, 2000). A Figura 2.3 mostra os componentes do forno a arco-elétrico e a injeção de carbono e oxigênio.

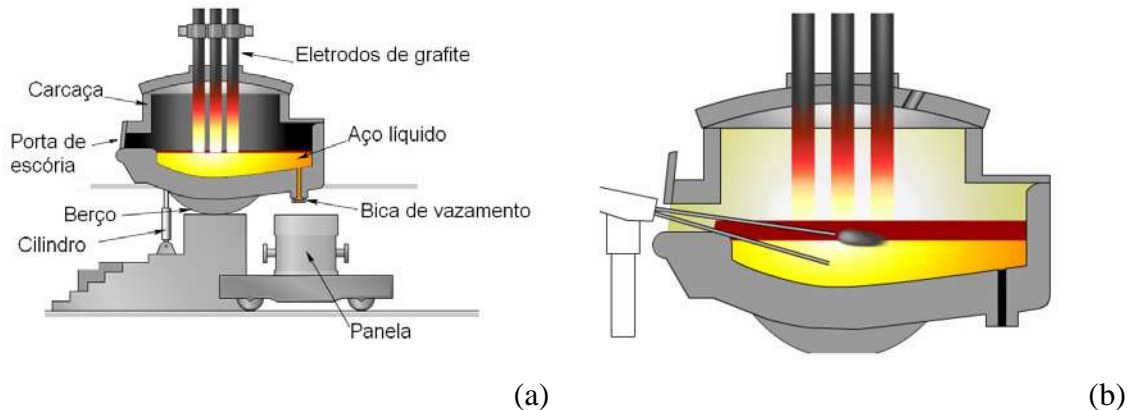


Figura 2.3 - (a) Componentes do forno a arco elétrico; (b) Injeção de oxigênio (METSOL et al., 2007)

2.2.3 Transporte, resfriamento e beneficiamento da escória de aciaria

O transporte da escória líquida ou parcialmente solidificada para os pátios de resfriamento é feito, principalmente, por vagões ou por potes *carrier* (Figura 2.4).

A escória é conduzida a um pátio e lançada nas baias de resfriamento. O resfriamento das escórias é feito por aspersão de água (Figura 2.5 a), por jatos de água (Figura 2.5 b) ou ao ar.

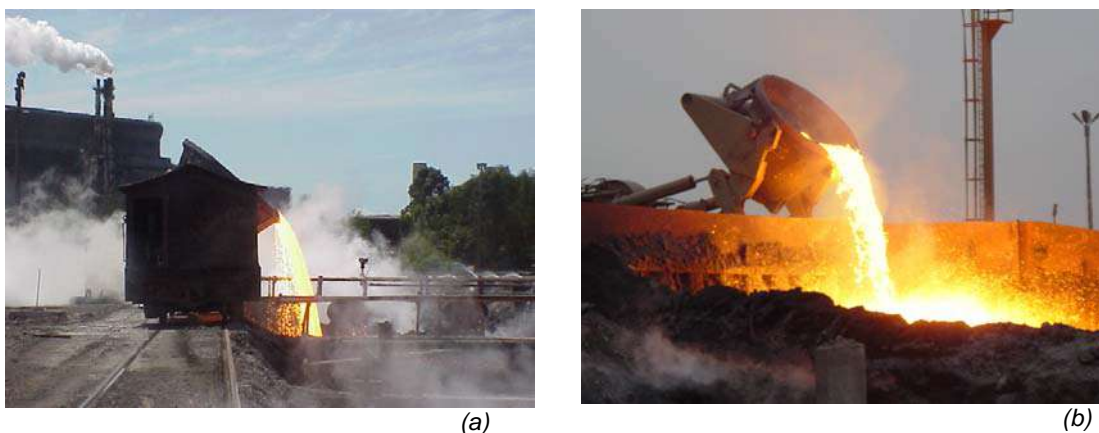


Figura 2.4 - Transporte da escória para as baias de resfriamento: (a) em vagão (PENA, 2004); (b) em pote *carrier* (SOUZA; POLESE, 2003).

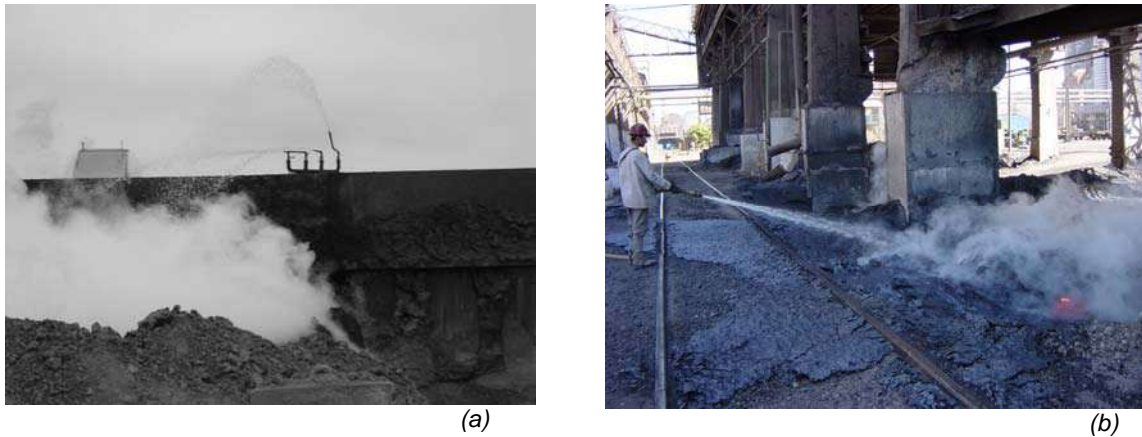


Figura 2.5 - Processos de resfriamento da escória: (a) por aspersão de água ; (b) por jato de água (SOUZA; POLESE, 2003).

A Figura 2.6 mostra o aspecto da escória de aciaria durante o resfriamento.

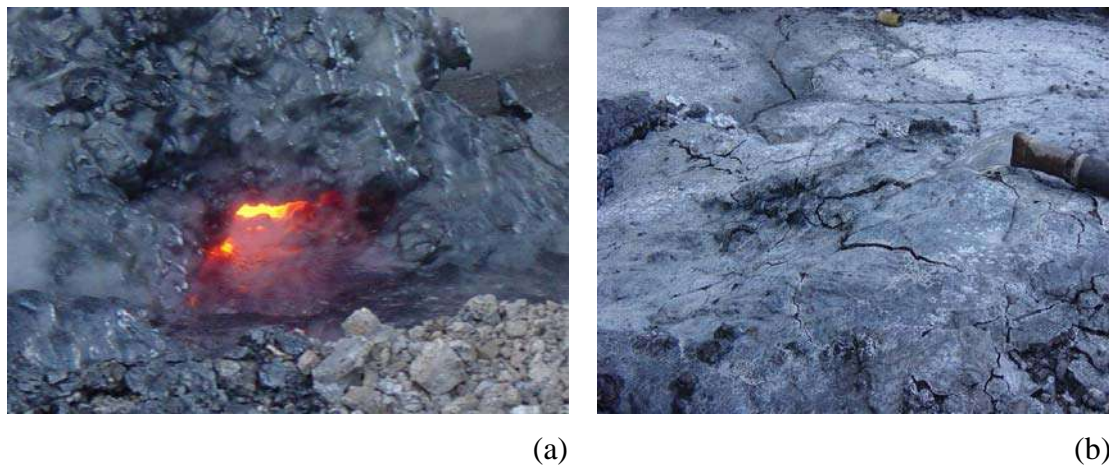


Figura 2.6 - Aspecto da escória de aciaria durante o resfriamento com jato de água

A próxima etapa é a de fragmentação da escória que, na maioria das siderúrgicas brasileiras, ocorre por boleio no guindaste. Nessa ocasião, é feita a separação de grandes placas metálicas por eletro-ímã (Figura 2.7 a). Parte desta fração metálica retorna ao processo de fabricação do aço como sucata. Em seguida, a escória de aciaria segue para uma planta de beneficiamento (Figura 2.7 b) onde é processada por meio de britagem, separações magnética e granulométrica. Nessa etapa outra parcela de material metálico é recuperada, podendo também ser reutilizada no processo como sucata e, em algumas siderúrgicas, pode ser vendida para fins específicos. Algumas plantas possuem apenas separações magnética e granulométrica, outras não possuem nenhum processo de beneficiamento.



Figura 2.7 - (a) Separação de grandes placas metálicas da escória de aciaria por eletro-ímã. (b) Planta de britagem e separações magnética e granulométrica da escória de aciaria (SOUZA, POLESE, 2003).

2.3 Características físicas

Vários estudos promovem a investigação das características e a comparação do material com agregados naturais por meio de ensaios específicos para agregados. De uma forma geral, as escórias de aciaria possuem características físicas equivalentes ou superiores aos agregados naturais (GEISELER, 1996).

Featherstone e Holliday (1998) consideram a escória de aciaria como um material altamente resistente à britagem e ao polimento sob a ação de qualquer tipo de tráfego. Consideram que, devido à angulosidade das partículas, pode ser aplicada também em situações específicas, tais como proteções contra inundações.

Featherstone e Holliday (1998) citam alguns parâmetros e especificações para caracterização física e mecânica de agregados para pavimentação. As normas britânicas bem como os parâmetros citados por estes autores são citadas no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Parâmetros da norma britânica para agregados para pavimentação (FEATHERSTONE; HOLLIDAY, 1998)

Norma	Parâmetro e especificação
BS 812 part 3 – Testes para agregados - Métodos para determinação das propriedades mecânicas	Fração de agregado britado (<i>Aggregate crushing value</i>)
	Fração de impacto do agregado (<i>Aggregate impact value</i>)
	Fração de finos (<i>10% fines value</i>)
	Valor de abrasão do agregado (<i>Aggregate abrasion value</i>)
BS 812 part 2 – Testes para agregados - Métodos para determinação da densidade	Valor de polimento de rocha (<i>Polished Stone Value</i>)
	Massa específica dos grãos (<i>Bulk density</i>)
	Massa específica aparente (<i>Relative density - apparent</i>)
BS 812 part 1 – Testes para agregados - Métodos para determinação de forma e granulometria	Absorção de água (<i>Water absorption</i>)
	Índice de forma (<i>Flakiness index</i>)
BS 63 parts 1 and 2 1993 – Agregados para pavimentação - Especificação para agregados de tamanho único para aplicações gerais e para revestimentos superficiais	Agregados para pavimentação - Especificações
DD 184 (BS draft) – Método para determinação da taxa de desgaste de superfícies de rolamento betuminosas pela ação da roda	Taxa de desgaste pela ação da roda (<i>Wheel tracking rate</i>)

As normas americanas e os parâmetros citados por Featherstone e Holliday (1998) constituem o Quadro 2.2.

Quadro 2.2 - Parâmetros da norma americana para agregados para pavimentação (FEATHERSTONE; HOLLIDAY, 1998; ASTM, 2003; ASTM, 2005)

Norma Americana	Parâmetro ou especificação
ASTM C 131-81 / ASTM C 131-03 Método de ensaio padronizado para determinação da resistência à deterioração de agregados de granulação fina por abrasão Los Angeles	Abrasão Los Angeles
ASTM D 3625-91 - Procedimento padronizado para determinação do efeito da água em agregados de revestimentos betuminosos – processo a quente	Aderência (<i>Binder adhesion</i>)
ASTM D 1883 / 05 – Método padronizado para determinação do Índice de Suporte Califórnia de solos compactados em laboratório	Índice de suporte Califórnia (<i>California bearing ratio - CBR</i>)
ASTM 2940 – Especificação padronizada para agregado graduado para bases ou sub-bases de rodovias ou aeroportos	Agregado para sub-base

No Brasil, as características das escórias de aciaria para utilização em bases, sub-bases, ou até mesmo em misturas betuminosas, são especificadas pelas normas DNER-PRO 263/94 – Emprego de escórias de aciaria em pavimentos rodoviários - Procedimento; e DNER-EM 262/94 – Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários - Especificação de Material (Quadro 2.3).

Quadro 2.3 - Características físicas e limites de aceitação de escória de aciaria (DNER-EM 262, 1994)

Parâmetros	Norma do ensaio	Limites
Absorção de água (%)	NBR 9937/87 Agregados – determinação da absorção	1 – 2
Massa específica (g/cm ³)		3 – 3,5
Massa unitária (kg/dm ³)	NBR 7251/82	1,5 – 1,7
Abrasão Los Angeles (%)	NM 51/2000	≤ 25

Geiseler (1996), ao comparar as escórias EAF e BOS (*basic oxygen steelmaking slag*) ou LD com granito e basalto, por meio de ensaios de massa específica, resistência ao impacto, absorção e abrasão Los Angeles, concluiu que a escória ao ser processada pode gerar um agregado de alta resistência (Quadro 2.4) e atender às especificações de construções rodoviárias.

Quadro 2.4 - Comparação entre escória de aciaria, basalto e granito (GEISELER, 1996)

Características	Tipo de Agregado			
	Escória LD	Escória EAF	Basalto	Granito
Massa específica dos grãos (g/cm ³)	3,1 – 3,7	3,2-3,8	2,8 – 3,1	2,6 –2,8
Resistência ao impacto em agregados britados (8-12 mm) porcentagem em massa (%)	10 – 26	10-26	9 - 20	12 - 27
Absorção de água porcentagem em massa (%)	0,2 – 1,0	0,2 – 1,0	<0,5	0,3 – 1,2
Abrasão Los Angeles (8/12 mm) porcentagem em massa (%)	9 – 18	8-15	-	15 - 20
Valor de polimento de rocha (PSV) ¹	54 – 57	58-63	45 -55	45 - 55
Resistência a britagem (N/mm ²)	>100	>100	>250	>120

A principal questão que existe quanto à utilização da escória de aciaria LD como um agregado de base e sub-base de pavimentação e aterro é a possibilidade de expansão. O efeito somatório das contribuições das reações expansivas existentes resulta na expansão da escória de aciaria, impossibilitando, em princípio, a sua utilização (SBRIGHI; BATTAGIN, 2002).

2.4 Mecanismos de expansão da escória de aciaria

As reações expansivas envolvem certos compostos presentes na escória de aciaria, gerando tensões internas que originam trincas e resultam até na pulverização do material. Dentre estes compostos volumetricamente instáveis, o CaO e o MgO são os mais importantes e maiores responsáveis pela desintegração e pelo enfraquecimento por diferença de volume molar nas suas reações (ALEXANDRE et al., s.d; GEISELER; SCHLOSSER, 1988; MOTZ; GEISELER, 1998; GUMIERI et al., 2000; MACHADO, 2000; SAHAY et al., 2000; ÂNGULO et al., 2001).

A origem dos óxidos de cálcio e magnésio na escória de aciaria está no final do processo do refino do aço, quando parte da cal e do magnésio presente na escória se

¹ “Valor da Pedra Polida” é a medida da resistência do agregado à ação de polimento de pneus sob condições similares àquela que ocorre na superfície de um pavimento. O número PSV determina a resistência à derrapagem de um agregado a ser utilizado em camadas superficiais. A norma Britânica – BS 812 é recomendada pela RILEM e pela ASTM para determinação do PSV.

precipita, ao ultrapassar os limites de solubilidade da escória fundida. Por esta razão, há um alto teor de CaO e MgO expansivos presentes na escória (MAAS, 1984; TOSTICARELLI et al., 1985; MACHADO, 2000; FILEV, 2002; SBRIGHI; BATTAGIN, 2002).

Machado (2000) concluiu que a escória de aciaria é levada à expansão pelo aumento de volume significativo em relação às dimensões originais dos cristais, nas transformações por hidratação, carbonatação e oxidação, conforme mostra o Quadro 2.5.

Quadro 2.5 - Características das espécies químicas isoladas aptado de Weast (1971)

Fórmula	Nome	Densidade (g/cm ³)	Massa molar (g/mol)	Volume Molar (cm ³ /mol)	Varição de volume (%)*
MgO	Periclásio	3,58	40,31	11,26	-
Mg(OH) ₂	Brucita	2,36	58,33	24,72	119,5 (**)
CaO	Cal	3,38	56,08	16,59	-
Ca(OH) ₂	Portlandita	2,24	74,09	33,08	99,4 (***)
CaCO ₃	Calcita	2,93	100,09	34,16	105,9 (***)
	Aragonita	2,71	100,09	36,93	122,6 (***)
CaCO ₃ . Mg CO ₃	Dolomita	2,87	184,41	64,25	287,3 (***)
Fe ⁰	Ferro (metálico)	7,86	55,85	7,11	-
FeO	Wustita	5,7	71,85	12,61	77,4 (****)
Fe ₂ O ₃	Hematita	5,24	159,69	30,48	328,7 (****)
Fe(OH) ₂	Hidróxido de ferro	3,4	89,86	24,43	271,7 (****)
FeO(OH)	Goetita	4,28	88,85	20,76	192 (****)

* Valores calculados a partir do volume e da densidade absoluta das espécies químicas isoladas.

** Em relação ao MgO.

*** Em relação ao CaO.

**** Em relação ao Fe⁰.

2.4.1 Expansão devido ao CaO

A cal virgem é empregada para retirar e neutralizar os elementos fósforo, enxofre e silício, no processo de refino de ferro-gusa para a produção do aço. A escória de aciaria retém parte da cal virgem em sua composição.

O CaO na escória de aciaria se apresenta nas formas livre ou combinada, como silicatos ou em solução sólida. A primeira reação a ser observada na escória de aciaria é a reação

de hidratação da cal livre (Eq. 2.1), formando o hidróxido de cálcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, aumentando o volume molar em 99% e a superfície do cristal em 54% (WEAST, 1971; SCANDIUZZI; ANDRIOLO, 1986; SBRIGHI; BATTAGIN, 2002).



A cal livre é o composto encontrado na escória de aciaria que desenvolve a maior expansão, em função da quantidade presente (GEISELER; SCHLOSSER, 1988; MACHADO, 2000; SAHAY et al., 2000). A expansão devido ao óxido de cálcio é influenciada por fatores como o teor e o tipo de cal livre presente, a umidade, a temperatura e o tamanho dos grãos (GEYER, 2001).

A cal livre pode ser residual ou precipitada. A cal livre residual se divide em esponjosa ($6\mu\text{m}$ a $50\mu\text{m}$) e granular ($3\mu\text{m}$ a $10\mu\text{m}$). A cal livre precipitada se divide na cal agregada ao C_2F ($< 4\mu\text{m}$), e na cal livre precipitada nos cristais de C_3S ($< 4\mu\text{m}$). Além disso, existe a cal livre proveniente de fragmentos não dissolvidos, que se hidratam facilmente (GEISELER; SCHLOSSER, 1988; MACHADO, 2000; SAHAY et al., 2000).

Todos estes tipos de cal livre podem hidratar-se, contudo, a hidratação mais significativa é a da cal livre esponjosa, que é constituída por grãos de tamanho até $50\mu\text{m}$ (ALEXANDRE et al., s.d ; GEISELER; SCHLOSSER, 1988).

Com a redução da granulometria e, conseqüentemente, aumento da superfície exposta, ocorre maior hidratação no CaO . Além disto, as frações menores que $8\mu\text{m}$ apresentam maiores teores de cálcio e menores teores de ferro, quando comparadas às frações mais grossas (AZEVEDO, 2001; GEYER, 2001).

A formação de CaCO_3 , por carbonatação da cal, e de dolomita ($\text{CaCO}_3\text{MgCO}_3$) ocorrem em menor escala, mas geram um aumento de volume de 105,9% a 122,6% e 287,3%, respectivamente (WEAST,1971).

2.4.2 Expansão devido ao MgO

A origem do MgO na escória de aciaria LD está na utilização da dolomita no forno para minimizar o desgaste do revestimento refratário (DRISSEN et al., 1984; MACHADO, 2000; SBRIGHI; BATTAGIN, 2002). Ele existe em três fases diferentes: quimicamente

combinado: monticelita (CaOMgOSiO_2) e merwinita (3CaOMgOSiO_2); não-combinado ou livre ou reativo (periclásio); e também em solução sólida (fase RO^2 da escória de aciaria), podendo chegar a um teor total de 10% na escória de aciaria (SHOUSUN, 1980).

Geralmente, o óxido de magnésio presente na escória de aciaria é encontrado sob forma de soluções sólidas, compostas de FeO e MnO, e denominadas magnésio-wustita, enquanto que o MgO, sob a forma de periclásio, é mais rara. Porém, é na forma de periclásio que o MgO se apresenta propício à expansão (GEISELER; SCHLOSSER, 1988; MONTGOMERY; WANG, 1991).

O óxido de magnésio em sua forma livre origina-se, principalmente, da dissolução incompleta da dolomita durante o refino. Porém, o periclásio normalmente se forma quando existem teores maiores que 3% de MgO total na escória, o que ocorre na maior parte das aciarias.

Quando o MgO está na forma de monticelita ou merwinita, ele é vítreo e quimicamente estável, o que não acontece no caso do periclásio, um composto cristalino na forma livre ou reativa. A reação expansiva de hidratação do MgO na forma de periclásio (Eq. 2.2) forma a brucita ou hidróxido de magnésio [$\text{Mg}(\text{OH})_2$], um composto que tem variação de volume de 119,5% em relação ao MgO (WEAST, 1971; COUTINHO, 1973; SCANDIUZZI; ANDRIOLO, 1986; MACHADO, 2000; SBRIGHI; BATTAGIN, 2002).



O periclásio causa uma instabilidade, ao longo do tempo, mais tardia que a instabilidade ocasionada pelo hidróxido de cálcio livre, visto que o periclásio se hidrata lentamente, causando uma expansão que pode levar à ruptura do material. A hidratação com a água não é imediata, devido ao fato de o periclásio encontrar-se na forma cristalina. Assim, a água leva muito tempo para atuar sobre o cristal (semanas, meses ou anos, conforme o grau de cristalização) conforme COUTINHO (1973).

O MgO, em solução sólida, possui uma formação na qual o FeO e o MnO criam uma coroa protetora para o MgO, que permanece no núcleo da formação, conforme a Figura

² A fase RO da escória de aciaria é composta de óxidos de ferro, manganês e magnésio, onde o MgO se encontra em solução sólida (YUJI, 1986; SAHAY et al., 2000);

2.8, dificultando ou impedindo o contato com a água. Conseqüentemente, não há expansão por hidratação deste tipo de MgO. Pode ocorrer que, além do MgO, FeO e MnO, exista CaO nesta formação quando são altos os teores de CaO na escória (SHOUSUN, 1980; GEISELER; SCHLOSSER, 1988).

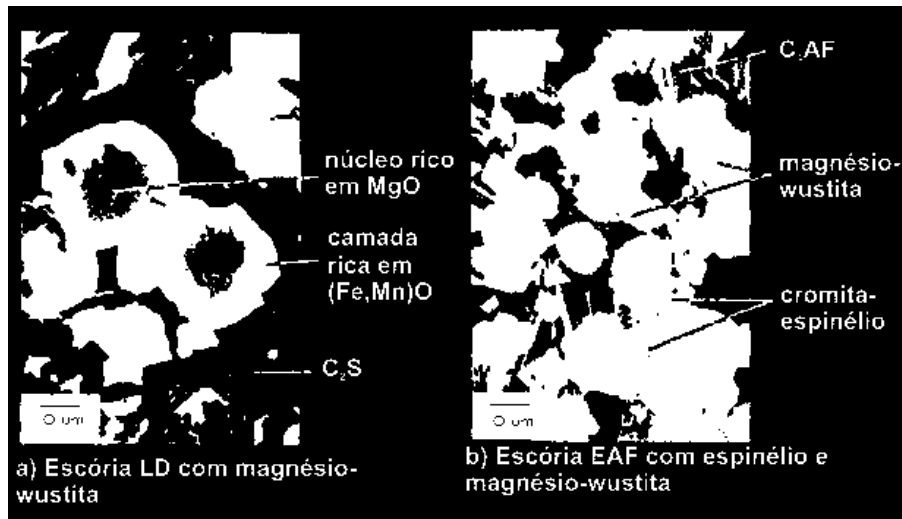


Figura 2.8 - O MgO em solução sólida (GEISELER; SCHLOSSER, 1988)

O grau de instabilidade volumétrica gerada depende do tamanho dos cristais, que, se forem pequenos, hidratam-se mais rapidamente e não chegam a causar pressões internas. O tamanho destes cristais depende da velocidade de resfriamento. No caso de resfriamento lento, que é mais comum, formam-se grandes cristais que se hidratam lentamente, causando grande expansão (AMARAL, 1999). A expansão em autoclave cresce proporcionalmente ao aumento de tamanho das partículas de MgO, ou seja, quanto maior a partícula original do óxido, maior será o volume do hidróxido formado, gerando maior expansão (GEYER, 2001).

2.4.3 A expansão devido ao ferro metálico

O ferro metálico é um componente da escória de aciaria que gera expansão, geralmente, com menor efeito global que a expansão causada pelo CaO e o MgO. Em média, o teor de ferro total na escória representa de 15% a 20% da sua composição.

Além das fases não metálicas, a escória de aciaria contém uma grande quantidade de partículas de aço ou ferro metálico que ficam incorporadas à escória no sopro de oxigênio. Estas partículas podem contribuir para a instabilidade volumétrica da escória, por meio da geração de produtos de corrosão e oxidação (MACHADO, 2000).

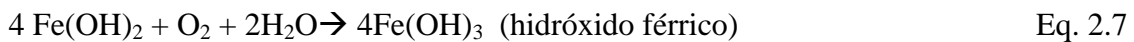
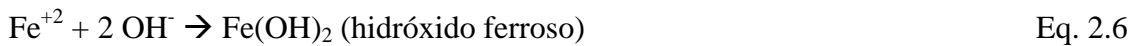
A expansão do Ferro Metálico (Fe^0) é causada por reações de oxidação e corrosão, formando os compostos: FeO (wustita), com aumento de volume molar de 77,4%; a hematita (Fe_2O_3) com aumento de volume de 328,7%; seguida do hidróxido ferroso [$\text{Fe}(\text{OH})_2$] e a goetita [$\text{FeO}(\text{OH})$], com variação de volume de 271,7% e 192,0%, respectivamente, em relação ao ferro metálico. Deve ser considerado que 70% dos compostos formados estão na forma de wustita (WEAST, 1971; MACHADO, 2000; SBRIGHI; BATTAGIN, 2002)

Nas reações de oxidação do ferro (Eq. 2.3, Eq. 2.4 e Eq. 2.5), este passa de sua forma metálica Fe^0 para suas formas iônicas Fe^{+2} e Fe^{+3} . Já nas reações de corrosão (Eq. 2.6 e Eq. 2.7) os íons reagem com o íon hidroxila da água e o oxigênio, formando os hidróxidos ferroso e férrico, que são mais comuns (MACHADO, 2000).

Reações de oxidação:



Reações de corrosão:



A relação $\text{MgO}/(\text{FeO}+\text{MnO})$ é importante para a expansão da escória de aciaria, uma vez que, se esta relação for menor que 1, há o aumento no espaçamento basal dos cristais e a formação de wustita, Mg-wustita ou Mg-Mn-wustita, compostos estáveis volumetricamente. Todavia, se a relação for maior que 1, a fase RO de periclásio ou periclásio ferroso torna-se volumetricamente instável (SHOUSUN, 1980; SBRIGHI; BATTAGIN, 2002).

2.5 Aplicações

A escória de aciaria é utilizada, principalmente, como agregado para pavimentação (base, sub-base), misturas asfálticas, lastro ferroviário, drenos e estruturas moduladas de estabilização de encostas. É também utilizada para fabricação de cimento e de corretivo de solo. Além disso, pode ser reciclada dentro da própria siderúrgica (ALEXANDRE et

al., s.d.; EMERY, 1984; FARRAND; EMERY, 1995; GEISELER, 1996; MOTZ; GEISELER, 2001; PENA, 2004).

A Figura 2.9 ilustra pavimentações, lastro ferroviário e contenção de encostas com a utilização de escória de aciaria.

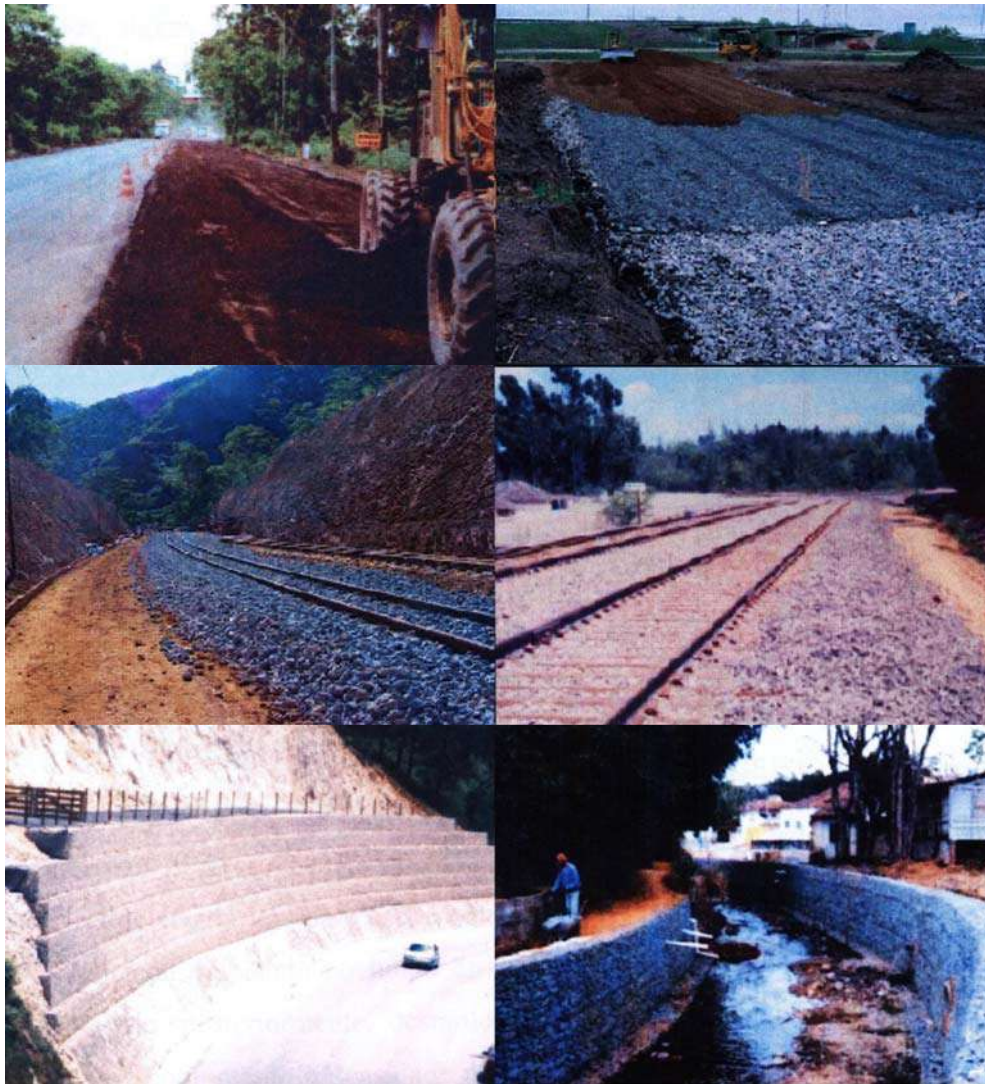


Figura 2.9 - Aplicações para escória de aciaria, pavimentação, lastro ferroviário e contenção de encostas (PENA, 2004).

Na Europa, segundo a EuroSlag (2006), a reutilização interna da escória na indústria siderúrgica corresponde a 14% do total de volume gerado. Os outros principais campos de aplicação são: a construção rodoviária (45%), a engenharia hidráulica (3%) e a produção de fertilizante (3%). São utilizadas, também, em menor escala, para fabricação de cimento (1%).

No Brasil, Little e Setepla (1999) citam as aplicações para as escórias de aciaria LD e EAF brasileiras, em um relatório elaborado para o IBS. Segundo os autores, pavimentação, preparação de terreno, lastro ferroviário e artefatos de concreto são as principais aplicações.

Para Geiseler (1996) em algumas aplicações, tais como estradas e estacionamentos não pavimentados ou barragens, não existe restrição para a expansibilidade volumétrica. Por outro lado, quando a escória de aciaria é usada em camadas de pavimentos confinadas ou não, a estabilidade volumétrica deve ser extremamente limitada. O autor cita, ainda, a utilização como revestimento de canais de navegação e observa que a hidratação dos compostos expansivos será devido à reação com água líquida e não com o vapor d'água, como em pavimentos.

A estabilidade volumétrica é ainda mais importante na utilização em fabricação de concreto, devido à rápida formação de uma ligação rígida. Qualquer expansão do agregado leva à formação de trincas, que podem comprometer a integridade de toda a estrutura. Dessa forma, a escória de aciaria é usada apenas em aplicações não estruturais tais como blocos para pavimentação e blocos quebra-mar. Algumas pesquisas foram realizadas para utilização em concreto para pavimentação e pisos de concreto, a partir de seleção cuidadosa do material (GEISELER, 1996).

O uso de escória de aciaria LD na fabricação de cimento foi pesquisada no passado, mas suas propriedades hidráulicas são consideradas pobres comparadas às das escórias granuladas de alto-forno. No entanto, pode ser usada na indústria de cimento como matéria-prima do clínquer, o que permite baixar a temperatura de fusão, reduzindo o consumo de energia (GEISELER, 1996). A alta variabilidade na composição química e o baixo controle de qualidade na sua geração são fatores que limitam esta aplicação (MURPHY et al., 1997; SAHAY et al., 2000).

Segundo Gomes (1999), as características químicas da escória de aciaria são favoráveis à obtenção de vidros e vidros cerâmicos mediante uma correção adequada na composição (principalmente quanto ao baixo teor de SiO_2). Ferreira (2000) conclui que boas propriedades mecânicas e aspecto visual agradável podem ser obtidos na produção de material vitro-cerâmico de escória de aciaria elétrica.

O Quadro 2.6 apresenta as principais aplicações da escória de aciaria com suas vantagens e limitações, obtidas de Alexandre et al. (s.d.), Ozeki (s.d.), Alexandre e

Raguin (1984), Anderson (1984), Emery (1984), Hirano (1984), Maas (1984), Ledezma et al. (1992), Afrani et al. (1995), Farrand e Emery (1995), Motz e Geiseler (1998), Little e Setepla (1999), Gumieri et al. (2000), Merkel (2000), Rex (2000), Robinson (2000), Sahay et al (2000), Thomaz (2000), Geyer (2001), Motz e Geiseler (2001), Correa et al (2002), Rohde (2002), Sbrighi e Battagin (2002), Beshr et al. (2003), Maslehuddin et al (2003) e Pena (2004).

Quadro 2.6 - Principais aplicações de escória de aciaria

Aplicação	Vantagens da escória	Limitações do uso da escória
Agregado para pavimentação	<ul style="list-style-type: none"> - Maior durabilidade e dureza; - Melhor resistência à derrapagem (utilização em camada asfáltica); - Camadas mais finas (5%); - Maior massa específica; - Maior resistência ao desgaste; - Maior capacidade de suporte; - Melhor forma dos grãos; - Melhor consistência e adesividade (misturas asfálticas); - Alta resistência à abrasão e ao polimento. 	<ul style="list-style-type: none"> - Potencial da expansão; - Possibilidade de fissuração e lixiviação superficial; formação da tufa³.
Lastro para ferrovias	<ul style="list-style-type: none"> - Maior resistência ao desgaste e à abrasão; - Massa específica relativamente alta; - Melhor ajustamento dos dormentes e comportamento do lastro quanto ao movimento lateral; - Estrutura vesicular proporciona melhor drenagem; - Não apresenta substâncias orgânicas; - Melhor intertravamento devido à rugosidade; 	<ul style="list-style-type: none"> - Potencial da expansão.
Estruturas para estabilização de encostas em estruturas moduladas	<ul style="list-style-type: none"> - Massa específica elevada; - Melhor drenagem; - Cimentação propicia um comportamento semelhante ao das estruturas rígidas 	<ul style="list-style-type: none"> - Não publicado
Corretivo de solos (substitui o calcário agrícola, matéria-prima para fertilizantes fosfatados)	<ul style="list-style-type: none"> - Alto teor de calcário; - Teor de P₂O₅ solúvel ($\cong 2\%$) favorece o crescimento do vegetal; - Lenta liberação de CaO. 	<ul style="list-style-type: none"> - Alto custo moagem; - Possibilidade de problemas com toxicidade.

³ A tufa é originada pela carbonatação da cal livre lixiviada resultando numa massa porosa e pouco resistente, que provoca o entupimento do sistema de drenagem.

2.5.1 Aplicação da escória de aciaria como base e sub-base

A utilização das escórias de aciaria em pavimentação é justificada, principalmente, pelas suas características físicas (GEISELER, 1996). Por exemplo, Featherstone e Holliday (1998) consideram a escória de aciaria como um material altamente resistente sob a ação de qualquer tipo de tráfego.

Uma seção transversal típica de um pavimento - com todas as camadas possíveis - consta de uma fundação, o subleito e de camadas de espessuras e materiais determinados por dimensionamento. O subleito é o terreno de fundação do pavimento. A regularização é a camada de espessura irregular, construída sobre o subleito, destinada a conformá-lo de acordo com o projeto. O reforço do subleito é uma camada de espessura constante, construída, se necessário, acima da regularização, com características tecnológicas superiores às de regularização e inferiores às da camada imediatamente superior, ou seja, a sub-base (SENÇO, 1997).

A sub-base é a camada que dá complemento à base, quando, por circunstâncias técnicas e econômicas, não for aconselhável construir a base diretamente sobre a regularização, ou o reforço do subleito. Segundo a regra geral, o material constituinte da sub-base deverá ter características tecnológicas superiores as do material de reforço. Por sua vez, o material da base deverá ser de melhor qualidade que o material da sub-base (SENÇO, 1997).

A base é a camada destinada a resistir aos esforços verticais oriundos do tráfego e a distribuí-los. Na verdade, o pavimento pode ser considerado composto de base e revestimento, sendo que a base poderá ou não ser complementada pela sub-base e pelo reforço do leito. O revestimento é também chamado de capa de rolamento, ou simplesmente capa. Recebe diretamente a ação do tráfego e deve ser tanto quanto possível impermeável (SENÇO, 1997). A Figura 2.10 mostra uma seção transversal típica de pavimento.

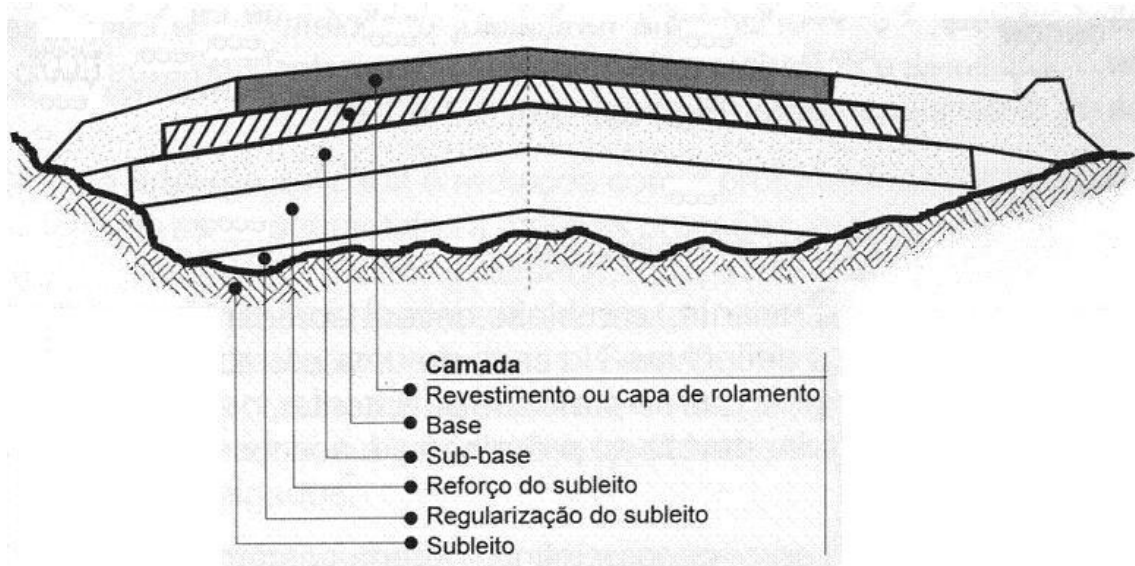


Figura 2.10 - Seção transversal típica de um pavimento (SENÇO, 1997)

As escórias de aciaria têm sido produzidas e usadas com sucesso em diferentes países como material para construção de estradas, devido às suas características e propriedades mecânicas vantajosas. Para confirmar essa experiência prática, há mais de 25 anos estradas de teste foram construídas, juntamente com os produtores de aço, pelo órgão que administra a construção de estradas na Alemanha. As escórias de aciaria foram usadas como bases e sub-bases de estradas. Para essas estradas de teste construídas, os seguintes resultados e observações foram encontrados (MOTZ; GEISELER, 1998; MOTZ; GEISELER, 2001):

- a superfície rugosa e angular dos materiais de escória de aciaria fornece uma maior e melhor capacidade de suporte após a compactação do que usando materiais convencionais;
- chuvas fortes não influenciam a capacidade de suporte de aplicações;
- a solidificação por carbonatação ou cimentação leva a um aumento da capacidade de suporte;
- as misturas de materiais são estáveis quando os requisitos para estabilidade volumétrica são totalmente atendidos.

2.6 Considerações sobre o capítulo

As características das escórias de aciaria estão relacionadas com o seu processo de geração. Fisicamente, a escória de aciaria atende aos requisitos para aplicação em pavimentação, no entanto, quimicamente, apresenta problemas que podem comprometer a qualidade dessa aplicação.

O uso mais expressivo das escórias de aciaria é como base e sub-base para pavimentação. As vantagens econômicas da utilização das escórias como agregados para estradas são resultantes das possibilidades de implantação de camadas mais finas de bases e sub-bases para a mesma resistência à carga/compressão e durabilidade, em relação à aplicação de materiais convencionais, como areia e brita.

As escórias geradas na Europa e sua utilização confirmam que estes co-produtos da indústria siderúrgica conseguiram um grande índice de utilização: aproximadamente 90% da escória produzida é utilizada (ALEXANDRE et al., s.d.).

No entanto, a utilização da escória de aciaria depende da redução da sua expansibilidade, causada por diferentes mecanismos. O óxido de cálcio hidrata-se rapidamente com uma grande expansão volumétrica, sendo responsável pela maior parte da expansão que ocorre em curto prazo. Por outro lado, o óxido de magnésio hidrata-se lentamente, expandindo-se por um longo período de tempo, podendo ocorrer por muitos anos (CRAWFORD; BURN, 1968; PERA, 1996).

Dependendo do teor de CaO livre e/ou MgO reativo, a reação de expansibilidade poderá provocar um aumento de volume da escória de aciaria tal que cause sua desintegração e enfraquecimento. Portanto, a estabilidade de volume é um critério chave para o uso da escória de aciaria como material de construção.

No próximo capítulo serão expostos os principais métodos utilizados para determinação do potencial de expansão da escória de aciaria e, também, as principais técnicas utilizadas para caracterização da microestrutura.

3 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA EXPANSIBILIDADE E TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA DA ESCÓRIA DE ACIARIA

3.1 Introdução

O principal problema que dificulta a utilização das escórias de aciaria é a sua expansibilidade, que tem como causa principal a existência de alguns compostos na sua composição mineralógica.

Os métodos para determinação do potencial de expansão mais utilizados em pesquisas ou usados rotineiramente em laboratórios são expostos também nesse capítulo, dando ênfase principalmente ao *Steam Test*, ensaio elaborado na Alemanha especificamente para escória de aciaria.

Muitos autores têm desenvolvido estudos nos quais identificam compostos encontrados por meio de diversas técnicas, tais como análise química, difração de raios X, termogravimetria, análise térmica diferencial e microscopia eletrônica de varredura. Esse capítulo descreve as principais técnicas utilizadas para caracterização da microestrutura e apresenta alguns resultados obtidos.

Com o uso de técnicas de análise da microestrutura de materiais é possível estudar a mineralogia das escórias de aciaria, assim como a sua composição química. Quando associada aos resultados de potencial de expansão de escórias de aciaria, a caracterização da microestrutura pode ser usada como ferramenta para compreensão do mecanismo de expansão.

3.2 Ensaios de determinação do potencial de expansão

Para a avaliação da expansibilidade da escória de aciaria, alguns métodos de ensaio foram propostos tomando como base o ensaio de compactação de solos, conhecido como CBR - *California Bearing Ratio*, ou Índice Suporte Califórnia, utilizando o procedimento descrito na norma ASTM D 1883/05 – Método de ensaio padronizado para determinação do Índice de Suporte Califórnia para solos compactados em laboratório. Os principais ensaios destinados à avaliação da expansibilidade da escória com base no ensaio CBR são (MACHADO, 2000):

- método de ensaio da JIS - *JAPANESE INDUSTRIAL STANDARDS*, na norma JIS A 5015/92 - Escória siderúrgica para construção de estradas;
- método de ensaio da ASTM - *American Society for Testing and Materials*, a norma ASTM D 4792/00 - *Potential expansion of aggregates from hydration reactions*;
- método de ensaio do Departamento de Transportes da Pensilvânia (PTM 130/78), adaptado pelo Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais (DMA-1/DER-MG/92), de acordo com o DNER - DPT 46/64 - Método de ensaio para avaliação do potencial de expansão da escória de aciaria - Adaptação do PTM 130/78.

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

- ensaio utilizando agulha de Le Chatelier - segundo o método da ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR. 11582/91 – Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de Le Chatelier;
- ensaio de autoclave, que pode ser conduzido segundo as condições estabelecidas pela JIS - *JAPANESE INDUSTRIAL STANDARDS*, na norma JIS R2211/91 - *Test method for hydration resistance of basic bricks*; ou sob as condições da ASTM - *American Society for Testing and Materials*, na norma ASTM C151/93 - Ensaio de expansão por autoclave em cimento Portland;
- teste a vapor da DIN - *Deutsches Institut für Normung* (Instituto alemão de normalização), padronizado pelo Comitê Europeu de Normalização (BS EN 1744-1/98 - Testes para propriedades químicas de agregados – análises químicas).

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

3.2.1 Ensaio adaptados a partir de ensaios em solos compactados (ASTM D 1883/05 e ASTM D 698/00)

O método de ensaio D 1883/05 é o procedimento da ASTM - *American Society for Testing and Materials* para determinação do Índice de Suporte Califórnia de solos compactados em laboratório para fins de pavimentação. Os ensaios de determinação do potencial de expansão da escória de aciaria prescritos na ASTM D 4792/00, na JIS A

5015/92 e no PTM 130/78 são executados com base no procedimento de compactação estabelecido por este método.

A norma ASTM D 1883/05 especifica que deve ser usado um cilindro de compactação de diâmetro interno igual a 152,4 mm e que os corpos-de-prova devem ser preparados de acordo com a norma ASTM D 698/00 – Método de ensaio padronizado para características de compactação em laboratório de solos usando energia padronizada (600 kN-m/m³).

O ensaio ASTM D 698/00 é um ensaio de compactação de solos. Nele, determina-se a relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca de um determinado tipo de solo compactado. A umidade ótima é também determinada pela análise da curva de compactação de um solo.

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

3.2.1.1 ASTM D 4792/00 - Determinação da expansão potencial de agregados devido a reações de hidratação

O método de ensaio ASTM D 4792/00 é o procedimento da ASTM – *American Society for Testing and Materials* para determinação do potencial de expansão volumétrica de agregados densamente compactados que contêm componentes susceptíveis à hidratação e ao aumento de volume. O método cita que alguns destes constituintes são óxidos de cálcio e magnésio, comuns em alguns co-produtos industriais.

O método consiste na medida da expansão volumétrica de amostras compactadas conforme o procedimento geral da norma ASTM D 1883/05 – Método de ensaio para determinação do Índice de Suporte Califórnia de solos compactados em laboratório.

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

A granulometria das amostras deve ser preparada da seguinte forma:

- se todo o material passa na peneira de 19,0 mm, este deve ser usado integralmente para preparação de corpos-de-prova para compactação, sem modificação em relação ao procedimento da ASTM D 698/00;
- se há material retido na peneira de 19,0 mm, este deve ser removido e substituído por quantidade igual que passa na peneira 19,0 mm, fica retido na peneira de 4,75 mm, e não tenha sido utilizado anteriormente para testes.

Três corpos-de-prova são moldados com escória de aciaria (cilindros de $152,4 \pm 0,7$ mm de diâmetro e, $116,4 \pm 0,5$ mm de altura). A Figura 3.1 mostra o molde para o ensaio (a) e a sua imersão (b).

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

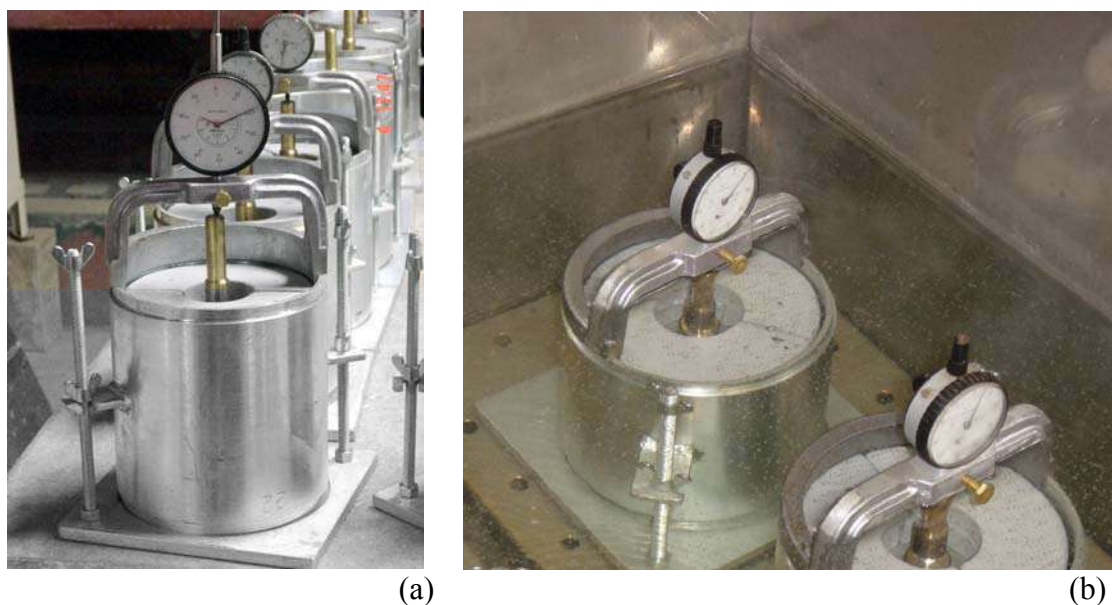


Figura 3.1 - (a) Molde para o ensaio baseado no ASTM D 1883/05 e (b) molde imerso

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

3.2.1.2 JIS A 5015/92 - Método de ensaio de dilatação em água para escória siderúrgica

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

Quanto à avaliação da expansibilidade, há um anexo à norma que trata de um ensaio adaptado do método ASTM D 698/00, em um equipamento semelhante (Figura 3.2). O procedimento utiliza um molde de 15 cm. O tanque de água deve ter capacidade para receber no mínimo 3 moldes, conservando a temperatura da água a $80 \pm 3^\circ \text{C}$ por 6 horas.

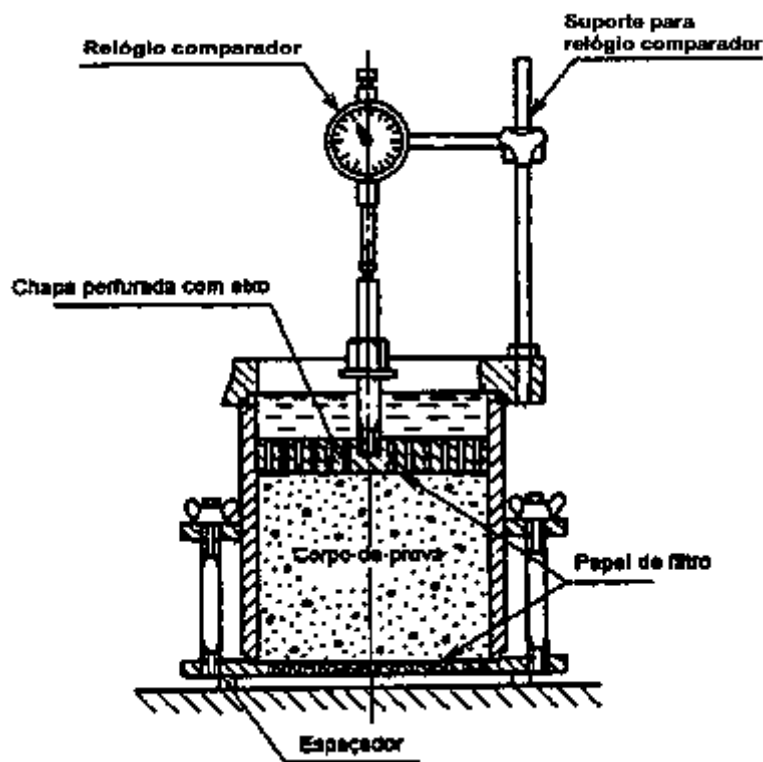


Figura 3.2 - Equipamento para ensaio de expansão em água (JIS A 5015/92)

Neste ensaio são utilizados 3 corpos-de-prova cilíndricos, obtidos por meio do ensaio de compactação em molde semelhante ao da norma ASTM D 1883/05. A granulometria da amostra a ser utilizada deve atender ao especificado na norma JIS A 5015/92, conforme mostra o Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Distribuição granulométrica de amostras para o ensaio JIS A 5015/92

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

A amostra é preparada tomando-se aproximadamente 30 kg de material e adicionando-se água. A umidade, próxima à umidade ótima, deve ser mantida por 24 horas. Após esse período de repouso, a amostra é quarteada para formação de 3 corpos-de-prova. Os corpos-de-prova são submersos em água e sujeitos a ciclos de aquecimento diários de 6 horas, com temperatura de 80°C, repetindo-se o processo por 10 dias. A expansão é medida por meio da variação da altura do corpo-de-prova. O critério para considerar a escória adequada para o uso em pavimentação adotado pela norma JIS A 5015/92 é que a expansão máxima seja de até 2%.

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

O ensaio de expansão PTM 130/78 foi desenvolvido por Emery (1984), em Ontario, Canadá, na MacMaster University. A temperatura de cura do corpo-de-prova foi alterada, originando a norma ASTM D 4792/2000. Posteriormente, o Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais fez nova adaptação, resultando na norma DMA-1/DER-MG/92.

No método PTM 130/78, a amostra é compactada, seguindo o ensaio de compactação ASTM D 698/00, em três camadas, em um molde cilíndrico com diâmetro de 15,24 cm e altura de 17,78 cm. São utilizados três corpos-de-prova distintos.

A partir da etapa de compactação, a amostra é submersa em água na temperatura de $71 \pm 3^\circ\text{C}$ e instala-se um relógio comparador no topo da amostra para acompanhar a expansão vertical. Durante os sete primeiros dias são feitas leituras diárias com a amostra imersa. Após esse período a amostra é levada à estufa a $71 \pm 3^\circ\text{C}$ e mantida em condição saturada, mas não submersa¹, onde são feitas as leituras de expansão por sete dias adicionais.

¹ Para manter a amostra saturada devem ser adicionados 500 ml de água ao topo da amostra diariamente (PTM 130/78).

Este ensaio demanda um tempo total de 14 dias para ser realizado. O limite estabelecido no Brasil, de acordo com a especificação da norma DNER-PRO 263/94 é de 3%. Segundo o documento a especificação do Departamento de Transportes da Pensilvânia na *Publication 408/2003 - Highway Construction Specifications*, o limite do potencial de expansão, determinado pelo PTM 130/78, é 0,5% (PennDOT, 2003).

Os ensaios com base na ASTM D 698/00, apesar de serem bastante utilizados, são questionados por alguns autores. Machado (2000) comenta que os métodos com base no ensaio de compactação com penetração de água no material, além de serem lentos e de difícil execução, possuem grande dispersão de resultados atribuída à diversidade de condições experimentais e à grande heterogeneidade do material, assim como à variação nos critérios de obtenção dos corpos-de-prova (faixa granulométrica, umidade inicial e massa específica).

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

3.2.2 O ensaio de agulhas de *Le Chatelier* – NBR 11582/91

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

Na adaptação deste ensaio para avaliação da expansão da escória de aciaria, é elaborado um traço de argamassa de cimento e escória e são necessários 6 corpos-de-prova. A expansibilidade é determinada pelo afastamento das extremidades das agulhas (Figura 3.3), o que ocorre em função do aumento de diâmetro do cilindro. O ensaio pode ser realizado a frio ou a quente, sendo que o ensaio a quente exige menor duração que o ensaio a frio (GEYER et al., 1998; GUMIERI et al., 2000; MACHADO, 2000; MANCIO et al., 2000; MASUERO et al., 2000; GEYER et al, 2001; MACHADO et al., 2002; SILVA FILHO et al., 2002). Geyer (2001) utilizou uma pasta de cimento com 35% de adição de escória de aciaria.

No ensaio de expansibilidade a quente, os corpos-de-prova são inicialmente imersos em água a temperatura ambiente por 24h e, posteriormente, imersos em água a 100°C por

um período de 3h a 5h. Há repetições deste ciclo até que a abertura das agulhas permaneça constante. No ensaio a frio, não ocorre a imersão em água a 100°C e a duração aumenta para 7 dias.

Machado (2000) comenta que, apesar de ser um método de ensaio relativamente simples, seus resultados são pouco precisos. Outro questionamento é a respeito da carbonatação da amostra, que, para a realização do ensaio, é britada e moída, expondo compostos anidros do interior do grão. De qualquer forma, é mais apropriado para utilização quando a aplicação é em pasta de cimento, mas para base e sub-base não é indicado.

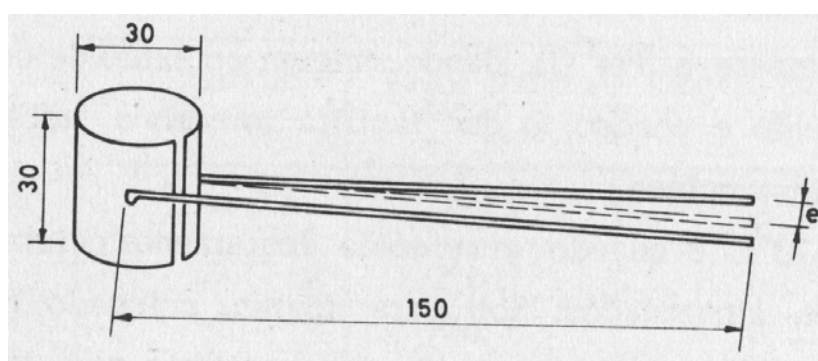


Figura 3.3 - Agulha de Le Chatelier (COUTINHO, 1973)

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

3.2.3 O ensaio de autoclave

De acordo com Okamoto et al. (1981), este ensaio pode ser realizado segundo a norma JIS R2211 ou a norma ASTM C151/93. No entanto, na maioria das vezes, a escória de aciaria é testada de acordo com esta última.

As amostras são tratadas com vapor em autoclave, mas a influência das condições do teste (pressão, tempo) na hidratação da escória não estão bem determinadas e Okamoto et al. (1981) afirmavam que estudos estavam sendo desenvolvidos com o intuito de estabelecer tais condições. O procedimento geral do ensaio consiste em: conformação do corpo-de-prova (40 mm de diâmetro por 55 mm de altura) sob pressão de 2×10^6 kg/m² (correspondente a temperatura de 215°C); cura do corpo-de-prova por 16 horas em estado úmido, determinação do volume inicial; tratamento em autoclave com

aumento de pressão por 1 hora, seguida de redução por 2 horas; medição do volume final.

Motz e Geiseler (2001) consideram que o ensaio em autoclave utilizado para medição de expansibilidade de escórias de aciaria foi o precursor do *Steam Test*, mas que as condições do ensaio (alta temperatura e pressão) são extremamente irreais. Além disso, as investigações concluíram que sob as condições da autoclave ocorriam reações minerais nunca vistas antes no campo, sob condições naturais.

3.2.4 O ensaio a vapor - *Steam Test* (EN 1744-1/98)

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

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

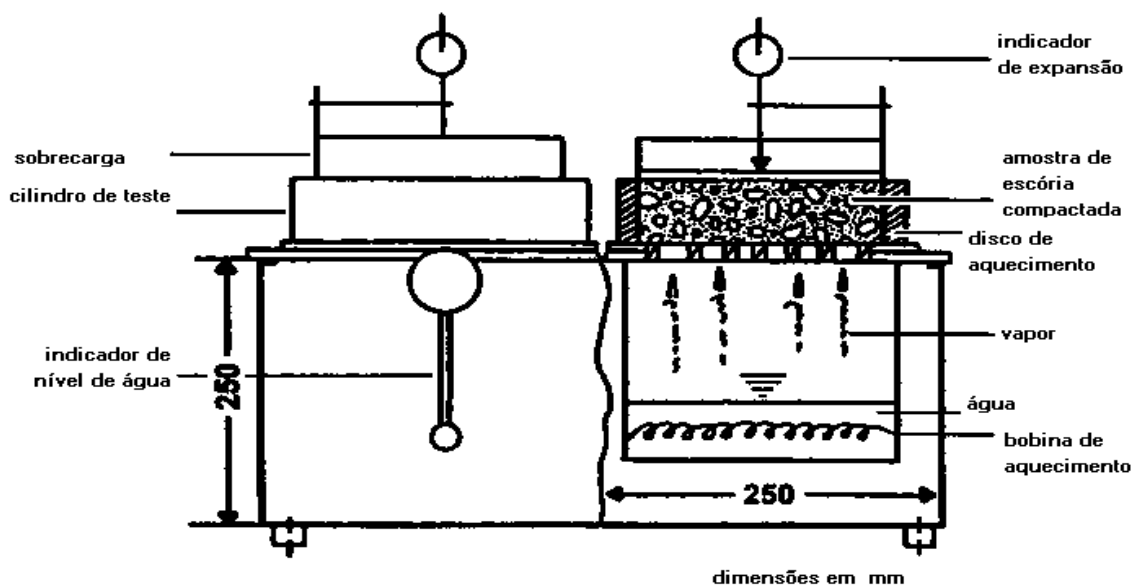
A norma EN 1744-1/98 especifica no item 19.3 o método de determinação da suscetibilidade de expansão da escória de aciaria britada, resultante da hidratação tardia da cal livre e/ou do óxido de magnésio livre.

São necessários no mínimo dois corpos-de-prova de 4,5 kg por amostra e cada um deve ser composto individualmente por uma granulometria específica. De acordo com a EN 1744-1/98 são utilizadas porções de 0 mm a 22 mm de misturas secas de escória combinadas de acordo com a parábola de *Fuller*, que tem proporção de massa por granulometria dada no Quadro 3.2, e que devem ser tomadas a partir de agregados britados.

Quadro 3.2 - Proporção de massa por granulometria segundo a parábola de Fuller (EN 1744-1/98)

Tamanho (mm)	Porcentagem em massa (%)
0 a 0,5	15
0,5 a 2	15
2 a 5,6	19
5,6 a 8	10
8 a 11,2	11
11,2 a 16	15
16 a 22	15

Os corpos-de-prova são formados pela compactação do material em um molde cilíndrico com diâmetro de 210 mm e altura de 100 mm. Após a compactação, os corpos-de-prova são colocados sobre uma câmara em que a água é aquecida, gerando vapor que percola pelos vazios entre os grãos de escória no recipiente superior. A Figura 3.4 mostra o esquema do equipamento *Steam Test Machine* (GEISELER; MOTZ, 1998; MOTZ; GEISELER, 2001, EN 1744:1998).

**Figura 3.4 - Equipamento do Steam Test (EN 1744-1/98)**

A umidade necessária à hidratação do CaO e do MgO é canalizada continuamente para a amostra preparada. O incremento de volume, obtido por meio do incremento da altura, é medido por um relógio comparador que fica acoplado à parte superior do equipamento e, a partir do valor final encontrado, calcula-se a expansão da amostra de escória de

aciaria. O tempo de estabilização pode variar de, aproximadamente, 24 horas, no caso da maioria das escórias tipo LD (processo a oxigênio), a até 168 horas, no caso de escórias EAF (escória de aciaria elétrica) ou escórias LD de alto teor de MgO (>5%). A curva de expansibilidade vs. tempo, no *Steam Test*, é função do tipo da escória de aciaria e, principalmente, dos teores de CaO e MgO presentes na amostra (MOTZ; GEISELER, 2001).

Motz e Geiseler (2001) mostram limites para os valores de expansão utilizando o *Steam Test* para o uso da escória de aciaria em pavimentação como agregado em misturas betuminosas e em misturas para camadas granulares tais como base e sub-base. Os limites que mostra o Quadro 3.3 são também especificados pelo Comitê Europeu de Normalização pelas normas EN 13043/03 e EN 13242/02.

Quadro 3.3 - Valores de expansão para escória de aciaria (MOTZ; GEISELER, 2001; EN 13043/03; EN 13242/02)

Tipo de escória de aciaria	Valores máximos de expansão (%)		Tempo de ensaio (h)	Categoria ²
	Agregados para misturas betuminosas	Agregados para misturas de camadas granulares		
LD/EAF (teor de MgO ≤ 5,0%)	3,5	5	24	V _A
LD/EAF (teor de MgO > 5,0%)	3,5	5	168	
LD/EAF (teor de MgO ≤ 5,0%)	6,5	7,5	24	V _B
LD/EAF (teor de MgO > 5,0%)	6,5	7,5	168	
LD/EAF (teor de MgO ≤ 5,0%)	10	10	24	V _C
LD/EAF (teor de MgO > 5,0%)	10	10	168	
LD/EAF (teor de MgO ≤ 5,0%)	Sem requisitos			V _D

² As categorias são estabelecidas conforme a utilização: A - mais nobre e D - menos nobre (MOTZ; GEISELER, 2001). Para os países Europeus, as categorias V_A a V_D podem ser selecionadas conforme a experiência de cada um deles (SAMARIS, 2006). As normas EN 13043/03 e EN 13242/02 denominam as categorias de acordo com o limite utilizado (ex.: expansão < 5%, categoria V₅).

Durante o desenvolvimento do ensaio, resultados de testes de laboratório foram comparados aos resultados de expansibilidade de escórias de aciaria sob condições de utilização, como, por exemplo, em pavimentação, havendo coerência entre os resultados obtidos no laboratório em curto prazo e o desempenho do material em campo em longo prazo (MOTZ; GEISELER, 2001).

3.3 Técnicas de caracterização da microestrutura

Existem diferentes técnicas que podem ser utilizadas para caracterização da microestrutura da escória de aciaria, tais como análise química, difração de raios X, termogravimetria, análise térmica diferencial, microscopia eletrônica de varredura, métodos do etileno glicol e do acetato de amônia (RIBAS SILVA, 2003).

A análise química fornece a composição química centesimal do material. Quanto menor a quantidade do componente, maior deve ser a aproximação da técnica adotada para determiná-la.

O teor de CaO livre pode ser determinado por meio dos métodos do etileno glicol e do acetato de amônia, sendo que este último pode determinar, também, por diferença, o teor de MgO livre.

A difração de raios X permite a identificação dos compostos cristalizados, inclusive as formas alotrópicas, presentes na amostra analisada.

As análises térmicas se baseiam no comportamento típico de cada substância, quando submetida a altas temperaturas, permitindo, assim, a identificação das fases cristalinas e amorfas.

3.3.1 Análise química (AQ)

A análise química é utilizada para determinar, principalmente, os teores dos diferentes óxidos presentes na amostra, como CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, MnO, Na₂O, P₂O₅, K₂O e TiO₂ (DELOYE, 1986), mas também a perda ao fogo, o resíduo insolúvel, os teores de CaSO₄ e de SO₃. Podem ainda ser determinados os teores de metais pesados (Cu, Cr, Hg, Pb, Mo, V, Zn) (AMARAL, 1999), com maior interesse para a análise do impacto ambiental. Alguns autores chegaram a uma análise mais detalhada ao estudar a formação de uma tufa calcária, depositada em drenos, por agregados de escória de aciaria (GUPTA *et al*, s.d.).

Os métodos para determinar a análise química de uma amostra podem ser os mais variados (LOUVRIER, 1985) e dependem da disponibilidade em cada laboratório. Porém, não se pode esquecer que a escolha da técnica deve levar em conta a quantidade prevista de cada óxido na amostra.

De acordo com GUPTA *et al* (s.d.), a ASTM preconiza o uso da fluorescência de raios X, para a determinação dos teores de óxidos na escória de aciaria. Essa técnica é adotada pela maioria dos pesquisadores (GUPTA *et al*, s.d.; KNELLER *et al*, 1994; AMARAL, 1999; MACHADO, 2000; POLISSENI, 2002;).

Para a determinação do teor de CaO livre, alguns pesquisadores (MACHADO, 2000; POLISSENI, 2002) utilizam o método do etileno glicol, mas este é bastante criticado, inclusive pelos pesquisadores que o utilizam, por determinar o CaO total, livre e combinado e por não determinar o teor de MgO (MOTZ; GEISELER, 2001; PENA, 2004).

Arjunan e Kumar (1994) descrevem uma outra técnica, denominada Método do Acetato de Amônia (AAM), para a determinação da cal e da magnésia livres no clínquer do cimento. Trata-se da estimativa da cal livre por meio do refluxo da amostra moída em uma solução alcoólica de acetato de amônia, em fervura branda. O resultado é filtrado e titulado por EDTA³ de modo a determinar o teor de CaO livre. A magnésia livre é extraída sob a forma de um sal duplo por meio da reação com o nitrato de amônia pelo método denominado Método do Nitrato de Amônia. Não se tem conhecimento de aplicação dessas técnicas em escória de aciaria, mas é bastante provável que elas possam ser aplicadas, com vantagens, sobre o método do etileno glicol.

OKAMOTO *et al*. (1981) utilizaram o método de extração do tribopheno-glycerol para determinação do teor de CaO livre em escórias de aciaria LD, mas não descreveu o método.

Com relação à análise química, normalmente não são citados pelos pesquisadores, os métodos utilizados. Por isso, teoricamente, os resultados não poderiam ser comparados, mas, tratando-se de uma análise centesimal, pode-se verificar a variabilidade dos teores de cada óxido. Nos artigos onde a técnica é citada foi utilizada a fluorescência de raios X.

³ Método do ácido etilenodiaminotetra acético sal dissódico.

3.3.2 Difração de raios X (DRX)

A difração de raios X é, juntamente com a análise química, a técnica mais utilizada para a caracterização da microestrutura da escória de aciaria. É usada para identificar as fases cristalinas presentes na amostra, considerando que, a cada tipo de cristal, corresponde uma série de ângulos de difração que lhe são característicos.

Usando-se o equipamento denominado difratômetro de raios X, a identificação das fases é baseada na aplicação da Lei de Bragg (Eq. 3.1), que leva em conta o elemento usado no aparelho e o correspondente comprimento de onda (características do equipamento).

$$n \cdot \lambda = 2d \cdot \sin \theta \quad \text{Eq. 3.1}$$

Onde: d = distância dos planos reticulados;

θ = ângulo de difração incidente;

n : número inteiro;

λ : comprimento de onda do feixe incidente.

É necessária uma amostra moída, para que a difração de raios X seja explorável. A emissão dos elétrons é feita por um filamento de tungstênio aquecido. A velocidade dos elétrons é adquirida pela alta tensão aplicada, em razão da diferença de potencial entre a fonte e o alvo. O comprimento de onda dos raios X utilizados depende do alvo, que normalmente, pode ser de cobalto, cobre, molibdênio ou ferro. A radiação difratada é captada por um contador (RIBAS SILVA, 1996).

O limite de detecção de um mineral em uma mistura é de aproximadamente 1% e somente as fases cristalinas são detectadas. No entanto, a DRX permite diferenciar espécies de uma mesma composição química (formas alotrópicas) conforme Guinier (1984), Ribas Silva (1990) e Ribas Silva (1996).

De acordo com Ribas Silva (1996) a difração de raios X, bastante utilizada pelos pesquisadores em geral, identifica, qualitativamente, a composição mineralógica da escória de aciaria e possui vantagens (simplicidade, rapidez, quantidade reduzida de amostra, possibilidade de reutilização da amostra, distinção de diversas variedades com a mesma fórmula) e inconvenientes (dificuldade de interpretação, impossibilidade de analisar substâncias mal cristalizadas).

3.3.3 Microscopia eletrônica de varredura e análise por energia dispersiva

A microscopia eletrônica de varredura permite a observação dos seguintes aspectos da escória de aciaria: textura do material, morfologia e distribuição dos compostos, além do aspecto geral da amostra. O MEV deve ser utilizado, juntamente com o EDS (Espectrômetro a Dispersão de Energia), de modo a se poder analisar elementarmente as fases observadas para facilitar sua identificação. A multiplicidade de fases que tem morfologias similares, sem a análise dos seus componentes, pode conduzir a uma identificação errônea.

A técnica da microscopia eletrônica de varredura consiste no bombardeamento da amostra por elétrons produzidos pelo aquecimento de um filamento de tungstênio. Esses elétrons ao atingirem a amostra são emitidos sob as formas de elétrons secundários, elétrons retroespalhados e ftons X, entre outros. Cada uma dessas emissões pode ser captada por um detetor específico, sendo que os dois primeiros são usados na obtenção de uma imagem da amostra. Os elétrons secundários fornecem uma melhor definição de imagem e os retroespalhados permitem uma melhor análise. Já os ftons X são utilizados para a microanálise dos componentes ou de uma região observados com ajuda do EDS (REGOURD; HORNAIN, 1975; DELOYE, 1986).

A análise por energia dispersiva é, em princípio, uma difração também baseada na Lei de Bragg. A intensidade dos raios do espectro depende dos ângulos de incidência e emergência. A interpretação do espectro resultante da análise de uma amostra pode ser difícil devido ao empilhamento de raios de diferentes elementos (RIBAS SILVA, 1996).

A análise de imagens (distribuição dos elementos químicos da amostra), usando o MEV, é bastante útil para se identificar as diferentes fases presentes na escória. Neste caso, é necessário um preparo especial da amostra, realizando um polimento superficial e, se necessário, impregnar com resina, para melhorar as condições de análise, sendo mais indicado o uso de elétrons retroespalhados.

A amostra observada deve suportar o vácuo de 10^{-2} torr. e o bombardeamento eletrônico, bem como ter uma condutibilidade superficial para escoar as cargas. Quando se trata de material não condutor, como a escória de aciaria, é necessário fazer uma metalização na superfície, sendo as mais comuns as de ouro, ouro-paládio e de carbono (RIBAS SILVA, 1996).

A MEV, apesar de sua utilidade, é menos usada do que a difração de raios X e a análise química, mas é indicada para completar a caracterização microestrutural da escória de aciaria.

3.3.4 Análises térmicas

As análises térmicas mais utilizadas para a caracterização da escória de aciaria são a termogravimetria (TG) e a análise térmica diferencial (ATD).

O equipamento utilizado para as análises térmicas é uma termobalança que permita o aumento constante da temperatura. Há equipamentos que realizam as duas análises (ATD e TG) ao mesmo tempo, em uma mesma amostra.

A **termogravimetria (TG)** determina a perda de massa do material ao ser aquecido. Conhecendo-se as temperaturas nas quais ocorrem certas reações, pode-se identificar os constituintes da amostra. Os dados são plotados em um diagrama, que relaciona a massa e a temperatura ou tempo, o que permite a determinação dos acidentes térmicos e a identificação dos componentes da amostra (HARMELIN, 1968; FILEV, 2002).

A **análise térmica diferencial (ATD)** permite a observação de fenômenos caloríficos endo ou exotérmicos provocados pelas transformações de transição de fase (fusão, ebulição, sublimação, vaporização, ou transições cristalinas, desidratação, decomposição, oxidação, redução e destruição da rede cristalina).

A técnica consiste na comparação do comportamento do material analisado com uma substância padrão, ao serem os dois aquecidos igualmente e de modo uniforme (HARMELIN, 1968; SSA, 2003).

O resultado é obtido por meio de um diagrama do comportamento da amostra, onde podem ser identificados, ainda, os pontos de reações endo ou exotérmicas. A temperatura de ocorrência dos acidentes térmicos é característica de cada material, o que permite sua identificação.

3.4 Características da microestrutura da escória de aciaria

Muitos autores têm desenvolvido estudos nos quais identificam compostos encontrados por meio de técnicas de análise de microestrutura, tais como análise química, difração de raios X, termogravimetria, análise térmica diferencial e microscopia eletrônica de varredura. Mineralogicamente, os principais componentes da escória de aciaria são a

larnita (β - C_2S), a ferrita dicálcica (C_2F), a wüstita (FeO), a cal livre (CaO), o periclásio (MgO), a portlandita [$Ca(OH)_2$] e a calcita ($CaCO_3$) de acordo com Sbrighi e Battagin (2002). As substâncias expansivas mais prejudiciais são o CaO e o MgO , tendo este último a reação mais lenta. A larnita, o α - C_2S e o ferro metálico também são substâncias expansivas.

3.4.1 Composição química da escória de aciaria

A escória de aciaria é composta de silicatos e óxidos de elementos que não são desejados na composição química do aço (ALTUN; YILMAZ, 2002). A composição mineralógica das escórias de aciaria muda com a sua composição química (SHI; QIAN, 2000; SHIH et al., 2004).

A escória de aciaria LD tem, em sua composição química, produtos resultantes da combinação dos elementos escorificantes com os elementos a serem retirados do ferro gusa e também da sucata metálica que é ocasionalmente usada como matéria-prima na fabricação do aço. Alguns dos produtos resultantes são os silicatos de cálcio e as ferritas combinadas com óxidos de ferro fundido, alumínio, manganês, cálcio e magnésio, além de outras espécies químicas que aparecem em menor escala (PENA, 2004). O Quadro 3.4 mostra a composição química da escória de aciaria LD proveniente de diferentes usinas siderúrgicas brasileiras.

Quadro 3.4 - Composição química da escória de aciaria LD (LITTLE; SETEPLA, 1999).

Usinas	Composição química da escória de aciaria (%)							
	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	Fe/t	S	P ₂ O ₅
CST	45.2	5.5	0.8	12.2	7.1	18.8	0.07	2.75
ACESITA	44.81	7.32	2.42	15.47	2.09	14.06	0.06	1.18
BELGO MINEIRA	47.0	8.0	1.5	15.0	3.0	19.0		
USIMINAS	41.4	6.2	1.4	11.0	6.3	22.0		1.8
AÇOMINAS	45.58	9.48	0.75	12.01	6.59	16.71		2.23
GERDAU – COCAIS	36.2	12.5	0.93	15.4	5.8	21.0	0.04	1.01
MANNESMANN	43.0	7.0	0.8	15.0	3.0	22.0	0.2	1.6
CSN	35.0	6.0	4.0	15.0	3.5	19.7	0.34	0.7
COSIPA	38.69	9.76	1.29	11.17	6.42	22.29	0.06	1.44
GERDAU – PAINS	38-45	8-12	2-2.5	13-18	3-5	21-28		1.5-

No início do sopro de oxigênio, usado no processo de fabricação, a escória de aciaria é formada por elevados teores de FeO e SiO₂ e os teores de CaO aumentam à medida que é dissolvido na escória líquida (MACHADO, 2000). Uma das principais causas das diferenças observadas na composição química das escórias de aciaria LD é o tipo de fundente utilizado, que pode ser a cal virgem ou a cal dolomítica⁴ (MURPHY et al., 1997). Este fato reflete diretamente na quantidade de óxido de magnésio presente na escória de aciaria, classificando-as em escórias de aciaria de baixo ou alto teor de MgO. O Quadro 3.5 mostra as composições químicas de escórias de aciaria LD publicadas por diversos pesquisadores internacionais.

Quadro 3.5 - Composição química da escória de aciaria LD.

Autor		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	P ₂ O ₅	S	Fe ₂ O ₃	Fe t
1	MURPHY et al. (1997)	35	18	3,6	11,5	6,5	-	-	-	-
2	MOTZ; GEISELER (2001)	45-55	12-18	< 3	< 3	< 5	< 2	-	-	18
3	MOTZ; GEISELER (2001)	42-50	12-15	< 3	5-8	< 5	< 2	-	-	15-20
4	GEISELER (1999)	48-54	11-18	1-4	1-4	1-4			-	14-19
5	NSA (s.d.)	42	15	5	8	5	0,8	0,08	-	24
6	GEORGE & SORRENTINO (1980)	47	13	1	6	5	2	< 0,1	-	25
7	FILEV (2002)	44,3	13,8	1,5	6,4	5,3	-	0,07	-	17,5
8	LITTLE & SETEPLA (1999)	36-46	11-15,5	0,8-4	5,5-12,5	-	-	-	-	14-22

Qian et al. (2002) consideram que a maioria das escórias de aciaria EAF possui teores de CaO inferiores a escória de aciaria LD e que é dificilmente hidratada reagindo com água a temperaturas normais. O Quadro 3.6 apresenta os resultados divulgados por diferentes autores, bem como as médias em diversos países, de análise química de escórias de aciaria LD.

⁴ A escória de aciaria produzida a partir da cal dolomítica tende a possuir maior teor de MgO.

Quadro 3.6 - Resultados das análises químicas da escória de aciaria LD de diversas procedências⁵

(%)	1	2	3	4	5	6	7				8	9	10	11	Limites	
CaO	45	>35	45	48	47	33	35	38	48	51	44	40-52	26	38	41	26-52
SiO₂	15	<20	10,5	16	13	11	13	12	13	15	14	10-19	18	12	10	10-20
Al₂O₃	4	<5	2,7	1,2	1	20	3,75	4	3	3	1,5	1-3	7	3	2	1-20
FeO	30	<25	35	16	25	11						60-70				11-70
MgO	10	10	4	8	10		11	8	10	5	6	5-10	12	9	10	4-10
MnO	5	4	7	6	4		3	4	3	4	5	5-8	2	6	6	2-8
S	-	0,2	0,06	0,1	0,1						0,07	<0,1				<0,1-0,2
P₂O₅		traços	1,05	0,5	2	19	0,29	0,13	0,22	0,3		0,5-1	0,08	1	2	tr. -19
Na₂O						0,05	0,08	0,07	0,01	0,01			<0,02			0,01-0,08
K₂O						0,32	0,01	0,01	0,01	0,01			<0,02			0,01-0,32
P.F.						5	6	2	6	3						2-6
CaSO₄						0,54										-
SO₃						0,32	0,01	0,01	0,01	0,04			0,2			0,01-0,32
Fe₂O₃							24	26	15	16		20-30	34			15-34
Umid.							3,08	0,61	1,65	2,88						0,61-3,08
Fe total											17,5			23	21	17,5-23
TiO₂											1,5		0,34			0,34-1,5
CaOl														5	7	5-7
1-Brasil (Sbrighi; Battagin, 2002)			4-Espanha (Sbrighi; Battagin, 2002)			7- EUA (Gupta et al, s.d.)			10- Brasil (Polisseni, 2002)							
2-Austrália (Sbrighi; Battagin, 2002)			5-França (Sbrighi; Battagin, 2002)			8-Brasil (Filev, 2002)			11- Brasil (Machado, 2000)							
3-China (Sbrighi; Battagin, 2002)			6- Brasil (Geyer et al., 2000)			9-EUA (SSA, 2003)										

No Quadro 3.7 pode se ver a composição química de escória de aciaria de Singapura.

⁵ A técnica utilizada para análise química, quando citada, é a fluorescência de raio X.

Quadro 3.7 - Composição química de escória de aciaria EAF de Singapura (QIAN et al., 2002)

Composição química (%)							
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO
22,48	19,38	5,27	9,51	0,35	8,49	30,54	1,10

O Quadro 3.8 apresenta a composição química de escórias de aciaria EAF provenientes de algumas usinas brasileiras.

Quadro 3.8 - Composições químicas da escória de aciaria EAF (LITTLE; SETEPLA, 1999).

Usinas	Composição Química da Escória de Aciaria (%)							
	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	Fe/t	S	P ₂ O ₅
GERDAU – CEARENSE	45-65	5-15	1-5	15-17	0.5-5			
GERDAU – AÇONORTE	25.7	10.37	5.31	15.8	5.51	34.31	0.31	
GERDAU – USIBA	42	6.5	4.5	13.5	3	28	0.06	0.6
BELGO – CARIACICA	34	9.3	6.2	18.2	4.7	18.67	0.13	0.54
BELGO – PIRACICABA	41.6	7.9	4.4		4.5	21.6	0.16	
BARRA MANSA	28.04	16.93	4	20.42	5.37	17.39		0.49
GERDAU – COSIGUA	30	9	3	17	3	35	1	
BELGO – JUIZ DE FORA	37	9.31	3.31	17.73	7.33	16.19	0.07	0.41
VILLARES – MOGI	45-55	4-6	3-5	12-17	4-6	10-15		
VILLARES – PINDA	30-50	3-9	3-7	8-18	4-6	7-20		0.3-0.7
GERDAU – GUAÍRA	25.5	12.1	7.7	20.3	6.6	23.2	0.06	0.19
GERDAU -	12-35	7-10	3-13	17-25	5-15	27-40	0.5-3	

O Quadro 3.9 mostra a composição química de escória de aciaria EAF de Taiwan (SHIH *et al.*, 2004).

Quadro 3.9 - Composição química de escória de aciaria EAF de Taiwan (SHIH et al., 2004)

Composição química (%)								
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Perda ao fogo (800°C)	umidade
41,98	19,15	1,18	7,64	1,16	2,89	2,32	15,73	7,95

No Quadro 3.10 estão os resultados médios de análise química de escórias de aciaria EAF, obtidos em diferentes países.

Quadro 3.10 - Resultado da análise química da escória de aciaria EAF.

Óxido	Brasil (SBRIGHI; BATTAGIN, 2002)	USA (SBRIGHI; BATTAGIN, 2002)	Japão (SBRIGHI; BATTAGIN, 2002)	Itália (SBRIGHI; BATTAGIN, 2002)	Alemanha (SBRIGHI; BATTAGIN, 2002)	Brasil (Filev, 2002) (oxid)	Brasil (Filev, 2002) (red)	Espanha (AMARAL, 1999)		Limites
CaO	33	41	40	41	32	38	51	27-30	27	27-51
SiO₂	18	17	25	14	15	19	27	10-13	13	10-27
Al₂O₃	6	8	5	7	4	7	9	6-7	4	4-9
FeO	30	18	19	20	31	--	--			18-31
MgO	10	10	4	8	10	6	7	3-4	7	3-10
MnO	5	4	7	6	4	6	1	3-6	2	1-7
S	-	0,2	0,06	0,1	0,1	0,38	0,50			0,1-0,5
P₂O₅	-	0,6	-	0,9	0,4	--	--	0,5-0,6	0,34	0,34-0,9
Na₂O								0,4-0,6	0,17	0,17-0,6
Fe₂O₃								40-45	40	40-45
Fe total						15	1,5			1,5-15
TiO₂						0,7	0,7	0,3-0,5	0,4	0,3-0,7

Como se pode observar, nem sempre os mesmos elementos são pesquisados na análise química da escória de aciaria. Os óxidos de Ca, de Si, de Al, de Fe, de Mg e de Mn são os mais frequentemente determinados, mas há outros que também são muitas vezes pesquisados, como o óxido de fósforo.

3.4.2 Difração de raios-X

Qian et al. (2002) consideram que os minerais predominantes na escória de aciaria EAF são silicato dicálcio (C₂S), merwinite (C₃MS₂) ou kirschsteinite (CFS). Adicionalmente, também considera a existência da fase wustita como um tipo de fase RO, contendo MgO (21%), CaO (6%), MnO (4%) além de FeO (69%). Refere-se ao mineral como de Mg-wustite.

No Quadro 3.11, são apresentadas as fases encontradas ou indicadas por alguns pesquisadores.

Quadro 3.11 - Fases encontradas por alguns pesquisadores na escória de aciaria, por meio da difração de raios X.

	Fase	Fórmula	1	2	3	4	5	
Silicatos	Larnita	Ca_2SiO_4	X		X	X	X	
	Silicato tricálcico	Ca_3SiO_5	X	X		X		
	Gehlenita	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	X			X	X	
	Ingersonita	Ca_2SiO_4	X	X				
	Merwinita	$\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$	X					
	Diópsido	$\text{CaMg}(\text{SiO}_3)_2$	O					
	Wadsseylite	$(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$					X	
	Fayalite	$(\text{Fe,Mg})_2\text{SiO}_4$					X	
	-	$\alpha \text{ 2CaO.SiO}_2$		X		X		
	Clinoferrosilite	FeSiO_3					X	
	Akermanita	$\text{Ca}_2\text{MgSiO}_7$					X	
	Nagelschmidite	$2\text{Ca}_2\text{SiO}_4.\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$					X	
	Piroxênio	$\text{Ca}(\text{Fe,Al,Mg})\text{SiO}_4$					X	
	Calcio-olivina	Ca_2SiO_4					M	
	Óxidos e hidróxidos	Gismondina	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8.4\text{H}_2\text{O}$			X		
Ferrita Dicálcica		$2\text{CaO.Fe}_2\text{O}_3$				X		
Dicálcioalumino-ferrite		$\text{Ca}_2(\text{Fe, Al, Ti})_2\text{O}_5$		X				
Brown Millerita		$4\text{CaO.Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$				X		
Periclásio		MgO	X	X		X	X	
Wuestita		FeO	X		X	X	X	
Hematita		Fe_2O_3			X		X	
Magnetita		Fe_3O_4	X	X			T	
Hausmanita		$(\text{Mn,Mg})(\text{Mn,Fe})_2\text{O}_4$					T	
Portlandita		$\text{Ca}(\text{OH})_2$	X				X	
Srebrodolskita		$\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$					X	
Mayenita		$\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$					X	
Magnésio-hornblenda		$(\text{Ca,Na})_2.26(\text{Mg,Fe,Al})_5.15(\text{Si,Al})_8\text{O}_2.2(\text{OH})_2$	O					
Magnésio-calcio-wuestite		$(\text{Fe,Mn,Mg,Ca})\text{O}$		X				
Cal		CaO				X		
Quartzo		SiO_2	X					
Brownmillerita		$\text{Ca}_2(\text{Al, Fe})_2\text{O}_5$	X					
Carbonatos		Magnesita	MgCO_3					X
		Calcita	CaCO_3	P				X
	Ferromagnesita	$(\text{Mg,Fe})\text{CO}_3$					M	
	Dolomita	$(\text{Ca,Mg})(\text{CO}_3)_2$					M	
	Ankerita	$\text{Ca}(\text{Fe,Mg})(\text{CO}_3)_2$					T	
	Rhodocrosita	MnCO_3					T	
Sulfetos	Marcassita	FeS_2					P	
	Pirita	FeS_2					T	
Sulfatos	Etringita	$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}$	X					
Outr.	Halita	NaCl					T	
	Fluorita	CaF_2		X				
X - presente O - ou similar P-provável M- Peq. quant. T- traços								
1- (Amaral,1999)			2- (Goldring; Juckes, 1997)					
3 - (Machado, 2000)			4- (Murphy et al., 1997)					
5- (Gupta et al, s.d.)								

Para Shi e Qian (2000) e SHIH et al. (2004) minerais comumente encontrados em escórias de aciaria são: Olivine - $(\text{Mg},\text{Fe})_2\text{SiO}_4$, merwinite - $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$, $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S), $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S), 4CaO , $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ (C_4AF), $2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ (C_2F), CaO , FeO , MnO , MgO em solução sólida (fase RO) e CaO livre.

A Figura 3.5 mostra a DRX da escória analisada por QIAN et al. (2002).

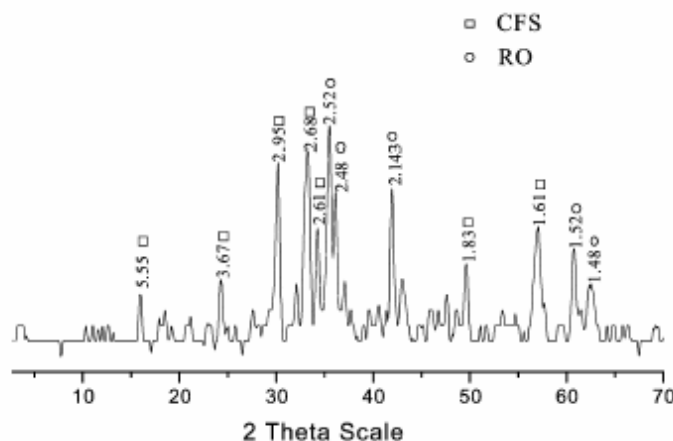


Figura 3.5 - DRX de escória da aciaria EAF de Singapura (QIAN et al., 2002)

Há uma grande diferença entre os compostos encontrados pelos diferentes autores que usaram a difração de raios X para identificar as fases presentes na escória de aciaria LD. As mais frequentemente encontradas e presentes em quase todas as pesquisas são a larnita, o silicato tricálcico, a gehlenita, o periclásio, a wuestita e a magnetita. As outras fases aparecem apenas em alguns dos estudos pesquisados, talvez porque elas existam em pequenas quantidades, nem sempre identificadas pelo pesquisador.

Existem, ainda, alguns compostos que foram encontrados apenas por um dos pesquisadores consultados, como é o caso do estudo de escória de aciaria LD onde Gupta et al. (s.d.) identificaram a presença de halita, marcassita, piritita e dolomita. Amaral (1999) encontrou etringita na escória de aciaria EAF.

3.4.3 Microscopia eletrônica de varredura

Por meio da microscopia eletrônica de varredura, Murphy et al. (1997) observaram que as amostras de escórias de aciaria sintética e LD, resfriadas rapidamente, possuem uma superfície relativamente vítrea e com muitas microfissuras. A análise desse material por EDS mostrou algumas regiões com cristais de C_2S e C_3S na matriz vítrea. O periclásio também foi encontrado na amostra amorfa.

Ao contrário, a amostra bem cristalizada, com diversos picos no diagrama de DRX, apresentou grãos de silicatos de cálcio (C_3S predominando sobre o C_2S) bem definidos, com diferentes relações Ca/Si. Por meio do EDS foi possível verificar que a matriz é basicamente uma fase calcio-alumino-ferrita, com outros elementos em solução (MURPHY et al., 1997).

O periclásio aparece como manchas escuras, o que está de acordo com as microfotos de elétrons retroespalhados (MURPHY et al., 1997).

A MEV também foi utilizada por Polisseni (2002), que estudou uma amostra sob a forma de pó (passando na peneira # 200) e outra sob a forma de fratura, extraída de um grão de escória de aciaria. Foram observadas as diferentes morfologias dos componentes das amostras, sendo que, na fratura, a amostra tem uma aparência menos cristalizada e a composição elementar é mais uniforme (Ca, Si, Al, Fe, Mn e Mg em todas as regiões analisadas), mas as proporções são variáveis. Segundo o pesquisador a amostra parecia estar com um depósito na superfície e talvez a análise seja resultado dessa camada superficial.

Polisseni (2002) cita que, ao contrário da fratura, a amostra em pó apresenta-se melhor cristalizada e com morfologias e composições diferentes, incluindo uma bem arredondada [Ca (79%), Si e Fe]. A morfologia, sob a forma de um cristal, aparenta uma fratura ou deterioração e contém Ca, Al, Fe (89%), Mn e Mg. Uma outra região, de granulação bem miúda, contém os mesmos elementos. Ao lado dessa cristalização, aparece um cristal, comparativamente bem maior, cuja análise mostrou Ca (42%), Si, Al, Fe, Mn, Mg e Ti. Uma foto do que parece ser da mesma região, com um aumento bem menor, mostra, em sua análise, a presença de Ca (74%), Si, Fe, Mg e Pt (POLISSENI, 2002). POLISSENI (2002) não comenta as observações microscópicas e apenas mostra as fotos e as análises por EDS.

Goldring e Juckes (1997), em seu estudo por meio da MEV, fizeram as seguintes observações:

- 1) Em locais com a composição próxima do Ca_2SiO_4 , o Si é, muitas vezes, substituído pelo P.
- 2) As formas observadas para os diferentes componentes são citadas a seguir, porém as microfotos não possuem escala e nem o aumento utilizado, o que dificulta a interpretação.

2.1. C₂S - cristal arredondado

2.2. Melite - cristais retangulares intersticiais, com muitas micro inclusões

2.3. Periclásio - textura refratária original

2.4. Fase cal - microfissurada cercada de C₂S e fase cal esponjosa.

De acordo com esses autores, as morfologias das fases mais comuns observadas são as seguintes (GOLDRING; JUCKES, 1997):

Fase cal:

- Granular: cristais arredondados ou losangos, com 10 a 100 µm
- Esponjosa: cristais com forma indeterminada e extremamente irregular
- Nas extremidades da fase (Ca, Mg): finos filmes de 1 a 2 µm
- C₃S: plaquetas pequenas (com até 5 µm), frequentemente alinhadas nos planos do cristal

Periclásio:

- Grãos arredondados (10 a 100 µm)
- Como inclusão no C₃S

Metal:

- Pequenas esferas de Fe metálico com 0,5 a 3 mm
- Finos filmes na matriz da escória

3.4.4 Análises térmicas

A **termogravimetria** foi utilizada nos estudos realizados por Kneller et al. (1994). A temperatura máxima de aquecimento usada pelo pesquisador foi de 1400° C e a massa da amostra foi de 9 a 10mg, com graduação obtida na peneira #325. Na curva da TG, foram observadas desidratação da portlandita e a dissociação do CaCO₃, sendo a primeira aproximadamente entre 400 e 460° C e a segunda entre 490 e 785° C. As reações são as seguintes:





Por meio da mesma técnica (TG), Machado (2000) determinou a perda de massa da escória de aciaria, chegando aos resultados mostrados no Quadro 3.12.

Quadro 3.12 - Espécies identificadas na escória de aciaria, por meio da termogravimetria (MACHADO, 2000).

Espécie	Fórmula	Intervalo (° C)	Teor (%)
Água livre	H ₂ O _{livre}	25-150	0,80
Brucita	Mg(OH) ₂	150-468	0,63
Portlandita	Ca(OH) ₂	468-517	0,77
Carbonatos (Ca e Mg)	CaCO ₃ ou MgCO ₃	517-733	0,61
Outras perdas		733-1550	0,17
Total		25-1550	2,98

Machado (2000), utilizando a análise térmica diferencial, identificou alguns eventos (Quadro 3.13).

Quadro 3.13 - Características observadas por meio da curva de ATD (MACHADO, 2000)

Pico	Reação	Temperatura (° C)	Evento
1	Endotérmica	200	Saída de água livre
2		450	Início de decomposição dos produtos hidratados
3	Endotérmica	1200	Fusão do material
4	Endotérmica	1550	Mudança das condições de temperatura no equipamento
5	Endotérmica	Resfriamento	Ponto de solidificação da escória

3.5 Considerações sobre o capítulo

Os métodos de ensaio são propostos segundo as aplicações da escória de aciaria. Assim, o método deve submeter o material analisado a condições semelhantes às aquelas encontradas quando da sua aplicação, havendo, portanto, diferenças quanto à granulometria do material analisado, à temperatura, ao tempo de ensaio, e à forma de

interação com outros elementos que constituem os corpos-de-prova de diferentes dimensões e formas. O Quadro 3.14 mostra as principais características dos ensaios de determinação do potencial de expansão.

Quadro 3.14 - Características dos principais métodos de determinação do potencial de expansão das escórias de aciaria

Métodos	Características
ASTM D 4792/00	Energia de compactação: Proctor Normal; Mecanismo de aceleração da expansão: Imersão em água aquecida; Temperatura de imersão: $70 \pm 3^{\circ}\text{C}$; Período ensaio: 07 dias (mínimo); Limite de expansão: 0,5% (aos 07 dias).
JIS A 5015/92	Energia de compactação: Proctor Modificado; Mecanismo de aceleração da expansão: Imersão em água, com períodos diários de aquecimento de 6 horas; Temperatura de imersão: $80 \pm 3^{\circ}\text{C}$; Período de ensaio: 10 dias; Limite de expansão: 2,0%; Observação: granulometria específica.
PTM 130/78	Energia de compactação: Proctor Normal; Mecanismo de aceleração da expansão: Imersão em água aquecida e aquecimento em estufa; Temperatura de imersão: $71 \pm 3^{\circ}\text{C}$; Período de imersão: 07 dias; Período de aquecimento em estufa: 07 dias; Limite de expansão: 3,0% no Brasil e 0,5% no EUA.
Le Chatelier NBR 11582/91	Traço de argamassa de escória e cimento; Mecanismo de aceleração da expansão: imersão em água; Temperatura de imersão: temperatura ambiente e 100°C ; Período de imersão à temperatura ambiente: 24 horas; Período de imersão a 100°C : 3h a 5h (apenas no ensaio a quente); Obs.: limite não normalizado para escória de aciaria;
Autoclave JIS R2211	Conformação do corpo-de-prova: pressão de $2 \times 10^6 \text{ kg/m}^2$ (215°C) Cura úmida por 16 horas; Mecanismo de aceleração da expansão: vapor e variação de pressão em autoclave; Período em autoclave: 1 hora com aumento de pressão e 2 horas com redução de pressão;
BS EM 1744-1:1998	Energia de compactação: Proctor normal; Mecanismo de aceleração da expansão: Percolação de vapor pela amostra; Temperatura do vapor: 100°C ; Período de ensaio: 24h ou 168 horas; Limite de expansão: não normalizado. Observação: granulometria específica.

Dessa forma, o Quadro 3.15 mostra os principais ensaios para a avaliação da expansibilidade da escória de aciaria, assim como sua origem e alguns de seus pontos fortes e fracos.

Quadro 3.15 - Principais ensaios para avaliação da expansibilidade da escória da aciaria

Ensaio	Pontos fortes	Pontos fracos		Origem
ASTM D 4792	existe normalização específica	ensaio lento	falta de fundamentação científica	Ensaio com base no ensaio de compactação
		difícil execução	ineficácia dos resultados do CBR	
		grande dispersão de resultados		
JIS 5015 ANEXO 2	existe normalização específica	ensaio lento	falta de fundamentação científica	
		difícil execução	ineficácia dos resultados do CBR	
		grande dispersão de resultados	falta de especificação do método de cura	
PTM 130 DMA-1/DER-MG	existe normalização específica	grande dispersão de resultados		
	cp's e sobrecargas menores	falta de fundamentação científica		
	ensaio mais simples	ineficácia dos resultados do CBR		
LE CHATELIER a quente	execução rápida e simples	menor influência do MgO	falta de normalização específica	Expansibilidade em cimentos
	menor duração que o ensaio a frio	resultados pouco expressivos	carbonatação devido à moagem	
	melhor influência do CaO	carbonatação da amostra	não é adequado à pavimentação	
LE CHATELIER a frio	execução rápida e simples	menor influência do CaO	falta de normalização específica	
	melhor influência do MgO	resultados pouco expressivos	carbonatação devido à moagem	
		carbonatação da amostra	não é adequado à pavimentação	
ASTM C151 (Autoclave)	tempo de ensaio reduzido	resultados exagerados	depende de equipamento para autoclave	
		questionáveis condições de ensaio	avalia qualitativamente a expansão da escória e não quantitativamente	
		falta correlação com a estabilidade volumétrica do concreto		
STEAM TEST	comprovada coerência entre o resultado do ensaio e o de campo	depende de equipamento específico		Desenvolvimento específico
	método desenvolvido para escória de aciaria			

Para a utilização da escória de aciaria para base e sub-base de pavimentos não seria aplicável a análise da expansão por meio de ensaios como o de Le Chatelier (NBR 11582/91) porque utiliza a escória de aciaria em conjunto com pasta de cimento Portland e foram desenvolvidos para esse fim.

Por sua vez, o ensaio em autoclave não é recomendado, pois expõe os corpos-de-prova a temperaturas e pressões extremas (215°C e $2 \times 10^6 \text{ kg/m}^2$), podendo, com isso, alterar as características dos materiais e, ainda, ocasionar reações que não seriam observadas caso os corpos-de-prova fossem expostos a condições consideradas normais, como em pavimentação.

O *Steam Test* é um ensaio promissor, já normalizado na Europa para determinação do potencial de expansão de escórias de aciaria e, no Brasil, precisa ser melhor estudado.

O conhecimento da expansibilidade por meio de ensaios de laboratório é fator fundamental para controle de qualidade da aplicação em pavimentação.

Para a aplicação em pavimentação, por exemplo, o ensaio de expansibilidade é uma simulação aproximada das condições tais como grau de compactação, umidade e sobrecargas. Estes são itens que interferem na expansibilidade e precisam ser considerados nestes ensaios, validando a aplicação para este fim. É relevante destacar também que, devido à heterogeneidade da escória de aciaria, é bastante difícil a comparação de resultados de ensaio de diferentes lugares e materiais.

A expansibilidade da escória de aciaria é o principal problema que dificulta a sua utilização como agregado para pavimentação. A caracterização da microestrutura é uma ferramenta para desenvolver o conhecimento sobre os mecanismos de reação que causam o problema de expansão volumétrica e, além disso, pode ser utilizada para caracterização e controle de lotes de escória destinados à aplicação. Sendo assim, a identificação dos compostos pela caracterização da microestrutura é ferramenta para desenvolver o uso da escória de aciaria.

A análise química, a difração de raios X, a microscopia eletrônica de varredura e as análises térmicas são as principais técnicas que podem ser utilizadas para caracterização da microestrutura.

A análise química fornece a composição química centesimal do material. Há inúmeros métodos para determiná-la e sua escolha deve levar em conta o teor do óxido a ser determinado. Quanto menor a quantidade do componente, maior deve ser a sensibilidade da técnica adotada para determiná-la (RIBAS SILVA, 1990)

A difração de raios X permite a identificação dos compostos cristalizados (inclusive as formas alotrópicas) presentes na amostra analisada (RIBAS SILVA, 1990).

A microscopia eletrônica de varredura permite a observação dos seguintes aspectos da escória de aciaria: textura do material, morfologia e distribuição dos compostos, além do aspecto geral da amostra. O MEV deve ser utilizado com o EDS, possibilitando a análise elementar das fases observadas e, conseqüentemente, a sua identificação. A multiplicidade de fases que tem morfologias similares, sem a análise dos seus componentes, pode conduzir a uma identificação errônea (RIBAS SILVA, 1990).

Devido à heterogeneidade da escória e também às pequenas dimensões das amostras utilizadas na caracterização da microestrutura é aconselhável que se analise e observe um número grande de partículas retiradas da amostra de campo, de modo a comprovar a presença do número maior possível de compostos.

4 MATERIAIS, MÉTODOS E PROJETO EXPERIMENTAL

4.1 Introdução

Este capítulo tem por objetivo descrever as amostras de escória de aciaria LD e EAF utilizadas neste estudo, apresentando informações como procedência, processos de geração, de resfriamento e de britagem. São apresentadas, ainda, as datas de geração das amostras nas usinas e de recebimento das mesmas no LEMAC – Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção da Universidade Federal do Espírito Santo.

Também tem por objetivo apresentar a metodologia utilizada para determinação dos parâmetros de caracterização física, microestrutural e de avaliação do potencial de expansão das escórias de aciaria inseridas no estudo.

O desenho metodológico da pesquisa é quantitativo, pois são determinadas medidas de expansibilidade e dos parâmetros de caracterização física. Além disso, é também, qualitativo na caracterização da microestrutura do material.

Os ensaios de caracterização física utilizados na pesquisa são executados conforme a metodologia definida pela ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. São executados no LEMAC – Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção.

O ensaio de determinação do potencial de expansão das escórias de aciaria pelo método *Steam Test* é executado de acordo com a norma europeia EN 1744-1:1998.

As análises de caracterização da microestrutura são realizadas em outras instituições (UFMG, ABCP e UFSC) e os resultados são analisados.

4.2 Escórias de aciaria utilizadas

As escórias de aciaria utilizadas na pesquisa são provenientes de siderúrgicas localizadas na região sudeste, conforme mostra a Figura 4.1. Essa região possui a maior produção de aço e, conseqüentemente, maior geração de escória, no Brasil. Com base na estatística preliminar do Instituto Brasileiro de Siderurgia para 2006, a produção de aço bruto nos Estados de Minas Gerais, São Paulo, Espírito Santo e Rio de Janeiro, foi respectivamente, 38,6%, 20,3%, 18,3% e 16,4%. Os outros estados produzem apenas 6,5%.

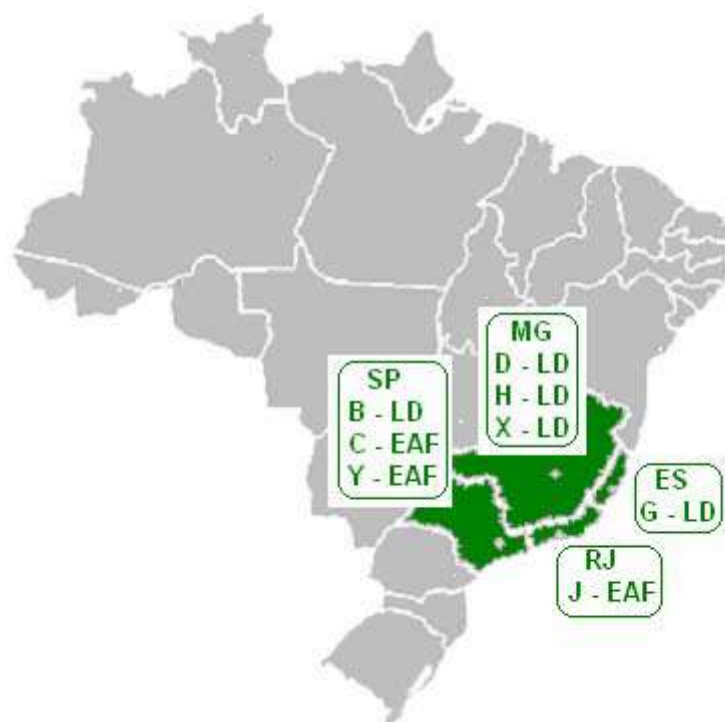


Figura 4.1 - Local de geração das amostras de escória de aciaria utilizadas

Em 2006 foram produzidas $30.910,1 \times 10^3$ toneladas de aço. Aproximadamente 75% pelo processo LD e 25% pelo processo EAF (IBS, 2007). São utilizadas na pesquisa oito amostras de escória de aciaria, cinco amostras LD e três amostras EAF (Quadro 4.1). Dessa forma, as amostras escolhidas para o estudo representam a geração de escória no Brasil.

Quadro 4.1 - Escórias de aciaria não tratadas: tipo e nome das amostras

Tipo	Amostra
LD	B
	D
	G
	H
	X
EAF	C
	J
	Y

4.2.1 Geração e processamento inicial

As escórias de aciaria utilizadas no estudo, em sua maioria, foram geradas no período de junho a dezembro de 2003. Apenas as amostras X e Y foram geradas no mês de maio de 2004. O Quadro 4.2 mostra as datas de geração das amostras de escória de aciaria.

Quadro 4.2 - Data de geração e recebimento das amostras de escória de aciaria

Tipo de escória	Amostra	Data de geração
LD	B	6/08/2003
	D	23 e 24/08/03
	G	31/07/03 a 08/08/03
	H	28/07/2003
	X	18 e 19/05/04
EAF	C	5/08/2003
	J	02 a 5/11/03
	Y	3 e 10/05/2004

O Quadro 4.3 contém informações referentes ao processamento das amostras nas usinas, obtidas através de uma Ficha de Controle de Amostragem, enviada às usinas em conjunto com o Procedimento de amostragem.

Quadro 4.3 - Informações sobre processamento das amostras de escória de aciaria

Amostra	Tipo	Resfriamento	Britagem
B	LD	com água	britador
D		com água industrial	planta separadora
G		jato de água	britador de mandíbula
H		adição de água por 24h	apenas peneiramento
X		jato de água	britador de mandíbula
C	EAF	jato de água / ao ar livre	planta separadora magnética
J		chuveiro	britador
Y		jato de água / ao tempo	somente grelha

Depois de geradas, as escórias são processadas de acordo com o procedimento usual de cada usina e não sofrem nenhum tipo de tratamento para a redução da expansibilidade.

4.3 Amostragem e preparação das amostras

A representatividade das amostras em relação ao lote inicial deve ser garantida e, para isso, é utilizado um procedimento específico descrito a seguir. A redução da amostra para obtenção das amostras de ensaio é tão criteriosa quanto a amostragem inicial, pois com elas são realizados os ensaios de caracterização física, as análises de microestrutura e o ensaio de expansibilidade.

4.3.1 Amostragem nas usinas

A coleta de amostra de escória de aciaria nas usinas para posterior realização dos ensaios e análises é realizada com base em procedimento de amostragem elaborado por professores da UFES com atenção às seguintes normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas: NBR NM 26/01 - Amostragem de agregados, NBR 10007/04 - Amostragem de resíduos sólidos, além de considerar o critério estatístico (SOUZA et al., 2003). A norma NBR NM 26/01 é indicada para consulta pelo DNIT – Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes, na especificação de material DNER EM 262/94 – Escória de aciaria para pavimentos rodoviários. O ANEXO I mostra o documento *Procedimento de Amostragem* e a Figura 4.2 mostra o fluxograma resumido.

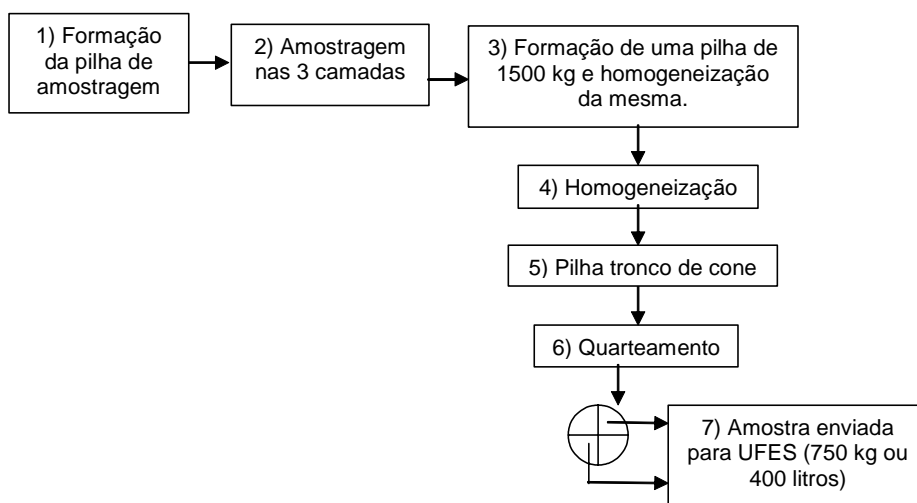


Figura 4.2 - Amostragem da escória de aciaria nas usinas.

O Quadro 4.4 mostra a data da amostragem das escórias de aciaria nas usinas

Quadro 4.4 - Data de realização da amostragem nas usinas e de recebimento na UFES das escórias de aciaria

Tipo	Amostra	Data de amostragem nas usinas	Data de recebimento na UFES
LD	B	08/08/2003	14/08/2003
	D	26/08/2003	27/08/2003
	G	18/08/2003	3/09/2003
	H	11/08/2003	9/09/2003
	X	22/05/2004	28/05/2004
EAF	C	07/08/2003	21/08/2003
	J	6/11/2003	10/11/2003
	Y	12/05/2004	8/06/2004

4.3.2 Quarteamento

As amostras são recebidas no LEMAC - Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção da Universidade Federal do Espírito Santo e são devidamente identificadas e armazenadas (Figura 4.3). Em seguida é realizada a redução da amostra de campo para os diversos ensaios especificados, por procedimento de acordo com a NBR NM 27/00 - Redução de amostras de campo de agregados para ensaios de laboratório.

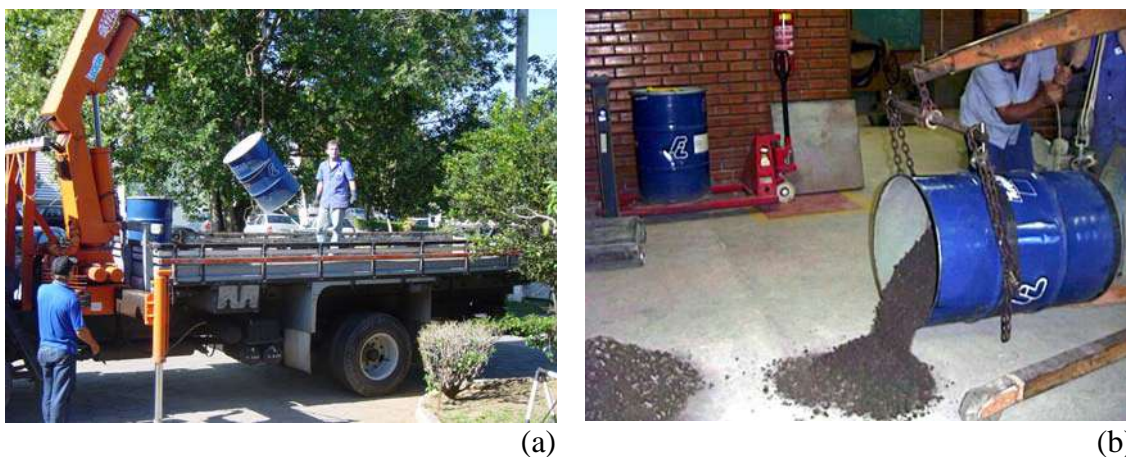


Figura 4.3 - (a) Chegada de amostras no LEMAC e (b) formação de montes

A Figura 4.4 mostra o processo de quarteamento das amostras de escória de aciaria.



Figura 4.4 - (a) Vista dos cinco montes (b) e coleta de amostra parcial para formar pilha de homogeneização

A homogeneização e o quarteamento são constituídos das seguintes etapas: cada tonel é despejado em 05 montes; em seguida, cada monte é homogeneizado e, de cada monte, são coletadas amostras parciais para constituição da amostra de cada ensaio; as amostras parciais são devidamente acondicionadas em sacos plásticos e identificadas através de etiquetas com código da amostra e nome do ensaio.

A Figura 4.5 mostra o fluxograma do quarteamento das amostras de escória de aciaria.

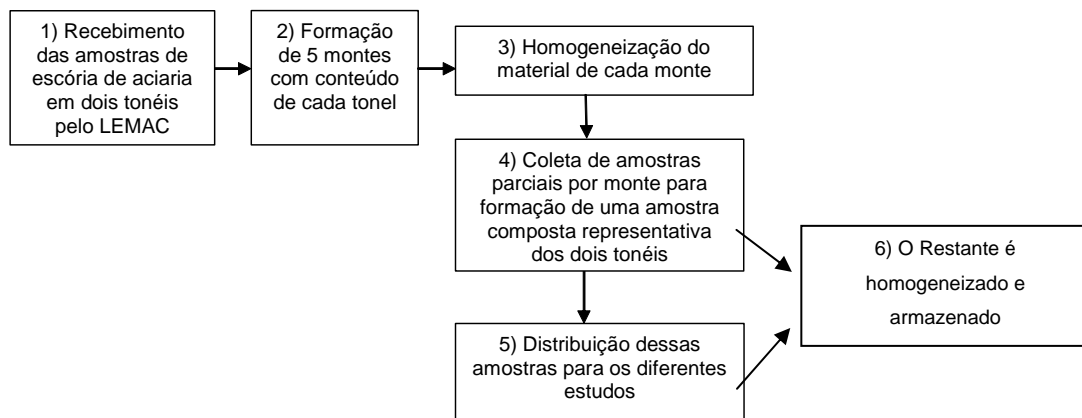


Figura 4.5 - Fluxograma do quarteamento das amostras de escória de aciaria no LEMAC

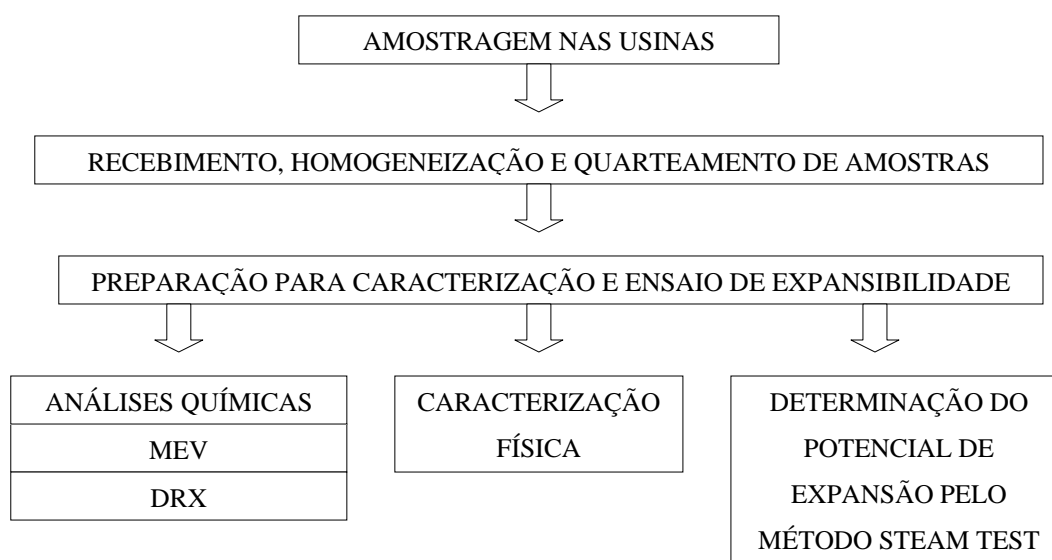
O Quadro 4.5 mostra a data de recebimento e de realização da homogeneização e do quarteamento das escórias.

Quadro 4.5 - Datas de recebimento e de realização da amostragem das escórias de aciaria

Tipo	Amostra	Data de recebimento	Data de quarteamento
LD	B	14/08/2003	26/08/03
	D	27/08/2003	10/09/03
	G	3/09/2003	19/09/03
	H	9/09/2003	24/09/03
	X	28/05/2004	09/06/04
EAF	C	21/08/2003	01/09/03
	J	10/11/2003	20/11/03
	Y	8/06/2004	28/06/04

4.4 Métodos e projeto experimental

Na parte experimental deste estudo são realizadas as atividades apresentadas no fluxograma da Figura 4.6. As escórias de aciaria LD e EAF, após o quarteamento, são separadas em sacos plásticos e identificadas de acordo com a sua origem. Além disso, as amostras destinadas a cada tipo de análise ou ensaio são também separadas e identificadas.

**Figura 4.6 - Fluxograma do programa experimental**

4.4.1 Caracterização física das escórias de aciaria

As características físicas da escória de aciaria são determinadas através de ensaios realizados no Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção – LEMAC, do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, de acordo com as respectivas normas da ABNT (Quadro 4.6).

Quadro 4.6 - Parâmetros de caracterização física e suas respectivas normas

Parâmetros		Normas da ABNT
1	Granulometria	NM 248/03
2	Absorção	NBR 9937/87
3	Massa específica aparente seca agregado graúdo	
4	Massa específica aparente saturada superfície seca agregado graúdo	
5	Massa específica real agregado graúdo	
6	Massa específica real agregado miúdo	NBR 9776/87
7	Massa específica real de agregado	NBR 9776/87, NBR 9937/87 e NM 248/03
8	Abrasão Los Angeles	NM 51/00
9	Esmagamento	NBR 9938/87
10	Massa unitária	NBR 7251/82
11	Massa unitária compactada	NBR 7810/83
12	Umidade	-

Para os ensaios de caracterização física são atendidas as especificações de repetições estabelecidas pelas respectivas normas de caracterização de agregados da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Os parâmetros abrasão Los Angeles, absorção, massa específica aparente seca do agregado graúdo e massa unitária, pela especificação do DNIT – Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes (DNER EM 262/94) devem ser caracterizados de acordo com as respectivas normas da ABNT citadas acima.

O número de repetições por ensaio está disposto no Quadro 4.7.

Quadro 4.7 - Número de repetições por ensaio em cada amostra de escória de aciaria

Parâmetro ¹	LD					EAF		
	B	D	G	H	X	C	J	Y
Granulometria	2	2	2	2	2	2	2	2
Absorção	1	1	1	1	1	1	1	1
Massa específica aparente seca agregado graúdo	1	1	1	1	1	1	1	1
Massa específica aparente saturada superfície seca agregado graúdo	1	1	1	1	1	1	1	1
Massa específica real agregado graúdo	1	1	1	1	1	1	1	1
Massa específica real agregado miúdo	2	2	2	2	2	2	2	2
Abrasão Los Angeles	1	1	1	1	1	1	1	1
Esmagamento	2	2	2	2	2	2	2	2
Massa unitária	3	3	3	3	4	3	4	4
Massa unitária compactada	3	3	3	3	4	3	4	4
Umidade	2	2	2	2	2	2	2	2

4.4.1.1 Granulometria

A composição granulométrica do material é determinada de acordo com o método prescrito pela NM 248/03 para agregados. São utilizadas as séries normal e intermediária de peneiras a partir da abertura de malha de 37,5mm. O Quadro 4.8 mostra as séries completas de peneiras normal e intermediária de acordo com a NM 248/03.

Cada amostra de escória de aciaria é cuidadosamente homogeneizada e quarteada. São utilizadas duas amostras para o ensaio, conforme a NM 248/03 que determina a quantidade de massa necessária para cada amostra.

¹ O parâmetro massa específica real do agregado é calculado com base nos resultados dos parâmetros massa específica real do agregado graúdo, massa específica real do agregado miúdo e granulometria, portanto não há número de repetições.

Quadro 4.8 - Séries de peneiras (NM 248/03)

Abertura de malha	
Série Normal	Série Intermediária
75 mm	-
-	63 mm
-	50 mm
37,5 mm	-
-	31,5 mm
-	25 mm
19 mm	-
-	12,5 mm
9,5 mm	-
-	6,3 mm
4,75 mm	-
2,36 mm	-
1,18 mm	-
600 μm	-
300 μm	-
150 μm	-

As amostras para determinação da granulometria são secas em estufa e, após o resfriamento à temperatura ambiente, são determinadas suas respectivas massas (m_1 e m_2). Toma-se a amostra m_1 e reserva-se a m_2 .

Para execução do ensaio, as peneiras limpas são encaixadas de modo a formar um único conjunto (Figura 4.7 a). Coloca-se a amostra (m_1) ou porções da mesma sobre a peneira superior do conjunto. Promove-se a agitação mecânica do conjunto por um tempo razoável para permitir a separação e a classificação prévia dos diferentes tamanhos de grão da amostra. Após esta etapa, a peneira superior do conjunto (com tampa e fundo falso encaixados) é destacada e agitada manualmente até que, após um minuto de agitação contínuo, a massa de material passante pela peneira seja inferior a 1% da massa do material retido anteriormente nesta peneira.



Figura 4.7 - (a) Peneirador mecânico e conjunto de peneiras (b) e execução do ensaio

Remove-se o material retido na peneira para uma bandeja identificada. Para remoção do material preso na peneira, a tela é escovada em ambos os lados (interno e externo). O material removido pelo lado interno é considerado como retido e o despreendido na parte inferior é considerado como passante.

Este procedimento de agitação manual e limpeza é repetido para todas as peneiras. É determinada a massa de material retido em cada uma das peneiras e no fundo do conjunto. Para que o ensaio esteja correto, calcula-se o somatório de todas as massas que não deve diferir mais de 0,3% da massa total inicial.

Após o término do ensaio com a amostra m_1 procede-se ao peneiramento da segunda amostra, de massa m_2 .

Para cada uma das amostras de ensaio, calcula-se a porcentagem retida, em massa, em cada peneira, com aproximação de 0,1%. As amostras devem apresentar necessariamente a mesma dimensão máxima característica² e, nas demais peneiras, os valores de porcentagem retida individualmente não devem diferir mais de 4% entre si.

² A dimensão máxima característica corresponde a abertura nominal (mm) da malha da peneira da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5%.

Caso isto ocorra, o peneiramento é repetido para outras amostras da mesma escória até atender a esta exigência. Calculam-se as porcentagens médias, retida e acumulada, em cada peneira com aproximação de 0,1%.

4.4.1.2 Absorção

A absorção do agregado³ graúdo é determinada de acordo com o método prescrito pela NBR 9937/87 para esta fração de material. O agregado graúdo é lavado completamente para que ocorra a remoção do material pó ou outro material da superfície. Em seguida, é seco em estufa, até massa constante e resfriado à temperatura ambiente. A massa mínima a ser ensaiada varia de acordo com o tamanho dos grãos do material e é definida na norma. O material, após a secagem, é pesado (massa do material seco) e, em seguida, submerso em água, por um período de (24 ± 4) h. Concluído o período de submersão, o material é retirado da água e envolvido em um pano absorvente para eliminar a água livre visível. Imediatamente após essa secagem superficial, o material é pesado novamente (massa do material na condição saturado superfície seca). A absorção é dada pela diferença entre a massa do material na condição saturado superfície seca e a massa do material seco, dividida pela massa do material seco.

O índice de absorção reflete a quantidade de água que o material retém em seus poros permeáveis, permitindo avaliar o consumo de água para atingir a saturação do mesmo. Elevados índices de absorção podem indicar materiais mais susceptíveis à deterioração por intemperização e ocorrência de reações desencadeadas pela presença de água, tais como oxidação e redução, entre outras. Em consequência dessa deterioração, o material apresentará tendência a não manutenção de propriedades de resistência. A permanência dessas propriedades é requisito fundamental para utilização para pavimentação, seja como base ou sub-base.

4.4.1.3 Massa específica

A massa específica do agregado graúdo é determinada de acordo com o método prescrito pela NBR 9937/87 para esta fração de material. O agregado graúdo é lavado completamente para que ocorra a remoção de pó ou outro material da superfície. Em

³ Na descrição da metodologia de realização dos ensaios, considera-se agregado a escória de aciaria (agregado siderúrgico).

seguida é seco em estufa até massa constante e resfriado à temperatura ambiente [Figura 4.8 (a)].

A massa mínima a ser ensaiada varia de acordo com o material e tem condições definidas na norma. O material, após a secagem, tem sua massa determinada (massa do material seco) e, em seguida, é submergido em água por um período de 24 ± 4 h.

Concluído o período de imersão, o material é retirado da água e envolvido em um pano absorvente para eliminar a água livre visível. Imediatamente após essa secagem superficial, determina-se sua massa (massa do material na condição saturado superfície seca). O material é colocado em um recipiente, especificado pela norma, é imerso e sua massa medida (massa imersa em água) Figura 4.8 (b).

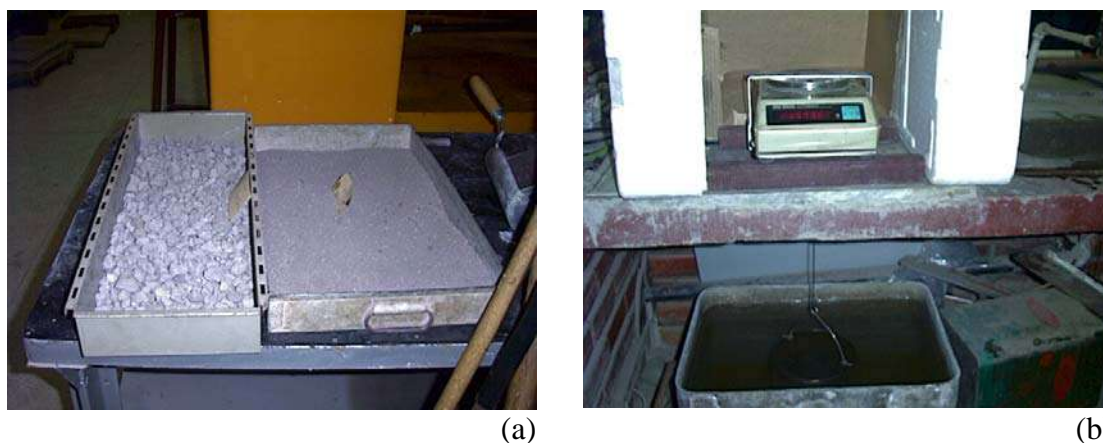


Figura 4.8 - (a) Frações graúda e miúda para realização de ensaios de massa específica e absorção (b) e pesagem hidrostática

A massa específica aparente seca do agregado graúdo é determinada pelo quociente da massa do material seco pelo seu volume aparente, sendo este composto pelo volume do material, incluindo os volumes dos poros permeáveis e impermeáveis.

A massa específica real do agregado graúdo é determinada pelo quociente da massa do material seco pelo seu volume, considerando neste, o volume do material e dos poros impermeáveis. A massa específica real do agregado total é uma média ponderada da massa específica real do agregado miúdo e do graúdo, considerando os percentuais das frações graúda e miúda, determinadas pela composição granulométrica.

A massa específica aparente saturada superfície seca do agregado graúdo é determinada pelo quociente da massa do material saturado com superfície seca pelo seu volume aparente, composto pelo volume do material, incluindo os volumes dos poros permeáveis e impermeáveis.

A massa específica do agregado miúdo é determinada de acordo com o método prescrito pela NBR 9776/87 para esta fração de material. O agregado miúdo é seco em estufa até massa constante (massa do material seco). O frasco especificado pela norma é preenchido com água até a marca de 200 cm³ e mantido em repouso.

Em seguida, é introduzida, no frasco, a quantidade de 500 g de agregado miúdo seco conforme Figura 4.9 (a) (massa do material seco), agitando-se o frasco para eliminação de bolhas de ar. A leitura do nível atingido pela água no gargalo do frasco indica o volume, em cm³, ocupado pelo conjunto água-agregado miúdo [Figura 4.9 (b)]. Essa medida, diminuída de 200 cm³ da marca de água inicial, representa o volume real do material (o volume dos sólidos mais o volume de vazios impermeáveis).

A massa específica real do agregado miúdo é dada pelo quociente da massa do material seco pelo volume real do material.



(a)



(b)

Figura 4.9 - (a) Preenchimento do frasco com agregado miúdo (b) e leitura do nível atingido pela água

A massa específica é uma característica física que determina a massa do material por unidade de volume. Para materiais utilizados em pavimentação, massas específicas elevadas trazem maior confinamento para as camadas inferiores, melhorando, por exemplo, no caso de sub-base, as condições do leito, propiciando-lhe maior resistência e reduzindo a compressibilidade e o desgaste. É importante ressaltar que massas

específicas muito elevadas podem ser problemáticas com relação ao custo do transporte, uma vez que a carga dos veículos destinados a este fim é limitada.

O parâmetro massa específica real do agregado é determinado através da ponderação da massa específica real do agregado graúdo e da massa específica real do agregado miúdo.

4.4.1.4 Abrasão Los Angeles e esmagamento

A abrasão Los Angeles é determinada de acordo com o método prescrito pela NBR NM 51/00. Conforme a graduação da amostra, o material é pesado nas frações definidas pela norma, seco em estufa e colocado, juntamente com a carga abrasiva, dentro do tambor cilíndrico da máquina Los Angeles. O equipamento é acionado e o tambor gira entre 30 rpm e 33 rpm, até completar 500 ou 1000 rotações, conforme graduação. Em seguida, retira-se o material (Figura 4.10) e este é passado na peneira com abertura de malha de 1,7 mm. A fração retida nessa peneira é lavada, seca em estufa e pesada com precisão de 1 g.



Figura 4.10 - Máquina de abrasão Los Angeles, carga abrasiva e material retirado ao final da 500 rotações.

A abrasão Los Angeles é a porcentagem de perda por abrasão obtida pela diferença entre a massa inicial seca e a massa final seca retida na peneira de abertura de malha de 1,7mm. Representa a resistência mecânica do material ao desgaste promovido pelo atrito recíproco do material e da carga abrasiva na máquina Los Angeles. O conhecimento dessa característica do material é fundamental para utilização do mesmo em pavimentação, pois mostra a capacidade de resistir às solicitações dinâmicas de tráfego, sem sofrer desgaste e ruptura dos grãos.

O índice de esmagamento é determinado de acordo com o método prescrito pela NBR 9938/87. A quantidade de material utilizada nesse ensaio corresponde àquela que passar na peneira de abertura de malha igual a 12,5 mm e contenha 10 kg retidos na peneira de abertura de malha igual a 9,5 mm. Esse material é seco em estufa por 24 h e esfriado até a temperatura ambiente.

Após esse procedimento, o material é peneirado novamente através das peneiras 12,5 mm e 9,5 mm e com a fração de material retida na peneira 9,5 mm preenche-se um recipiente cilíndrico, especificado na norma, em três camadas sucessivas, aplicando-se em cada uma 25 golpes com a haste de socamento, também especificada na norma. Em seguida, determina-se a massa desse material que preenche o cilindro (massa inicial do material seco antes do ensaio).

O material é transferido para o recipiente cilíndrico de ensaio com igual procedimento de compactação. Um êmbolo é inserido no cilindro de ensaio sobre o material e logo após o conjunto é colocado no prato inferior da máquina de ensaio, especificada pela norma, onde aplica-se uma carga de 400 kN, uniformemente, à razão de (40 ± 5) kN por minuto. Após aplicar a carga total, o conjunto é retirado da máquina de ensaio e todo o material contido no cilindro é removido para uma bandeja limpa.

O material é passado na peneira de abertura de malha igual a 2,4 mm e é determinada a massa do material retido. O índice de esmagamento é determinado pelo percentual de material fragmentado por esmagamento, obtido pela diferença entre a massa seca inicial e massa seca final retida na peneira 2,4 mm, em relação à sua massa inicial seca.

O índice de esmagamento representa uma resistência mecânica do material quando submetido a uma carga que origina tensões de contato entre os grãos e gera a fragmentação dos mesmos. Para a utilização em pavimentação, essa característica tem importância também relacionada à capacidade do material de resistir às solicitações dinâmicas de tráfego, tensões de contato entre os grãos e sofrer desgaste e esmagamento.

4.4.1.5 Massa unitária

A massa unitária do agregado em estado seco é determinada de acordo com o método prescrito pela NBR 7251/82. A quantidade de material deve ser, pelo menos, o dobro do volume do recipiente de forma paralelepípedica, especificado pela norma. Sempre que o

material não estiver em estado seco, é indicado o teor de umidade correspondente. O recipiente é preenchido, por meio de concha ou pá, sendo o material lançado de uma altura de 10 a 12 cm do topo do recipiente. A superfície do agregado é regularizada, de modo a compensar as saliências e reentrâncias, ou alisada com régua. O recipiente é pesado com o material nele contido. A massa do agregado solto é a diferença entre a massa do recipiente cheio e a massa do recipiente vazio. A massa unitária é a relação entre a massa seca do material lançado no recipiente e o volume deste recipiente. A massa unitária é utilizada para transformações de unidades de massa seca para volume de material seco.

A massa unitária do agregado em estado compactado seco é determinada de acordo com o método prescrito pela NBR 7810/83. A quantidade de material deve ser de, pelo menos, o dobro do volume do recipiente de forma cilíndrica, especificado pela norma e a amostra deve ser seca em estufa até obter massa constante. O recipiente é cheio até 1/3 do volume e nivelado com as mãos. Aplicam-se 25 golpes com a haste especificada na norma. Repete-se esse procedimento, nas duas camadas seguintes, até o preenchimento total do recipiente. A superfície é nivelada novamente com as mãos. O recipiente é pesado com o material nele contido. A Figura 4.11 mostra a execução do ensaio de massa unitária compactada.



(a)



(b)

Figura 4.11 - (a) Compactação do material e (b) pesagem do material compactado

A massa do agregado compactado é a diferença entre a massa do recipiente cheio e a massa do recipiente vazio. A massa unitária compactada consiste na relação entre a massa seca do material lançado e compactado no recipiente e o volume deste recipiente.

A massa unitária compactada é um parâmetro que auxilia na determinação de uma melhor composição de agregados graúdos.

4.4.1.6 Umidade

A umidade representa o percentual de água presente no material em determinado instante, em relação à sua massa seca. Coleta-se uma massa úmida de matéria e submete-se a secagem em estufa a 100 ± 5 °C até massa constante (aproximadamente 24 horas). O teor de umidade é calculado pelo percentual obtido pela diferença entre a massa úmida e a massa seca em relação a massa seca. A Figura 4.12 mostra a execução do ensaio de determinação da umidade. A execução do ensaio de determinação da umidade é realizado de acordo com o procedimento usual do LEMAC.

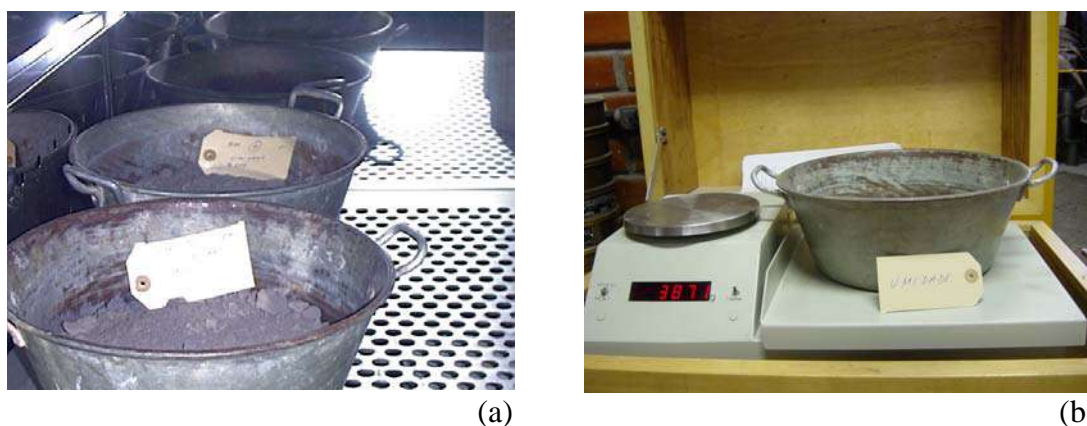


Figura 4.12 - (a) Material disposto na estufa para secagem e (b) pesagem do material seco

Essa característica é determinada nas amostras de escória de aciaria após o quarteamento a fim de se conhecer o estado inicial de umidade dessas amostras quando recebidas.

4.4.2 Caracterização da microestrutura das escórias de aciaria

As amostras de escória de aciaria são submetidas às análises de caracterização da microestrutura: análise química, difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura. Os símbolos utilizados para identificação dessas análises estão dispostos no Quadro 4.9.

Quadro 4.9 - Identificação das análises de microestrutura

Identificação	Análise
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
DRX	Difração de raios X
AQ	Análise química

As amostras para as análises de microestrutura são preparadas conforme o Quadro 4.10.

Quadro 4.10 - Preparação de amostras para análise da microestrutura

Análise	Preparação da amostra
MEV	São colhidos grãos, da amostra reduzida, que apresentam diferenças (cor, porosidade aparente, entre outros). Destes grãos são extraídas fraturas com dimensões compatíveis com a câmara do microscópio. Para cada amostra de escória são utilizadas, pelo menos, três fraturas para análise no microscópio.
DRX	São colhidos grãos, conforme descrito para a MEV e, em seguida, são moídos em moinho pulverizador até uma graduação, de preferência, menor ou igual à do cimento (75 μm). A quantidade de material de cada amostra de escória é de aproximadamente 350 g, por análise.
AQ	

As análises foram realizadas em laboratórios de outras instituições (Quadro 4.11) devido à indisponibilidade, naquele momento, dos equipamentos na Universidade Federal do Espírito Santo.

Quadro 4.11 - Laboratórios onde foram realizadas as análises de microestrutura

Análise	Laboratório	Equipamento/Método
DRX	Dep. Eng. de Minas (UFMG)	Difratômetro de raios X - Philips PN3710 ($\lambda=1,54 \text{ \AA}$)
MEV	Laboratório de Caracterização Microestrutural, Dep. Eng. Mecânica (UFSC)	Microscópio eletrônico de varredura XL 30 Philips
AQ	Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP)	Análises por complexometria /colorimetria/absorção atômica

O Quadro 4.12 apresenta os fatores e as variáveis de controle dos ensaios de microscopia eletrônica de varredura, difração de raios-X e análise química.

Quadro 4.12 - Fatores e variáveis de controle das análises de microestrutura

Fatores	Variáveis de controle
Estrutura do grão (escória de aciaria do tipo LD, escória de aciaria do tipo EAF)	Composição mineralógica qualitativa identificada por difração de raios X
	Composição e morfologia observada por microscópio eletrônico de varredura e microanálise por EDS
	Composição química

4.4.2.1 Difração de raios x

A difração de raios X é ferramenta importante para a identificação de compostos cristalinos e parte do princípio de que todo material cristalizado pode ser caracterizado pelo ângulo definido pelo feixe de raios X difratados através dele.

A identificação dos diferentes componentes cristalizados é obtida através da lei de Bragg (Eq. 4.1), que determina a distância inter-reticular do cristal, em função do ângulo de difração θ , registrado por um difratômetro.

$$n \cdot \lambda = 2d \cdot \sin \theta \quad \text{Eq. 4.1}$$

onde n = número inteiro

d = distância dos planos reticulados;

θ = ângulo de difração;

λ = comprimento de onda do feixe incidente.

O difratômetro de raios X é composto por uma fonte de elétrons, proveniente de um filamento de tungstênio, e um ânodo ou cátodo de metal, que fornece o comprimento de onda (λ). Através dos ângulos encontrados pode-se identificar as fases cristalinas.

Os raios determinados por DRX são identificados através da comparação com os raios de minerais registrados por PENA (2004) em seu estudo sobre escória de aciaria LD. Além disso, os raios são identificados também a partir de fichas da ASTM, de minerais encontrados no concreto, utilizadas por RIBAS SILVA (1990) em seu estudo da microestrutura do concreto. São consultados ainda, para identificação dos raios, o livro *Les Minéraux em Grains – méthodes d'étude et détermination* (PARFENOFF et al, 1970) e *sites* especializados da internet (WEBMINERAL, 2006; MINDAT, 2006).

O composto é identificado quando vários raios coincidem. Excepcionalmente, alguns compostos são identificados com apenas dois raios coincidentes. Os resultados da difração de raios-X são sempre sujeitos a ambigüidades, procurando-se saná-las buscando os compostos cuja presença é mais provável no material.

Após a identificação dos raios, é feito um levantamento, na literatura, de morfologias típicas daqueles minerais encontrados na DRX.

4.4.2.2 Microscopia eletrônica de varredura

As observações, utilizando-se a emissão de elétrons secundários, permitem a visualização de detalhes topográficos muito pequenos e a identificação de fases cristalinas e amorfas (com o auxílio do EDS). A Figura 4.13 mostra exemplo de fraturas de grãos de escória de aciaria, para observação em microscópio eletrônico de varredura. As fraturas têm, em média, aproximadamente 4 cm².



Figura 4.13 - Fraturas de grãos de escória de aciaria para observação em MEV

As fraturas de grãos das amostras de escórias são fixadas em suportes metálicos com pinos [Figura 4.14 a] e metalizadas com uma fina camada de ouro, para permitir a sua observação (Figura 4.14 b). Após a fixação das amostras nos suportes, aplica-se prata na junção da amostra com o suporte para escoamento das cargas elétricas.



(a)



(b)

Figura 4.14 - (a) Colocação da camada de prata nas amostras fixadas em suporte de pino (b) e metalizador

Depois de preparadas, as fraturas são levadas à câmara de amostras (Figura 4.15 a) do microscópio eletrônico de varredura (Figura 4.15 b), onde é aplicado o vácuo.

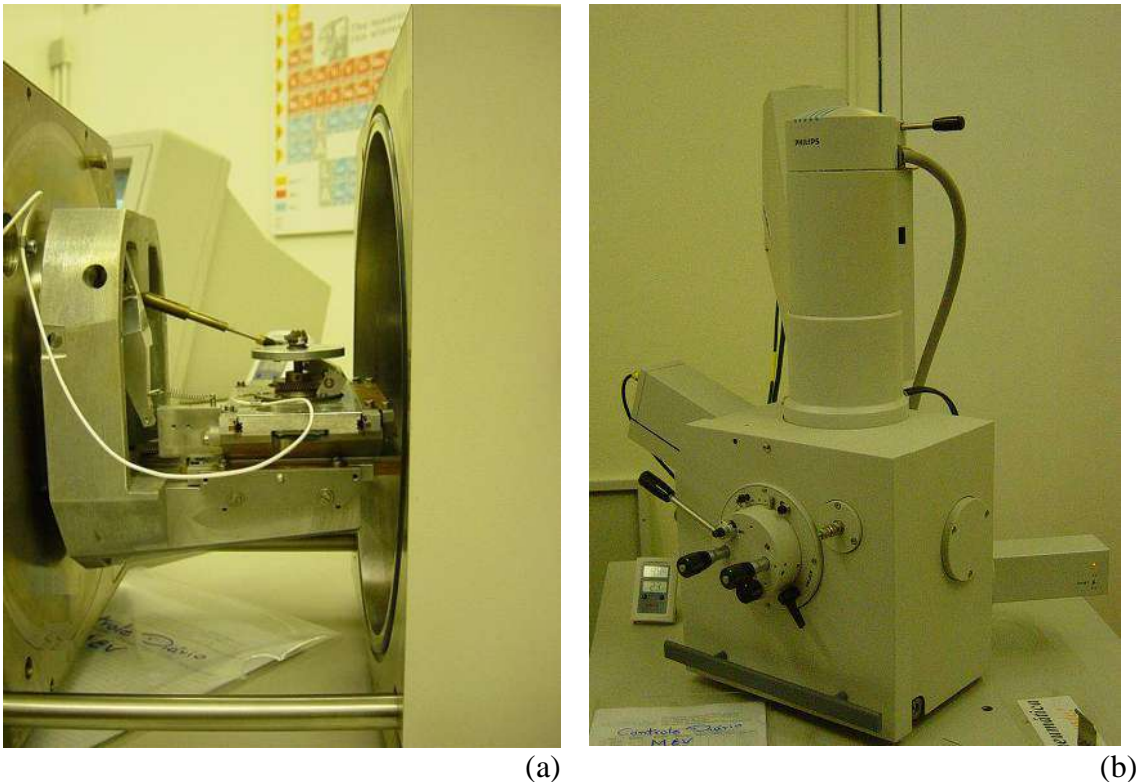


Figura 4.15 - (a) Câmara de amostras (b) e microscópio eletrônico de varredura

Os resultados, registrados em microfractografias e diagramas das análises químicas gerados por EDS, são comparados com morfologias e composições químicas de compostos já identificados por DRX nas amostras e outros compostos possíveis de serem encontrados nas escórias de aciaria.

4.4.2.3 Análise química

As amostras foram analisadas quimicamente por meio de complexometria (perda ao fogo, dióxido de silício, óxido de alumínio, óxido de ferro, óxido de cálcio, óxido de magnésio, anidrido sulfúrico, óxido de sódio, óxido de potássio, ferro metálico e óxido de cálcio livre), colorimetria (óxido de cromo, óxido de vanádio, óxido de manganês, óxido de titânio, óxido de estrôncio) e por absorção atômica (anidrido fosfórico).

A análise química é usada como terceiro fator na verificação da existência ou não de certos elementos químicos nas escórias de aciaria para complementar a definição dos compostos identificados qualitativamente por MEV e DRX.

4.4.3 Avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria pelo método *Steam Test*

As amostradas de escória de aciaria são ensaiadas segundo o método descrito na norma BS EN 1744-1/98 – Testes para propriedades químicas de agregados – análises químicas. O equipamento para realização do ensaio é denominado *Steam Test Machine*, pelo fabricante alemão (INFRATEST) e é especificado na norma europeia referente. O LEMAC – Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção possui dois equipamentos (*Steam Test Machine*) importados da Alemanha através de projeto de pesquisa financiados pela FINEP e por empresas privadas.

Uma amostra de escória de aciaria, com granulometria conhecida, é objeto de um fluxo de vapor a 100 °C, em uma unidade de vapor submetida à pressão ambiente. Dessa forma, a umidade necessária para reação da cal livre e do óxido de magnésio livre é continuamente cedida à amostra do teste. Qualquer mudança no volume causada por essa reação é lida a partir de um indicador digital, instalado diretamente no topo da amostra, que transfere os dados de deslocamento vertical para o computador. O programa computacional registra esses dados e calcula o aumento de volume, que é dado, como resultado, através da porcentagem em relação ao volume inicial da amostra compactada de escória de aciaria.

O número mínimo, segundo a norma do *Steam Test*, é de dois corpos-de-prova por amostra. Para determinação do potencial de expansão das escórias de aciaria são utilizados quatro corpos-de-prova para cada amostra para estudo da variabilidade.

O tempo de ensaio do *Steam Test*, na sua norma de origem, é de 24h para a escória LD e 168h (7 dias) para escórias EAF (BS EN 1744-1:98). No final desse período, é medida a ascensão da superfície do corpo-de-prova e calculada a expansão, em relação ao volume inicial.

Segundo Motz e Geiseler (2001) o tempo de ensaio das amostras deve ser relacionado ao teor de óxido de magnésio, que é responsável pela expansão tardia. Os autores sugerem que para amostras de escória LD com teores de MgO acima de 5%, o ensaio deve ser realizado com 168 horas. O acréscimo no tempo de ensaio sugerido por Motz e Geiseler (2001) foi adotado pela norma BS EN 13242/02. Adicionalmente, uma amostra de escória de aciaria LD é escolhida para avaliação do potencial de expansão por um período de 168 horas.

Os Quadros 4.13 e 4.14 apresentam os fatores e as variáveis de controle do ensaio de determinação do potencial de expansão pelo *Steam Test*.

Quadro 4.13 - Fatores e variáveis de controle - potencial de expansão de escórias LD e EAF pelo *Steam Test*

Fatores	Variáveis de controle
Tipo de escória (LD / EAF)	Resultados de potencial de expansão

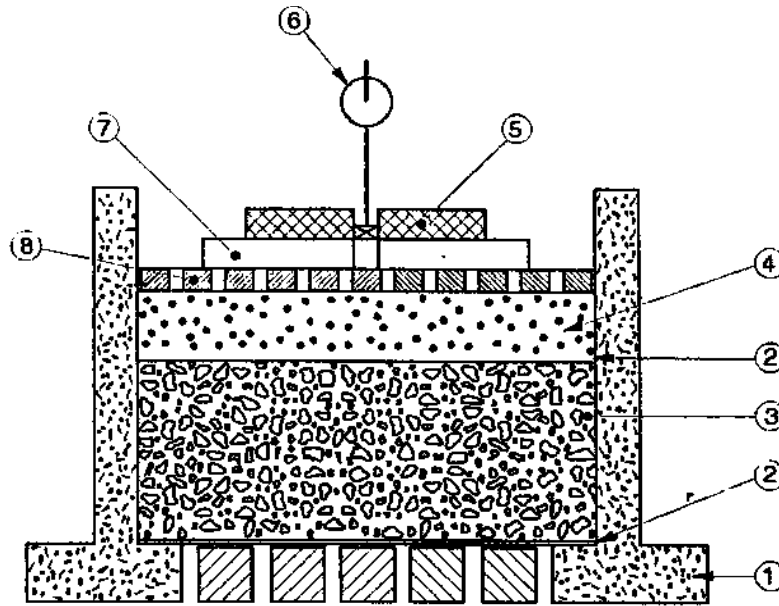
Quadro 4.14 - Fatores e variáveis de controle - potencial de expansão de escórias LD pelo *Steam Test*

Fatores	Variáveis de controle
Tempo de ensaio para escória LD (24 horas / 168 horas)	Resultados de potencial de expansão

4.4.3.1 Aparelhagem

O equipamento usado para o *Steam Test*, esquematizado nas Figuras 4.16 e 4.17 é composto das seguintes partes e acessórios:

- i. Unidade de vaporização (Figura 4.17) constituída por dois tanques onde a água é aquecida até o seu ponto de ebulição através de aquecedores (máximo 2kW);
- ii. Dois cilindros (Figura 4.16), com base perfurada, diâmetro de 210mm, altura 100mm e providos de aquecedor [(120±10)°C; 250W] para evitar a condensação de vapor dentro do corpo-de-prova;
- iii. Dois extensômetros digitais, com cursor de 25 mm com leitura de 0,01 mm;
- iv. Esferas de vidro, com diâmetro de 5 mm;
- v. Filtros de papel, com diâmetro de 240 mm;
- vi. Duas peças metálicas de sobrecarga, com diâmetro externo de 180 mm e pino na parte superior com 15 mm de diâmetro. A massa total da sobrecarga e da camada de esferas de vidro deve ser de 6 kg.
- vii. Mesa vibratória, com frequência aproximada de (48±3) Hz e amplitude de ±1,5 mm; ou soquete manual tipo Proctor normal;
- viii. Paquímetro 250 mm/0,02mm



- 1) cilindro com base perfurada, 0,01 furo por centímetro quadrado, 49 furos de 3mm, distribuídos da seguinte forma:
 ponto central: 1 furo;
 círculo, 65mm de diâmetro: 8 furos;
 círculo, 125mm de diâmetro: 16 furos;
 círculo, 185mm de diâmetro: 24 furos;
- 2) filtro de papel;
- 3) corpo-de-prova de escória de aciaria compactado;
- 4) esferas de vidro de 5mm de diâmetro;
- 5) e 7) sobrecarga;
- 6) extensômetro digital;
- 8) prato perfurado, 0,3 furo por centímetro quadrado, furos de 3mm de diâmetro, distribuídos em círculos concêntricos distantes 6mm um do outro, e com espaçamento de 6,5mm a 7mm em cada círculo.

Figura 4.16 - Esquema ilustrativo do cilindro de teste do método *Steam Test* (BS EN 1744-1/98)

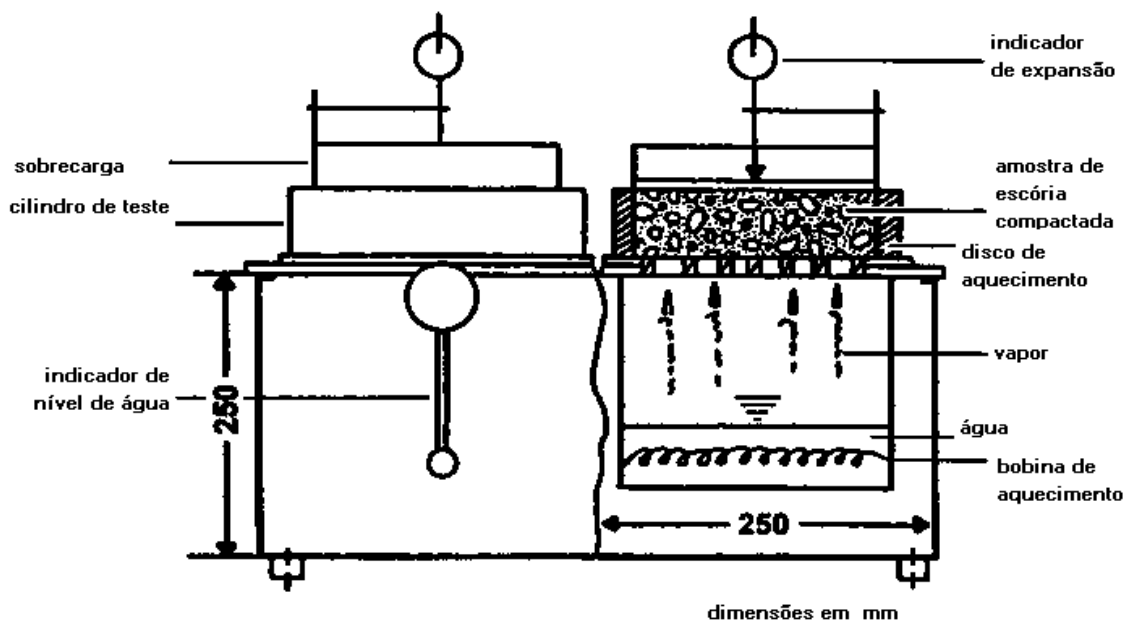


Figura 4.17 - Esquema do equipamento *Steam Test* (BS EN 1744-1/98)

4.4.3.2 Preparação dos corpos-de-prova

A amostra de escória de aciaria é seca em estufa de laboratório a 110 ± 5 °C até alcançar massa constante. A quantidade de material requerida para cada corpo-de-prova é 4,5 kg.

Para determinar o potencial de expansão é necessário o conhecimento da massa específica real, de acordo com as normas NBR 9776:1987 e NBR 9937: 1987.

São utilizadas porções de 0 mm a 22 mm de escória de aciaria combinadas de acordo com a parábola de *Fuller*. As proporções de massa para cada faixa granulométrica são dadas no Quadro 4.15.

Quadro 4.15 - Proporção de massa por faixa granulométrica (BS EN 1744-1/98)

Faixa granulométrica (mm)	Porcentagem em massa (%)
0 a 0,5	15
0,5 a 2	15
2 a 5,6	19
5,6 a 8	10
8 a 11,2	11
11,2 a 16	15
16 a 22	15
Total	100

Cada porção de material é formada separadamente para compor um corpo-de-prova de acordo com a distribuição granulométrica mencionada.

A base perfurada do cilindro de teste é coberta com um filtro de papel circular e, com o uso de uma colher de laboratório, transfere-se a porção de material referente a um corpo-de-prova para o cilindro.

Quanto à compactação, a norma recomenda o uso de mesa vibratória, por seis minutos na frequência de 48 ± 3 hertz e amplitude de $\pm 1,5$ mm e uma carga estática de $0,035$ N/mm² e cita que, sob essas condições de compactação, uma porosidade aparente prática (*void content*) entre 20 a 25% do volume permanece no corpo-de-prova. De acordo com a norma, a amostra pode ser compactada, de forma alternativa, com soquete Proctor Normal (Figura 4.18).

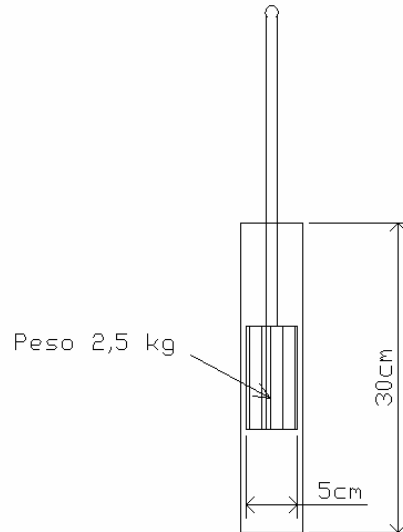


Figura 4.18 - Soquete manual tipo Proctor Normal

Para este estudo, é utilizado o soquete Proctor Normal e calcula-se o número de golpes para padronizar a energia de compactação em torno da energia de Proctor Normal (6 kgxcm/cm³). São necessários 150 golpes em uma só camada no cilindro especificado para o *Steam Test*. Para a distribuição dos golpes no material, é utilizado um disco de madeira compensada, com espessura de 22,8 mm, sobre a amostra. A Eq. 4.2 mostra a fórmula para o cálculo da energia

$$E = \frac{P.h.N.n}{V} \quad \text{Eq. 4.2}$$

Onde:

E é a energia específica de compactação, isto é, por unidade de volume;

P é o peso do soquete;

h é a altura de queda do soquete

N é o número de golpes por camada;

n é o número de camadas;

V é o volume do solo compactado.

Depois da compactação, determina-se o volume do corpo-de-prova de escória V_S , que é a diferença entre o volume do cilindro V_C e o volume de ar V_A entre o corpo-de-prova de escória e o topo do cilindro. Calcula-se V_C e V_A a partir da medida da altura, com um

paquímetro, e toma-se a média de quatro leituras nas extremidades de dois diâmetros ortogonais.

Finalmente, a superfície da escória é coberta com filtro de papel circular e colocam-se, sobre ele, esferas de vidro lubrificadas previamente com óleo de silicone para reduzir o atrito entre elas. A massa total da camada de esferas é de $(1,5 \pm 0,01)$ kg. As esferas de vidro são distribuídas uniformemente, dentro do cilindro de ensaio, de forma que fiquem niveladas superficialmente.

A lubrificação das esferas de vidro é repetida a cada ensaio. Como o vapor deposita a cal nas bolas de vidro durante o teste, remove-se a mesma, a cada quatro ensaios, com cloro em solução.

4.4.3.3 Determinação do potencial de expansão

Após o corpo-de-prova ser coberto com a camada de esferas de vidro, o cilindro é colocado no equipamento, ajustado ao encaixe e fixado com as travas do aparelho. O prato perfurado e a sobrecarga são colocados sobre as esferas de vidro. O extensômetro digital é fixado em um suporte rígido do equipamento. Após o acionamento do equipamento, o cilindro com o corpo-de-prova começa a se aquecer, apresentando aumento de volume. Para não registrar os movimentos de subida associados ao aquecimento do cilindro, até que o vapor comece a passar livremente pela amostra, os deslocamentos não são registrados.

4.4.3.4 Cálculo e expressão dos resultados de potencial de expansão

Calcula-se o volume inicial da porção de escória compactada V_S , antes do ensaio, a partir da Eq. 4.3.

$$V_S = V_C - V_A \quad \text{Eq. 4.3}$$

Onde:

V_S é o volume do corpo-de-prova de escória de aciaria após a compactação (cm^3);

V_C é o volume do cilindro (cm^3);

V_A é o volume entre a superfície da escória e a extremidade superior do cilindro (cm^3).

V_C e V_A são calculados a partir das medidas das alturas com paquímetro e do diâmetro do cilindro (210 mm). Após a compactação, determinam-se a massa específica seca (Eq. 4.4) e a porosidade aparente da mistura compactada (Eq. 4.5).

$$\gamma_M = 100 W / V_S (100 + w) \quad \text{Eq. 4.4}$$

$$V_M = (1 - \gamma_M / \gamma) \times 100 \quad \text{Eq. 4.5}$$

Onde:

γ_M é a massa específica aparente da mistura compactada (g/cm³);

W é a massa da mistura compactada (g);

V_S é o volume do corpo-de-prova de escória de aciaria, após a compactação (em cm³);

V_M é o volume de vazios da mistura compactada (% de volume);

γ é a massa específica real das partículas de escória (g/m³);

w é a umidade da escória (% de massa seca).⁴

Após completar o teste, a expansão é calculada, em porcentagem de volume, a partir da ascensão final do corpo-de-prova, lida pelo extensômetro digital (Eq. 4.6).

$$\text{expansão} = (\pi \times h \times d^2 \times 100) / 4 \times V_S \quad \text{Eq. 4.6}$$

Onde:

h é o deslocamento vertical do corpo-de-prova registrado pelo extensômetro digital, ao longo do teste (mm);

d é o diâmetro interno do cilindro de teste (mm).

O resultado deve ser registrado com arredondamento a 0,1% do volume.

4.4.3.5 Limites do potencial de expansão

A escória de aciaria é um material com natureza mineralógica heterogênea e, por este motivo, o valor máximo obtido do potencial de expansão deve ser analisado quanto ao limite para utilização. O limite de potencial de expansão recomendado por Motz e

⁴ As amostras utilizadas para o *Steam Test* são secas em estufa a 105 ± 5 °C. Dessa forma, elimina-se a umidade da fórmula.

Geiseler (2001) para utilização em pavimentação é de 3,5% para agregados utilizados em misturas betuminosas. Para aplicações em camadas granulares como base e sub-base, o limite de 5% pode ser admitido como valor máximo de expansão.

A norma europeia EN 13242: 2002 - *Aggregates for unbound and hydraulically bound materials for use in civil engineering work and road construction* - especifica os limites para a expansão volumétrica da escória de aciaria para utilização com agregado em camadas granulares (Quadro 4.16).

Quadro 4.16 - Categorias para valores máximos de expansão para escória de aciaria - camadas granulares (EN 13242/02)

Tipo de escória de aciaria	Expansão volumétrica (%)	Categoria
Escória LD / Escória EAF	≤ 5	V ₅
	$\leq 7,5$	V _{7,5}
	≤ 10	V ₁₀
	> 10	V _{Declado}
	Sem requisitos	V _{SR}

Há necessidade de determinação deste limite para o caso do Brasil. É recomendada uma análise criteriosa a respeito do valor do limite que será adotado, se possível, estabelecendo uma relação entre o limite adotado para o ensaio e os valores correspondentes às expansões admissíveis para o material quando em situação de serviço (no pavimento).

4.5 Metodologia de análise dos resultados

A caracterização física da escória de aciaria é realizada com o número de repetições estabelecidas pelas normas de caracterização de agregados da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Para os ensaios com mais de uma repetição é realizada estatística descritiva com determinação dos valores máximo e mínimo, o desvio padrão e a média.

A caracterização da microestrutura é subjetiva. A difração de raios-X, a microscopia eletrônica de varredura e a análise química são analisadas em conjunto e relacionadas aos resultados de determinação do potencial de expansão.

O ensaio de determinação do potencial de expansão das escórias de aciaria pelo método a vapor é realizado com quatro repetições⁵. É realizada a estatística descritiva dos resultados com determinação dos valores máximo e mínimo, o desvio padrão, a média, a variância e o coeficiente de variação.

⁵ Apenas para a amostra LD ensaiada por 168 horas é determinado o potencial de expansão com duas repetições.

5 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, MICROESTRUTURAL E DO POTENCIAL DE EXPANSÃO DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA

5.1 Introdução

A caracterização da escória de aciaria é uma etapa importante para maior conhecimento desse material, possibilitando comparações com materiais convencionais e a verificação de sua adequação à aplicação em pavimentação (base e sub-base), seu uso mais difundido. De acordo com Gontijo (2006), para que seja indicado como material de constituição de camadas de pavimentos rodoviários, uma intensa e consistente investigação de suas propriedades físicas, físico-químicas, mecânicas e, fundamentalmente, químicas deve ser efetuada. Além disso, é necessária a determinação da sua expansibilidade, para verificar se esta já foi estabilizada, e se atende às características de projeto.

Dessa forma, este capítulo tem como objetivo apresentar a caracterização física e da microestrutura e o potencial de expansão de cinco amostras de escórias de aciaria LD e três amostras de EAF geradas em usinas siderúrgicas no Brasil.

Os parâmetros de caracterização física estudados são: granulometria, absorção, massa específica, massa unitária, abrasão Los Angeles, índice de esmagamento e umidade inicial.

A caracterização da microestrutura dessas amostras é obtida por meio da interpretação dos resultados da difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura, com auxílio da análise química.

Finalmente, o potencial de expansão das amostras de escória é determinado pelo método *Steam Test*, desenvolvido por pesquisadores alemães e normalizado na União Européia (EN 1744-1:1998).

5.2 Resultados de caracterização física das escórias de aciaria

Para os ensaios de caracterização física são atendidas as especificações de repetições mínimas estabelecida pelas respectivas normas de caracterização de agregados (Capítulo 4).

5.2.1 Granulometria

O Quadro 5.1 apresenta os resultados do ensaio para determinação da composição granulométrica das escórias de aciaria. O Quadro 5.2 apresenta os resultados de dimensão máxima característica e módulo de finura das amostras de escória de aciaria. As Figuras 5.1 e 5.2 mostram as curvas granulométricas das escórias de aciaria LD e EAF, respectivamente.

Quadro 5.1 - Determinação da composição granulométrica das escórias de aciaria

Amostra/ tipo de escória		Porcentagem retida acumulada													
		Peneiras (mm)													
		38	32	25	19	12,5	9,5	6,3	4,8	2,4	1,2	0,6	0,3	0,15	Fundo
LD	B	1	4	10	19	36	47	58	64	74	79	84	89	94	100
	D	2	5	13	23	35	42	50	54	60	65	72	80	89	100
	G	0	0	0	1	19	32	46	55	69	76	81	86	92	100
	H	0	0	0	3	16	25	37	45	57	64	71	81	91	100
	X	0	0	14	26	43	55	66	71	78	82	85	88	93	100
EAF	C	0	0	1	4	15	25	41	53	75	88	95	97	98	100
	J	0	0	1	6	21	32	45	53	69	80	88	92	95	100
	Y	5	7	12	19	32	41	54	61	71	77	82	87	91	100

Quadro 5.2 - Dimensão máxima característica e módulo de finura das escórias de aciaria

Parâmetros	Amostras							
	Escória LD					Escória EAF		
	B	D	G	H	X	C	J	Y
Dimensão máxima característica (mm)	32	32	19	19	32	19	25	38
Módulo de finura	5,51	4,87	4,92	4,37	5,78	5,55	5,15	5,34

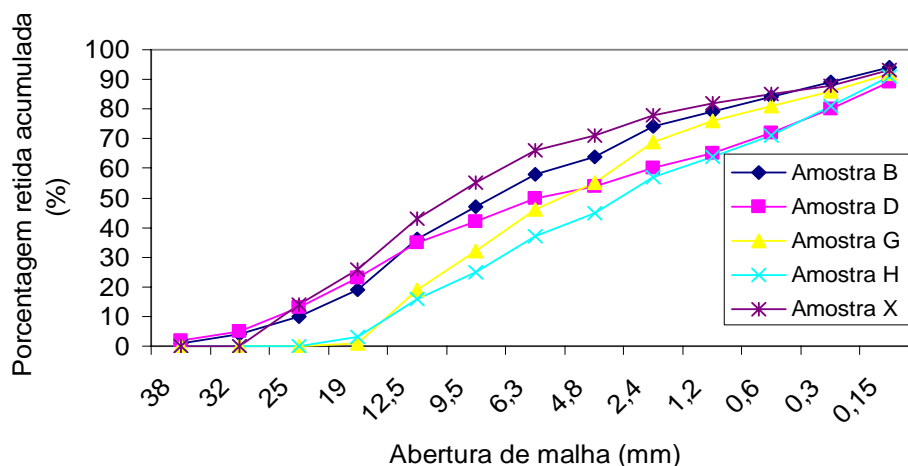


Figura 5.1 - Curvas granulométricas das escórias de aciaria LD

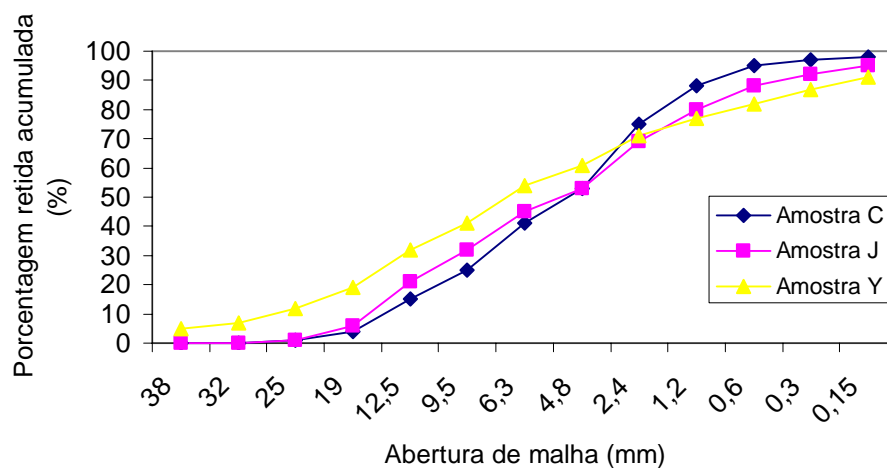


Figura 5.2 - Curvas granulométricas das escórias de aciaria EAF

Para utilização em pavimentação, o DNIT especifica, por meio da EM 262/94, a proporção de 40% do material na faixa até 12,7 mm, 60% na faixa de 12,7 mm a 50,8 mm e que sejam atendidas as características exigidas em projeto. As amostras de escória de aciaria estudadas apresentam grãos abaixo da 12,7 mm em proporção de 57% a 85% do total de material, sendo um material com fração mais fina do que a especificada pelo DNIT. De qualquer forma, esta granulometria pode ser corrigida com adição de material mais grosso.

5.2.2 Absorção

O Quadro 5.3 apresenta o índice de absorção das amostras de escória de aciaria, definido segundo a NBR 9937/87. As Figuras 5.3 e 5.4 mostram, respectivamente, o índice de absorção das amostras de escória de aciaria LD e EAF.

Quadro 5.3 - Índice de absorção (NBR 9937/87)

Tipo de escória	Amostra	Absorção (%)
LD	B	5,2
	D	2,2
	G	1,2
	H	0,9
	X	1,0
EAF	C	2,7
	J	1,4
	Y	2,0

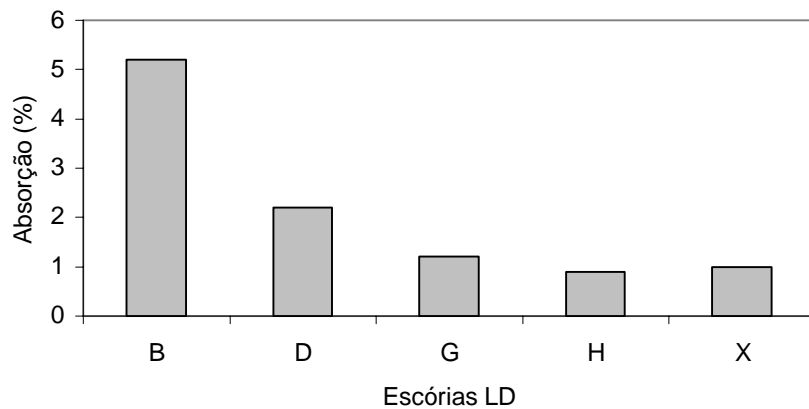


Figura 5.3 - Absorção das amostras de escória de aciaria LD

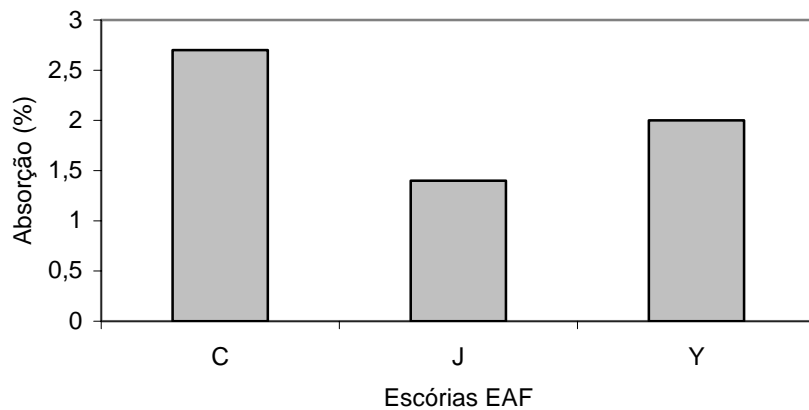


Figura 5.4 - Absorção das amostras de escória de aciaria EAF

A absorção de água determinada para as amostras de escória de aciaria varia de 0,9 a 5,2%. Esta faixa reflete a heterogeneidade da porosidade das partículas causada pelo processo de resfriamento não uniforme e pela própria constituição mineralógica.

Mehta e Monteiro (1994) explicam que, para agregados naturais, a absorção de água pode ser usada como uma primeira aproximação da medida de sua porosidade. Mudança de volume, induzida por intemperismo como ciclos de molhagem e secagem, ocorre para agregados com estrutura porosa e está relacionada à distribuição do tamanho dos poros, que permite às partículas dos agregados ficarem saturadas por umedecimento mas impede a drenagem na secagem e é capaz de causar altas pressões hidráulicas dentro das partículas. Dessa forma, não só a absorção, mas também a distribuição de tamanho dos poros da escória de aciaria tem relação direta com o problema de expansibilidade.

Para aplicação em camadas de pavimentos, o DNIT especifica valores de absorção entre 1 a 2% (DNER-EM 262/94). A restrição quanto à absorção de água do agregado para utilização em pavimentos está relacionada também à necessidade de água para obtenção do grau de compactação especificado. Raposo (2005) estudou a curva de compactação de escórias LD e concluiu que a quantidade de água não foi o fator determinante para obtenção do nível máximo de compactação desse material.

5.2.3 Massa específica

O Quadro 5.4 apresenta a massa específica real do agregado graúdo das amostras de escória de aciaria, definida segundo a NBR 9937/87.

Quadro 5.4 - Massa específica real do agregado graúdo das amostras de escória de aciaria

Tipo de escória	Amostra	Massa específica real (kg/dm³)
LD	B	3,92
	D	3,46
	G	3,55
	H	3,63
	X	3,64
EAF	C	3,63
	J	3,48
	Y	3,23

As Figuras 5.5 e 5.6 mostram, respectivamente, a massa específica real do agregado graúdo das amostras de escória de aciaria LD e EAF.

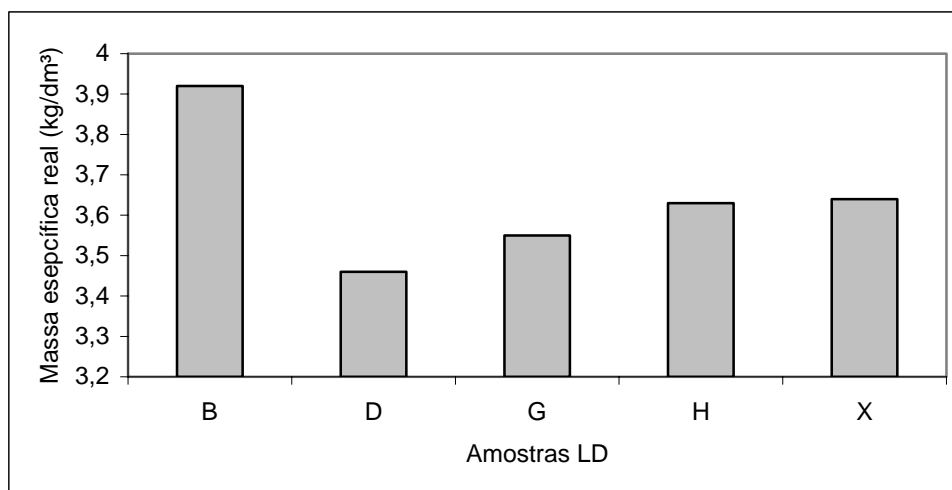


Figura 5.5 - Massa específica real das amostras de escória de aciaria LD

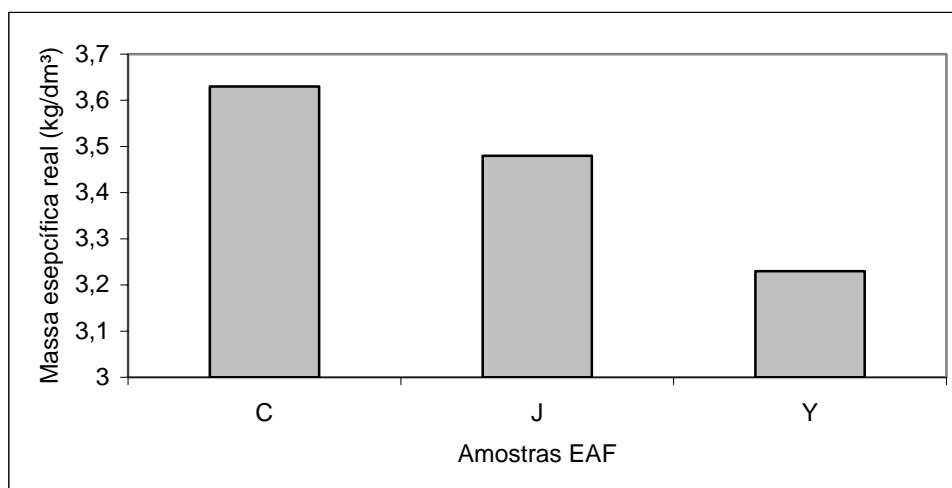


Figura 5.6 - Massa específica real das amostras de escória de aciaria EAF

O DNIT limita a massa específica do agregado graúdo na faixa de 3 a 3,5 kg/dm³, para a escória de aciaria utilizada em camadas de pavimentos (DNER-EM 262 – 1994). Os valores encontrados estão próximos ou acima do limite de 3,5 kg/dm³, variando de 3,23 a 3,92 kg/dm³.

A massa específica das escórias de aciaria tem a tendência a ser maior que a de agregados naturais. Pena (2004) determinou a massa específica de escória LD e de agregado graúdo granítico, ambos provenientes da região da Grande Vitória e encontrou 3,55 kg/dm³ e 2,61 kg/dm³ respectivamente.

Apesar da especificação para escória de aciaria para pavimentos limitar a massa específica para esse tipo de utilização, a maior massa específica das escórias de aciaria pode representar a diminuição da espessura de camadas em que são aplicadas,

interferindo positivamente no custo (SILVA, 2006). Por outro lado, pode determinar um acréscimo no custo de transporte para o local de utilização. De qualquer forma, por meio da utilização projetada e com controle de qualidade, a elevada massa específica é uma característica que pode ser bem aproveitada.

O Quadro 5.5 apresenta a massa específica aparente seca do agregado graúdo das amostras de escória de aciaria, definida segundo a NBR 9937/87. As Figuras 5.7 e 5.8 mostram, respectivamente, a massa específica aparente seca do agregado graúdo das amostras de escória de aciaria LD e EAF.

Quadro 5.5 - Massa específica aparente seca (NBR 9937/87)

Tipo de escória	Amostra	Massa específica aparente seca (kg/dm ³)
LD	B	3,26
	D	3,22
	G	3,40
	H	3,51
	X	3,51
EAF	C	3,30
	J	3,32
	Y	3,03

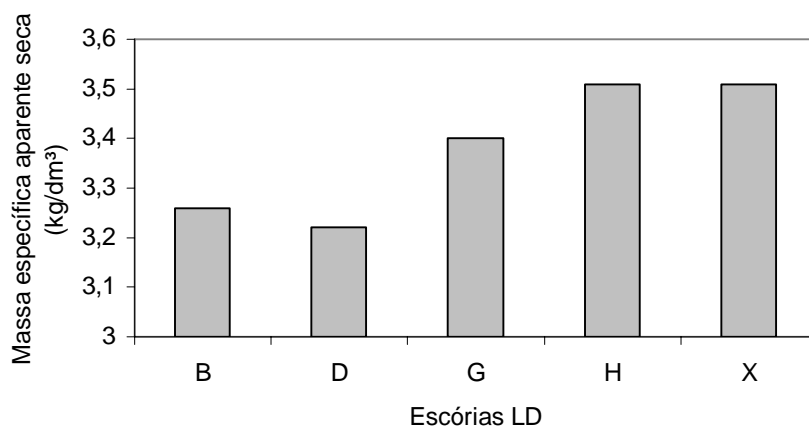


Figura 5.7 - Massa específica aparente seca das amostras de escória de aciaria LD

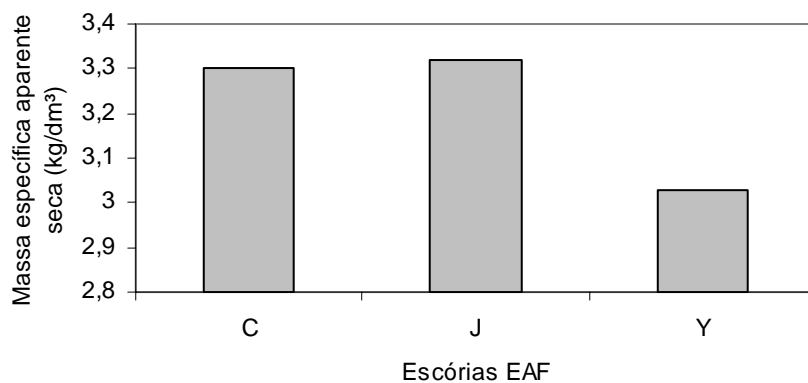


Figura 5.8 - Massa específica aparente seca das amostras de escória de aciaria EAF

O Quadro 5.6 apresenta a massa específica aparente saturada superfície seca do agregado graúdo das amostras de escória de aciaria, definida segundo a NBR 9937/87. As Figuras 5.9 e 5.10 mostram, respectivamente, a massa específica aparente seca do agregado graúdo das amostras de escória de aciaria LD e EAF.

Quadro 5.6 - Massa específica aparente saturada superfície seca (NBR 9337/87)

Tipo de escórias	Amostra	Massa específica aparente saturada superfície seca (kg/dm³)
LD	B	3,43
	D	3,29
	G	3,44
	H	3,55
	X	3,55
EAF	C	3,39
	J	3,37
	Y	3,09

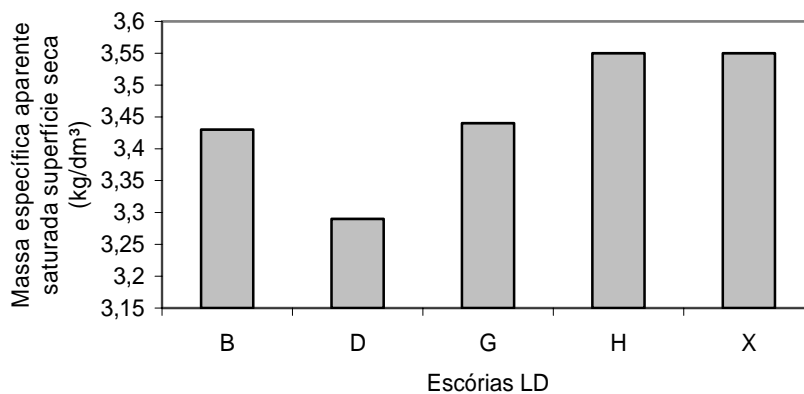


Figura 5.9 - Massa específica aparente saturada superfície seca das amostras de escória

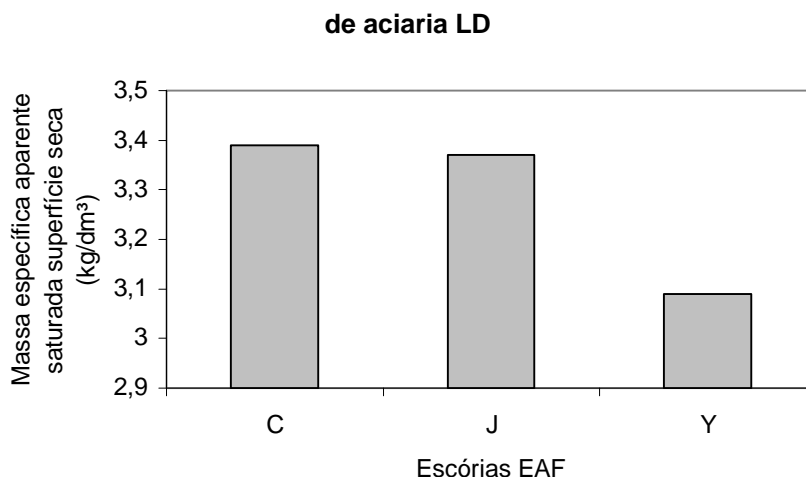


Figura 5.10 - Massa específica aparente saturada superfície seca das amostras de escória de aciaria EAF

A Tabela 5.1 apresenta a massa específica do agregado miúdo das amostras de escória de aciaria, definida segundo a NBR 9776/87. As Figuras 5.11 e 5.12 mostram, respectivamente, a massa específica do agregado miúdo das amostras de escória de aciaria LD e EAF.

Tabela 5.1 - Massa específica do agregado miúdo (NBR 9776/87)

Tipo de escória	Amostra	n	Massa específica do agregado miúdo (kg/dm³)			
			Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
LD	B	2	3,45	3,46	3,46	0,01
	D	2	3,13	3,14	3,14	0,01
	G	2	3,35	3,37	3,36	0,01
	H	2	3,36	3,37	3,37	0,01
	X	2	3,39	3,40	3,40	0,01
EAF	C	2	3,57	3,58	3,58	0,01
	J	2	3,56	3,56	3,56	0,00
	Y	2	3,01	3,01	3,01	0,00

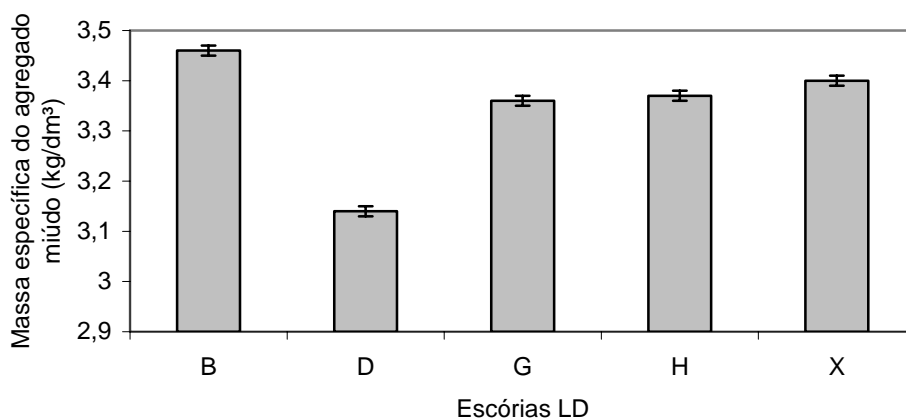


Figura 5.11 - Massa específica do agregado miúdo das amostras de escória de aciaria LD

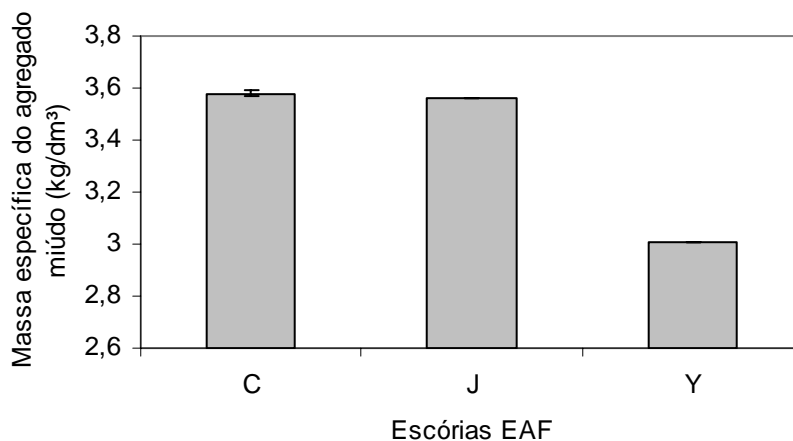
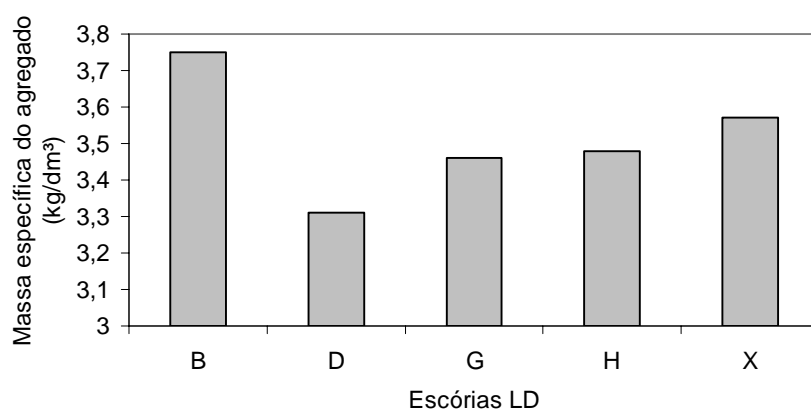
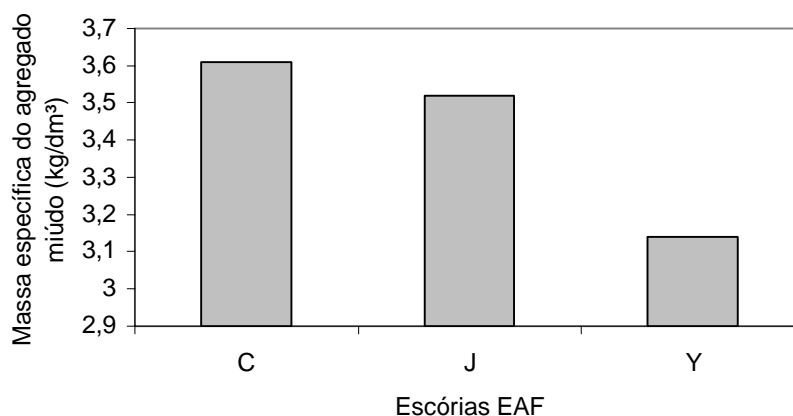


Figura 5.12 - Massa específica do agregado miúdo das amostras de escória de aciaria EAF

O Quadro 5.7 apresenta a massa específica real do agregado das amostras de escória de aciaria, estabelecida pela ponderação dos parâmetros massa específica real do agregado gráudo e massa específica real do agregado miúdo, em relação à composição granulométrica. As Figuras 5.13 e 5.14 mostram, respectivamente, a massa específica real do agregado das amostras de escória de aciaria LD e EAF.

Quadro 5.7 - Massa específica real do agregado (NBR 9776/87, NBR 9937/87 e NM248/01)

Tipo de escória	Amostra	Massa específica (kg/dm ³)
LD	B	3,75
	D	3,31
	G	3,46
	H	3,48
	X	3,57
EAF	C	3,61
	J	3,52
	Y	3,14

**Figura 5.13 - Massa específica das amostras de escória de aciaria LD****Figura 5.14 - Massa específica das amostras de escória de aciaria EAF**

5.2.4 Abrasão Los Angeles e esmagamento

O Quadro 5.8 apresenta o índice de abrasão Los Angeles das amostras de escória de aciaria na graduação B, definido segundo a NBR NM 51/00. As Figuras 5.15 e 5.16

mostram, respectivamente, o índice de abrasão Los Angeles das amostras de escória de aciaria LD e EAF.

Quadro 5.8 - Abrasão Los Angeles das amostras (NBR NM 51/00)

Tipo de escória	Amostra	Abrasão Los Angeles (%)
LD	B	14,7
	D	20,7
	G	13,1
	H	11,9
	X	11,8
EAF	C	22,4
	J	36,1
	Y	20,8

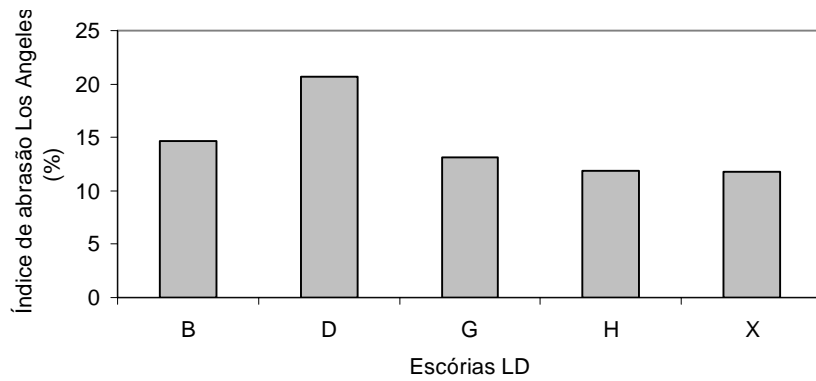


Figura 5.15 - Abrasão Los Angeles das amostras de escória de aciaria LD

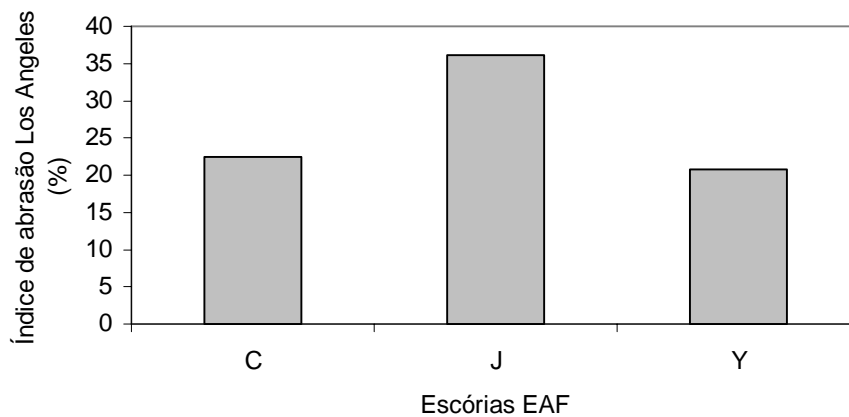


Figura 5.16 - Abrasão Los Angeles das amostras de escória de aciaria EAF

O DNIT limita, ainda, o índice de Abrasão Los Angeles em 25% para aceitação de escória de aciaria a ser utilizada em camadas de pavimento (DNER-EM 262-1994). Com exceção da amostra J, as escórias de aciaria estudadas apresentaram teor de Abrasão Los Angeles inferiores ao limite. Considerando a maioria dos resultados obtidos para esse parâmetro, a escória de aciaria, quando utilizada de forma controlada, pode propiciar ao pavimento maior durabilidade em relação a friabilidade.

A Tabela 5.2 apresenta o índice de esmagamento das amostras de escória de aciaria, definido segundo a NBR 9938/87. As Figuras 5.17 e 5.18 mostram, respectivamente, o índice de esmagamento das amostras de escória de aciaria LD e EAF.

Tabela 5.2 - Índice de esmagamento das amostras (NBR 9938/87)

Tipo de escória	Amostra	n	Índice de esmagamento (%)			
			Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
LD	B	2	13,80	14,70	14,25	0,64
	D	2	19,70	19,70	19,70	0,00
	G	2	12,40	12,50	12,45	0,07
	H	2	11,80	14,10	12,95	1,63
	X	2	13,00	13,60	13,30	0,42
EAF	C	2	27,50	28,10	27,80	0,42
	J	2	37,70	37,80	37,75	0,07
	Y	2	26,30	26,50	26,40	0,14

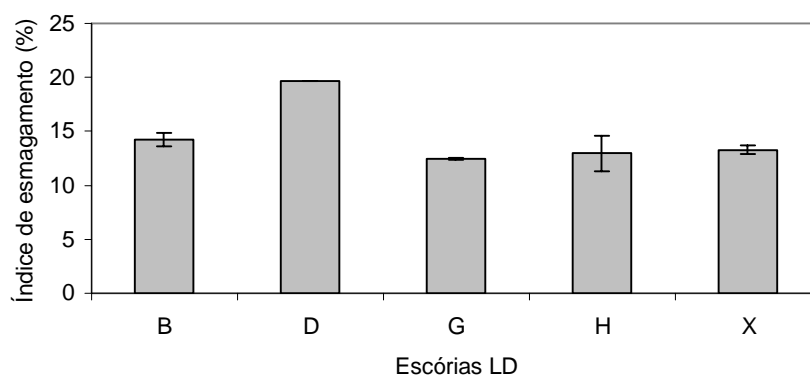


Figura 5.17 - Índice de esmagamento das amostras de escória de aciaria LD

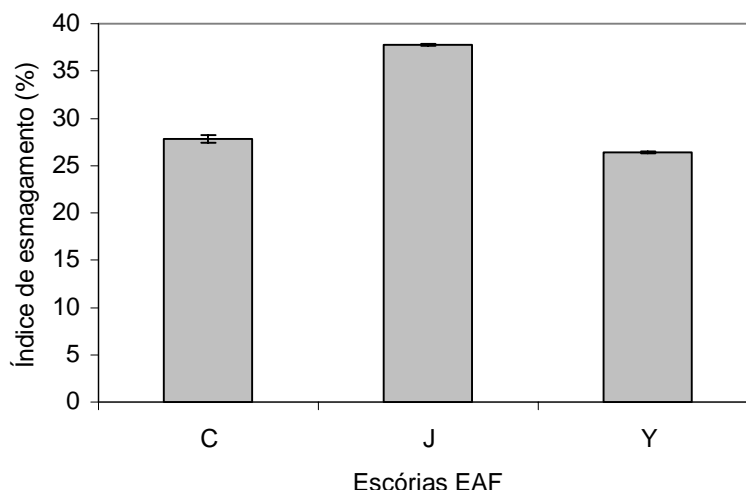


Figura 5.18 - Índice de esmagamento das amostras de escória de aciaria EAF

O índice de esmagamento é comparável ao índice de Abrasão Los Angeles porque ambos avaliam a resistência do agregado (COUTINHO, 1973). Tanto o ensaio de abrasão Los Angeles quanto o de esmagamento têm pequena dispersão. Em geral, com apenas 01 amostra obtêm-se uma probabilidade de 90% de que o valor médio difira da média verdadeira de $\pm 3\%$ (COUTINHO, 1973; NEVILLE, 1997).

5.2.5 Massa unitária

A Tabela 5.3 apresenta a massa unitária das amostras de escória de aciaria, definida segundo a NBR 7251/82. As Figuras 5.19 e 5.20 mostram, respectivamente, a massa unitária no estado solto das amostras de escória de aciaria LD e EAF.

Tabela 5.3 - Massa unitária no estado solto das amostras (NBR 7251/82)

Tipo de escória	Amostra	n	Massa unitária no estado solto (kg/dm ³)			
			Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
LD	B	3	2,11	2,12	2,12	0,01
	D	3	1,98	1,99	1,99	0,01
	G	3	2,16	2,17	2,16	0,01
	H	3	2,11	2,12	2,11	0,01
	X	4	2,19	2,22	2,21	0,01
EAF	C	3	1,79	1,79	1,79	0,00
	J	4	1,73	1,74	1,74	0,01
	Y	4	1,89	1,92	1,91	0,01

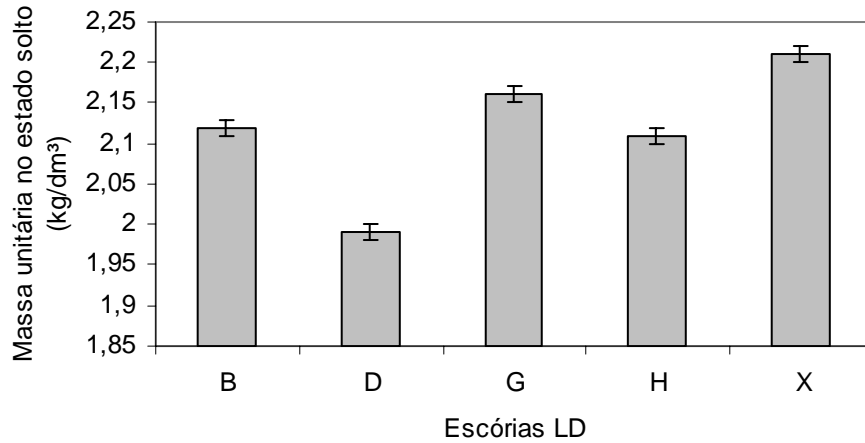


Figura 5.19 - Massa unitária no estado solto das amostras de escória de aciaria LD

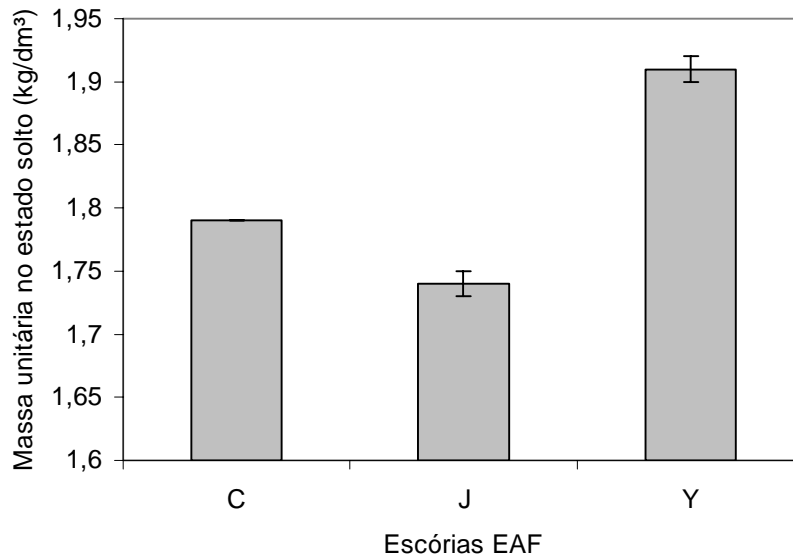


Figura 5.20 - Massa unitária no estado solto das amostras de escória de aciaria EAF

O DNIT especifica a faixa de $1,5 \text{ kg/dm}^3$ a $1,7 \text{ kg/dm}^3$ para a massa unitária no estado solto das escórias de aciaria. As amostras de escórias LD e EAF apresentam resultados superiores para essa característica ($1,74 \text{ kg/dm}^3$ a $2,21 \text{ kg/dm}^3$), em função de sua elevada massa específica, interferindo no custo de transporte desse material.

A Tabela 5.4 apresenta a massa unitária compactada das amostras de escória de aciaria, definida segundo a NBR 7810/83. As Figuras 5.21 e 5.22 mostram, respectivamente, a massa unitária das amostras de escória de aciaria LD e EAF.

Tabela 5.4 - Massa unitária compactada (kg/dm³)

Tipo de escória	Amostra	n	Massa unitária compactada (k/dm ³)			
			Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
LD	B	3	2,33	2,35	2,34	0,01
	D	3	2,35	2,37	2,36	0,01
	G	3	2,33	2,33	2,33	0,00
	H	3	2,29	2,30	2,29	0,01
	X	4	2,25	2,31	2,28	0,03
EAF	C	3	1,96	1,97	1,96	0,01
	J	4	1,90	1,95	1,92	0,02
	Y	3	1,99	2,03	2,01	0,02

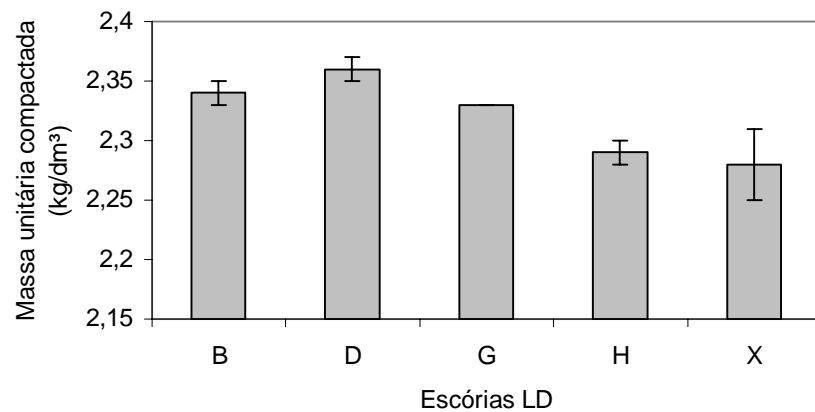


Figura 5.21 - Massa unitária compactada das amostras de escória de aciaria LD

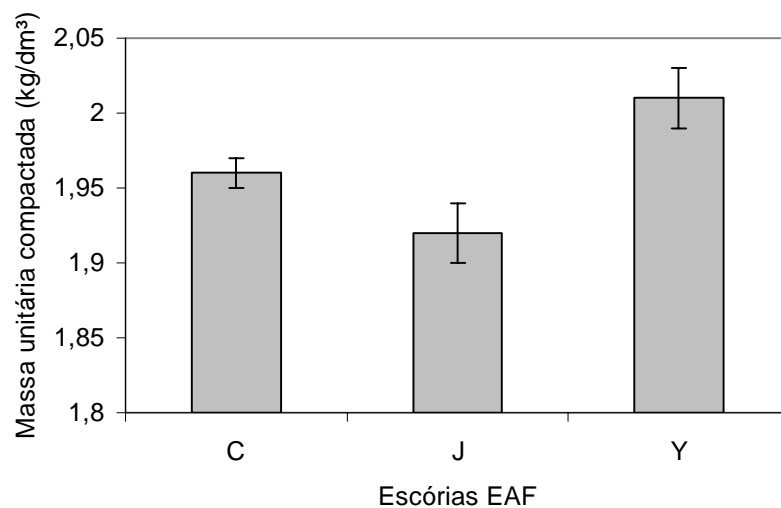


Figura 5.22 - Massa unitária compactada das amostras de escória de aciaria EAF

5.2.6 Umidade

A Tabela 5.5 apresenta a umidade das amostras de escória de aciaria. As Figuras 5.23 e 5.24 mostram, respectivamente, a umidade das amostras de escória de aciaria LD e EAF.

Tabela 5.5 - Teor de umidade das amostras (%)

Tipo de escória	Amostra	n	Teor de umidade (%)			
			Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
LD	B	2	2,80	2,80	2,80	0,00
	D	2	3,20	3,30	3,25	0,07
	G	2	3,90	4,00	3,95	0,07
	H	2	5,40	5,50	5,45	0,07
	X	2	1,60	1,60	1,60	0,00
EAF	C	2	30,00	35,50	32,75	3,89
	J	2	3,70	3,80	3,75	0,07
	Y	2	2,10	2,10	2,10	0,00

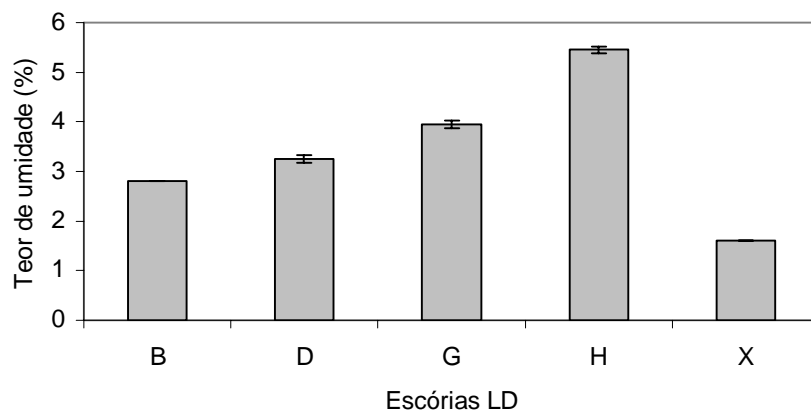


Figura 5.23 - Umidade das amostras de escória de aciaria LD

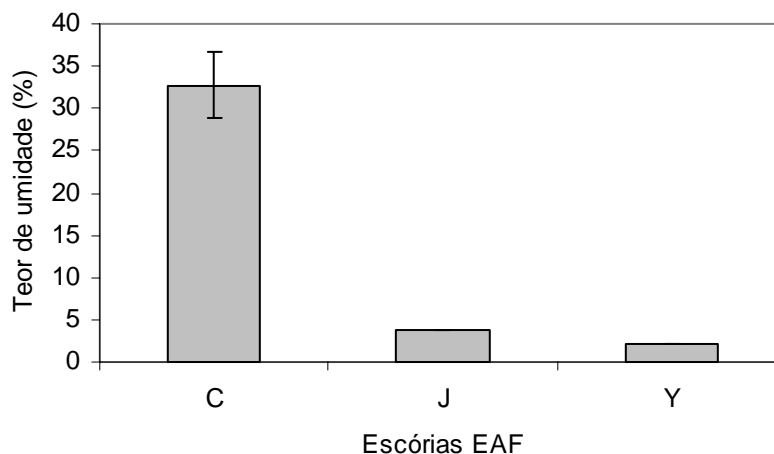


Figura 5.24 - Umidade das amostras de escória de aciaria EAF

A umidade das escórias de aciaria caracteriza a porcentagem de água (em relação à massa seca) do material quando foi recebido no laboratório. Esse parâmetro é bastante variável em função da água utilizada nos processo de resfriamento, beneficiamento e estocagem além da precipitação pluviométrica da região.

De maneira geral, as características físicas das escórias testadas de aciaria são favoráveis a sua utilização em pavimentação rodoviária. O índice de abrasão Los Angeles, parâmetro importante para esta finalidade, apresenta valores aceitáveis em relação à especificação do DNER, com exceção apenas da amostra J. Para os parâmetros massa específica real do agregado e massa unitária foram encontrados valores altos e bastante superiores aos comuns a agregados naturais.

Mesmo considerando que há grande variabilidade quando há a comparação entre agregados naturais e escórias de aciarias de diferentes regiões e de diferentes siderúrgicas. Maslehuddin *et al* (2003) encontraram também diferenças em relação a alguns índices físicos de um agregado natural calcário local e da escória de aciaria EAF. Propriedades físicas como massa específica, absorção, teor de argila e partículas friáveis e abrasão, tiveram resultados favoráveis às escórias de aciaria testadas.

Motz e Geiseler (2001) também obtiveram resultados favoráveis para a escória de aciaria quando da avaliação de características como massa específica, forma, resistência ao impacto e ao polimento, friabilidade e resistência ao congelamento e degelo, numa comparação com agregados graníticos.

5.3 Resultados de caracterização da microestrutura

A caracterização da microestrutura é de grande utilidade para avaliar a escória de aciaria, entretanto não se deve esquecer que as análises e observações são realizadas em amostras de pequenas dimensões. Isto significa que os minerais detectados realmente estão presentes no material, mas os não detectados podem ou não existir na escória.

5.3.1 Amostras de escória de aciaria LD

5.3.1.1 Difração de raios - X

Os compostos identificados pela difração de raios-X das amostras de escória de aciaria LD estudadas estão resumidos no Quadro 5.9. Os resultados da DRX, distância interplanar (d) e intensidade dos raios (I) estão no ANEXO II.

Quadro 5.9 - Compostos identificados por DRX nas escórias de aciaria LD

Composto	Fórmula	B	D	G	H	X
Alumínio	Al					
AFm	[Ca ₂ Al(OH) ₆][OH.6H ₂ O]					
Afutilita	Ca ₃ (SiO ₃ .OH) ₂ .2H ₂ O					
Alita - Silicato tricálcico	3CaOSiO ₂					
Aluminato de cálcio	12CaO 7Al ₂ O ₃					
Aluminato de cálcio	CaO 2Al ₂ O ₃					
Aluminato de cálcio	2CaO.Al ₂ O ₃					
Anatase	TiO ₂					
Antigorita	Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄					
Aragonita	CaCO ₃					
Augite	(Ca,Na)(Mg,Fe,Al,Ti)(Si,Al) ₂ O ₆					
Birnessite	Na ₄ Mn ₁₄ O ₂₇ .9H ₂ O					
Bredigita – Silicato dicálcico	2CaO SiO ₂					
Brownmillerita	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃					
Brucita	Mg(OH) ₂					
Calcita	CaCO ₃					
Cal livre	CaO					
Cal em solução sólida	CaO					
Caolinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄					
Carbonato de Na	Na ₂ CO ₃					
Crisotila	Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄					
Cyrllovite	NaFe ₃ ⁺³ [(OH) ₂ PO ₄] ₂ . 2H ₂ O					
Dolomita	CaMgCO ₃					
Ertixiite	Na ₂ Si ₄ O ₉					

Quadro 5.9 - Compostos identificados por DRX nas amostras de escória de aciaria LD - continuação

Composto	Fórmula	B	D	G	H	X
Etringita	$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26(\text{H}_2\text{O})$					
Ferrita de Ca Hidratada	$\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{OH})_{12}$					
Ferroaluminato de Ca hidratado	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$					
Gesso - Sulfato de cálcio	$\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$					
Gismondina	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8\cdot 4\text{H}_2\text{O}$					
Goetita	$\text{FeO}(\text{OH})$					
Hematita	Fe_2O_3					
Hexaluminato de cálcio	$\text{CaO}\cdot\text{Al}_{12}\text{O}_{12}$					
Larnita – Silicato dicálcico	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$					
Magnesita	MgCO_3					
Metatenardita	Na_2SO_4					
Mica	variável					
Monoaluminato de cálcio	CaAl_2O_4					
Monosulfoaluminato de Ca hidratado	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot 13\text{H}_2\text{O}$					
Periclásio	MgO					
Pirita	FeS_2					
Portlandita	$\text{Ca}(\text{OH})_2$					
Quartzo	SiO_2					
Ranquinita	$\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7$					
Silicato de cálcio hidratado	$\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot(\text{H}_2\text{O})_4$					
Spessartina	$\text{Mn}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$					
Sulfato de K	K_2SO_4					
Sulfato de Mg hidratado	$\text{MgSO}_4\cdot 5\text{MgO}\cdot 8\text{H}_2\text{O}$					
Sulfotrialuminato tetracálcico	$[\text{Ca}_4(\text{Al}_6\text{O}_{12})\text{SO}_4]$					
Takanelite	$(\text{Mn},\text{Ca})\text{Mn}_4\text{O}_9\cdot\text{H}_2\text{O}$					
Tenardita	Na_2SO_4					
Tridimita	SiO_2					
Vaterita	CaCO_3					
Wustita	FeO					

identificado
Não identificado

5.3.1.2 Análise química

Os resultados das amostras de escória de aciaria LD constam do Quadro 5.10.

Quadro 5.10 - Resultados das análises químicas das amostras de escória de aciaria LD

Ensaio		Resultados em massa (%)				
		B	D	G	H	X
Perda ao Fogo	PF	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Óxido de silício	SiO ₂	10,07	10,03	9,52	7,40	9,69
Óxido de alumínio	Al ₂ O ₃	2,06	1,19	3,70	2,89	3,38
Óxido de ferro	Fe ₂ O ₃	29,93	31,24	31,95	35,82	34,72
Óxido de cálcio	CaO	38,43	39,29	39,32	36,44	40,28
Óxido de magnésio	MgO	9,24	8,25	9,62	10,49	5,14
Anidrido sulfúrico	SO ₃	0,13	0,19	0,08	0,12	0,10
Óxido de sódio	Na ₂ O	0,04	0,01	0,02	0,01	0,01
Óxido de potássio	K ₂ O	0,01	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Anidrido Fosfórico	P ₂ O ₅	1,84	1,92	1,20	1,25	1,26
Ferro Metálico	Fe	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Óxido de Cálcio livre	CaO l	0,06	1,73	4,81	4,48	7,02

5.3.1.3 Microscopia eletrônica de varredura

Os resultados da microscopia eletrônica de varredura, juntamente com o do EDS, são registrados sob a forma de microfractografias e de diagramas, respectivamente. Estes diagramas mostram a composição química elementar de um ponto ou uma região observados na microfractografia. O ANEXO III contém os resultados do MEV/EDS.

5.3.1.4 Discussões dos resultados

De acordo com os resultados da análise química, a perda ao fogo não é detectada em nenhuma das amostras. Os menores teores de óxido de cálcio livre são encontrados nas amostras B e D (0,06 e 1,73 %, respectivamente). Os teores das demais amostras variam de 4,48 a 7,02 %.

A difração de raios-X das amostras de escórias LD mostra pequenas diferenças: a amostra D é a que apresenta menor número de minerais identificados, não contendo um dos aluminatos de cálcio e gismondina (aluminossilicato de cálcio). A gismondina também não é detectada nas amostras G, H e X. A spessartina (contendo Si, Al, Mn) não aparece na amostra B.

É realizado um cruzamento dos resultados das análises MEV/EDS e DRX, obtendo-se os minerais detectados pelas duas técnicas, para as amostras LD (Quadro 5.11).

Quadro 5.11 - Minerais detectados por MEV/EDS e DRX nas amostras de escória de aciaria LD

Amostras	LD				
	B	D	G	H	X
Aluminato de cálcio			X		
Carbonato de cálcio (calcita, aragonita, vaterita)	X	X	X	X	X
Etringita			X		
Ferrita de cálcio hidratada	X	X	X	X	X
Ferroaluminato de cálcio hidratado	X		X	X	X
Minério de ferro (goethita, hematita, wustita)	X		X		
Portlandita	X	X	X	X	X
Silicato dicálcico		X	X		X
Silicato tricálcico		X	X		X
Silicatos de cálcio hidratados (C-S-H)	X		X	X	X

Pode-se observar que a presença dos carbonatos de cálcio, da ferrita de cálcio hidratada e da portlandita é identificada pela MEV e confirmada pela DRX em todas as amostras de escórias LD. Os aluminatos de cálcio e a etringita são detectados por MEV e DRX apenas na amostra G. Os silicatos de cálcio hidratados não são identificados na amostra D, o silicato tricálcico é encontrado nas amostras D, G e X e o silicato dicálcico nas amostras D, G, e X. O ferroaluminato de cálcio hidratado é identificado em todas as amostras, com exceção da amostra D e o minério de ferro é encontrado apenas nas amostras B e G. As Figuras 5.25 a 5.30 mostram alguns compostos identificados na microscopia eletrônica de varredura e detectados também por DRX. Os demais compostos estão no ANEXO III.

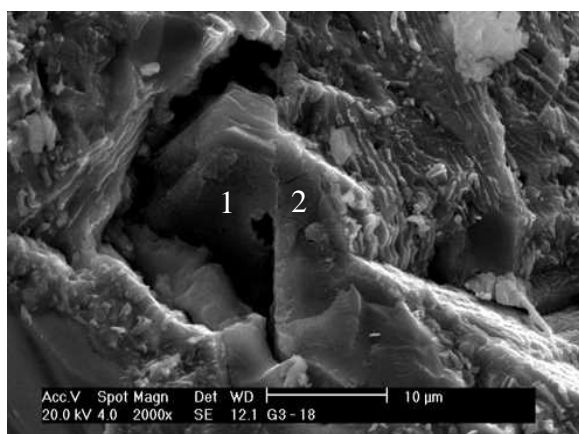


Figura 5.25 - Portlandita (1) e Silicato tricálcico (2)

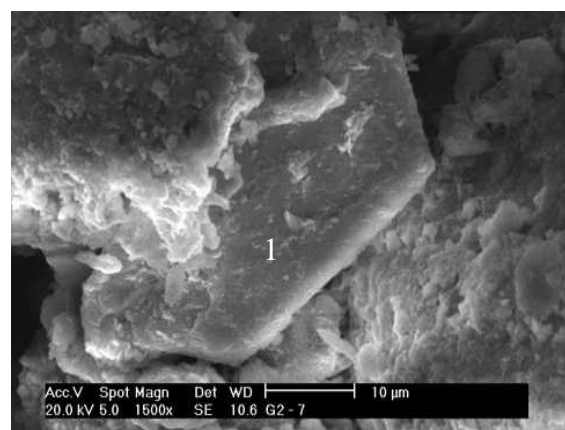


Figura 5.26 - Carbonato de cálcio (1)

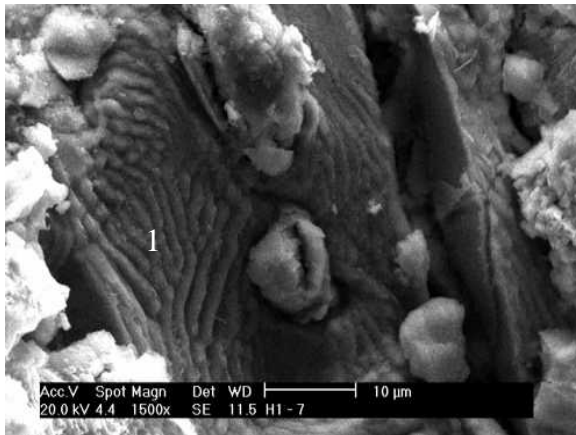


Figura 5.27 - Ferroaluminato de cálcio hidratado (1)

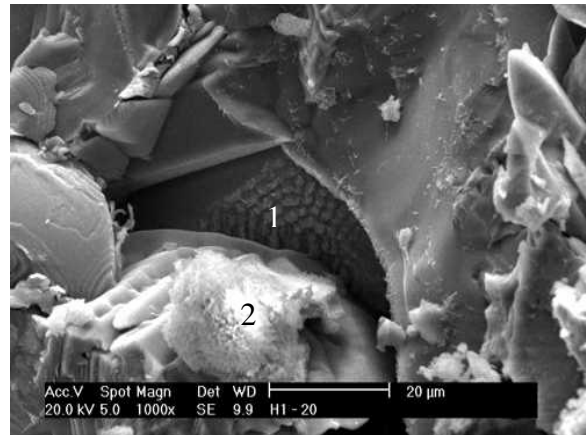


Figura 5.28 - Ferrita de cálcio hidratada (1), C-S-H (2)

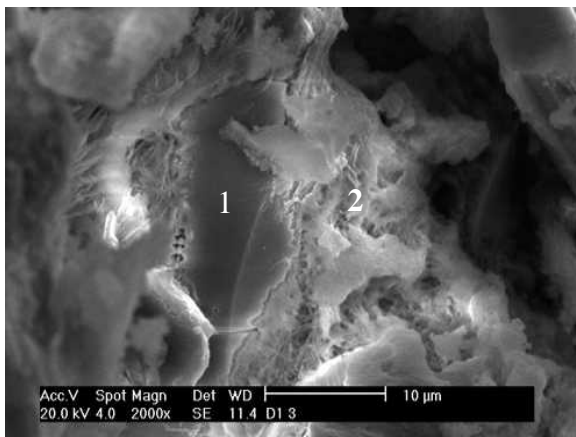


Figura 5.29 - Silicato dicálcico (1), Silicato tricálcico (2)

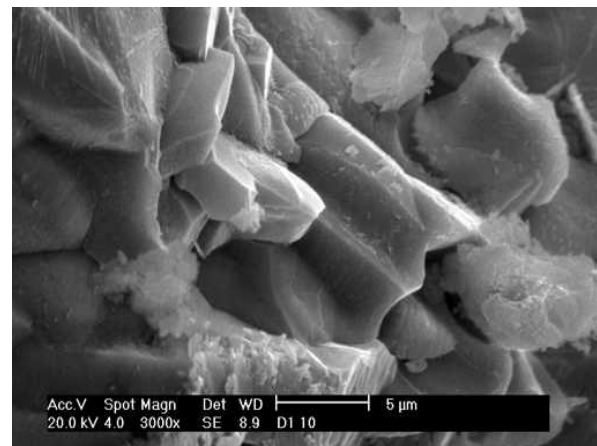


Figura 5.30 - Silicato dicálcico

5.3.2 Amostras de escória de aciaria EAF

5.3.2.1 Difração de raios-X

Os compostos identificados pela difração de raios-X das amostras de escória de aciaria EAF estudadas estão resumidos no Quadro 5.12. Os resultados da DRX, distância interplanar (d) e intensidade dos raios (I) estão no ANEXO II.

Quadro 5.12 - Compostos identificados por DRX nas amostras de escórias de aciaria EAF

Composto	Fórmula	C	J	Y
Alumínio	Al			
AFm	$[Ca_2Al(OH)_6][OH.6H_2O]$			
Afuilita	$Ca_3(SiO_3.OH)_2.2H_2O$			
Alita - Silicato tricálcico	$3CaO SiO_2$			
Aluminato de cálcio	$12CaO 7 Al_2O_3$			
Aluminato de cálcio	$CaO 2 Al_2O_3$			
Aluminato de cálcio	$2CaO.Al_2O_3$			
Anatase	TiO_2			
Antigorita	$Mg_3 Si_2 O_5 (OH)_4$			
Aragonita	$CaCO_3$			
Augite	$(Ca,Na)(Mg,Fe,Al,Ti)(Si,Al)_2 O_6$			
Birnessite	$Na_4Mn_{14}O_{27}.9H_2O$			
Bredigita – Silicato dicálcico	$2CaO SiO_2$			
Brownmillerita	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$			
Brucita	$Mg(OH)_2$			
Calcita	$CaCO_3$			
CaO livre	CaO			
CaO solução sólida	CaO			
Caolinita	$Al_2 Si_2 O_5 (OH)_4$			
Carbonato de Na	Na_2CO_3			
Crisotila	$Mg_3Si_2O_5 (OH)_4$			
Cyrlonvite	$NaFe_3^{+3}[(OH)_2 PO_4]_2 \cdot 2H_2O$			
Dolomita	$Ca Mg (CO_3)_2$			
Ertixiite	$Na_2Si_4O_9$			
Etringita	$Ca_6Al_2(SO_4)_3 (OH)_{12}.26(H_2O)$			
Ferrita de Ca Hidratada	$Ca_3 Fe_2 (OH)_{12}$			
Ferroaluminato de Ca hidratado	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$			
Gesso - Sulfato de cálcio	$CaSO_4 2H_2O$			
Goetita	$FeO (OH)$			
Hematita	Fe_2O_3			
Hexaluminato de cálcio	$Ca.Al_{12}O_{12}$			
Larnita – Silicato dicálcico	$2CaO.SiO_2$			
Magnesita	$MgCO_3$			
Metatenardita	Na_2SO_4			
Mica	variável			
Monoaluminato de cálcio	$CaAl_2O_4$			
Monosulfoaluminato de Ca hidratado	$3CaO.Al_2O_3.CaSO_4. 13H_2O$			
Periclásio	MgO			

Quadro 5.12 - Compostos identificados por DRX nas amostras de escórias de aciaria EAF - continuação

Composto	Fórmula	C	J	Y
Pirita	FeS ₂			
Portlandita	Ca(OH) ₂			
Quartzo	SiO ₂			
Ranquinita	Ca ₃ Si ₂ O ₇			
Silicato de cálcio hidratado	CaO.SiO ₂ .(H ₂ O) ₄			
Spessartina	Mn ₃ Al ₂ Si ₃ O ₁₂			
Sulfato de K	K ₂ SO ₄			
Sulfato de Mg hidratado	MgSO ₄ .5MgO.8H ₂ O			
Sulfotrialuminato tetracálcico	[Ca ₄ (Al ₆ O ₁₂)SO ₄]			
Tenardita	Na ₂ SO ₄			
Tridimita	SiO ₂			
Vaterita	CaCO ₃			
Wustita	FeO			
identificado <input checked="" type="checkbox"/>		Não identificado <input type="checkbox"/>		

5.3.2.2 Análise química

Os resultados das amostras de escória de aciaria EAF constam do Quadro 5.13.

Quadro 5.13 - Resultados das análises químicas das amostras de escória de aciaria EAF

Ensaio		Resultados em massa (%)		
		C	J	Y
Perda ao Fogo	PF	n.d.	n.d.	n.d.
Óxido de silício	SiO ₂	14,40	15,29	24,12
Óxido de alumínio	Al ₂ O ₃	2,87	5,27	15,89
Óxido de ferro	Fe ₂ O ₃	39,12	42,31	16,19
Óxido de cálcio	CaO	28,83	27,26	23,75
Óxido de magnésio	MgO	3,04	2,41	12,83
Anidrido sulfúrico	SO ₃	0,28	0,22	0,05
Óxido de sódio	Na ₂ O	0,09	0,11	0,04
Óxido de potássio	K ₂ O	0,01	0,02	0,01
Anidrido Fosfórico	P ₂ O ₅	1,38	0,67	0,36
Ferro Metálico	Fe	n.d.	0,03	0,01
Óxido de Cálcio livre	CaO l	0,15	0,27	0,09

5.3.2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Os resultados da microscopia eletrônica de varredura, juntamente com o do EDS, são registrados sob a forma de microfractografias e de diagramas, respectivamente. Estes

diagramas mostram a composição química elementar de um ponto ou uma região observados na microfractografia. O ANEXO III contém os resultados do MEV/EDS.

5.3.2.4 Discussões dos resultados

A análise química das amostras de escória EAF mostra que o teor de óxido de alumínio é visivelmente mais alto na amostra Y do que nas outras amostras EAF analisadas. A amostra Y também apresenta alto teor de óxido de magnésio (12,33%), em relação às outras duas amostras (teores são de 3,04% e 2,41 %). O ferro metálico não é detectado na amostra C. Os resultados da DRX das amostras de escória EAF mostram ausência dos seguintes minerais: birnessite e ertixite (amostra J), óxido de cálcio em solução sólida (J), ferrita de cálcio hidratada (amostra Y) e mica e spessartina (amostra C).

Em um cruzamento dos resultados obtidos por MEV/EDS e DRX, obtêm-se os minerais detectados pelas duas técnicas, para as amostras EAF (Quadro 5.14).

Quadro 5.14 - Minerais detectados por MEV/EDS e DRX nas amostras de escória de aciaria EAF

Amostras Compostos	EAF		
	C	J	Y
Aluminato de cálcio		X	X
Caolinita		X	X
Carbonato de cálcio (calcita, aragonita, vaterita)	X	X	X
Dolomita		X	
Etringita	X	X	X
Ferrita de cálcio hidratada	X		X
Ferroaluminato de cálcio hidratado			X
Minério de ferro (goethita, hematita, wustita)	X	X	X
Monosulfoaluminato de cálcio hidratado			X
Portlandita	X	X	X
Silicato dicálcico	X	X	X
Silicato tricálcico			X
Silicatos de cálcio hidratados (C-S-H)		X	X
Silica (quartzo, tridimita, etc.)	X		X

Pode-se observar que a presença dos carbonatos de cálcio, da etringita, dos minérios de ferro, da portlandita e do silicato dicálcico é identificada pela MEV e confirmada pela DRX em todas as amostras de escórias EAF. Os aluminatos de cálcio, a caolinita e o silicato de cálcio hidratado não são identificados pelas duas análises apenas para a amostra C. A dolomita é detectada por MEV e DRX apenas na amostra J. A ferrita de

cálcio hidratada e a sílica são detectadas nas amostras C e Y por ambos os métodos de análise. O ferroaluminato de cálcio e o silicato tricálcico são identificados apenas na amostra Y por MEV e DRX.

As Figuras 5.31 a 5.36 mostram alguns compostos identificados na microscopia eletrônica de varredura e detectados também no DRX. Os demais compostos estão no ANEXO III.

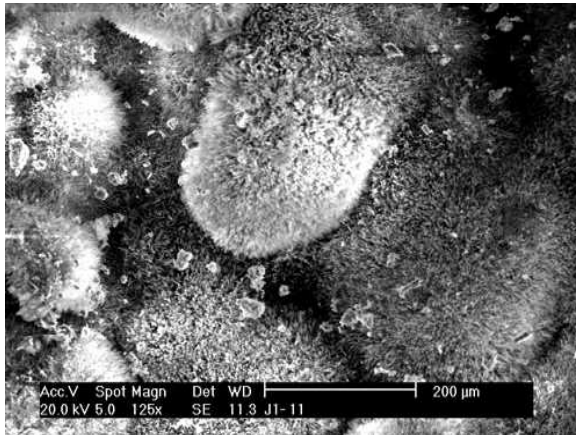


Figura 5.31 - Carbonato de cálcio

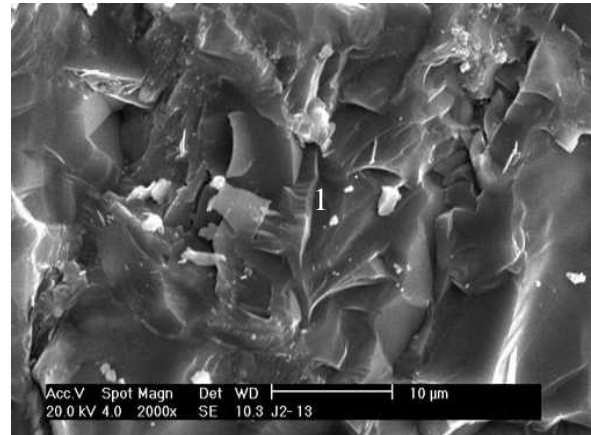


Figura 5.32 - C-S-H (1)

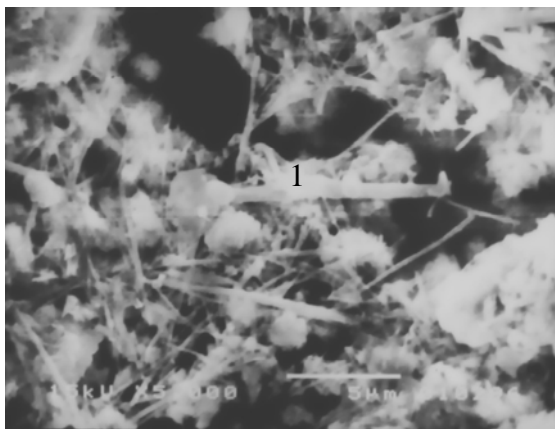


Figura 5.33 - Ferrita de cálcio hidratada (1)

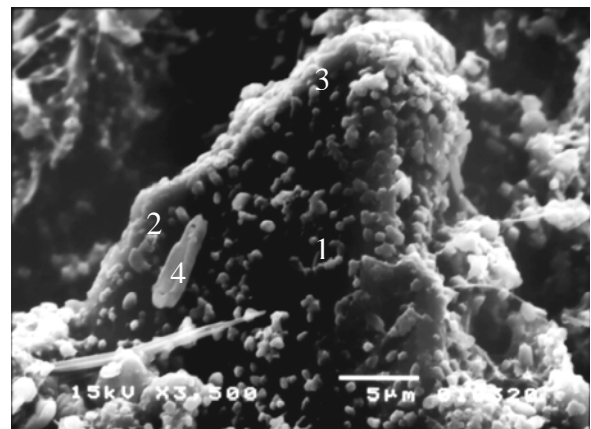


Figura 5.34 - Carbonato de cálcio (1), (2), (3) e (4)



Figura 5.35 - Monossulfoaluminato de cálcio (1), Aluminato de cálcio (2)

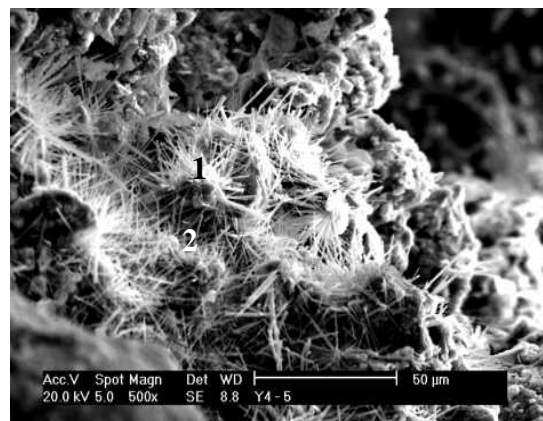


Figura 5.36 - Etringita (1) e (2)

5.4 Resultados do ensaio de expansão a vapor – *Steam Test*

O método de ensaio *Steam Test* utiliza vapor para acelerar as reações de hidratação, que causam expansibilidade na escória de aciaria. A norma BS EN 1744-1:1998 cita o mínimo de dois corpos-de-prova por amostra de escória de aciaria. Neste estudo o potencial de expansão é determinado para quatro corpos-de-prova por amostra, para estudo da variabilidade.

O método de compactação utilizado, conforme descrito no capítulo 4, é manual, utilizando soquete padrão Proctor normal e a energia de compactação em torno da energia de Proctor normal (52 a 67N), já que o número de golpes é padronizado.

O Quadro 5.15 mostra a porosidade aparente prática das amostras, calculada a partir da massa específica real e do volume da amostra após compactação.

Quadro 5.15 - Porosidade aparente média das amostras de escória de aciaria compactadas

Escória	Amostra	Massa específica real (kg/dm ³)	Porosidade aparente (%)
LD	B	3,75	37
	D	3,31	30
	G	3,46	34
	H	3,48	29
	X	3,57	31
EAF	C	3,61	38
	J	3,52	40
	Y	3,14	33

A norma BS EN 1744-1/-98 cita que, na prática, permanece no corpo-de-prova uma porosidade aparente (*void content*) entre 20 a 25% do volume, utilizando o sistema de compactação dinâmica (mesa vibratória e carga estática). Na compactação com soquete proctor normal observa-se que a partir do 100º golpe ocorre apenas um rearranjo dos grãos com aumento da porosidade ao final do 150º golpe e a porosidade aparente não atinge 25%.

O menor limite de potencial de expansão recomendado por Motz e Geiseler (2001) para utilização da escória de aciaria como agregado para camadas granulares como base e sub-base em pavimentação é de 5%. As normas EN 13043/02 e EN 13242/02 especificam o mesmo limite, conforme visto no capítulo 3.

5.4.1 Potencial de expansão das amostras de escória de aciaria LD

As Figuras 5.37 a 5.41 mostram os resultados do potencial de expansão das escórias de aciaria LD, amostras B, D, G, H, e X, respectivamente, segundo o método BS EN 1744-1/98.

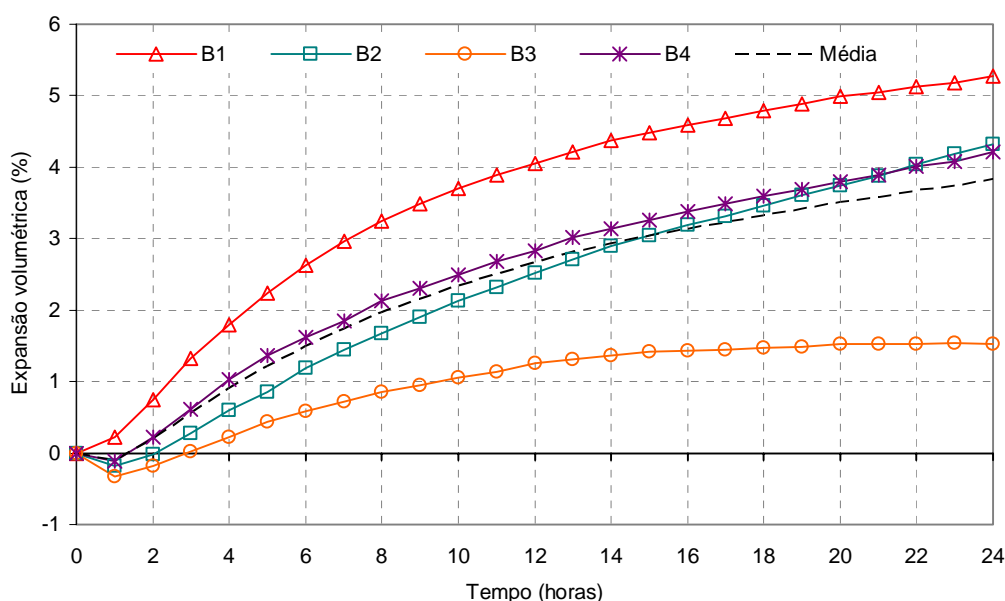


Figura 5.37 - Resultados da expansão acumulada da amostra B de escória de aciaria LD segundo o método *Steam Test*

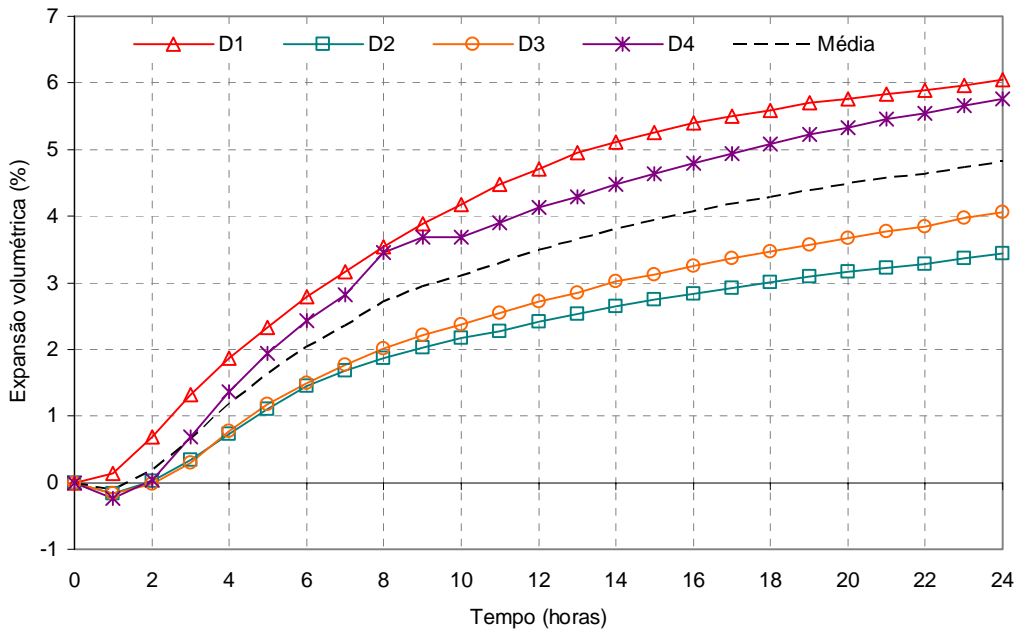


Figura 5.38 - Resultados da expansão acumulada da amostra D de escória de aciaria LD segundo o método *Steam Test*

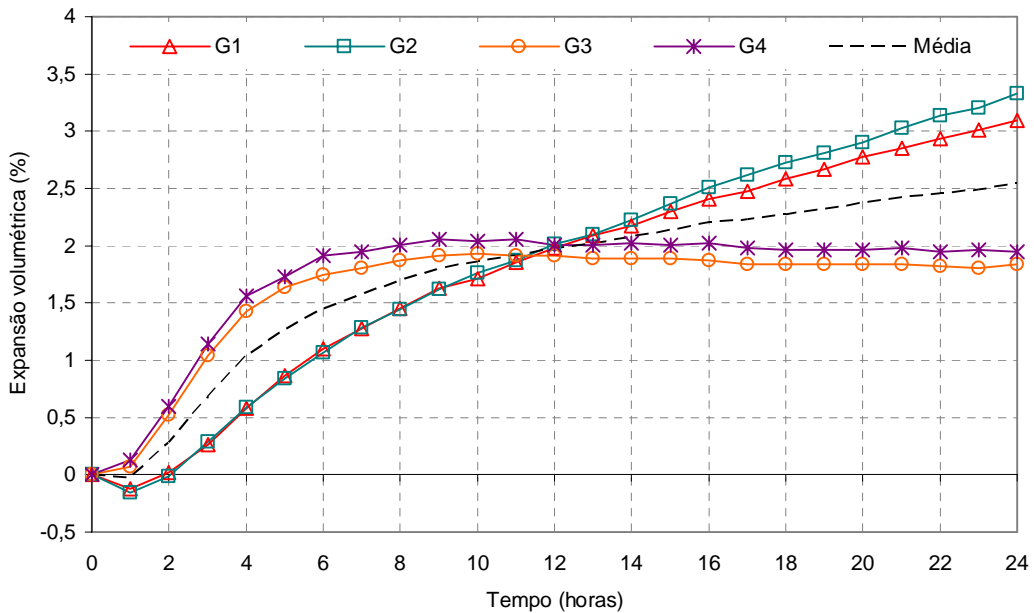


Figura 5.39 - Resultados da expansão acumulada da amostra G de escória de aciaria LD segundo o método *Steam Test*

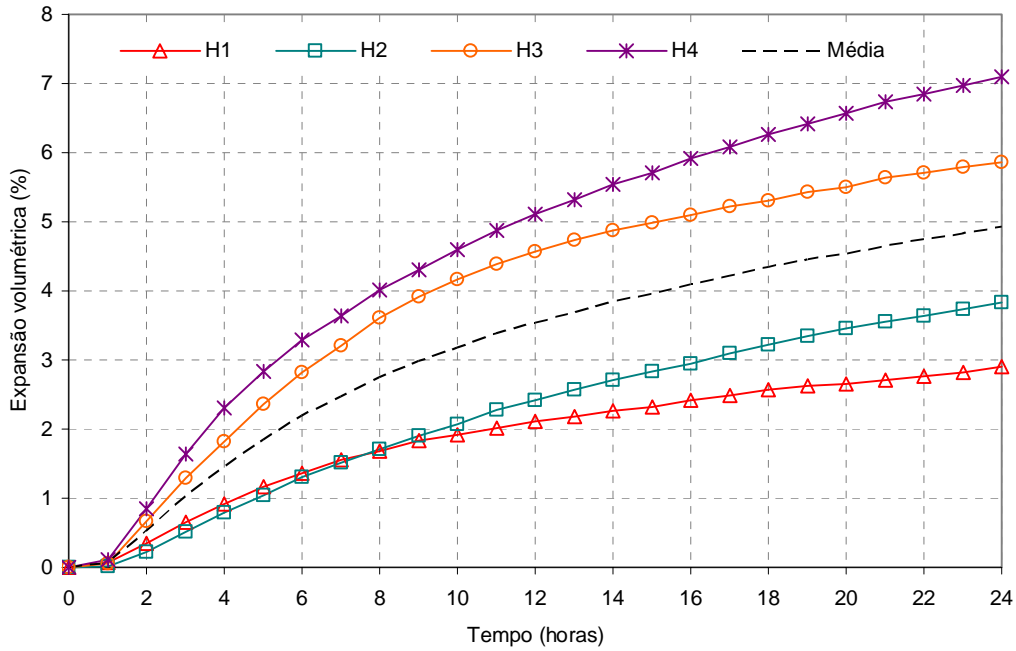


Figura 5.40 - Resultados da expansão acumulada da amostra H de escória de aciaria LD segundo o método *Steam Test*

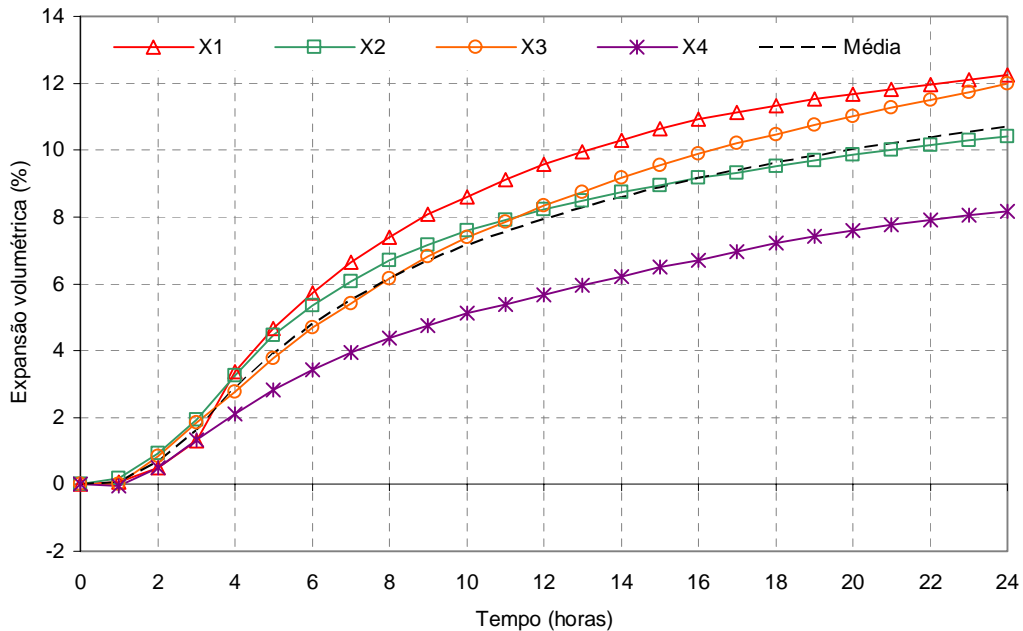


Figura 5.41 - Resultados da expansão acumulada da amostra X de escória de aciaria LD segundo o método *Steam Test*

O Quadro 5.16 mostra a análise estatística das amostras LD.

Quadro 5.16 - Análise estatística das amostras de escória de aciaria LD

Análise estatística	Amostras				
	B	D	G	H	X
Média	3,83	4,83	2,55	4,93	10,70
Desvio padrão	1,61	1,27	0,77	1,91	1,88
Máximo	5,27	6,05	3,33	7,10	12,26
Mínimo	1,52	3,44	1,84	2,90	8,16
Variância	2,60	1,63	0,59	3,64	3,55
Coef. de variação (%)	42,05	26,40	30,14	38,75	17,61

A amostra B, com menor teor de óxido de cálcio livre (0,06%) apresenta o menor valor mínimo de resultado de potencial de expansão (1,52%) e valor máximo de potencial de expansão de 5,27%. O teor de óxido de magnésio da amostra B é de 9,24%.

A amostra D apresenta valores de potencial de expansão que variam de 3,44% a 6,05%. Os teores de óxido de cálcio livre e óxido de magnésio presentes nessa amostra são, respectivamente, 1,73% e 8,25%.

A amostra G não apresenta nenhum ponto acima de 5% nos resultados de potencial de expansão acumulada. O valor máximo de expansão dessa amostra é o menor entre os resultados máximos para as escórias LD (3,33%). Na análise química da amostra G, o teor de óxido de cálcio livre é 4,81% e de óxido de magnésio, 9,62%.

A amostra H apresenta dois pontos do potencial de expansão acumulada acima de 5%. O valor máximo determinado é de 7,10% de expansão volumétrica. Os teores de óxido de magnésio e óxido de cálcio livre são, respectivamente, 10,49% e 4,48%.

O teor de óxido de magnésio da amostra X é 5,14%, o mais baixo entre as amostras de escória de aciaria LD e muito próximo ao limite de 5% definido por Motz e Geiseler (2001) para realização do ensaio por um período de 168 horas. Ao final do período de vinte e quatro (24) horas do ensaio a vapor, a amostra X, cujo teor de óxido de cálcio livre é o mais elevado (7,10%), apresenta resultados de potencial de expansão entre 8,16% e 12,26%.

O resultado de 12,26% da amostra X pode confirmar a relação direta do potencial de expansão com o teor de óxido de cálcio livre, que é o principal responsável pela expansão durante o ensaio de 24 horas. No entanto, não é possível fazer essa relação

para todos os resultados, provavelmente devido às pequenas porções da amostra para análise química, que apesar de ser colhida sob uma amostragem criteriosa, dificilmente representa a amostra como um todo.

O óxido de cálcio livre e o óxido de cálcio em solução sólida são identificados pela DRX, em todas as amostras LD, assim como os minerais formados pela sua hidratação e carbonatação, portlandita e carbonatos de cálcio.

O periclásio é identificado pela DRX em todas as amostras LD. O resultado da hidratação do óxido de magnésio livre é a formação da brucita que também é detectada pela DRX em todas as amostras. A dolomita, proveniente da carbonatação do cálcio e do magnésio presentes no material, também é encontrada pela DRX em todas as amostras LD.

Os minerais formados pela oxidação e corrosão do ferro metálico, wustita, goetita e hematita são identificados em todas as amostras LD.

Os resultados de potencial de expansão das escórias de aciaria LD em conjunto com os resultados da caracterização da microestrutura mostram que, para utilização em camadas confinadas de pavimentos, deve-se submeter o material a um processo de tratamento com hidratação prévia capaz de reduzir este potencial por meio da estabilização dos compostos reativos existentes na escória de aciaria.

5.4.2 Potencial de expansão das amostras de escória de aciaria EAF

As Figuras 5.42 a 5.44 mostram os resultados do potencial de expansão das escórias de aciaria EAF, amostras C, J e Y respectivamente, segundo o método BS EN 1744-1/98

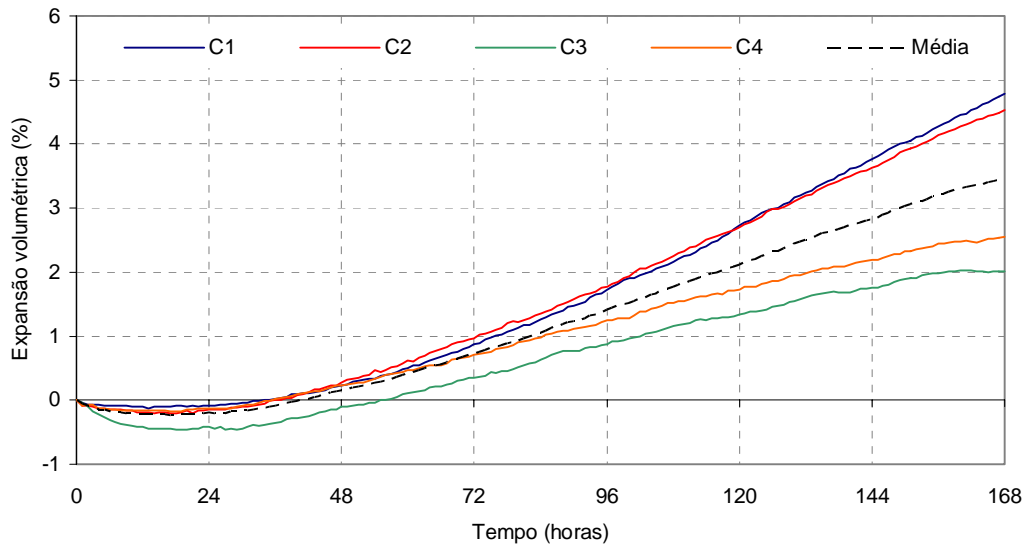


Figura 5.42 - Resultados da expansão acumulada da amostra C de escória de aciaria EAF segundo o método *Steam Test*

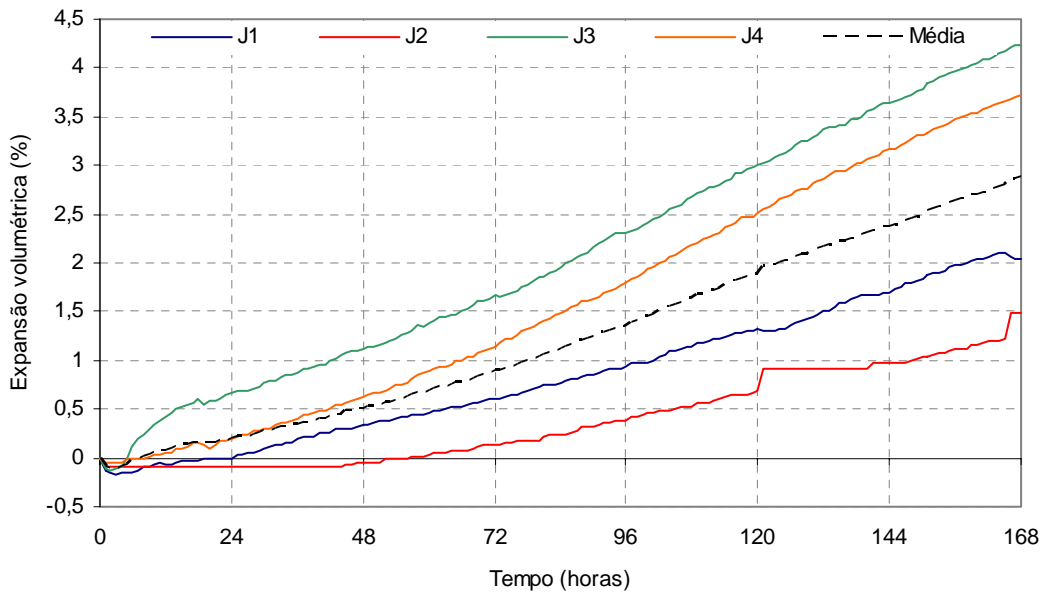


Figura 5.43 - Resultados da expansão acumulada da amostra J de amostra de escória de aciaria EAF segundo o método *Steam Test*

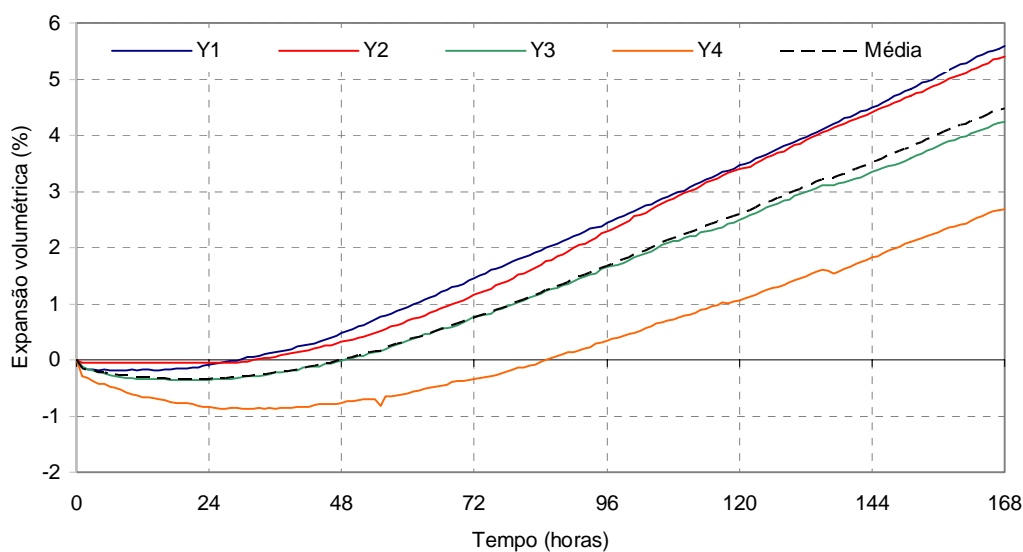


Figura 5.44 - Resultados da expansão acumulada da amostra Y de escória de aciaria EAF segundo o método *Steam Test*

O Quadro 5.17 mostra a análise estatística das amostras de escória de aciaria EAF.

Quadro 5.17 - Análise estatísticas das amostras de escória de aciaria EAF

Análise estatística	Amostras		
	C	J	Y
Média	3,47	2,87	4,48
Desvio padrão	1,39	1,31	1,34
Máximo	4,78	4,23	5,59
Mínimo	2,02	1,49	2,69
Variância	1,94	1,72	1,79
Coef. de variação (%)	40,08	45,64	29,82

As amostras C e J não apresentam nenhum ponto de potencial de expansão acumulada acima de 5% e possuem, respectivamente, 3,04% e 2,41% de óxido de magnésio em sua composição química. São os menores teores determinados nas oito amostras estudadas e os resultados máximos de potencial de expansão dessas amostras estão entre os três menores valores obtidos para todas as amostras de escória EAF e LD.

A amostra Y apresenta dois pontos acima de 5% para o potencial de expansão acumulada. O teor de óxido de magnésio dessa amostra é o mais elevado entre todas amostras analisadas (12,83%).

O teor de óxido de cálcio livre das amostras de escória de aciaria EAF, determinado pela análise química, são bastante inferiores àqueles encontrados nas amostras LD, com exceção da amostra B, que também apresenta baixo teor de CaO livre (0,06%).

É importante lembrar que a quantidade de escória utilizada para análise química é extremamente pequena (350 g). No entanto, alguns resultados podem ser associados aos teores de óxido de magnésio e óxido de cálcio livre presentes nas amostras.

O óxido de cálcio livre é identificado pela DRX, em todas as amostras EAF assim como os minerais formados pela sua hidratação e carbonatação, portlandita e carbonatos de cálcio. O óxido de cálcio em solução sólida não é identificado apenas na amostra J.

O periclásio é identificado pela DRX em todas as amostras EAF. O resultado da hidratação do óxido de magnésio livre é a formação da brucita que também é detectada pela DRX em todas as amostras. A dolomita, proveniente da carbonatação do cálcio e do magnésio presentes no material, também é encontrada pela DRX em todas as amostras EAF.

Os minerais formados pela oxidação e corrosão do ferro metálico, wustita, goetita e hematita são identificados em todas as amostras EAF.

5.4.3 Avaliação do teor de MgO no potencial de expansão

O período de ensaio também interfere nos resultados de expansão máxima. Motz e Geiseler (2001) criaram uma tabela relacionando o tempo de ensaio do *Steam Test* com o teor de óxido de magnésio e o tipo de aplicação.

O tempo de ensaio prescrito pela norma BS EN 1744-1:98 para as amostras de escória de aciaria LD é 24 horas e para as escórias de aciaria EAF é 168 horas. Porém, Motz e Geiseler (2001) recomendam a adoção de tempo de ensaio para as amostras LD com teor de MgO acima de 5% também, de 168 horas.

Os teores de óxido de magnésio variam nas amostras de escória LD de 5,14% a 10,49% e, nas amostras de escória EAF, de 2,41% a 12,83%, mostrando que as escórias de aciaria LD podem também apresentar elevados teores de MgO. A composição química

das escórias de aciaria LD brasileiras, apresentada por Little e Setepla (1999), também mostra teores elevados de MgO, sempre superiores a 5%.

Schlosser e Geiseler (1988) consideram que as escórias ricas em MgO podem ser tanto LD quanto EAF, desde que sejam geradas com o uso de dolomita ou cal dolomítica como fundente. Também consideram que escórias com baixo teor de óxido de magnésio são especialmente escórias LD formadas com o uso de cal com teor de magnésio abaixo de 3% em massa. A expansibilidade dessas escórias é fundamentalmente aquela gerada pelo CaO livre.

Com o intuito de investigar a evolução do potencial de expansão para amostras com teor de MgO superior a 5%, realiza-se o ensaio *Steam Test* da amostra de escória de aciaria G por período de 168 horas. Essa amostra é selecionada por ter apresentado o menor valor para expansão máxima (3,33%) entre as amostras LD ensaiadas por 24 horas. A Figura 5.45 mostra o resultados deste ensaio.

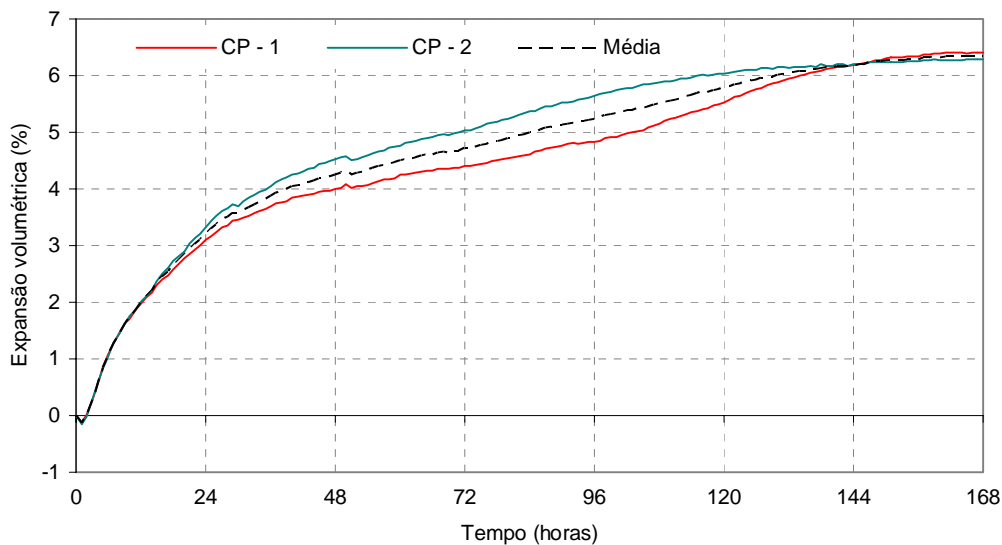


Figura 5.45 - Resultados da expansão acumulada da amostra G segundo o método *Steam Test*, por período de 168 horas

Analisando o gráfico dos resultados de potencial de expansão das amostras G, segundo o método *Steam Test*, observa-se que, após as 24 horas iniciais, a expansão acumulada continua em ascensão. Os resultados do potencial de expansão do ensaio com 168 horas são maiores em relação ao ensaio com 24 horas de duração e superiores ao limite de

5%, confirmando a necessidade de prolongar o tempo de ensaio, conforme sugerido por Motz e Geiseler (2001), na ocorrência de teores elevados de MgO (maiores que 5%).

5.4.4 Considerações finais sobre o capítulo

As amostras de escória de aciaria tanto EAF quanto LD ensaiadas fisicamente apresentam elevada massa específica, cerca de 20% superior aos agregados naturais, devido a uma quantidade significativa de ferro na sua composição. Com exceção da amostra J, as escórias de aciaria apresentam índice de Abrasão Los Angeles inferiores a 25%. A escória de aciaria é, portanto, um material denso e resistente à abrasão, características que podem ser aproveitadas para sua utilização como agregado para pavimentação.

Por outro lado, as amostras de escória de aciaria estudadas apresentam absorção elevada, acima de 2% e a superfície dos grãos de escória de aciaria apresenta uma grande quantidade de cavidades. Para Samaris (2006) a porosidade das escórias de aciaria é resultante das bolhas de ar adquiridas durante o seu resfriamento e quando resfriadas com água podem apresentar maior porosidade e menor resistência a fragmentação do que quando resfriadas apenas ao ar.

O resultado da caracterização da microestrutura identifica além dos principais componentes, uma grande variedade de minerais, por meio da DRX. Os resultados da análise química são coerentes em relação as faixas de teores de óxidos encontradas por alguns pesquisadores (SBRIGHI; BATTAGIN, 2002; GEYER et al., 2000; GUPTA, et al., s.d.; FILEV, 2002; SSA, 2003; POLISSENI, 2002, MACHADO, 2000; LITTLE; SETEPLA, 1999; MURPHY et al, 1997; MOTZ; GEISELER, 2001; GEISELER, 1999; NSA, s.d.; GEORGE; SORRENTINO, s.d.; D. LI et al, 1997; QIAN et al, 2002; AMARAL, 1999, SHIH et al, 2004).

A cal livre, um dos responsáveis pela expansão da escória de aciaria, foi detectada pela DRX e pela análise química (pelo método do etileno-glicol) em todas as amostras. No entanto, a heterogeneidade, a pequena quantidade da amostra ensaiada e a confiabilidade questionável do método de determinação do teor de cal livre não permitem uma correlação direta com os resultados de expansão.

A Figura 5.46 apresenta os valores máximos de potencial de expansão obtidos por meio do método de ensaio *Steam Test* das escórias de aciaria LD e EAF.

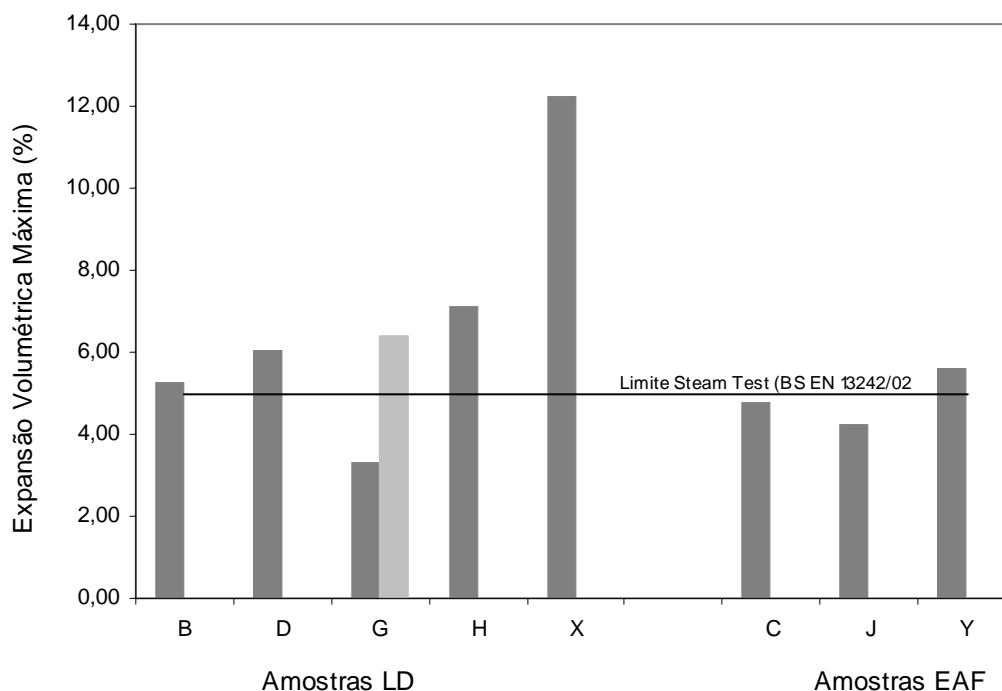


Figura 5.46 - Comparativo entre os resultados máximos obtidos para as amostras de escória de aciaria tipo LD e EAF (168 horas)

Pode-se observar que as amostras LD ensaiadas por 24 horas apresentam potencial de expansão pelo *Steam Test* superior ao limite de 5% (BS EN 13242/02) com exceção da amostra G. Os resultados mostram que deve haver preocupação também quanto a expansibilidade das escórias EAF sendo que a amostra Y ultrapassa o limite de 5%. Masuero et al (2000) também analisaram uma escória EAF não tratada, logo após a sua geração, para análise do potencial de expansão pelo método JIS 5015 durante 72 dias e obteve um resultado de 17,7% de expansão, extremamente superior ao limite recomendado pela norma (2%).

Considerando que, para as amostras LD, os ensaios foram realizados por 24 horas e, que o tempo de ensaio proposto por Motz e Geiseler (2001) para as escórias de aciaria LD com teores de MgO acima de 5%, e confirmado nesse estudo, é de 168 horas, provavelmente, o potencial de expansão destas escórias seja ainda superior ao apresentado.

Dessa forma, considera-se importante a análise do teor de óxido de magnésio, adicionalmente ao teor de óxido de cálcio, para determinação do tempo de ensaio de

avaliação do potencial de expansão de escórias de aciaria segundo o método do *Steam Test*.

6 CONCLUSÕES

O uso mais expressivo das escórias de aciaria é como material para base e sub-base de estradas e as vantagens econômicas decorrentes resultam da possibilidade de projeto e especificação de camadas mais finas para uma mesma resistência. Quando corretamente selecionada e processada, a escória de aciaria fornece ao engenheiro rodoviário muitas qualidades necessárias para o atendimento da vida útil de projeto e redução nos custos de manutenção preventiva e corretiva. Cabe também ressaltar o benefício ambiental da utilização da escória de aciaria em substituição à areia e à brita, já que esses são recursos naturais e não renováveis.

Entretanto, apesar de suas excelentes características, a escória de aciaria apresenta um fator limitante à sua utilização em camadas confinadas de pavimentos: a expansão, causada por reações envolvendo, sobretudo, a hidratação do óxido de cálcio e do óxido de magnésio (ALEXANDRE et al., s.d.; GEISELER, 1996; GEISELER e SCHLÖSSER, 1988; MOTZ; GEISELER, 1998; GUMIERI et al., 2000; MACHADO, 2000; SAHAY et al., 2000; ÂNGULO et al., 2001; ROHDE, 2002; PENA, 2004).

Com isso, têm sido desenvolvidos e adotados métodos experimentais de determinação da expansão das escórias de aciaria em países como Estados Unidos, Japão e Alemanha, podendo-se citar o PTM 130/1978, JIS A 5015/1992, ASTM D 4792/2000 e o BS EN 1744-1/1998 (MACHADO, 2000, MOTZ; GEISELER, 2001; RAPOSO, 2005).

Atendendo a um dos objetivos do trabalho, as amostras de escória de aciaria são ensaiadas pelo método BS EN 1744- 1/1998 (*Steam Test*). A análise dos resultados permite observar a diferença entre o comportamento expansivo das escórias de aciaria do tipo LD e EAF desta pesquisa. As amostras de escória de aciaria tanto LD quanto EAF precisam sofrer algum tipo de tratamento com o objetivo de reduzir os níveis de expansão para que possam ser utilizadas em camadas de base e sub-base de pavimentos sem que eles sofram danificações ao longo do tempo.

As amostras são avaliadas também quanto à composição mineralógica por meio das técnicas de análise química, microscopia eletrônica de varredura e difração de raios-X. De acordo com os resultados a caracterização da microestrutura e do potencial de expansão, podem ser feitas as seguintes considerações:

- As amostras de escória de aciaria submetidas ao ensaio à vapor, sem receber nenhum tratamento, apresentam elevado potencial de expansão, independente do processo de geração LD ou EAF;
- O potencial de expansão das escórias de aciaria EAF não pode ser identificado nas primeiras 24 horas de ensaio;
- A variabilidade dos resultados apresentados pelas amostras de escória de aciaria LD e EAF (Quadro 6.1) reforça a necessidade de realização de uma amostragem criteriosa dos lotes de escória de aciaria, considerando as normas da ABNT de amostragem de resíduos (NBR 10007/2004) e de amostragem de agregados (NM 26/2001), tal como foi realizada a amostragem neste estudo.

Quadro 6.1 - Coeficiente de variação dos resultados de potencial de expansão das amostras de escórias de aciaria

Amostras	LD					EAF		
	B	D	G	H	X	C	J	Y
CV (%)	42,05	26,40	30,14	38,75	17,61	40,08	45,64	29,82

- O método *Steam Test* expõe a amostra a condições altamente agressivas de aceleração dos mecanismos de expansão e, conseqüentemente, favorece a heterogeneidade dos resultados de potencial de expansão das escórias de aciaria, comprovado pelo coeficiente de variação;
- O *Steam Test* é capaz de identificar o potencial de expansão decorrente da hidratação do MgO, que pode ser extremamente lenta nas utilizações das escórias de aciaria como base e sub-base, e que também pode comprometer o desempenho em serviço do pavimento. Deve-se considerar que, em várias situações, os problemas oriundos da expansão da escória de aciaria utilizada em base e sub-base ocorreram após alguns anos de utilização. Além disso, experiências europeias, iniciadas desde 1980, mostram que os resultados do potencial de expansão de escórias de aciaria determinados pelo método *Steam Test* são compatíveis com resultados de campo sob condições de utilização em pavimentação a longo prazo (MOTZ; GEISELER, 2001);
- A amostra LD ensaiada por 168 horas apresentou acréscimo no valor da expansão total em relação às primeiras 24 horas, sugerindo que escórias LD com teores de

óxido de magnésio elevados devem ser ensaiadas por um período maior que 24 horas, conforme recomendado por MOTZ; GEISELER (2001);

- O óxido de cálcio livre é detectado em todas as amostras de escória de aciaria pela análise química (pelo método do etileno-glicol). Apesar de alguns resultados de expansão corresponderem ao teor de óxido de cálcio, não é possível fazer uma correlação direta entre todos os resultados, devido à heterogeneidade, à pequena quantidade da amostra ensaiada e à confiabilidade questionável do método de determinação do teor de cal livre;
- O óxido de magnésio detectado pela análise química corresponde ao teor total de MgO (livre e combinado). De qualquer forma, na ausência de um método confiável para análise do óxido de magnésio livre (BS EN 13242/02) recomenda-se que o teor de MgO total deve ser considerado para análise do tempo de ensaio;
- O óxido de cálcio livre e o periclásio são identificados por DRX nas amostras de escória de aciaria. Os produtos da sua hidratação e carbonatação, portlandita, carbonatos de cálcio, brucita e dolomita são identificados por DRX e também por MEV em alguns casos;
- O ferro metálico não é detectado pela análise química na maioria das amostras de escória de aciaria. Os minerais formados pela sua oxidação e corrosão, wustita, goetita e hematita são identificados por DRX e também por MEV em alguns casos;
- Existe uma grande variedade de minerais identificados pela interpretação dos resultados de DRX. Com os resultados da MEV, é possível definir aqueles que são identificados em ambas as técnicas: aluminato de cálcio, caolinita, calcita, aragonita, vaterita, dolomita, etringita, ferrita de cálcio hidratada, ferroaluminato de cálcio hidratado, goethita, hematita, wustita, monossulfalominato de cálcio, portlandita, silicato dicálcico, silicato tricálcico, silicatos de cálcio hidratados, quartzo e tridimita;
- Com os resultados da caracterização da microestrutura das amostras de escória de aciaria EAF e LD foi possível gerar álbuns de microfractografias com identificação dos compostos constituintes do material;
- Os minerais que não são identificados para determinada amostra de escória de aciaria podem ou não estar presentes na sua constituição, assim como podem existir

minerais que não foram identificados nesse trabalho, consequência da heterogeneidade do material e do tamanho reduzido da amostra para análise.

Segundo JONES et al.(1996) e MOTZ; GEISELER (2001), a escória de aciaria possui características físicas e mecânicas iguais ou superiores aos agregados naturais usados em bases e sub-bases de estradas. Os resultados da caracterização física mostram que, em geral, as características das amostras analisadas são favoráveis à utilização, mas mostra também que, em alguns casos, a escória de aciaria apresenta absorção elevada e inclusive baixa resistência à abrasão. Dessa forma, para a correta utilização das escórias de aciaria é imprescindível um programa de controle de qualidade.

A massa específica das escórias de aciaria é superior aos valores médios apresentados pelos agregados naturais. Essa característica, aliada à elevada resistência à abrasão pode significar uma vantagem econômica resultante da possibilidade de implantação de camadas de bases e sub-bases de menor espessura para uma mesma solicitação de compressão e durabilidade, se comparada aos materiais convencionais.

A análise dos resultados dos ensaios de caracterização física obtidos por essa pesquisa para as escórias de aciaria estudadas permite concluir que:

- A granulometria das amostras estudadas é uniforme e adaptável às especificações do DNIT (DNER EM 262/94) para utilização em pavimentação;
- A absorção de água determinada para as amostras de escória de aciaria ultrapassa, em alguns casos, o limite especificado pelo DNIT (DNER EM 262/94). A absorção e também a distribuição de tamanho dos poros da escória de aciaria tem relação direta com o problema de expansibilidade, portanto na ausência da quantificação da porosidade do material, a absorção deve ser um parâmetro de controle;
- Os resultados obtidos para o parâmetro massa específica estão próximos ou acima do limite especificado pelo DNIT (DNER-EM 262/94). A massa específica das escórias de aciaria tem a tendência a ser maior que a de agregados naturais e isso influencia negativamente no transporte, devido ao aumento do peso da carga transportada para um mesmo volume. Porém, é uma vantagem quando se quer algum tipo de estabilização por ação da gravidade, como confinamento e resistência à erosão por ação da água (RAPOSO, 2005);

- As amostras de escórias LD e EAF apresentam resultados superiores aos limites do DNIT (DNER-EM 262/94) para a massa unitária em função de sua elevada massa específica;
- Para os resultados de índice de abrasão Los Angeles, apenas a amostra J apresentou valor superior ao limite do DNIT (DNER-EM 262-1994). Considerando a maioria dos resultados obtidos para esse parâmetro, a escória de aciaria propicia ao pavimento maior durabilidade em relação à friabilidade;
- Para viabilizar a aplicação tecnicamente adequada da escória de aciaria em pavimentos rodoviários são necessárias não só medidas para redução do seu potencial de expansão, mas também controle das características físicas com rejeição de lotes que não atendam às especificações normalizadas;

Mundialmente, as pesquisas envolvendo a utilização das escórias de aciaria em bases e sub-bases de estradas têm se desenvolvido fortemente com o objetivo de identificar tratamentos para as escórias de aciaria, com vistas à diminuição de seu potencial de expansão ou de misturas para redução da expansão do pavimento (ALEXANDRE et al., s.d; GEORGE; SORRENTINO, 1980; YUJI, 1986; MURPHY et al., 1997; MOTZ; GEISELER, 2001).

Por meio de tratamento, adequação de projeto ou adoção de misturas de escória com outros materiais, como o saibro ou com a própria escória de alto-forno, as escórias podem ser utilizadas em maior escala. Estes procedimentos são viáveis, tanto que alguns países europeus apresentam elevados percentuais de reciclagem e reutilização das escórias de aciaria produzidas.

Com o objetivo de contribuir para a maior utilização das escórias de aciaria em bases e sub-bases de pavimentos e para dar continuidade a este trabalho, alguns temas para futuras pesquisas podem ser sugeridos:

- O método *Steam Test* expõe a amostra a condições altamente agressivas de aceleração dos mecanismos de expansão. Para verificar os efeitos do teste a vapor sobre as escórias de aciaria é necessário realizar uma investigação da microestrutura da amostra antes e após a realização do ensaio;
- Também para verificar os resultados do *Steam Test* é importante a realização de estudo de correlação de resultados de expansão da escória de aciaria em laboratório com resultados de expansão em campo para trechos experimentais construídos com

escória de aciaria para uma avaliação mais conclusiva sobre limites aceitáveis de ensaios de laboratório;

- Com base na análise dos resultados da absorção das amostras de escória de aciara, a porosidade e a distribuição dos poros da escória de aciaria devem ser investigadas, uma vez que esses parâmetros estão diretamente relacionados com o problema de expansibilidade, além das características químicas;
- Revisão dos limites da especificação do DNIT (DNER EM 262/94) principalmente para os parâmetros massa específica e massa unitária uma vez que esses limites têm origem em normas para agregados naturais.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFRANI, I; BRADBURY, A; HAJEK, J. **Deterioration of asphaltic concrete surfaces containing steel slag**. Canadian strategic highway research program. Ontario, 1995.

ALEXANDRE, J.; BEISSER, R.; GEISELER, J.; KUHN, M.; MOTZ, H.; JUKES, L. M.; KOLLER, W.; PIRET, J. **Utilization of BOF slag in Europe meets high standards**. S.d.

ALEXANDRE, J.; RAGUIN, J. Beneficiation of blast furnace slag and converter slag in the French iron and steel industry. Chambre syndicale de la siderurgie francaise. In: **Utilization of blast furnace and BOF slag** – Committee on environmental affairs. Bruxelas, 1984.

ALTUN, I. A.; YILMAZ, I. **Study on steel furnace slags with high MgO as additive in Portland cement**. Cement and Concrete Research, v. 32, p. 1247 – 1249. 2002.

AMARAL, L. A. **Hormigones con escorias de horno eléctrico como aridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental**. Tese de doutorado. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 230 p. 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 131 - 03** – Standard test method for resistance to degradation of small- size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles Machine. Philadelphia. 2003.

_____. – **ASTM D 1883** – Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils. 2005.

_____. – **ASTM C 151** – Ensaio de expansão por autoclave em cimento Portland. Philadelphia. 1993.

_____. – **ASTM D 4792** - Potencial de expansão de agregados em reações de hidratação. 2000.

_____. – **ASTM D 698** - Standard Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort – Ensaio Proctor. 2000.

_____. – **ASTM D 2940** - Standard specification for graded aggregate material for base or sub base for highways or airports. 2003.

ANDERSON, D. M. Problems of slag handling and utilization in North America. In: **Utilization of blast furnace and BOF slag** – Committee on environmental affairs. Bruxelas, 1984.

ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JONH, V.M. Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. IV Seminário desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil. **Anais**. CT 206 – IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto. São Paulo. 2001.

ARAUJO, A. L. **Manual de Siderurgia** – Produção. V.1. Editora Arte & Ciência. São Paulo. 1997.

ARJUNAN, P.; KUMAR, A. **Rapid techniques for determination of free lime and free magnesia in cement clinker and portlandite in hydrates**. Cement and Concrete Research. v.24, 2. p. 343-352. 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR. 11582/91** – Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de Le Chatelier – Rio de Janeiro, 1991.

_____. - **NBR 26** – Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro. 2001.

_____. - **NBR 27** – Agregados – Redução de amostra de campo para ensaios de laboratório. 2000.

_____. - **NBR 9776** – Determinação da Massa Específica de Agregado Miúdo por meio do Frasco de Chapman. 1987.

_____. - **NBR 9937** – Determinação da Absorção e da Massa Específica Aparente de Agregado Graúdo. 1987.

_____. - **NM248** – Agregados - Determinação da composição granulométrica. 2003.

_____. - **NM51** – Agregado graúdo – Ensaio de Abrasão "Los Angeles". 2000.

_____. - **NBR 9938** – Determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos. 1987.

_____. - **NBR 7251** – Determinação da Massa Unitária de Agregado em Estado Solto. 1982.

_____. - **NBR 7810** – Agregado em Estado Compactado Seco - Determinação da Massa Unitária. 1983.

____. - **NBR 10007** – Amostragem de resíduos. 2004.

AZEVEDO, C. S. **Contribuição das adições minerais para a resistência à corrosão da armadura do concreto**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Goiás. Goiânia. 2001.

BESHR, H. ALMUSALLAN A. A.; MASLEHUDDIN M. Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete. In: **Construction and building materials**. nº17. p. 97 – 103. Dhahran. 2003

BRITISH STANDARD – BS. **BS EN 1744-1** – Test for chemical properties of aggregates - Chemical analysis. 1998.

____. – **BS EN 13043** – Aggregates for bituminous mixtures and surface treatments for roads, airfields and other trafficked areas. 2002.

____. – **BS EN 13242** – Aggregates for unbound and hydraulically bound materials for use in civil engineering work and road construction. 2002.

COMPANHIA SIDERÚRGICA DE TUBARÃO - CST. **Relatório Ambiental**. 2003.

COMPANHIA SIDERÚRGICA DE TUBARÃO – CST. Disponível em <http://www.cst.com.br>. Acessado em março de 2005.

CORRÊA, M. L. T., MELLO, J. W. V.; SILVA, J.; CRISTIN, M. Utilization de laitiers d'aérié pour corriger l'acidité des sols et combattre la toxicité aluminique. In: **Laitiers sidérurgiques**. Nº83. p. 23 -31. 2002.

COUTINHO, A. S. **Fabrico e Propriedades do Betão**. V. 01. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. p. 7-15. Lisboa. 1973.

CRAWFORD, C. B.; BURN, K. N. Building damage from Expansive Steel Slag Backfill. In: Placement and Improvement of Soil to Support Structures. **Anais da Conferência**. Soil Mechanic and Foundations Division / American Society of Civil Engineers (ASCE). pp. 235-261. Cambridge, Massachusetts, E.U.A. 1968.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER-PRO 263** Emprego de escórias de aciaria em pavimentos rodoviários. Rio de Janeiro., 1994.

____. – **DNER-EM 262/94** - Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários. Rio de Janeiro, 1994.

DELOYE, F.X. **L'analyse du béton durci**. Paris: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. 80p. 1986.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE MINAS GERAIS **DMA-1/DER-MG/92** Método de ensaio para avaliação do potencial de expansão da escória de aciaria – Adaptação do PTM 130. 1992.

DIN - Deutsches Institut für Normung - Instituto alemão de normalização – **EN 1744-1** - Testes para propriedades químicas de agregados – análises químicas. 1998.

DRISSEN, P.; ENGELL, H. J.; JANKE, D. Viscosity of steelmaking slags at elevated MgO content. In: **Iron and steel slag – Properties and Utilization (Reports)**. p. 223 - 234. 1984.

EMERY, J. J. Steel slag utilization in asphalt mixes. In: **Canadian technical asphalt association proceedings**. p. 296 – 304. Ontário. 1984.

EUROPEAN SLAG ASSOCIATION – EUROSLAG. **Legal Status of Slags** – Position Paper. Janeiro de 2006.

FARRAND, B.; EMERY, J. Recent improvements in quality of steel slag aggregate. In: **Transportation research record**. nº 1486. p. 137 – 141. 1995.

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

FERREIRA, E. B. **Vidros e vitro-cerâmicas de escória de aciaria**. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2000.

FILEV, Rodrigo. **Escória de aciaria** - Ficha técnica. Universidade de São Paulo. Disponível em: http://www.reciclagem.pcc.usp.br/escoria_de_aciaria.htm. Acessado em maio de 2006. São Paulo. 2002.

GEISELER, J. Use of steelworks slags in Europe. In: **Waste Management**. Vol. 16. p. 59 -63. Inglaterra. 1996.

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

GEISELER, J.; MOTZ, H. **The steel slags - characteristics, properties and quality assurance**. Iron and Steel Slags - Properties and utilization – Reports. p 149 -168. 1998.

GEISELER, J., SCHLOSSER, R. Investigation concerning the structure and properties of steel slags, In: **3rd International Conference on Molten Slags and Fluxes, Iron and Steel Slags - Properties and utilization**. Escócia. Junho de 1988.

GENTILE, E. F.; MOURÃO, M. B. Visão geral do processo siderúrgico. In: **Siderurgia para não siderurgistas**. Programa de educação continuada da ABM – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. São Paulo. p. 1-9. 2006.

GEORGE; SORRENTINO. **Valorization of basic oxygen steel slags**. 7^o ICCS, Vol III. p. 140 – 144. Paris. 1980.

GEYER, R.T. **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2001.

GEYER, R. T. et al. Caracterização de escórias de aciaria para utilização como adição ao cimento Portland. In: **42^o REIBRAC**. Fortaleza: Ibracon. 10p. 2000.

GEYER, R. T.; DAL MOLIN, D.; MAFALDO, I.; VILEL;A A. – Adição de escória de aciaria no concreto. In: **40^o Congresso brasileiro do concreto – Ibracon**. Rio de Janeiro. 1998.

GHATAORA, G. S.; FREER-HEWISH, J. R.; JESSIC, J. **The utilization of recycled aggregates generated from highway arising and steel slag fines**. Department of Civil Engineering School of Engineering. The University of Birmingham. Reino Unido. 2004.

GOLDRING, D.C.; JUCKES, L.M. **Petrology and stability of steel slags**. Ironmaking and Steelmaking. v. 24 6 447-452. 1997.

GOMES, V. **Obtenção de material vitrocerâmico utilizando escória de aciaria**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 1999.

GONTIJO, P. R. A. **Pavimentos compostos com escórias de aciaria**. Revista Pavimentação. Ano I. N^o 3. ABPv - Associação Brasileira de Pavimentação. p. 42-54. Julho de 2006.

GUINIER, A. **Les rayons X**. Vendôme: Presses Universitaires de France, 127p. 1984.

GUMIERI, A. G.; PAGNUSSAT, D. T.; DAL MOLIN, D.C.C. The use of steel slag as mineral admixture to the concrete. In: **Sustainable construction into the next millennium** - environmentally, friendly and innovative cement bases materials. João Pessoa. 2000.

GUPTA, D. J. et al. **Characterization of base and subbase iron steel slag aggregates causing deposition of calcareous tufa in drains**. Transportation Research Record 1434, p. 8-17. s.d.

HARMELIN, M. **La thermo-analyse**. Presses Universitaires de France. 85p. Paris 1968.

HIRANO, Y. How to expand the market for BOF. In: **Utilization of BOF and BF slag**. IISI. 1984.

INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA - IBS. **Anuário Estatístico**. Versão digital. 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA - IBS. **Produção Siderúrgica Brasileira de 2006**. Dados preliminares. Versão Digital. 2007.

JAPANESE INDUSTRIAL STANDARDS - **JIS R 2211** – Test method for hydration resistance of basic bricks. 1991

____. - **JIS A 5015 – Escória siderúrgica para construção de estradas**. 1992.

____. – **Esclarecimento da norma JIS A 5015**. 1992.

JONES, N. C.; DOBSON, C. J.; HANLEY, P. J. **High Quality Steel Slag Aggregate for Road Construction**. The Slag Reduction Company Ltd, 15p, Australia, 1996.

KANDHAL, P.S.; HOFFMAN, G.L. **Evaluation of Steel Slag Fine Aggregate in Hot-Mix Asphalt Mixes**. 1997.

KNELLER, W.A. et al. **Determination of original free lime content of weathered iron and slags by thermogravimetric analysis**. Transportation Research. Record 1434. p. 17-22. 1994.

LEANDRO, C. A. S. Fabricação de aço em fornos elétricos. In: **Siderurgia para não siderurgistas**. Programa de educação continuada da ABM – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. p. 70-83. São Paulo, 2006.

LEDEZMA, R. T.; RUIZ, L. S.; MULLER, G. C. **Las escorias de acería y su empleo em carreteras y vias férreas**. Multserv Intermetal. Caracas. 1992.

LITTLE, A.D.; SETEPLA. **Estudo sobre Aplicações de Escórias Siderúrgicas**. Relatório Final. Tecnometal para IBS - Instituto Brasileiro de Siderurgia. 104p. 1999.

LOUVRIER, J. **Recueil de modes opératoires pour l'analyse des ciments, bétons, sols et roches et des matières pulvérulentes de peintures blanches**. Paris: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 67p. 1985.

MAAS. Utilization of BOF and BF slag In: **Steelmaking slags**. IISI. 1984.

MACHADO, A. T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria**. Dissertação de Mestrado apresentada a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 135p. São Paulo. 2000.

MACHADO, A. T.; GOMES, A. O.; CARDOSO R. J. C. & CRUZ E. B. O uso de escórias de aciaria como agregado na construção civil. In: **IX Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído**. Foz do Iguaçu. 2002.

MALYNOWSKYJ, A. Fabricação de aço líquido em conversor a oxigênio. In: **Siderurgia para não siderurgistas**. Programa de educação continuada da ABM – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. p. 84-110. São Paulo. 2006.

MANCIO, M.; HOFFMANN, A.T.; MASUERO, A. B. **Avaliação da Resistência Mecânica e Durabilidade de Concretos com Adição de Escória de Aciaria Elétrica**. Revista de Iniciação Científica - USP nº 2. 2000.

MASLEHUDDIN, M.; ALFARABI, M.; SHAMEEN, M.; IBRAHIM, M.; BARRY, M.S. Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concrete. In: **Construction and building materials**. 17. p. 105-112. 2003.

MASUERO, A. B.; DAL MOLIN, D. C. C.; VILELA, A. C. F. **Estabilização e viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria elétrica**. In: **Ambiente Construído**. v.4, n.2, p. 57 – 81. Porto Alegre. 2004.

MASUERO, A. B.; DAL MOLIN, D.; VILELA, A. C. Use of electrical steel slag as civil construction material: stabilization of expansion. In: **CIB Symposium – Construction and Environment theory into practice**. São Paulo, 2000.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto - estrutura, propriedades e materiais**. Editora Pini. São Paulo. 1994.

MERKEL, T. Successful utilization of steel slag in Germany. In: **2nd European slag conference** – Euroslag. Düsseldorf. 2000.

METSOL, M. G.; POLIAKOVA, S.; SJOKVIST, T.; GREEN, A.; THOMASON, K. **Steel Processing**. Parceria International Iron and Steel Institute / The University of Liverpool. E-learning disponível em www.steeluniversity.org. Acessado em fevereiro de 2007.

MINDAT. **Mineralogy Database**. Disponível em <http://www.mindat.org>. Acessado em Dezembro de 2006.

MONTGOMERY; WANG. **Instant-chilled steel slag aggregate in concrete - fracture related properties**. 1991.

MORISHITA; KOIDE; KOMAI. **The development of a new aging process of steel-making slag**. Sumimoto Metal Industries & Kawasaki Heavy Industries. Japão.1995

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

____. **The steel slags** – Characteristics, Properties and Quality Assurance. Iron and Steel Slags - Properties and utilization - Reports pp. 149-168, 1998.

MURPHY, J. N.; MEADOWCROFT, T. R.; BARR, P. V. Enhancement of the cementitious properties of steelmaking slag, In: **Canadian Metallurgical Quarterl**. Vol. 36, p. 315-331. 1997.

NATIONAL SLAG ASSOCIATION. **Steel Slag**. Estados Unidos. s.d.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2ª edição. p. 138-141. 1997.

OKAMOTO, A.; FUTAMURA, E.; KAWAMURA, K. **Hydration behavior of LD slag at autoclave test**.1981.

OZEKI, S. **Properties and usage of steel plant slag**. Steel Technology Center. NKK Corporation. S.d.

PARFENOFF, A.; POMEROL, C.; TOURENO, J. **Les minéraux en grains** – méthodes d'étude et détermination. Paris, Masson et Cie, Éditeurs, 1970.

PENA, D. C. - **Avaliação da expansibilidade da escória de aciaria LD curada a vapor para utilização em peças de concreto para pavimentação.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2004.

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

PENNSYLVANIA TESTING METHOD – PTM 130. – **Método de ensaio para avaliação do potencial de expansão da escória de aciaria** – Departamento de Transportes da Pensilvânia. 1978.

PERA, J. State of the art report – use of waste materials in construction in western Europe. In: Workshop Reciclagem e reutilização de resíduos como materiais de construção civil. **Anais.** São Paulo, 1996. p. 1-20.

POLISSENI, A.E. Caracterização da escória de aciaria oriunda de Juiz de Fora destinada à fabricação de cimento. In: 44^o REIBRAC. **Anais.** Belo Horizonte: Ibracon. 23p. 2002.

QIAN, G. ; SUN, D. D. ; TAY, J. H. ; LAI, Z. ; XU, G. **Autoclave properties of kirschsteinite-based steel slag.** Cement and Concrete Research, v. 32, p. 1377 – 1382. 2002.

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

REGOURD, M.; HORNAIN, H. **Applications de la microscopie électronique à balayage.** Revue des Matériaux de Construction. 693, p. 73-95. 1975.

REID, J.M.(coord.) **Deliverable D3 Literature review** - Report N^o. WP1.SGI.003. v. 1. ALTMAT. Disponível em <http://www.trl.co.uk/altmat/deliver.htm>, Acessado em 7/7/2003. 85p. 1999.

REX, M. Blast furnace and steel slag as liming materials. In: **2nd European slag conference** – Euroslag. Düsseldorf. 2000.

RIBAS SILVA, M. **Étude de la microstructure du béton sous l'influence de variations hygrométriques importantes.** Tese de doutorado da ENPC. Paris: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. 220p. 1990.

RIBAS SILVA, M. **Caracterização da microestrutura da escória de aciaria.** Projeto AGSPAVI/FINEP/IBS/UFES. NEXES – Núcleo de Excelência em Escórias Siderúrgicas. Vitória. 2003.

RIBAS SILVA, M. **Técnicas de observação e análise.** Trad. P. C. Ribas Silva. Brasília: Universidade de Brasília, 21p. 1996.

ROBINSON, H. L. Low energy, sustainable, materials incorporation blast furnace and basic oxygen steel slag for highway construction and maintenance in the UK. In: **2nd European slag conference – Euroslag.** Düsseldorf. 2000.

ROHDE, L. **Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos – estudo laboratorial.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 101p. Porto Alegre. 2002.

SAHAY, J. S.; NAGPAL, O. P.; PRASAD, S. Waste management of steel slag. In.: **Steel times international.** Março, 2000. p.38 – 40.

SAMARIS - SUSTAINABLE AND ADVANCED MATERIALS FOR ROAD INFRASTRUCTURE. **Guide on techniques for recycling in pavement structures - Deliverable 29.** 2006.

SBRIGHI, C. N.; BATTAGIN, I. L. S. **Precausões e limitações do uso de escórias como agregados na construção civil.** CPTI. São Paulo. 2002.

SCANDIUZZI, L.; ANDRIOLO, F. R. **Concreto e seus materiais: Propriedades e ensaios.** Ed. Pini. São Paulo. 1986.

SCHLOSSER, R. GEISELER, J., Investigation concerning the structure and properties of steel slags, In: **3rd International Conference on Molten Slags and Fluxes, Iron and Steel Slags - Properties and utilization.**1988.

SEKI, A. et al. **Development of dusting prevention stabilizer for stainless steel slag.** Kawasaki Steel Technology Report. N. 15 p. 16-21, 1986.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. Vol. 1. Editora Pini. São Paulo. 1997.

SHI, C.; QIAN, J. **High performance cementing materials from industrial slags – a review**. Resources, Conservation and Recycling. N. 29. p. 195-207. 2000.

SHIH, P. H.; WU, Z. Z.; CHIANG, H.L. **Characteristics of bricks made from waste steel slag**. Waste Management. N° 24. p. 1043–1047. 2004.

SHOUSUN, L. Effect of MgO in steel slag on soundness of cement. 7° International Congress on the Chemistry of Cement. Vol. II. **Anais**. p. 39-44. Paris. 1980.

SILVA FILHO, A. F., MOURA, W. A.; LEITE, R.S. **Caracterização de escória de ferro-cromo como agregado graúdo para a produção de concreto**. Revista Sientibus. N° 26. p. 95-110. Feira de Santana. 2002.

SILVA, M. G. (coord.) **Avaliação da expansibilidade e das tecnologias de tratamento visando o desenvolvimento de mercado das escórias de aciaria para fins de pavimentação**. Projeto AGSPAVI/FINEP/IBS/UFES. NEXES – Núcleo de Excelência em Escórias Siderúrgicas. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2006.

SOUZA, F. L. S.; POLESE, M. O. **Relatório das Visitas às Usinas Siderúrgicas - Realização da Entrevista de Atualização do Inventário de Escória de Aciaria e para Esclarecimento sobre o Procedimento de Amostragem**. Projeto AGSPAVI/FINEP/IBS/UFES. NEXES – Núcleo de Excelência em Escórias Siderúrgicas. Vitória. 2003.

SOUZA, F.L.S; SILVA, M.G; ZANDONADE, E.; BRAGA, F.; PENA, D.C. **Procedimento de Amostragem**. Centro Tecnológico. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2003.

STEEL SLAG ASSOCIATION - SSA. **Steel slag** - Material description. Disponível em <http://www.rmrc.unh.edu/Partners/UserGuide/ssa1.htm>. Acessado em 15/05/2003. 2003.

TAKANO, C. Matérias-primas siderúrgicas. In: **Siderurgia para não siderurgistas**. Programa de educação continuada da ABM – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. p. 10-27. São Paulo. 2006.

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

TOSTICARELLI, J.; ANGELONE, S.; ANDREONI, R. Escoria de acería. Estado actual de estudios sobre su utilización. In: **Memoria técnica de las primeras jornadas técnicas de escorias siderúrgicas**. Buenos Aires. 1985.

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

WEBMINERAL. **Mineralogy Database**. Disponível em <http://www.webmineral.com>. Acessado em Dezembro de 2006.

YUJI, W. The effect of hydration products in steam treated steel slag on the hydration of steel slag Portland blended cement. In: 8° International Congress on the Chemistry of Cement. Vol. III. **Anais**. p. 36-40. 1986.

ANEXO I

**PROCEDIMENTO DE
AMOSTRAGEM DA ESCÓRIA DE ACIARIA**

PROCEDIMENTO DE AMOSTRAGEM DA ESCÓRIA DE ACIARIA

1. INTRODUÇÃO

A amostragem é tão importante quanto o ensaio, por isto, devem ser tomadas todas as precauções necessárias para que se obtenha amostras representativas quanto às suas naturezas e características (NBR NM 26:2000). Neste documento, apresentam-se orientações básicas para a amostragem da escória de aciaria.

2. OBJETIVO

Apresentar a metodologia de amostragem de escória de aciaria a ser realizada pelas Usinas Siderúrgicas para a obtenção da amostra representativa de interesse para os ensaios de caracterização e avaliação da expansibilidade.

3. DEFINIÇÕES

- **Amostra representativa:**
Parcela do resíduo a ser estudado, que é obtida através de um processo de amostragem e que, quando analisada, apresenta as mesmas características e propriedades da massa total do resíduo (NBR 10007: 1987).
- **Lote de escória de aciaria:**
Quantidade de escória de aciaria produzida e armazenada sob condições uniformes. Seu volume não deve ultrapassar 300m³.
- **Amostra parcial:**
Parcela de material coletado do lote de escória de aciaria, obedecendo a um procedimento de amostragem. As amostras parciais deverão ser colocadas sobre uma superfície plana, limpa e dura.
- **Homogeneização:**
É uma mistura bem feita das amostras parciais, de modo a obter um material o mais homogêneo possível. Para tanto, deve-se movimentar o material sobre uma superfície plana, limpa e dura, revirando-o totalmente, no mínimo, 3 vezes.
- **Amostra de campo:**
Porção representativa de um lote de escória de aciaria, coletada nas condições prescritas.
- **Quarteamento:**
Processo de redução de amostra de campo através da disposição de todo o material numa superfície plana, limpa e dura, formando-se um tronco de cone cuja altura seja entre 4 e 8 vezes menor que o diâmetro da base, conforme vista em corte. Este volume, em planta, é dividido em 4 partes, sendo que duas partes opostas diagonalmente serão tomadas como amostra, e as outras duas serão descartadas, conforme a Figura 1 a seguir.

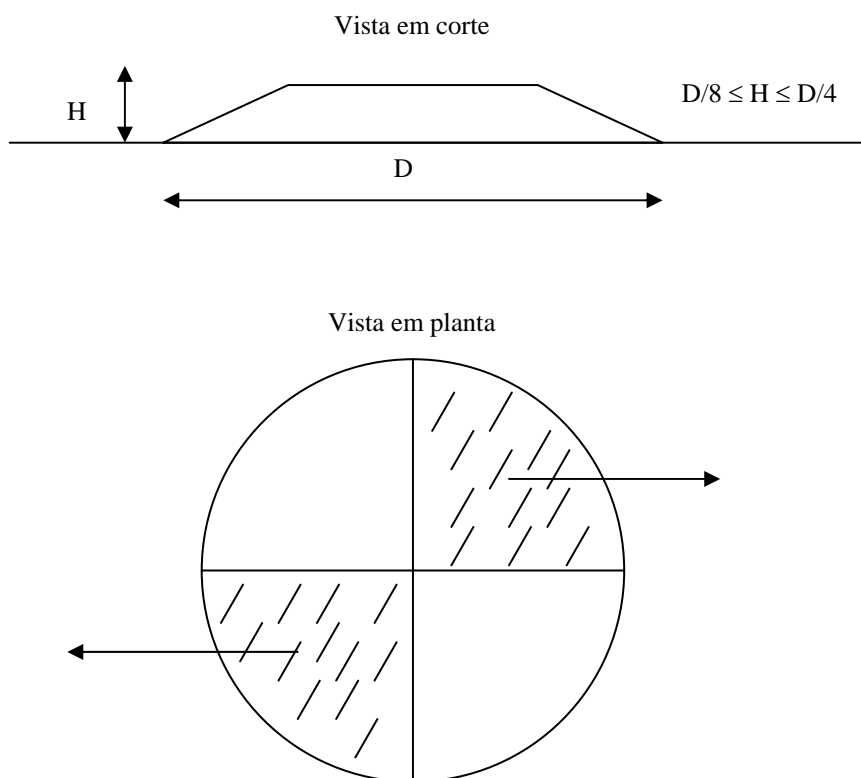


Figura 1 – Formato da pilha tronco de cone para o quarteamo da escória de aciaria.

4. AMOSTRA DE ESCÓRIA DE ACIARIA

4.1 Especificação da escória de interesse para a pesquisa

A escória de aciaria para formação do lote deverá ser obtida no menor tempo decorrido possível, entre a sua geração e a sua amostragem. Preferencialmente, deve-se escolher uma escória de aciaria que apresente maior potencial expansivo (maiores teores de CaO e MgO). Não sendo isto possível, deve-se fornecer a escória que represente a maior parte do material gerado ou a escória que se tenha interesse de aplicação em pavimentação, desde que se possa fazer a identificação correta do material, bem como todo o histórico de sua geração.

4.2 Granulometria

A granulometria do material para o presente estudo deve estar situada entre 0 a 20 mm, por imposição de condições de alguns métodos de ensaio. Caso não seja possível, poderão ser enviadas uma das seguintes faixas granulométricas: 0 mm a 25 mm, 0 mm a 40,0mm, 0 mm a 50 mm.

4.3 Monitoramento e controle

A escória de interesse para esta pesquisa deve ser isenta de contaminação, devendo ser feito o controle desde sua geração até sua separação granulométrica para montagem da pilha de amostragem.

4.4 Identificação e registro

Para a identificação das amostras de escória de aciaria, devem ser fornecidas as informações listadas abaixo, que deverão estar registradas em forma de etiquetas nos tambores (tonéis) de acondicionamento.

EMPRESA:
NOME DA USINA:
PROCESSO UTILIZADO: () LD () EAF
DATA DE GERAÇÃO DA ESCÓRIA:
FAIXA GRANULOMÉTRICA:

Outras informações como a britagem e classificação, a composição química, caracterização ambiental ou outras informações complementares deverão vir em documentos anexos. Deverá ser preenchida uma ficha (Figura 2), para o controle do processo de geração e amostragem da escória de aciaria. Estes documentos deverão ser entregues no prazo máximo de 10 dias após o recebimento das amostras pela UFES.

FICHA DE CONTROLE DO PROCESSO DE GERAÇÃO E AMOSTRAGEM DA ESCÓRIA DE ACIARIA
EMPRESA:
USINA:
Processo de geração utilizado: () LD () EAF
Tipo(s) de aço que gerou a escória de aciaria:
Data/Hora da geração da escória de aciaria:
Quantas corridas foram utilizadas para a formação do lote de escória:
Data/Hora do vazamento da escória de aciaria:
Como foi feito o resfriamento da escória de aciaria?
Data/Hora da britagem:
Qual o equipamento utilizado para britagem?
Qual a granulometria da escória de aciaria?
Data/Hora de início das amostragens:
Responsável pela amostragem:
Telefone/ e-mail do responsável:
Como foi feito o transporte da escória para o local de amostragem?
Qual o equipamento utilizado para formar a pilha de amostragem?
Qual o formato da pilha de amostragem?
Dimensões da pilha de amostragem:
Qual o equipamento utilizado para retiradas das amostras parciais?
Quantas amostras parciais foram retiradas?
Foi realizada homogeneização das amostras parciais?
Foi formada pilha tronco de cone para o quarteramento?
Qual o volume da pilha tronco de cone formada para o quarteramento?
A amostragem foi realizada sobre superfície plana, dura e limpa? () sim () não
A amostragem foi realizada em local coberto?
Houve chuva durante a amostragem?

Figura 2 – Modelo de ficha de controle para amostragem de escórias de aciaria.

4.5 Relevância do controle e identificação

Os ensaios do estudo serão referentes, única e exclusivamente, ao lote de que proveio a amostra da escória de aciaria enviada à UFES. Desta forma, é imprescindível a identificação do material de formação do lote de forma mais detalhada e completa possível.

Tais informações são importantes para que o lote para a amostragem seja formado, preferencialmente, por escória de aciaria de origem plenamente conhecida, para referências futuras.

A não identificação completa e detalhada do material fornecido terá conseqüências futuras quanto ao estabelecimento de uma correlação confiável entre o material ensaiado e os resultados obtidos.

5. FORMAÇÃO DA PILHA DE AMOSTRAGEM

Entende-se pela formação da pilha de escória, o lançamento do volume de um lote de escória de aciaria, processado, identificado quimicamente, sendo que o volume máximo estabelecido é de 300m³. Nos casos das siderúrgicas que processam aços especiais, o volume mínimo deverá ser de 150m³ ou 5 dias de produção de escória. Em qualquer dos casos, os volumes deverão ser representativos do procedimento normal.

O material que comporá o lote não poderá ter sofrido processo algum de “cura”, até a formação da pilha, e deverá ter a granulometria estabelecida neste estudo.

O volume da pilha será imaginariamente dividido em três camadas de alturas aproximadamente iguais, das quais serão retiradas amostras na superfície, no meio e na base, conforme a Figura 3. Deverão ser retiradas amostras equidistantes de diferentes regiões e profundidades de cada camada, abrangendo toda a área horizontal da pilha, ou seja, de cada camada será retirado um volume proporcional a área da camada, conforme a Figura 4, resultando em no mínimo 30 amostras parciais de aproximadamente 50 kg cada. Essas amostras formarão uma pilha e deverão ser homogeneizadas para a posterior formação de uma pilha de 1500 Kg. Essa pilha de 1500Kg deverá ser novamente homogeneizada para a formação da pilha tronco de cone para quarteamento.

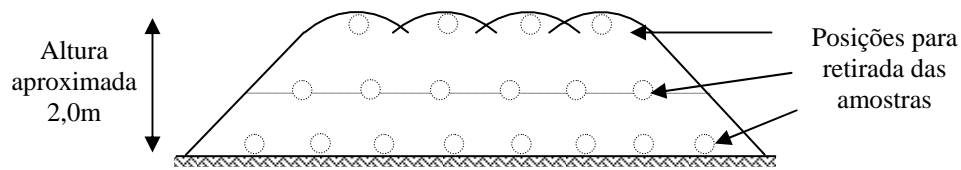


Figura 3 – Seção transversal da pilha de amostragem

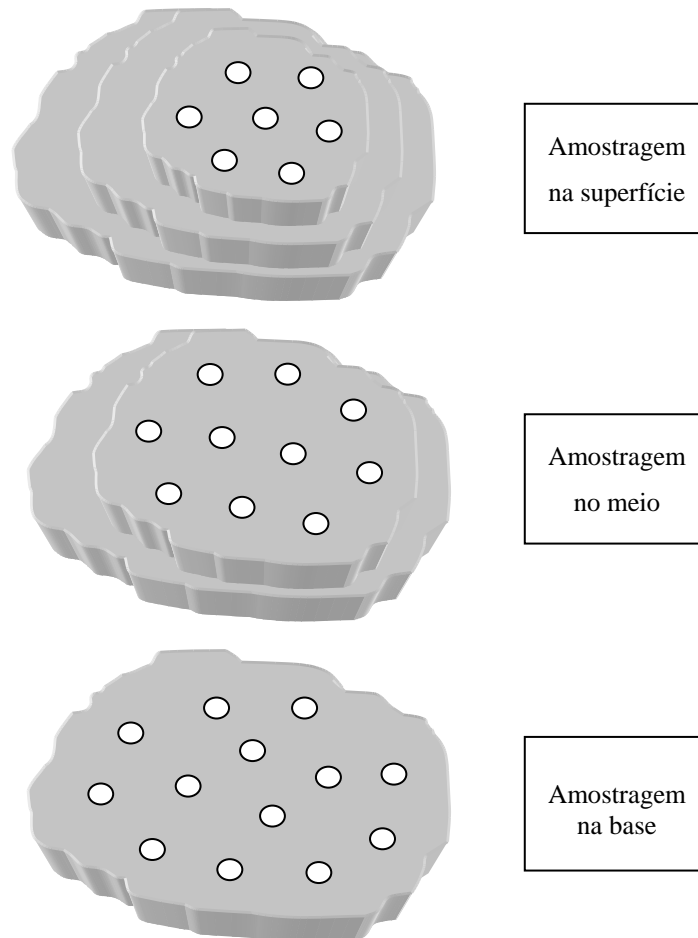


Figura 4 – Esquema da amostragem em camadas

As amostras parciais deverão ser coletadas com uma pá de bico, de modo a evitar-se a segregação de grãos maiores, sendo necessário o auxílio de uma retroscavadeira para que sejam feitas cavidades de acesso às camadas inferiores. Neste procedimento, devem ser observados aspectos de segurança no trabalho, principalmente no acesso às pilhas e às suas camadas inferiores.

As amostras parciais deverão ser dispostas em uma superfície limpa, dura e plana, para homogeneização e posterior formação da pilha tronco de cone para o quarteamo, conforme definição no item 3, onde não deverá ocorrer perda de material e nem contaminação por elementos estranhos. Após homogeneizadas e quarteadas, as amostras parciais formarão a amostra de campo, com aproximadamente 750kg. Na Figura 5 tem-se o esquema geral do procedimento de amostragem.

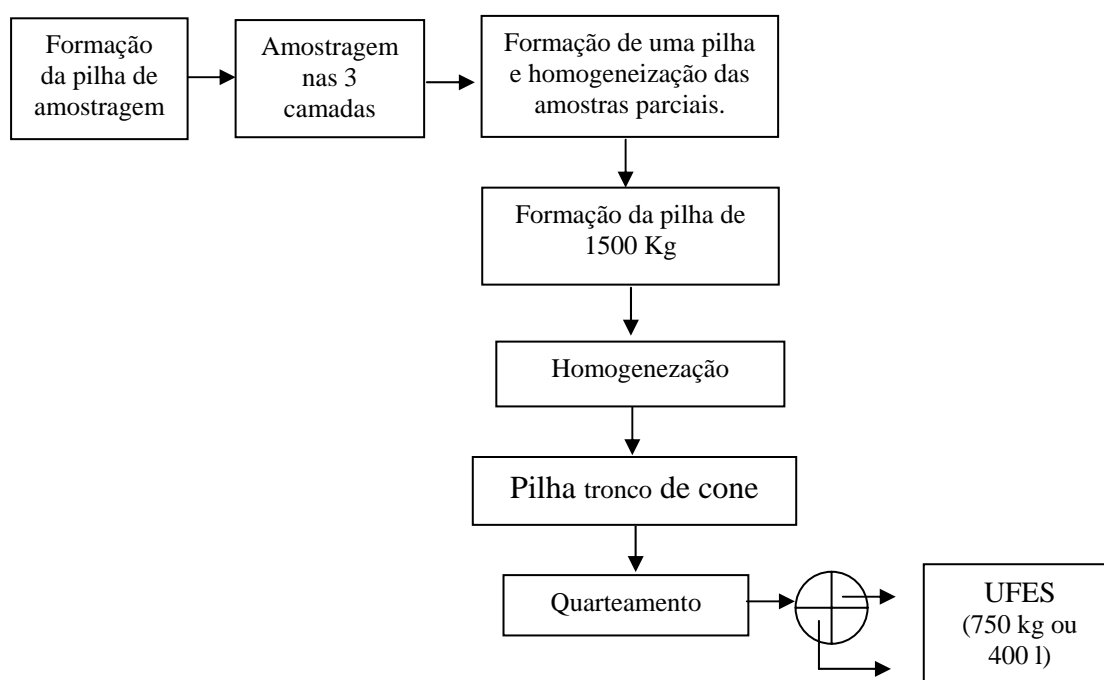


Figura 5 – Esquema geral do procedimento de amostragem

A amostragem e o acondicionamento deverão ocorrer em um mesmo dia, preferencialmente, sem chuva, sendo as amostras entregues ao Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção no Centro Tecnológico da UFES (ITUFES) com respectiva identificação, em um prazo máximo de 10 (dez) dias da geração da escória.

6. ACONDICIONAMENTO E IDENTIFICAÇÃO

O material amostrado deverá ser acondicionado em 02 tambores de 200 litros, hermeticamente fechados (mantendo inalterada a umidade e evitando contaminações), imediatamente após sua amostragem.

Cada um dos recipientes de acondicionamento deverá estar devidamente identificado, constando data de geração, faixa granulométrica, nome e telefone do responsável pela amostragem, siderúrgica e outros itens necessários para a correta identificação da escória de aciaria, conforme especificado no item 4.4.

7. INÍCIO DA AMOSTRAGEM E PRAZO PARA RECEBIMENTO DAS AMOSTRAS

As usinas deverão realizar a amostragem da escória de aciaria, após recebimento deste procedimento e realização da visita pela equipe.

8. EQUIPE RESPONSÁVEL

- Eng^o Delio C. Pena¹
- Prof. Fernando Lordêllo dos S. Souza²
- Prof.^a Maristela Gomes da Silva³
- Prof.^a Eliana Zandonade⁴
- Prof. Florindo dos Santos Braga⁵

¹ Eng. Civil, mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFES.; E-mail deliopena@escelsa.com.br

² Eng. Civil, M. Eng., professor do Departamento de Estruturas e Edificações e do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFES, Chefe do Laboratório de Estruturas e Ensaios de Materiais;. E-mail fernalor@npd.ufes.br

³ Eng. Civil, Dr.Eng., coordenadora da pesquisa, professora do Departamento de Estruturas e Edificações e do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Diretora do Centro Tecnológico da UFES;. E-mail margomes@npd.ufes.br

⁴ Estatística, Dr. Estatística., professora do Departamento de Estatística da UFES e do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. E-mail elianazandonade@uol.com.br

⁵ Eng. Civil, Dr.Eng., professor do Departamento de Engenharia Ambiental e do Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental da UFES;. E-mail florindo@ebrnet.com.br

ANEXO II

RESULTADOS DA DIFRAÇÃO DE RAIOS-X DAS AMOSTRAS DE ESCÓRIA DE ACIARIA

RESULTADOS DA DIFRAÇÃO DE RAIOS-X DAS AMOSTRAS DE ESCÓRIA DE ACIARIA LD

Amostra B		Amostra D		Amostra G		Amostra H		Amostra X	
d (Å)	I (%)	d (Å)	I (%)	d (Å)	I (%)	d (Å)	I (%)	d (Å)	I (%)
7,31549	12,22	7,24857	18,83	11,62635	5,63	7,26606	13,19	7,34271	12,00
5,21793	2,97	4,42825	5,92	7,26776	14,23	3,85531	8,79	4,08178	2,70
4,90529	4,70	3,65337	16,45	3,86050	10,33	3,65626	10,36	3,87191	10,21
3,87259	6,26	3,01617	28,25	3,74720	3,20	3,03279	3,87	3,67342	20,61
3,66869	8,45	2,76865	80,03	3,65576	19,08	2,86003	6,78	3,20280	2,50
3,23145	3,91	2,72873	56,65	3,22630	4,14	2,77468	57,80	3,03615	9,81
3,04478	4,73	2,68884	47,64	3,02409	16,34	2,68965	41,20	2,86993	12,24
2,87216	10,17	2,65612	91,05	2,94410	4,09	2,65577	65,96	2,78140	99,69
2,78248	54,76	2,59388	36,71	2,86577	15,04	2,59502	15,30	2,74190	86,66
2,74243	53,41	2,46539	43,46	2,77459	83,42	2,53441	8,78	2,70090	47,40
2,69992	25,27	2,37423	14,55	2,73637	80,72	2,46653	46,51	2,66456	86,91
2,66487	37,77	2,26870	1,82	2,65228	82,78	2,37583	23,80	2,60432	28,51
2,60701	27,43	2,17606	22,31	2,60007	36,11	2,27467	5,46	2,49855	34,00
2,47249	33,58	2,13388	100,00	2,47762	51,01	2,13678	100,00	2,47517	59,51
2,38011	57,98	2,01681	8,33	2,37507	32,39	2,06415	8,96	2,38011	72,04
2,28312	6,44	1,97511	5,93	2,27513	14,21	2,01857	10,42	2,27838	10,47
2,18508	17,86	1,93371	24,20	2,18200	39,10	1,97919	4,12	2,18457	39,49
2,14260	100,00	1,87041	10,58	2,15001	97,39	1,93514	22,79	2,14536	100,00
1,98127	5,00	1,83560	11,41	2,13993	100,00	1,87116	5,04	2,13407	65,38
1,93750	14,59	1,75760	11,29	2,02261	6,92	1,83282	6,70	1,98224	10,76
1,89289	4,61	1,68756	5,75	1,97995	11,15	1,73290	3,68	1,93908	28,60
1,83245	2,79	1,62229	5,76	1,93362	26,38	1,68191	7,72	1,88806	5,37
1,79842	3,88	1,58251	15,17	1,82729	6,95	1,58253	8,74	1,83725	10,81
1,73844	2,36	1,54984	9,47	1,75990	5,13	1,54822	8,01	1,79626	3,57
1,68494	13,25	1,51307	38,62	1,68289	15,15	1,51301	36,62	1,73654	3,13
1,62876	4,77	1,28858	10,64	1,62263	5,81	1,43176	2,51	1,68443	34,82
1,60252	2,22	1,23406	7,93	1,58163	19,49	1,36873	2,95	1,62560	6,14
1,58435	7,90			1,54901	11,47	1,33215	3,90	1,60686	3,69
1,54959	5,33			1,51523	42,92	1,29121	8,87	1,58524	17,02
1,51632	29,83			1,48334	6,26	1,23671	7,15	1,55219	8,35
1,48396	4,90			1,43393	3,25			1,51746	39,65
1,43420	2,36			1,36868	10,39			1,43639	5,73
1,37506	4,33			1,32935	5,29			1,37237	8,13
1,33456	1,92			1,29768	11,45			1,33761	2,31
1,29389	8,35			1,24338	8,55			1,29743	9,98
1,23823	7,21							1,23827	10,53

Nota:

d = distância interplanar

I = intensidade dos raios

RESULTADOS DA DIFRAÇÃO DE RAIOS-X DAS AMOSTRAS DE ESCÓRIA DE ACIARIA EAF

Amostra C		Amostra J		Amostra Y	
d (Å)	I (%)	d (Å)	I (%)	d (Å)	I (%)
25,01000	17,560	4,69364	3,23	7,23049	14,07
7,21117	10,20	4,20822	8,87	5,46345	5,05
4,86405	16,84	3,85880	2,33	4,77119	32,22
3,74147	1,89	3,67946	5,73	4,62974	5,92
3,63763	5,13	3,32680	6,57	3,87847	9,85
3,18828	2,62	3,23758	6,79	3,61462	13,53
3,03893	6,35	3,05146	32,70	3,47732	4,77
2,96732	11,160	2,95221	11,75	3,32130	6,97
2,86856	20,840	2,84693	42,08	3,19910	21,27
2,77486	70,870	2,77575	7,54	3,04282	20,85
2,73719	65,500	2,72731	27,82	2,97297	87,54
2,71037	46,790	2,66435	39,24	2,92670	51,66
2,66878	31,920	2,61311	9,85	2,87899	42,97
2,60288	26,730	2,52579	9,52	2,77227	39,76
2,49004	52,470	2,47776	67,76	2,73260	38,86
2,43642	14,900	2,28844	5,29	2,64626	47,23
2,39773	6,860	2,14676	100,00	2,50536	100,00
2,27698	10,320	2,02885	6,38	2,45922	39,12
2,15742	100,000	1,92127	13,50	2,38804	7,53
2,08362	7,720	1,83422	8,78	2,28812	10,87
2,04487	15,280	1,75274	10,60	2,15519	37,75
2,01586	8,090	1,72480	5,51	2,09908	33,36
1,97622	9,550	1,61166	5,48	2,06701	16,14
1,92848	10,770	1,51891	31,76	2,02001	23,39
1,80437	3,420	1,48057	3,14	1,92929	8,78
1,71099	4,170	1,37604	2,01	1,81203	14,90
1,62536	9,680	1,29816	7,82	1,74977	13,46
1,60645	8,160	1,24217	14,18	1,66452	5,87
1,57231	7,040			1,62497	9,02
1,52670	41,420			1,60295	20,23
1,48180	5,740			1,58380	11,15
1,39058	2,780			1,52277	15,46
1,36715	3,010			1,48451	19,94
1,30128	8,700			1,47251	23,38
1,24498	6,610			1,41514	4,87
				1,34840	11,23
				1,32338	2,66

Nota:

d = distância interplanar

I = intensidade dos raios

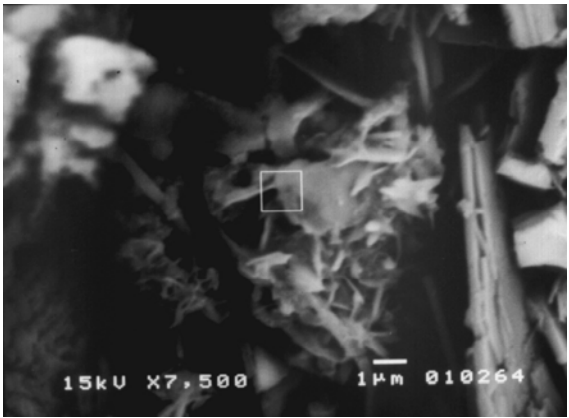
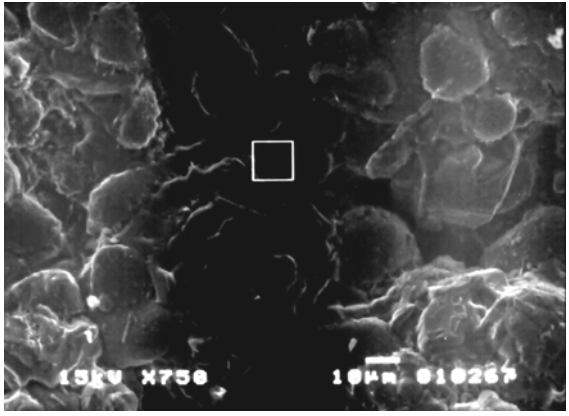
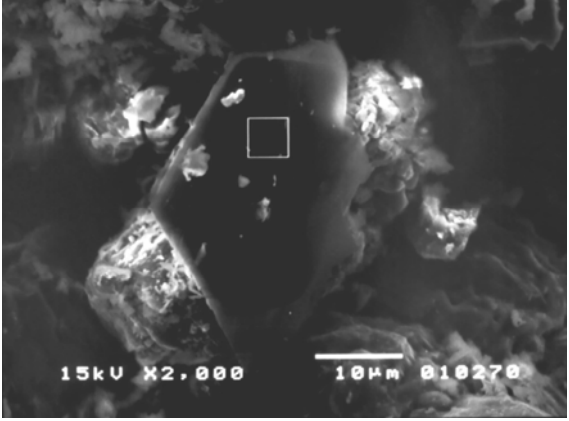
ANEXO III

MICROFRACTOGRAFIAS DAS AMOSTRAS DE ESCÓRIA DE ACIARIA

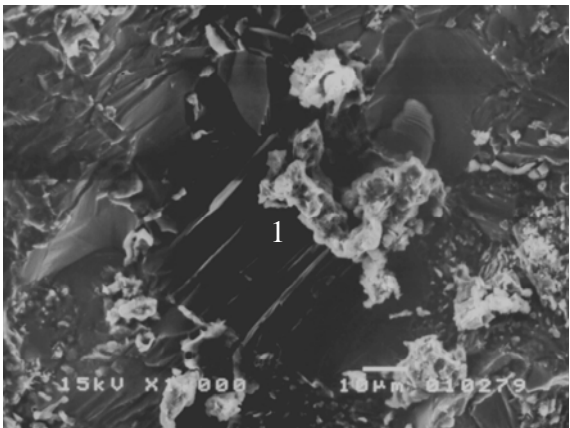
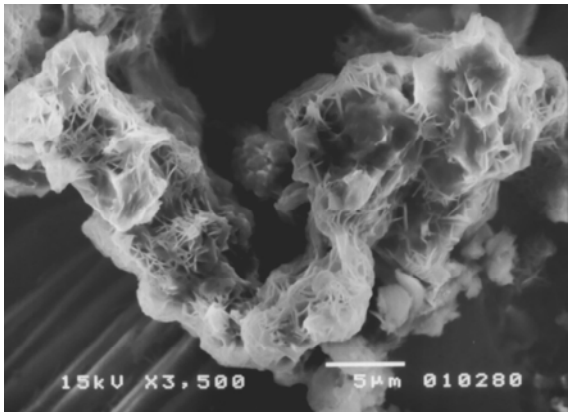

MICROFRACTOGRAFIAS DAS AMOSTRAS DE ESCÓRIA DE ACIARIA

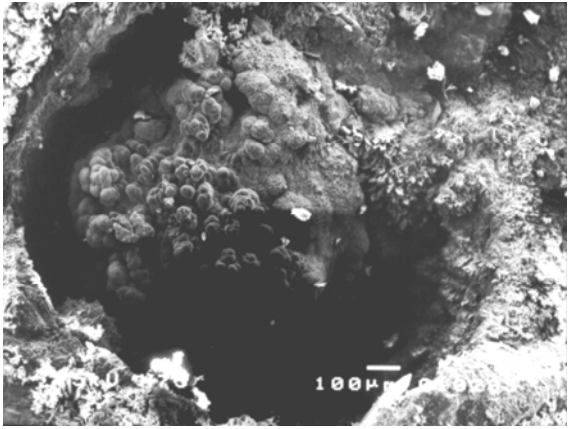
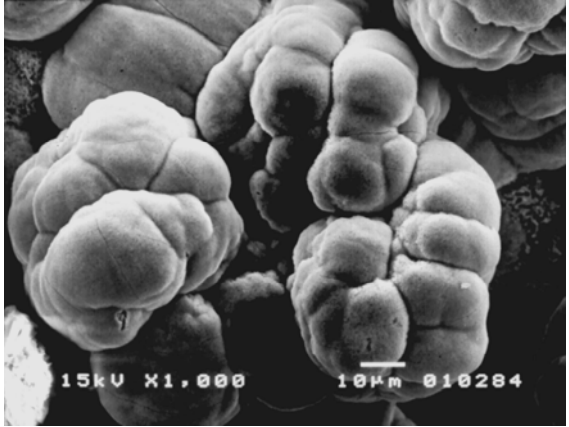
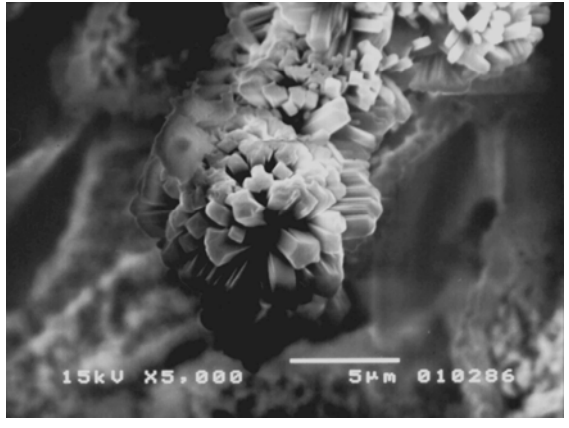
1 AMOSTRA B – MEV

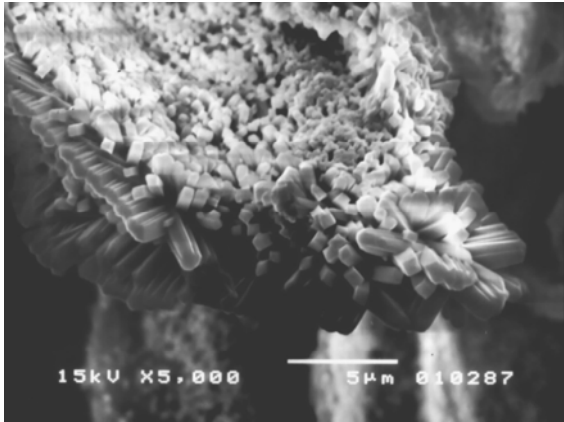
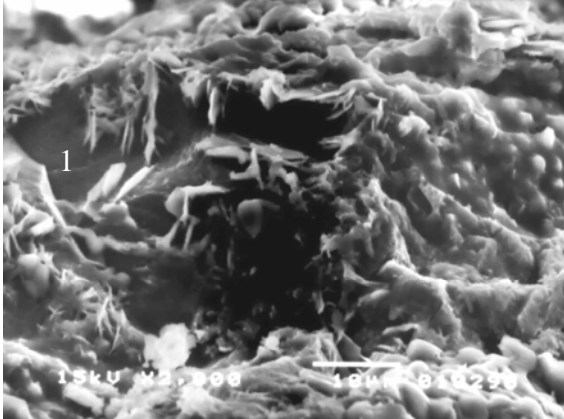

1.1 Amostra B1 (Interna)

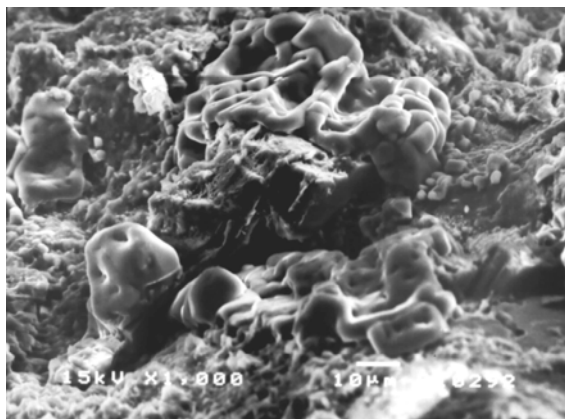
	<p>B1- Escória de Aciaria LD</p> <p>Foto: 10264</p> <p>Retroespalhado Cloroaluminato de cálcio</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	<p>B1- Escória de Aciaria LD</p> <p>Foto: 10267</p> <p>Ferrita de cálcio hidratada</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	<p>B1- Escória de Aciaria LD</p> <p>Foto: 10270</p> <p>Carbonato de cálcio</p> <p>Metalização: Ouro</p>

1.2 Amostra B2 (Interna)

 <p>15kV X1000 10µm 010279</p>	<p>B2 - Escória de Aciaria LD Foto: 10279</p> <p>1) Minério de ferro</p> <p>Metalização: Ouro</p>
 <p>15kV X3500 5µm 010280</p>	<p>B2 - Escória de Aciaria LD Foto: 10280 Detalhe de 10279</p> <p>Silicato de cálcio hidratado</p> <p>Metalização: Ouro</p>
 <p>15kV X2000 10µm 010282</p>	<p>B2 - Escória de Aciaria LD Foto: 10282</p> <p>1) Ferroaluminato de cálcio</p> <p>Metalização: Ouro</p>

 <p>100µm</p>	<p>B2 - Escória de Aciaria LD</p> <p>Foto: 10283</p> <p>Poros</p> <p>Minério de ferro</p> <p>Metalização: Ouro</p>
 <p>15kV X1.000 10µm 010284</p>	<p>B2 - Escória de Aciaria LD</p> <p>Foto: 10284</p> <p>Detalhe da foto 10283</p> <p>Minério de ferro</p> <p>Metalização: Ouro</p>
 <p>15kV X5.000 5µm 010286</p>	<p>B2 - Escória de Aciaria LD</p> <p>Foto: 10286</p> <p>Minério de ferro</p> <p>Metalização: Ouro</p>

	<p>B2 - Escória de Aciaria LD</p> <p>Foto: 10287</p> <p>Minério de ferro</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	<p>B2 - Escória de Aciaria LD</p> <p>Foto: 10290</p> <p>1) MgO solução sólida</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	<p>B2 - Escória de Aciaria LD</p> <p>Foto: 10291</p> <p>1) Portlandita 2) Carbonato de cálcio</p> <p>Metalização: Ouro</p>



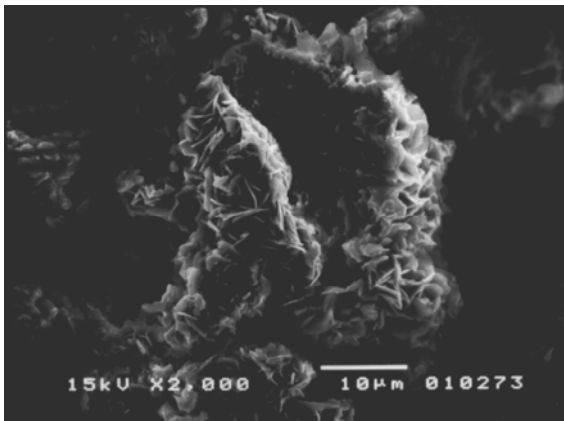
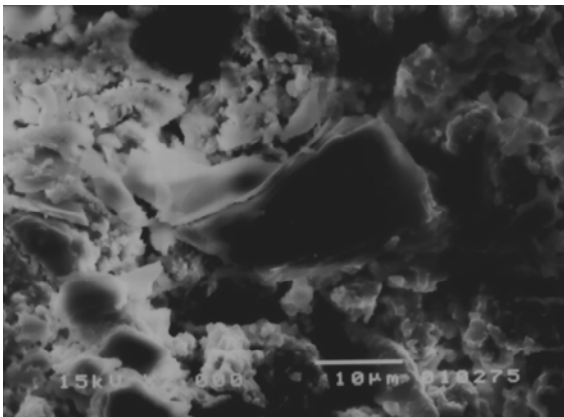
B2 - Escória de Aciaria LD

Foto: 10292

Parte amorfa: Cloreto de sódio

Metalização: Ouro

1.3 Amostra B3 (Externa)

	<p>B3 - Escória de Aciaria LD Foto: 10273</p> <p>Cloroaluminato de cálcio</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	<p>B3 - Escória de Aciaria LD Foto: 10275</p> <p>Portlandita</p> <p>Metalização: Ouro</p>

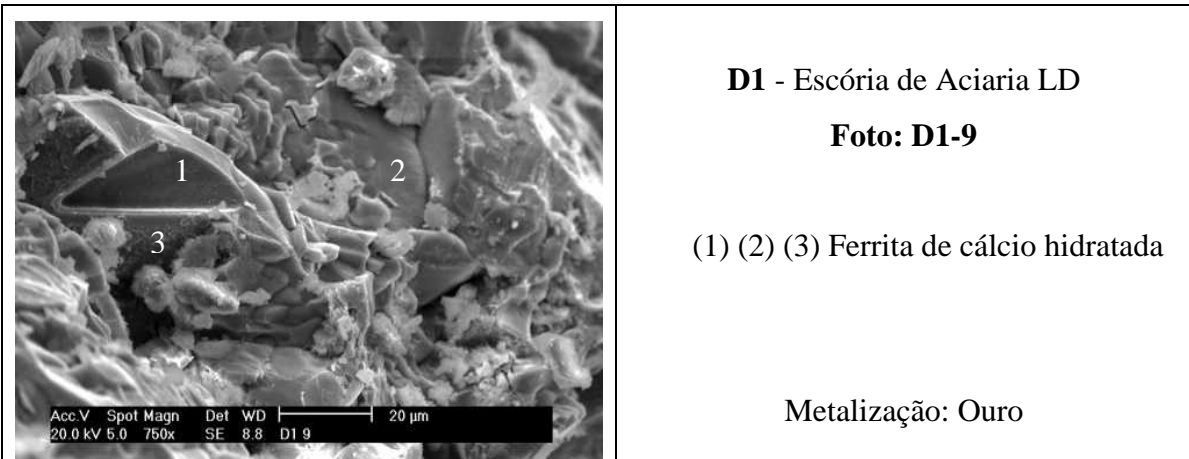
2 AMOSTRA D – MEV

2.1 Amostra D1

	<p>D1 - Escória de Aciaria LD Foto: D1-2</p> <p>(1) (3) Silicato dicálcico 2) Silicato tricálcico</p> <p>Metalização: Ouro</p>	
	<p>D1 - Escória de Aciaria LD Foto: D1-3</p> <p>1) Silicato dicálcico 2) Silicato tricálcico</p> <p>Metalização: Ouro</p>	

	<p>D1 - Escória de Aciaria LD</p> <p>Foto: D1-4</p> <p>1) Silicato dicálcico</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	<p>D1 - Escória de Aciaria LD</p> <p>Foto: D1-6</p> <p>1) MgO em solução sólida</p> <p>Metalização: Ouro</p>

	<p>D1 - Escória de Aciaria LD Foto: D1-7</p> <p>1) Ferrita de cálcio hidratada 2) MgO em solução sólida</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	<p>D1 - Escória de Aciaria LD Foto: D1-8</p> <p>1) Ferrita de cálcio hidratada</p> <p>Metalização: Ouro</p>

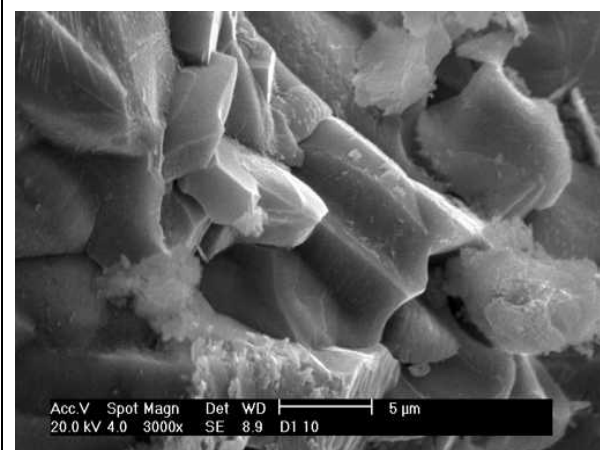
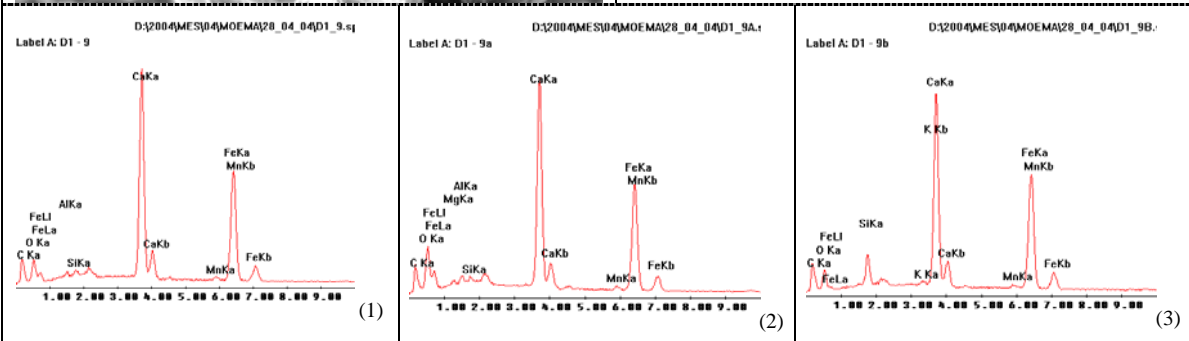


D1 - Escória de Aciaria LD

Foto: D1-9

(1) (2) (3) Ferrita de cálcio hidratada

Metalização: Ouro



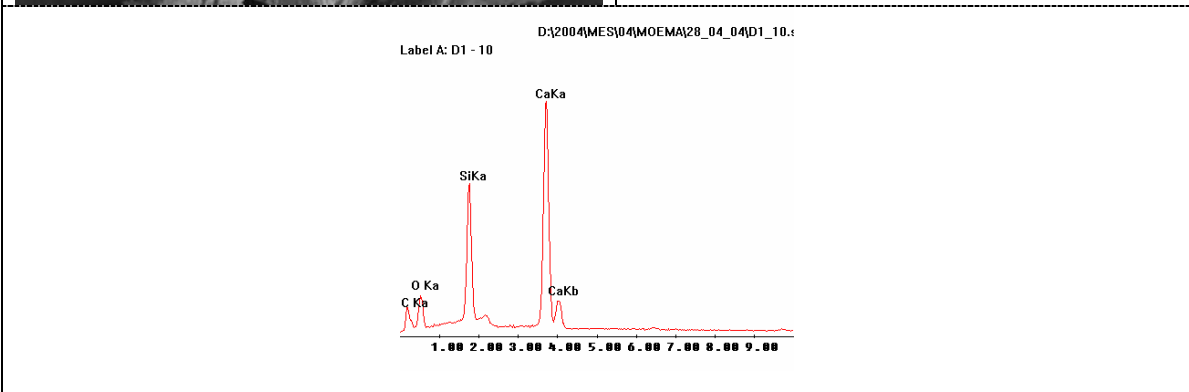
D1 - Escória de Aciaria LD

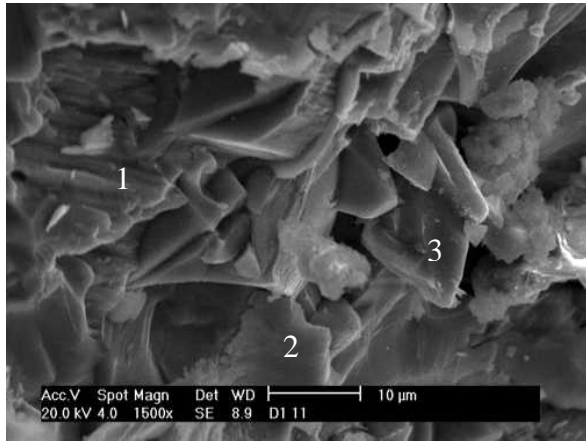
Foto: D1-10

Detalhe de D1-9

Silicato dicálcico

Metalização: Ouro



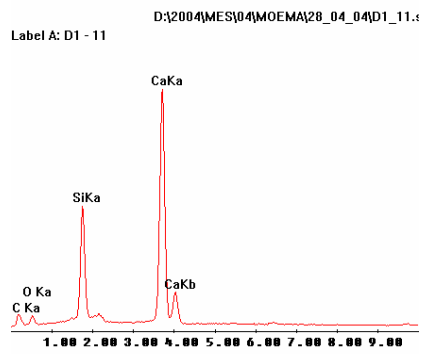


D1 - Escória de Aciaria LD

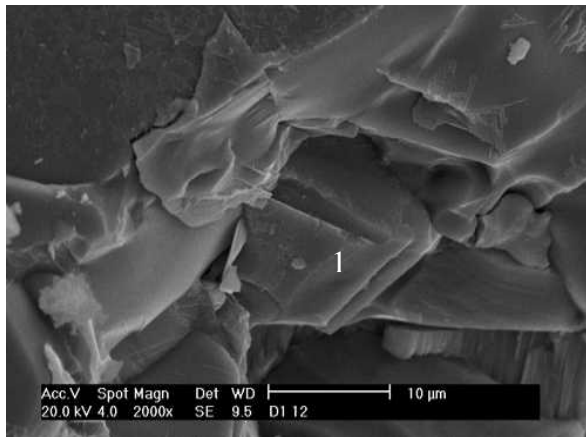
Foto: D1-11

(1) (2) (3) Silicato dicálcico

Metalização: Ouro



(1) (2) (3)

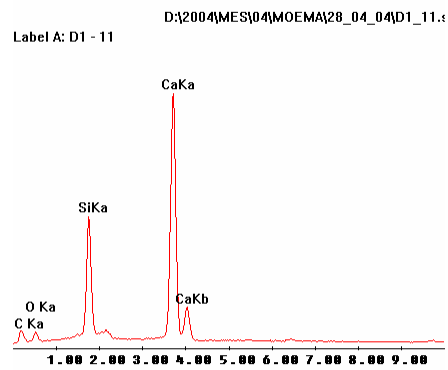


D1 - Escória de Aciaria LD

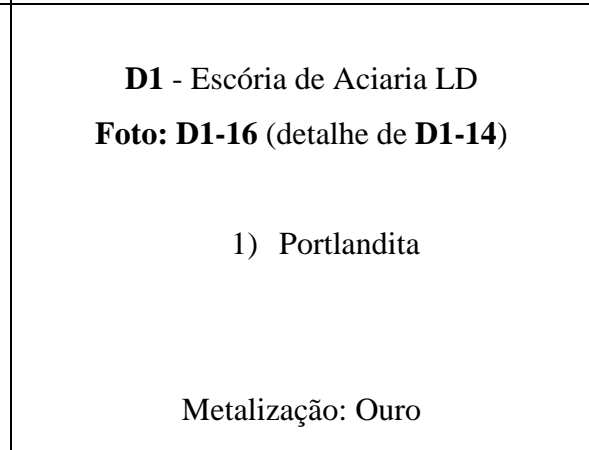
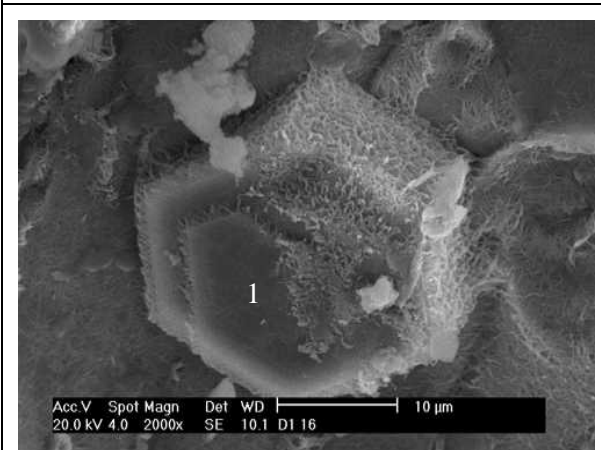
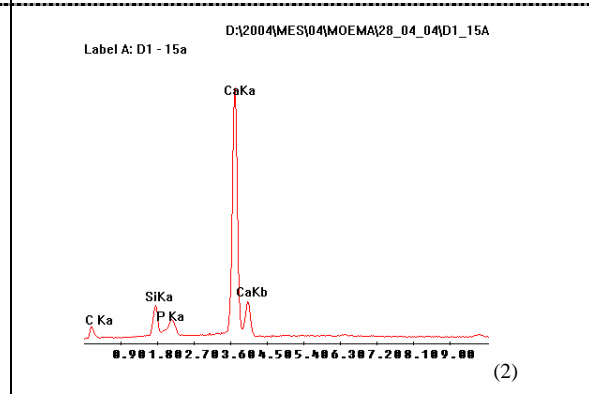
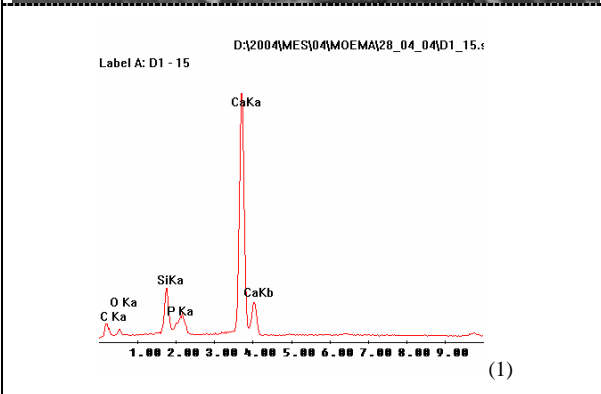
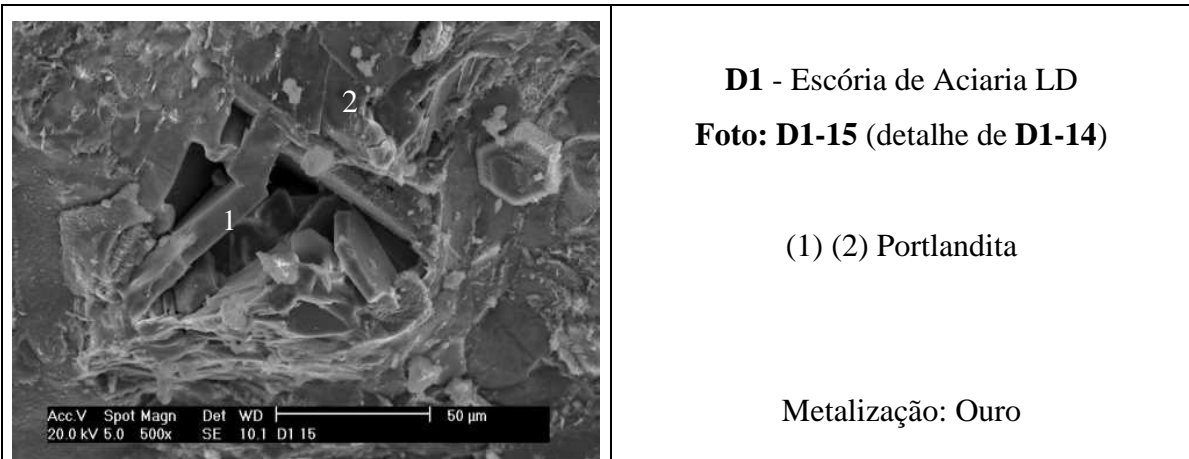
Foto: D1-12

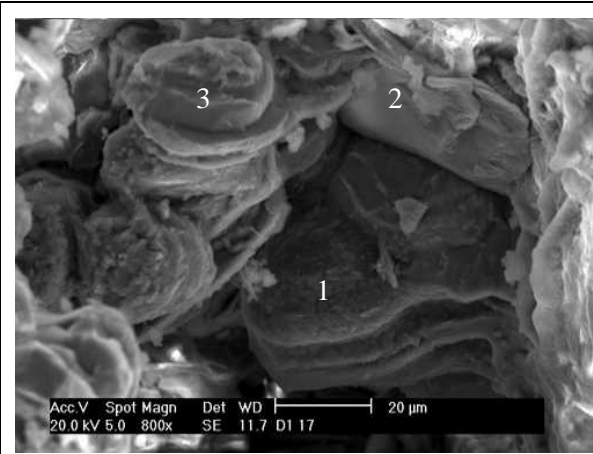
1) Silicato dicálcico

Metalização: Ouro



	<p>D1 - Escória de Aciaria LD Foto: D1-13</p> <p>1) Ferrita de cálcio hidratada 2) Silicato dicálcico</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	<p>D1 - Escória de Aciaria LD Foto: D1-14</p> <p>1) Portlandita</p> <p>Metalização: Ouro</p>



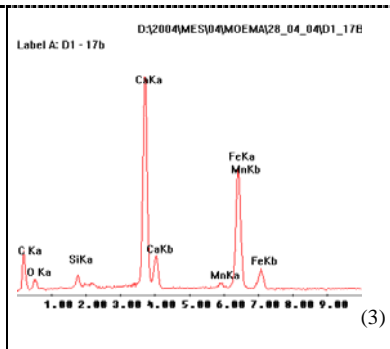
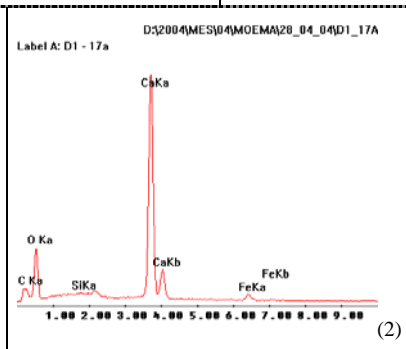
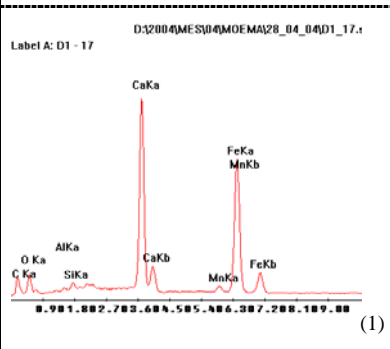


D1 - Escória de Aciaria LD

Foto: D1-17

- (1) (3) Ferrita de cálcio hidratada
- 2) Carbonato de cálcio

Metalização: Ouro

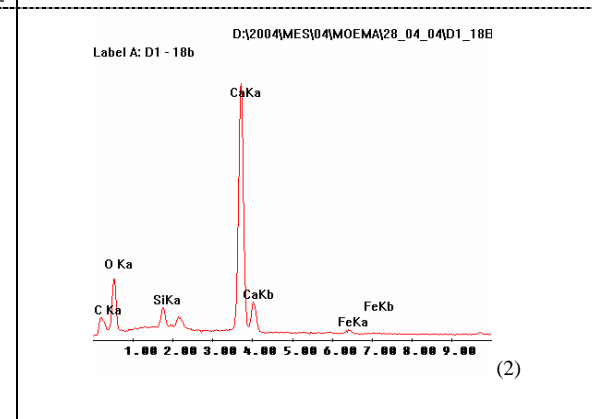
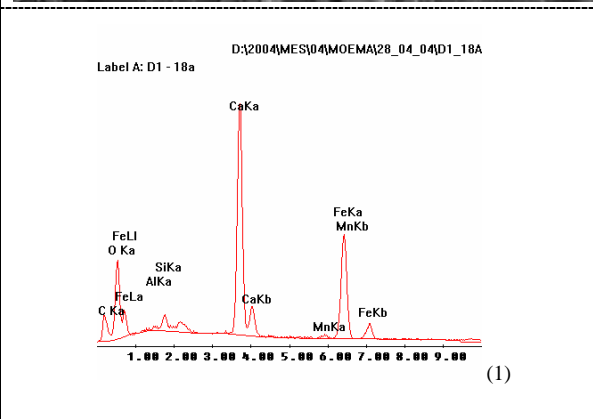


D1 - Escória de Aciaria LD

Foto: D1-18

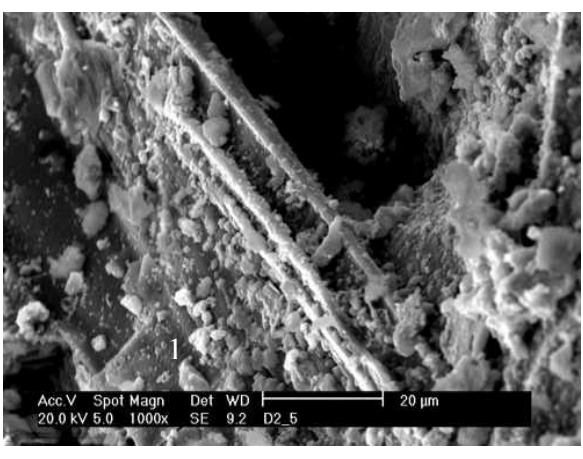
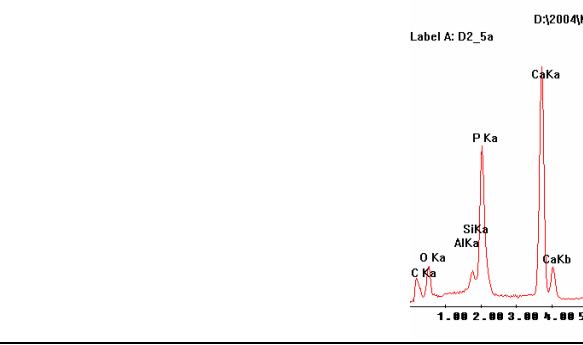
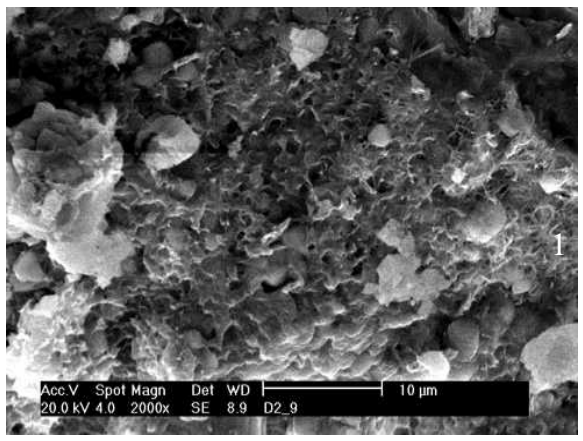
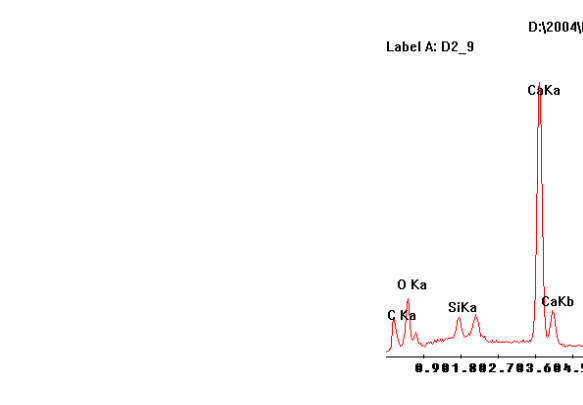
- 1) Ferrita de cálcio hidratada
- 2) Carbonato de cálcio

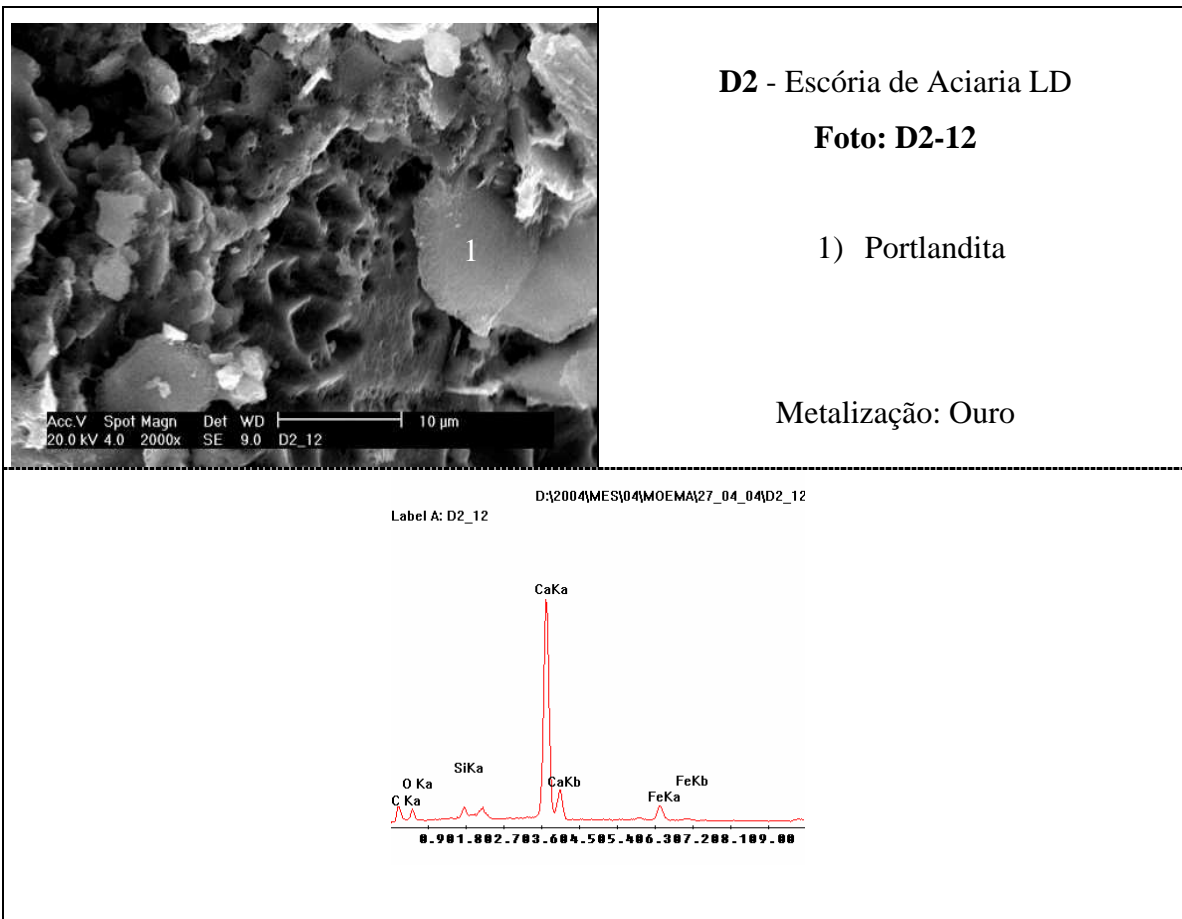
Metalização: Ouro



2.2 Amostra D2

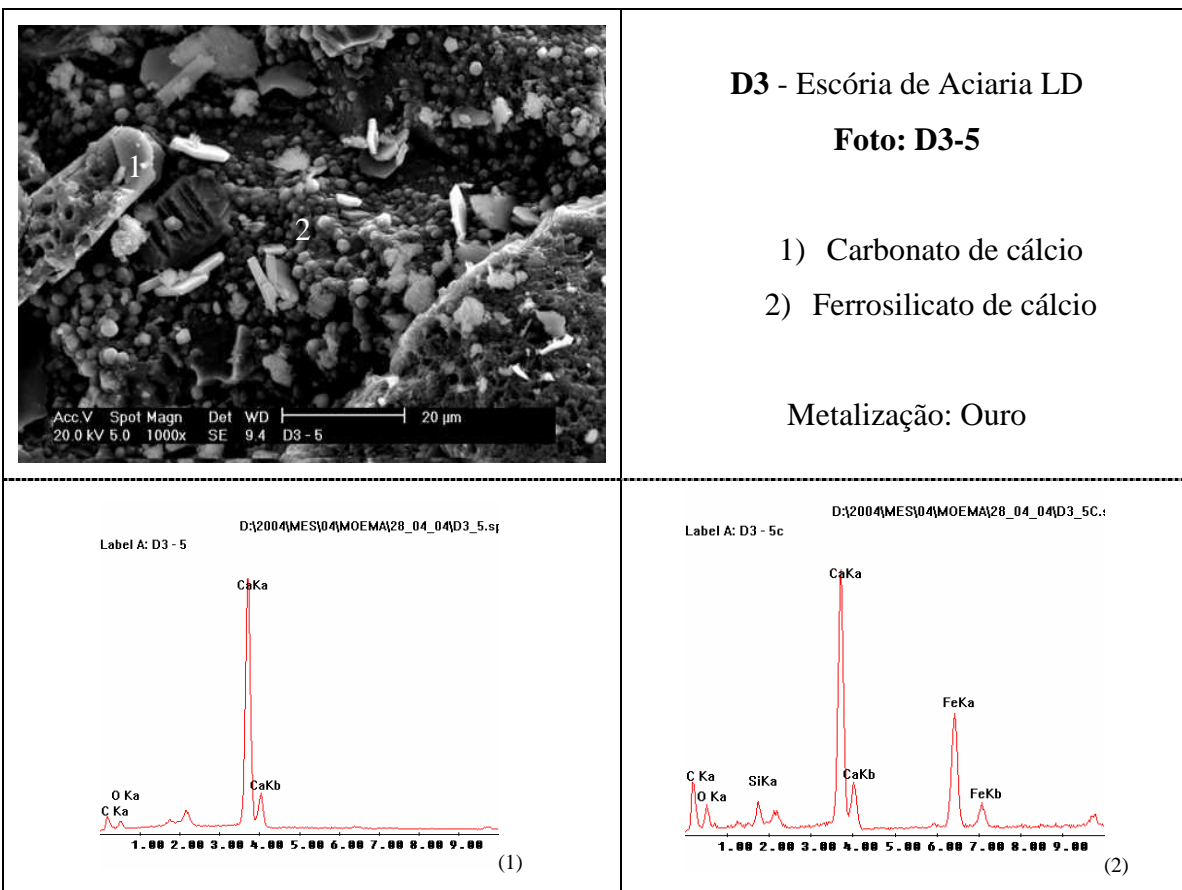
	<p>D2 - Escória de Aciaria LD Foto: D2-2</p> <p>1) Carbonato de cálcio</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	<p>D2 - Escória de Aciaria LD Foto: D2-3</p> <p>(1) (2) Portlandita</p> <p>Metalização: Ouro</p>
<p>(1)</p>	<p>(2)</p>

	<p>D2 - Escória de Aciaria LD</p> <p>Foto: D2-5</p> <p>1) Fosfato de cálcio</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	
	<p>D2 - Escória de Aciaria LD</p> <p>Foto: D2-9</p> <p>1) Ferrita de cálcio hidratada</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	



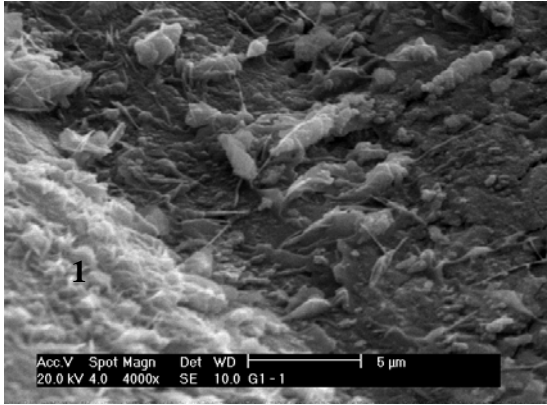
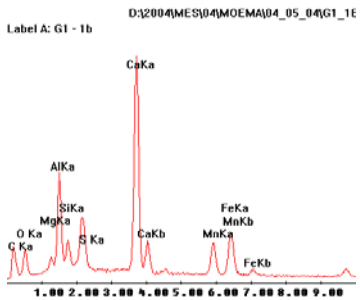
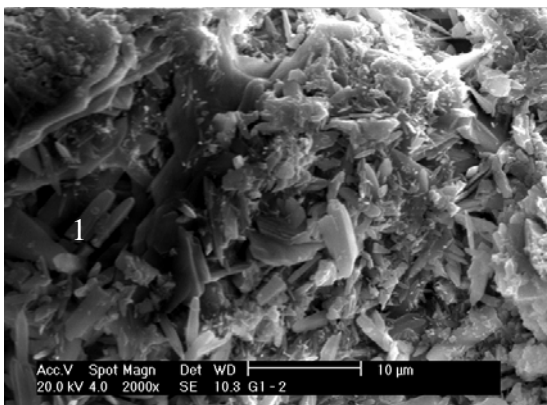
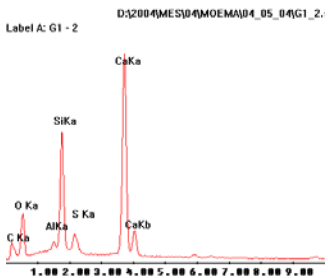
2.3 Amostra D3

	<p>D3 - Escória de Aciaria LD Foto: D3-2</p> <p>1) Portlandita 2) Ferrita de cálcio hidratada</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	<p>D3 - Escória de Aciaria LD Foto: D3-4</p> <p>Ferrita de cálcio hidratada</p> <p>Metalização: Ouro</p>



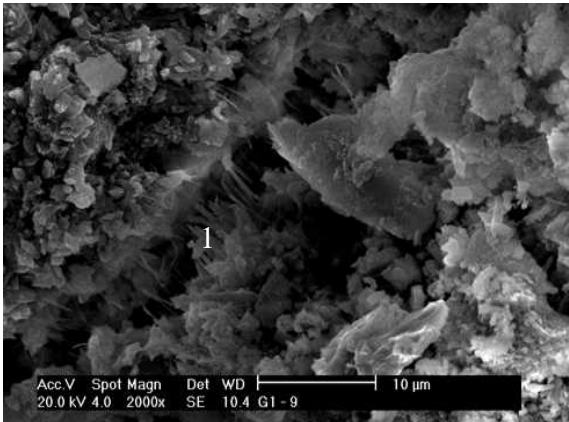
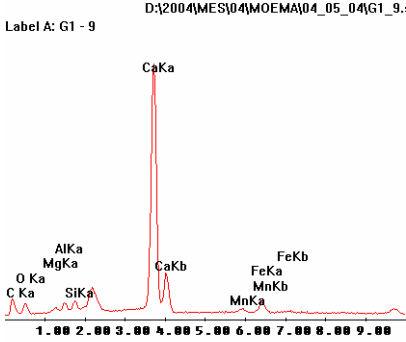
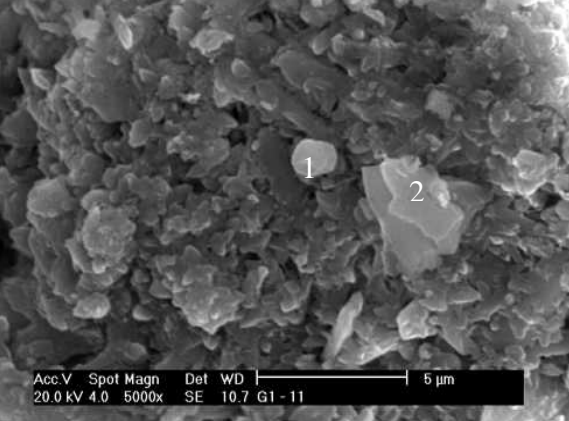
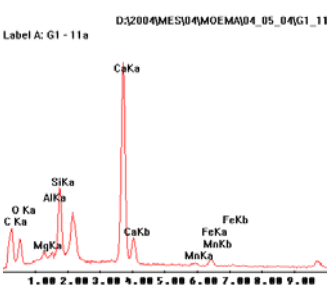
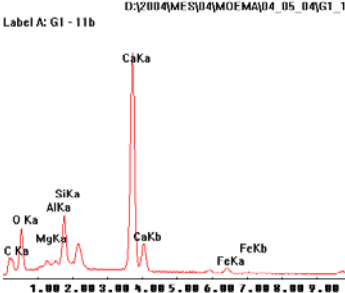
3 AMOSTRA G – MEV

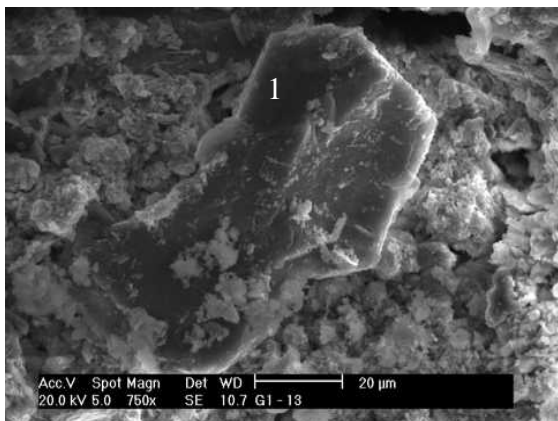
3.1 Amostra G1 (Externa)

	<p>G1 - Escória de Aciaria LD Foto: G1-1</p> <p>1) Etringita</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	
	<p>G1 - Escória de Aciaria LD Foto: G1-2</p> <p>1) Silicato dicálcico</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	

	<p>G1 - Escória de Aciaria LD</p> <p>Foto: G1-3</p> <p>1) Silicato dicálcico 2) Portlandita</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	<p>G1 - Escória de Aciaria LD</p> <p>Foto: G1-5</p> <p>1) Carbonato de cálcio</p> <p>Metalização: Ouro</p>

	<p>G1 - Escória de Aciaria LD Foto: G1-6</p> <p>1) Silicato tricálcico</p> <p>Metalização: Ouro</p>
<p>Label A: G1 - 6</p> <p>D:\2004\MES\04\MOEMA\04_05_04\G1_6:</p>	
	<p>G1 - Escória de Aciaria LD Foto: G1-7</p> <p>1) Gismondina 2) Portlandita</p> <p>Metalização: Ouro</p>
<p>Label A: G1 - 7</p> <p>D:\2004\MES\04\MOEMA\04_05_04\G1_7:</p> <p>(1)</p>	<p>Label A: G1 - 7c</p> <p>D:\2004\MES\04\MOEMA\04_05_04\G1_7c:</p> <p>(2)</p>

 <p>Acc.V Spot Magn Det WD 10 µm 20.0 kV 4.0 2000x SE 10.4 G1 - 9</p>	<p>G1 - Escória de Aciaria LD Foto: G1-9</p> <p>1) Carbonato de cálcio</p> <p>Metalização: Ouro</p>
<p>Label A: G1 - 9 D:\2004\MES\04\MOEMA\04_05_04\G1_9_.</p> 	
 <p>Acc.V Spot Magn Det WD 5 µm 20.0 kV 4.0 5000x SE 10.7 G1 - 11</p>	<p>G1 - Escória de Aciaria LD Foto: G1-11</p> <p>1) Silicato dicálcico 2) Silicato tricálcico</p> <p>Metalização: Ouro</p>
<p>Label A: G1 - 11a D:\2004\MES\04\MOEMA\04_05_04\G1_11</p>  <p>(1)</p>	<p>Label A: G1 - 11b D:\2004\MES\04\MOEMA\04_05_04\G1_11</p>  <p>(2)</p>

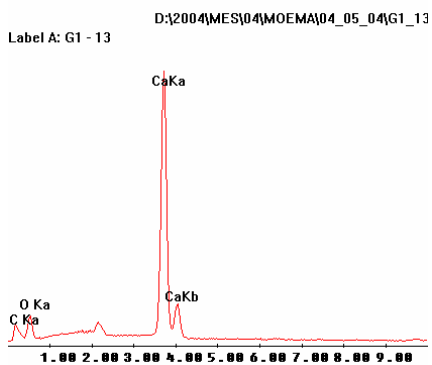


G1- Escória de Aciaria LD

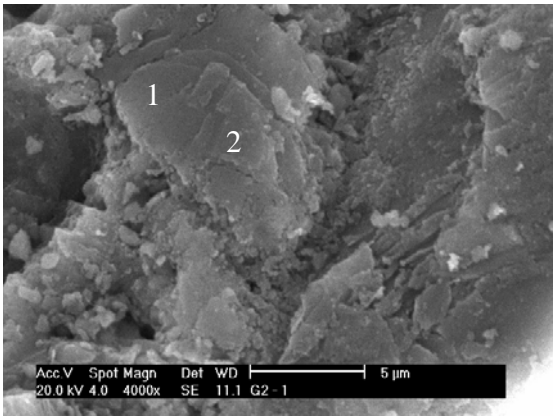
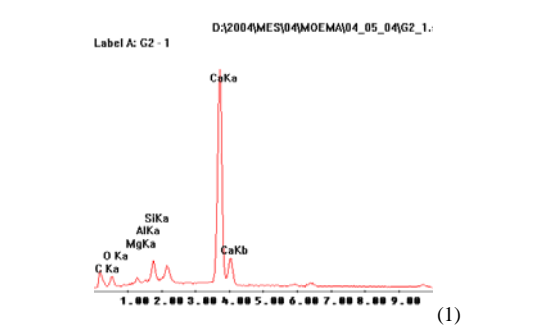
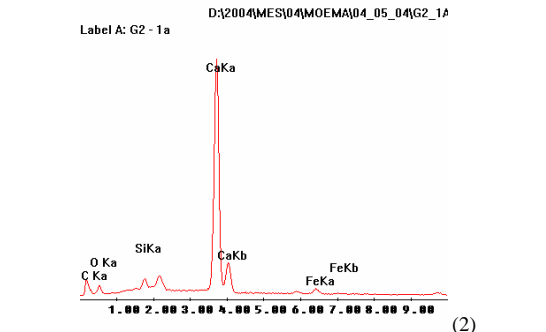
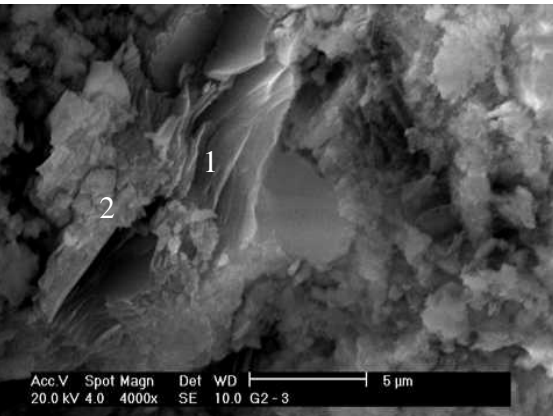
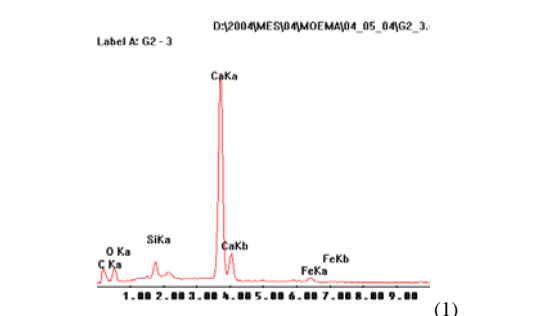
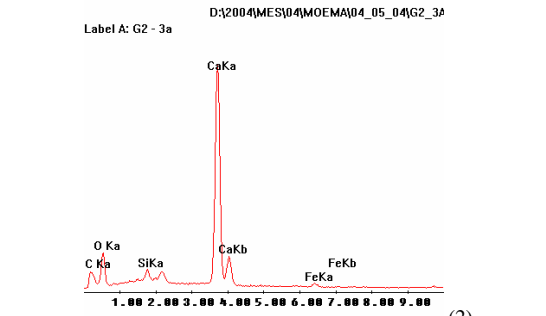
Foto: G1-13

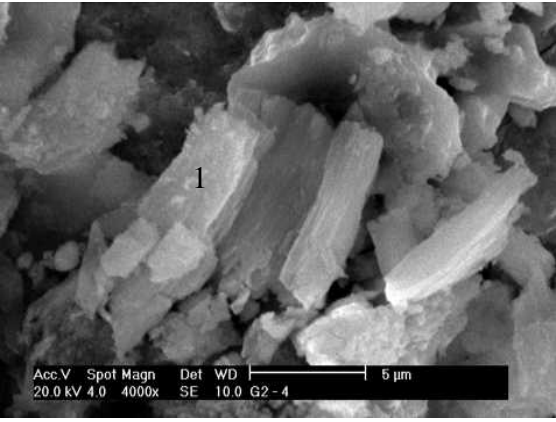
1) Carbonato de cálcio

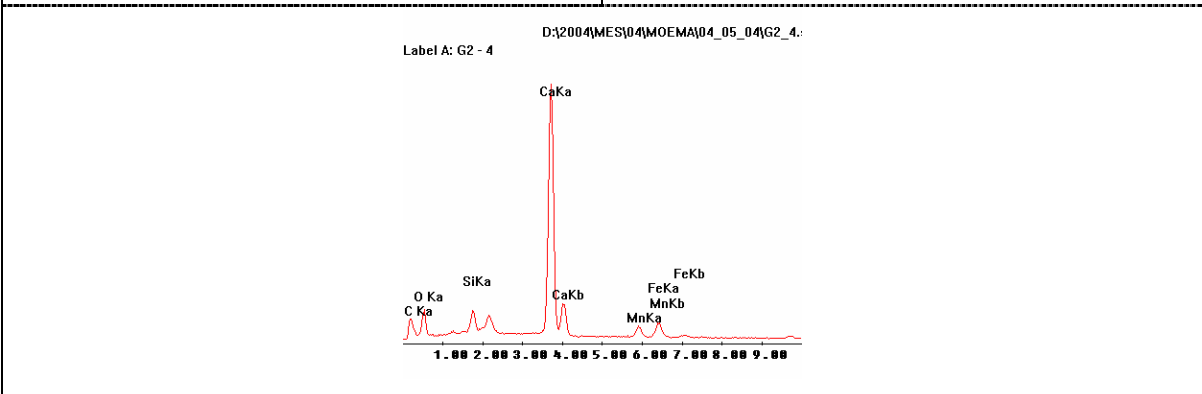
Metalização: Ouro

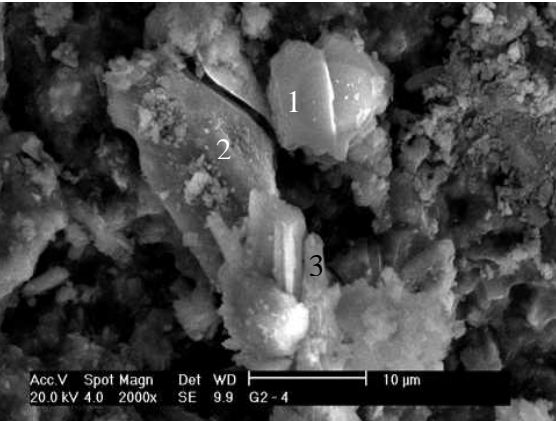


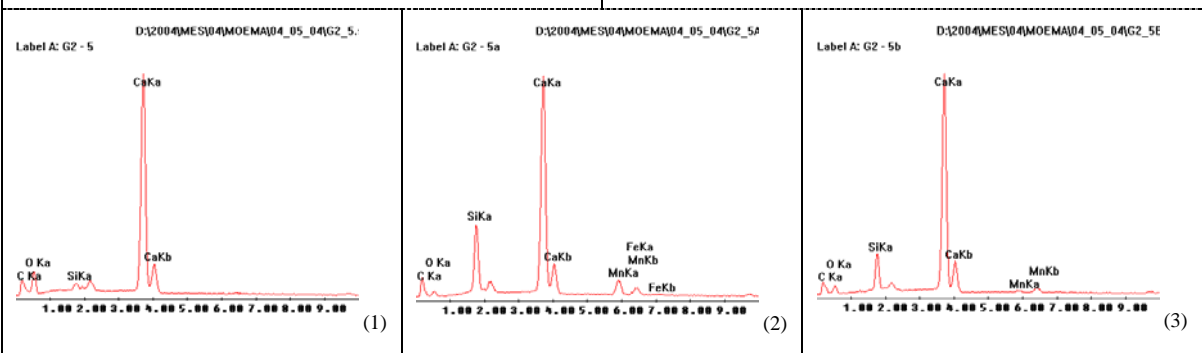
3.2 Amostra G2 (Interna)

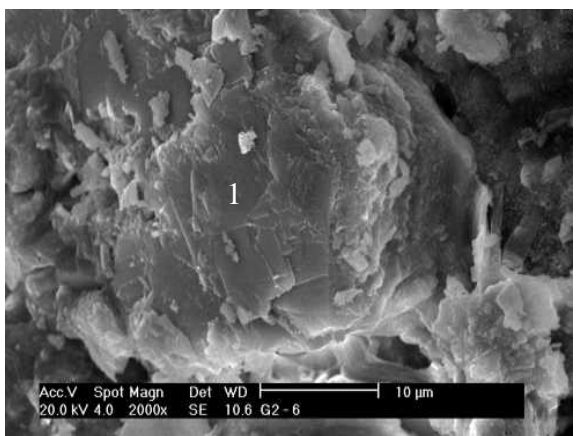
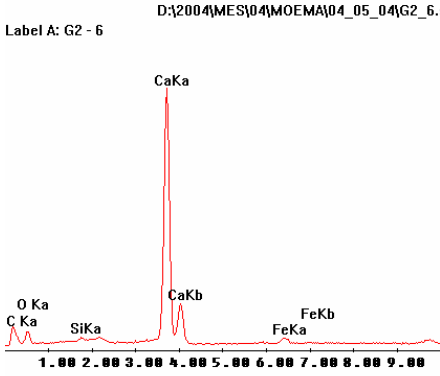
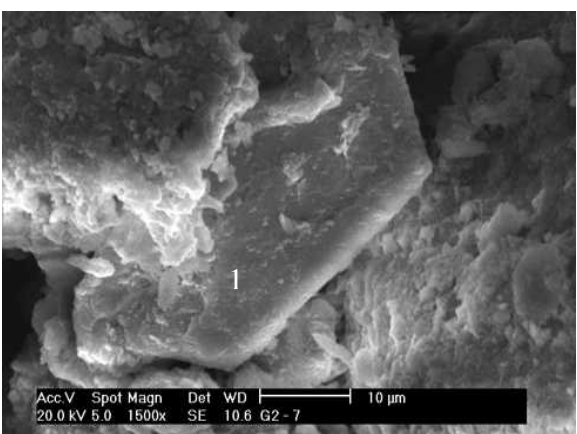
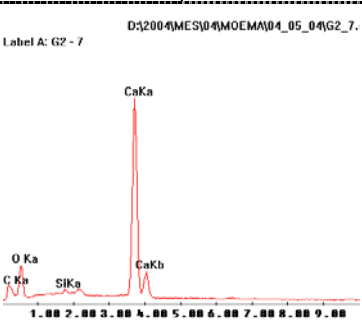
	<p>G2 - Escória de Aciaria LD Foto: G2-1</p> <p>(1) (2) Portlandita</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	
	<p>G2 - Escória de Aciaria LD Foto: G2-3</p> <p>(1) (2) Portlandita</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	

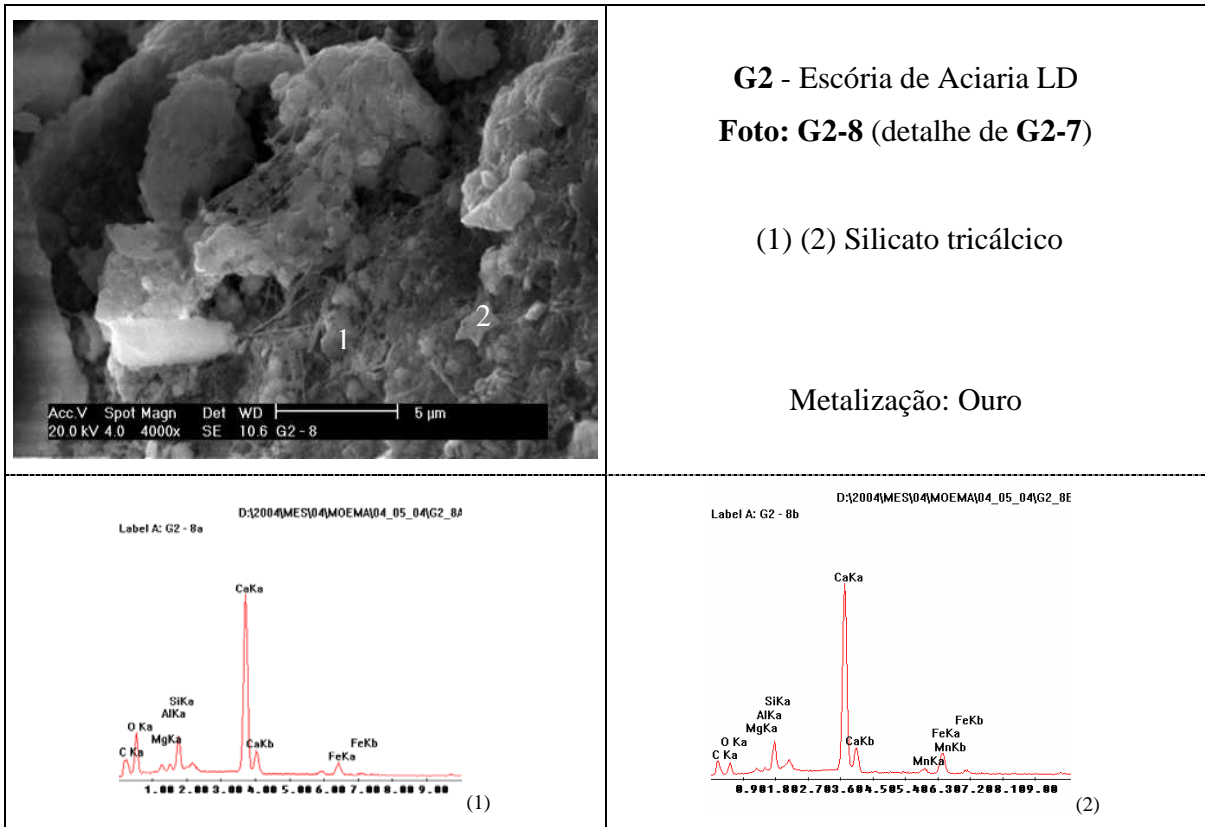
 <p>Acc.V Spot Magn Det WD 5 µm 20.0 kV 4.0 4000x SE 10.0 G2 - 4</p>	<p>G2 - Escória de Aciaria LD Foto: G2-4</p> <p>1) Carbonato de cálcio</p> <p>Metalização: Ouro</p>
---	---



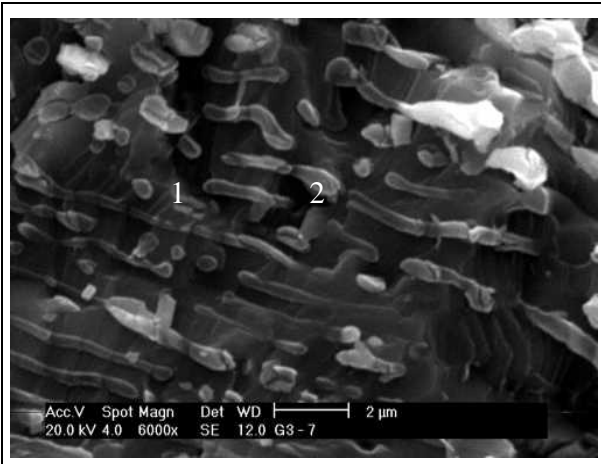
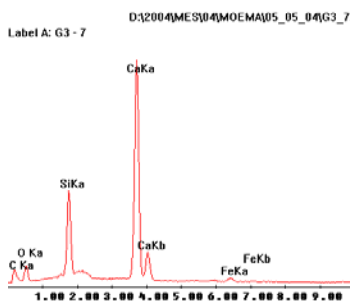
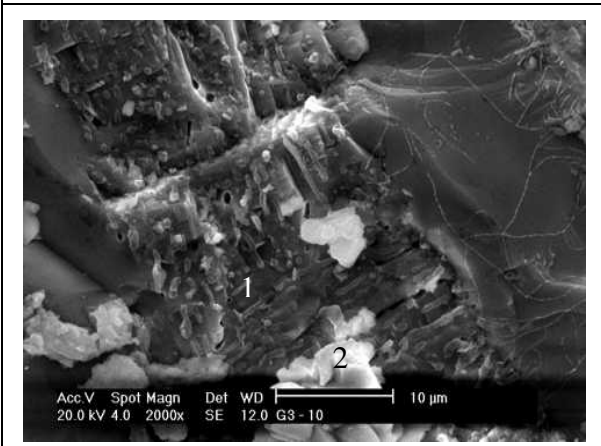
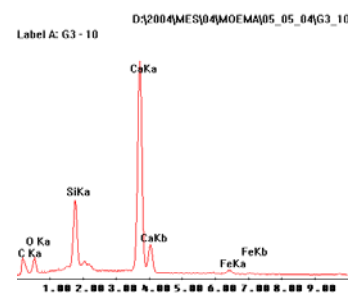
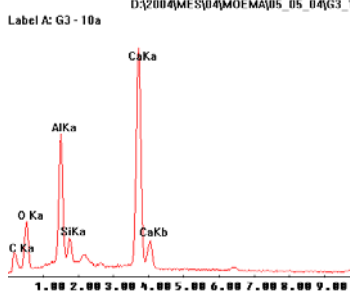
 <p>Acc.V Spot Magn Det WD 10 µm 20.0 kV 4.0 2000x SE 9.9 G2 - 4</p>	<p>G2 - Escória de Aciaria LD Foto: G2-5</p> <p>(1) (3) Carbonato de cálcio 2) Silicato dicálcico</p> <p>Metalização: Ouro</p>
---	--

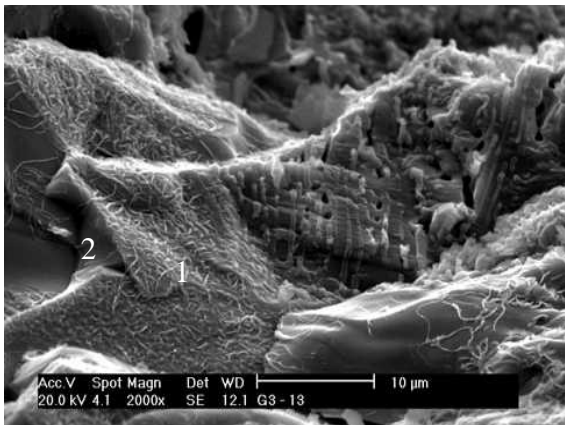


	<p>G2 - Escória de Aciaria LD Foto: G2-6</p> <p>1) Portlandita</p> <p>Metalização: Ouro</p>
<p>Label A: G2 - 6</p> 	
	<p>G2 - Escória de Aciaria LD Foto: G2-7</p> <p>1) Carbonato de cálcio</p> <p>Metalização: Ouro</p>
<p>Label A: G2 - 7</p> 	



3.3 Amostra G3 (Interna)

	<p>G3 - Escória de Aciaria LD Foto: G3-7</p> <p>(1) (2) Silicato dicálcico</p> <p>Metalização: Ouro</p>
 <p style="text-align: right;">(1) (2)</p>	
	<p>G3 - Escória de Aciaria LD Foto: G3-10</p> <p>1) Silicato tricálcico 2) Aluminato de cálcio</p> <p>Metalização: Ouro</p>
 <p style="text-align: right;">(1)</p>	 <p style="text-align: right;">(2)</p>

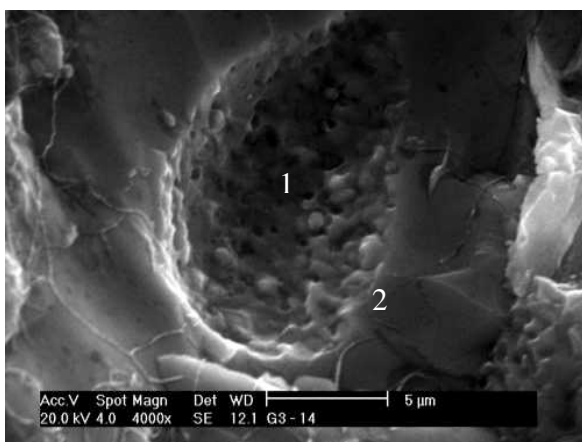
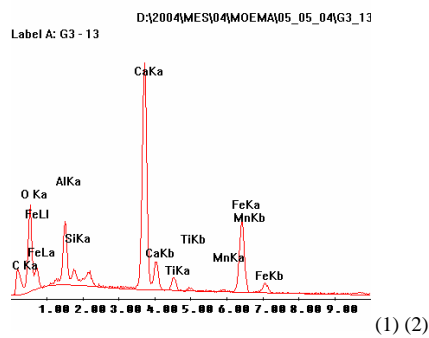


G3- Escória de Aciaria LD

Foto: G3-13

(1) (2) Ferroaluminato de cálcio hidratado

Metalização: Ouro

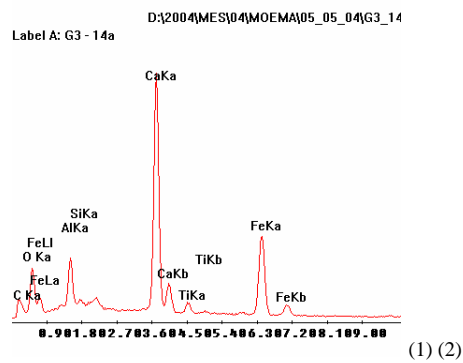


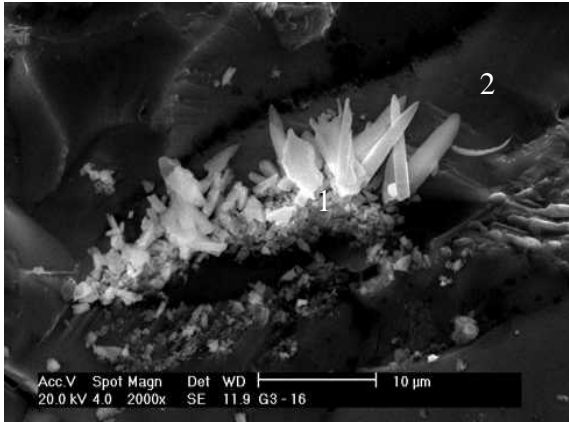
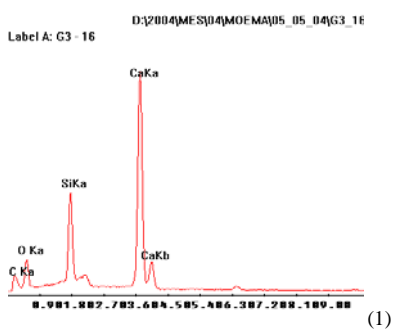
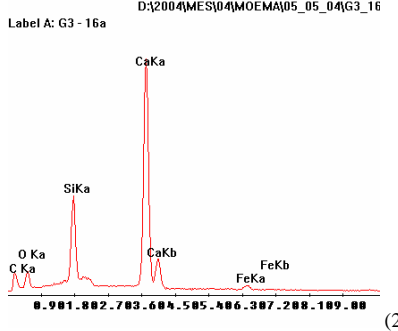
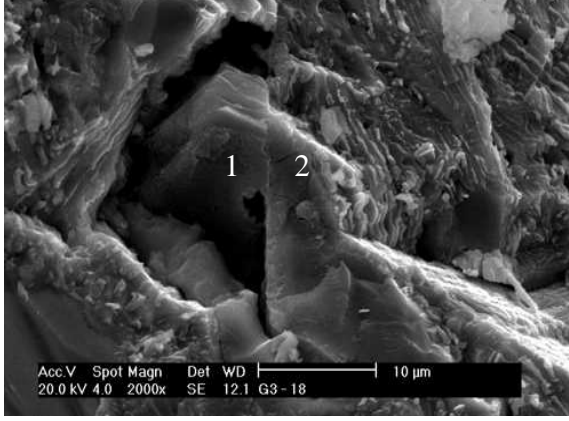
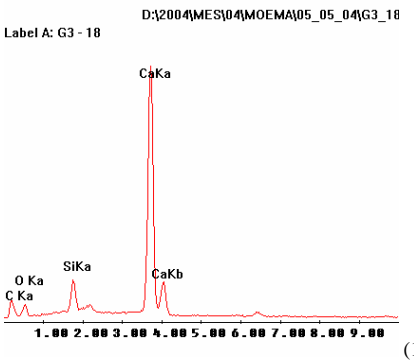
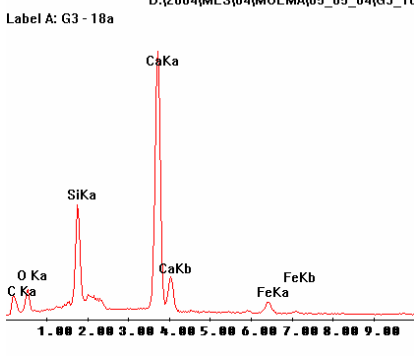
G3 - Escória de Aciaria LD

Foto: G3-14

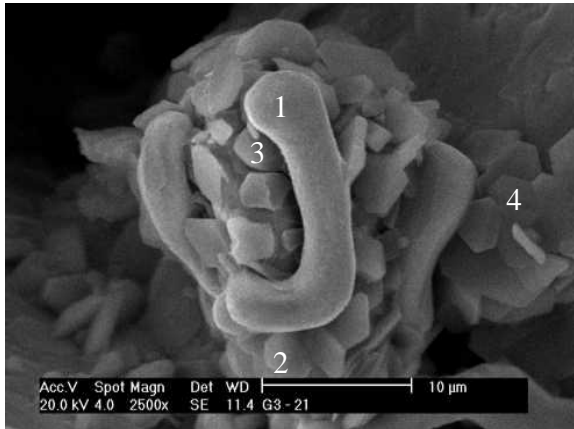
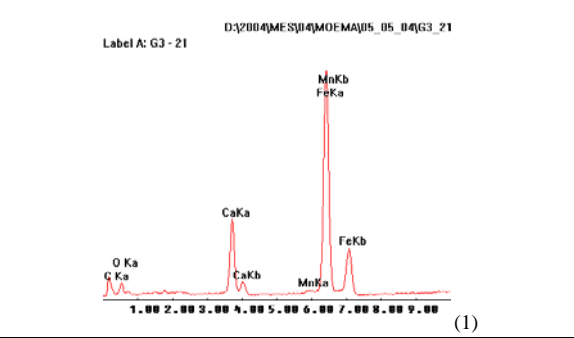
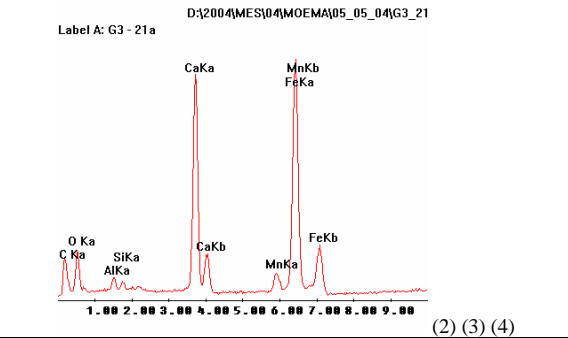

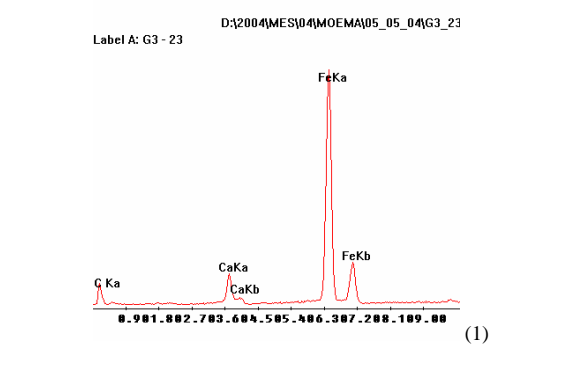
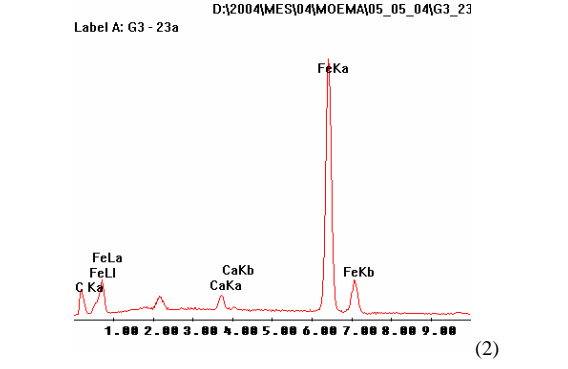
(1) (2) Ferroaluminato de cálcio hidratado

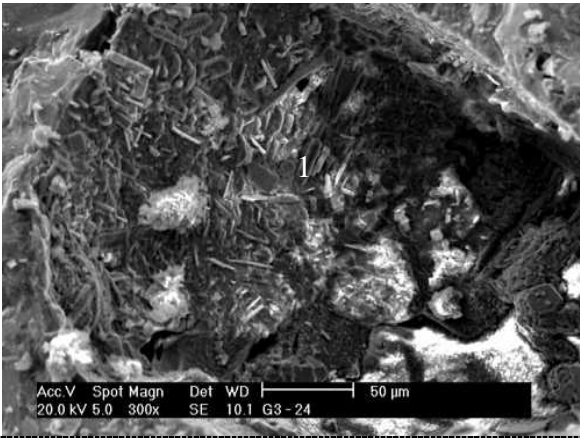
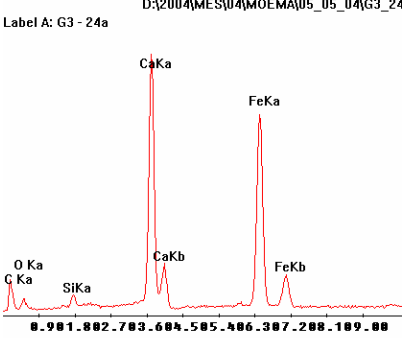
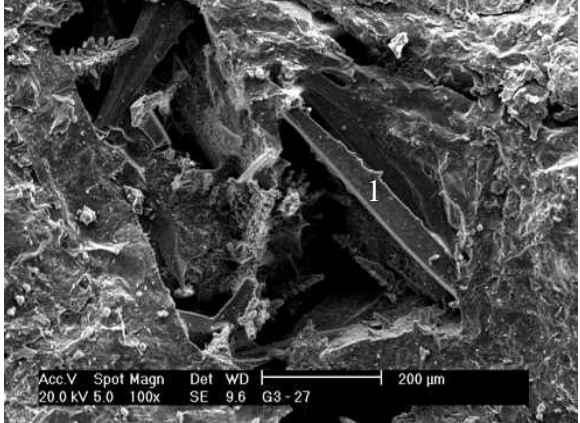
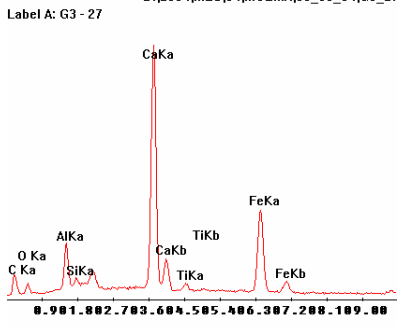
Metalização: Ouro

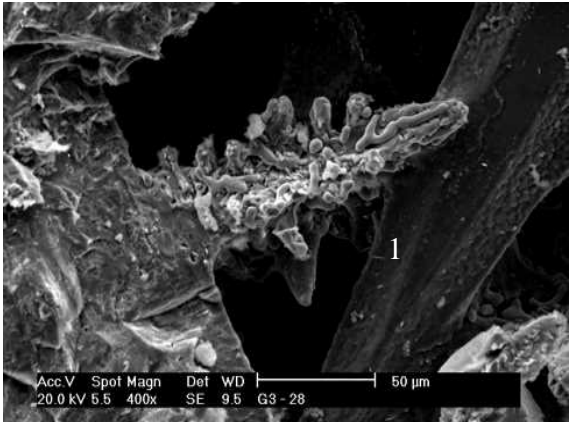
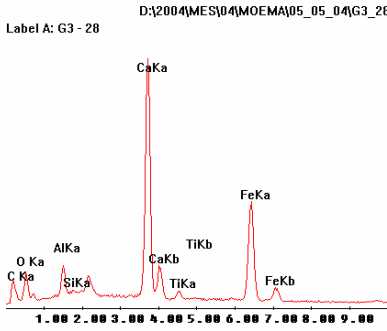
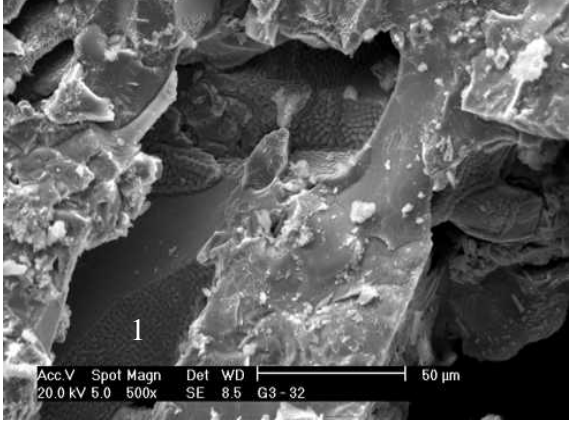
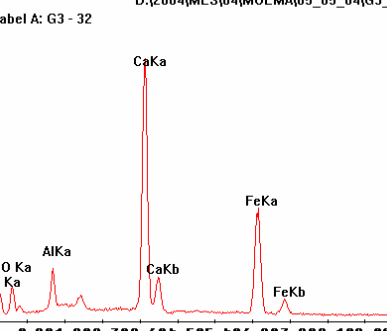


	<p>G3- Escória de Aciaria LD Foto: G3-16</p> <p>(1) (2) Silicato dicálcico</p> <p>Metalização: Ouro</p>
 <p>(1)</p>	 <p>(2)</p>
	<p>G3 - Escória de Aciaria LD Foto: G3-18</p> <p>(1) Portlandita (2) Silicato tricálcico</p> <p>Metalização: Ouro</p>
 <p>(1)</p>	 <p>(2)</p>

	<p>G3 - Escória de Aciaria LD Foto: G3-19</p> <p>1) Portlandita 2) Carbonato de cálcio</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	<p>G3- Escória de Aciaria LD Foto: G3-20</p> <p>1) Silicato de cálcio hidratado</p> <p>Metalização: Ouro</p>

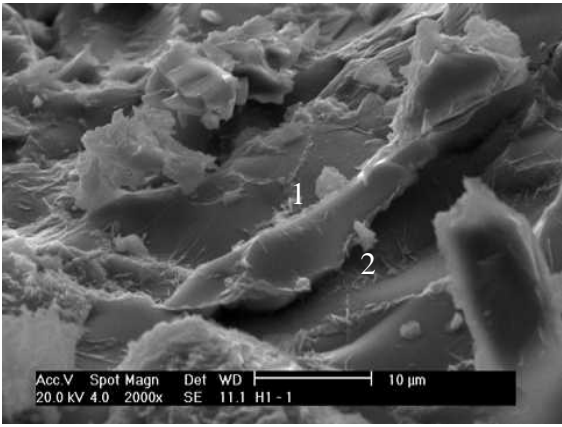
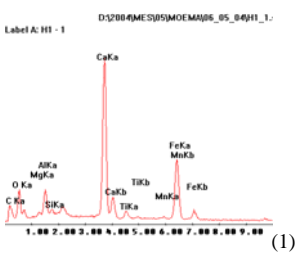
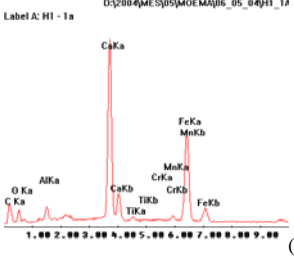
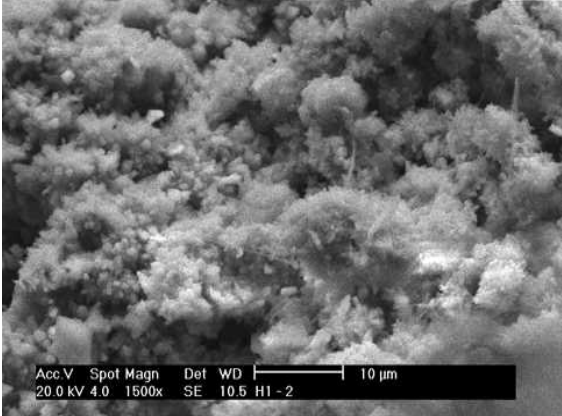
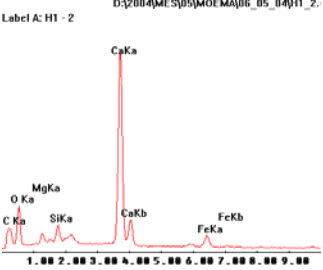
	<p>G3 - Escória de Aciaria LD Foto: G3-21 (Poró)</p> <p>(1) (2) (3) (4) Ferrita de cálcio hidratada</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	
	<p>G3 - Escória de Aciaria LD Foto: G3-23</p> <p>(1), (2) Minério de ferro</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	

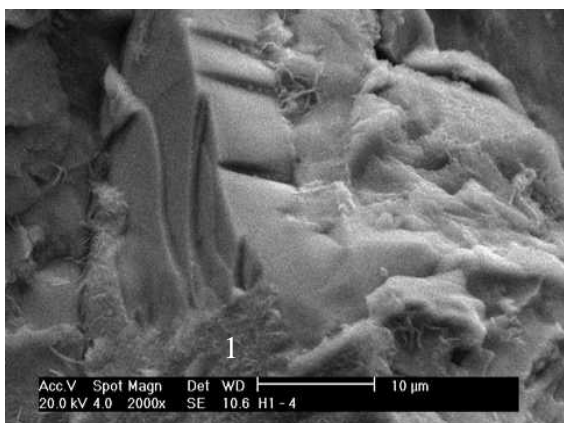
	<p>G3 - Escória de Aciaria LD</p> <p>Foto: G3-24</p> <p>Poros</p> <p>1) Ferrita de cálcio hidratada</p> <p>Metalização: Ouro</p>
<p>Label A: G3 - 24a</p> <p>D:\2004\MES\04\MOEMA\05_05_04\G3_24</p>  <p>(1)</p>	
	<p>G3 - Escória de Aciaria LD</p> <p>Foto: G3-27</p> <p>1) Ferroaluminato de cálcio hidratado</p> <p>Metalização: Ouro</p>
<p>Label A: G3 - 27</p> <p>D:\2004\MES\04\MOEMA\05_05_04\G3_27</p> 	

	<p>G3 - Escória de Aciaria LD Foto: G3-28 (detalhe de G3-27)</p> <p>1) Ferroaluminato de cálcio hidratado</p> <p>Metalização: Ouro</p>
<p>Label A: G3 - 28 D:\2004\MES\04\MOEMA\05_04\G3_28</p> 	
	<p>G3 - Escória de Aciaria LD Foto: G3-32</p> <p>1) Ferroaluminato de cálcio hidratado</p> <p>Metalização: Ouro</p>
<p>Label A: G3 - 32 D:\2004\MES\04\MOEMA\05_04\G3_32</p> 	

4 AMOSTRA H - MEV

4.1 Amostra H1 (Interna)

	<p>H1 - Escória de Aciaria LD</p> <p>Foto: H1-1</p> <p>1) Ferroaluminato de cálcio 2) Ferroaluminato de cálcio</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	
	<p>H1 - Escória de Aciaria LD</p> <p>Foto: H1-2</p> <p>1) Carbonato de cálcio</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	

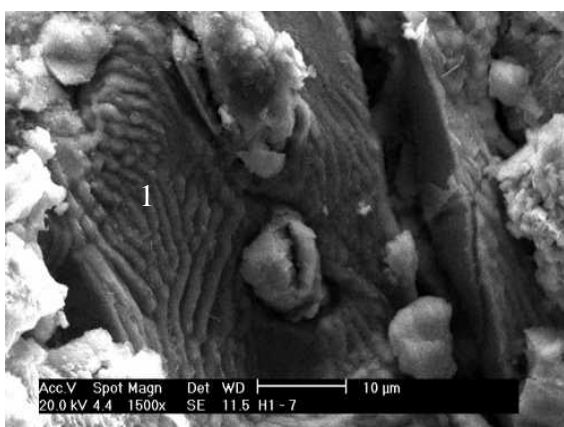
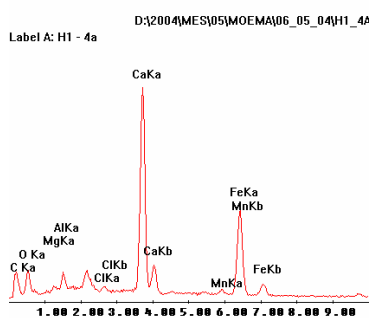


H1 - Escória de Aciaria LD

Foto: H1-4

1) Ferrita de cálcio hidratada

Metalização: Ouro

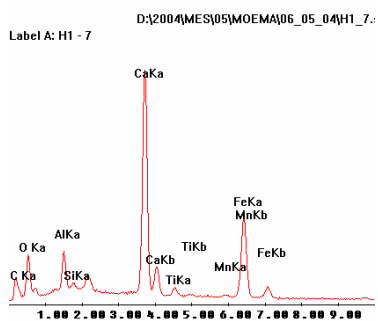


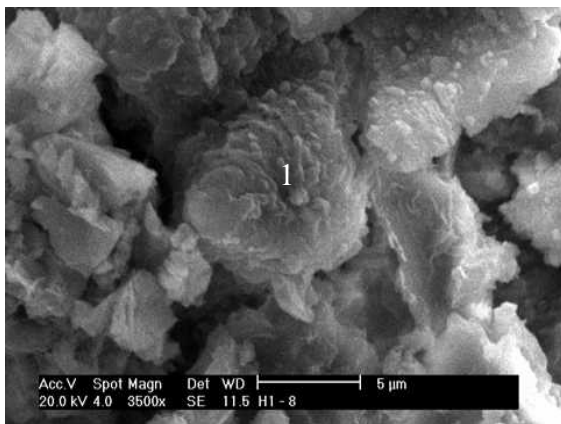
H1 - Escória de Aciaria LD

Foto: H1-7

1) Ferroaluminato de cálcio hidratado

Metalização: Ouro



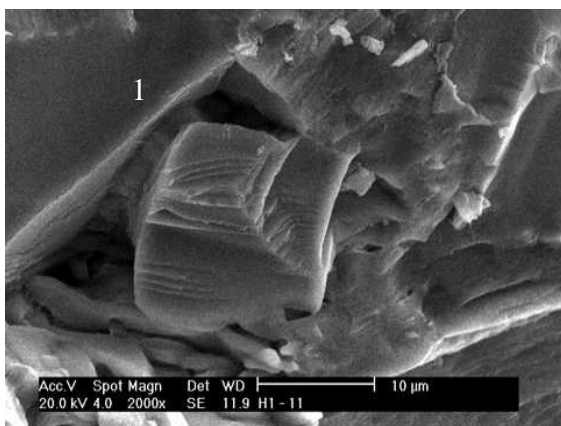
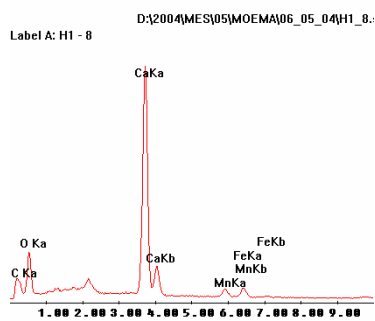


H1 - Escória de Aciaria LD

Foto: H1-8

1) Carbonato de cálcio

Metalização: Ouro

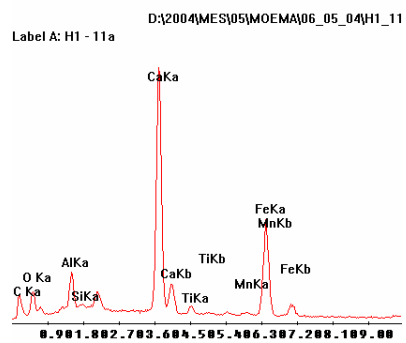


H1 - Escória de Aciaria LD

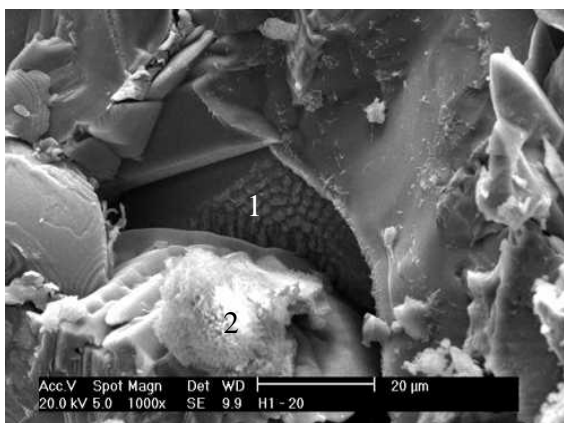
Foto: H1-11

1) Ferroaluminato de cálcio hidratado

Metalização: Ouro



	<p>H1 - Escória de Aciaria LD</p> <p>Foto: H1-16</p> <p>1) Carbonato de cálcio 2) Carbonato de cálcio</p> <p>Metalização: Ouro</p>	
	<p>H1 - Escória de Aciaria LD</p> <p>Foto: H1-17</p> <p>1) Carbonato de cálcio 2) Carbonato de cálcio 3) Ferroaluminato de cálcio hidratado</p> <p>Metalização: Ouro</p>	

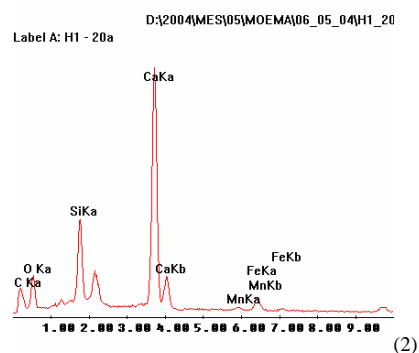
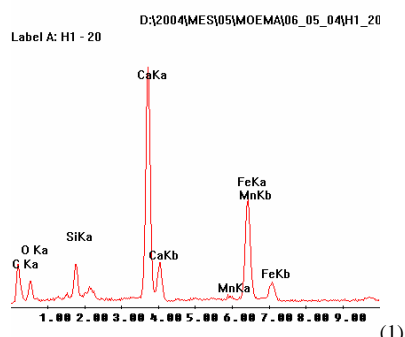


H1 - Escória de Aciaria LD

Foto: H1-20

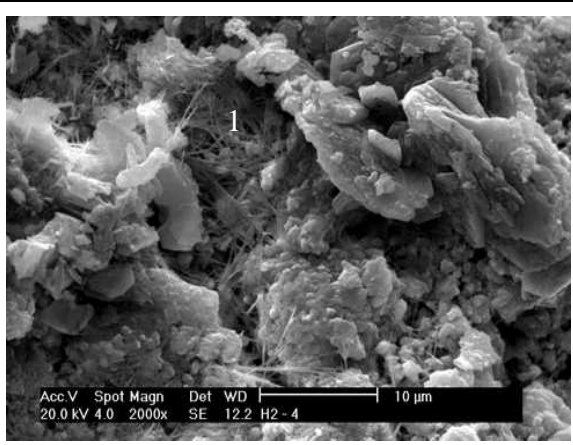
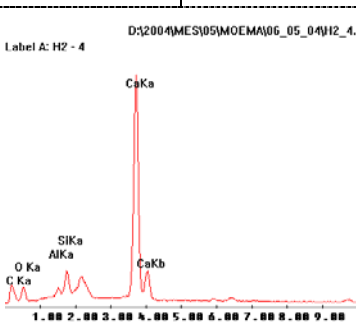
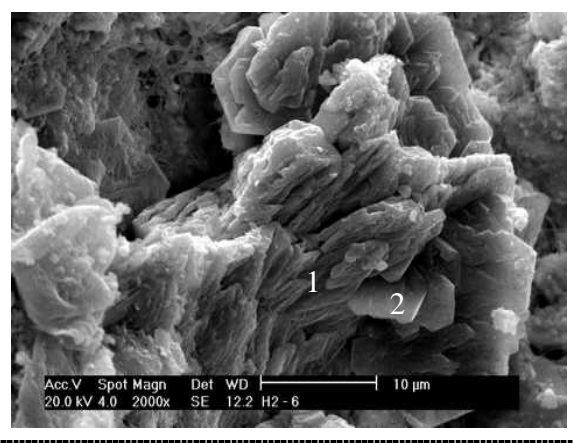
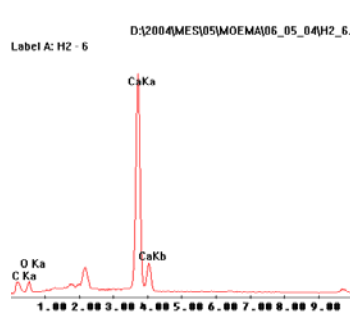
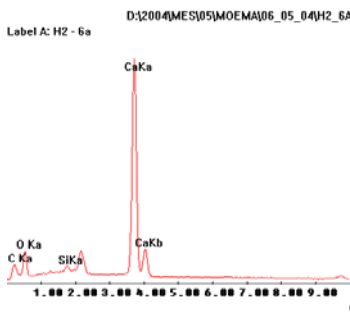
- 1) Ferrita de cálcio hidratada
- 2) Silicato de cálcio hidratado

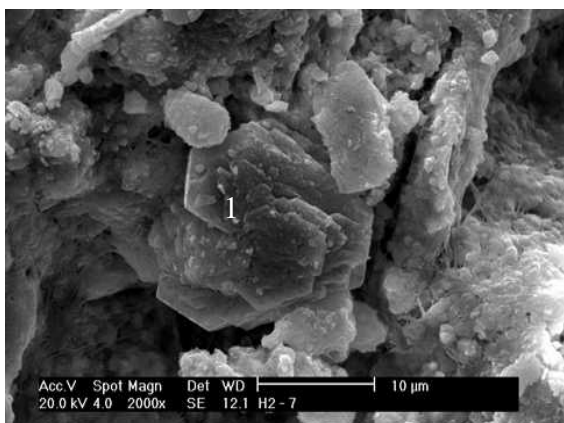
Metalização: Ouro



4.2 Amostra H2 (Externa)

	<p>H2 - Escória de Aciaria LD</p> <p>Foto: H2-1</p> <p>Carbonato de cálcio</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	<p>H2 - Escória de Aciaria LD</p> <p>Foto: H2-3</p> <p>1) Portlandita</p> <p>Metalização: Ouro</p>

	<p>H2 - Escória de Aciaria LD Foto: H2-4</p> <p>1) Carbonato de cálcio</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	
	<p>H2 - Escória de Aciaria LD Foto: H2-6</p> <p>1) Portlandita 2) Portlandita</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	

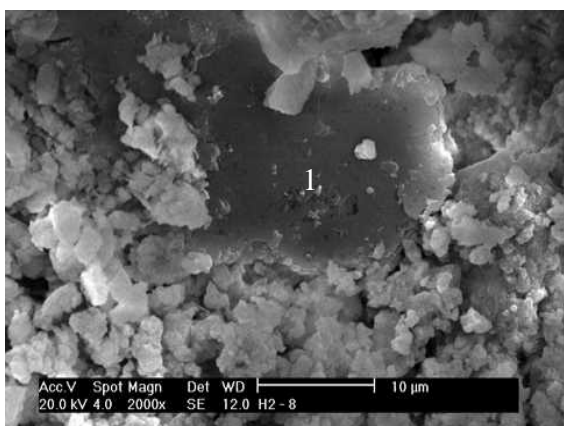
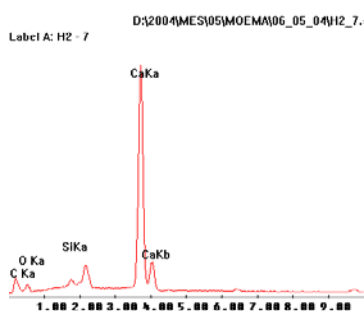


H2 - Escória de Aciaria LD

Foto: H2-7

1) Portlandita

Metalização: Ouro

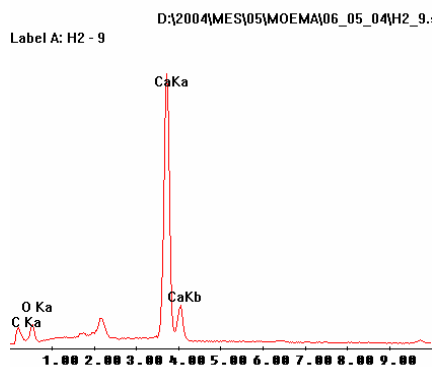


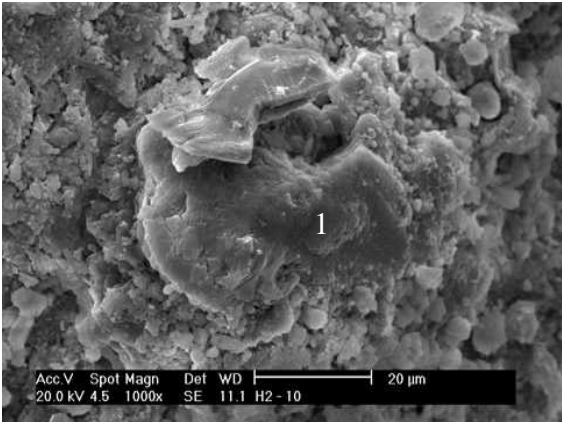
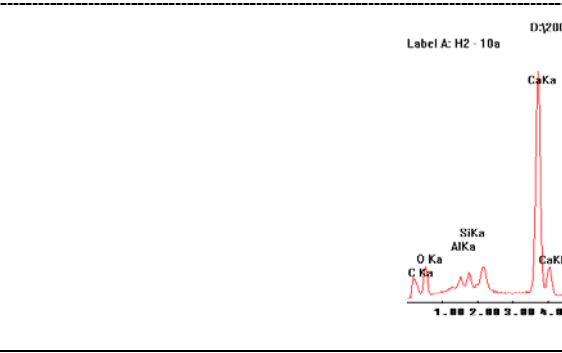
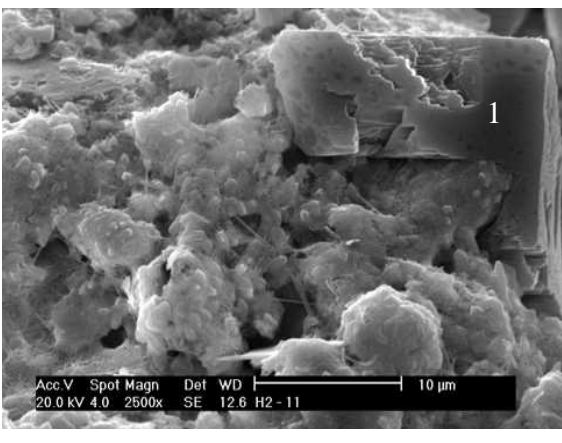
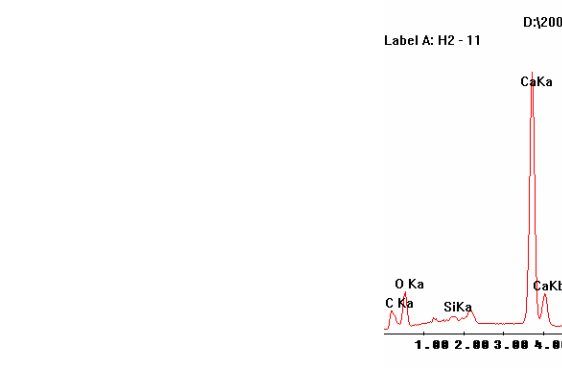
H2 - Escória de Aciaria LD

Foto: H2-8

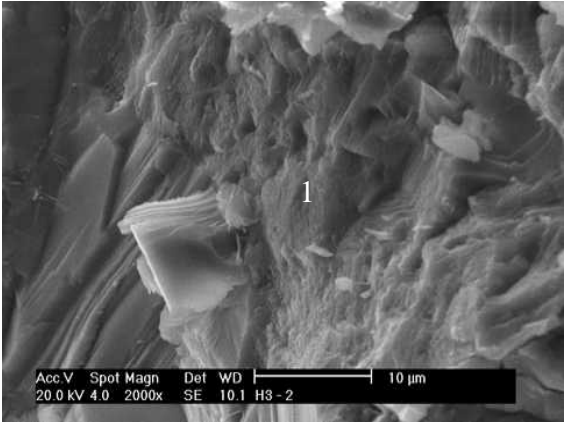
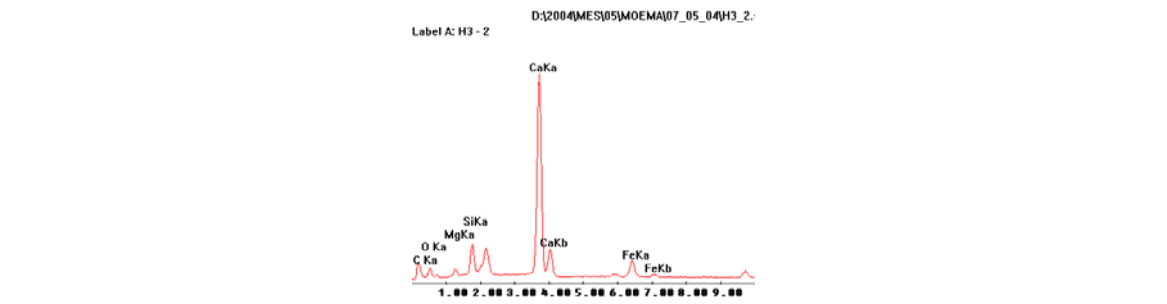
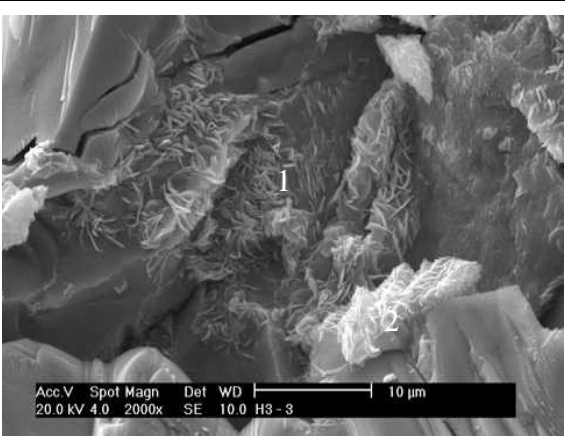
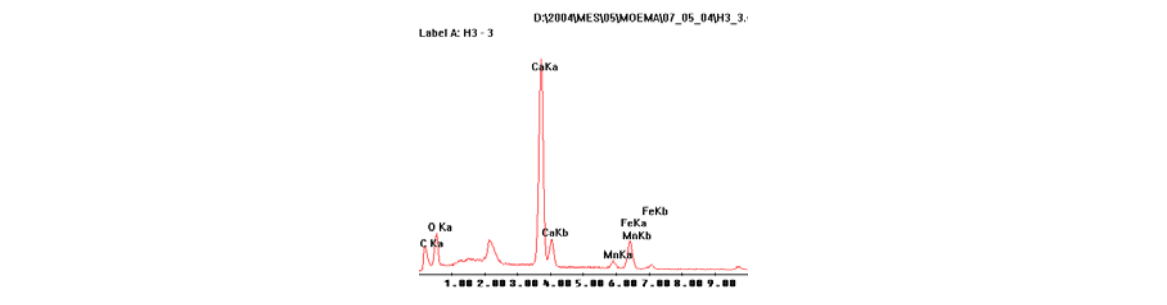
1) Carbonato de cálcio

Metalização: Ouro

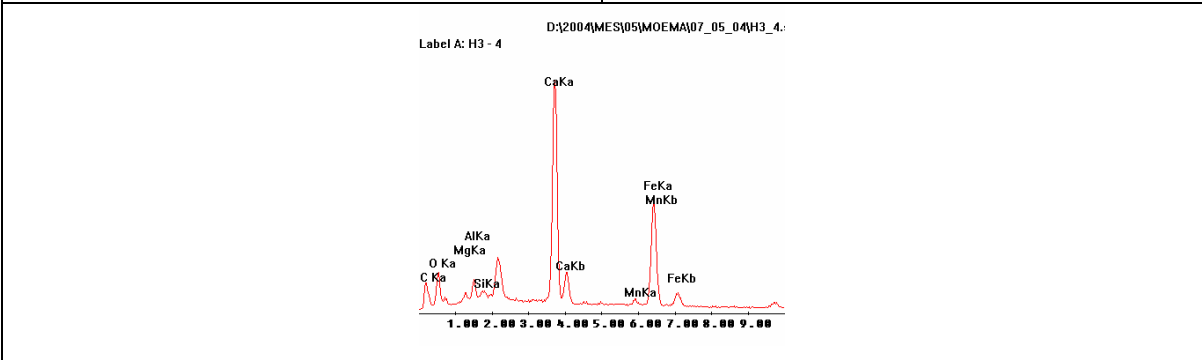


	<p>H2 - Escória de Aciaria LD</p> <p>Foto: H2-10</p> <p>1) Carbonato de cálcio</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	
	<p>H2 - Escória de Aciaria LD</p> <p>Foto: H2-11</p> <p>1) Portlandita</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	

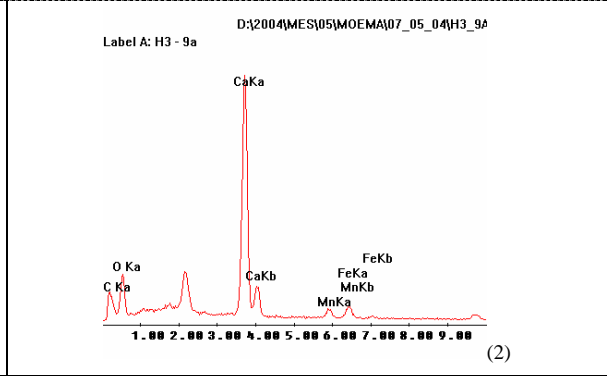
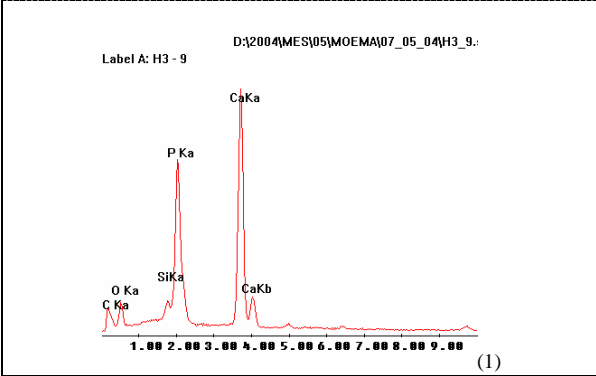
4.3 Amostra H3 (Interna)

	<p>H3 - Escória de Aciaria LD Foto: H3-2</p> <p>1) Silicato de cálcio hidratado</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	
	<p>H3 - Escória de Aciaria LD Foto: H3-3</p> <p>1) Ferrita de cálcio hidratada 2) Ferrita de cálcio hidratada</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	

	<p>H3 - Escória de Aciaria LD Foto: H3-4</p> <p>1) Ferrita de cálcio hidratada 2) Ferrita de cálcio hidratada</p> <p>Metalização: Ouro</p>
--	--



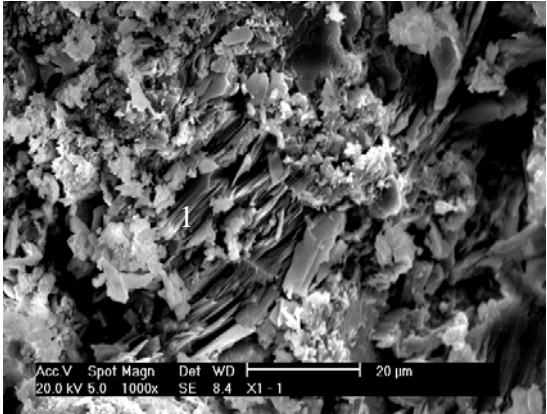
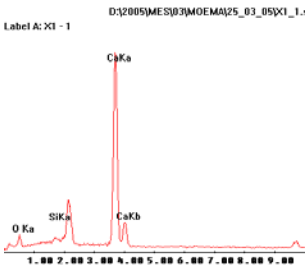

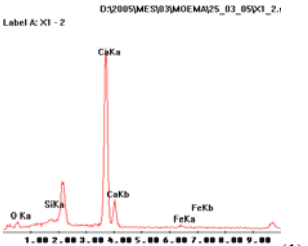
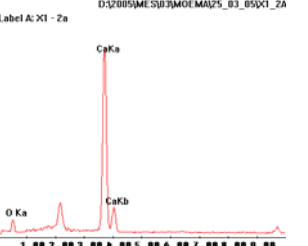
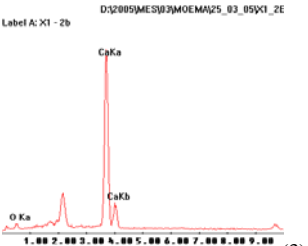
	<p>H3 - Escória de Aciaria LD Foto: H3-9</p> <p>1) Fosfato de cálcio 2) Portlandita</p> <p>Metalização: Ouro</p>
--	--

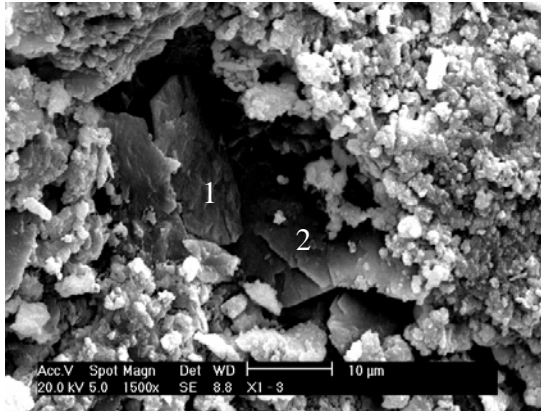
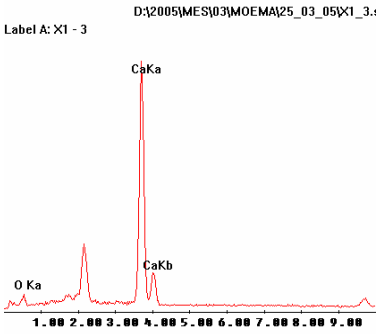
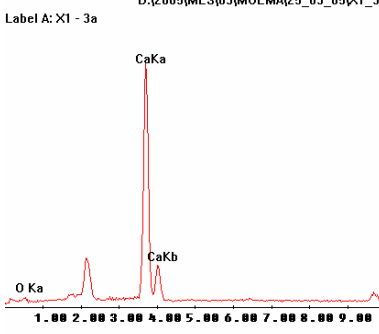
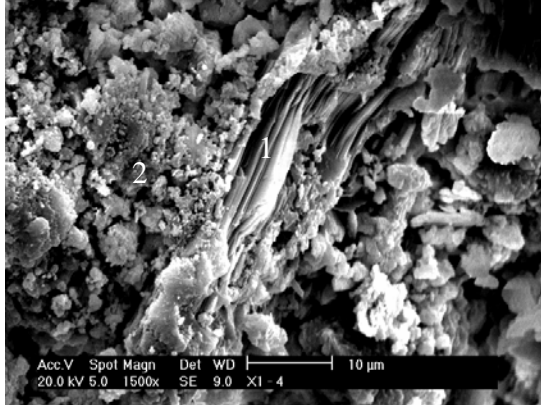
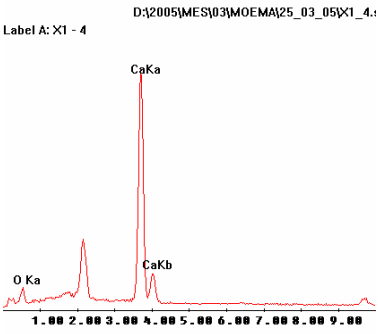
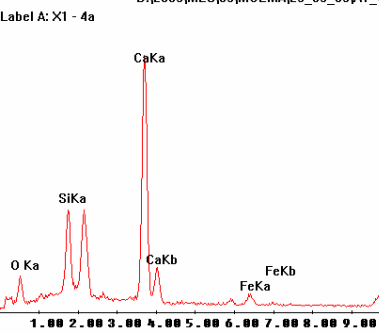


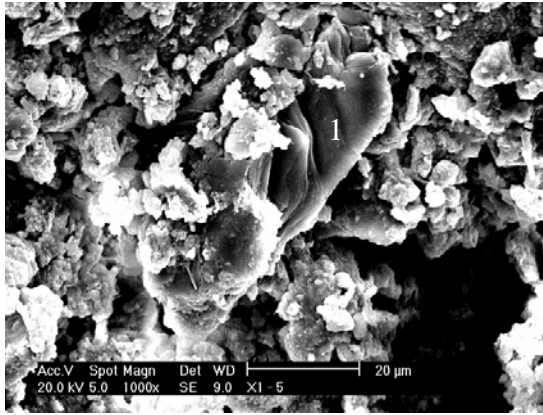
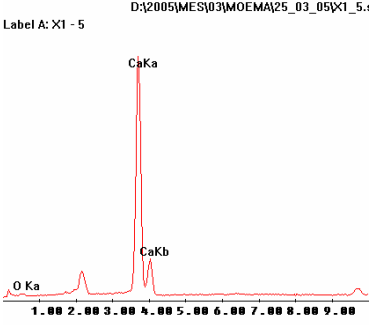
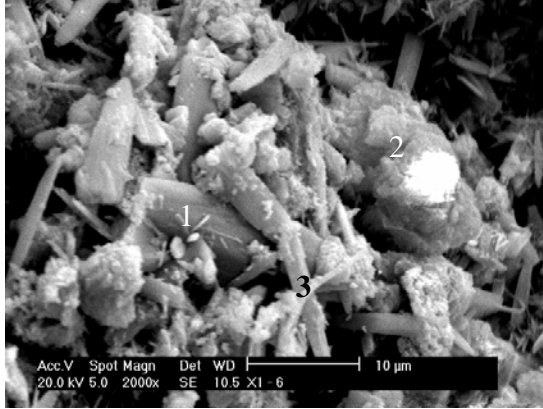
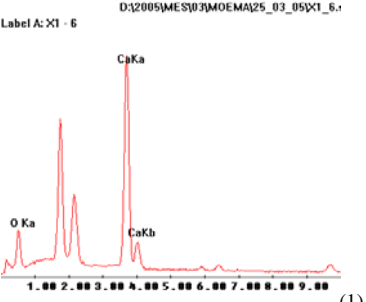
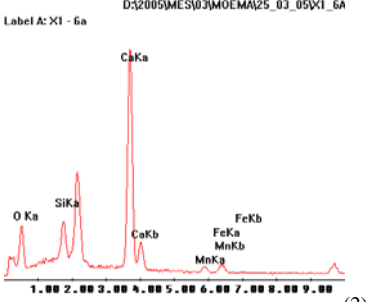
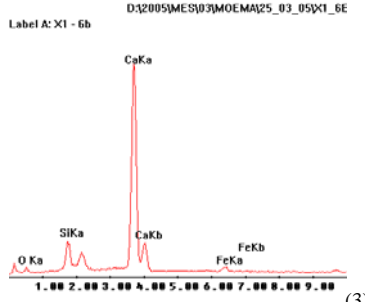
	<p>H3 - Escória de Aciaria LD Foto: H3-11</p> <p>1) Silicato de cálcio hidratado 2) Ferrita de cálcio hidratada</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	<p>H3 - Escória de Aciaria LD Foto: H3-12</p> <p>Vista ampla do poro H3-11</p> <p>Metalização: Ouro</p>

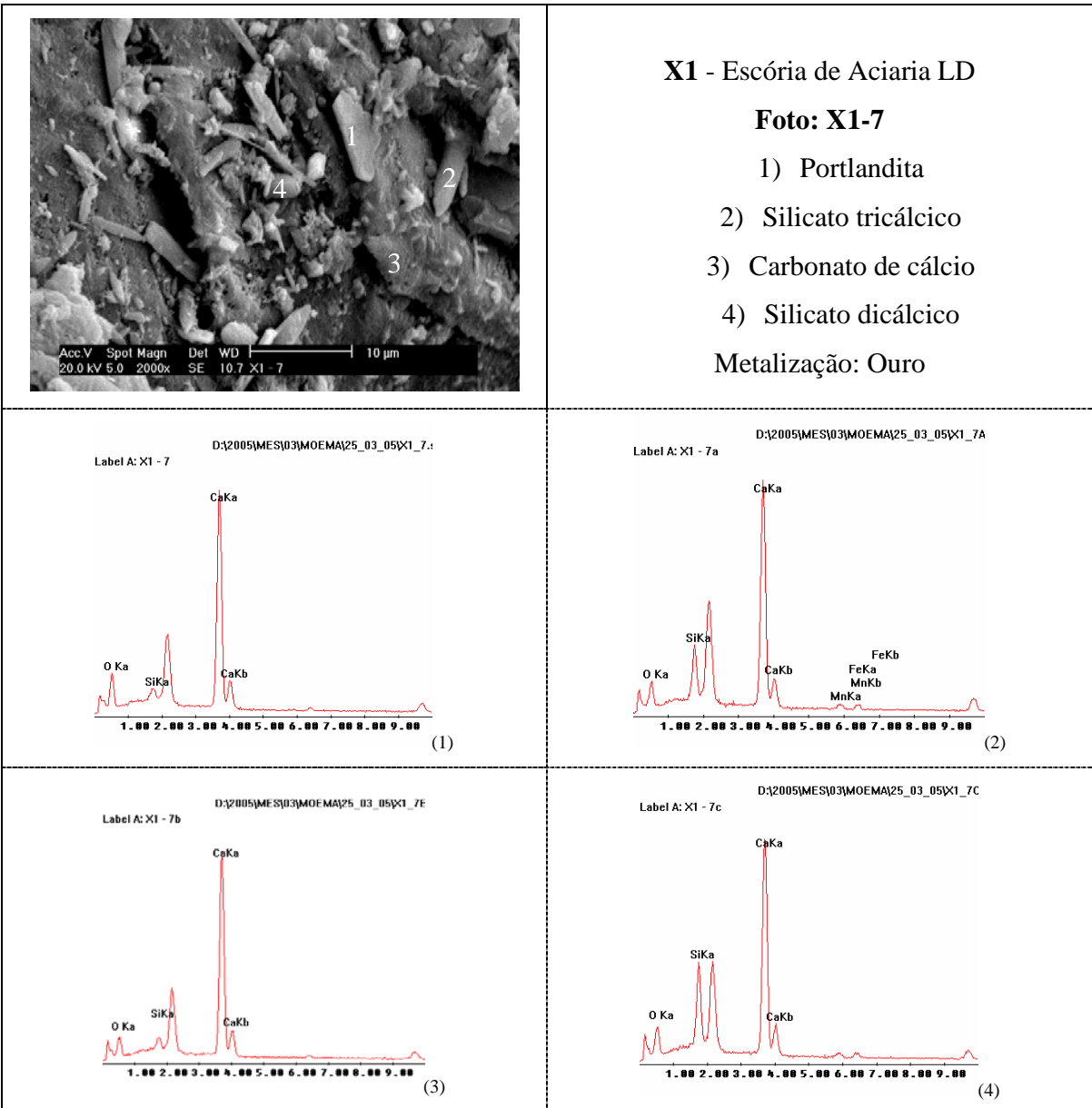
5 AMOSTRA X – MEV

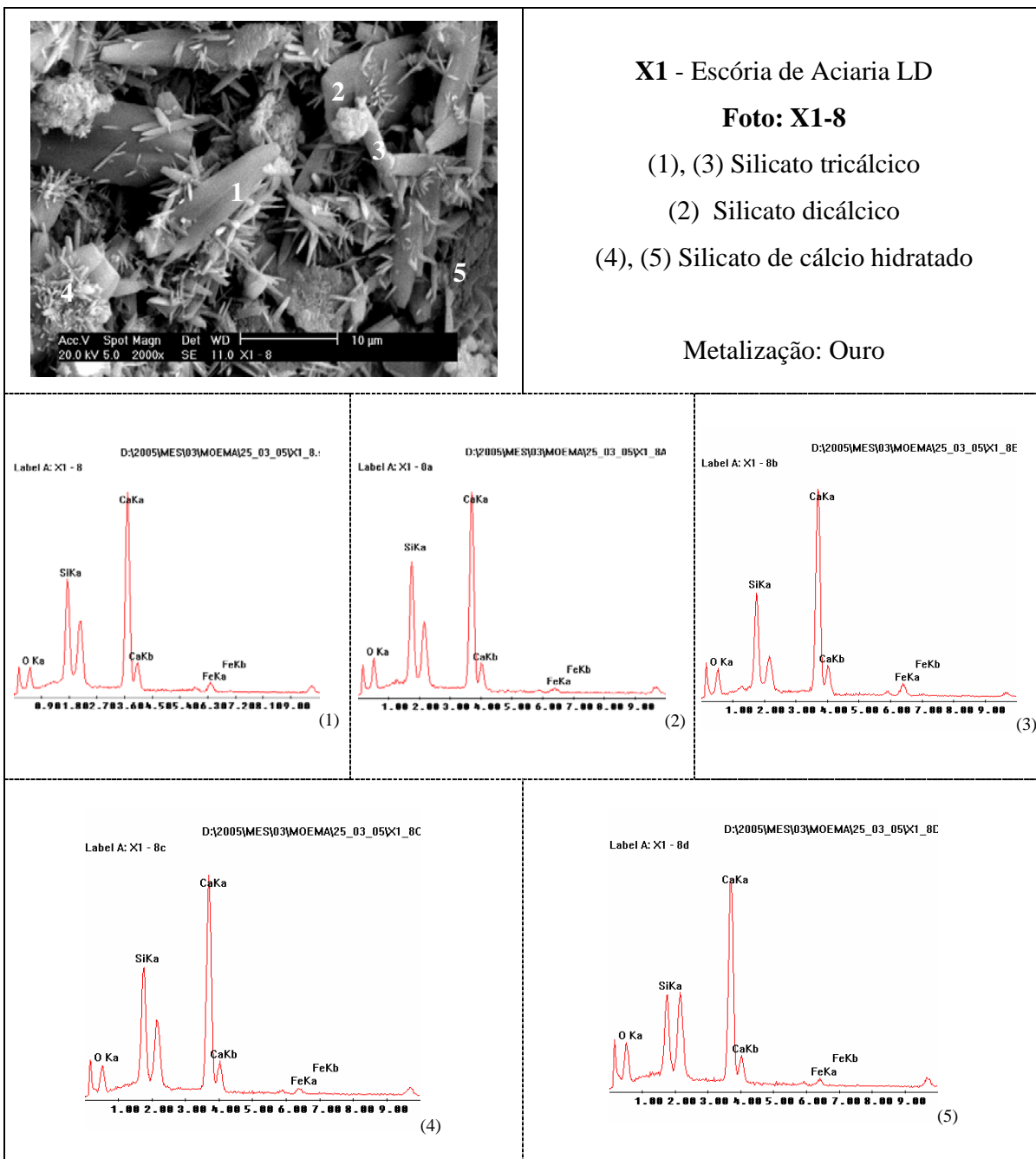
5.1 Amostra X1 (Externa)

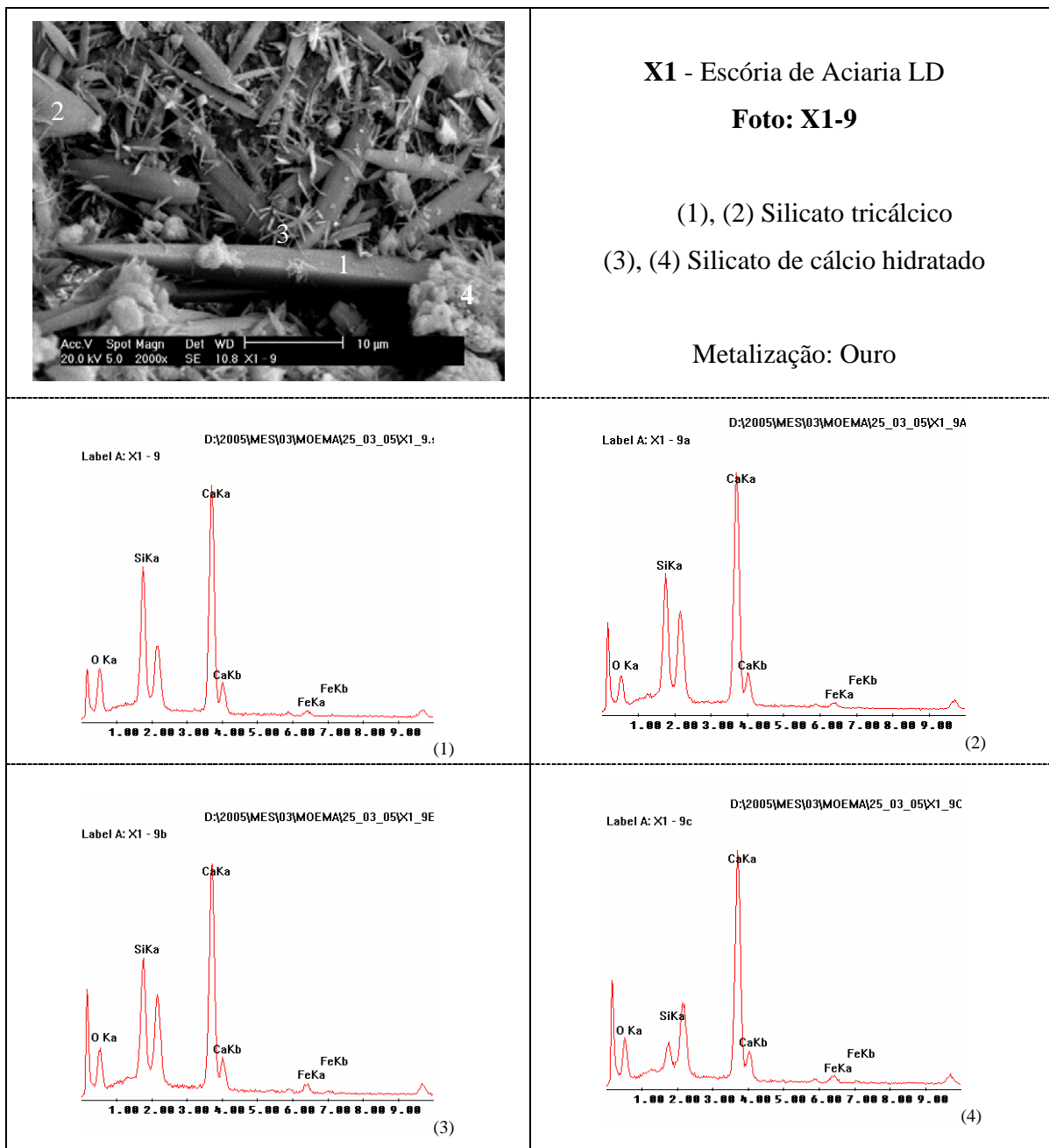
	<p>X1 - Escória de Aciaria LD Foto: X1-1</p> <p>1) Portlandita</p> <p>Metalização: Ouro</p>	
		
	<p>X1 - Escória de Aciaria LD Foto: X1-2</p> <p>(1), (2), (3) Portlandita</p> <p>Metalização: Ouro</p>	
 <p>(1)</p>	 <p>(2)</p>	 <p>(3)</p>

	<p>X1 - Escória de Aciaria LD Foto: X1-3</p> <p>(1), (2) Portlandita</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	
	<p>X1 - Escória de Aciaria LD Foto: X1-4</p> <p>1) Portlandita 2) Silicato de cálcio hidratado</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	

	<p>X1 - Escória de Aciaria LD</p> <p>Foto: X1-5</p> <p>(1) Portlandita</p> <p>Metalização: Ouro</p>	
<p>Label A: X1 - 5</p> 		
	<p>X1 - Escória de Aciaria LD</p> <p>Foto: X1-6</p> <p>1) Silicato dicálcico</p> <p>(2), (3) Silicato tricálcico</p> <p>Metalização: Ouro</p>	
<p>Label A: X1 - 6</p>  <p>(1)</p>	<p>Label A: X1 - 6a</p>  <p>(2)</p>	<p>Label A: X1 - 6b</p>  <p>(3)</p>

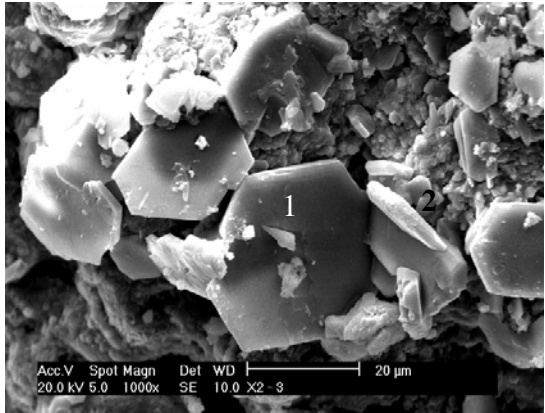
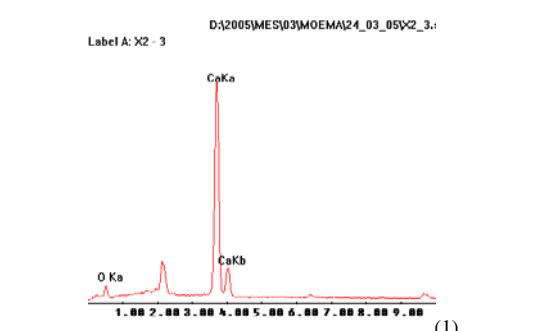
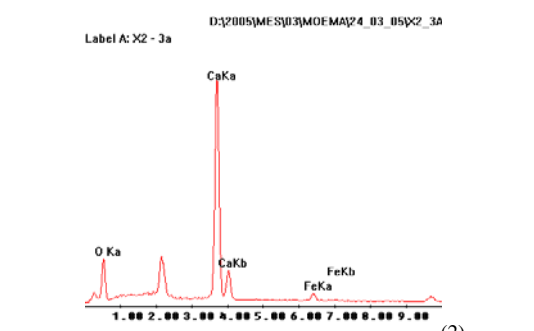
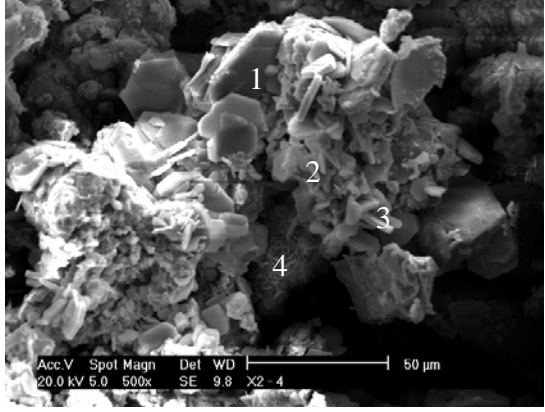
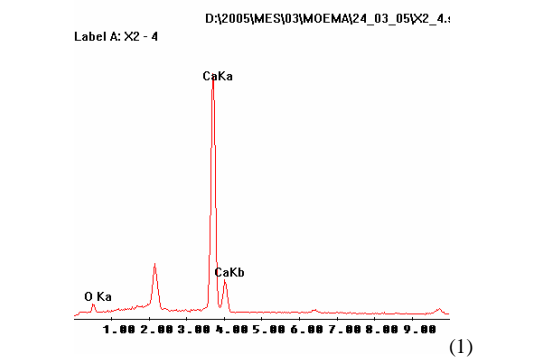
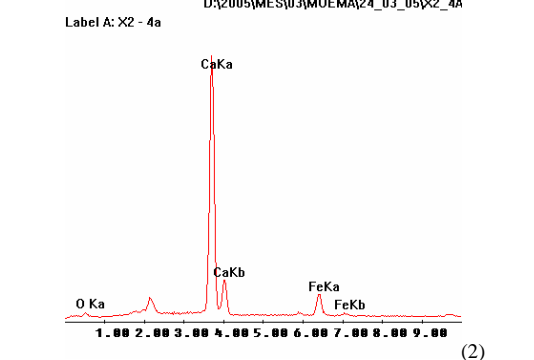


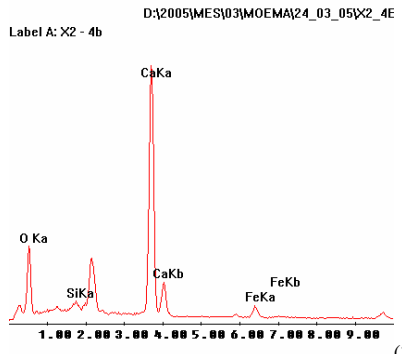
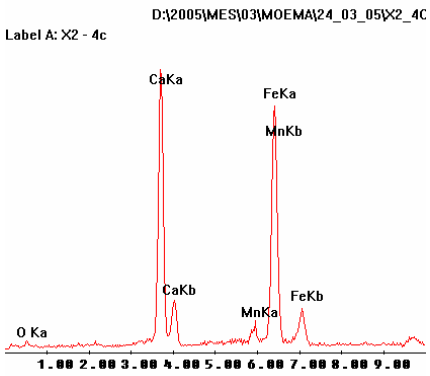
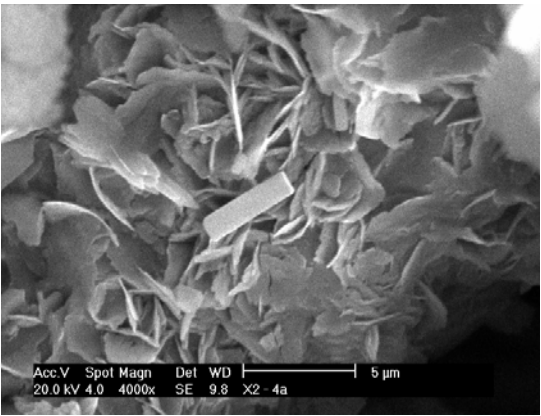
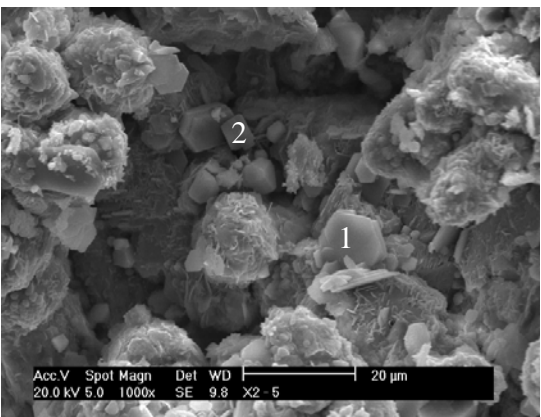
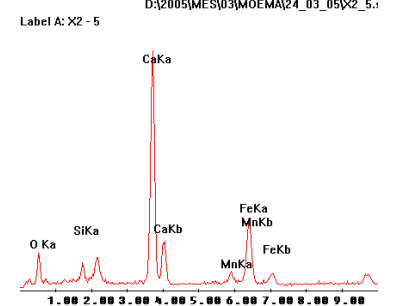
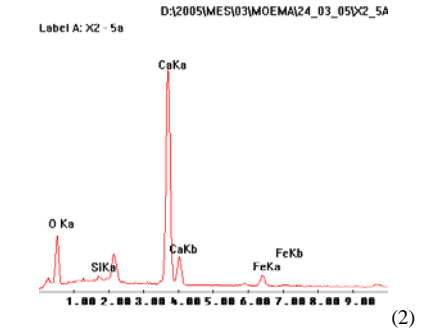


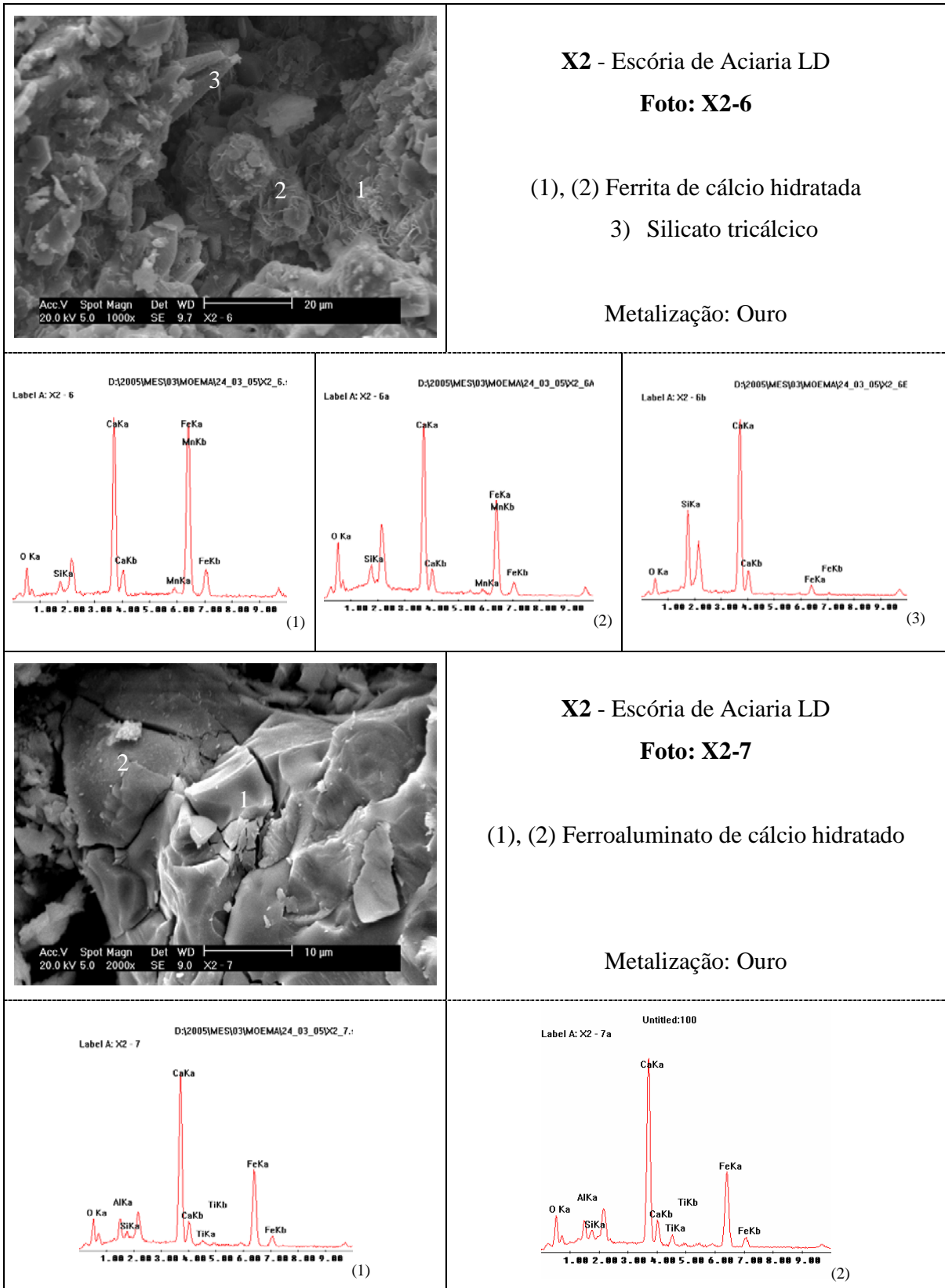


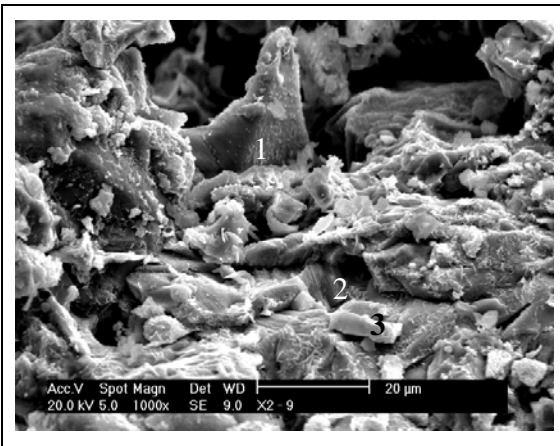
5.2 Amostra X2 (Interna)

	<p>X2 - Escória de Aciaria LD Foto: X2-1</p> <p>(1), (2), (3) Portlandita</p> <p>Metalização: Ouro</p>	
	<p>X2 - Escória de Aciaria LD Foto: X2-2</p> <p>(1), (3) Carbonato de cálcio 2) Portlandita</p> <p>Metalização: Ouro</p>	

	<p>X2 - Escória de Aciaria LD Foto: X2-3</p> <p>(1) (2) Portlandita</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	
	<p>X2 - Escória de Aciaria LD Foto: X2-4</p> <p>(1), (3) Portlandita (2), (4) Ferrita de cálcio hidratada</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	

 <p>Label A: X2 - 4b D:\2005\MES\03\MOEMA\24_03_05\X2_4E</p> <p>(3)</p>	 <p>Label A: X2 - 4c D:\2005\MES\03\MOEMA\24_03_05\X2_4C</p> <p>(4)</p>
 <p>Acc.V Spot Magn Det WD 5 µm 20.0 kV 4.0 4000x SE 9.8 X2 - 4a</p>	<p>X2 - Escória de Aciaria LD Foto: X2-4a Detalhe de X2-4 (4)</p> <p>Metalização: Ouro</p>
 <p>Acc.V Spot Magn Det WD 20 µm 20.0 kV 5.0 1000x SE 9.8 X2 - 5</p>	<p>X2 - Escória de Aciaria LD Foto: X2-5</p> <p>1) Ferrita de cálcio hidratada 2) Portlandita</p> <p>Metalização: Ouro</p>
 <p>Label A: X2 - 5 D:\2005\MES\03\MOEMA\24_03_05\X2_5:</p> <p>(1)</p>	 <p>Label A: X2 - 5a D:\2005\MES\03\MOEMA\24_03_05\X2_5A</p> <p>(2)</p>



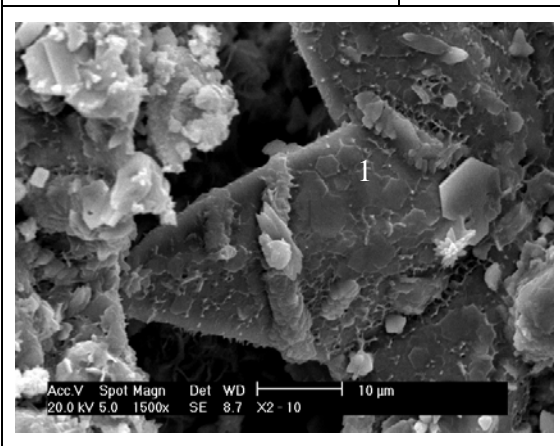
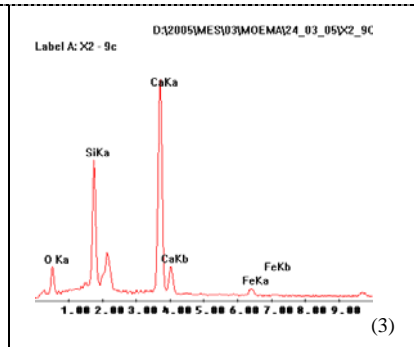
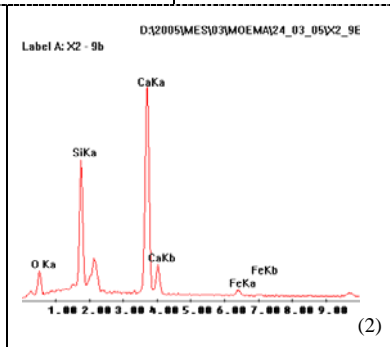
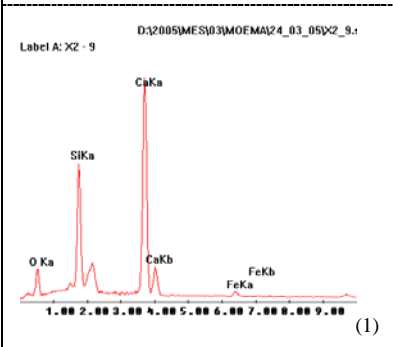


X2 - Escória de Aciaria LD

Foto: X2-9

- 1) Silicato tricálcico
- (2), (3) Silicato dicálcico

Metalização: Ouro

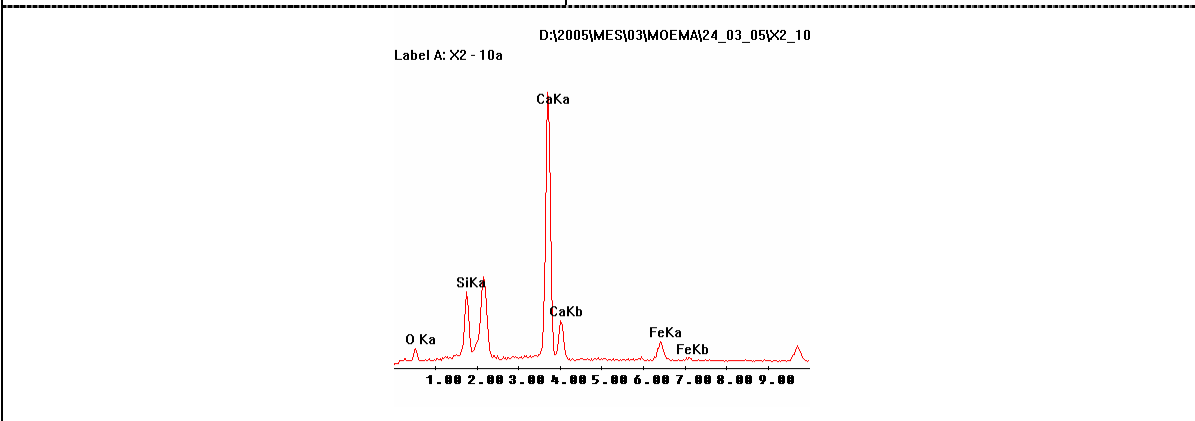


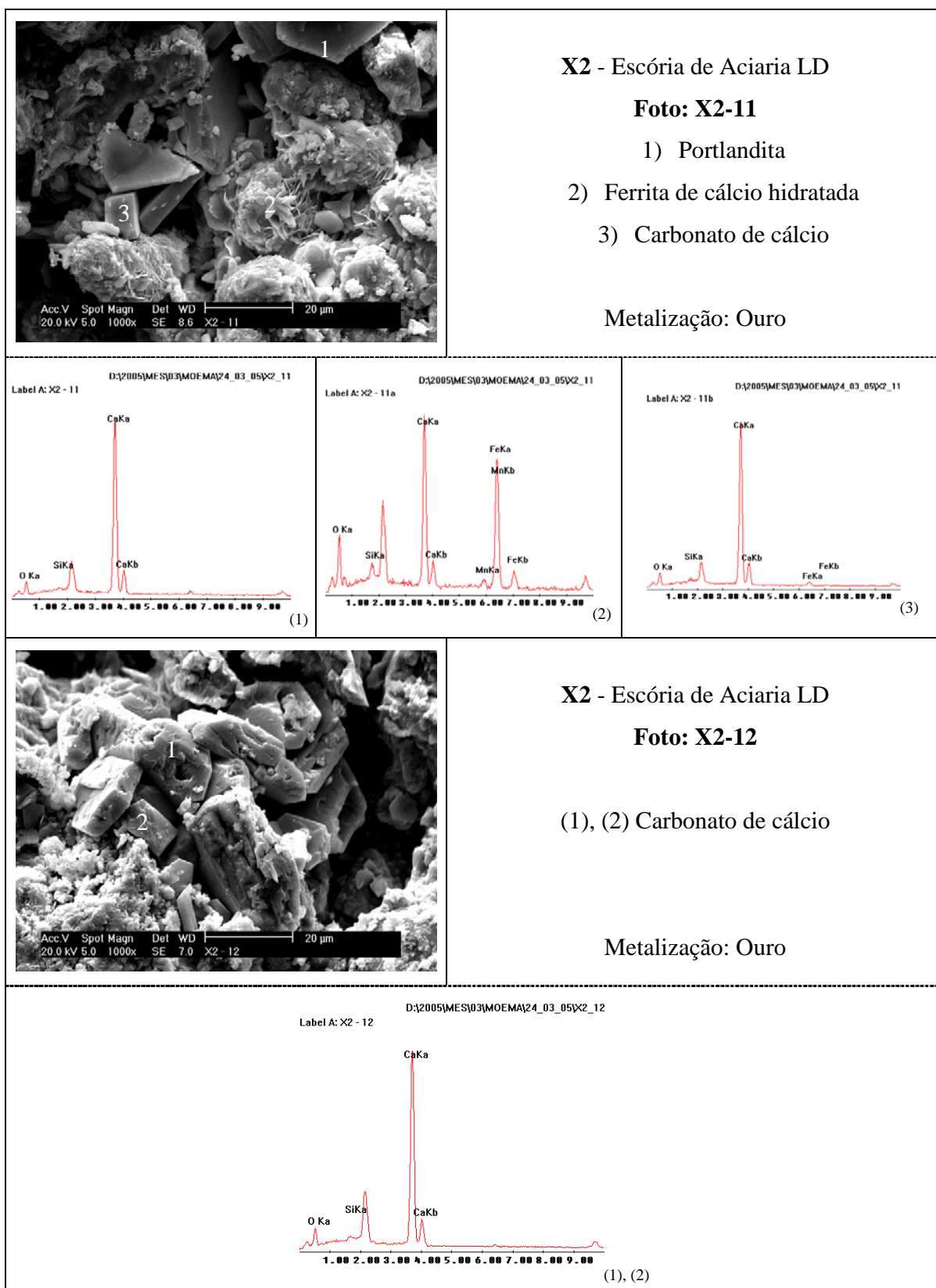
X2 - Escória de Aciaria LD

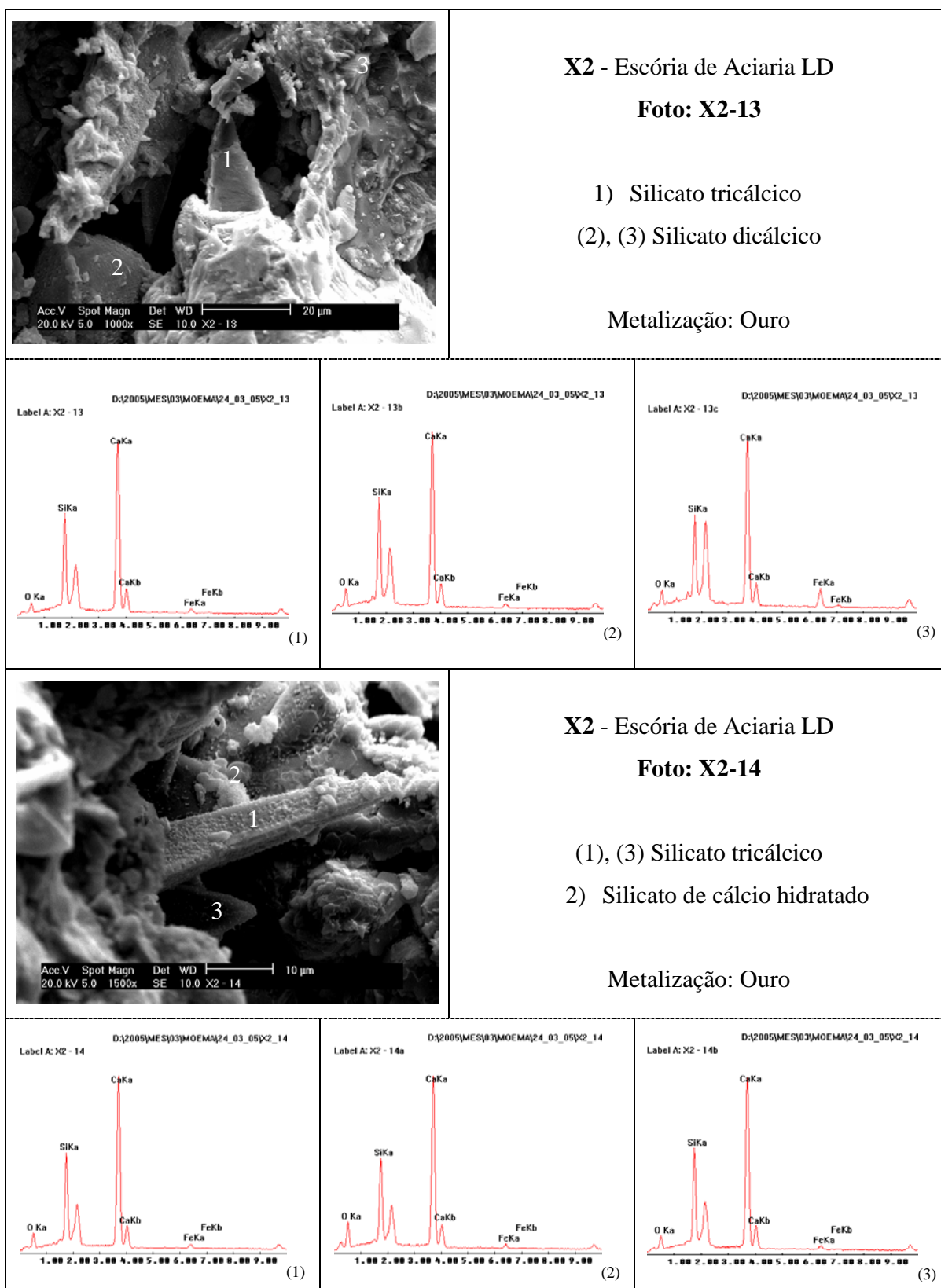
Foto: X2-10a

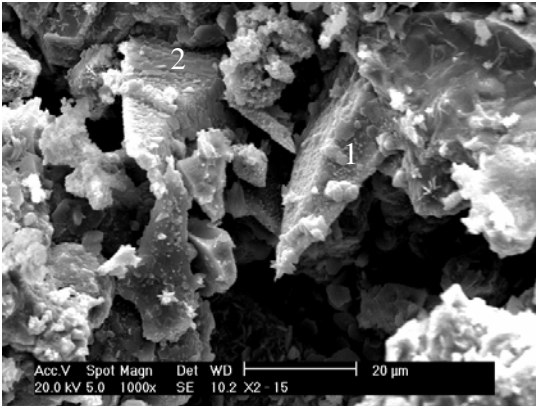
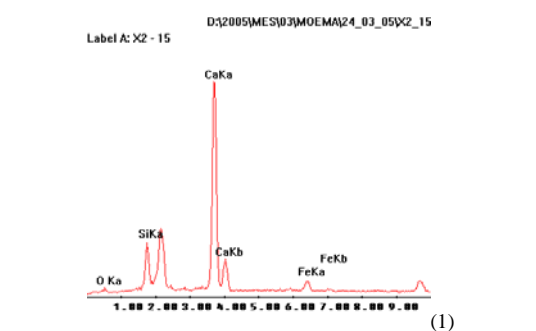
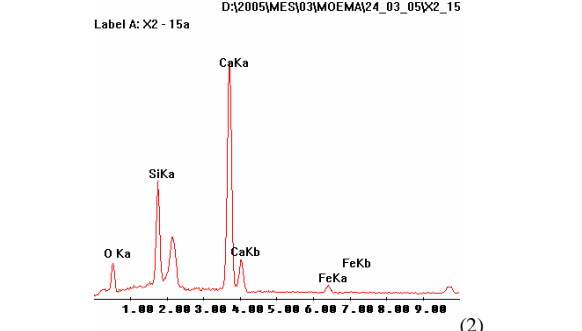
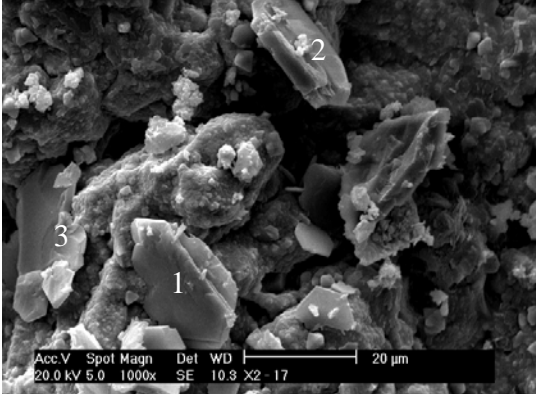
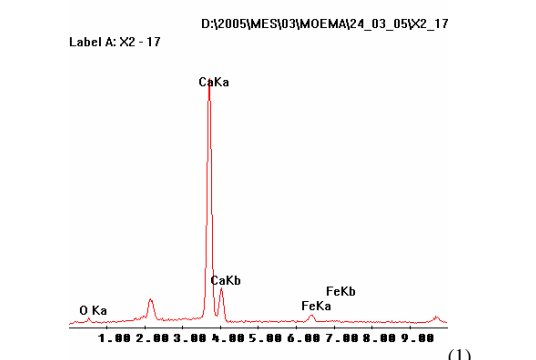
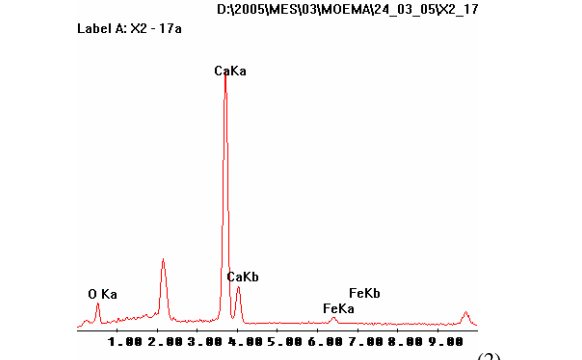
- 1) Silicato tricálcico com placas de portlandita

Metalização: Ouro



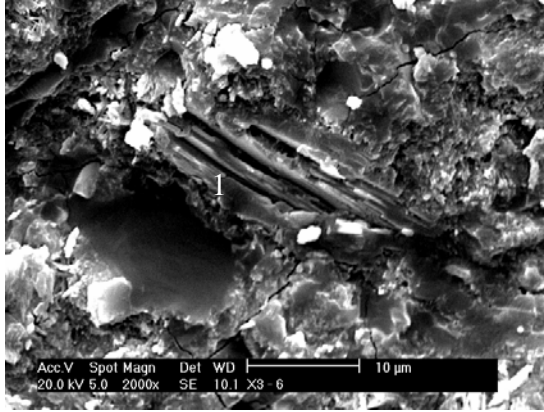
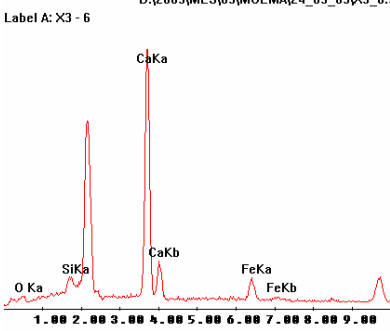
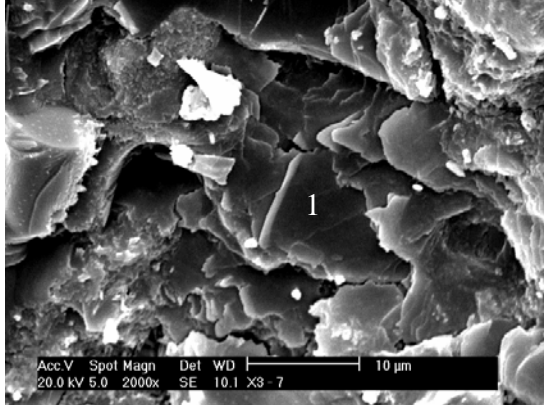
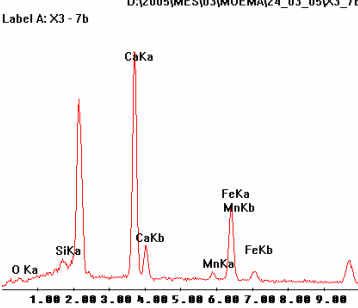


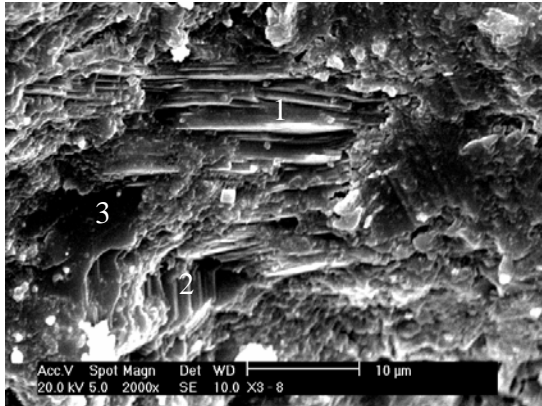
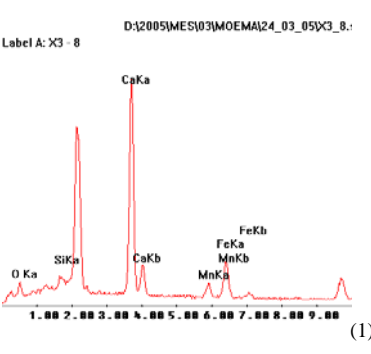
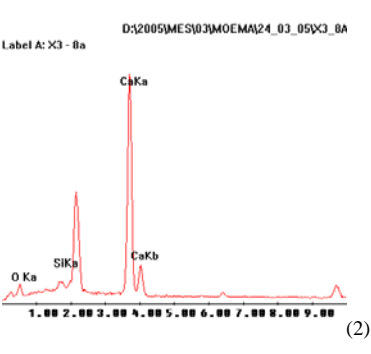
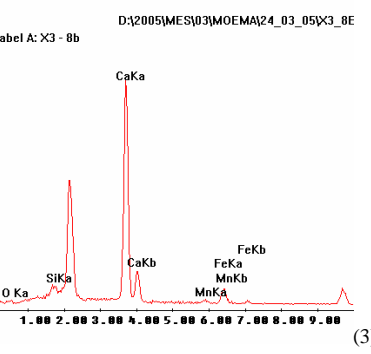
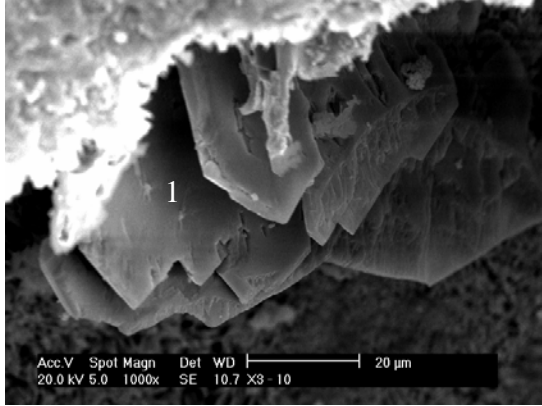
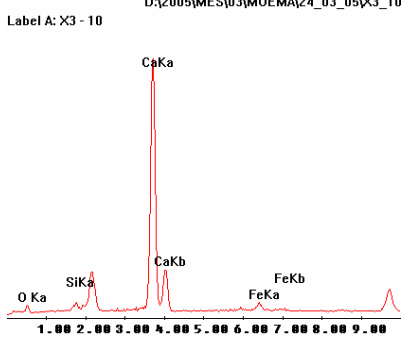


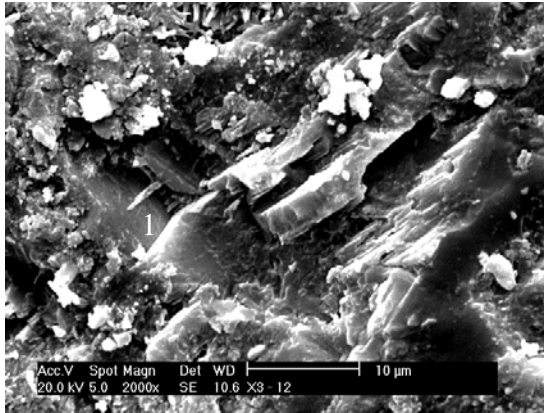
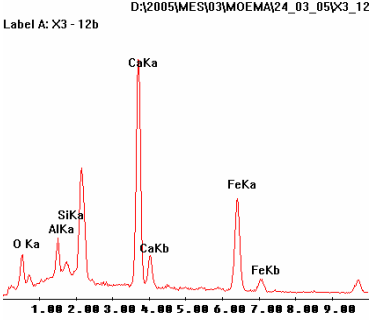
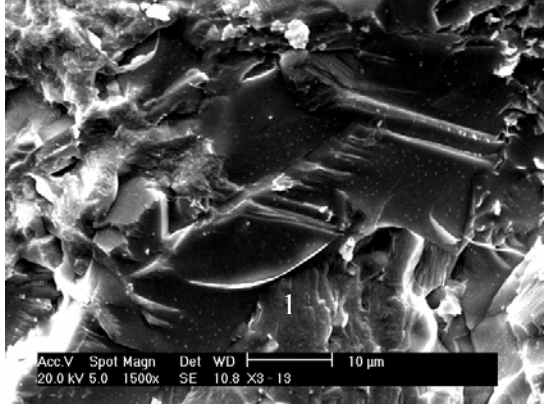
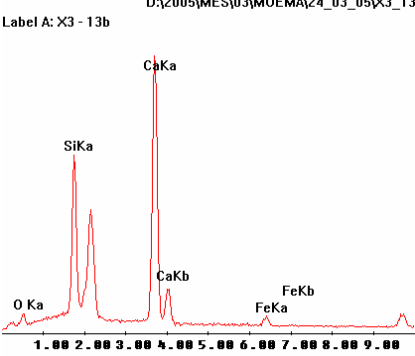
	<p>X2 - Escória de Aciaria LD</p> <p>Foto: X2-15</p> <p>1) Silicato tricálcico com placa de portlandita 2) Silicato tricálcico</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	
	<p>X2 - Escória de Aciaria LD</p> <p>Foto: X2-17</p> <p>(1), (2), (3) Carbonato de cálcio</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	

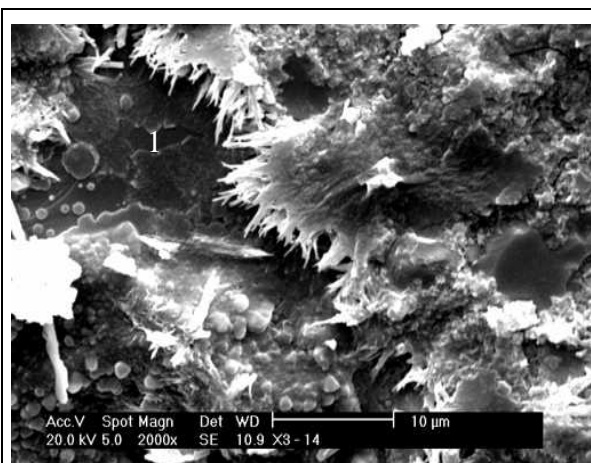
5.3 Amostra X3 (Interna)

	<p>X3 - Escória de Aciaria LD Foto: X3-3 Dentro de um poro</p> <p>Silicato de cálcio hidratado</p> <p>Metalização: Ouro</p>
<p style="text-align: center;">D:\2005\MES\03\MOEMA\24_03_05\X3_3:</p> <p style="text-align: center;">Label A: X3 - 3</p>	
	<p>X3 - Escória de Aciaria LD Foto: X3-5</p> <p>1) MgO em solução sólida</p> <p>Metalização: Ouro</p>
<p style="text-align: center;">D:\2005\MES\03\MOEMA\24_03_05\X3_5:</p> <p style="text-align: center;">Label A: X3 - 5</p>	

	<p>X3 - Escória de Aciaria LD Foto: X3-6</p> <p>1) Portlandita</p> <p>Metalização: Ouro</p>
<p>Label A: X3 - 6 D:\2005\MES\03\MOEMA\24_03_05\X3_6:</p> 	
	<p>X3 - Escória de Aciaria LD Foto: X3-7</p> <p>1) Ferrita de cálcio hidratada</p> <p>Metalização: Ouro</p>
<p>Label A: X3 - 7b D:\2005\MES\03\MOEMA\24_03_05\X3_7E</p> 	

	<p>X3 - Escória de Aciaria LD Foto: X3-8</p> <p>1) Ferrita de cálcio (2), (3) Portlandita</p> <p>Metalização: Ouro</p>	
		
	<p>X3 - Escória de Aciaria LD Foto: X3-10</p> <p>1) Portlandita</p> <p>Metalização: Ouro</p>	
		

	<p>X3 - Escória de Aciaria LD Foto: X3-12</p> <p>1) Ferroaluminato de cálcio hidratado</p> <p>Metalização: Ouro</p>
<p>Label A: X3 - 12b</p> 	
	<p>X3 - Escória de Aciaria LD Foto: X3-13</p> <p>1) Silicato de cálcio hidratado</p> <p>Metalização: Ouro</p>
<p>Label A: X3 - 13b</p> 	

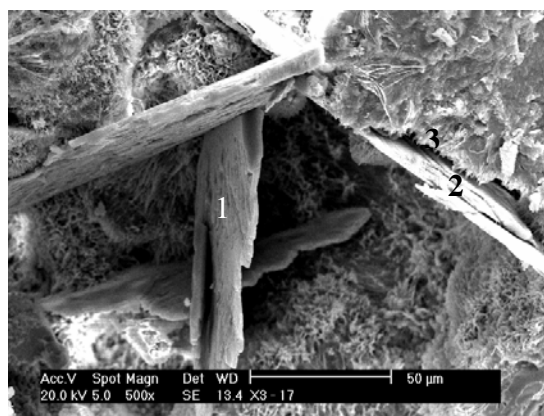
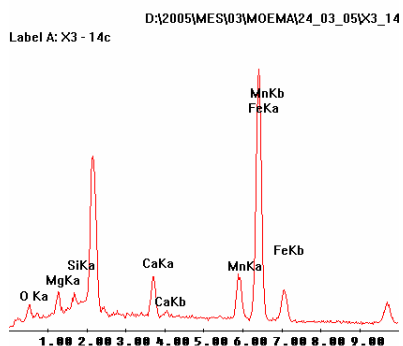


X3 - Escória de Aciaria LD

Foto: X3-14

1) MgO em solução sólida

Metalização: Ouro



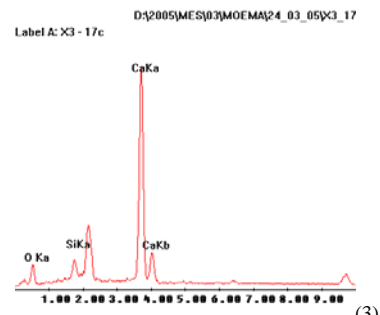
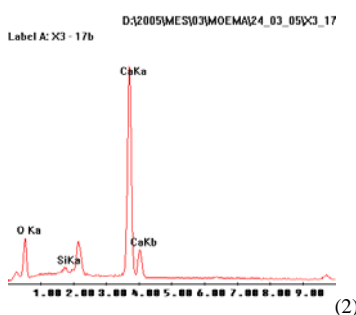
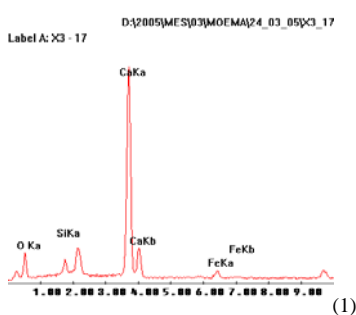
X3 - Escória de Aciaria LD

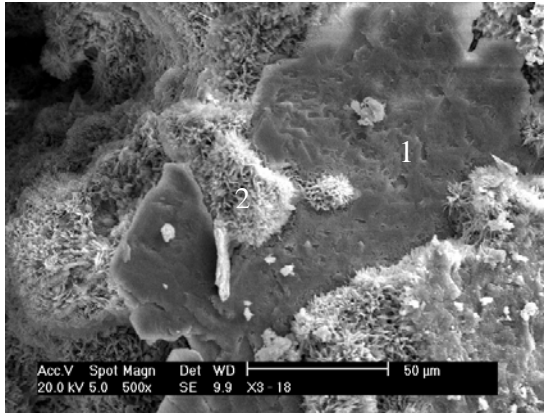
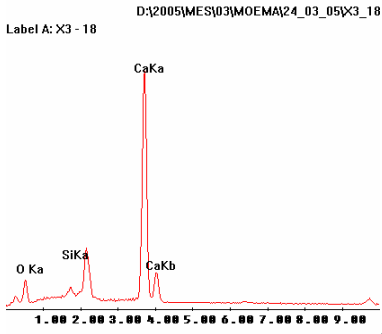
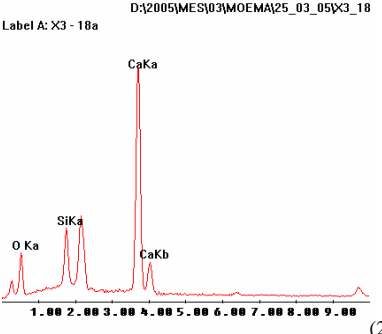
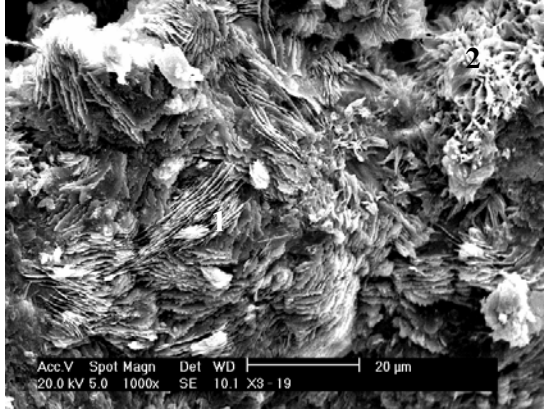
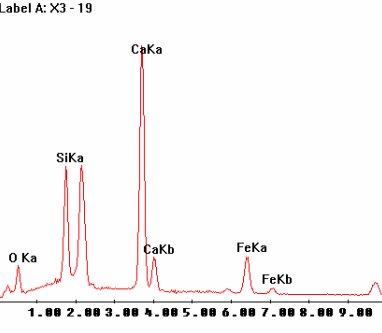
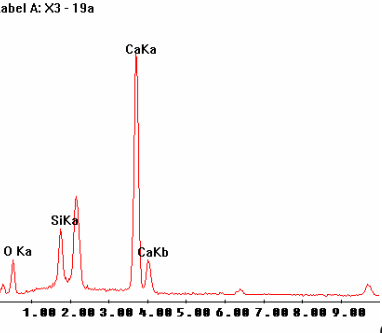
Foto: X3-17

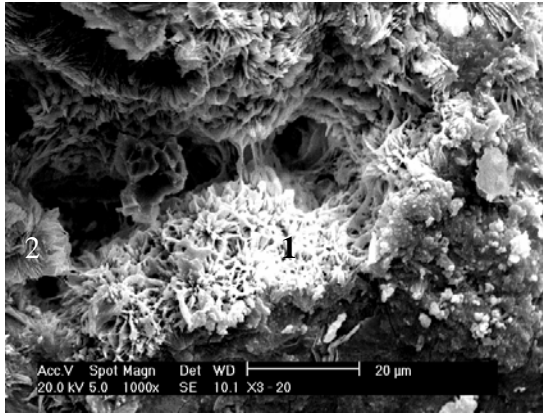
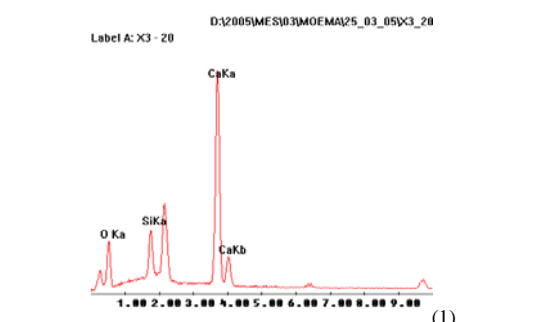
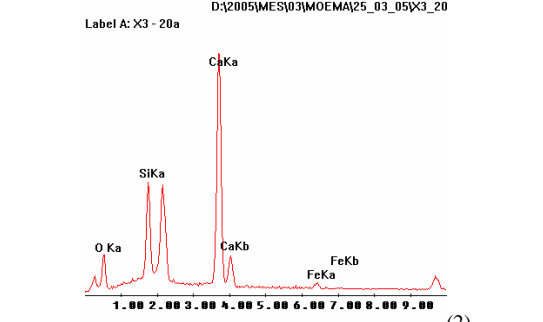
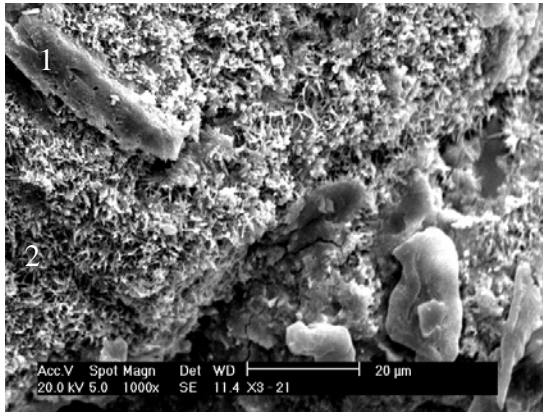
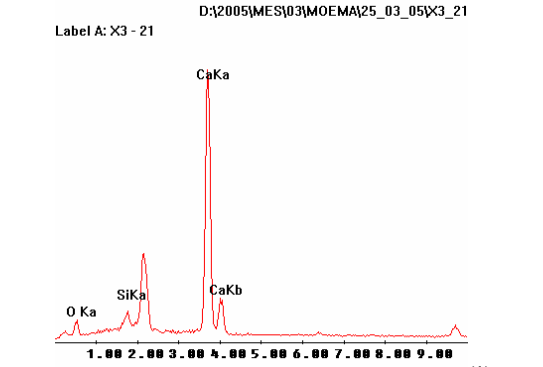
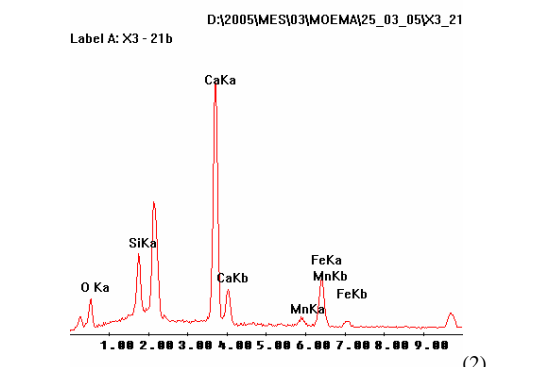
(1), (2) Portlandita

3) Silicato de cálcio hidratado

Metalização: Ouro

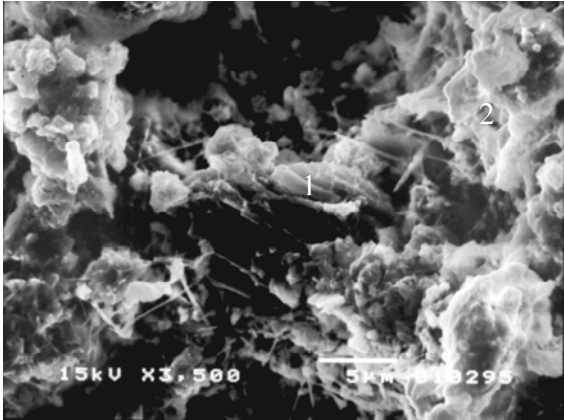
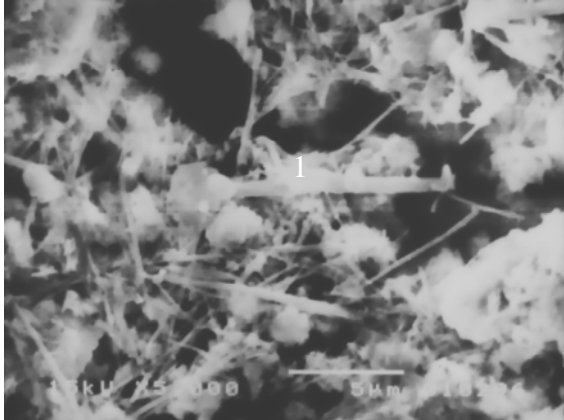
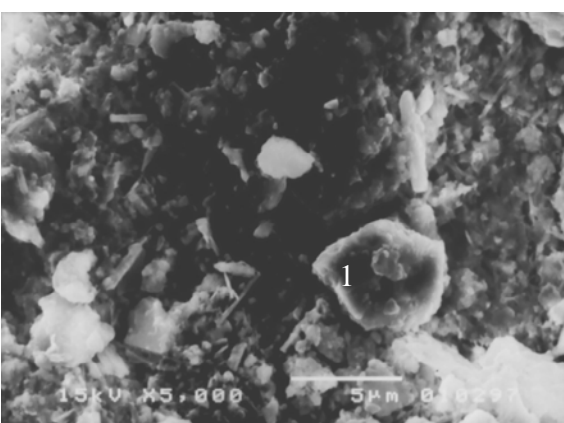


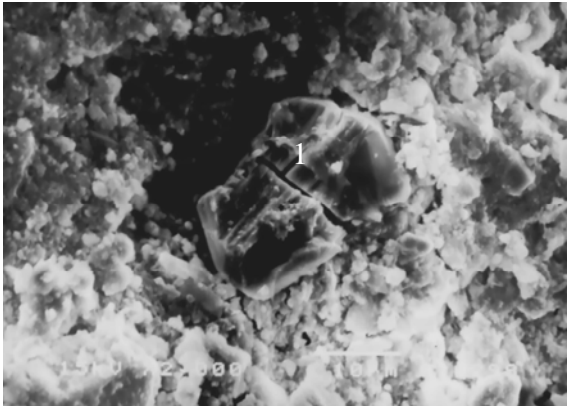
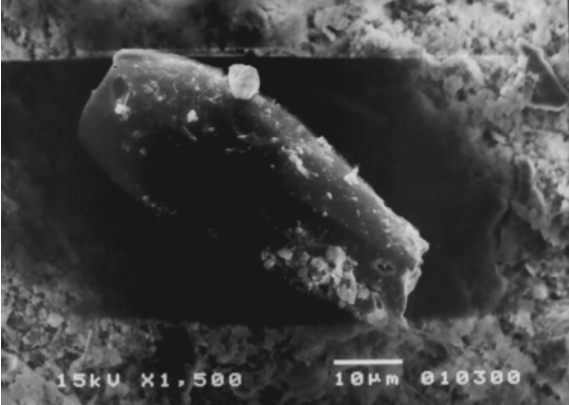

	<p>X3 - Escória de Aciaria LD Foto: X3-18</p> <p>1) Portlandita 2) Silicato de cálcio hidratado</p> <p>Metalização: Ouro</p>
<p>Label A: X3 - 18</p>  <p>(1)</p>	<p>Label A: X3 - 18a</p>  <p>(2)</p>
	<p>X3 - Escória de Aciaria LD Foto: X3-19</p> <p>1) Ferrosilicato de cálcio 2) Silicato de cálcio hidratado</p> <p>Metalização: Ouro</p>
<p>Label A: X3 - 19</p>  <p>(1)</p>	<p>Label A: X3 - 19a</p>  <p>(2)</p>

	<p>X3 - Escória de Aciaria LD Foto: X3-20</p> <p>(1), (2) Silicato de cálcio hidratado</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	
	<p>X3 - Escória de Aciaria LD Foto: X3-21</p> <p>1) Carbonato de cálcio 2) Ferrosilicato de cálcio</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	

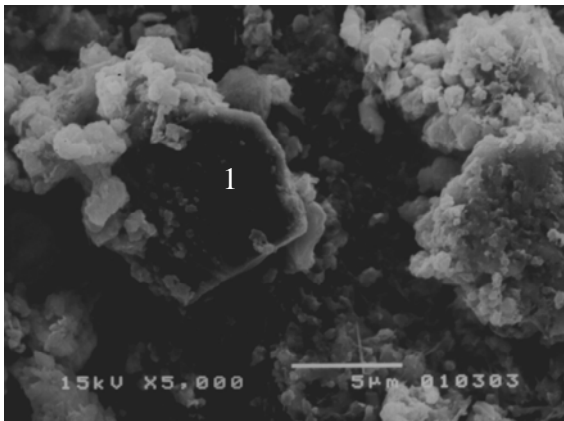
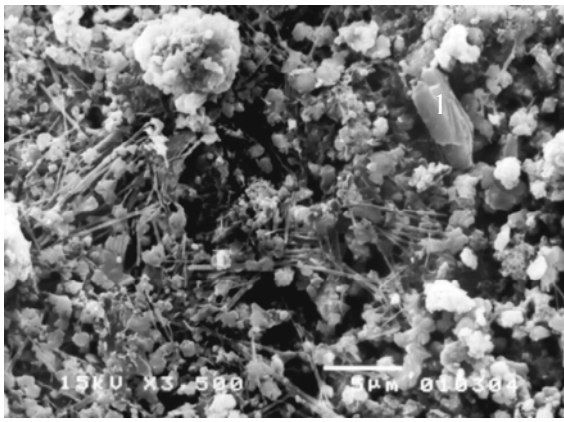
6 AMOSTRA C - MEV

6.1 Amostra C1 (Externa)

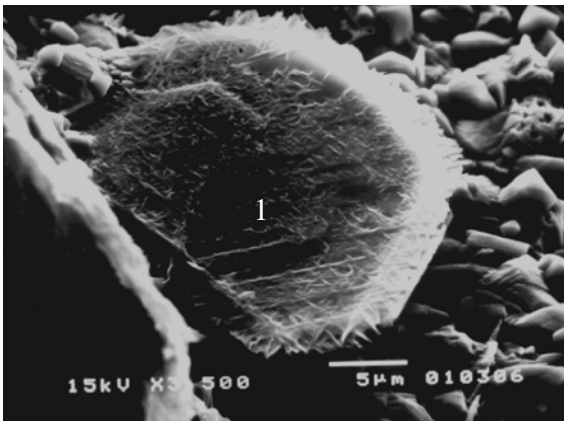
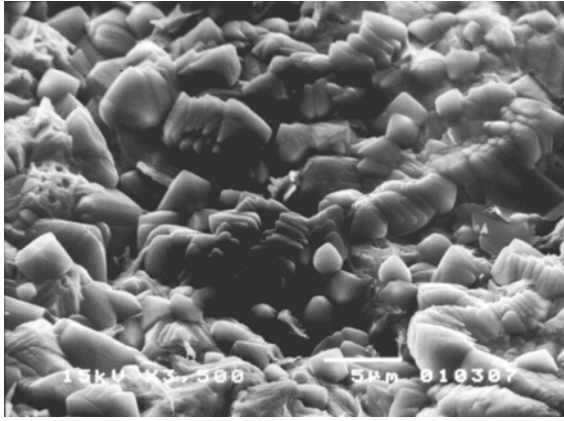
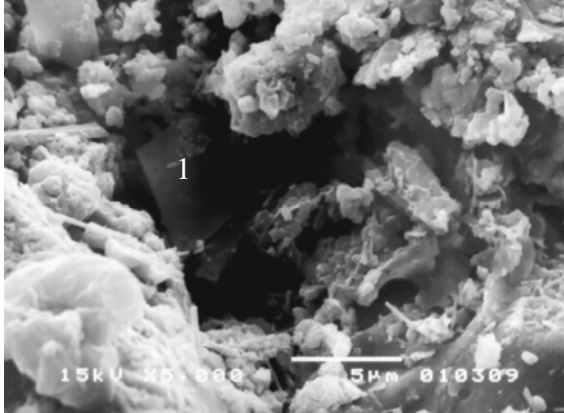
	<p>C1 - Escória de Aciaria Elétrica Foto: 10295</p> <p>1) Portlandita 2) Silicato dicálcico</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	<p>C1 - Escória de Aciaria Elétrica Foto: 10296</p> <p>Ferrita de cálcio hidratada</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	<p>C1 - Escória de Aciaria Elétrica Foto: 10297</p> <p>1) MgO em solução sólida</p> <p>Metalização: Ouro</p>

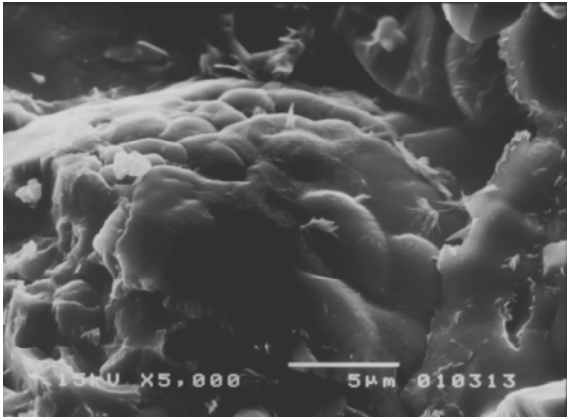
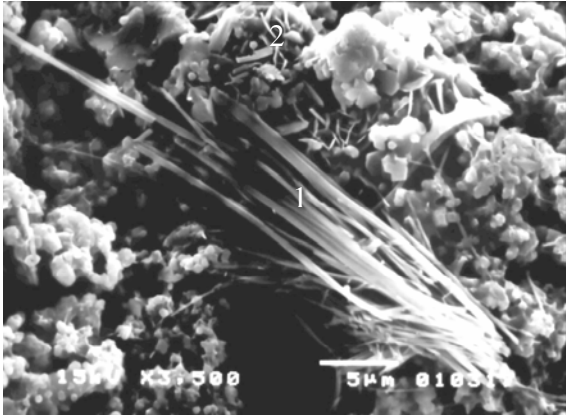

 <p>15kV X2,500 10µm 010298</p>	<p>C1 - Escória de Aciaria Elétrica Foto: 10298</p> <p>1) MgO em solução sólida</p> <p>Metalização: Ouro</p>
 <p>15kV X1,500 10µm 010300</p>	<p>C1 - Escória de Aciaria Elétrica Foto: 10300</p> <p>Silicato dicálcico</p> <p>Metalização: Ouro</p>
 <p>15kV X3,500 5µm 010301</p>	<p>C1 - Escória de Aciaria Elétrica Foto: 10301</p> <p>1) Sílica</p> <p>Metalização: Ouro</p>

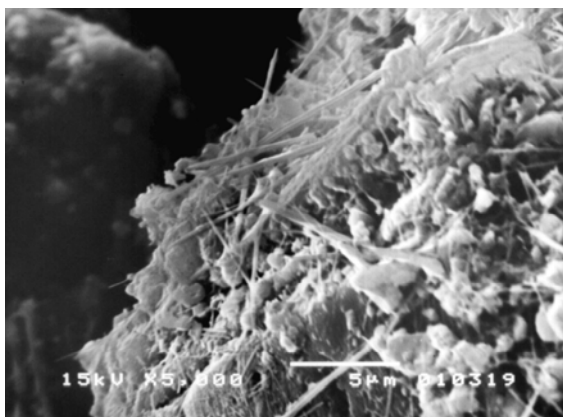
6.2 Amostra C2 (Externa)

 <p>15kV X5,000 5µm 010303</p> <p>A scanning electron micrograph (SEM) showing a dark, angular mineral particle labeled '1' surrounded by a lighter, porous slag matrix. The image includes technical data: 15kV, X5,000 magnification, and a 5µm scale bar.</p>	<p>C2 - Escória de Aciaria Elétrica Foto: 10303</p> <p>1) Minério de ferro</p> <p>Metalização: Ouro</p>
 <p>15kV X3,500 5µm 010304</p> <p>A scanning electron micrograph (SEM) showing a complex, porous slag structure with a mineral particle labeled '1' highlighted. The image includes technical data: 15kV, X3,500 magnification, and a 5µm scale bar.</p>	<p>C2 - Escória de Aciaria Elétrica Foto: 10304</p> <p>1) Carbonato de Cálcio</p> <p>Metalização: Ouro</p>

6.3 Amostra C3 (Interna)

	<p>C3 - Escória de Aciaria Elétrica Foto: 10306</p> <p>1) Carbonato de cálcio</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	<p>C3 - Escória de Aciaria Elétrica Foto: 10307</p> <p>Carbonato de cálcio:</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	<p>C3 - Escória de Aciaria Elétrica Foto: 10309</p> <p>1) Ferrita de cálcio hidratada</p> <p>Metalização: Ouro</p>

 <p>15kV X5,000 5µm 010313</p>	<p>C3 - Escória de Aciaria Elétrica Foto: 10313</p> <p>Silicato dicálcico</p> <p>Metalização: Ouro</p>
 <p>15kV X5,000 5µm 010317</p>	<p>C3 - Escória de Aciaria Elétrica Foto: 10317</p> <p>1) Etringita 2) Carbonato de cálcio</p> <p>Metalização: Ouro</p>
 <p>15kV X750 10µm 010318</p>	<p>C3 - Escória de Aciaria Elétrica Foto: 10318</p> <p>1) Etringita</p> <p>Metalização: Ouro</p>

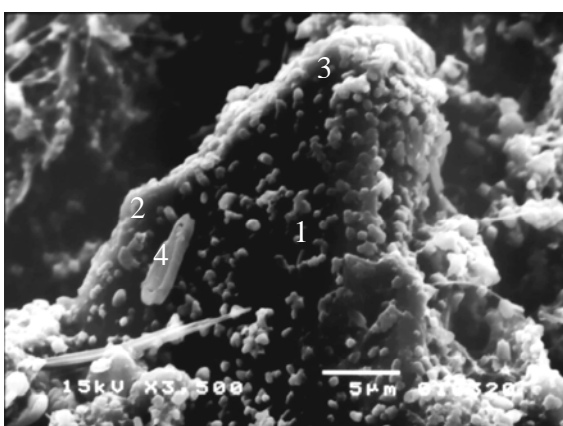


C3 - Escória de Aciaria Elétrica

Foto: 10319

Etringita

Metalização: Ouro



C3 - Escória de Aciaria Elétrica

Foto: 10320

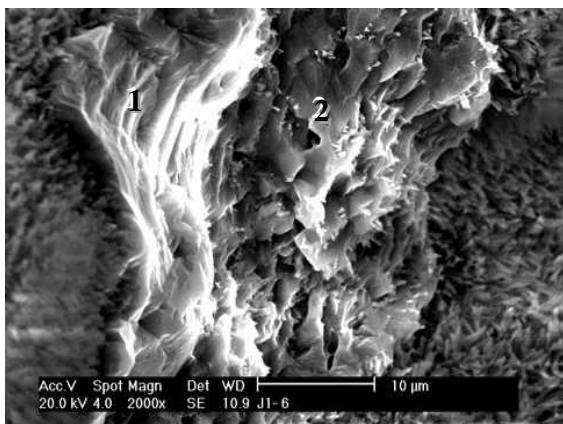
(1), (2), (3), (4) Carbonato de cálcio

Metalização: Ouro

7 AMOSTRA J – MEV

7.1 Amostra J1 (Externa)

	<p>J1 - Escória de Aciaria EAF</p> <p>Foto: J1-4</p> <p>Carbonato de cálcio</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	<p>J1 - Escória de Aciaria EAF</p> <p>Foto: J1-5</p> <p>1) Portlandita</p> <p>Metalização: Ouro</p>

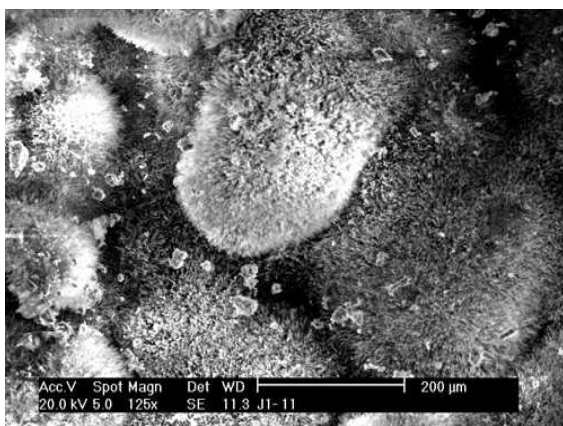
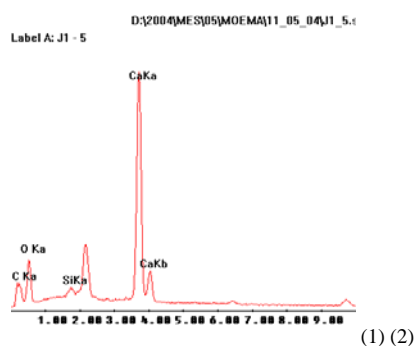


J1 - Escória de Aciaria EAF

Foto: J1-6

(1) (2) Portlandita

Metalização: Ouro



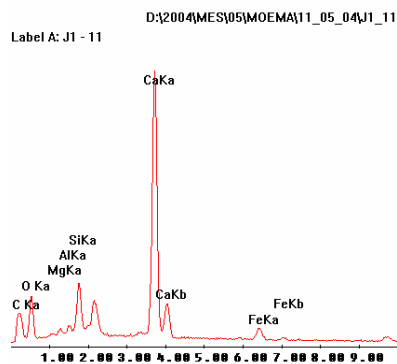
J1 - Escória de Aciaria EAF

Foto: J1-11

Esferas de agulhas

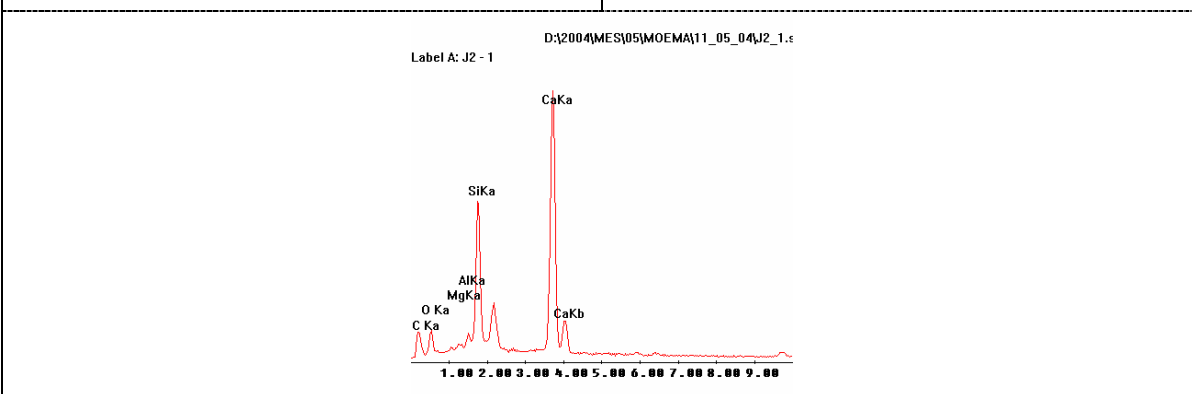
1) Carbonato de cálcio

Metalização: Ouro

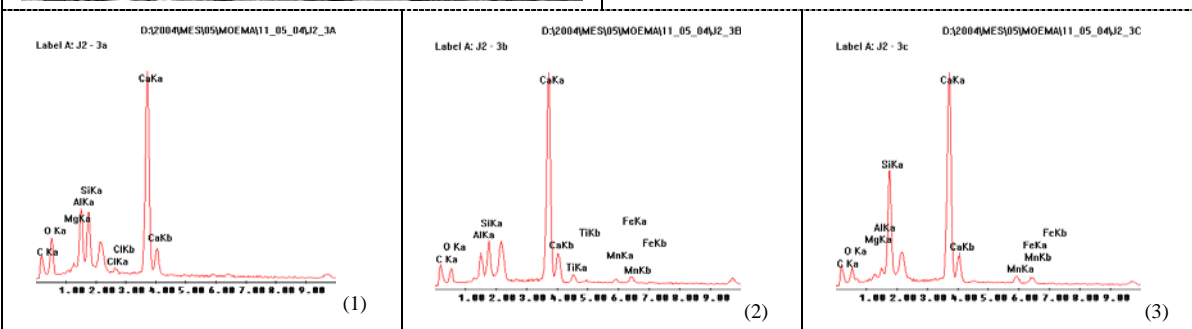


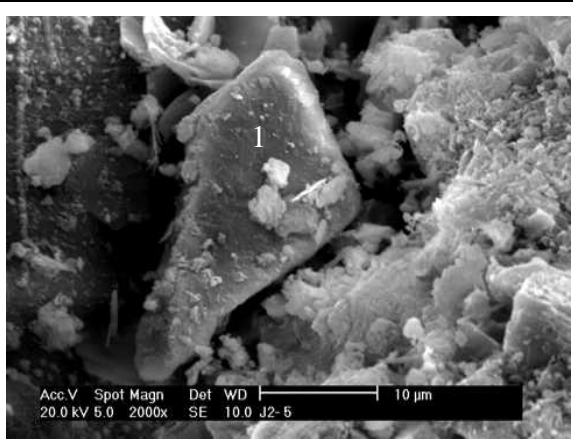
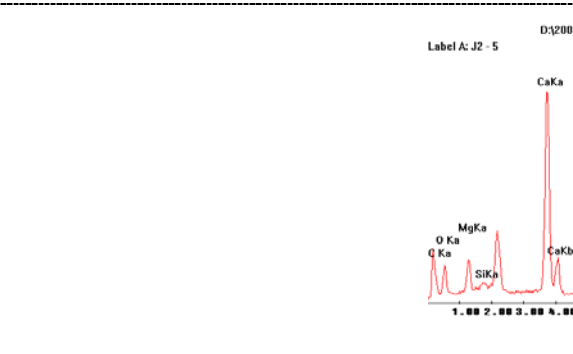
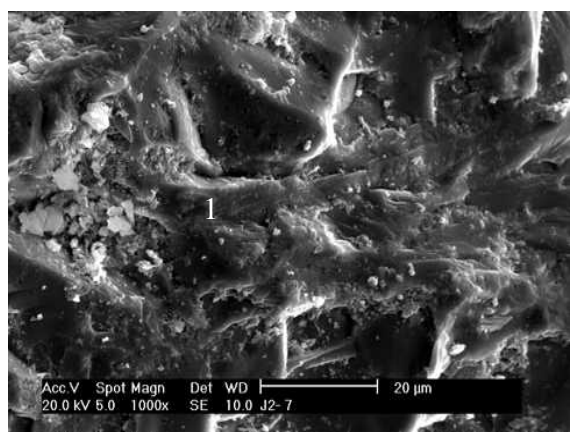
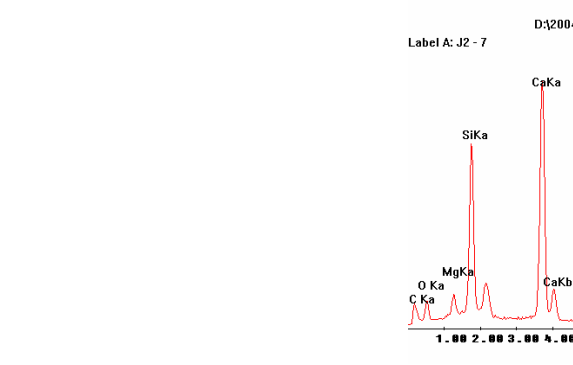
7.2 Amostra J2 (Interna)

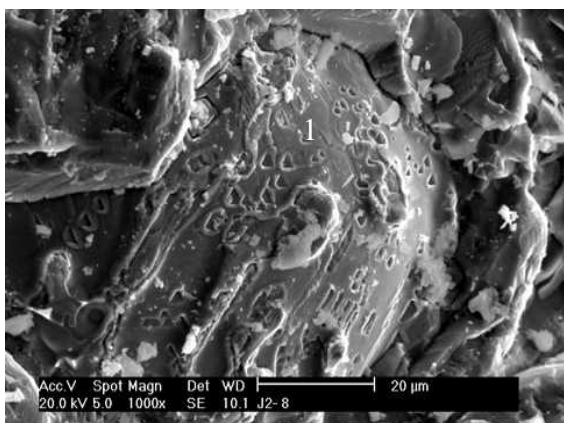
	<p>J2 - Escória de Aciaria EAF Foto: J2-1</p> <p>1) Silicato de cálcio hidratado</p> <p>Metalização: Ouro</p>
--	--



	<p>J2 - Escória de Aciaria EAF Foto: J2-3</p> <p>(1) (2) Gismondina 3) Silicato de cálcio hidratado</p> <p>Metalização: Ouro</p>
--	--



	<p>J2 - Escória de Aciaria EAF</p> <p>Foto: J2-5</p> <p>1) Ankerite</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	
	<p>J2 - Escória de Aciaria EAF</p> <p>Foto: J2-7</p> <p>1) Silicato de cálcio hidratado</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	

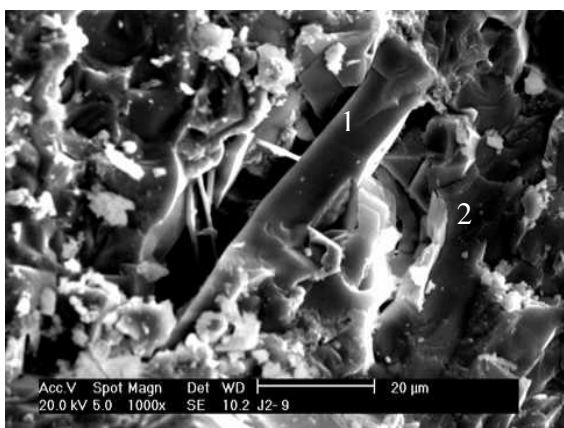
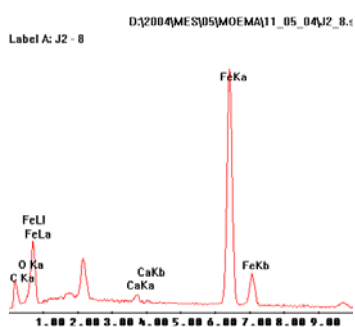


J2 - Escória de Aciaria EAF

Foto: J2-8

1) Minério de ferro

Metalização: Ouro

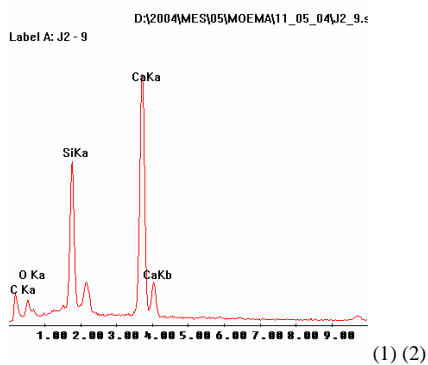


J2 - Escória de Aciaria EAF

Foto: J2-9

(1) (2) Silicato de dicálcico

Metalização: Ouro



(1) (2)

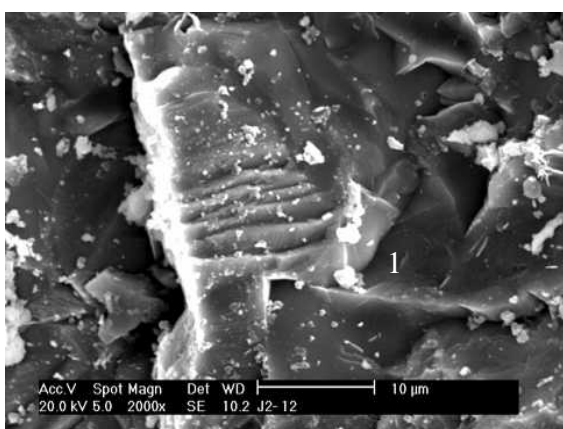
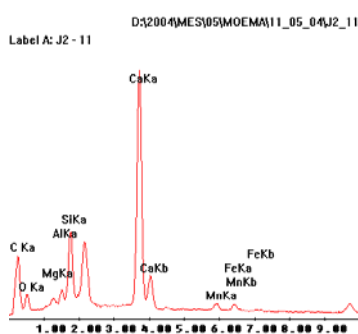


J2 - Escória de Aciaria EAF

Foto: J2-11

1) Silicato dicálcico

Metalização: Ouro

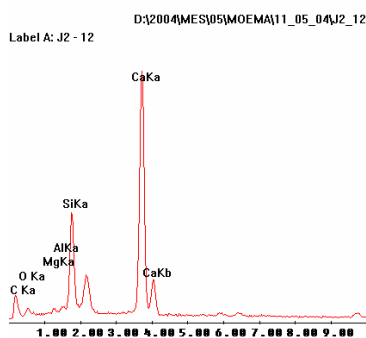


J2 - Escória de Aciaria EAF

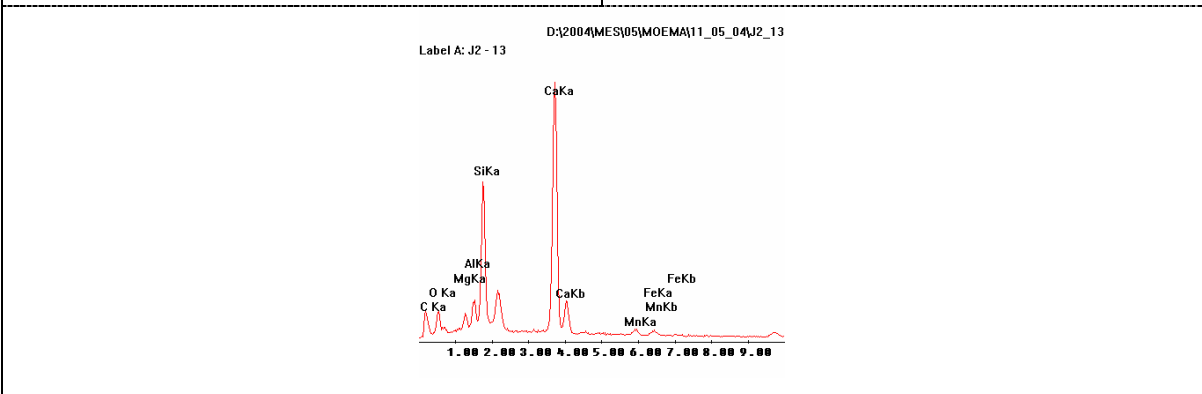
Foto: J2-12

1) Silicato de cálcio hidratado

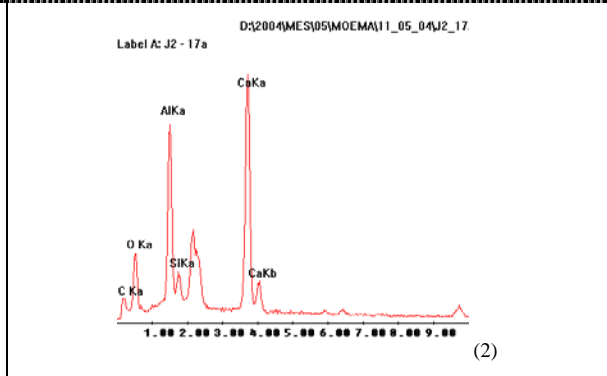
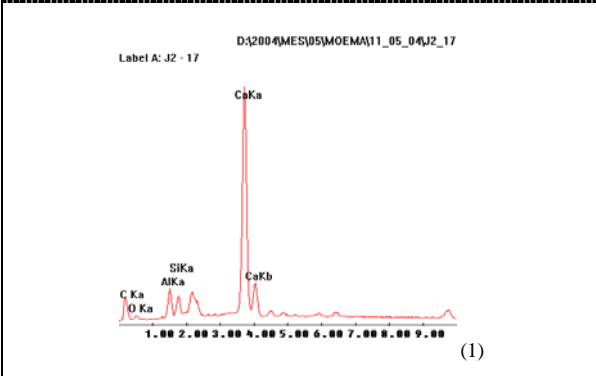
Metalização: Ouro

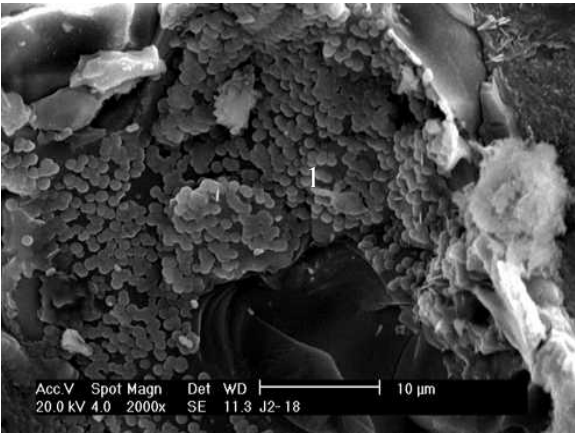
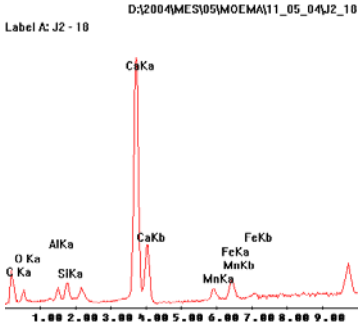

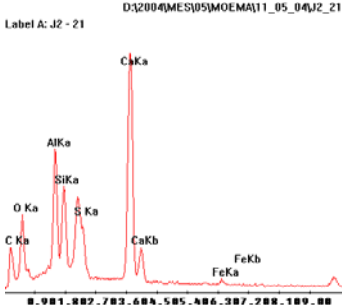


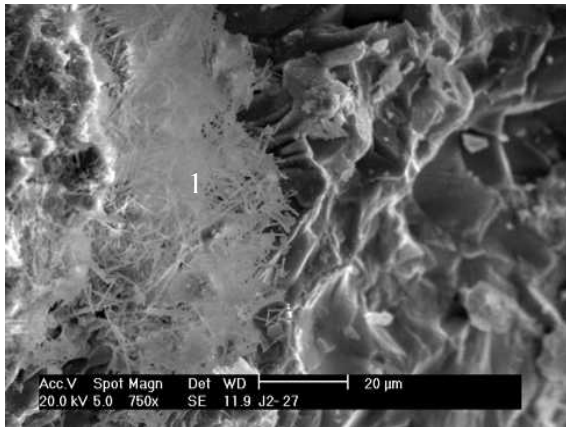
	<p>J2 - Escória de Aciaria EAF</p> <p>Foto: J2-13</p> <p>Silicato de cálcio hidratado</p> <p>Metalização: Ouro</p>
--	--



	<p>J2 - Escória de Aciaria EAF</p> <p>Foto: J2-17</p> <p>(1) (2) Aluminato de calcio</p> <p>Metalização: Ouro</p>
--	---



	<p>J2 - Escória de Aciaria EAF Foto: J2-18</p> <p>1) Carbonato de cálcio</p> <p>Metalização: Ouro</p>
<p>Label A: J2 - 18</p>  <p>D:\2004\MES\05\MOEMA\11_05_04\J2_18</p>	
	<p>J2 - Escória de Aciaria EAF Foto: J2-21</p> <p>1) Etringita</p> <p>Metalização: Ouro</p>
<p>Label A: J2 - 21</p>  <p>D:\2004\MES\05\MOEMA\11_05_04\J2_21</p>	

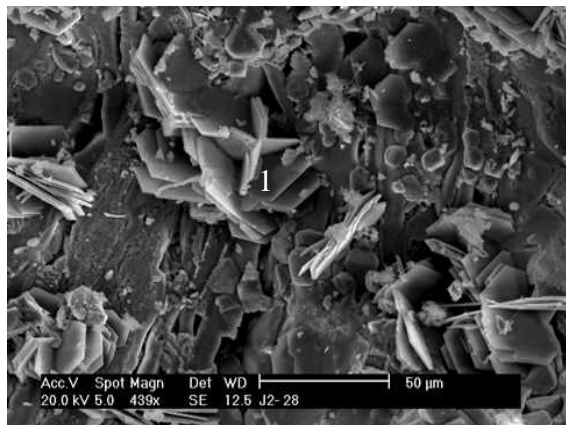
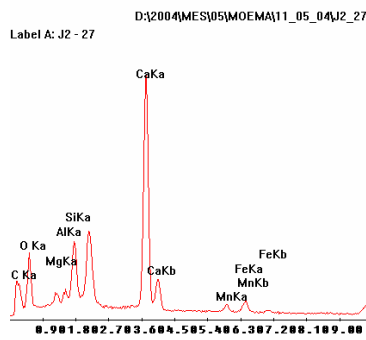


J2 - Escória de Aciaria EAF

Foto: J2-27

1) Carbonato de cálcio

Metalização: Ouro



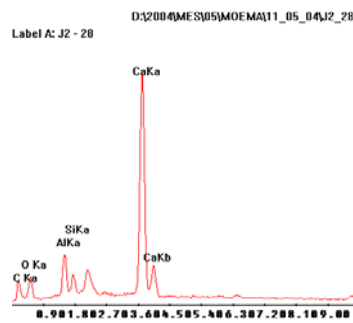
J2 - Escória de Aciaria EAF

Foto: J2-28

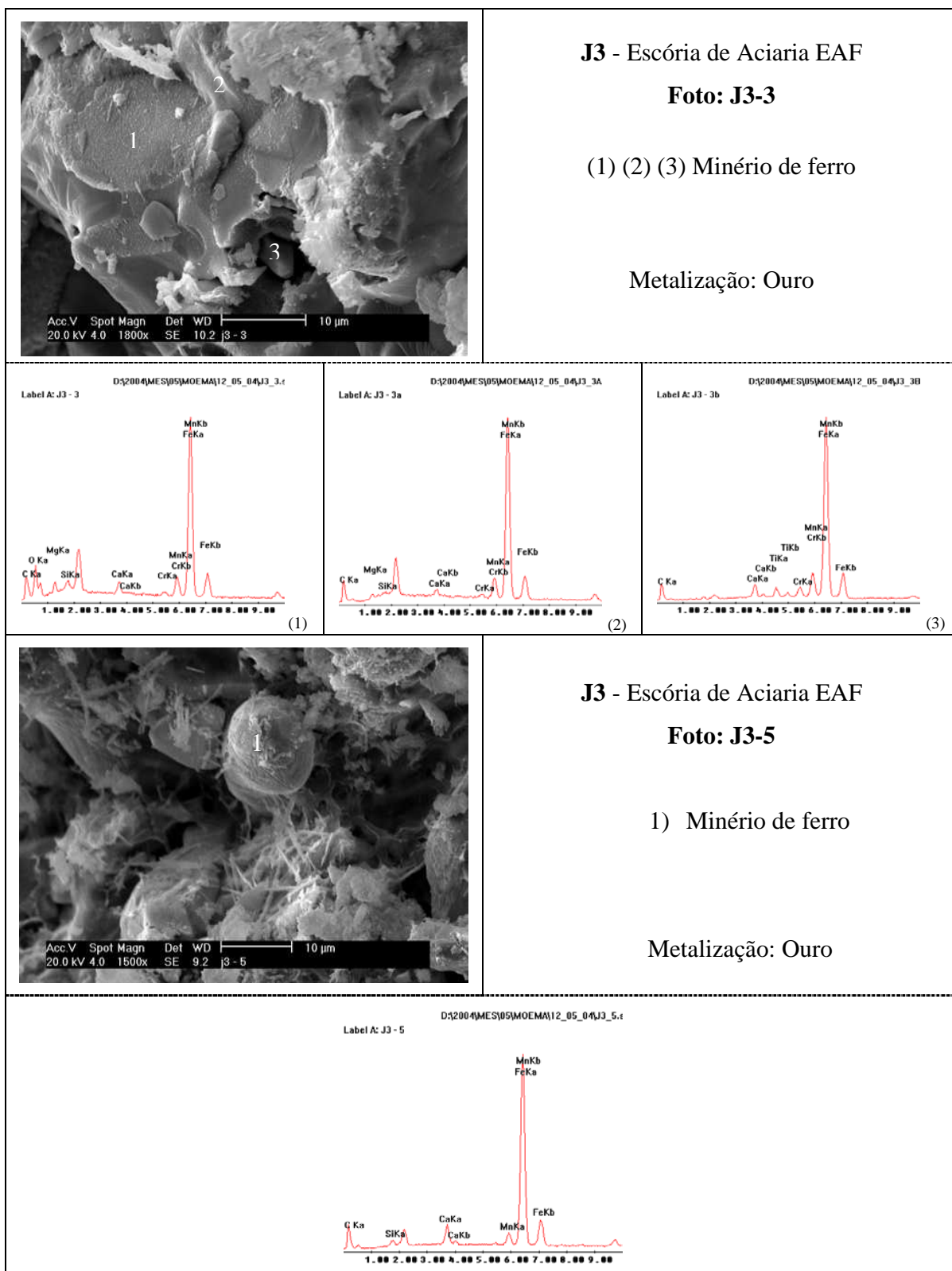
Dentro de um poro

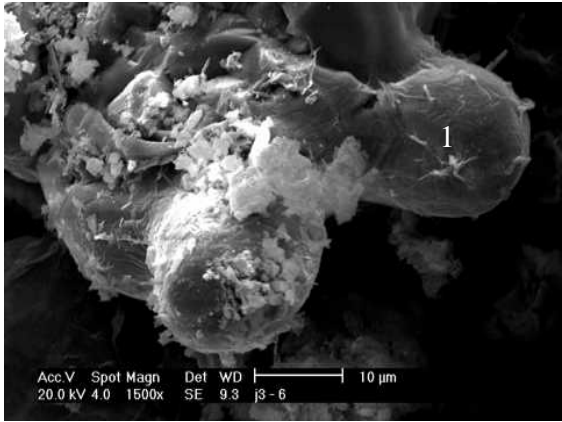
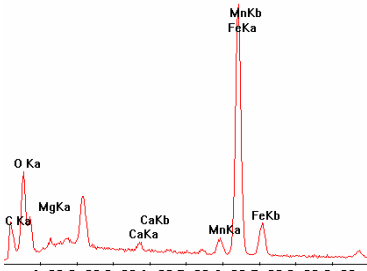
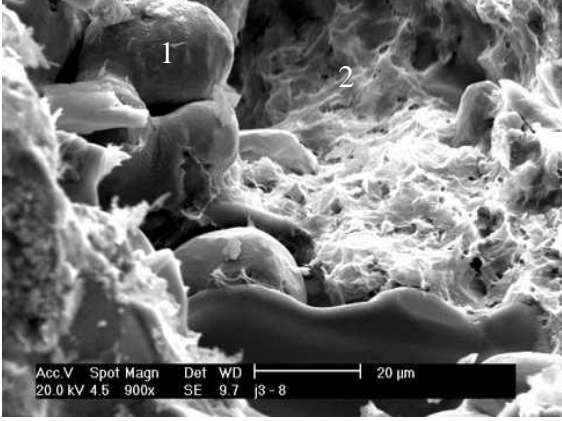
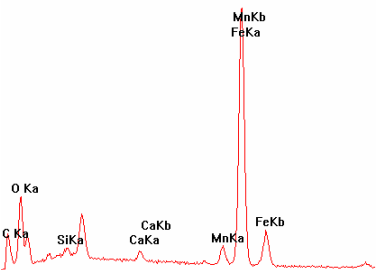
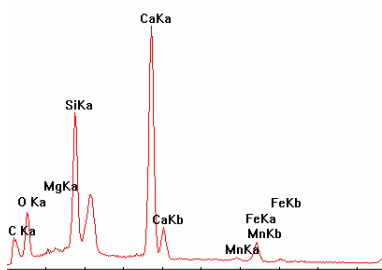
1) Caolinita

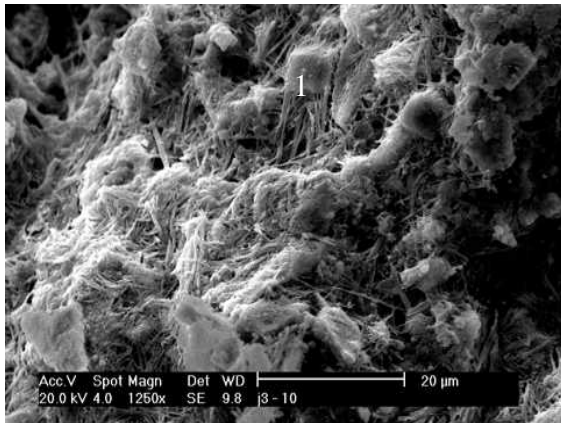
Metalização: Ouro



7.3 Amostra J3 (Interna)



 <p>Acc.V Spot Magn Det WD 10 µm 20.0 kV 4.0 1500x SE 9.3 j3-6</p>	<p>J3 - Escória de Aciaria EAF</p> <p>Foto: J3-6</p> <p>1) Minério de ferro</p> <p>Metalização: Ouro</p>
<p style="text-align: center;">D:\2004\MES\05\MOEMA\12_05_04\J3_6.e</p> <p style="text-align: center;">Label A: J3 - 6</p>  <p style="text-align: center;">1.00 2.00 3.00 4.00 5.00 6.00 7.00 8.00 9.00</p>	
 <p>Acc.V Spot Magn Det WD 20 µm 20.0 kV 4.5 900x SE 9.7 j3-8</p>	<p>J3 - Escória de Aciaria EAF</p> <p>Foto: J3-8</p> <p>1) Minério de ferro</p> <p>2) Silicato de cálcio hidratado</p> <p>Metalização: Ouro</p>
<p style="text-align: center;">D:\2004\MES\05\MOEMA\12_05_04\J3_8.e</p> <p style="text-align: center;">Label A: J3 - 8</p>  <p style="text-align: center;">1.00 2.00 3.00 4.00 5.00 6.00 7.00 8.00 9.00</p> <p style="text-align: center;">(1)</p>	<p style="text-align: center;">D:\2004\MES\05\MOEMA\12_05_04\J3_8A</p> <p style="text-align: center;">Label A: J3 - 8a</p>  <p style="text-align: center;">1.00 2.00 3.00 4.00 5.00 6.00 7.00 8.00 9.00</p> <p style="text-align: center;">(2)</p>

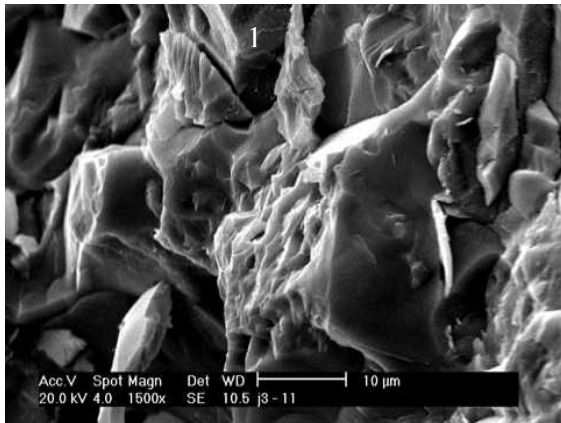
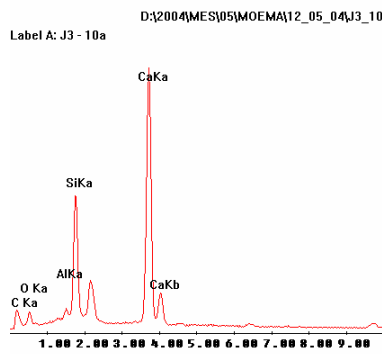


J3 - Escória de Aciaria EAF

Foto: J3-10

1) Silicato dicálcico

Metalização: Ouro

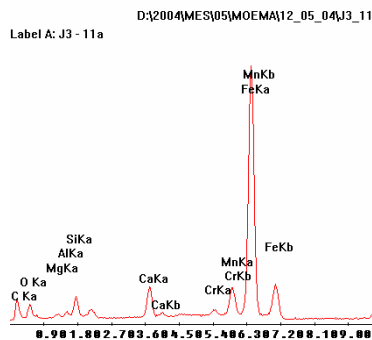


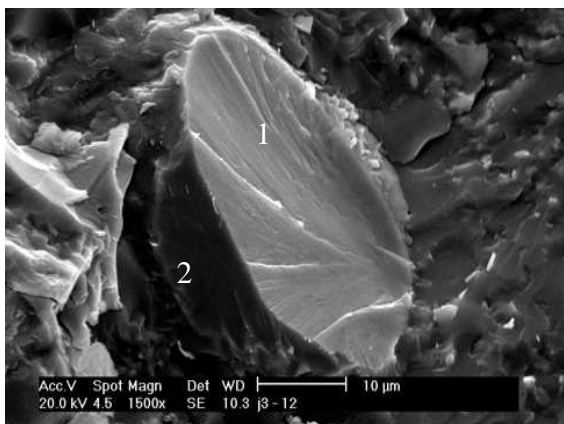
J3 - Escória de Aciaria EAF

Foto: J3-11

1) Minério de ferro

Metalização: Ouro





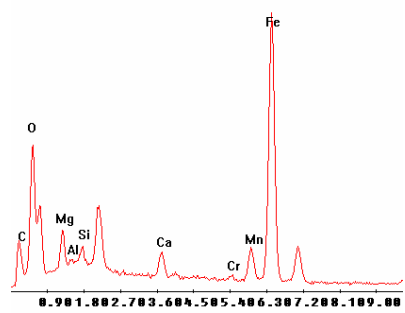
J3 - Escória de Aciaria EAF

Foto: J3-12

(1) (2) Minério de ferro


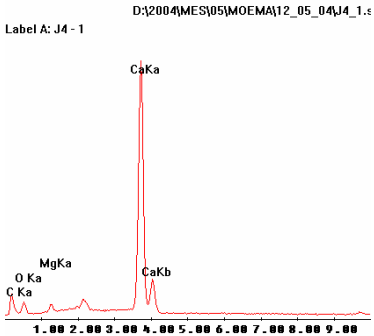
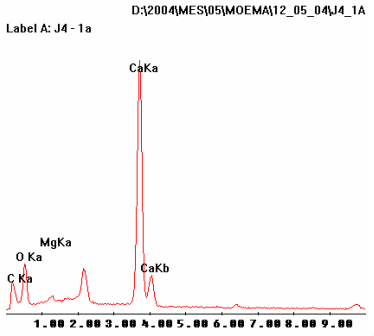

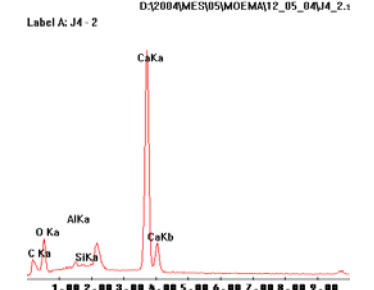
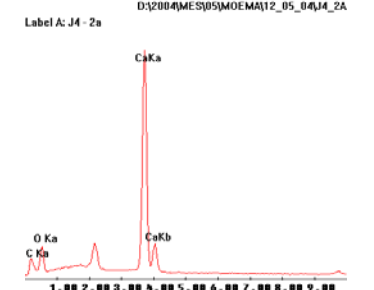
Metalização: Ouro

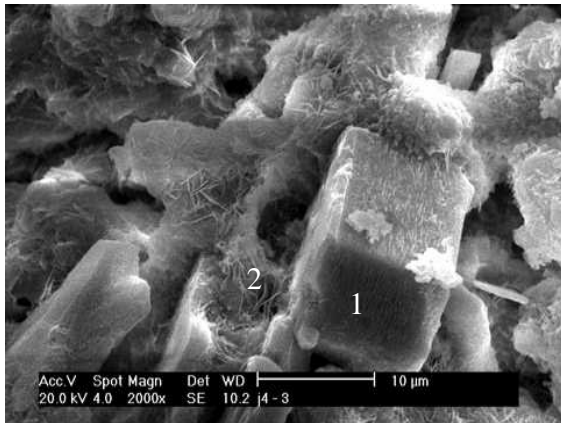
D:\2004\MES\05\MOEMA\12_05_04\J3_12
Label A: J3 - 12



(1) (2)

7.4 Amostra J4 (Interna)

	<p>J4 - Escória de Aciaria EAF</p> <p>Foto: J4-1</p> <p>(1) (2) Portlandita</p> <p>Metalização: Ouro</p>
 <p>Label A: J4 - 1</p> <p>D:\2004\MES\05\MOEMA\12_05_04\J4_1.e</p> <p>(1)</p>	 <p>Label A: J4 - 1a</p> <p>D:\2004\MES\05\MOEMA\12_05_04\J4_1A</p> <p>(2)</p>
	<p>J4 - Escória de Aciaria EAF</p> <p>Foto: J4-2</p> <p>(1) (2) Carbonato de cálcio</p> <p>Metalização: Ouro</p>
 <p>Label A: J4 - 2</p> <p>D:\2004\MES\05\MOEMA\12_05_04\J4_2.e</p> <p>(1)</p>	 <p>Label A: J4 - 2a</p> <p>D:\2004\MES\05\MOEMA\12_05_04\J4_2A</p> <p>(2)</p>

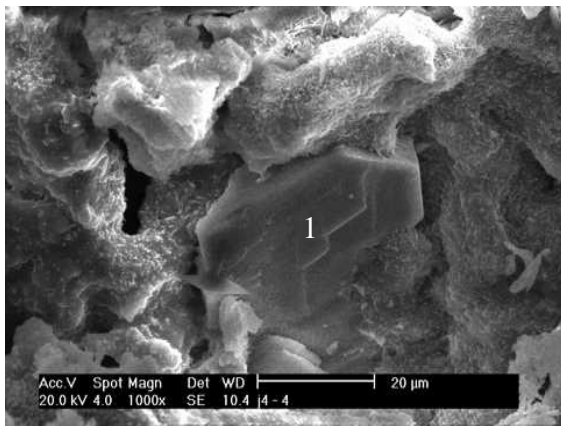
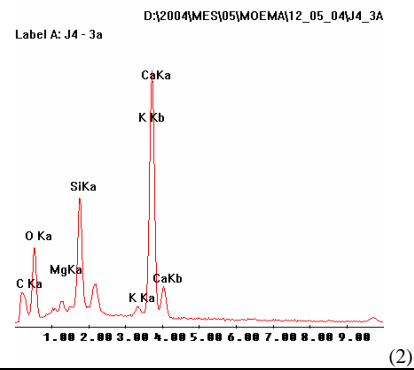
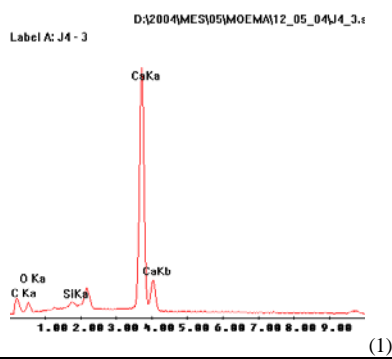


J4 - Escória de Aciaria EAF

Foto: J4-3

- 1) Carbonato de cálcio
- 2) Silicato de cálcio hidratado

Metalização: Ouro

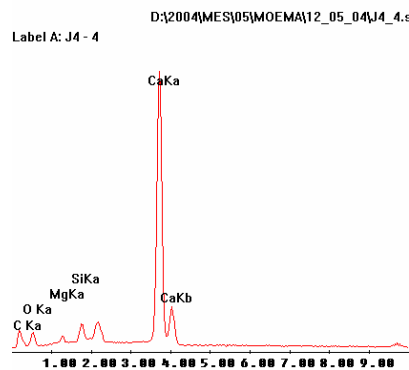


J4 - Escória de Aciaria EAF

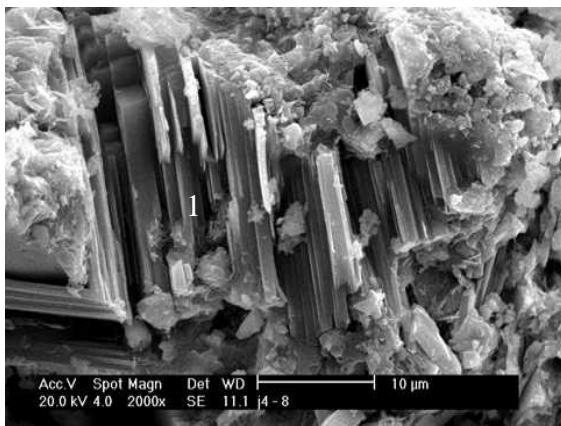
Foto: J4-4

- 1) Carbonato de cálcio

Metalização: Ouro



	<p>J4 - Escória de Aciaria EAF Foto: J4-5</p> <p>1) Carbonato de cálcio 2) Silicato de cálcio hidratado</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	<p>J4 - Escória de Aciaria EAF Foto: J4-7</p> <p>(1) (2) Portlandita</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	<p>(1), (2)</p>

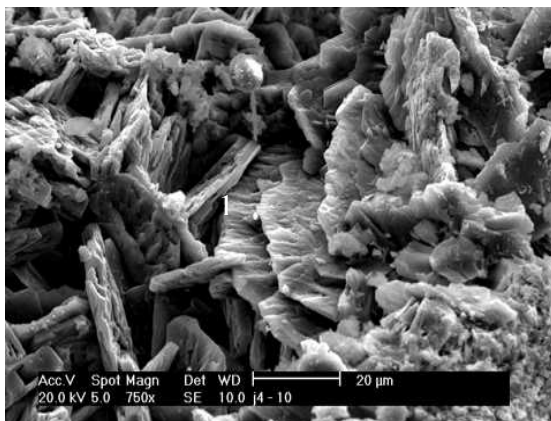
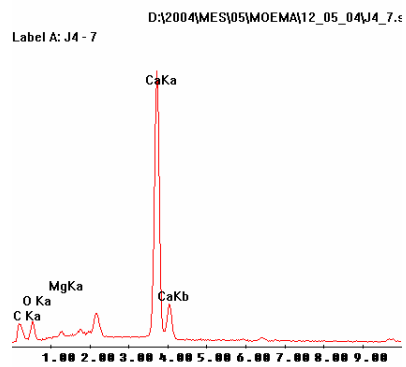


J4 - Escória de Aciaria EAF

Foto: J4-8

1) Portlandita

Metalização: Ouro

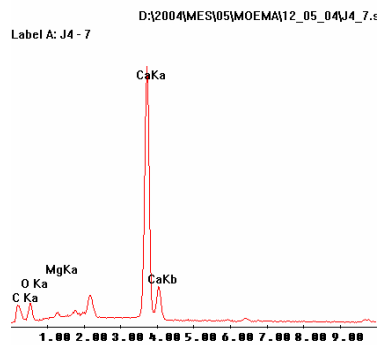


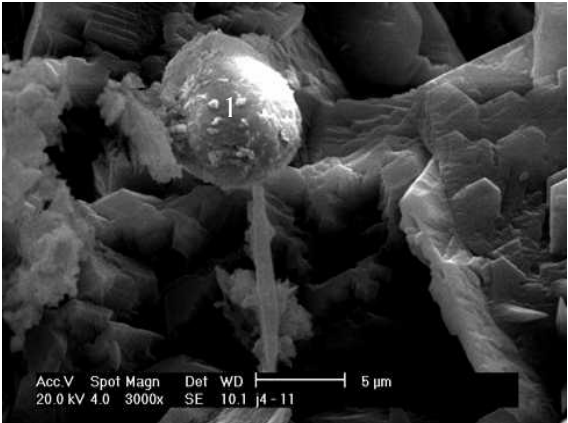
J4 - Escória de Aciaria EAF

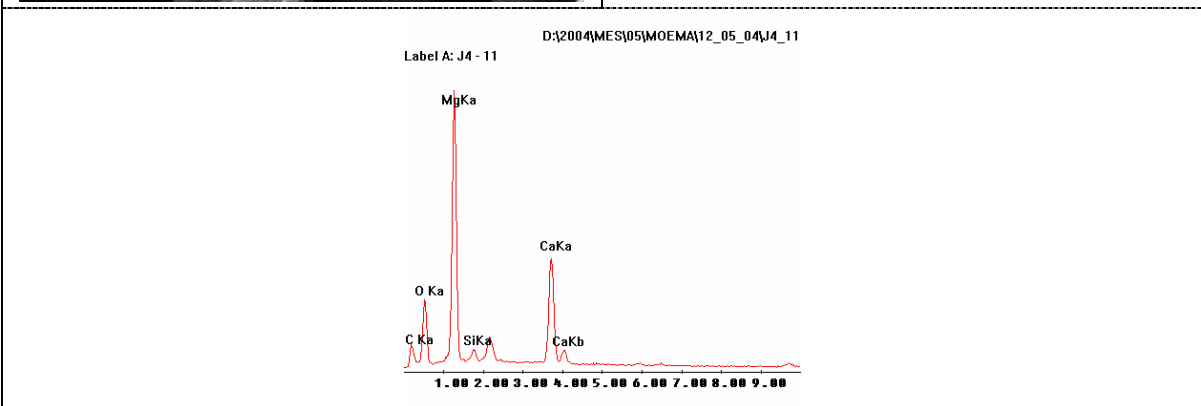
Foto: J4-10


1) Carbonato de cálcio

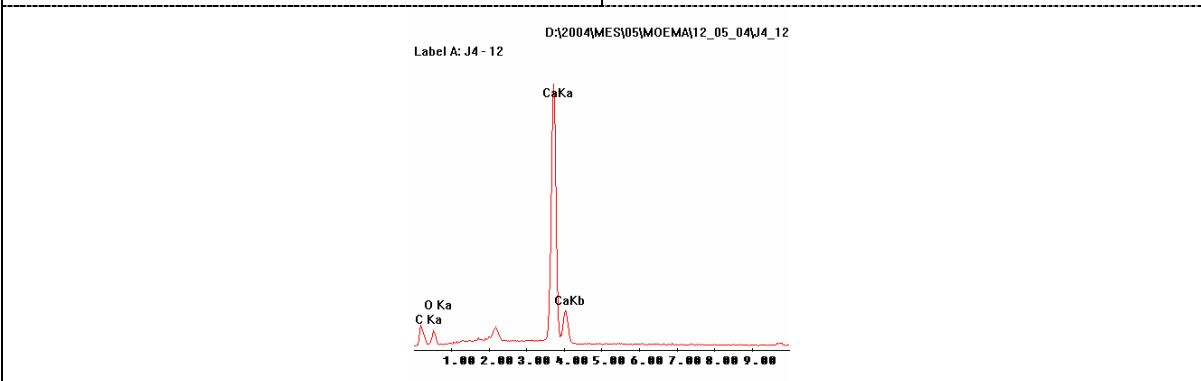
Metalização: Ouro

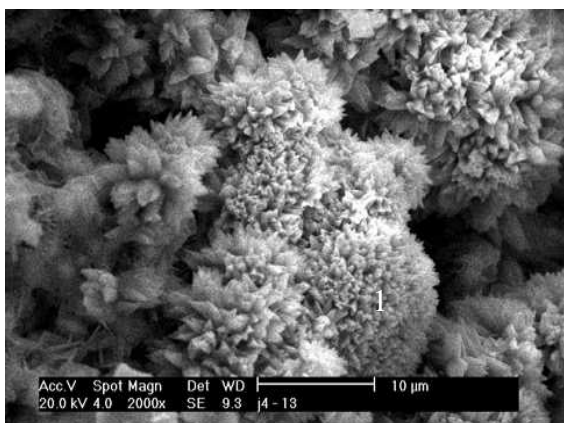


	<p>J4 - Escória de Aciaria EAF</p> <p>Foto: J4-11</p> <p>1) Dolomita</p> <p>Metalização: Ouro</p>
---	---



	<p>J4 - Escória de Aciaria EAF</p> <p>Foto: J4-12</p> <p>1) Portlandita</p> <p>Metalização: Ouro</p>
---	--



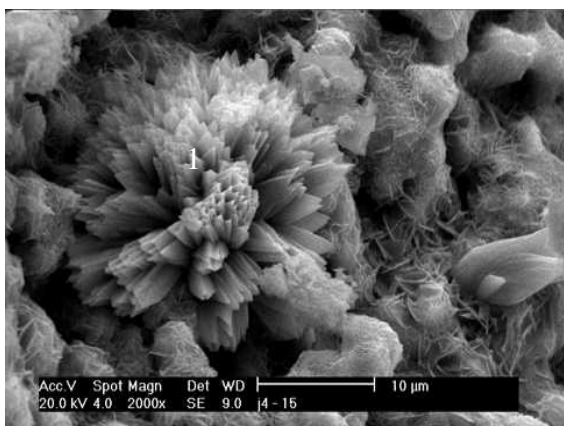
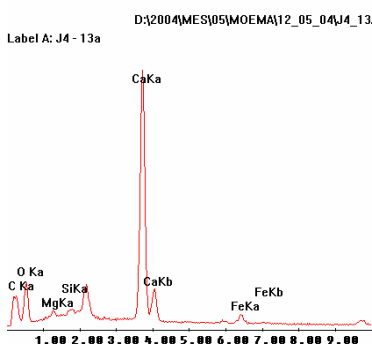


J4 - Escória de Aciaria EAF

Foto: J4-13

1) Carbonato de cálcio

Metalização: Ouro

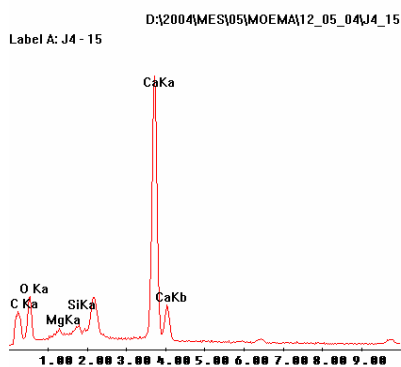


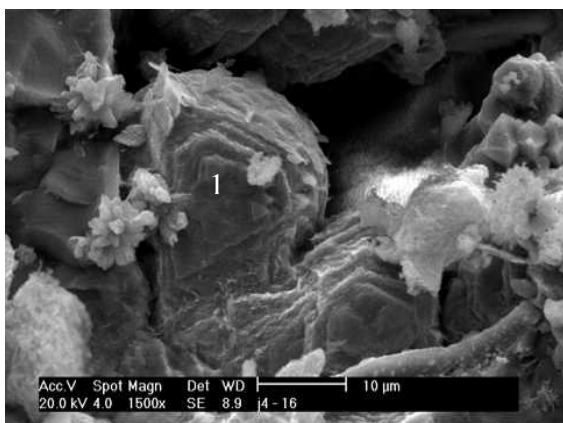
J4 - Escória de Aciaria EAF

Foto: J4-15

1) Carbonato de cálcio

Metalização: Ouro



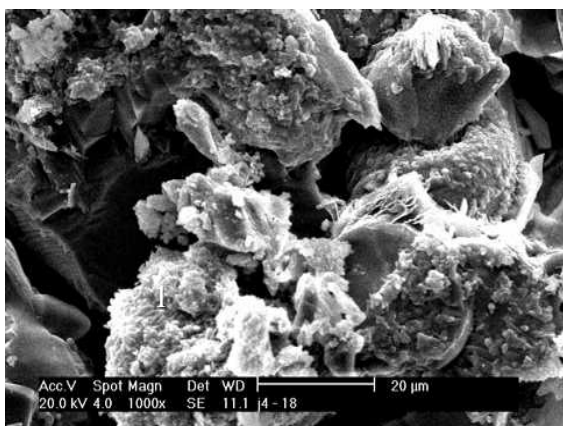
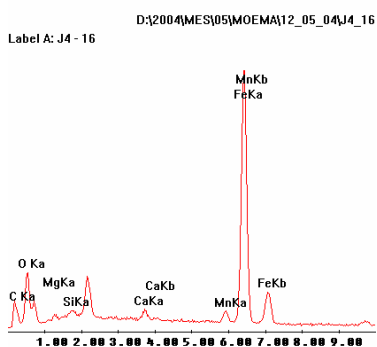


J4 - Escória de Aciaria EAF

Foto: J4-16

1) Minério de ferro

Metalização: Ouro

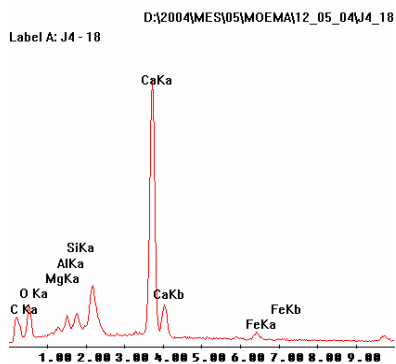


J4 - Escória de Aciaria EAF

Foto: J4-18

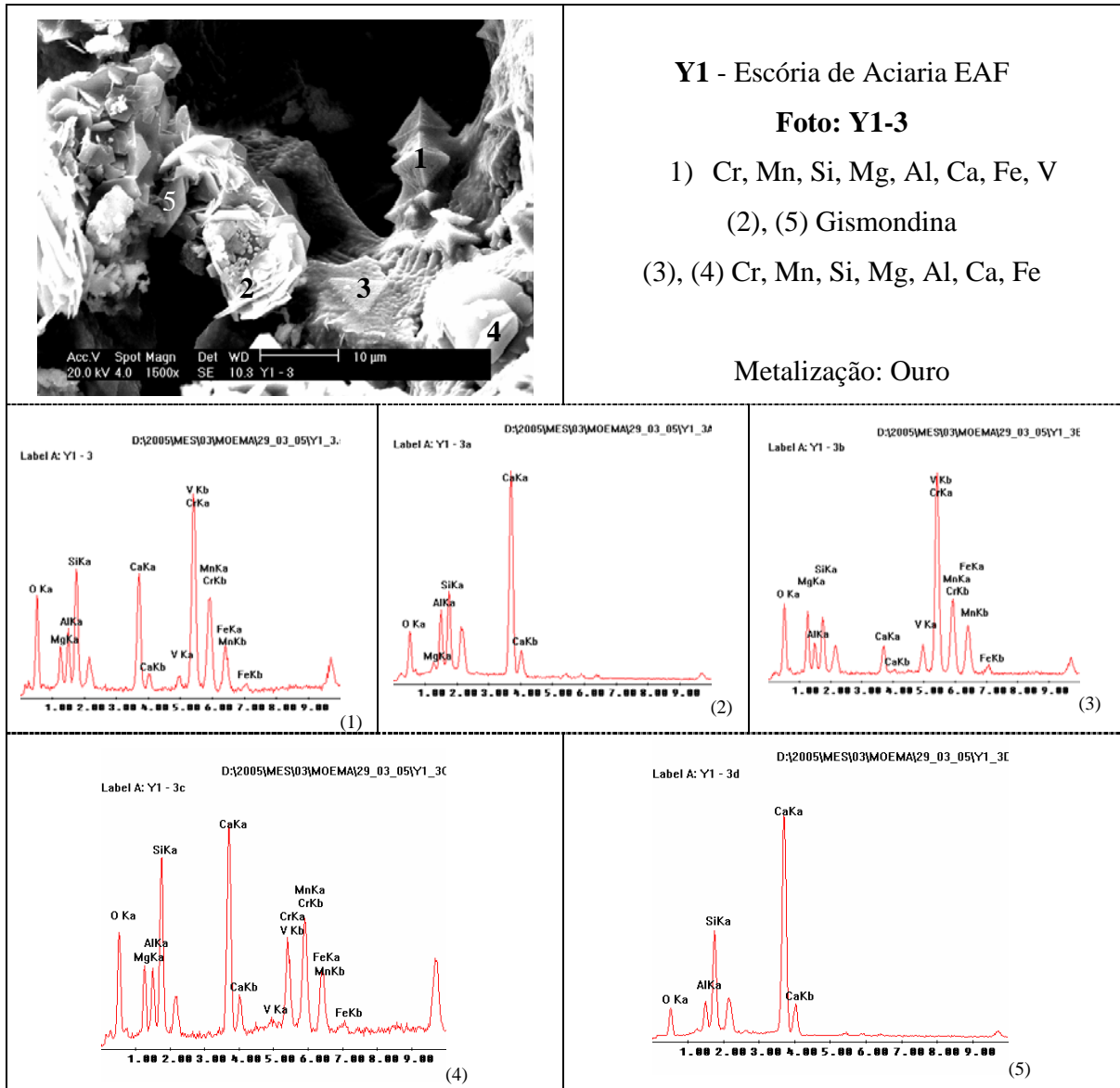
1) Carbonato de cálcio

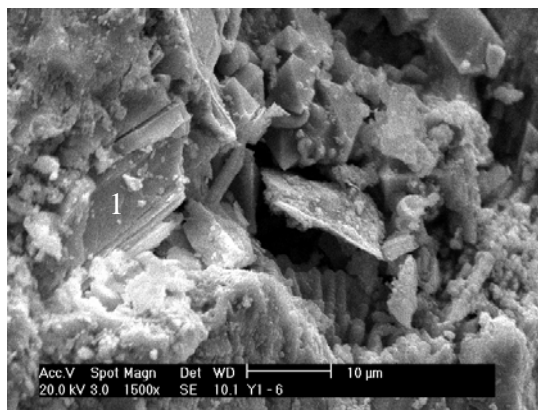
Metalização: Ouro



8 AMOSTRA Y - MEV

8.1 Amostra Y1 (Interna)



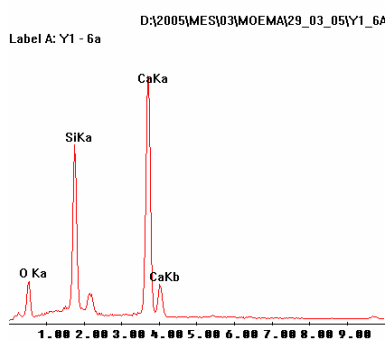


Y1 - Escória de Aciaria EAF

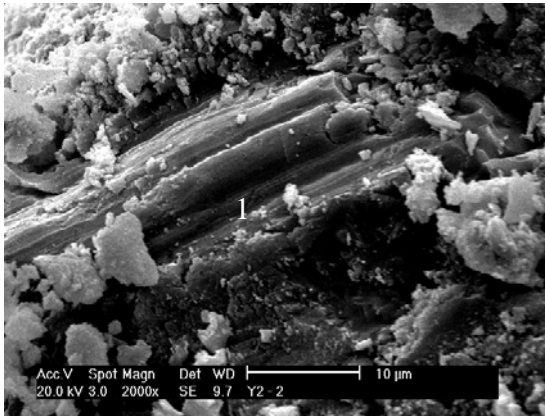
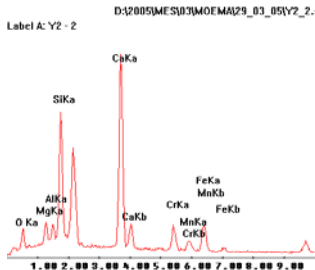
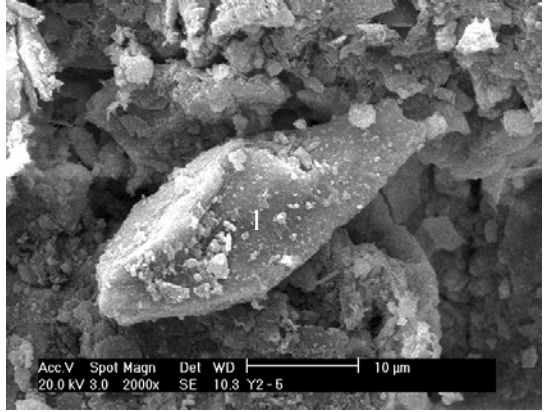
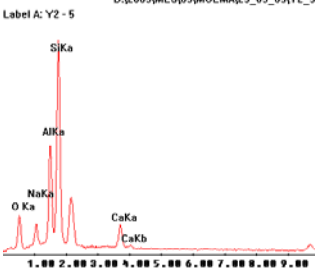
Foto: Y1-6

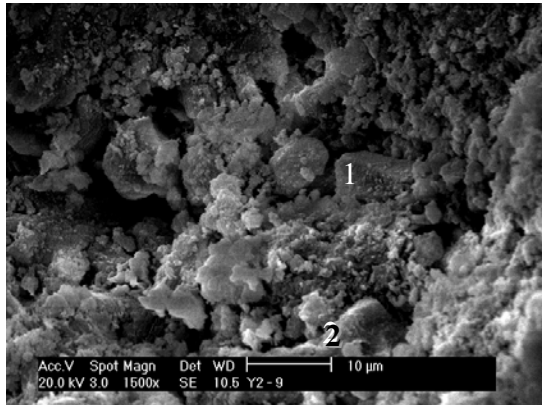
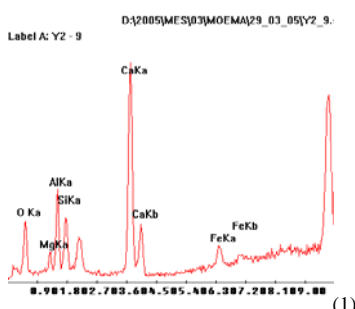
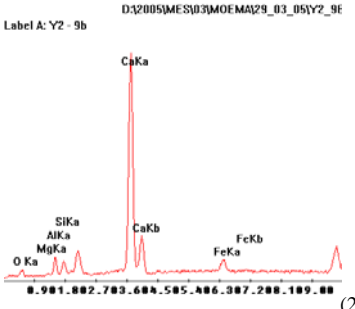
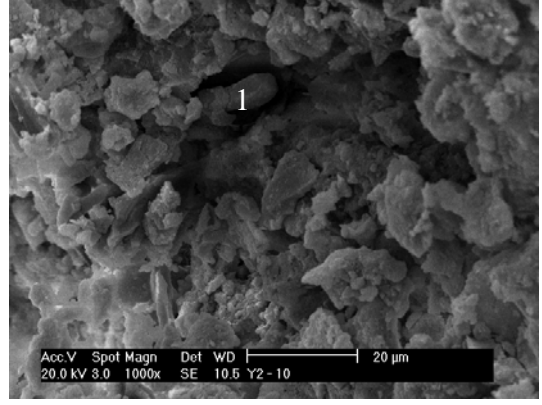
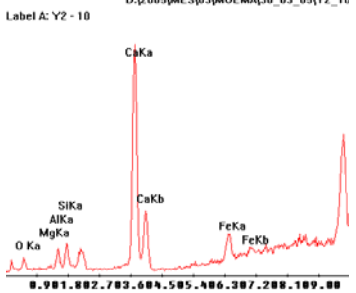
1) Silicato dicálcico

Metalização: Ouro

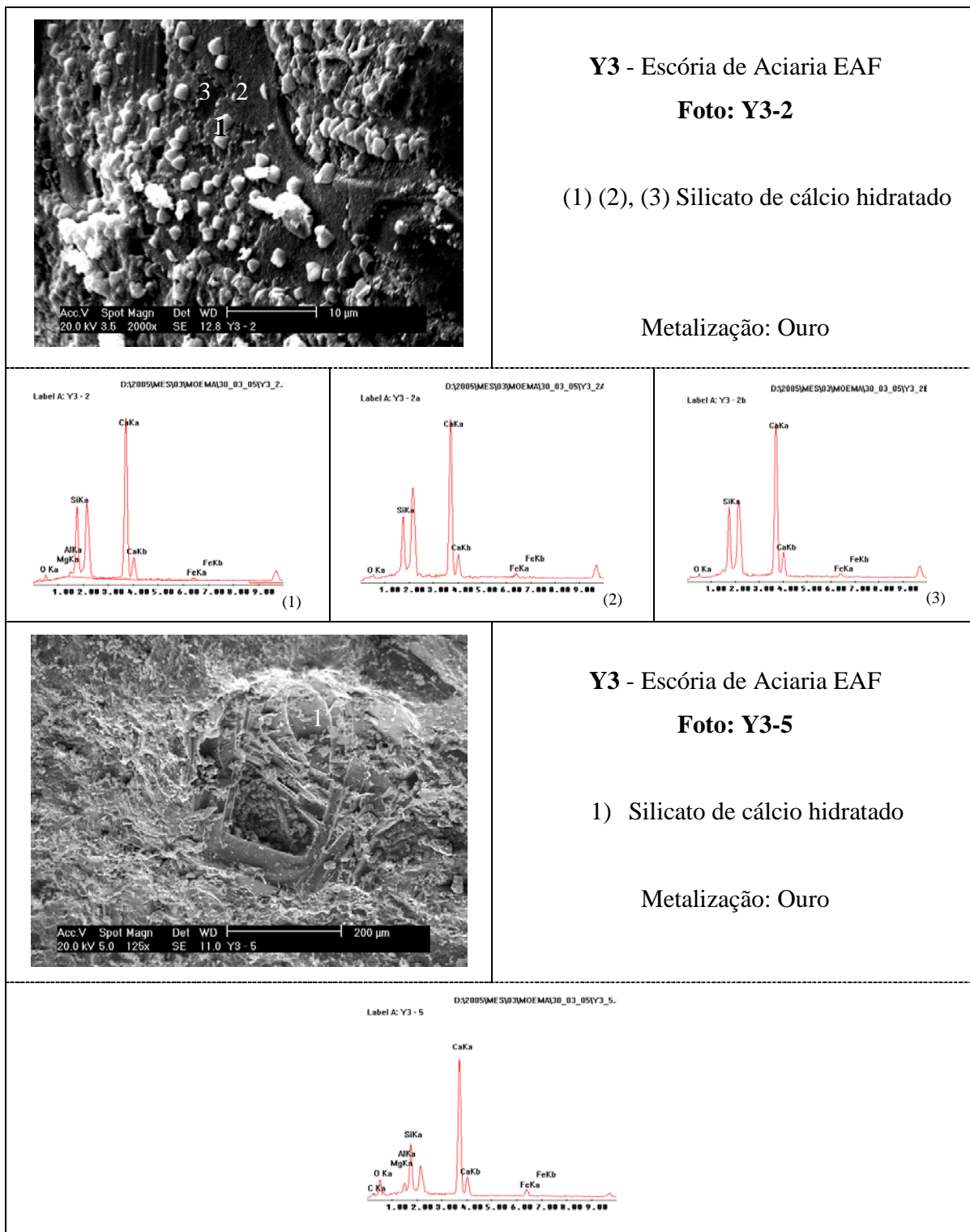


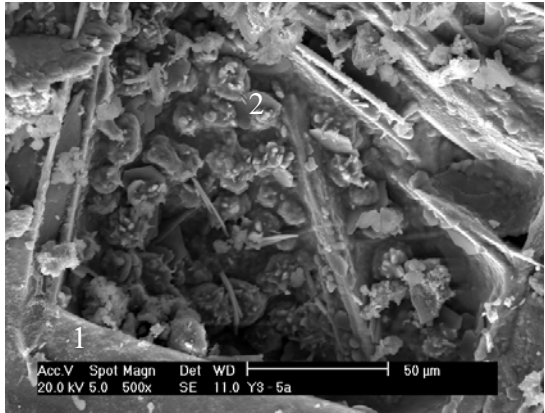
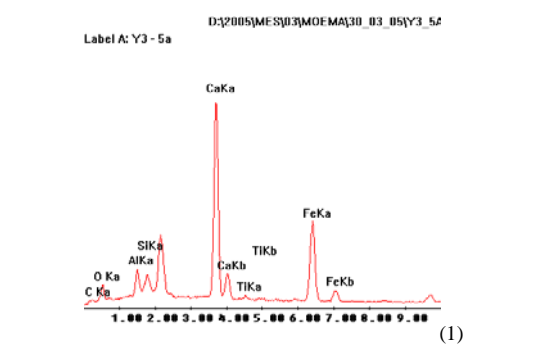
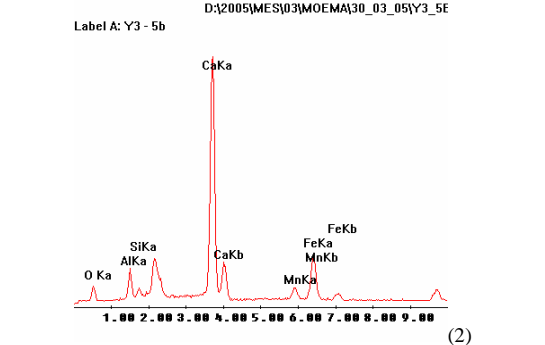
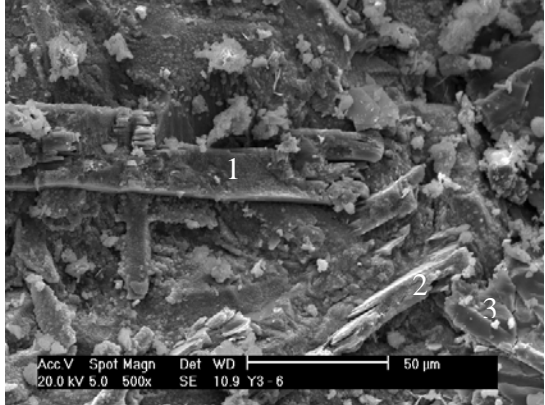
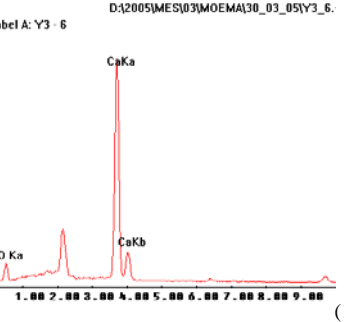
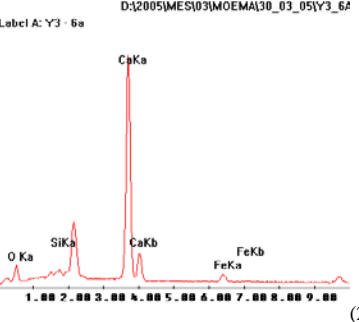
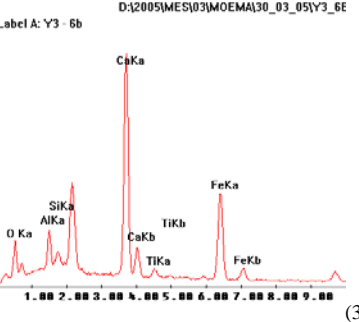
8.2 Amostra Y2 (Externa)

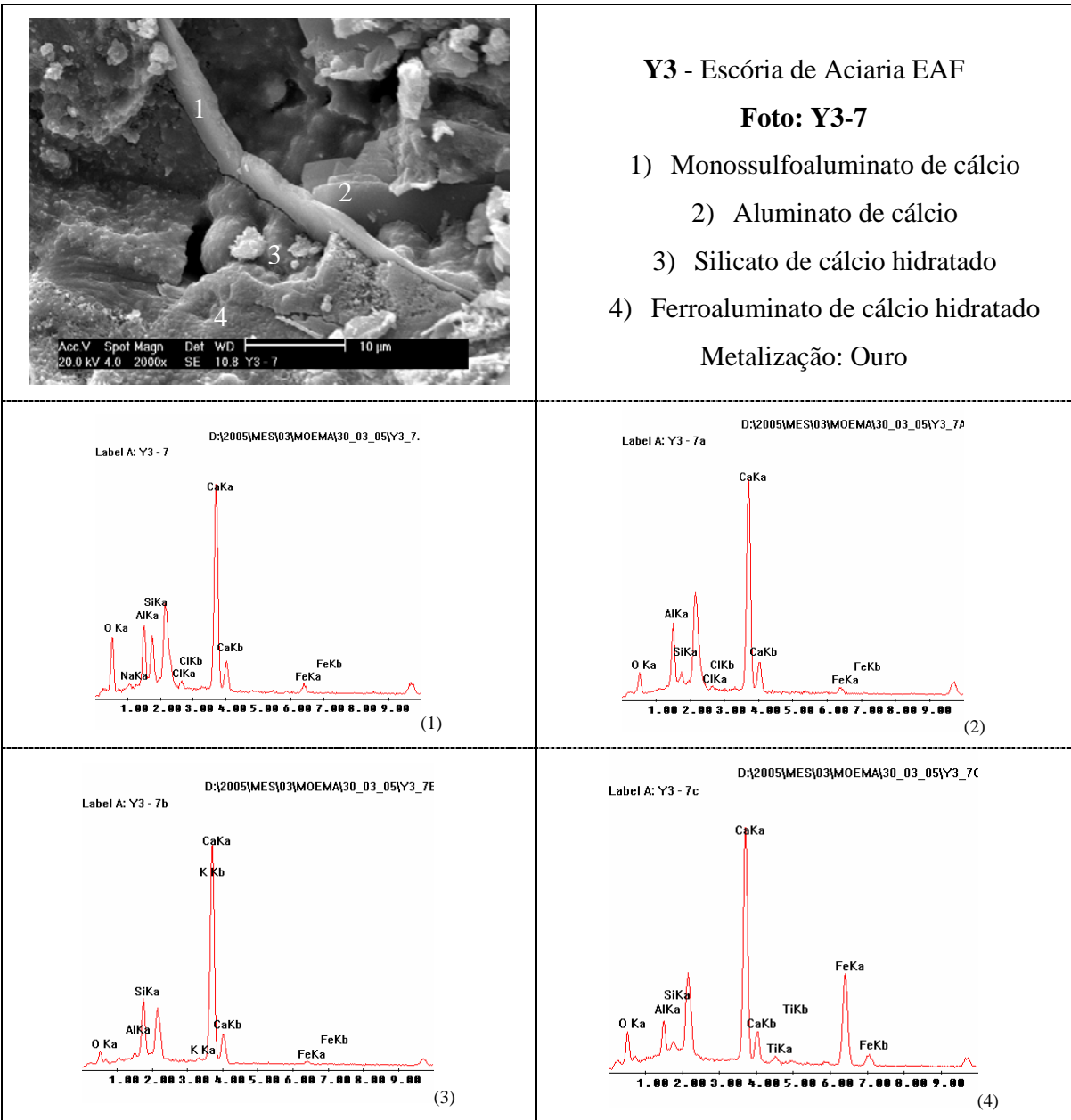
	<p>Y2 - Escória de Aciaria EAF</p> <p>Foto: Y2-2</p> <p>1) Silicato tricálcico</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	
	<p>Y2 - Escória de Aciaria EAF</p> <p>Foto: Y2-5</p> <p>1) Feldspato anortite</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	

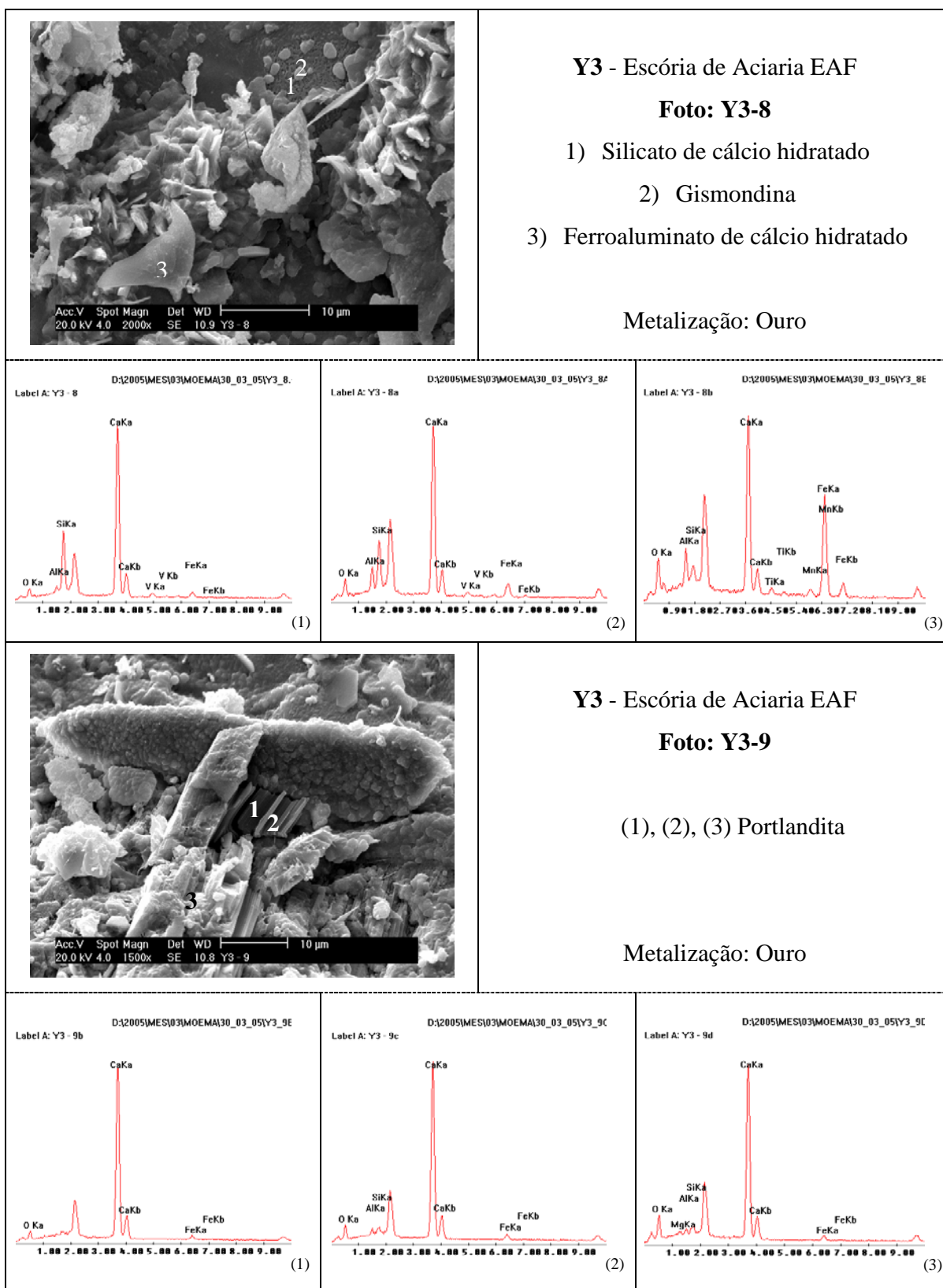
	<p>Y2 - Escória de Aciaria EAF Foto: Y2-9</p> <p>1) Gismondina 2) Carbonato de cálcio</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	
	<p>Y2 - Escória de Aciaria EAF Foto: Y2-10</p> <p>1) Carbonato de cálcio</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	

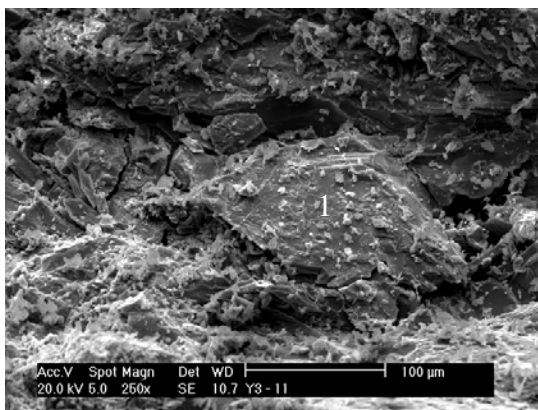
8.3 Amostra Y3 (Interna)



	<p>Y3 - Escória de Aciaria EAF Foto: Y3-5a Dentro do poro de Y3-5</p> <p>(1), (2) Ferroaluminato de cálcio hidratado</p> <p>Metalização: Ouro</p>	
 <p>(1)</p>	 <p>(2)</p>	
	<p>Y3 - Escória de Aciaria EAF Foto: Y3-6</p> <p>(1), (2) Portlandita 3) Ferroaluminato de cálcio hidratado</p> <p>Metalização: Ouro</p>	
 <p>(1)</p>	 <p>(2)</p>	 <p>(3)</p>





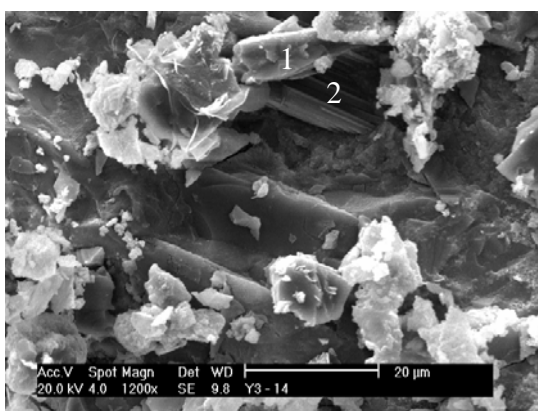
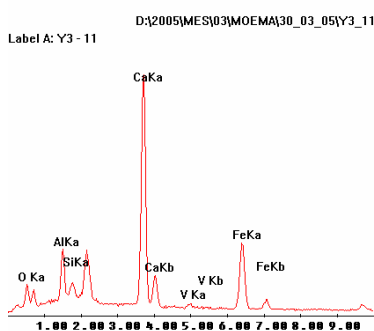


Y3 - Escória de Aciaria EAF

Foto: Y3-11

- 1) Ferrolauminato de cálcio hidratado

Metalização: Ouro

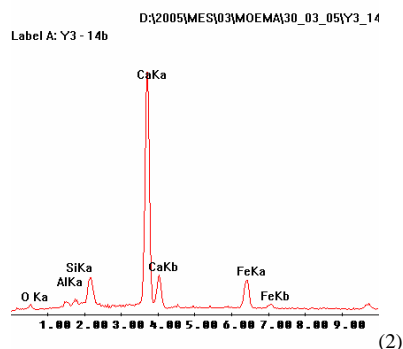
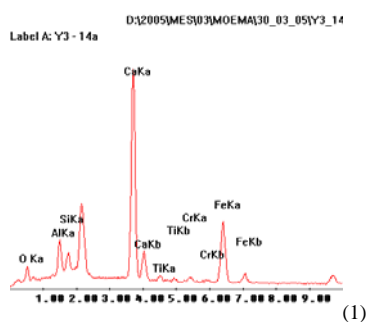


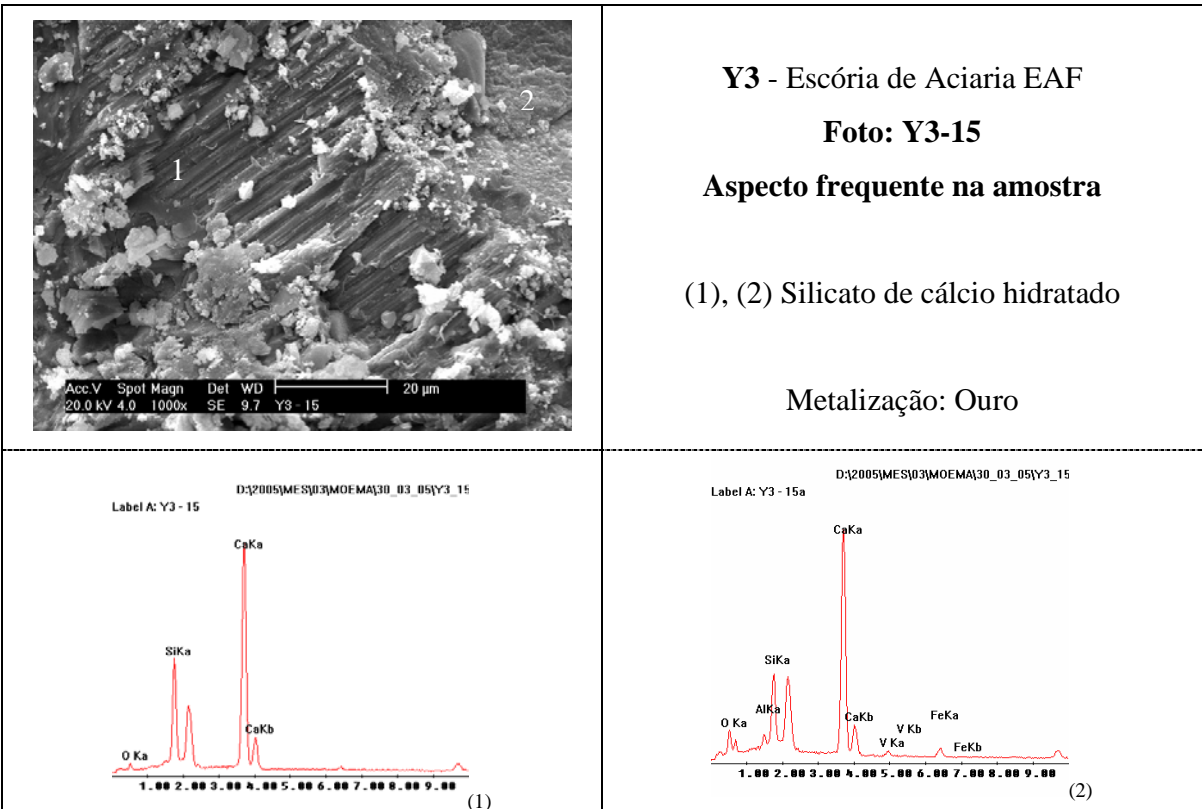
Y3 - Escória de Aciaria EAF

Foto: Y3-14

- 1) Ferroaluminato de cálcio hidratado
- 2) Portlandita

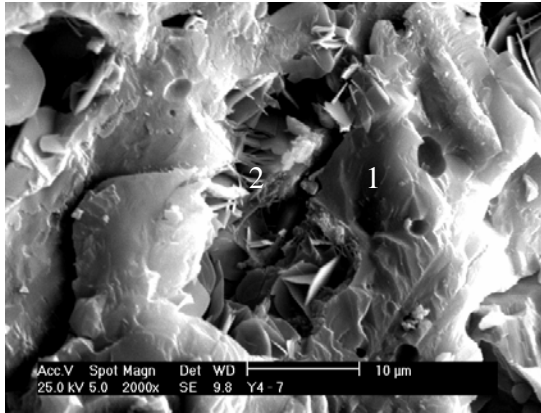
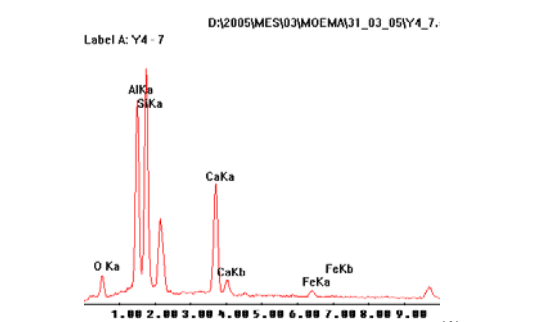
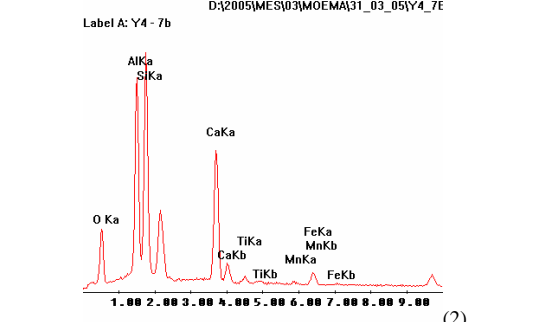
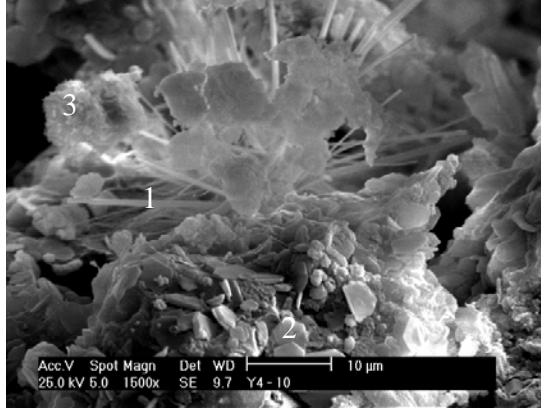
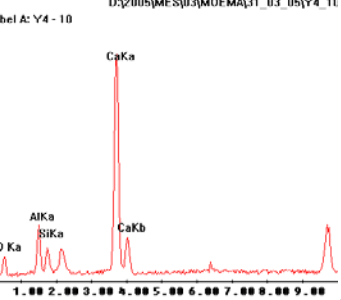
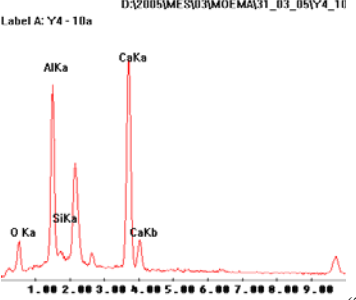
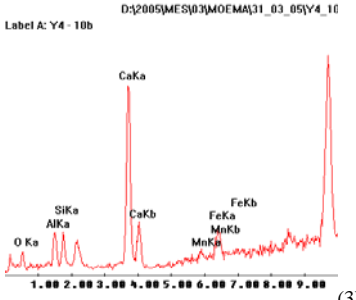
Metalização: Ouro

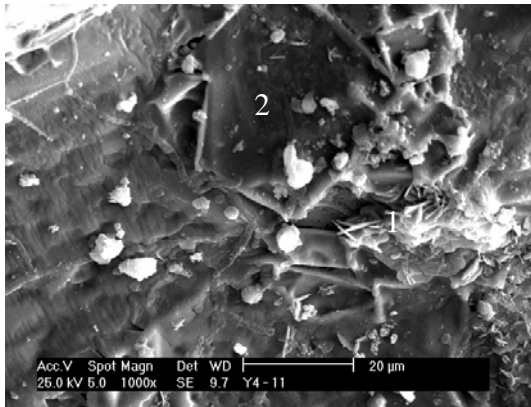




8.4 Amostra Y4 (Interna)

	<p>Y4 - Escória de Aciaria EAF</p> <p>Foto: Y4-1</p> <p>(1), (2) Sílica</p> <p>3) Silicato de cálcio hidratado</p> <p>Metalização: Ouro</p>	
	<p>Y4 - Escória de Aciaria EAF</p> <p>Foto: Y4-5</p> <p>(1), (2) Etringita</p> <p>Metalização: Ouro</p>	

	<p>Y4 - Escória de Aciaria EAF</p> <p>Foto: Y4-7</p> <p>(1), (2) Gismondina</p> <p>Metalização: Ouro</p>	
 <p>(1)</p>	 <p>(2)</p>	
	<p>Y4 - Escória de Aciaria EAF</p> <p>Foto: Y4-10</p> <p>(1), (2) Aluminato de cálcio</p> <p>3) Ferroaluminato de cálcio hidratado</p> <p>Metalização: Ouro</p>	
 <p>(1)</p>	 <p>(2)</p>	 <p>(3)</p>

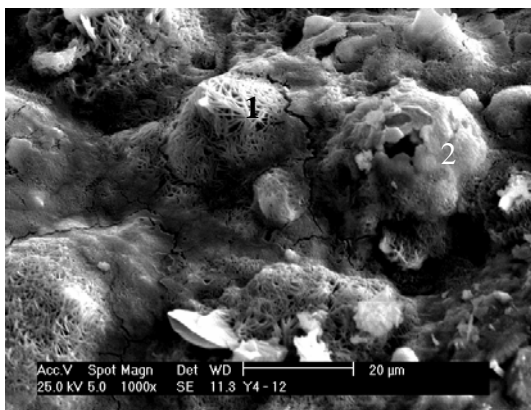
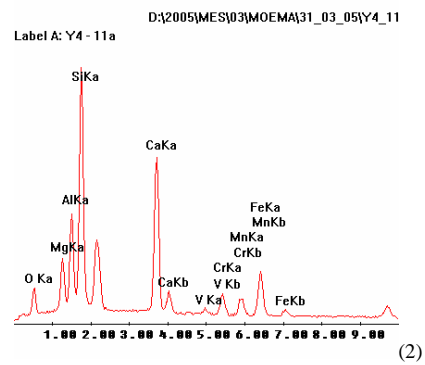
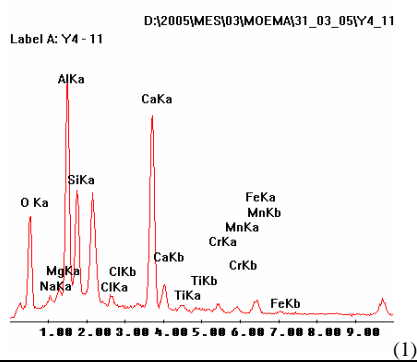


Y4 - Escória de Aciaria EAF

Foto: Y4-11

(1), (2) Gimondina

Metalização: Ouro

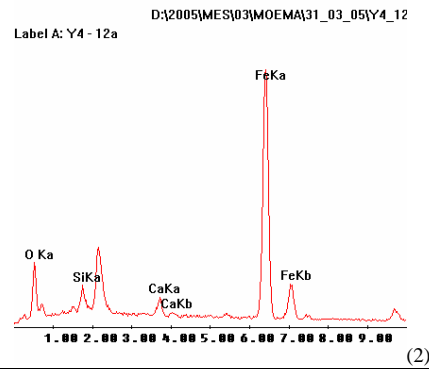
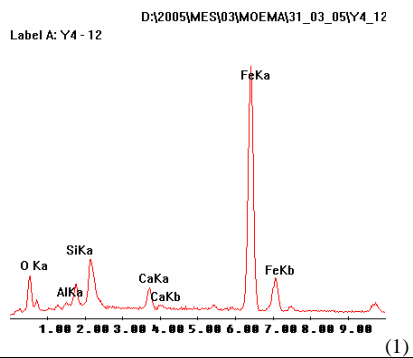


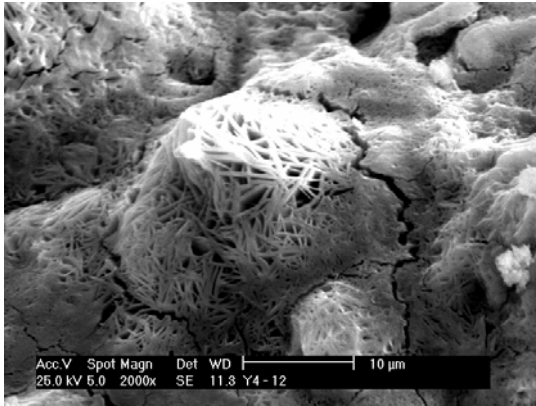
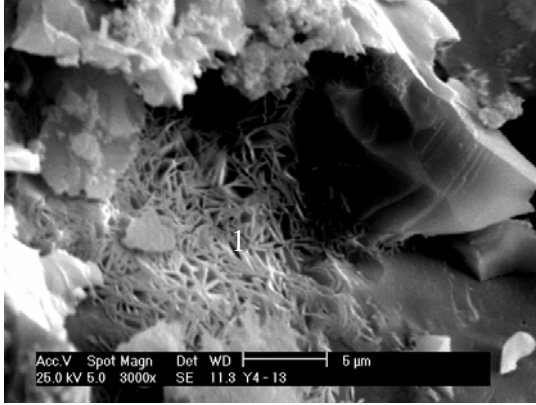
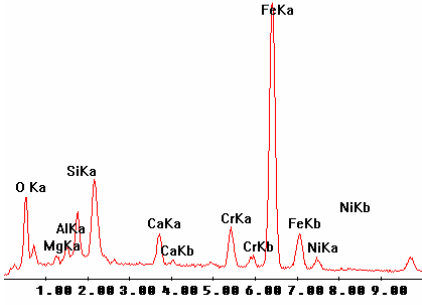
Y4 - Escória de Aciaria EAF

Foto: Y4-12

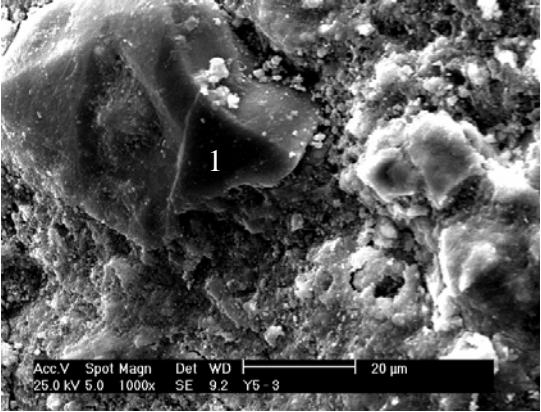
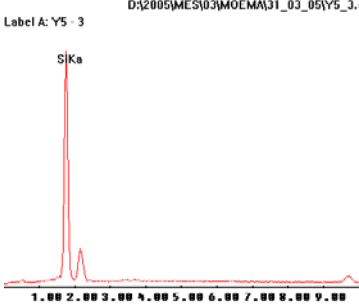
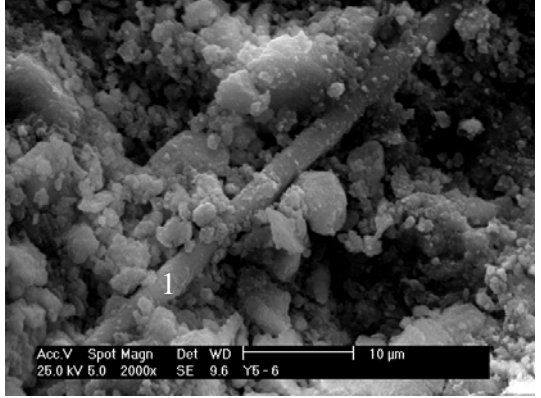
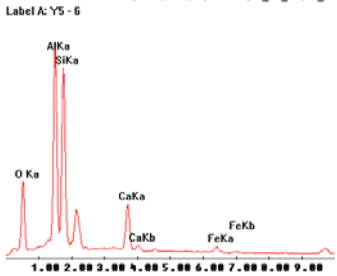
(1), (2) Minério de ferro

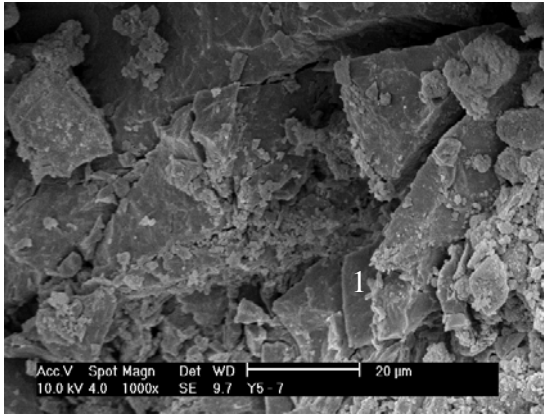
Metalização: Ouro

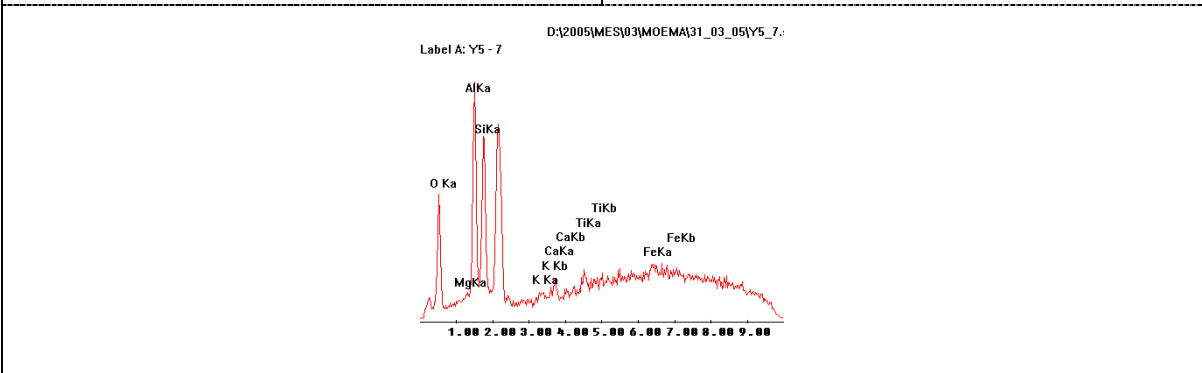


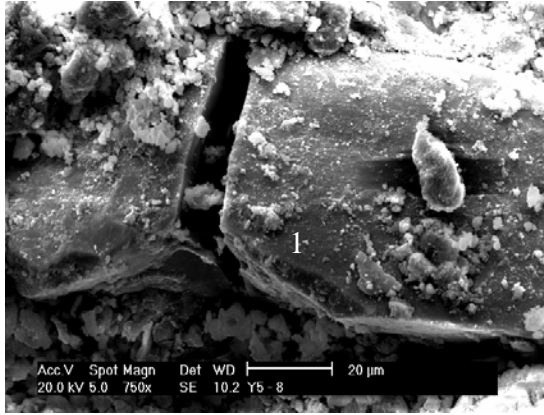
	<p>Y4 - Escória de Aciaria EAF</p> <p>Foto: Y4-12a</p> <p>Detalhe de Y4-12</p> <p>Minério de ferro</p> <p>Metalização: Ouro</p>
	<p>Y4 - Escória de Aciaria EAF</p> <p>Foto: Y4-13</p> <p>1) Minério de ferro</p> <p>Metalização: Ouro</p>
<p style="text-align: center;">D:\2005\MES\03\MOEMA\31_03_05\Y4_13</p> <p style="text-align: center;">Label A: Y4 - 13</p> 	

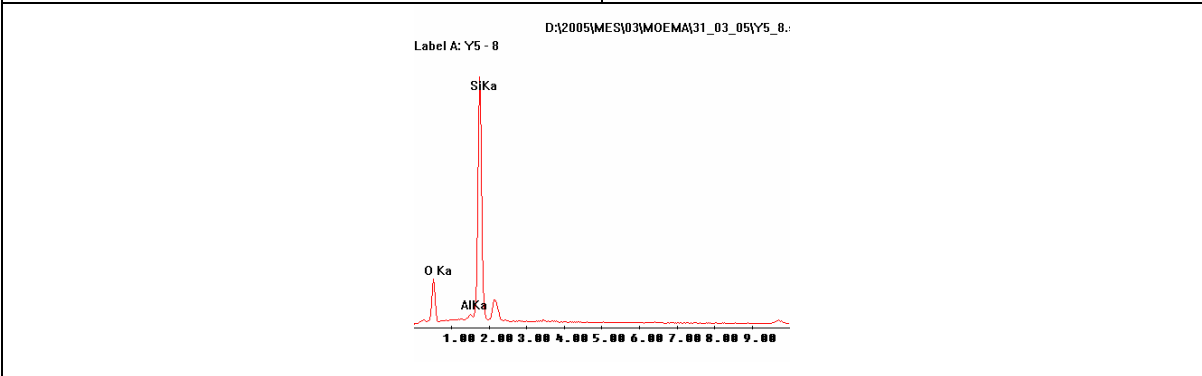
8.5 Amostra Y5 (Externa)

	<p>Y5 - Escória de Aciaria EAF Foto: Y5-3</p> <p>1) Sílica</p> <p>Metalização: Ouro</p>
<p>Label A: Y5 - 3 D:\2005\MES\03\MOEMA\31_03_05\Y5_3_</p> 	
	<p>Y5 - Escória de Aciaria EAF Foto: Y5-6</p> <p>1) Gismondina</p> <p>Metalização: Ouro</p>
<p>Label A: Y5 - 6 D:\2005\MES\03\MOEMA\31_03_05\Y5_6_</p> 	

	<p>Y5 - Escória de Aciaria EAF</p> <p>Foto: Y5-7</p> <p>1) Caolinita</p> <p>Metalização: Ouro</p>
---	---



	<p>Y5 - Escória de Aciaria EAF</p> <p>Foto: Y5-8</p> <p>1) Sílica</p> <p>Metalização: Ouro</p>
---	--



Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)