LUIZ CEZAR DUARTE PACHECO

O ESTUDO DA ESCÓRIA DE ACIARIA COMO AGREGADO SIDERÚRGICO PARA USO EM LASTRO FERROVIÁRIO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Tecnologia da Construção

Orientador: Prof. Orlando Celso Longo – D.Sc

Co-orientador: Prof. Antônio Eduardo Polisseni – D.Sc

NITERÓI

2006

P Pacheco, Luiz Cezar Duarte

O estudo da escória de aciaria como agregado siderúrgico para uso em lastro ferroviário / Luiz Cezar Duarte Pacheco. – Niterói, RJ: [s.n.], 2006.

133 f.

Orientador: Orlando Celso Longo

Co-orientador: Antônio Eduardo Polisseni

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal Fluminense, 2006.

1. Lastro Ferroviário 2. Agregado Siderúrgico 3. Escória I. Título

CDD ????????

LUIZ CEZAR DUARTE PACHECO

O ESTUDO DA ESCÓRIA DE ACIARIA COMO AGREGADO SIDERÚRGICO PARA USO EM LASTRO FERROVIÁRIO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Tecnologia da Construção

Aprovada em 24 de Novembro de 2006.

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Orlando Longo – Orientador – D.Sc.
Universidade Federal Fluminense

_____

Prof. Emil de Souza Sanchéz Filho – D. Sc.
Universidade Federal Fluminense

_____

Prof. Antônio Eduardo Polisseni - Co-orientador – D. Sc.
Universidade Federal de Juiz de Fora

_____

Prof. José Alberto Barroso Castañon – D. Sc.
Universidade Federal de Juiz de Fora

NITERÓI
2006

AGRADECIMENTOS :

Agradeço a DEUS por nos dar saúde, disposição e paz para enfrentar mais este desafio.

Agradeço a meus filhos Patrícia Perroni Pacheco e Cezar Perroni Pacheco motivo maior de tudo,

A minha esposa Maria Tereza Perroni Pacheco pelo incentivo.

Agradeço a meus Pais, Américo Duarte Pacheco e Maria Lourdes de Carvalho Pacheco por ter nos ensinado tanto com palavras e com exemplos, por ter nos ensinado a respeitar e a amar o próximo, a meus irmãos Paulo Roberto Pacheco e Ivan Sergio Pacheco, amigos sempre perto nos incentivando e nos dando carinho e compreensão.

Agradeço a minhas cunhadas, Iracema Cruzeiro Pacheco e Lucia Pacheco, que com alegria nos incentiva.

Agradeço ao Professor D.Sc. Orlando Celso Longo, que com competência e dedicação nos orientou, e ao meu querido amigo Prof. D.Sc. Antonio Eduardo Polisseni que com carinho, paciência, competência me incentivou e me orientou para que concluísse este desafio.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS : 3
SUMÁRIO 4
LISTA DE FIGURAS 7
LISTA DE TABELAS 10
RESUMO 11
ABSTRACT 12
1 INTRODUÇÃO 13
1.1 VISÃO DE SUSTENTABILIDADE 13
1.2 OBJETIVOS 14
1.3 JUSTIFICATIVAS 15
1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA 16
2 METODOLOGIA DO DESENVOLVIMENTO DA DISSERTAÇÃO 18
2.1 PRODUÇÃO DE LASTRO FERROVIARIO COM MATERIAL PÉTREO BRITADO 18
2.1.1 Fluxograma do processo de britagem 23
2.2 PRODUÇÃO DE AÇO E O AGREGADO SIDERÚRGICO DE ACIARIA 24
2.2.1 Histórico e estatísticas da produção do aço 24
2.2.2 Dados sobre a geração, tipos de resfriamento, processos de beneficiamento e as oportunidades de utilização das escórias. 27
2.2.2.1 A Geração das escórias 27
2.2.2.2 As oportunidades de utilização das escórias de aciaria 30
2.2.2.3 Utilização de escória em obras rodoviárias e lastro ferroviário 31
2.2.3 FLUXOGRAMA DA PRODUÇÃO DE AÇO 34
3 MATERIAIS E MÉTODOS 35
3.1 METODOLOGIA 35
3.1.1 PROCEDIMENTO PARA AMOSTRAGEM DE LOTE DE AGREGADO SIDERURGICO PARA LASTRO PADRÃO 35
3.1.2 Definições 36
3.2 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE A AMOSTRAGEM 37
3.2.1 Procedimentos de amostragem 39
3.2.2 Fluxograma do processo de amostragem do lote de agregado siderúrgico 43
3.2.3 Especificações de equipamentos de amostragem e de segurança 43
3.3 ENSAIOS 44

3.3.1 Introdução 44
3.3.2 Objetivo 48
3.3.3 Ensaios de caracterização 48
3.3.3.1 Caracterização física 50
3.3.3.2 Caracterização química 52
3.3.3.3 Caracterização mineralógica 53
3.3.3.4 Caracterização microestrutural 54
3.3.3.5 Caracterização ambiental 54
3.3.3.6 Caracterização da expansibilidade 55
3.4 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS 55
3.4.1 Composição granulométrica 55
3.4.2 Massa específica, absorção de água e porosidade. 56
3.4.3 Resistência ao desgaste – Abrasão Los Angeles 57
3.4.4 Resistência ao choque “TRETON” 58
3.4.5 Índice de forma 59
3.4.6 Resistência ao esmagamento 59
3.4.7 Fluorescência de Raio-X 60
3.4.8 Microscopia Eletrônica de Varredura 60
3.4.9 Expansibilidade: PTM 130/DER-MG 61
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 62
4.1 RESULTADOS 62
4.1.1 Análise granulométrica 62
4.1.2 Massa específica, absorção de água e porosidade 63
4.1.3 Resistência ao desgaste – Abrasão Los Angeles 63
4.1.4 Resistência ao choque “TRETON” 63
4.1.5 Índice de Forma 63
4.1.6 Resistência ao Esmagamento 64
4.1.7 Teor de Argila 64
4.1.8 Teor de Material Pulverulento 64
4.1.9 Teor de Fragmentos Macios e Friáveis 64
4.1.10 Resistência às Intempéries 64
4.1.11 Fluorescência de raios-X 65
4.1.12 Determinação de CaO (livre) 65
4.1.13 Determinação de resíduo insolúvel 65
4.1.14 Determinação da perda ao fogo 65
4.1.15 Caracterização mineralógica 65
4.1.15.1 Difração de raios-X 66
4.1.16 Caracterização microestrutural 66
4.1.16.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) com EDS 66
4.1.17 Caracterização ambiental 66
4.1.18 Caracterização da expansibilidade 66
4.1.18.1 Expansibilidade: PTM 130/DER-MG 67
4.2 RESUMO DOS RESULTADOS DOS ÍNDICES FÍSICOS DO AGREGADO DE CADA SIDERÚRGICA 67
4.3 RESUMO DOS RESULTADOS DOS ÍNDICES QUÍMICOS DOS AGREGADOS DE CADA SIDERÚRGICA 69
5 COMPARATIVOS: *AGREGADO SIDERÚRGICO* X MATERIAL PÉTREO 73
6 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS 79

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 80
8 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS 82
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....83
10 ANEXOS 87
ANEXO A 88
ANEXO B 92
ANEXO C 98
ANEXO D 114
ANEXO E 117

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Vista geral (a), parcial da britagem (b) do lastro pétreo e estocagem (c). 21
Figura 2.2 Geração média dos principais resíduos siderúrgicos (IBS, 2006). ...27
Figura 2.3 Produção de Aço Bruto (milhões de toneladas) – (IBS, 2006). 29
Figura 3.1 Localização dos pontos para coleta de amostras parciais. 38
Figura 3.2 Basculação das amostras parciais. 40
Figura 3.3 Mistura e espalhamento das amostras parciais. 40
Figura 3.4 Quarteamento das amostras parciais. 41
Figura 3.5 Escolha das amostras parciais a serem utilizadas. 42
Figura 3.6 Amostras com granulometria conforme *NBR 5564: Via férrea – Lastro padrão* 49
Figura 3.7 Amostras com granulometria não conforme *NBR 5564: Via férrea – Lastro padrão* 50
Figura 3.8 Peneirador mecânico e série de peneiras utilizadas para composição granulométrica do *agregado siderúrgico*. 55
Figura 3.9 Fração retida na peneira de malha 25 mm da série de peneiras utilizadas. 55
Figura 3.10 Determinação da massa específica: peso seco. 56
Figura 3.11 Determinação da massa específica: peso submerso. 56
Figura 3.12 Determinação da absorção: material imerso por 48 horas. 57
Figura 3.13 Determinação da absorção: material saturado – superfície seca. 57
Figura 3.14 Determinação da absorção: pesagem do material saturado – superfície seca. 57
Figura 3.15 Equipamento da abrasão Los Angeles. 58
Figura 3.16 Determinação da abrasão Los Angeles: início do ensaio. 58
Figura 3.17 Equipamento de resistência ao choque “TRETON”. 58
Figura 3.18 Início do ensaio de resistência ao choque “TRETON”. 58
Figura 3.19 Determinação do índice de forma do *agregado siderúrgico*. 59
Figura 3.20 Medição das dimensões do *agregado siderúrgico* durante o ensaio. 59
Figura 3.21 Prensa hidráulica e equipamento para determinação da resistência ao esmagamento do *agregado siderúrgico*. 60
Figura 3.22 *Agregado siderúrgico* após a realização do ensaio de esmagamento. .60
Figura 3.23 Equipamento de difração de raios-X (POLISSENI, 2005). 60
Figura 3.24 Microscópio eletrônico de varredura (MEV). 61
Figura 3.25 Determinação da expansibilidade pelo método PTM 130/DER-MG: ensaio submerso. 61
Figura 5.1 Valores de resistência ao choque “TRETON” do *agregado siderúrgico*. .73

Figura B.1 Difratograma de raios-X do *agregado siderúrgico* – Usiminas 1,5” a 3”. 93
Figura B.2 Difratograma de raios-X do *agregado siderúrgico* – Usiminas 1” a 2”. ...93
Figura B.3 Difratograma de raios-X do *agregado siderúrgico* – Gerdau Guairá.....94
Figura B.4 Difratograma de raios-X do *agregado siderúrgico* – CST. 94
Figura B.5 Difratograma de raios-X do *agregado siderúrgico* – Gerdau Açominas..95
Figura B.6 Difratograma de raios-X do *agregado siderúrgico* – CSN. 95
Figura B.7 Difratograma de raios-X do *agregado siderúrgico* – Aços Villares. 96
Figura B.8 Difratograma de raios-X do *agregado siderúrgico* – Gerdau Cosigua. (ASELP) 96
Figura B.9 Difratograma de raios-X do *agregado siderúrgico* – Villares Metals. 97
Figura B.10 Difratograma de raios-X do *agregado siderúrgico* – Belgo Mineira/JF..97
Figura C.1 Micrografia do *agregado siderúrgico*. MEV – elétrons secundários – Ampliação 250x. Usiminas 1,5” a 3”. 98
Figura C.2 EDS do *agregado siderúrgico* – Usiminas 1,5” a 3”. 99
Figura C.3 Micrografia do *agregado siderúrgico*. MEV – elétrons secundários – Ampliação 250x. Usiminas 1” a 2”. 100
Figura C.4 EDS do *agregado siderúrgico* – Usiminas 1” a 2”. 100
Figura C.5 – Micrografia do *agregado siderúrgico*. MEV – elétrons secundários – Ampliação 250x. Gerdau Guaíra 101
Figura C.6 – EDS do *agregado siderúrgico* – Gerdau Guaíra 102
Figura C.7 Micrografia do agregado siderúrgico. MEV – elétrons secundários – Ampliação 250x. CST (Companhia Siderúrgica de Tubarão). 103
Figura C.8 EDS do *agregado siderúrgico* – CST. 103
Figura C.9 Micrografia do *agregado siderúrgico*. MEV – elétrons secundários – Ampliação 250x. Gerdau Açominas. 104
Figura C.10 EDS do *agregado siderúrgico* – Gerdau Açominas. 105
Figura C.11 Micrografia do *agregado siderúrgico*. MEV – elétrons secundários – Ampliação 250x. CSN (Companhia Siderúrgica Nacional). 106
Figura C.12 EDS do *agregado siderúrgico* – CSN. 106
Figura C.13 Micrografia do *agregado siderúrgico*. MEV – elétrons secundários – Ampliação 250x. Aços Villares. 107
Figura C.14 EDS do *agregado siderúrgico* – Aços Villares. 108
Figura C.15 Micrografia do *agregado siderúrgico*. MEV – elétrons secundários – Ampliação 300x. Gerdau Cosigua (ASELP). 109
Figura C.16 EDS do *agregado siderúrgico* – Gerdau Cosigua. 109
Figura C.17 Micrografia do *agregado siderúrgico*. MEV – elétrons secundários – Ampliação 300x. Villares Metals. 110
Figura C.18 EDS do *agregado siderúrgico* – Villares Metals. 111
Figura C.19 Micrografia do *agregado siderúrgico*. MEV – elétrons secundários – Ampliação 300x. Belgo Mineira/JF. 112
Figura C.20 EDS do *agregado siderúrgico* – Belgo Mineira/JF. 112
Figura E.1 Expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – Gerdau Açominas : a) expansão diária (%) e b) expansão acumulada (%). 118
Figura E.2 Expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – V&M TUBES: a) expansão diária (%) e b) expansão acumulada (%). 119
Figura E.3 Expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – CSN : a) expansão diária (%) e b) expansão acumulada (%). 120
Figura E.4 Expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – Belgo Mineira – João Monlevade: a) expansão diária (%) e b) expansão acumulada (%). 121

Figura E.5 Expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – Usiminas 1,5” a 3” (ASCLP): a) expansão diária (%) e b) expansão acumulada (%). 122
Figura E.6 Expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – Usiminas 1” a 2”: a) expansão diária (%) e b) expansão acumulada (%). 123
Figura E.7 Expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – Gerdau Cosígua: a) expansão diária (%) e b) expansão acumulada (%). 124
Figura E.8 Expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – Gerdau Cosígua: a) expansão diária (%) e b) expansão acumulada (%). 125
Figura E.9 Expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – Gerdau Guaíra: a) expansão diária (%) e b) expansão acumulada (%).....126
Figura E.10 Expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – CST: a) expansão diária (%) e b) expansão acumulada (%).....127
Figura E.11 Expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – Belgo Mineira – Juiz de Fora: a) expansão diária (%) e b) expansão acumulada (%). 128
Figura E.12 Expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – Aços Villares: a) expansão diária (%) e b) expansão acumulada (%).....129
Figura E.13 Expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – Villares Metals: a) expansão diária (%) e b) expansão acumulada (%). 130
Figura E.14 Expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – Cosipa: 131
Figura E.15 Expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – Barra Mansa: a) expansão diária (%) e b) expansão acumulada (%).....132

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 Produção mundial de aço bruto (Unidade: x10^6 t) (IBS, 2006).....25
TABELA 2.2 Produção de aço bruto da América Latina (Unidade: x10^3 t) (IBS, 2006). 26
TABELA 2.3 Produção de aço bruto por empresa no Brasil (Unidade: x10^3 t) (IBS, 2006). 26
Tabela 2.4 Composição típica de escória de aciaria elétrica, (GEYER, 2001). 29
Tabela 2.5 Composição química típica das escórias de refino oxidante (FEA e LD), escórias de refino redutor (FP), escórias de alto-forno (AF), e do cimento Portland comum (CP) no Brasil (GEYER, 2001). 30
Tabela B.1 Compostos mineralógicos 92
Tabela C.1 Resultados do EDS do *agregado siderúrgico* – Usiminas 1,5" a 3".....99
Tabela C.2 – Resultados do EDS do *agregado siderúrgico* – Usiminas 1" a 2".....101
Tabela C.3 Resultados do EDS do *agregado siderúrgico* – Gerdau Guairá. 102
Tabela C.4 Resultados do EDS do *agregado siderúrgico* – CST.....104
Tabela C.5 Resultados do EDS do *agregado siderúrgico* – Gerdau Açominas. 105
Tabela C.6 Resultados do EDS do *agregado siderúrgico* – CSN. 107
Tabela C.7 Resultados do EDS do *agregado siderúrgico* – Aços Villares. 108
Tabela C.8 Resultados do EDS do *agregado siderúrgico* – Gerdau Cosigua.....110
Tabela C.9 Resultados do EDS do *agregado siderúrgico* – Villares Metals. 111
Tabela C.10 Resultados do EDS do *agregado siderúrgico* – Belgo Mineira/JF. 113
Tabela D.2 Resultados do ensaio de lixiviação do *agregado siderúrgico* (NBR 10005/2004) 115
Tabela D.3 Resultados do ensaio de solubilização do *agregado siderúrgico* (NBR 10006/2004). 116
Tabela E.1 Ensaio de expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG 118
Tabela E.2 Ensaio de expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – .119
Tabela E.3 Ensaio de expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – .120
Tabela E.4 Ensaio de expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG 121
Tabela E.5 Ensaio de expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – ..122
Tabela E.6 Ensaio de expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG 123
Tabela E.7 Ensaio de expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG 124
Tabela E.9 Ensaio de expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – ..126
Tabela E.10 Ensaio de expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – 127
Tabela E.11 Ensaio de expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – 128
Tabela E.12 Ensaio de expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – 129
Tabela E.13 Ensaio de expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – 130
Tabela E.14 Ensaio de expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – 131
Tabela E.15 Ensaio de expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – 132

RESUMO

A reciclagem de resíduos tem contribuído para preservação de recursos naturais e do meio ambiente. O aproveitamento do agregado siderúrgico (escória) como lastro ferroviário é uma das alternativas a ser estudada. O objetivo desta pesquisa é por meio de ensaios de caracterização física (composição granulométrica, massa específica, absorção de água e porosidade resistência ao desgaste – abrasão Los Angeles, resistência ao choque "TRETON, índice de forma, resistência ao esmagamento, teor de argila, teor de material pulverulento, teor de fragmentos macios e friáveis, resistência às intempéries), química (Fluorescência de raios-X, determinação de CaO (livre), Determinação de resíduo insolúvel,), mineralógica (Difração de Raio X) , microestrutural (microscopia eletrônica de varredura com EDS), ambiental (lixiviação e solubilização) e de estudos sobre sua expansibilidade, (PTM 130/DER-MG), conhecer melhor esse semi-produto, de modo a permitir a elaboração de procedimentos e normas para o lastro ferroviário com o agregado siderúrgico. Os resultados experimentais a produção de forma conjugados com os dados disponíveis do material pétreo utilizados para lastro ferroviário. Apresenta-se o fluxograma da produção de aço e da produção do lastro com material pétreo. As amostras foram coletadas com procedimentos criados e discutidos com as siderúrgicas parceiras, procedimentos esses fundamentais nos valores dos resultados, pois é necessária sua padronização em todas as siderúrgicas, e em todas as ocasiões de estudo e utilização de lastro ferroviário com agregado siderúrgico. As siderúrgicas parceiras foram Gerdau Açominas,V & M Tubes, Companhia Siderúrgica Nacional – CSN, Belgo Mineira – Unidade João Monlevade, Usiminas, Gerdau Cosígua, Gerdau Guairá, Companhia Siderúrgica de Tubarão – CST, Belgo Mineira – Unidade Juiz de Fora, Aços Villares, Villares Metals, Cosipa e Siderúrgica Barra Mansa.

Palavras-chave: escoria de aciaria, agregado siderúrgico, lastro ferroviário.

ABSTRACT

The recycling of residues has been an opportunity of preservation of natural resources and of the environment. The use of the metallurgical aggregate (scum) as rail ballast is one of the opportunities to be studied. The objective of this research is, through essays of physical characterization (Grain composition, Specific mass, absorption of water and porosity, Resistance to the waste - Abrasion Los Angeles, Resistance to shock "TRETON", Form Index, Resistance to crushing, Clay tenor, Tenor of powdery material, Tenor of soft fragments and friable, Resistance to the intemperate weather), Chemical (Ray-X fluorescence, Determination of CaO (free), Determination of insoluble residue), Mineralogical (Diffraction of X-Ray), Microstructural (Electronic Sweeping Microscopy with EDS), Environmental (Lixiviation and Solubilization) and studies on its expansibility, (PTM 130/DER-MG), to know better this semi-product to have procedures and standards to produce the rail ballast with the metallurgical aggregate. With the obtained data we compared with the available data of the stone material used for rail ballast. We introduced the scheme of steel production and production of the ballast with stone material. The samples were collected with procedures created and discussed with the partners steel plants, procedures these, based in the results, because of it, is its standardization needful in all the steel plants and in all the study opportunities and use of rail ballast with having metallurgical aggregate. The steel plants partners were Gerdau Açominas,V & M Tubes, National Metallurgical company – CSN (Brazil), Belgo Mineira - Unit João Monlevade, Usiminas, Gerdau Cosígua, Gerdau Guairá, Metallurgical Company of Tubarão - CST, Belgo Mineira - Unit Juiz de Fora, Aços Villares, Villares Metals, Cosipa and Steel Plant Barra Mansa.

Key-words:

1 INTRODUÇÃO

1.1 VISÃO DE SUSTENTABILIDADE

As últimas décadas têm sido marcadas por profundas modificações no cenário socioeconômico mundial.

Com as perspectivas de crescimento do Brasil e com a necessidade premente de escoamento da produção e distribuição de matérias prima, a tendência da política estratégica é a descentralização das indústrias.

O meio mais econômico de transporte de materiais é, sem duvida, o ferroviário. Os órgãos responsáveis por este setor estão sinalizando o grande interesse do governo em investir na restauração e implantação das ferrovias nacionais.

Para que isto seja viável é necessário equalizar condições no sentido de viabilizar um plano estratégico para priorizar as ações. O maior problema na construção e manutenção das ferrovias é o respeito ao meio ambiente, isto é, o atendimento as normas e especificações dos órgãos fiscalizadores (COMITE TÉCNICO DO MEIO AMBIENTE – CT206 IBRACON).

Segundo SJÖSTRÖM (1996), desenvolvimento sustentável pode ser definido como uma forma de desenvolvimento econômico que “emprega os recursos naturais e o meio ambiente, não apenas em benefício do presente, mas também, das gerações futuras”.

Foi realizada pesquisa nos EEUU com 1500 construtores, projetistas e pesquisadores pela Civil Engineering Research Foundation (CERF). Essa entidade está a promover a modernização na construção civil, visando detectar quais as

tendências consideradas fundamentais para o futuro do setor. A questão ambiental foi considerada a segunda mais importante (JOHN, 1996).

Recentemente na cidade de Belo Horizonte – MG, na sede do CREA, no período de 16 a 18 de agosto de 2005, os profissionais da área tecnológica, integrantes do Sistema CONFEA/CREA e outros profissionais da engenharia, participaram da realização do Seminário Nacional Protocolo de Kyoto cujo enfoque estava voltado com a preocupação da sustentabilidade sócio-ambiental do planeta. A maior preocupação, dentre outras, foi com relação a gestão de resíduos sólidos (VERTICE-CREA-MG, 2005).

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho visa possibilitar a utilização do agregado siderúrgico (escória) como lastro ferroviário.

O Brasil produziu 50,4 milhões de toneladas de aço em 2005, o que gerou aproximadamente 21% de agregado siderúrgico (escória) (IBS, 2006),

Resíduos são subprodutos gerados pelo processo econômico, incluindo atividades extrativistas, produção industrial e de serviços, bem como em produtos consumo, até mesmo de preservação ambiental, como a microssílica, a escória de sintetização de resíduos urbanos, todos com emprego na construção civil (JOHN, 2005).

A construção civil usufrui cerca de 50% do total de recursos naturais consumidos pela sociedade (SJÖSTRÖM, 1996). As leis Brasileiras estão disciplinando e organizando a exploração de nossos recursos naturais. O processo utilizado na obtenção do lastro ferroviário pétreo utilizado até então na quase totalidade das ferrovias nacionais tem se tornado antieconômico e de difícil exploração no atendimento das normas brasileiras.

O incentivo à reciclagem deve ser então uma parte importante de qualquer política ambiental (JOHN, 1997).

Muito se tem falado sobre desenvolvimento sustentável nos dias atuais. O desenvolvimento sustentável não é estritamente técnico, ao contrário, trata-se de uma visão holística integrando conceitos ambientais, econômicos, tecnológicos e sociais, com o objetivo de alcançar uma produção industrial em harmonia com o meio ambiente e, concomitantemente, agregando o maior valor social e econômico possíveis (IBRACON, 2005).

Para atender ao meio ambiente o desenvolvimento econômico sustentável deixou de ser uma bandeira de ecologistas sonhadores para ser um conceito importante na comunidade de nações. A certificação ambiental retratada na série ISO14000 e que já está em implementação no Brasil, é a parte mais visível desta mudança (JOHN, 2005).

Independente do ponto de vista adotado, a “questão ambiental” deverá modificar todo o paradigma de desenvolvimento e avaliação de projetos (JOHN, 2005).

1.3 JUSTIFICATIVAS

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

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

Nos últimos anos é crescente a tendência do setor produtivo, que gera um determinado resíduo, ofertar este resíduo a outro setor produtivo que poderá utilizá-lo como insumo minimizando, assim, um de seus problemas no processo de produção. O setor da construção civil por consumir grandes quantidades de

materiais é vislumbrado como um setor que tem grande potencial para consumir os resíduos gerados por outros setores. Esta parceria já vem acontecendo entre o setor siderúrgico e o setor da construção civil. As escórias de alto-forno a coque, geradas no processo de fabricação do ferro-gusa, são consumidas em larga escala para a produção dos cimentos Portland composto (CPII E) e de alto-forno (CPIII). O mesmo ocorre com as cinzas volantes geradas nas usinas termoelétricas, que são utilizadas na produção do cimento Portland pozolânico (CPIV).

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

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

A proposta deste trabalho está em conformidade com a linha de pesquisa do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFF, que pesquisa e potencializa a viabilidade da utilização de novos materiais no setor da construção civil.

1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA

A estrutura da pesquisa está fundamentada em nove capítulos.

- no primeiro capítulo apresenta-se a utilização da escória de aciaria como agregado siderúrgico, sendo que na introdução, ressalta-se a importância da reciclagem do agregado siderúrgico, bem como, os objetivos e justificativa da pesquisa;

- no segundo capítulo são apresentadas as contextualizações, ressaltando-se a produção de lastro ferroviário com material pétreo, com o fluxograma de britagem, a produção de aço e o agregado siderúrgico com histórico e

estatísticas de sua produção, e o fluxograma da produção do aço até a obtenção do agregado siderúrgico;

- no capítulo três é abordada a metodologia do processo para amostragem de lote de agregado siderúrgico para lastro padrão com seu respectivo fluxograma. São relacionados os locais de coletas de amostras, os ensaios e os equipamentos utilizados para sua realização;
- no capítulo quatro são apresentados os resultados dos ensaios com o agregado siderúrgico e suas respectivas discussões;
- no capítulo cinco são mostrados os comparativos dos resultados dos ensaios de agregados siderúrgicos das 15 usinas, bem como com os resultados de ensaios do material pétreo;
- no sexto capítulo é realizada uma análise estatística dos resultados;
- o sétimo capítulo mostra as conclusões e recomendações obtidas por meio da pesquisa;
- no capítulo oitavo, são apresentadas sugestões para futuros trabalhos.

2 METODOLOGIA DO DESENVOLVIMENTO DA DISSERTAÇÃO

2.1 PRODUÇÃO DE LASTRO FERROVIARIO COM MATERIAL PÉTREO BRITADO

Visando uma análise sobre a otimização de produção de lastro ferroviário em plantas de britagem devem ser considerados alguns aspectos importantes que irão balizar as ações na produção do agregado.

A escolha do tipo de rocha é a primeira condição a ser buscada. O agregado deverá ser de alta resistência, com baixo Índice de Abrasão Los Angeles, nunca superior a 40% (ABNT – NBR 5564 Via férrea - lastro padrão) devido ao atrito entre as partículas, o que provoca a desagregação dos grãos, evitando assim um abatimento e um conseqüente desnivelamento da linha, acarretando constantes intervenções na restituição da condição ideal da ferrovia.

A próxima etapa é a configuração da melhor malha de furação para a geração de material detonado com a menor presença possível de finos nos desmontes, com razão de carga adequada á perfeita fragmentação do maciço em dimensões acima do corte superior da faixa granulométrica que se deseja obter para o lastro ferroviário. A faixa usualmente utilizada é bem distribuída entre 32 mm e 54 mm em seus limites inferior e superior, respectivamente. O dimensionamento adequado dos bancos das frentes de lavra, dos equipamentos de perfuração e do tipo de explosivo irá determinar a configuração dos volumes possíveis de produção que irão atender a demanda exigida do empreendimento. Não se deve esquecer da condição inicial de lavra que demanda atenção em função da escala que se irá atingir dentro de uma programação prévia de consumo e cuja produtividade é diretamente afetada em função das dimensões iniciais dos bancos, ainda restrita pela não conformidade em termos de posicionamento dos equipamentos de forma adequada, de baixas

profundidades possíveis nos primeiros fogos em relação a topografias ainda não estabelecidas dentro da configuração ideal. Observa-se que esses aspectos são todos previstos num bom planejamento de lavra, onde a engenharia de minas é exigida em todos os aspectos citados.

As pedreiras comerciais que já têm condição de operação exercida há vários anos, têm em suas instalações todos os aspectos necessários previstos para a produção da brita em questão, com a vantagem do aproveitamento integral dos vários produtos gerados abaixo da faixa especificada, gerando maior aproveitamento da exploração mineral. Este aspecto se torna relevante diante a constatação de que no mínimo 40% dos materiais gerados na cominuição da rocha, nos primeiros estágios de britagem, serão abaixo da faixa ideal para lastro ferroviário, ou seja, abaixo de 32 mm. Cada estágio a mais que se fizer necessário para a redução da rocha até atingir as dimensões citadas irão provocar a geração de produtos finos (abaixo do limite inferior), o que acarretará menor rendimento por m^3 detonado na geração de lastro. Uma tendência favorável sobre esse ponto é a busca da substituição dos dormentes de madeira por concreto, o que leva à demanda dos materiais não aproveitados para geração de lastro, como brita 2, 1, 0 e finos.

A planta de britagem deverá ter no mínimo três estágios, sendo:

1) *Britagem Primária*: britador de mandíbulas convencional com dimensão mínima de 80 cm de boca, abertura mínima de saída (APF) de 5” para geração de agregados com dimensões máximas de 13”.

2) *Britagem Secundária*: britador cônico dimensionado com boca de alimentação para receber as dimensões geradas pelo estágio anterior e com abertura suficiente para a geração do produto em questão, lastro ferroviário. Nesse estágio é que se dará a realização do maior volume do lastro, e deverá ser operado visando a abertura ótima da máquina em função da variação do agregado de alimentação, que apresenta faixa consideravelmente grande, exigindo atenção do operador para que se evite esforço além do necessário na britagem, que acarretará geração de materiais mais finos que o necessário.

3) *Britagem Terciária*: este estágio é o final para a geração do lastro ferroviário, que deverá ser alimentado em processo fechado, ou seja, com um pulmão que permita a perfeita alimentação do britador (Hidrocone) em situação de máxima abertura, com carga circulante alta, promovendo a redução ideal do oversise da peneira de 54 mm, gerando o máximo de produto dentro da faixa ideal. Essa abertura máxima será função também da menor geração de finos possível. Esse procedimento levará a uma melhor conformação do agregado em relação a sua forma, promovendo um maior arredondamento dos grãos. Sobre o aspecto do índice de forma na produção de lastro ferroviário, não se tem a preocupação devido ao grande espaço vazio que é gerado pelo tamanho do agregado, porém, permite um melhor preenchimento do volume estabelecido do lastro com distribuição de carga favorecida, gerando menor solicitação na estrutura, e conseqüentemente menor desgaste dos grãos na dinâmica de utilização da via.

As especificações dos equipamentos para uma planta de britagem deverão atender aos aspectos descritos anteriormente e todos os fabricantes disponibilizam as informações sobre os britadores no objetivo de atender às necessidades presentes. Hoje no Brasil tem-se os maiores fabricantes de britadores do mundo, com variada linha de produção e opções sempre adequadas ao uso específico de demanda.

Na Figura 2.1. são mostrados os detalhes da vista geral (a), vista parcial da britagem (b) e a estocagem do lastro pétreo (c).

(a)

(

(b)

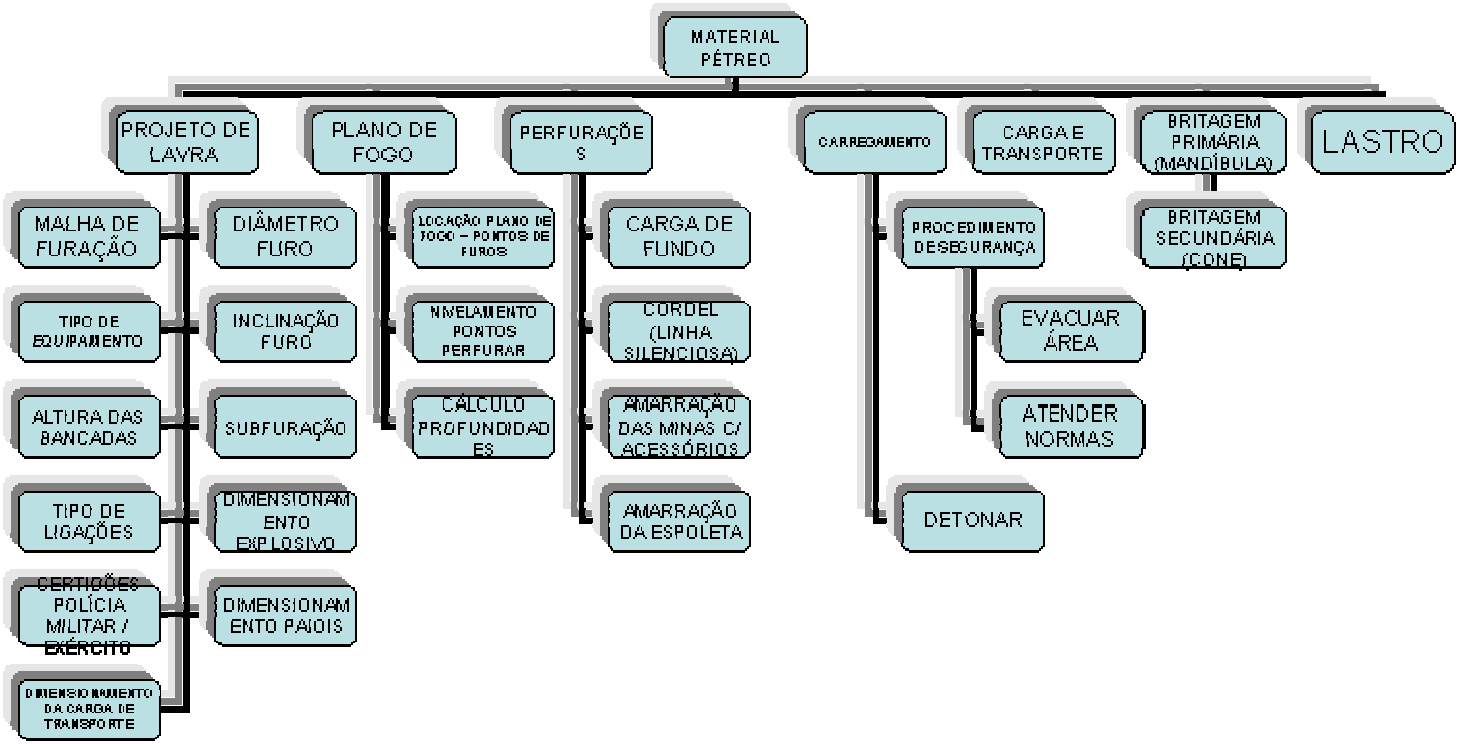
(

(c)

Figura 2.1. Vista geral (a), parcial da britagem (b) do lastro pétreo e estocagem (c).

No item 2.1.1, apresenta-se fluxograma com etapas necessárias à produção de lastro ferroviário, utilizando material pétreo com as devidas preocupações com a segurança de todo o sistema.

2.1.1 Fluxograma do processo de britagem



2.2 PRODUÇÃO DE AÇO E O AGREGADO SIDERÚRGICO DE ACIARIA

2.2.1 Histórico e estatísticas da produção do aço

O processo de produção do aço por conversor a oxigênio foi idealizado por Henry Bessemer em 1856. As primeiras experiências de sopro de oxigênio em conversor na superfície de metais fundidos foram testadas por Durrer e Schartz em 1938. Em 1947, estes utilizaram sopro de oxigênio em metais fundidos por meio de lanças refrigeradas. A primeira produção de aço neste processo deu-se em 1948. No ano de 1952 entrou em operação uma usina na Áustria, na cidade de Linz, com capacidade de produção de 250 mil toneladas / ano. Em 1953, também na cidade austríaca de Donawitz, deu-se início a produção de aço pelo mesmo processo, o que se disseminou por diversos países do mundo. Esse processo ficou conhecido como "LD" (Linz – Donawitz) ou BOF (Basic Oxigen Furnace). Essa denominação foi também utilizada para referência aos conversores a oxigênio (POLISSENI apud MUNDIN, 1985).

Em 1920 iniciou-se a extração dos minérios em Itabira do Mato Dentro, em Minas Gerais, em conseqüência de um contrato assinado pelo governo do Brasil com a "Itabira Iron Ore Company", sendo seu transporte realizado pela estrada de ferro Vitória-Minas até o Porto de Santa Cruz, no estado do Espírito Santo. Em 1938 o Brasil já produzia 92,4 mil toneladas de aço por ano com 11 pequenas empresas siderúrgicas trabalhando com carvão vegetal. Com o término do contrato com a "Itabira Iron Ore Company" em 1939, iniciam-se os primeiros contatos para implantação da Siderúrgica Nacional. Em 1940, por meio do decreto lei 1108 é criada a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN). A produção de aço iniciou-se a partir do ano de 1946 (POLISSENI *apud* ENCICLOPÉDIA, 1991).

A produção brasileira de aço bruto em 2005 foi de 31,61Mt. O Brasil ocupa a 9ª posição relativa no mundo e a 1ª na América Latina (IBS, 2006).

A Tabela 2.1 mostra os dados relativos á produção mundial de aço bruto, evidenciando o Brasil como o nono produtor. Verifica-se também o crescimento acentuado e constante da China, que teve, a partir do ano de 2001 um crescimento

em torno de 25% ao ano, chegando a espetacular produção de 394,4 x10^6 t, sendo sua produção 210% acima da produção do Japão, que é o 2° do *ranking*.

TABELA 2.1 Produção mundial de aço bruto (Unidade: x10^6 t) (IBS, 2006).

PAÌS	2000	2001	2002	2003	2004	2005
China	127,2	150,9	181,6	220,1	280,5	349,4
Japão	106,4	102,9	107,7	110,5	112,7	112,5
EUA	101,8	90,1	92,2	90,4	99,7	93,3
Rússia	59,1	59,0	59,8	62,7	65,6	66,1
Coréia do Sul	43,1	43,9	45,4	46,3	47,5	47,8
Alemanha	46,4	44,8	45,0	44,8	46,4	44,5
Ucrânia	27,9	26,7	29,6	36,9	38,7	38,6
Índia	26,9	27,3	28,8	31,8	32,6	38,1
Brasil	**27,9**	**26,7**	**29,6**	**31,1**	**32,9**	**31,6**
Itália	26,8	26,5	26,1	26,7	28,5	29,2
França	21,0	19,3	20,3	19,8	20,5	21,0
Formosa	16,9	17,3	18,2	18,9	20,8	19,5
Turquia	14,3	15,0	16,5	18,3	19,6	18,6
Espanha	15,9	16,5	16,4	16,5	17,6	17,8
Canadá	16,6	15,3	16,0	15,9	16,7	16,2
México	15,6	13,3	14,1	15,1	16,3	15,3
Reino Unido	15,2	13,5	11,7	13,0	13,8	13,2
Bélgica	11,6	10,8	11,3	11,1	11,7	10,4
África do Sul	8,5	8,8	9,1	9,5	9,5	9,5
Polônia	10,5	8,8	8,4	9,1	8,7	9,4
Austrália	7,1	7,0	7,5	7,5	10,6	8,4
Irã	6,6	6,9	7,3	7,9	7,4	7,8
Rep. Tcheca	6,2	6,3	6,5	6,8	6,5	7,0
Áustria	5,7	5,9	6,2	6,3	6,8	6,9
Holanda	5,7	6,0	6,1	6,6	5,7	6,3
Suécia	5,2	5,5	5,8	5,7	7,0	6,2
Romênia	4,8	4,9	5,5	5,7	6,0	6,2
Cazaquistão	4,8	4,7	4,8	4,9	6,0	5,7
Argentina	4,5	4,1	4,4	5,0	5,1	5,4
Rep. Eslovaca	3,7	4,0	4,3	4,6	4,6	4,9
Venezuela	3,8	3,8	4,2	3,9	4,8	4,7
Finlândia	4,1	3,9	4,0	4,8	5,4	4,5
Indonésia	2,8	2,8	2,8	4,8	4,5	4,5
Outros	39,1	40,6	41,2	41,7	45,8	48,8
TOTAL	**847,6**	**850,2**	**902,2**	**964,7**	**1.066,5**	**1.129,3**

FONTE: Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS, 2006).

Verifica-se a partir da Tabela 2.2 que o Brasil é o maior produtor de aço bruto da América Latina, produzindo no ano de 2005, 31,61 x10^3 t, produção essa que se manteve estável nos últimos três anos.

TABELA 2.2 Produção de aço bruto da América Latina (Unidade: x10^3 t) (IBS, 2006).

PAÌS	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Brasil	27.865	26.717	29.604	31.147	32.909	31.610
México	15.631	13.300	14.051	15.128	16.730	16.194
Argentina	4.479	4.112	4.363	5.033	5.126	5.382
Venezuela	3.835	3.813	4.164	3.930	4.561	4.907
Chile	1.352	1.247	1.280	1.377	1.579	1.537
Trinidad e Tobago	742	668	817	903	730	842
Colômbia	660	638	663	614	726	798
Peru	751	690	611	668	815	712
Cuba	336	270	268	210	291	256
América Central	246	240	265	283	192	245
Paraguai	77	71	80	91	107	101
Equador	58	60	67	80	72	84
Uruguai	38	31	34	41	58	64
TOTAL	**56.070**	**51.857**	**56.267**	**59.505**	**63.896**	**62.723**

FONTE: Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS,2006).

A relação de empresas produtoras de aço bruto no Brasil é mostrada na Tabela 2.3.

TABELA 2.3 Produção de aço bruto por empresa no Brasil (Unidade: x10^3 t) (IBS, 2006).

Empresa (Estado)	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Acesita	856	786	709	749	835	753
Aços Vilares	660	602	700	774	816	680
Barra Mansa	393	392	387	421	564	579
Belgo-Arcelor Brasil	2.571	2.668	2.827	2.889	3.250	3.272
CSN	4.782	4.048	5.107	5.318	5.518	5.201
CST – Arcelor Brasil	4.752	4.784	4.904	4.812	4.958	4.850
Gerdau	6.116	5.826	5.999	.976	7.284	6.889
MWL Brasil	24	31	24	36	-	-
V & M do Brasil	519	500	500	551	611	592
Usiminas / Cosipa	7.184	7.080	8.447	8.621	8.951	8.661
TOTAL	**27.865**	**26.717**	**29.604**	**31.147**	**32.909**	**31.610**

FONTE: Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS, 2006).

2.2.2 Dados sobre a geração, tipos de resfriamento, processos de beneficiamento e as oportunidades de utilização das escórias.

Os resíduos siderúrgicos gerados na fabricação do aço são os pós, as lamas e as escórias. São necessárias pesquisas no sentido de se conhecer melhor o agregado siderúrgico, pois com o crescimento da produção torna-se necessário oportunizar a reciclagem desse produto.

2.2.2.1 A Geração das escórias

Verifica-se na Figura 2.2 que o maior insumo gerado na fabricação do aço são as escórias, com 77% do montante de resíduos gerados.

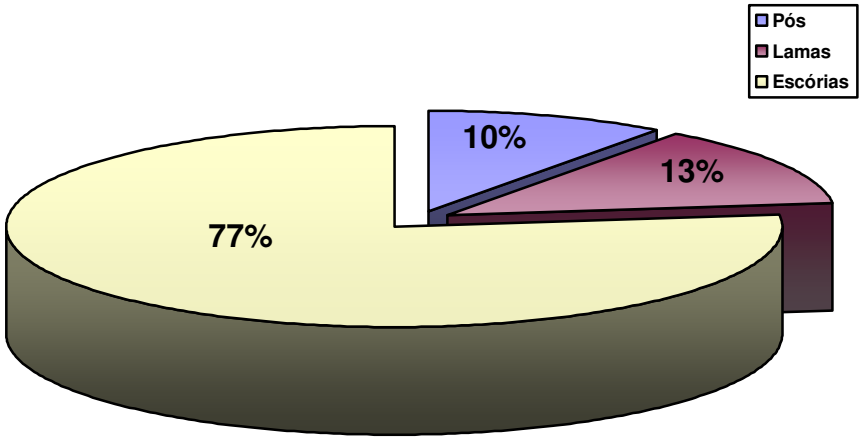


Figura 2.2 Geração média dos principais resíduos siderúrgicos (IBS, 2006).

Segundo POLISSENI (2005), o Instituto Brasileiro de Siderurgia, no ano de 1999 encomendou às empresas SETEPLA TECHNOMETAL e ARTHUR D. LITTLE Ltd. uma pesquisa que teve por objetivo diagnosticar a prática de gestão e as oportunidades de aplicações das escórias siderúrgicas nos seguintes países: Brasil, Estados Unidos, Canadá, Reino Unido, França, Alemanha, Itália, Japão e Coréia do Sul. Os principais pontos que se destacaram na pesquisa foram:

- mundialmente as aplicações mais usuais para a escória de alto-forno são a fabricação de cimento, a produção de concreto e a construção de estradas. Os principais usos da escória de aciaria são: a construção de estradas, a

reciclagem como carga de alto-forno e a preparação, recuperação e nivelamento de terrenos;

- a escória pode ser usada com retorno econômico para as siderúrgicas, como alternativa a agregados naturais (brita e areia), ou como matéria-prima para a produção industrial de cimento, lã mineral e fertilizantes;

- as aplicações com maiores potenciais de atratividade para a siderurgia brasileira são:

    - escória granulada de alto-forno: fabricação de cimento e produção de concreto;

    - escória de alto-forno resfriada ao ar: produção de lã mineral e construção de estradas;

    - escórias de aciaria: construção de estradas, lastro de ferrovias e usos agronômicos (corretivo de solos ou produção de fertilizantes fosfatados);

- em nenhum dos países pesquisados, as escórias são classificadas como resíduos perigosos ou não passíveis de reciclagem. A utilização intensiva das escórias siderúrgicas em aplicações industriais vem determinando a própria adequação do material em termos técnicos e ambientais;

- as normas técnicas e procedimentos referentes às principais aplicações da escória a consideram matéria-prima ou agregado de uso corrente, do mesmo modo que é especificado para os materiais concorrentes;

- em alguns países há regulamentos e incentivos para evitar a disposição de escórias em aterros. No Reino Unido são produzidos cimentos com 100% da escória, o “slag cement”, e nos países asiáticos há subsídios ao transporte e entrega das escórias nos locais onde serão utilizadas.

- a quantidade de escória produzida é significativa. No total dos nove países pesquisados, inclusive o Brasil, há uma produção anual de 71 milhões de

toneladas de escória de alto-forno e de 47 milhões de toneladas de escória de aciaria (Figura 2.3).

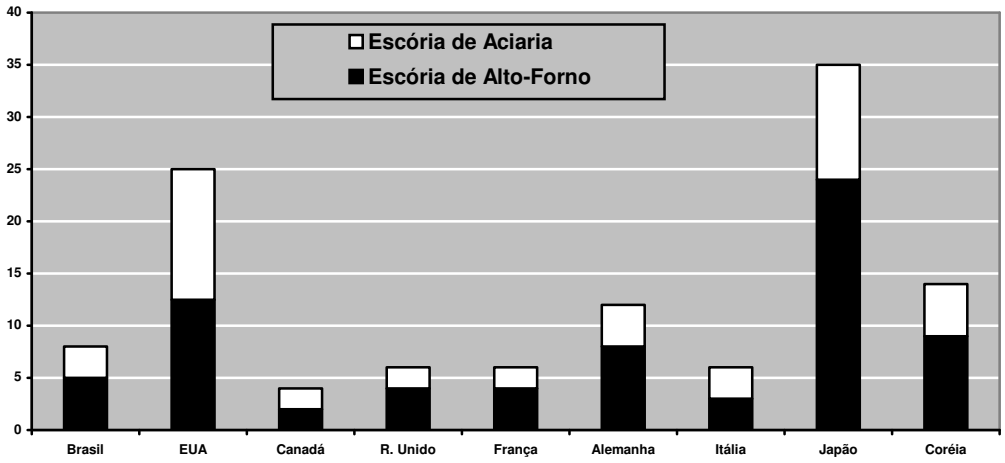


Figura 2.3 Produção de Aço Bruto (milhões de toneladas) – (IBS, 2006).

As escórias consistem basicamente de CaO, MgO, SiO_2 e Al_2O_3, óxidos de ferro e traços de outros elementos químicos.

A escória de alto-forno difere quimicamente da escória de aciaria principalmente no que diz respeito ao pequeno teor de ferro contido e no menor índice de basicidade, conforme mostram as Tabelas 2.4 e 2.5.

Tabela 2.4 Composição típica de escória de aciaria elétrica, (GEYER, 2001).

País	**Geração (kg / t)**	**Ca O (%)**	**Mg O (%)**	**Si O_2 (%)**	**Al_2 O_3 (%)**	**Fe_2O_3 (%)**	**MnO (%)**	**P_2O_5 (%)**	**S (%)**
Japão	127	40	4	25	5	19	7	-	0,06
Suécia	100	46	5	11	5	28	4	0,7	-
EUA	160	41	10	17	8	18	4	0,6	0,2
Alemanha	120	32	10	15	4	31	4	1,4	0,1
Brasil	**150**	**33**	**10**	**18**	**6**	**30**	**5**	**-**	**-**
Itália	120	41	8	14	7	20	6	0,9	0,1
Média	**100-160**	**32-46**	**4-10**	**11-25**	**4-8**	**18-31**	**4-7**	**0,6-1,4**	**0,1-0,2**

Tabela 2.5 Composição química típica das escórias de refino oxidante (FEA e LD), escórias de refino redutor (FP), escórias de alto-forno (AF), e do cimento Portland comum (CP) no Brasil (GEYER, 2001).

Composição Química	FEA (%)	FP (%)	LD (%)	AF (%)	CP comum (%)
CaO	30-35	45-55	6-45	42	61-67
SiO_2	15-20	20-25	7-16	34	20-23
MgO	8-12	8-12	1-9	6	0,8 – 1,0
Al_2O_3	3-9	3-9	1-4	14	4,5-7,0
FeO	25-35	0,5-3,5	8-30	0,35	-
MnO	3-6	0,5-3,5	3-7	-	-
TiO_2	-	-	-	0,50	-
F_2O_3	-	-	-	-	2-3,5
SO_3	-	0,5	-	-	0-3,0
Álcalis (K_2O + Na_2O)	-	-	-	-	0,14 - 1,5
CaO Livre	-	-	0-8	-	1,0 – 1,5
P_2O_5	-	-	1,6	-	-
S	-	-	0,13	-	-
Cr_2O_3	-	-	0,35	-	-
Basicidade i = CaO/SiO_2	1,75-2,00	2,2-2,25	0,86-2,8	1,23	2,91-3,05

As características das escórias são afetadas pela sua composição química e pelo método de resfriamento empregado. Em função de grandes quantidades de sucatas utilizadas para se produzir o aço na aciaria elétrica, essas escórias apresentam maior quantidade de impureza (Cr, Ni, Cu, Sn e Mn) que as escórias geradas no conversor LD (IBS, 2006).

2.2.2.2 As oportunidades de utilização das escórias de aciaria

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

- em camadas de aterro que não possuam contenção lateral, isto é, possam permitir a expansão sem prejuízo da camada final do aterro;

- em aterros de regiões cujo nível da água é bastante elevado e não tenham qualquer confinamento;
- na execução de revestimento primário de ruas e avenidas onde o material aplicado ficará exposto sem confinamento;
- na execução de pátios para manobra de veículos, não sendo recomendada para áreas de estocagem de produtos acabados.

No Brasil já é uma realidade a comercialização da escória de aciaria para uso em pavimentos e aterros. Porem a escoria de aciaria pode encontrar outras aplicações.

As oportunidades de utilização das escórias de aciaria são:

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

2.2.2.3 Utilização de escória em obras rodoviárias e lastro ferroviário

As vantagens da utilização das escórias de aciaria em substituição às britas naturais são: não requerem custos de britagem após a saída da siderúrgica, necessitando apenas de peneiramento com o intuito de adequar a granulometria, têm alta resistência à abrasão (ALBERNAZ *et al*. 2000).

A reciclagem de escória é comum desde o início do século XX. Em 1903 na Inglaterra, E. Purnell Hooley utilizou escória de alto-forno como agregado em misturas asfálticas. As escórias de aciaria são utilizadas como britas em bases e

sub-bases de rodovias há mais de 90 anos e em misturas asfálticas desde 1937 (FEATHERSTONE, 1999).

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

Um impedimento para o uso das escórias de aciaria é o alto custo do transporte, sendo que para se viabilizar economicamente a sua utilização, a distância média de transporte não deve ultrapassar 50 km (SILVA *et al*. 2001).

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

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

No mundo já foram executadas inúmeras obras rodoviárias e ferroviárias que utilizaram escórias de aciaria com sucesso, principalmente em regiões próximas às usinas onde foram geradas (NOUMAN *et al*. 1992; KRASS, 1978, HIRANO, 1984).

Segundo POLISSENI (2005), no Brasil são registradas com sucesso algumas obras de engenharia rodoviária utilizando a escória de aciaria:

- Aeroporto da Usiminas – MG – Pátio de pouso e decolagem (2,0 km) (ALBERNAZ *et al*. 2000);

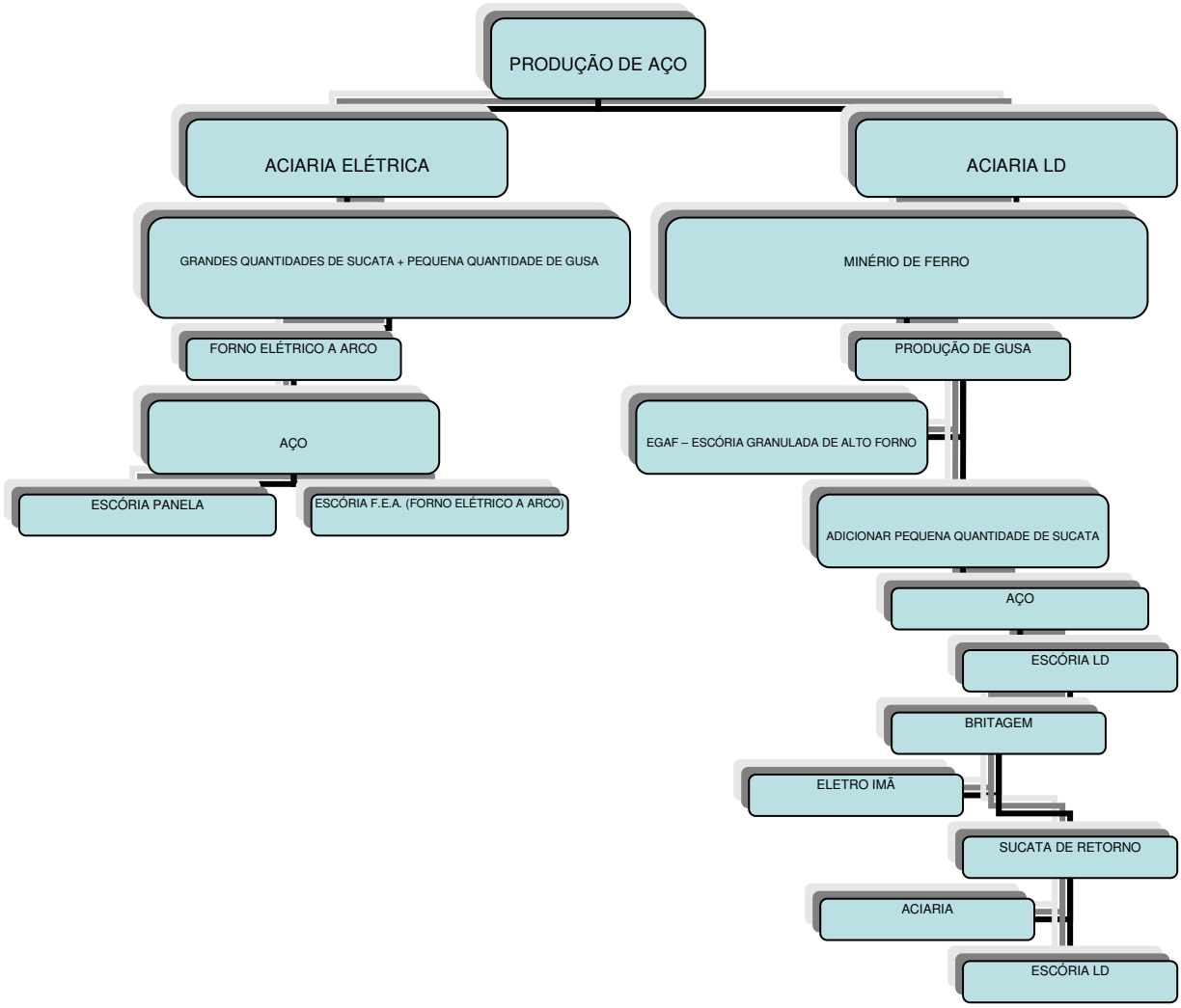
- Acesso a Ipaba – MG (5,0 km) (ALBERNAZ *et al*. 2000);
- Construção do Porto Seco em Juiz de Fora – MG (PACHECO e MARANGON, 1997).
- Construção do contorno rodoviário da cidade de Volta Redonda – RJ (FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE JUIZ DE FORA, 2002).
- Acesso ao Porto de Praia Mole – Vitória – ES (ROSSI, 2003).
- Aterro sobre solo mole, sub-base e capas asfálticas na BR 303 – Vitória – ES (SILVA, 2001).
- Experiências com agregado siderúrgico na cidade de Praia Grande – SP (FILHO, 2003).
- Pavimentos de alto desempenho estrutural executados com escória de aciaria – DER MG / USIMINAS (NASCIMENTO e ALBERNAZ, 2003).
- Avenidas internas da Companhia Siderúrgica de Tubarão – Vitória – ES (LANA, 2003c).
- Qualidade e economia no pavimento de ruas do município de Serra – ES (DADALTO, 2003).
- Pavimentação urbana em Mogi das Cruzes – SP, Volta Redonda – RJ e Três Rios – RJ (COSIPA, 2003).
- Revestimento do pátio de “containers” da COSIPA – SP (COSIPA, 2003).
- Pavimentação da terceira zona residencial de Praia Grande – SP (COSIPA, 2003).
- Regularização de solo e aplicação do pavimento econômico do condomínio Guaratuba – SP (COSIPA, 2003).

- Pavimentação de estradas vicinais e vias públicas DERSA / DNER – SP (aproximadamente 300 km) (COSIPA, 2002).

- Pavimentação da Via Dutra (trecho de Resende – RJ) (COSIPA, 2003).

No item 2.2.3 apresenta-se fluxograma da produção do aço em aciaria elétrica e aciaria LD, até a obtenção das respectivas escórias.

2.2.3 FLUXOGRAMA DA PRODUÇÃO DE AÇO



3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 METODOLOGIA

3.1.1 PROCEDIMENTO PARA AMOSTRAGEM DE LOTE DE AGREGADO SIDERURGICO PARA LASTRO PADRÃO

É necessária a padronização do procedimento de coleta de amostras em todas as siderúrgicas do país. Para que isto seja possível temos que ter normas e especificações. Sendo assim, pode-se comparar os resultados de agregados siderúrgicos (escória) de fontes diferentes, pois o processo de coleta será sempre representativo.

Nesta pesquisa o *agregado siderúrgico* é visto como uma oportunidade de utilização em *lastro padrão de ferrovias* e os *procedimentos de amostragem* apresentados nesta fase inicial são específicos para esta finalidade.

Para realização da pesquisa serão coletadas amostras de *agregado siderúrgico* em três formas distintas de produção *(virgem, envelhecida e comercial)*, em função da disponibilidade de cada siderúrgica.

O objetivo é estabelecer *os procedimentos para a amostragem de agregado siderúrgico* desde a sua produção, coleta e transporte de amostras, as mais representativas possíveis de cada lote de *agregado siderúrgico* formado, a serem destinadas a ensaios de laboratório.

3.1.2 Definições

a) ***Agregado siderúrgico para lastro ferroviário***: material granular, sem forma e volume definidos, gerado nas aciarias e produzido segundo as faixas granulométricas definidas pelas especificações (Tabela 3.1):

Tabela 3.1 Faixas granulométricas do agregado siderúrgico para lastro ferroviário.

Lado da malha da peneira (mm) NBR NM-ISO 3310-1		Porcentagem em massa acumulada (%)		
		Padrão A	Padrão B	Padrão comercial produzido pela siderúrgica
	1	2	3	4
1	76,2	–	0 – 0	n.e.
2	63,5	0 – 0	0 – 10	n.e.
3	50,8	0 – 10	–	n.e.
4	38,0	30 – 65	40 – 75	n.e.
5	25,4	85 – 100	–	n.e.
6	19,0	–	90 – 100	n.e.
7	12,0	95 – 100	95 – 100	n.e.

* n.e. – não especificado

b) ***Agregado siderúrgico virgem para lastro padrão (ASVLP)***: Agregado produzido segundo as faixas granulométricas da Tabela 4.1., sendo logo depois de estocado para envelhecimento.

c) ***Agregado siderúrgico envelhecido para lastro padrão (ASELP)***: Agregado produzido segundo as faixas granulométricas da Tabela 4.1., e que se encontra estocado a mais de seis meses.

d) ***Agregado siderúrgico comercial para lastro padrão (ASCLP)***: *Agregado siderúrgico* produzido segundo a faixa granulométrica da siderúrgica que realiza a sua comercialização conforme solicitação do cliente.

e) ***Lote de agregado siderúrgico***: É a quantidade de *agregado siderúrgico para lastro padrão (ASVLP, ASELP e ASCLP)* produzido para coleta, devendo possuir volume mínimo de 1.200 m^3 (20 m x 20 m x 3 m).

f) ***Amostra representativa***: Conforme a norma *NBR 10.007 – Amostragem de resíduos (ABNT, 1987)*, uma amostra representativa é definida como uma parcela do resíduo a ser estudado, obtida por meio de um processo de amostragem que apresenta as mesmas características e propriedades da massa total de resíduos.

g) ***Amostra parcial***: Consiste de 30 parcelas individuais coletadas do *lote de agregado siderúrgico* para a formação da amostra composta.

h) ***Amostra composta***: Conforme sugere a norma NBR 10.007, consiste na soma de parcelas individuais do resíduo, retiradas de pontos e profundidades diferentes da pilha.

i) ***Amostra de campo***: É a porção representativa de um lote de *agregado siderúrgico* coletado e reduzido até a quantidade necessária para a execução de ensaios de laboratório.

j) ***Praça de trabalho de amostragem***: É a região que receberá as amostras parciais para sua mistura, homogeneização e quarteamento. O local deverá ser limpo, rígido e plano com dimensões mínimas de 10 m x 10 m.

3.2 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE A AMOSTRAGEM

A amostragem é tão importante quanto os *ensaios de caracterização e qualificação*, por isso devem ser tomadas todas as precauções necessárias para que se obtenham ***amostras representativas***.

O volume para a coleta de *amostras parciais* deverá ter dimensões de 20 m de diâmetro e altura de 3 m, cujos pontos estarão distribuídos e localizados conforme apresentado na Figura 3.1.

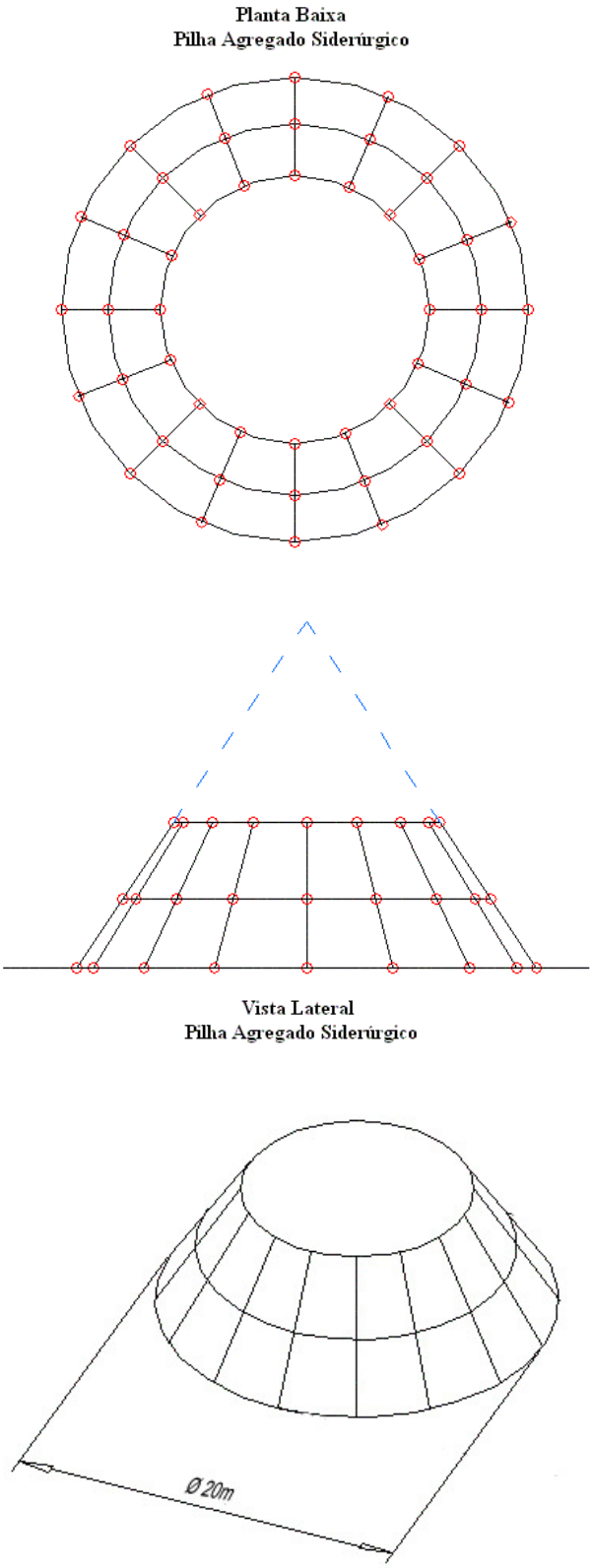


Figura 3.1 Localização dos pontos para coleta de amostras parciais.

As *amostras parciais*, tomadas em diferentes pontos do lote de *agregado siderúrgico*, devem representar todas as possíveis variações do material, tanto quanto à qualidade e características, bem como as condições em que é encontrado.

3.2.1 Procedimentos de amostragem

a) Para o *agregado siderúrgico* se faz necessário a utilização de equipamento mecanizado (retroescavadeira) capaz de formar um *lote de agregado siderúrgico* de dimensões definidas, de maneira segura, na qual podem ser coletadas diversas *amostras parciais* para a formação da *amostra composta*.

b) O número de *amostras parciais* deve ser suficiente para abranger todas as possíveis variações e assegurar representatividade da amostra. Assim, fixa-se a coleta de 30 pontos de *amostras parciais*, de forma a gerar um volume mínimo de ***5 m³***. Os pontos de coleta serão demarcados no *lote de agregado siderúrgico* segundo disposição apresentada na Figura 4.1.

c) Após a coleta das *amostras parciais*, procede-se a mistura e homogeneização dando origem a uma *amostra composta*, que após o processo de quarteamento (Figuras 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5) originará a *amostra de campo* com um volume mínimo de ***2m³***, que posteriormente será encaminhada para laboratório para realização dos ensaios de qualificação e caracterização.

- Primeiramente, bascular o conjunto de ***amostras parciais*** na ***praça de trabalho*** formando uma pilha de ***agregado siderúrgico***.

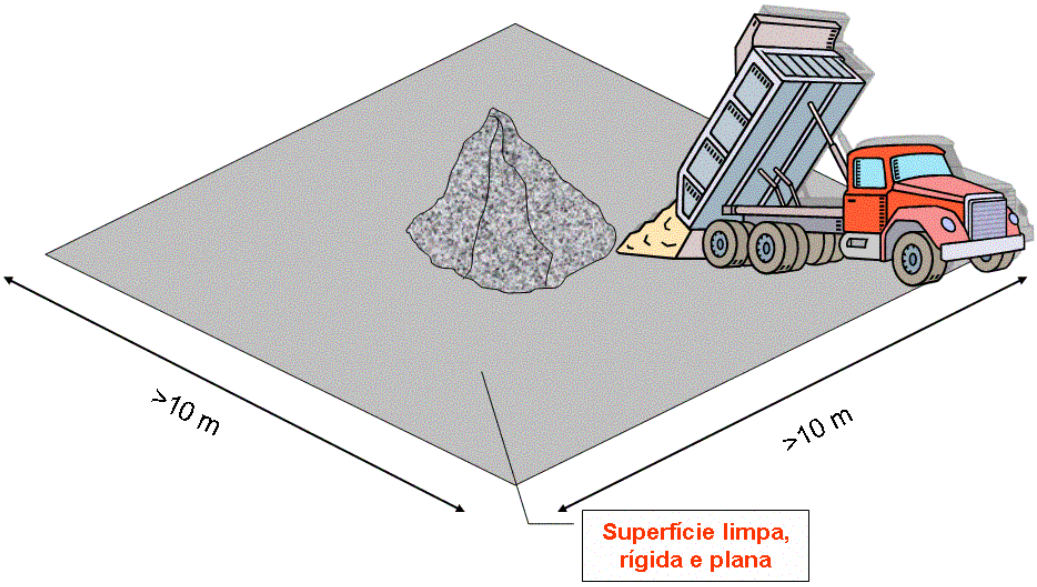


Figura 3.2 Basculação das amostras parciais.

- A ***amostra composta*** é convenientemente misturada e espalhada na ***praça de trabalho de amostragem*** com o auxílio de serventes e retroescavadeira de forma que não ocorra nenhuma perda de material e nem haja contaminação, formando uma camada delgada, de altura uniforme e de formato quadrangular.

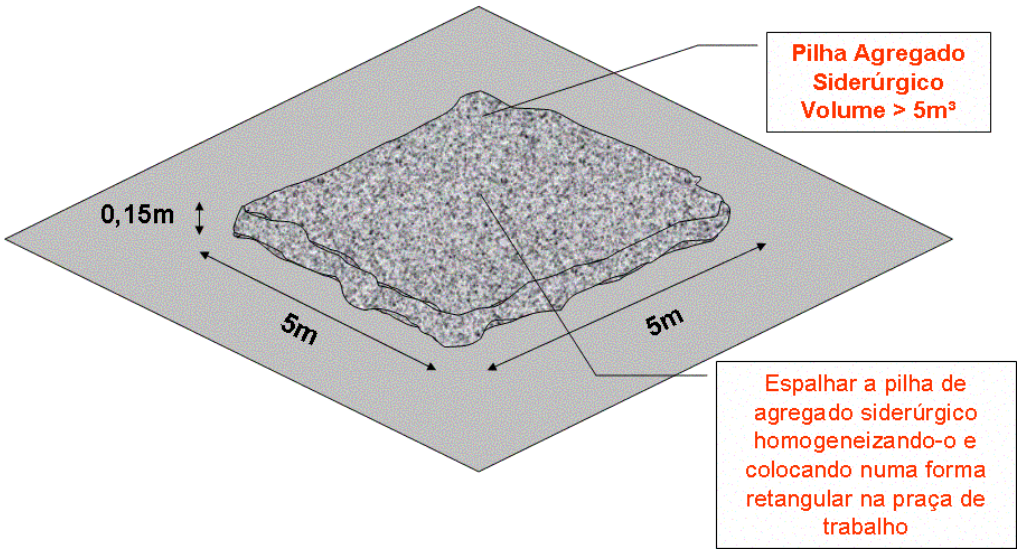


Figura 3.3 Mistura e espalhamento das amostras parciais.

- Faz-se o quarteamento da ***amostra composta***, ou seja, a divisão em quatro partes do total de 5 m^3 de **agregados siderúrgicos** dispostos.

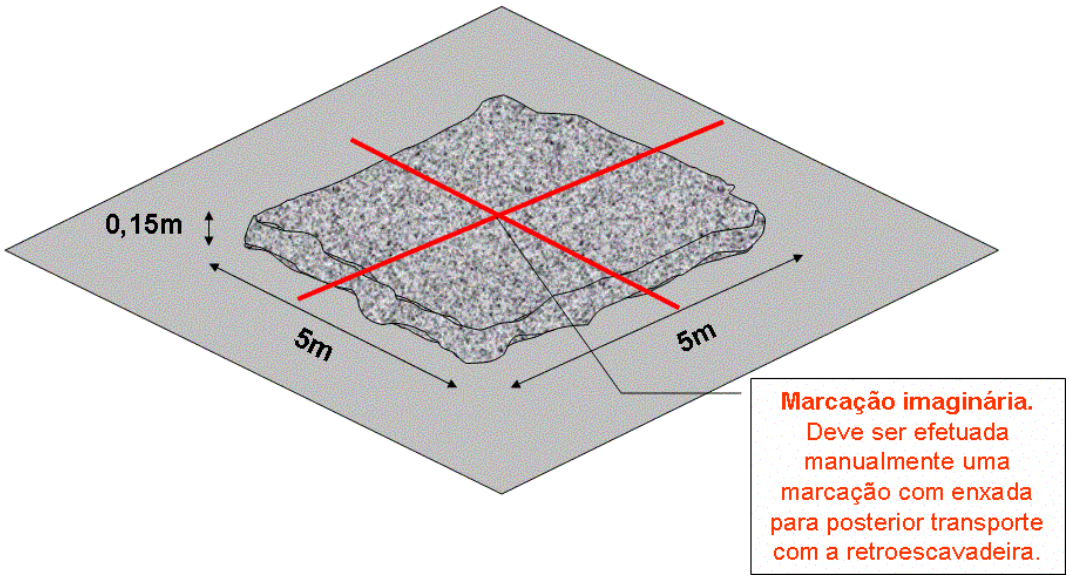


Figura 3.4 Quarteamento das amostras parciais.

- Duas das partes obtidas pelo quarteamento e localizadas em posição diametralmente opostas são descartadas e coleta-se o restante, obtendo-se a ***amostra de campo*** com volume mínimo de 2m^3, que serão acondicionados e transportados conforme procedimento adequado.

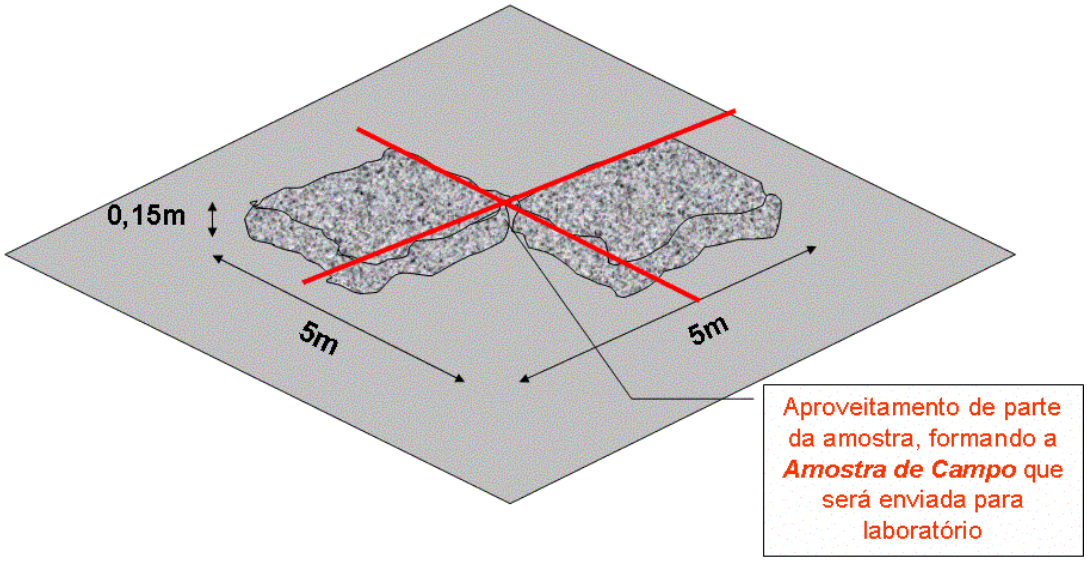
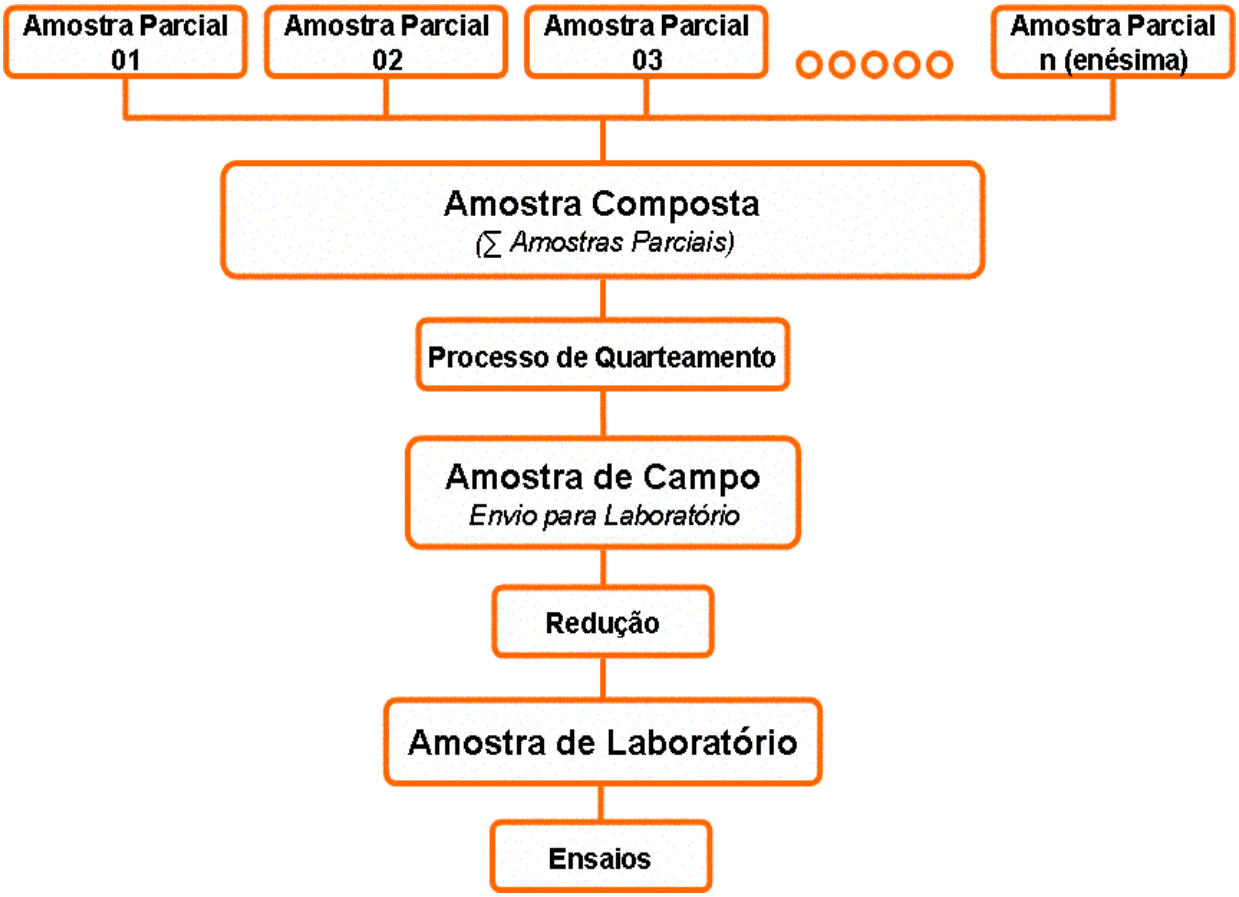


Figura 3.5 Escolha das amostras parciais a serem utilizadas.

O transporte da *amostra de campo* deverá ser realizado em caminhões basculante. Com a finalidade de evitar a contaminação do *agregado siderúrgico* o fundo do caminhão deverá ser limpo e forrado com *lona plástica preta*. Posteriormente ao carregamento da amostra do *agregado siderúrgico*, o caminhão deverá ser coberto com *lona encerada*.

3.2.2 Fluxograma do processo de amostragem do lote de agregado siderúrgico



3.2.3 Especificações de equipamentos de amostragem e de segurança

a) É imprescindível que todos os profissionais envolvidos na amostragem estejam com seus equipamentos de proteção individual (EPI) e que devam ser tomadas medidas mitigadoras dos riscos envolvidos durante a coleta, manuseio e transporte do *agregado siderúrgico*.

***Observação*: As normas de Engenharia de Segurança da siderúrgica e orientações do Engenheiro de Segurança do Trabalho devem ser seguidas.**

b) Os profissionais que estarão envolvidos diretamente na coleta do *agregado siderúrgico* devem utilizar no mínimo os seguintes itens de segurança: capacete, máscara, protetor auricular, luva de raspa e calçado de segurança.

c) Os seguintes equipamentos devem ser disponibilizados para que seja realizada a coleta do *agregado siderúrgico*:

- uma retroescavadeira série CAT 330 ou similar com operador;
- um caminhão basculante com caçamba de 6 m^3 com motorista;
- dois serventes;
- uma trena de 30 m;
- uma escada de madeira ou outro com 6 m;
- duas picaretas;
- duas enxadas;
- duas pás de bico;
- dois enxadões;
- duas lonas plásticas preta de 130 micras, com 12 m^2 cada;
- um rolo de *fita zebrada* para sinalização (fita plástica colorida em poliestireno com listras amarela e preta intercaladas);
- uma peça de lona encerada (cobertura do caminhão do transporte das amostras).

3.3 ENSAIOS

3.3.1 Introdução

O *agregado siderúrgico* foi coletado nas siderúrgicas localizadas nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, abaixo relacionadas:

i) Gerdau Açominas.

ii) V & M Tubes.

iii) Companhia Siderúrgica Nacional – CSN.

iv) Belgo Mineira – Unidade João Monlevade.

v) Usiminas.

vi) Gerdau Cosígua.

vii) Gerdau Guairá.

viii) Companhia Siderúrgica de Tubarão – CST.

ix) Belgo Mineira – Unidade Juiz de Fora.

x) Aços Villares.

xi) Villares Metals.

xii) Cosipa.

xiii) Siderúrgica Barra Mansa.

Foram visitadas as pedreiras:

Pedrasul (Juiz de Fora – MG), Santa Mônica (Juiz de Fora – MG), Santo Cristo (Juiz de Fora – MG), Pombal (Aparecida – SP), Carandaí (Carandaí – MG).

JOHN (1996) a reciclagem de resíduos como material de construção envolve:

- a caracterização física e química e da microestrutura do resíduo, incluindo-se o seu risco ambiental;
- busca de possíveis aplicações dentro da construção civil, considerando-se as características do resíduo;
- o desenvolvimento de diferentes aplicações, incluindo-se o processo de produção;

- análise de desempenho frente as diferentes necessidades dos usuários para cada aplicação específica;

- análise do impacto ambiental de novo produto, em uma abordagem cradle to grave, que necessariamente deve envolver avaliação de riscos à saúde dos trabalhadores e usuários.

No caso do agregado siderúrgico (escória) é fundamental além do recomendado por JOHN (1996) definir-se os procedimentos para coleta de amostras, pois as definições necessitam que as análises sejam feitas em materiais representativos para que as conclusões sejam abrangentes e/ou seletivas. No caso do agregado siderúrgico (escoria), ainda não existe texto normativo da ABNT que regulamenta a coleta deste material.

O comitê técnico do IBRACON (CT206-Meio ambiente) juntou-se ao grupo de estudo sobre agregados reciclados do Sinduscon-SP elaboraram e aprovaram as primeiras normas brasileiras publicadas pelo CB-18 da ABNT, disciplinando e orientando o uso sustentável da construção civil e demonstrando o comprometimento da tecnologia nacional com o meio ambiente. (IBRACON, 2005).

As normas aprovadas pelo CB-18 da ABNT são:

- NBR15112:2004: Resíduos de construção civil e resíduos volumosos - Áreas de transbordo e triagem – diretrizes para projeto, implantação e operação.

- NBR15113:2004: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação.

- NBR15114:2004: Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação.

- NBR15115:2004: Agregados reciclados e resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos.

- NBR15116:2004: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização de pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos.

No caso do agregado siderúrgico (escoria), ainda não existe texto normativo da ABNT que regulamenta a coleta deste material.

O aproveitamento dos resíduos gerados pela indústria vem se consolidando como uma prática importante para a sustentabilidade, seja atenuando o impacto ambiental gerado pelo setor ou mesmo oportunizando a redução de custos relativos ao manejo. O *agregado siderúrgico* vem se tornando uma grande oportunidade de utilização em diversos setores, destacando-se no *lastro padrão de ferrovias*.

Visando agregar valor e incrementar a comercialização do *agregado siderúrgico* no setor ferroviário, torna-se necessária a sua caracterização física, química, mineralógica, microestrutural, ambiental e de expansibilidade.

Relação de ensaios a serem executados para se conhecer melhor este agregado siderúrgico:

1) Caracterização física
   1.1 Composição granulométrica
   1.2 Massa específica, absorção de água e porosidade
   1.3 Resistência ao desgaste – Abrasão Los Angeles.
   1.4 Resistência ao choque “TRETON”.
   1.5 Índice de forma
   1.6 Resistência ao esmagamento.
   1.7 Teor de argila
   1.8 Teor de material pulverulento
   1.9 Teor de fragmentos macios e friáveis.
   1.10 Resistência à intempéries.

2) Caracterização química ..
   2.1 Fluorescência de raios-X.
   2.2 Determinação de CaO (livre)

2.3 Determinação de resíduo insolúvel
2.4 Determinação da perda ao fogo.

3) Caracterização mineralógica
3.1 Difração de raios-X.

4)Caracterização microestrutural
4.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) com EDS

5)Caracterização ambiental
5.1 Lixiviação.
5.2 Solubilização.

6)Caracterização da expansibilidade
6.1 Expansibilidade: PTM 130/DER-MG.

3.3.2 Objetivo

Caracterizar o *agregado siderúrgico* por meio da realização de ensaios físicos, químicos, mineralógicos, microestrutural, ambiental e expansibilidade para estabelecer parâmetros para sua utilização em *lastro de ferrovias* de forma a subsidiar a elaboração de proposta de texto para a *Norma Técnica de Especificação do Lastro Ferroviário* a ser encaminhada ao ***CB-06 da ABNT***.

3.3.3 Ensaios de caracterização

Conforme CHESNER *et al*. (2001) *apud* MANCIO (2001), em um processo de utilização de resíduos é importante que todos os intervenientes – engenheiros, pesquisadores, fontes geradoras e órgãos reguladores – estejam cientes das propriedades dos materiais, de como eles podem ser utilizados e das limitações que porventura estejam associadas ao seu uso. Assim, para caracterização do *agregado siderúrgico* foi realizada uma série de ensaios de laboratório.

Ressalta-se que os ensaios mais específicos (resistividade, fluorescência de raios-X, cal livre, resíduo insolúvel, perda ao fogo, difração de raios-X, microscopia eletrônica de varredura com EDS e os ensaios ambientais de lixiviação e

solubilização) para caracterização do *agregado siderúrgico* foram realizados em 10 (dez) amostras (Gerdau Açominas, CSN, Usiminas 1,5 a 3”, Usiminas 1 a 2”, Gerdau Guaíra, CST e Aços Villares, Gerdau Cosigua, Belgo Mineira – Juiz de Fora, Villares Metals). Este procedimento foi adotado no sentido de que somente as dez amostras se enquadraram na faixa granulométrica exigida pela norma *NBR 5564: Via férrea – Lastro padrão*. As Figuras 3.6 e 3.7 são apresentadas as diferenças de granulometria nas amostras conforme e não conforme especificação da norma *NBR 5564: Via férrea – Lastro padrão*.

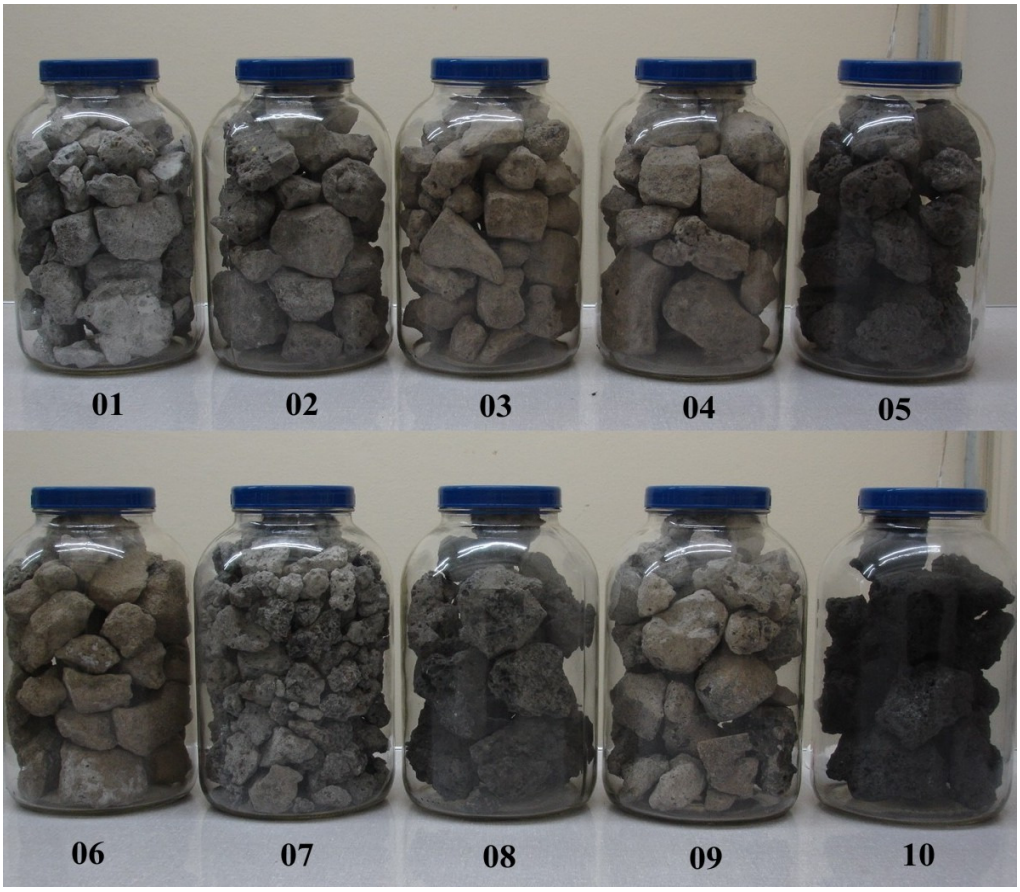


Figura 3.6 Amostras com granulometria conforme *NBR 5564: Via férrea – Lastro padrão*

Figura 3.7 Amostras com granulometria não conforme *NBR 5564: Via férrea – Lastro padrão*

Legenda:

01 – Gerdau Açominas	06 – CST	11 – Siderúrgica Barra Mansa
02 – CSN	07 – Aços Villares	12 – V&M Tubes
03 – Usiminas 1' a 2'	08 – Belgo Mineira/Juiz de Fora	13 – Cosipa
04 – Usiminas 1,5' a 3'	09 – Villares Metals	14 – Gerdau Cosigua (ASVLP)
05 – Gerdau Guaíra	10 – Gerdau Cosigua (ASELP)	15 – Belgo Mineira/João Monlevade

Os ensaios foram realizados nos laboratórios da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), Instituto Militar de Engenharia (IME) e Puriquima Análises Químicas e Ambientais. Para resguardar a identidade das siderúrgicas, os ensaios realizados em outros laboratórios, fora da Universidade Federal de Juiz de Fora, receberam uma codificação específica. Segue abaixo a relação dos ensaios bem como o método utilizado e local onde foram realizados.

3.3.3.1 Caracterização física

Os ensaios de caracterização física das amostras de *agregado siderúrgico* foram realizados seguindo as metodologias preconizadas pela Associação Brasileira

de Normas Técnicas (ABNT) e pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). A seguir são apresentados os respectivos métodos de ensaios e locais onde foram realizados.

i) Composição granulométrica

- NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica.

ii) Massa específica, absorção de água e porosidade.

- NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.
- MB-893: Lastro padrão – Determinação da massa específica aparente, da absorção de água e da porosidade aparente do material.

iii) Resistência ao desgaste – Abrasão Los Angeles

- NBR NM 51: Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”.

iv) Resistência ao choque

- NBR 8938: Lastro padrão – Determinação da resistência ao choque.

v) Índice de forma

- MB-894: Lastro padrão – Determinação da forma do material.

vi) Resistência ao esmagamento

- DNER-ME 197/97: Agregados – Determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos.

vii) Teor de argila

- NBR 7218: Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis.

viii) Teor de material pulverulento

- NM 46: Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 micrômetros por lavagem.

ix) Teor de fragmentos macios e friáveis

- NBR 8697: Lastro – Determinação do teor de fragmento macio e friável.

x) Resistência a intempéries

- NBR 7702: Lastro ferroviário – Determinação da resistência do material à intempérie.
- DNER-ME 089/94: Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio.

xi) Resistividade

- Procedimento do Laboratório da UFJF/MG.

Todos os ensaios de caracterização física foram realizados nos laboratórios de Materiais de Construção, Pavimentação, Mecânica dos Solos e Medidas Elétricas da Universidade Federal de Juiz de Fora.

3.3.3.2 Caracterização química

Os ensaios de caracterização química das amostras de *agregado siderúrgico* foram realizados seguindo as metodologias preconizadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e procedimentos internos do laboratório da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). A seguir são apresentados os respectivos métodos de ensaios e local onde foram realizados.

i) Fluorescência de raios-X

- PO-GT 5023: Espectrometria de raios-X – Operações básicas.

ii) Determinação de CaO (livre)

- NBR NM 13: Cimento Portland – Análise química – Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol.

iii) Resíduo insolúvel

- PO-GT 3047: Escória – Determinação do resíduo insolúvel.

iv) Perda ao fogo

- PO-GT 3035: Matéria-prima – Determinação de perda ao fogo (P.F.).

Todos os ensaios de caracterização química foram realizados nos laboratórios da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), em São Paulo/SP.

3.3.3.3 Caracterização mineralógica

Os ensaios de caracterização mineralógica das amostras de *agregado siderúrgico* foram realizados seguindo as metodologias preconizadas pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). A seguir é apresentado o respectivo método de ensaio e local onde foi realizado.

i) Difração de raios-X

- PO-GT 5042: Procedimento para análise por Difratometria de raios X.

Os ensaios de caracterização mineralógica foram realizados no laboratório da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), em São Paulo/SP.

3.3.3.4 Caracterização microestrutural

Os ensaios de caracterização microestrutural das amostras de *agregado siderúrgico* foram realizados seguindo procedimentos internos do laboratório do Instituto Militar de Engenharia. A seguir é apresentado o respectivo método de ensaio e local onde foi realizado.

i) Microscopia eletrônica de varredura (MEV) com EDS

Os ensaios de caracterização microestrutural foram realizados no Laboratório de Microscopia Eletrônica do Instituto Militar de Engenharia (IME), no Rio de Janeiro/RJ.

3.3.3.5 Caracterização ambiental

Os ensaios de caracterização ambiental das amostras de *agregado siderúrgico* foram realizados seguindo as metodologias preconizadas pelos métodos de ensaios utilizados para resíduos sólidos da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). A seguir são apresentados os respectivos métodos de ensaios e local onde foram realizados.

i) Lixiviação

- NBR 10004/2004: Resíduos sólidos – Classificação.
- NBR 10005/2004: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos.

ii) Solubilização

- NBR 10006/2004: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.

Todos os ensaios de caracterização ambiental foram realizados nos laboratórios da Puriquima – Análises Químicas e Ambientais, em São Paulo/SP.

3.3.3.6 Caracterização da expansibilidade

Os ensaios de caracterização da expansibilidade das amostras de *agregado siderúrgico* foram realizados seguindo as metodologias preconizadas pelo Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais (DER/MG). A seguir é apresentado o respectivo método de ensaio e local onde foi realizado.

i) Expansibilidade: PTM 130/DER-MG

- PTM 130: Método de ensaio para avaliação do potencial de expansão de escória de aciaria.

Os ensaios de caracterização da expansibilidade foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal de Juiz de Fora.

3.4 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

3.4.1 Composição granulométrica

As Figuras 3.8 e 3.9 apresentam os equipamentos utilizados na determinação da composição granulométrica do *agregado siderúrgico*.

Figura 3.8 Peneirador mecânico e série de peneiras utilizadas para composição granulométrica do *agregado siderúrgico*.

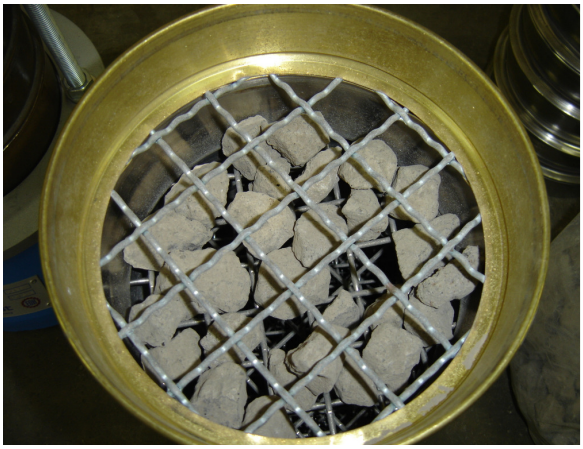


Figura 3.9 Fração retida na peneira de malha 25 mm da série de peneiras utilizadas.

Os resultados indicam que algumas siderúrgicas deverão fazer ajustes em relação à granulometria quando da produção do *agregado siderúrgico* para que este seja utilizado em lastro padrão de ferrovias, conforme tabela de especificação de distribuição granulométrica da norma *NBR 5564: Via férrea – Lastro padrão* no Anexo A.

Os resultados individuais da distribuição granulométrica de todas as siderúrgicas são apresentados no Anexo B.

3.4.2 Massa específica, absorção de água e porosidade.

As Figuras 3.10 e 3.11 ilustram etapas da execução do ensaio de massa específica e as Figuras 3.12, 3.13 e 3.14 do ensaio para determinação da absorção do *agregado siderúrgico*.

Figura 3.10 Determinação da massa específica: peso seco.

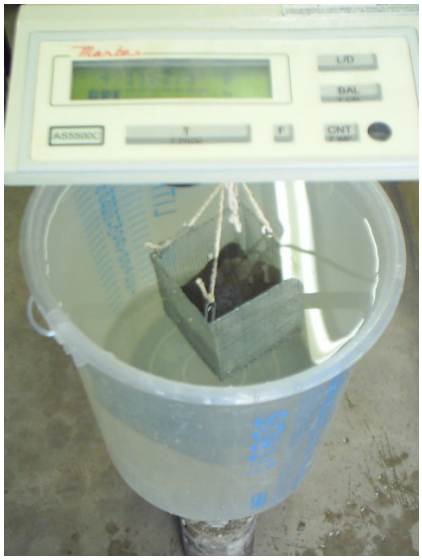


Figura 3.11 Determinação da massa específica: peso submerso.

Figura 3.12 Determinação da absorção: material imerso por 48 horas.

Figura 3.13 Determinação da absorção: material saturado – superfície seca.

Figura 3.14 Determinação da absorção: pesagem do material saturado – superfície seca.

3.4.3 Resistência ao desgaste – Abrasão Los Angeles

Na Figura 3.15 é apresentado o equipamento para determinação da abrasão Los Angeles e a Figura 3.16 o *agregado siderúrgico* posto no cilindro para início do ensaio.

Figura 3.15 Equipamento da abrasão Los Angeles.

Figura 3.16 Determinação da abrasão Los Angeles: início do ensaio.

3.4.4 Resistência ao choque "TRETON"

Na Figura 3.17 é apresentado o equipamento para execução do ensaio de resistência ao choque "TRETON" e na Figura 3.18 o *agregado siderúrgico* sendo colocado dentro da câmara do aparelho "TRETON" para início do ensaio.

Figura 3.17 Equipamento de resistência ao choque "TRETON".

Figura 3.18 Início do ensaio de resistência ao choque "TRETON".

3.4.5 Índice de forma

Na Figura 3.19 são mostrados os equipamentos utilizados para determinação do índice de forma do *agregado siderúrgico* e na Figura 3.20 a medição de suas dimensões sendo executada.

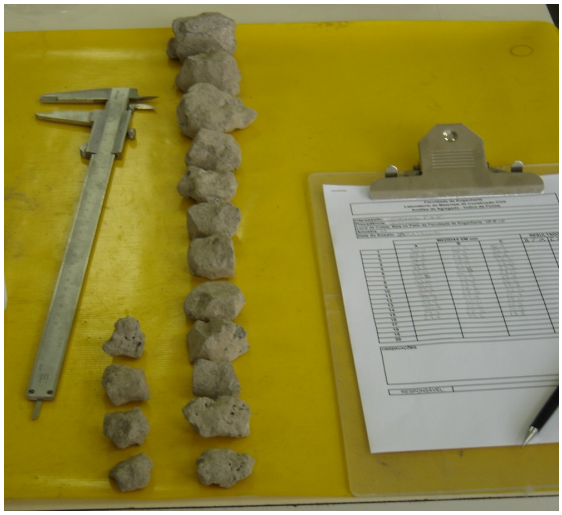


Figura 3.19 Determinação do índice de forma do *agregado siderúrgico*.

Figura 3.20 Medição das dimensões do *agregado siderúrgico* durante o ensaio.

3.4.6 Resistência ao esmagamento

Na Figura 3.21 é mostrada a prensa hidráulica utilizada para determinação da resistência ao esmagamento do *agregado siderúrgico* e na Figura 3.22 a visualização do material após a aplicação da carga.

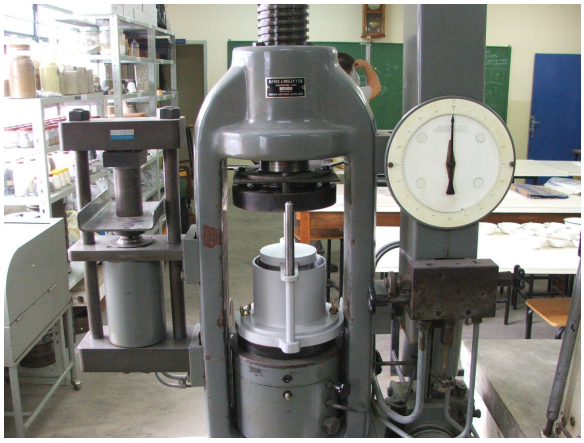


Figura 3.21 Prensa hidráulica e equipamento para determinação da resistência ao esmagamento do *agregado siderúrgico*.

Figura 3.22 *Agregado siderúrgico* após a realização do ensaio de esmagamento.

3.4.7 Fluorescência de Raio-X

Na Figura 3.23 é mostrada o equipamento utilizado para realização do ensaio de difração de raios-X.

Figura 3.23 Equipamento de difração de raios-X (POLISSENI, 2005).

3.4.8 Microscopia Eletrônica de Varredura

Para os ensaios realizados no Laboratório de Microscopia Eletrônica do IME foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura, marca JEOL, modelo JSM 5800

e os EDS foram realizados com uma ampliação de 250 vezes. A Figura 3.24 apresenta o equipamento utilizado para realização do ensaio.

Figura 3.24 Microscópio eletrônico de varredura (MEV).

3.4.9 Expansibilidade: PTM 130/DER-MG

A Figura 3.25 mostra uma etapa da execução do ensaio de expansibilidade na condição submersa

Figura 3.25 Determinação da expansibilidade pelo método PTM 130/DER-MG: ensaio submerso.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 RESULTADOS

4.1.1 Análise granulométrica

A composição granulométrica do *agregado siderúrgico* foi determinada com base na norma *NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica*. Os resultados encontrados nos ensaios de análise granulométrica das amostras das siderúrgicas estão apresentados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 Resultados análise granulométrica dos agregados siderúrgicos.

Siderúrgica	***Cidade***	Faixa Granulométrica
Gerdau Açominas	Ouro Branco/MG	**B**
V&M TUBES	Belo Horizonte/MG	*n.e.*
CSN	Volta Redonda/RJ	**A**
Belgo Mineira	João Monlevade/MG	*n.e.*
Usiminas 1,5" a 3"	Ipatinga/MG	**B**
Usiminas 1" a 2"	Ipatinga/MG	**A**
Gerdau Cosigua	Rio de Janeiro/RJ	*n.e.*
Gerdau Cosigua	Rio de Janeiro/RJ	**A**
Gerdau Guaíra	Araucária/PR	**A**
CST	Serra/ES	**A** e **B**
Belgo Mineira	Juiz de Fora/MG	**B**
Aços Villares	Pindamonhangaba/SP	**B**
Villares Metals	Sumaré/SP	**A**
COSIPA	Cubatão/SP	*n.e.*
Barra Mansa	Barra Mansa/RJ	*n.e.*

- n.e. = não conformidade em relação à NBR 5564.

A e B = faixas granulométricas especificadas pela norma NBR 5564: Via férrea – Lastro padrão.

No Anexo A, são mostrados os resultados individuais das distribuições granulométricas das siderúrgicas.

4.1.2 Massa específica, absorção de água e porosidade

Comparando os resultados apresentados nas Tabelas 4.2. e 4.3., nota-se que os valores encontrados para massa específica estão em conformidade com outros pesquuisadores. Os valores de absorção de água e porosidade apresentaram maiores que os valores de norma, mas em conformidade com os valores encontrados por Polisseni (2005). Justificam-se estas variações por se tratar de um *agregado siderúrgico*, sendo que as especificações de norma são para material pétreo.

4.1.3 Resistência ao desgaste – Abrasão Los Angeles

Os resultados de ensaios de perda de massa por Abrasão Los Angeles dão indicações da resistência mecânica das partículas do *agregado siderúrgico*. Conforme se observa nas Tabelas 4.2 e 4.3, os valores encontrados estão dentro da faixa da norma *NBR 5564: Via férrea – Lastro padrão* (< 40%) e em conformidade com os valores dos outros pesquisadores. Portanto, o *agregado siderúrgico* apresenta uma boa resistência ao desgaste.

4.1.4 Resistência ao choque "TRETON"

Os valores de resistência ao choque "TRETON" estão dentro da faixa da norma *NBR 5564: Via férrea – Lastro padrão* (< 20%) para todas as siderúrgicas, conforme se observa nas Tabelas 4.2 e 4.3.

4.1.5 Índice de Forma

Os ensaios para determinação do índice de forma do *agregado siderúrgico* apresentaram como resultado forma cúbica (Tabela 4.2), em conformidade com os

dados da literatura e norma (Tabela 4.3). A forma cúbica do agregado possibilita um maior entrosamento entre as partículas, permitindo um melhor travamento.

4.1.6 Resistência ao Esmagamento

Segundo Tabela 4.2, a faixa de valores para a resistência ao esmagamento do *agregado siderúrgico* encontra-se entre 13% e 30%. A literatura não traz valores de referência quanto à resistência ao esmagamento do material.

4.1.7 Teor de Argila

Segundo se apresenta na Tabela 4.2, os *agregados siderúrgicos* encontram-se isentos de material argiloso em sua composição. Portanto, a ausência de teor de argila mostra que durante o processo produtivo do *agregado siderúrgico* não houve contaminação.

4.1.8 Teor de Material Pulverulento

Segundo se apresenta na Tabela 4.2, os *agregados siderúrgicos* encontram-se isentos de material pulverulento em sua composição. Portanto, a ausência de teor de material pulverulento mostra que durante o processo produtivo do *agregado siderúrgico* não houve contaminação.

4.1.9 Teor de Fragmentos Macios e Friáveis

Segundo se apresenta na Tabela 4.2, não foram encontrados fragmentos macios e friáveis na composição do *agregado siderúrgico*.

4.1.10 Resistência às Intempéries

O ensaio de resistência a intempéries determina a resistência à desintegração dos agregados sujeitos à ação do tempo, pelo ataque de soluções saturadas de sulfato de sódio (ou de magnésio). Segundo ensaios realizados no Laboratório de Materiais de Construção, os *agregados siderúrgicos* mostraram-se resistentes a intempéries.

4.1.11 Fluorescência de raios-X

Conforme se observa na Tabela 4.5, as composições químicas predominantes nas amostras ensaiadas são óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO), dióxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de manganês (MnO) e óxido de ferro (Fe_2O_3). A faixa de valores destes elementos está em conformidade com os dados da Tabela 4.5. Há outros elementos presentes, mas em menor porcentagem e não sendo tão representativos na caracterização global.

4.1.12 Determinação de CaO (livre)

Os resultados do teor de cal livre (CaO) encontrados nas amostras de *agregado siderúrgico* estão apresentados na tabela 4.4. Os resultados obtidos estão em conformidade com os estudos dos pesquisadores MASUERO (2001), GEYER (2001), POLISSENI (2005) e GUMIERI (2002).

4.1.13 Determinação de resíduo insolúvel

Os resultados de resíduo insolúvel encontrados nas amostras de *agregado siderúrgico* estão apresentados na Tabela 4.4. Segundo dados de POLISSENI (2005), os resultados encontrados estão em conformidade.

4.1.14 Determinação da perda ao fogo

Os resultados de perda ao fogo encontrados nas amostras de *agregado siderúrgico* estão apresentados na tabela 4.4. Segundo dados de POLISSENI (2005), os valores encontrados para o *agregado siderúrgico* estão abaixo de 2%, portanto, não há expectativa de contaminação do material.

4.1.15 Caracterização mineralógica

Para caracterização mineralógica do *agregado siderúrgico* foram realizados ensaios de Difração de raios-X para determinação das fases presentes em cada amostra.

4.1.15.1 Difração de raios-X

Com base nos difratogramas apresentados no Anexo B (Figuras B.1 a B.10), caracterizaram-se os compostos mineralógicos cristalizados constantes na tabela B.1. Dos resultados dos difratogramas percebe-se que o *agregado siderúrgico* apresenta estrutura interna predominantemente cristalina devido à presença de diversos picos.

4.1.16 Caracterização microestrutural

A caracterização microestrutural das amostras de *agregado siderúrgico* foi desenvolvida por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) por elétrons secundários e análise elementar quantitativa via EDS.

4.1.16.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) com EDS

O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) permite a obtenção de informações estruturais e químicas das amostras, como, por exemplo, a composição química de um ponto ou região da superfície, possibilitando a identificação de praticamente qualquer elemento presente. Os resultados estão apresentados no Anexo C (Figuras C.1 a C.14)

4.1.17 Caracterização ambiental

É de fundamental importância a avaliação do impacto que o *agregado siderúrgico* possa provocar no meio ambiente. A caracterização ambiental foi realizada segundo os métodos de ensaios de lixiviação (NBR 10005, 2004) e solubilização (NBR 10006, 2004). Os resultados encontrados foram analisados de acordo com as prescrições da NBR 10004 (2004), que classifica se um resíduo é perigoso ou não, bem como seu comportamento, se inerte ou não ao meio ambiente. Os resultados são apresentados no Anexo D.

4.1.18 Caracterização da expansibilidade

É de fundamental importância a avaliação da expansibilidade do *agregado siderúrgico*, pois as escórias de aciaria possuem características expansivas devido,

principalmente à hidratação da cal livre (CaO) e do periclásio (MgO), além das mudanças nas formas alotrópicas do silicato de dicálcico (C_2S) e da corrosão e oxidação do ferro metálico residual (MACHADO, 2000). A caracterização da expansibilidade foi realizada segundo o método Pennsylvania Test Method – PTM 130.

4.1.18.1 Expansibilidade: PTM 130/DER-MG

O objetivo do ensaio de expansão preconizado pelo Departamento de Transportes da Pensilvânia, Pennsylvania Test Method – PTM 130 (1982), e que foi adaptado pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Minas Gerais (DER-MG), é determinar o grau de expansão da escória de aciaria quando compactado e testado em laboratório. O índice de expansão volumétrica máximo, medido aos 14 dias, para uma escória de aciaria, é de 3% (Norma ABNT). Os resultados das análises do *agregado siderúrgico* estão apresentados no Anexo E.

4.2 RESUMO DOS RESULTADOS DOS ÍNDICES FÍSICOS DO AGREGADO DE CADA SIDERÚRGICA

Na Tabela 4.2. apresenta-se um resumo dos índices físicos do *agregado siderúrgico* de cada siderúrgica, realizados conforme normas específicas de cada ensaio.

Tabela 4.2 Resultados dos índices físicos dos agregados siderúrgicos.

PROPRIEDADES FÍSICAS												
Siderúrgicas	**Massa Específica (g/cm³)**	**Massa Unitária (g/cm³)**	**Abrasão Los Angeles (%)**	**Absorção de Água (%)**	**Índice de Forma**	**Resistência ao Choque "TRETON" (%)**	**Porosidade Aparente (%)**	**Teor de partículas macias e friáveis (%)**	**Impurezas orgânicas (%)**	**Resistência ao Esmagamento (%)**	**Teor de argila (%)**	**Teor de material pulverulento (%)**
Gerdau Açominas	3,49	1,784	16,98	1,22	CÚBICA	4,67	3,01	Isento	Isento	13,42	Isento	Isento
V&M Tubes	3,60	1,651	19,32	0,90	CÚBICA	5,13	2,28	Isento	Isento	20,20	Isento	Isento
CSN	3,51	1,739	33,83	4,48	CÚBICA	2,45	5,86	Isento	Isento	13,63	Isento	Isento
Belgo Mineira João Monlevade	3,08	1,814	24,5	1,74	CÚBICA	6,43	3,01	Isento	Isento	19,00	Isento	Isento
Usiminas 1,5" a 3"	3,36	1,721	15,7	2,02	CÚBICA	3,48	3,60	Isento	Isento	20,00	Isento	Isento
Usiminas 1" a 2"	3,48	1,796	14,98	1,99	CÚBICA	4,95	4,43	Isento	Isento	13,42	Isento	Isento
Gerdau Cosigua ASVLP	3,73	1,888	25,71	0,96	CÚBICA	4,68	2,61	Isento	Isento	24,09	Isento	Isento
Gerdau Cosigua ASELP	3,52	1,593	25,24	2,23	CÚBICA	3,54	5,69	Isento	Isento	20,75	Isento	Isento
Gerdau Guaíra	3,25	1,621	30,32	2,57	CÚBICA	5,33	5,78	Isento	Isento	21,07	Isento	Isento
CST	3,45	1,790	13,11	0,54	CÚBICA	3,89	1,37	Isento	Isento	25,29	Isento	Isento
Belgo Mineira Juiz de Fora	3,40	1,620	22,39	1,55	CÚBICA	5,74	3,75	Isento	Isento	25,36	Isento	Isento
Aços Villares	3,19	1,622	22,03	3,7	CÚBICA	6,00	6,78	Isento	Isento	29,07	Isento	Isento
Villares Metals	2,75	1,517	26,31	2,91	CÚBICA	4,86	5,23	Isento	Isento	24,40	Isento	Isento
COSIPA	3,42	1,633	16,75	1,00	CÚBICA	3,29	2,33	Isento	Isento	25,15	Isento	Isento
Barra Mansa	3,29	1,75	33,06	3,22	CÚBICA	5,54	6,88	Isento	Isento	28,79	Isento	Isento

A Tabela 4.3 apresenta os resultados da faixa de valores das principais propriedades físicas do *agregado siderúrgico* encontrados na literatura pesquisada e a faixa de valores especificados pela norma *NBR 5564: Via férrea – Lastro padrão*.

Tabela 4.3 Resumos dos índices físicos do agregado siderúrgico.

PROPRIEDADES FÍSICAS			
Propriedade	**Silva**(1)	**Mancio**(2)	**NBR 5564**(3)
Massa Específica: (g/cm³)	3,00 a 3,50	3,20 a 3,60	> 2,40
Massa Unitária: (g/cm³)	1,50 a 1,70	1,60 a 1,90	*
Abrasão Los Angeles (%)	15 a 25	20 a 25	< 40
Absorção de Água (%)	1 a 2	< 3	< 1
Índice de Forma	CÚBICA	*	CÚBICA
Resistência ao Choque "TRETON" (%)	*	*	< 20
Porosidade Aparente (%)	*	*	< 1
Teor de partículas macias e friáveis (%)	*	*	< 5
Impurezas orgânicas (%)	*	*	< 0,5

Fonte: (1) Silva (2001)

(2) Mancio (2001)

(3) NBR 5564: Via férrea – Lastro padrão

* não especificado pelo autor

4.3 RESUMO DOS RESULTADOS DOS ÍNDICES QUÍMICOS DOS AGREGADOS DE CADA SIDERÚRGICA

A caracterização química foi realizada através da análise química global do *agregado siderúrgico* e da determinação da composição mineralógica.

A Tabela 4.4 apresenta a análise química semiquantitativa por espectrometria de raios X do *agregado siderúrgico* das sete siderúrgicas que se enquadraram na faixa de especificação da norma *NBR 5564: Via férrea – Lastro padrão*.

Tabela 4.4 Análise química semiquantitativa por espectrometria de raios X.

Composição Química		Usiminas 1,5"a 3"	Usiminas 1"a 2"	Gerdau Guaíra	CST	Gerdau Açominas	CSN	Aços Villares	Gerdau Cosigua	Villares Metals	Belgo Mineira – JF
		% em Massa									
Fluoreto	F^-	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	2,54	nd
Óxido de sódio	Na_2O	nd	nd	0,33	nd	nd	nd	tr	nd	0,07	0,20
Óxido de magnésio	MgO	7,76	5,49	7,06	4,62	7,22	4,85	3,33	4,57	6,83	4,27
Óxido de alumínio	Al_2O_3	6,58	16,84	4,62	1,79	1,1	4,8	4,99	3,96	6,41	6,25
Dióxido de silício	SiO_2	7,39	10,55	21,67	12,15	10,75	13,05	17,84	15,16	27,04	19,89
Pentóxido de fósforo	P_2O_5	1,55	1,18	0,74	1,8	1,8	1,76	0,98	1,01	0,18	1,47
Trióxido de enxofre	SO_3	0,17	0,26	0,17	0,15	0,13	0,19	0,42	0,28	0,12	0,22
Cloreto	Cl^-	tr	nd	tr	tr	nd	nd	nd	tr	tr	tr
Óxido de potássio	K_2O	nd	nd	tr	nd	nd	nd	nd	nd	nd	tr
Óxido de cálcio	CaO	34,49	38,34	21,6	43,23	38,94	41,08	38,67	26,11	29,90	27,74
Óxido de titânio	TiO_2	0,31	0,55	0,75	0,68	0,42	0,55	0,47	0,44	0,33	0,75
Óxido de vanádio	V_2O_5	0,1	0,09	0,06	0,19	0,09	0,1	0,18	0,10	0,89	0,10
Óxido de cromo	Cr_2O_3	0,23	1,13	1,02	0,2	0,27	0,09	2,6	2,52	9,41	0,76
Óxido de manganês	MnO	4,77	4,11	4,3	5,3	5,02	5,95	5,59	5,45	5,81	4,20
Óxido de ferro	Fe_2O_3	36,5	21,27	37,19	29,71	34,09	27,44	24,34	40,06	9,54	33,69
Óxido de cobre	CuO	nd	nd	tr	nd	nd	nd	tr	tr	nd	tr
Óxido de níquel	NiO	nd	tr	nd	nd	nd	nd	nd	nd	tr	nd
Óxido de zinco	ZnO	nd	nd	tr	nd	nd	nd	nd	nd	nd	tr
Óxido de estrôncio	SrO	0,11	0,15	tr	0,14	0,15	0,1	0,28	0,11	0,13	0,14
Óxido de zircônio	ZrO_2	nd	nd	tr	nd	nd	nd	tr	tr	tr	tr
Óxido de nióbio	Nb_2O_5	tr	tr	tr	tr	tr	tr	tr	tr	0,57	tr
Óxido de bário	BaO	nd	nd	0,17	nd	nd	nd	0,11	tr	tr	0,16
Óxido de wolfrâmio	WO_3	nd	nd	tr	nd	nd	nd	tr	tr	tr	tr
CaO livre	CaO l	6,5	3,04	0,27	6,2	5,56	6,8	0,6	0,22	0,08	0,09
Resíduo Insolúvel	RI	4,44	8,75	40,92	4,72	6,2	5	17,04	11,52	38,72	25,30
Perda ao Fogo	PF	0,15	0,39	0,01	0,39	0,07	0,18	0,2	nd	nd	nd

- tr = traços (< 0,1%).
- nd = não detectado.

- A espectrometria de raios X não detecta elementos com número atômico inferior ao do flúor (H, Li, Be, B, C, N e O) nem aqueles que ocorrem abaixo do limite de detecção de 0,001%.

- A análise espectrométrica semiquantitativa está fundamentada em dados teóricos de sensitividade dos elementos, não se valendo de curvas de calibração. Dessa forma, os resultados apresentados não podem ser considerados com o rigor de uma análise quantitativa.

- Os resultados elementares obtidos diretamente na análise espectrométrica foram transformados para valores em óxidos e automaticamente totalizados em 100%.

- Os valores de perda ao fogo foram determinados a 200ºC, tendo em vista que a partir dessa temperatura as amostras apresentam ganho de massa.

A Tabela 4.5 apresenta os valores dos principais elementos químicos encontrados no *agregado siderúrgico* segundo a literatura pesquisada.

Tabela 4.5 Composição química característica das escórias de aciaria (%).

PROPRIEDADES QUÍMICAS (%)										
Elementos	Silva[1]	Em diversos países[2]								
		EUA	Canadá	UK	França	Alemanha	Itália	Japão	Coréia	Brasil
CaO	35,3	35-45	35-60	36-46	40-50	24-53	35-45	26-45	35-45	28-50
MgO	6,05	4-8	5-15	4-8	2-8	1-7	4-8	5-7	4-8	4-17
SiO_2	14,6	11-15	10-20	10-15	10-15	10-18	11-15	17-14	11-15	8-25
Al_2O_3	4,16	6-10	1-10	1-3,5	1-2	1-9	6-10	1-13	6-10	0,8-13
MnO	3,56	NA	4-10	NA	NA	2-8	NA	5-8	NA	NA
P_2O_5	0,69	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
FeO	8,14	15-25	10-35	18-24*	15-25	14-30*	15-25	17-22	15-25	10-28*
Fe°	1,14	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

NA = não disponível

* = ferro total

Fonte: (1) Silva (2001)

(2) Little (1999)

5 COMPARATIVOS: *AGREGADO SIDERÚRGICO* X MATERIAL PÉTREO

Algumas considerações serão apresentadas com relação ao *agregado siderúrgico* e material pétreo.

Na Figura 5.1 estão apresentados os resultados da resistência ao choque "TRETON" encontrados para todas as amostras de *agregado siderúrgico*. Conforme se observa, os valores encontrados estão em conformidade com a norma *NBR 5564: Via férrea – Lastro padrão* que estabelece o valor limite de 20 %.

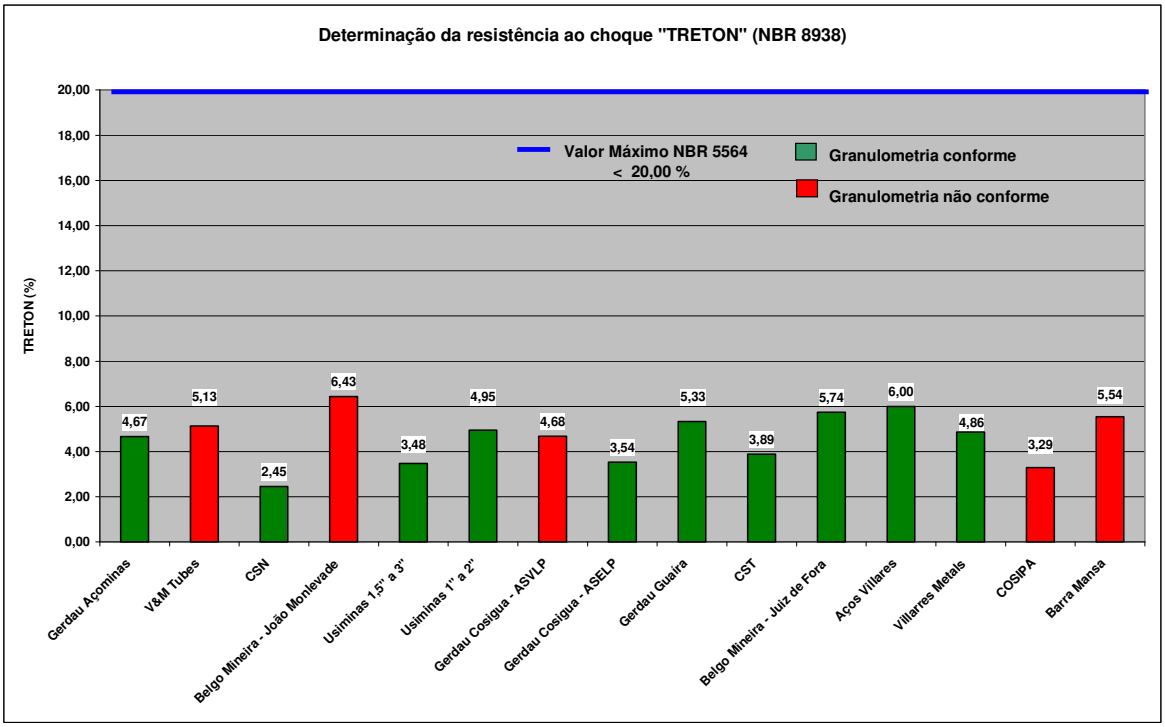


Figura 5.1 Valores de resistência ao choque "TRETON" do *agregado siderúrgico*.

Observa-se na Figura 5.2. que os resultados encontrados para massa específica para as amostras de *agregado siderúrgico* estão em conformidade com a norma *NBR 5564: Via férrea – Lastro padrão* que estabelece o valor mínimo de 2,40 g/cm^3.

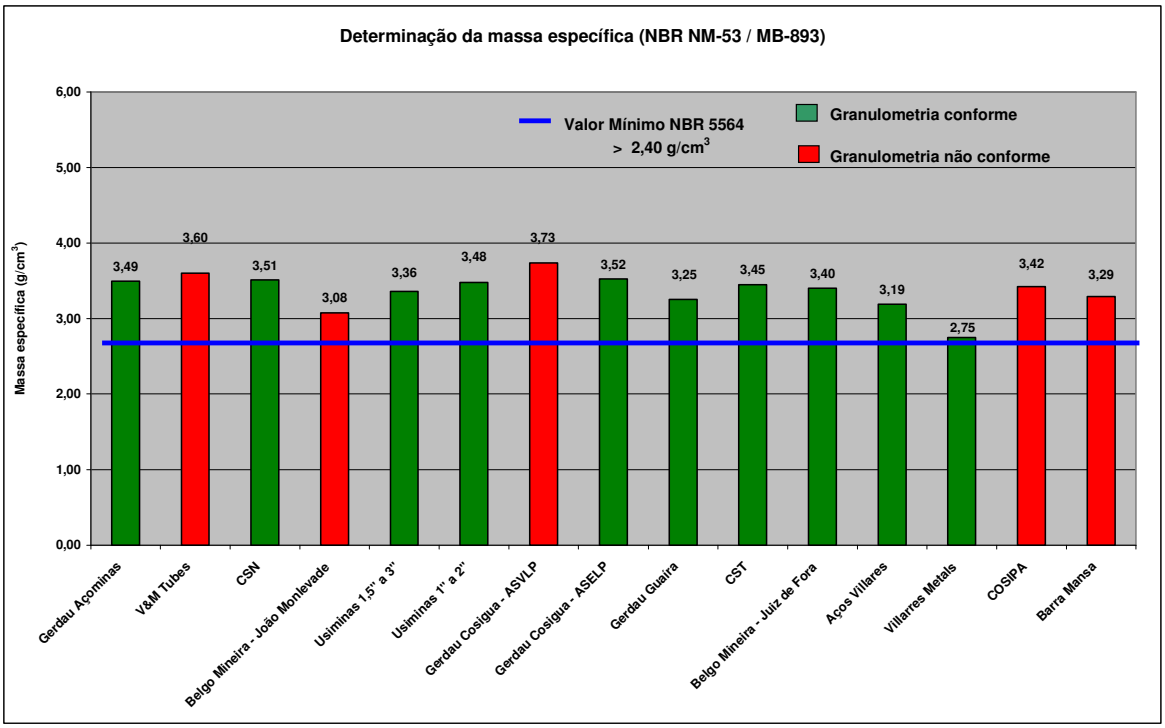


Figura 5.2 Valores de massa específica do *agregado siderúrgico*.

Observa-se na figura 5.3 os resultados encontrados abrasão Los Angeles e, de acordo com a norma *NBR 5564: Via férrea – Lastro padrão*, que estabelece o valor máximo de 40 %, os valores estão em conformidade.

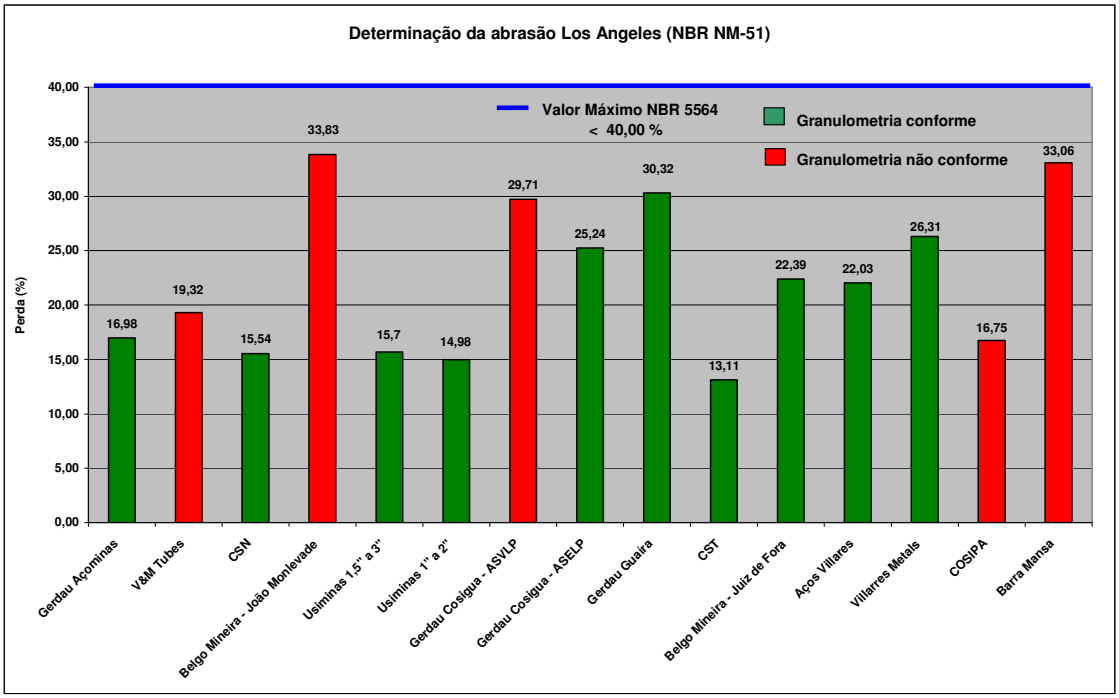


Figura 5.3 Valores de abrasão Los Angeles do *agregado siderúrgico*.

Observa-se na Figura 5.4. variações nos resultados encontrados para absorção do *agregado siderúrgico*. De acordo com a norma *NBR 5564: Via férrea – Lastro padrão*, o valor de absorção deve ser no máximo 1,0 %. Como a norma estabelece valores para material pétreo, justificam-se tais variações.

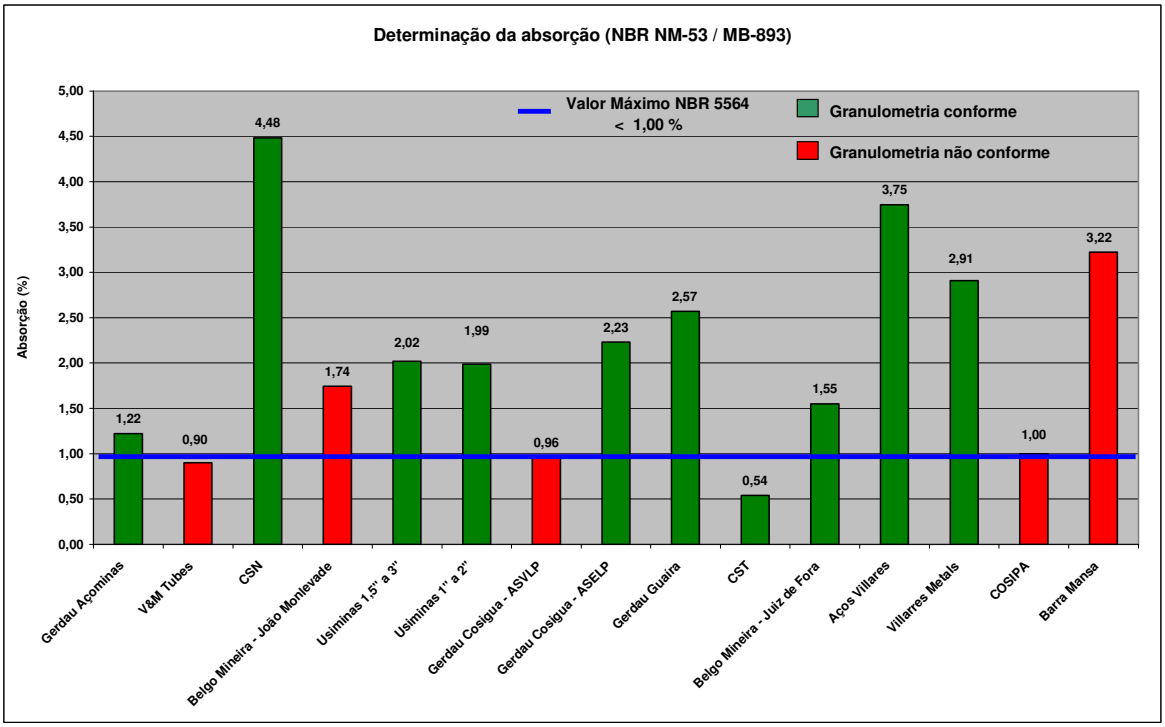


Figura 5.4 Valores de absorção do *agregado siderúrgico*.

Da mesma forma, observa-se na Figura 5.5 variações nos resultados encontrados para porosidade aparente do *agregado siderúrgico*. De acordo com a norma *NBR 5564: Via férrea – Lastro padrão*, o valor de porosidade aparente deve ser no máximo 1,0 %. Como a norma estabelece valores para material pétreo, justificam-se tais variações.

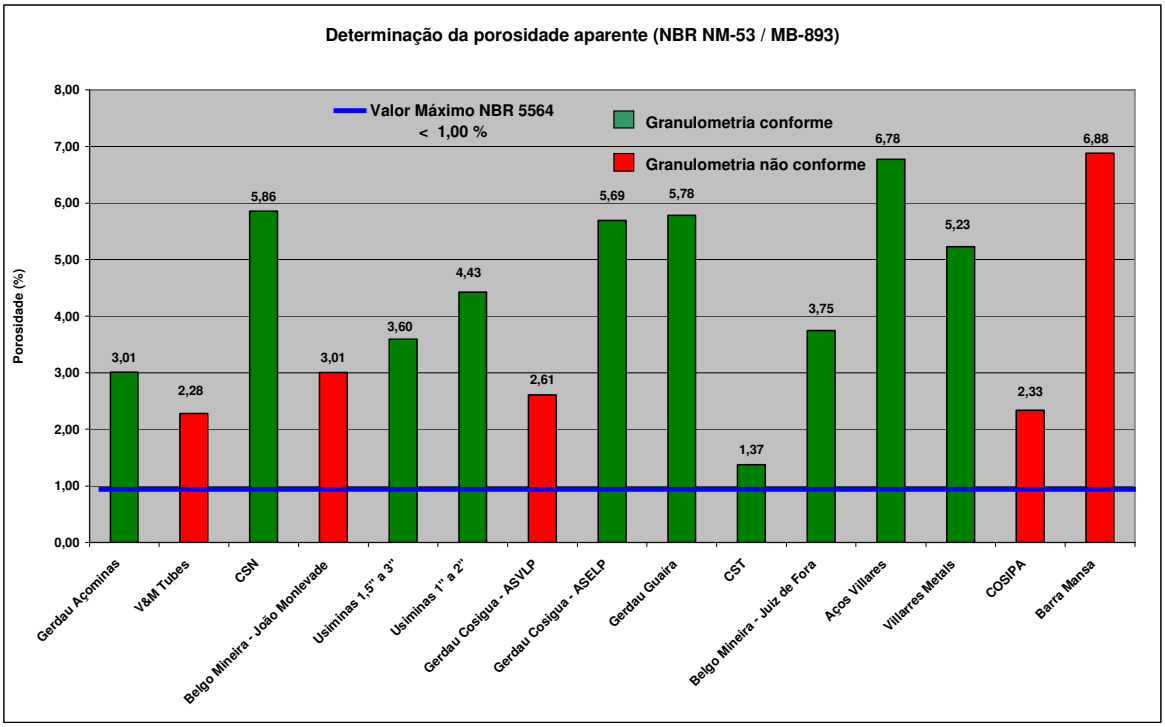


Figura 5.5 Valores de porosidade aparente do *agregado siderúrgico*.

Na tabela 5.1 está apresentada a faixa de variação dos valores encontrados de algumas propriedades físicas para o material pétreo e a faixa de valores determinados para o *agregado siderúrgico*.

Tabela 5.1 Faixa de valores de *agregado siderúrgico* x material pétreo.

Propriedades Físicas		
Propriedade	***Agregado Siderúrgico***	**Material Pétreo***
Massa Específica: (g/cm³)	2,75 a 3,734	2,76 a 2,80
Massa Unitária: (g/cm³)	1,517 a 1,888	1,540 a 1,591
Abrasão Los Angeles (%)	13,11 a 33,83	17,5 a 33,4
Absorção de Água (%)	0,54 a 4,48	0,45
Índice de Forma	Cúbicas	Cúbicas
Resistência ao Choque "TRETON" (%)	2,45 a 6,43	7,5 a 14,6
Porosidade Aparente (%)	1,37 a 6,88	-
Teor de partículas macias e friáveis (%)	Isentos	-
Impurezas orgânicas (%)	Isentos	-

Fonte: * Relatório de análises físicas de pedreiras (Pedra Sul Mineração, Pedreira Serra Lapa, Pedreira Embu S.A., Pedreira Construtora Martins Lanna, Pedreira Pedra Negra, Pedreira EMBAVI, Pedreira Serveling Civilsan).

Observa-se que os valores encontrados não apresentaram grandes variações, portanto, o *agregado siderúrgico* apresenta boas características para ser empregado em lastro de ferrovias.

6 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Foi realizada a análise estatística dos resultados dos ensaios listados na Tabela 4.2, obtendo-se valores médios conforme Tabela 6.1. Observa-se que no universo das amostras de *agregado siderúrgico* analisadas algumas propriedades apresentaram variabilidade nos coeficientes de variação. Esta variabilidade é conseqüência da qualidade, principalmente, das sucatas que entram no processo produtivo do aço.

Tabela 6.1 **Análise estatística dos resultados.**

Estatística dos resultados das amostras			
Propriedades	**Média**	**Desvio Padrão**	**Coef. de Variação**
Massa Específica: (g/cm³)	3,46	0,20	5,73%
Massa Unitária: (g/cm³)	1,73	0,11	6,38%
Abrasão Los Angeles (%)	22,35	7,02	31,42%
Absorção de Água (%)	1,88	1,15	61,17%
Índice de Forma	-	-	-
Resistência ao Choque "TRETON" (%)	4,73	1,18	24,95%
Porosidade Aparente (%)	3,81	1,73	45,35%
Teor de partículas macias e friáveis (%)	-	-	-
Impurezas orgânicas (%)	-	-	-
Resistência ao Esmagamento (%)	21,62	5,11	23,62%

Os resultados médios obtidos estão em conformidade com os trabalhos técnicos de LITTLE (1999) e SILVA (2001) e com os pesquisadores MACHADO (2000), MASUERO (2001), MANCIO (2001), GEYER (2001), GUMIERI (2002) e POLISSENI (2005).

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados encontrados para o *agregado siderúrgico* das siderúrgicas participantes, estão em conformidade com os resultados encontrados pelos trabalhos técnicos LITTLE (1999) e SILVA (2001) e pelos pesquisadores MACHADO (2000), MASUERO (2001), MANCIO (2001), GEYER (2001), GUMIERI (2002) e POLISSENI (2005).

As principais propriedades físicas atendem aos requisitos para emprego do agregado siderúrgico em lastro padrão de ferrovia, tais como massa específica, resistência ao desgaste (abrasão Los Angeles), resistência ao choque "TRETON", forma da partícula e granulometria.

A granulometria (*NBR 5564: Via férrea – Lastro padrão*) do *agregado siderúrgico* é requisito fundamental para o desempenho do lastro. As siderúrgicas Gerdau Açominas, Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), Usiminas, Gerdau Guaíra, Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST), Aços Villares, Gerdau Cosigua, Belgo Mineira (Juiz de Fora) e Villares Metals atenderam à granulometria.

As demais siderúrgicas que não atenderam à granulometria (*NBR 5564: Via férrea – Lastro padrão*) recomenda-se a adequação do processo produtivo (britagem e peneiramento) do *agregado siderúrgico* para que seja empregado em lastro ferroviário.

As análises ambientais por meio das normas *NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos* e *NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos* classificam, segundo a norma *NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação*, o *agregado siderúrgico* como resíduo não inerte e não perigoso (Classe II-A). Portanto, estão aptos para emprego no

lastro de ferrovias. Ressaltando-se, os valores de pH de todas as siderúrgicas analisadas foram inferiores ao valor de 12,5.

Em relação à expansibilidade, conclui-se que o tempo de estocagem do *agregado siderúrgico* influencia no fenômeno de expansão. Para as amostras ensaiadas, que segundo informações das siderúrgicas foram envelhecidas, o fenômeno de expansão não foi significativo, apresentando valores inferiores a 3 % aos 14 dias de ensaio, conforme preconiza o método PENNSYLVANIA TESTING METHOD – PTM 130 adaptado pelo DER-MG.

Com base nos resultados obtidos e apresentados nesta dissertação, entende-se que é possível sua utilização como lastro ferroviário.

8 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Após a caracterização física, química e microestrutural do agregado siderúrgico, incluindo o seu risco ambiental; sugere-se que se determine a propriedade de resistividade do agregado siderúrgico no lastro ferroviário e sua influência, nas ferrovias sinalizadas.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERNAZ, C.A.V.; FILHO, V.P.C.; NASCIMENTO, J.F.; LIMA, N.P. **Pavimento de alto desempenho estrutural executado com escória de aciaria.** Uberlândia, Brasil: 10ª Reunião de Pavimentação Urbana, 2000. 25p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11541**: Amostragem de material para lastro para rodovia férrea. Rio de Janeiro, 1991. 3 p.

_____. **NBR NM 26**: Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, 2001. 10p.

_____. **NBR NM 27**: Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001. 7p.

_____. **MB-893**: Lastro padrão – Determinação da massa específica aparente, da absorção de água e da porosidade aparente do material. Rio de Janeiro, 1987. 2p.

_____. **MB-894**: Lastro padrão – Determinação da forma do material. Rio de Janeiro, 1989. 2p.

_____. **NBR NM 51**: Agregado graúdo – Ensaio de abrasão "Los Ángeles". Rio de Janeiro, 2001. 6p.

_____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003. 8p.

_____. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6p.

_____. **NBR 5564**: Via férrea – Lastro padrão. Rio de Janeiro, 1991. 4p.

_____. **NBR 7218**: Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 1987. 4p.

_____. **NBR 7702**: Lastro ferroviário – Determinação da resistência do material à intempérie. Rio de Janeiro, 1983. 2p.

_____. **NBR 8697**: Lastro – Determinação do teor de fragmento macio e friável. Rio de Janeiro, 1984. 3p.

_____. **NBR 8938**: Lastro padrão – Determinação da resistência ao choque. Rio de Janeiro, 1985. 3p.

_____. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004. 71p.

_____. **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004. 16p.

_____. **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004. 3p.

_____.**NBR15112:** Resíduos de construção civil e resíduos volumosos - Áreas de transbordo e triagem – diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

_____.**NBR15113**: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

_____.**NBR15114**: Resídos sólidos da construção civil - Áreas de reciclagem – Aterros - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

_____.**NBR15115**: Agregados reciclados e resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004.

_____.**NBR15116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização de pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NM 46**: Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira de 75 micrometros por lavagem. Rio de Janeiro, 2001. 4p.

Conselho Regional de Engenharia e Arquitetura – CREA – **REVISTA VÉRTICE** – MG, 2005.

DAIDO STEEL. Aproveitamento em escórias de forno elétrico. In: Simpósio do Grupo de Forno Elétrico, 39, Comitê de Pesquisa Cooperada da Japan and Steel Association, maio/1993, 13p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 089/94**: Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Rio de Janeiro, 1994. 6p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 197/97**: Agregados – Determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos. Rio de Janeiro, 1997. 5 p.

FEATHERSTONE, W.B. Slag treatment improvement by dry granulation. **Iron and Steel Engineer.** July, 1998. Pag 42-46.

GEYER, Rejane Maria Tubino. **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria elétrica como adição ao concreto**. 2001. 170f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

GUMIERI, Adriana Guerra. **Estudo da viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria do processo LD como adição em cimentos**. 2002. 226f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

Instituto Brasileiro de Siderurgia – IBS. **Anuário Estatístico**. Rio de Janeiro: IBS 2005.

Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON – **COMITE TÉCNICO DO MEIO AMBIENTE** – CT206 IBRACON: IBRACON 2005.

JOHN, V.M.; KRAAYENBRINK, E.A.; VAN WAMELEN, J. Upgradeability: and added dimension to performance evaluation. *In*: **Int. Symp. Applications of the Performance Concept in Building**. *Proceedings...* Tel Aviv: CIB, 1996.

_____. **Avaliação da vida útil de materiais, componentes e edifícios**. Porto Alegre, CPGEC/UFRGS, 1987, 130p. (Dissert. Mestrado)

_____. Pesquisa e desenvolvimento de mercados para resíduos. *In*: **Workshop reciclagem e reutilização de resíduos como materiais de construção**. *Anais.* São Paulo: ANTAC, 25-16 Nov. 1996 p.21-31.

_____. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. São Paulo, PCC/USP, 1995 200p. (Tese de Doutorado)

_____. **Desenvolvimento sustentável, construção civil, reciclagem e trabalho multidisciplinar**. São Paulo, 2005.

HIRANO, Y. How to expand the market for BOF slags in Japan. In: COMMITTEE ON ENVIROMENTAL AFFAIR. **Utilization of blast furnace and bof slag.** Brussels, Belgium: International Iron and Steel Institute. 1984. section A2, p.32-43.

KRASS, K. **Possibilités et problèmes de valorisation dês scories d'acerie em Republique Federale d'Allemagne**. Revue de Métallurgie, Paris, p315-320, mai., 1978.

LITTLE, A.D. SETEPLA TECNOMETAL ENGENHARIA Ltda. **Estudo sobre aplicações de escórias siderúrgicas:** relatório final. Rio de Janeiro, 1999. 100 p.

MACHADO, A.T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria.** 2000. 153p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

MANCIO, M. **Contribuição ao estudo do fenômeno da instabilidade volumétrica das escórias de aciaria elétrica**. 2001. 142f. Dissertação (Mestrado em Engenharia

Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

MASUERO, A.B. **Estabilização das escórias de aciaria elétrica com vistas a sua utilização como substituição ao cimento**. 2001. 264f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

NOUMAN, A.A. et al. The use of steel slag in asphaltic concrete. ASTM – Special – Technical – Publication. N 1147, Philadelphia, PA, U.S.A. p.3-18.

PENNSYLVANIA TESTING METHOD – PTM 130. **Método de Ensaio para Avaliação do Potencial de Expansão de Escória de Aciaria**. Maio 1978. Adaptado pelo Departamento de Estradas e Rodagem de Minas Gerais – DMA – 1/ DER – MG – 1982.

POLISSENI, A.E. **Estudo da viabilidade técnica da utilização de escória de aciaria elétrica micronizada como material cimentício**. 2005. 220f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

ROSSI, L. A. A escória de aciaria e a política ambiental da CST / Política de destinação de resíduo da CST. In: SEMINÁRIO DE ESCÓRIA DE ACIARIA. Vitória. Jul. 2003.

RUBIO, A.R.; CARRETERO, J.G. La aplicación de las escórias de aceria en carreteras. Ingenieria Civil, V80, p.5-8, 1991.

SILVA, S.N. et al. **Desenvolvimento de novas rotas de aplicação da escória de aciaria LD**. In: SEMINÁRIO DE FUSÃO, REFINO E SOLIDIFICAÇÃO DOS METAIS – STEELMAKING SEMINAR, XXXII, 2001, Salvador. **Anais**... São Paulo: Divisão técnica de fusão, refino e solidificação dos metais, 2001. p.155-168.

SJÖSTRÖM, Ch. Durability and sustainable se of building materiais. *In*: **Sustainable use of materiais.** J.W. Llewellyn & H. Devies editors. London RE/RILEM, 1992.

10 ANEXOS

- ANEXO A – Resultados individuais da distribuição granulométrica das siderúrgicas
- ANEXO B – Difratogramas das Difrações de Raios-X
- ANEXO C – Resultados da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com EDS
- ANEXO D – Resultados de Caracterização Ambiental com Resultados Classificatórios dos Ensaios de Lixiviação e Solubilização
- ANEXO E – Apresentação da Caracterização da Expansibilidade com Resultados Classificatórios do Ensaio PTM 130/DER – MG

ANEXO A

Resultados individuais da distribuição granulométrica das siderúrgicas

ANEXO A

Resultados individuais da distribuição granulométrica das siderúrgicas

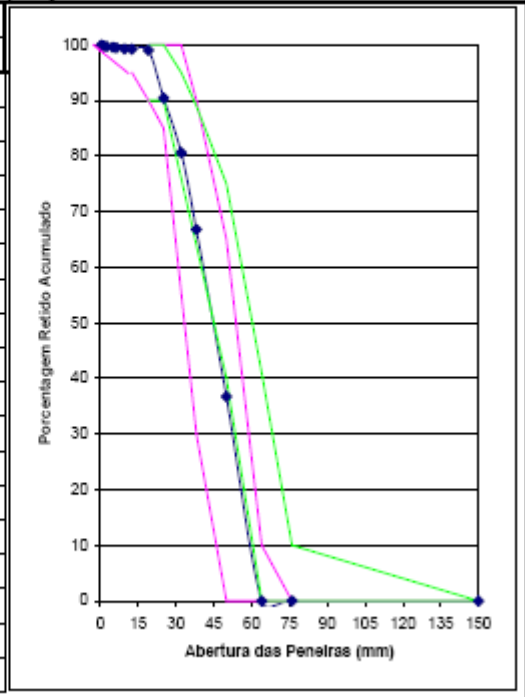
Universidade Federal de Juiz de Fora - Faculdade de Engenharia - UFJF

Planilha de Caracterização de Agregado

Procedência: *Gerdau Cosigua* Local da Coleta: *Pátio de Rejeitos - Santa Cruz* Tipo de Material: *Aciaria Elétrica - ASELP* Data da Coleta: *11/8/2005*

Determinação da Composição Granulométrica - NBR NM 248

Peneiras (mm)	Média da Massa Retida (g)	Porcentagens	
		% Retida	% Retida Acumulada
150	0,0	0	0
76	0,0	0	0
64	0,0	0	0
50	11015,0	37	37
38	8980,0	30	67
32	4150,0	14	81
25	2930,0	10	90
19	2580,0	9	99
12,5	64,8	0	99
9,5	19,2	0	99
6,3	47,6	0	99
4,8	39,3	0	100
2,4	37,9	0	100
1,2	36,4	0	100
0,6	22,9	0	100
0,3	10,0	0	100
0,15	40,2	0	100
Fundo	42,0	0	100



Legenda: Agregado — Faixa A (NBR 5564/91) — Faixa B (NBR 5564/91)

Caracterização do Agregado

Módulo de Finura:	8,64	NBR NM 248
Dimensão. Máx. Característica: (mm)	64	NBR NM 248
Massa Específica: (g/cm³)	3,52	NBR 7418
Massa Unitária: (g/cm³)	1,593	NBR 7251
Abrasão Los Angeles (%)	25,24	NBR NM 51
Absorção de Água (%)	2,23	NBR 7418
Indice de Forma	CÚBICA	NBR 6954
Resistência ao Choque " TRETON" (%)	3,54	NBR 8938
Porosidade Aparente (%)	5,69	NBR 7418
Teor de Partículas macias e friáveis (%)	Isento	NBR 8697
Impurezas Orgânicas (%)	Isento	NBR 7218
Resistência ao Esmagamento (%)	20,75	DNER-ME 197/97

Observações:

Conformidade Granulométrica em Relação à:

NBR 5564/91 - Via Férrea - Lastro padrão

[X] Conforme [ ] Não Conforme

Faixa de Enquadramento: A

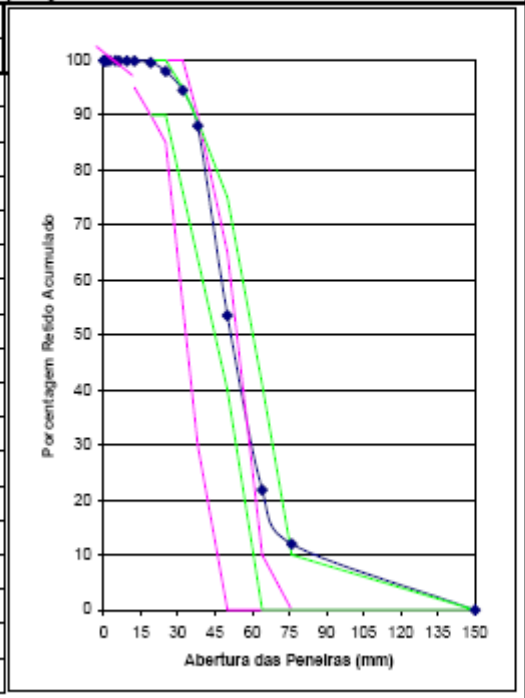
Universidade Federal de Juiz de Fora - Faculdade de Engenharia - UFJF

Planilha de Caracterização de Agregado

Procedência: *Gerdau Açominas* **Local da Coleta:** *Pátio de Rejeitos - Ouro Branco* **Tipo de Material:** *Escória LD (Oxi) ASVLP* **Data da Coleta:** *18/11/2004*

Determinação da Composição Granulométrica - NBR NM 248

Peneiras (mm)	Média da Massa Retida (g)	Porcentagens	
		% Retida	% Retida Acumulada
150	0,0	0	0
76	3600,0	12	12
64	2950,0	10	22
50	9520,0	32	54
38	10350,0	34	88
32	1925,0	6	94
25	1035,0	3	98
19	480,2	2	100
12,5	93,3	0	100
9,5	4,5	0	100
6,3	4,2	0	100
4,8	1,3	0	100
2,4	1,9	0	100
1,2	3,1	0	100
0,6	1,7	0	100
0,3	5,1	0	100
0,15	7,1	0	100
Fundo	18,4	0	100



Legenda: Agregado — Faixa A (NBR 5564/91) — Faixa B (NBR 5564/91)

Caracterização do Agregado

Módulo de Finura:	8,99	NBR NM 248
Dimensão. Máx. Característica: (mm)	150	NBR NM 248
Massa Específica: (g/cm³)	3,49	NBR 7418
Massa Unitária: (g/cm³)	1,784	NBR 7251
Abrasão Los Angeles (%)	16,98	NBR NM 51
Absorção de Água (%)	1,22	NBR 7418
Indice de Forma	CÚBICA	NBR 6954
Resistência ao Choque " TRETON" (%)	4,67	NBR 8938
Porosidade Aparente (%)	3,01	NBR 7418
Teor de Partículas macias e friáveis (%)	Isento	NBR 8697
Impurezas Orgânicas (%)	Isento	NBR 7218
Resistência ao Esmagamento (%)	13,42	DNER-ME 197/97

Observações:

Conformidade Granulométrica em Relação à:

NBR 5564/91 - Via Férrea - Lastro padrão

[X] Conforme [ ] Não Conforme

Faixa de Enquadramento: B

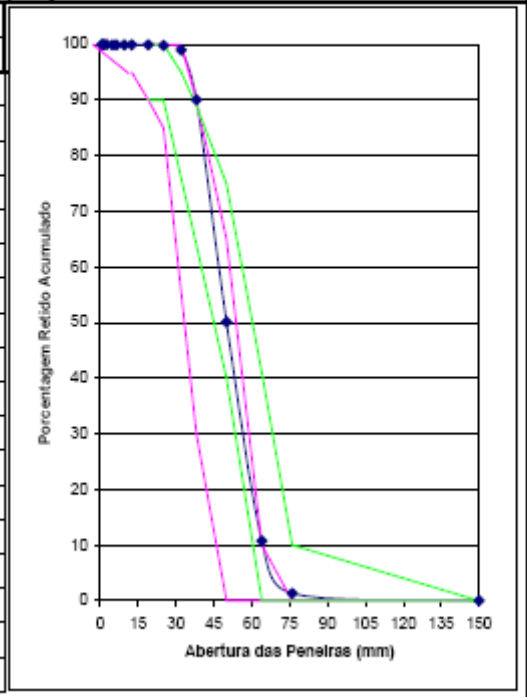
Universidade Federal de Juiz de Fora - Faculdade de Engenharia - UFJF

Planilha de Caracterização de Agregado

Procedência: *CSN* **Local da Coleta:** *Pátio de Rejeitos - Volta Redonda* **Tipo de Material:** *Escória LD (Oxi) ASELP* **Data da Coleta:** *30/11/2004*

Determinação da Composição Granulométrica - NBR NM 248

Peneiras (mm)	Média da Massa Retida (g)	Porcentagens	
		% Retida	% Retida Acumulada
150	0,0	0	0
76	400,0	1	1
64	2830,0	9	11
50	11800,0	39	50
38	12000,0	40	90
32	2880,0	9	99
25	240,0	1	100
19	35,0	0	100
12,5	0,0	0	100
9,5	0,0	0	100
6,3	0,5	0	100
4,8	4,8	0	100
2,4	3,1	0	100
1,2	5,3	0	100
0,6	3,9	0	100
0,3	5,8	0	100
0,15	7,5	0	100
Fundo	19,2	0	100



Legenda: Agregado — Faixa A (NBR 5564/91) — Faixa B (NBR 5564/91)

Caracterização do Agregado

Módulo de Finura:	8,91	NBR NM 248
Dimensão. Máx. Característica: (mm)	76	NBR NM 248
Massa Específica: (g/cm³)	3,51	NBR 7418
Massa Unitária: (g/cm³)	1,739	NBR 7251
Abrasão Los Angeles (%)	15,54	NBR NM 51
Absorção de Água (%)	4,48	NBR 7418
Indice de Forma	CÚBICA	NBR 6954
Resistência ao Choque " TRETON" (%)	2,45	NBR 8938
Porosidade Aparente (%)	5,86	NBR 7418
Teor de Partículas macias e friáveis (%)	Isento	NBR 8697
Impurezas Orgânicas (%)	Isento	NBR 7218
Resistência ao Esmagamento (%)	13,63	DNER-ME 197/97

Observações:

Conformidade Granulométrica em Relação à:

NBR 5564/91 - Via Férrea - Lastro padrão

[X] Conforme [ ] Não Conforme

Faixa de Enquadramento: [A]

ANEXO B

Difratogramas das Difrações de Raios-X

Tabela B.1 Compostos mineralógicos

Minerais	*Quimismo Aproximado*	Freqüência relativa (%)									
		Usiminas 1,5'' a 3''	**Usiminas 1'' a 2''**	**Gerdau Guaíra**	**CST**	**Gerdau Açominas**	**CSN**	**Aços Villares**	**Gerdau Cosigua**	**Villares Metals**	**Belgo Mineira – JF**
Wustita	FeO	****	***	****	****	****	****	**	****	nd	****
C_2S	Ca_2SiO_4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	**	nd	nd
Cuspidina	$[Ca_4Si_2O_7(F, OH)_2]$	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	***	nd
Hematita	Fe_2O_3	**	*	nd	*	*	*	nd	nd	**	nd
C_2F	$2CaO.Fe_2O_3$	**	***	nd	***	**	***	**	nd	nd	nd
Cromita - Magnesiocromita	$(FeCr_2O_4).[(Mg,Fe)(Al,Cr)_2O_4]$	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	****	nd
Belita	$2CaO.SiO_2$	**	***	nd	**	**	**	****	nd	nd	nd
Forsterita	Mg_2SiO_4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	*	nd	nd
Cal livre	CaO	**	*	nd	**	**	**	nd	nd	nd	nd
Ferro Metálico	Fe^0	*	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Magnesioferrita - Magnetita	$(MgFe_2^{3+}O_4)$ – $(Fe^{2+}Fe_2^{3+}O_4)$	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	****	nd
Gehlenita	$2CaO.Al_2O_3.SiO_2$	nd	**	nd	nd	nd	*	nd	*	**	**
Glaucocroíta	$(CaMnSiO_4)$	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	**	**
Kirschsteinita	$CaFeSiO_4$	nd	nd	***	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Portlandita	$Ca(OH)_2$	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	*	nd	tr
Akermanita	$Ca_2MgSi_2O_7$	nd	nd	*	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
$C_{12}A_7$	$12CaO.7Al_2O_3$	*	**	nd	*	tr	*	*	nd	nd	nd

Simbologia: nd = não detectado *** = freqüente

tr = traços **** = muito freqüente

* = presente ? = possível

** = pouco freqüente

Nota: A avaliação semiquantitativa das fases está fundamentada na altura dos picos de difração, cuja intensidade é função do teor, da simetria e do grau de cristalinidade dos constituinte.

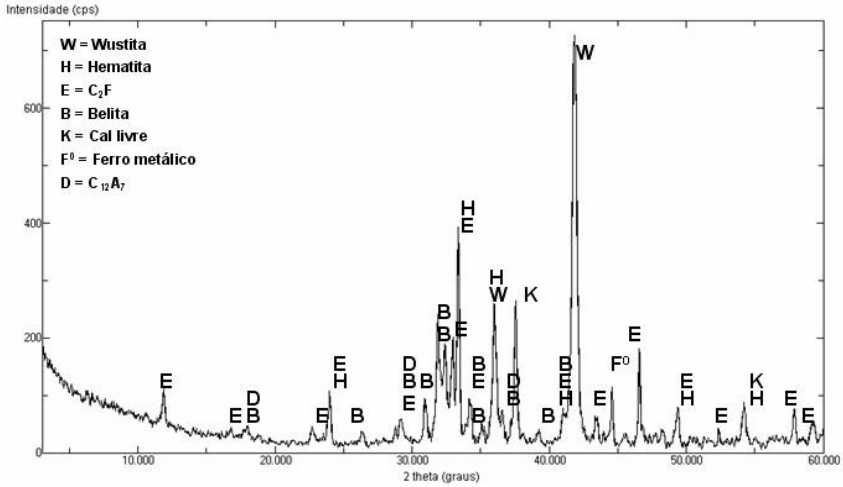


Figura B.1 Difratograma de raios-X do *agregado siderúrgico* – Usiminas 1,5” a 3”.

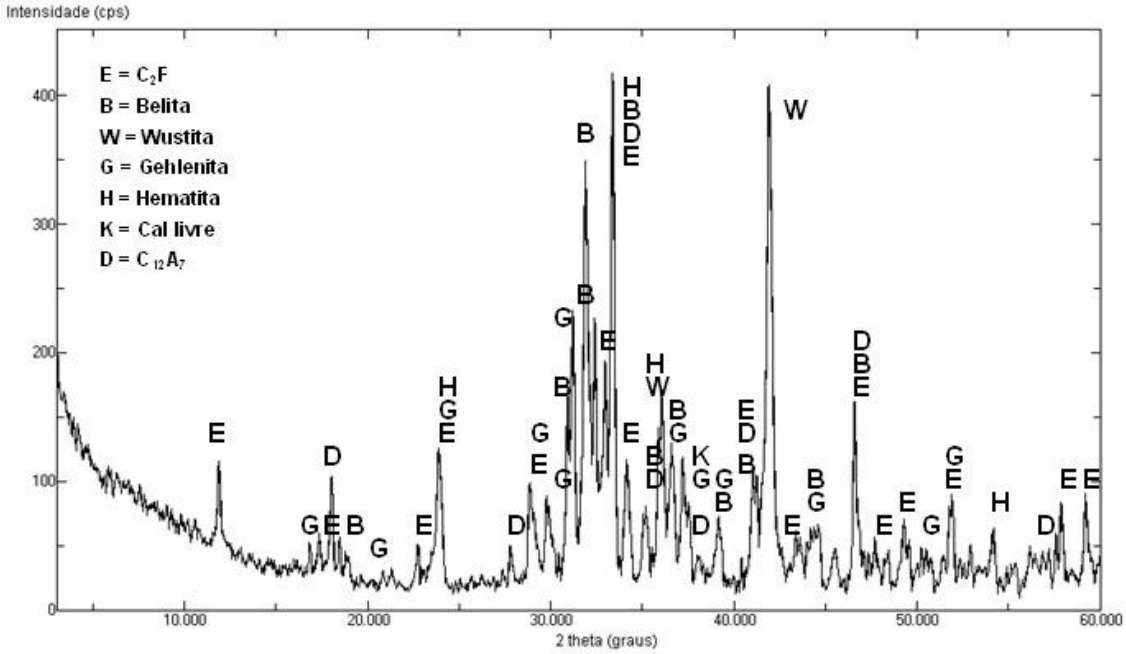


Figura B.2 Difratograma de raios-X do *agregado siderúrgico* – Usiminas 1” a 2”.

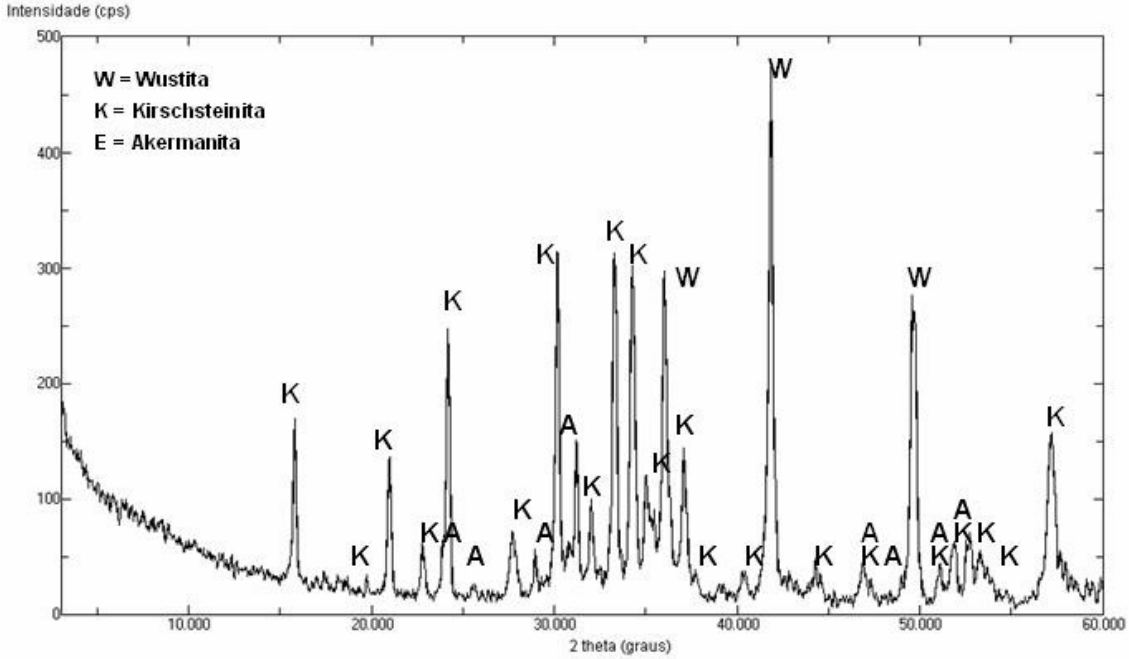


Figura B.3 Difratograma de raios-X do *agregado siderúrgico* – Gerdau Guairá.

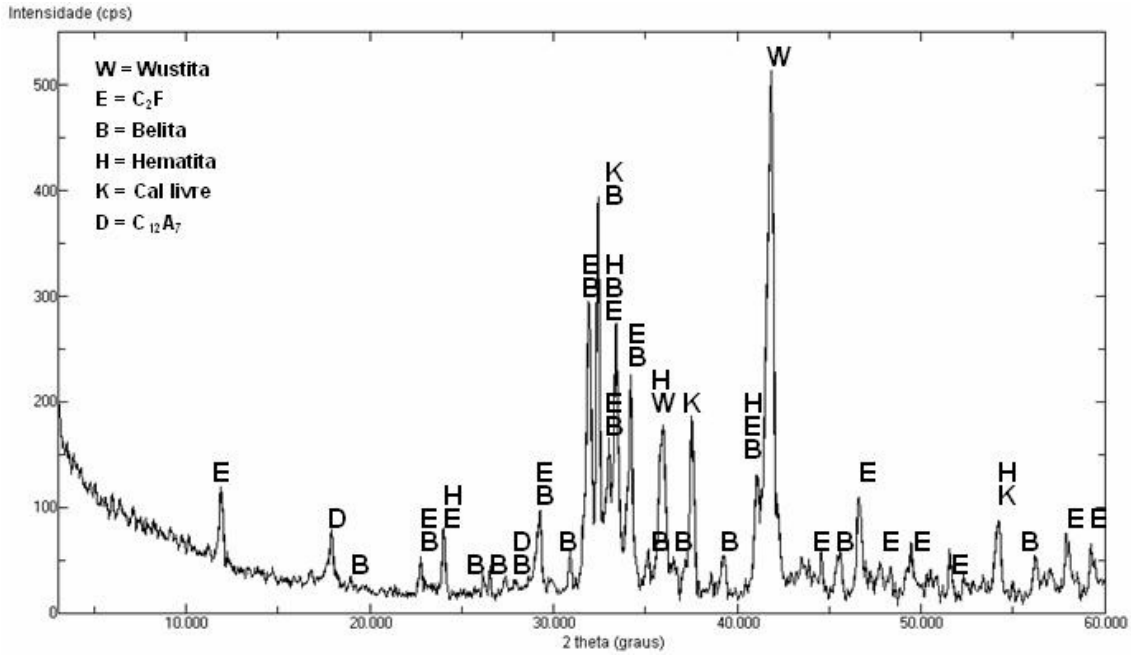


Figura B.4 Difratograma de raios-X do *agregado siderúrgico* – CST.

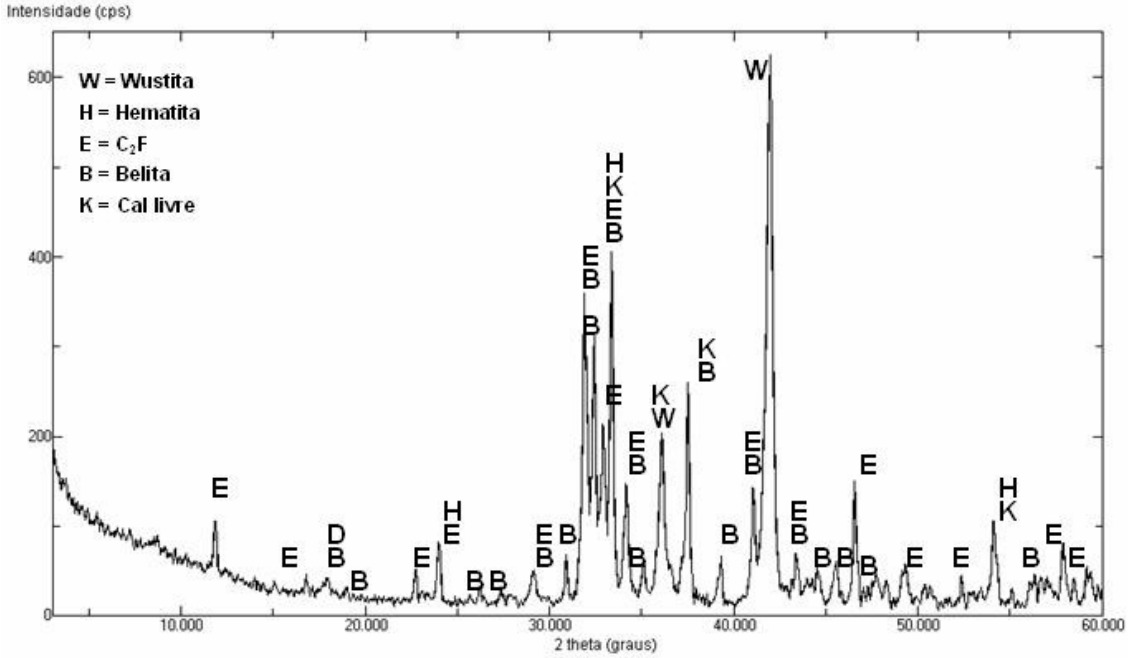


Figura B.5 Difratograma de raios-X do *agregado siderúrgico* – Gerdau Açominas.

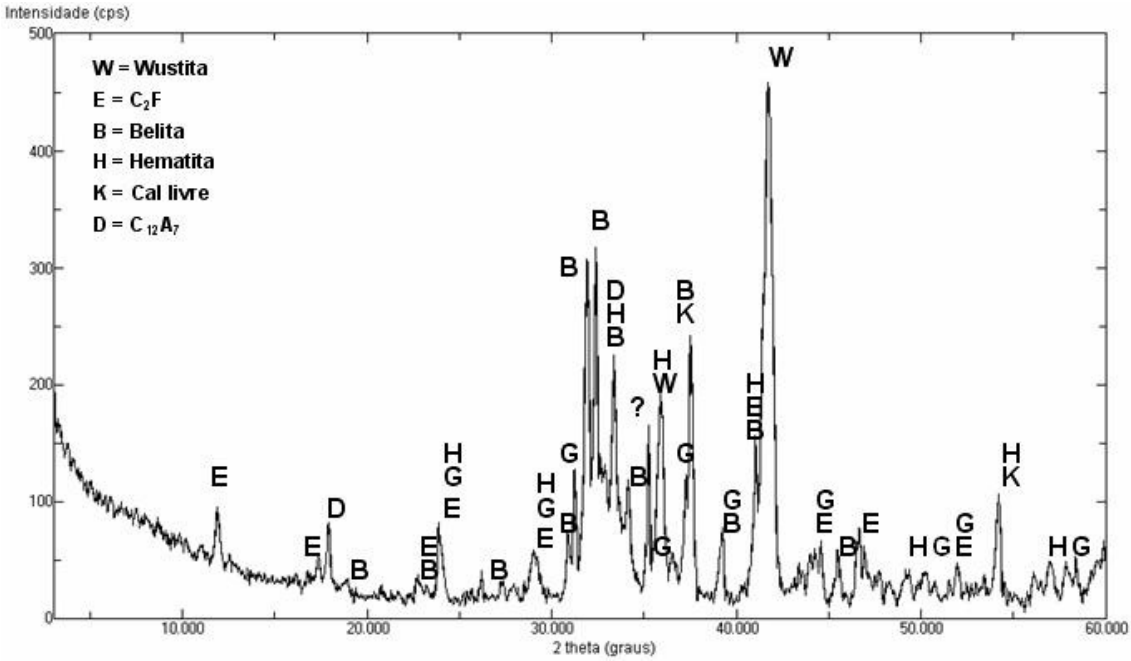


Figura B.6 Difratograma de raios-X do *agregado siderúrgico* – CSN.

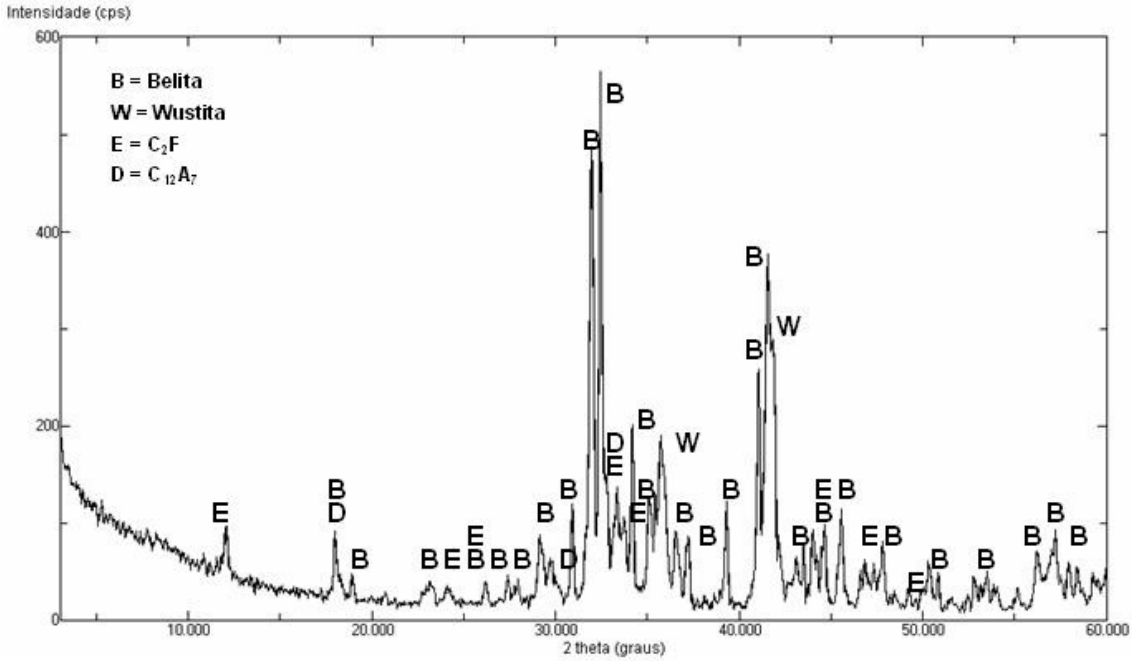


Figura B.7 Difratograma de raios-X do *agregado siderúrgico* – Aços Villares.

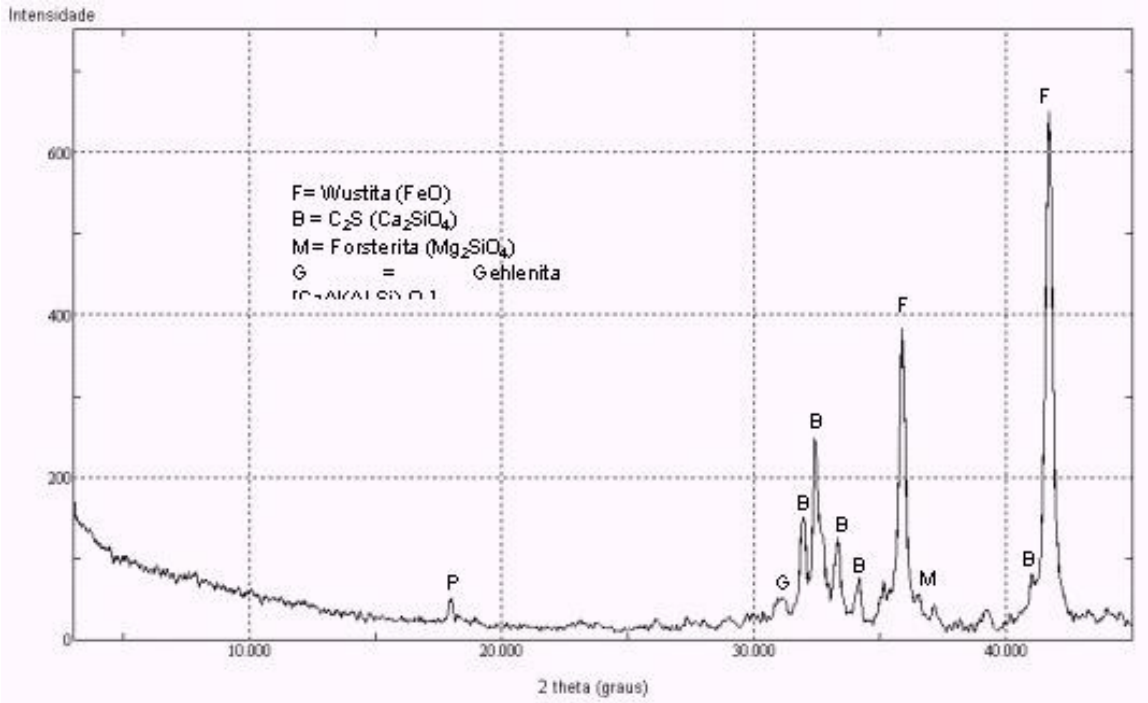


Figura B.8 Difratograma de raios-X do *agregado siderúrgico* – Gerdau Cosigua. (ASELP)

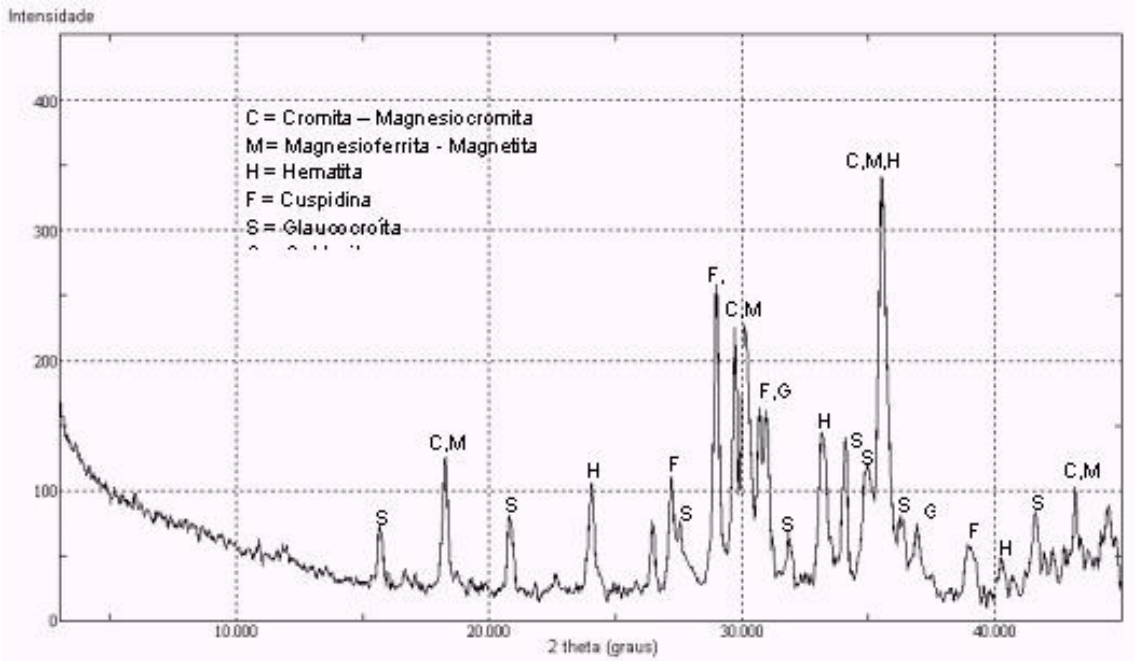


Figura B.9 Difratograma de raios-X do *agregado siderúrgico* – Villares Metals.

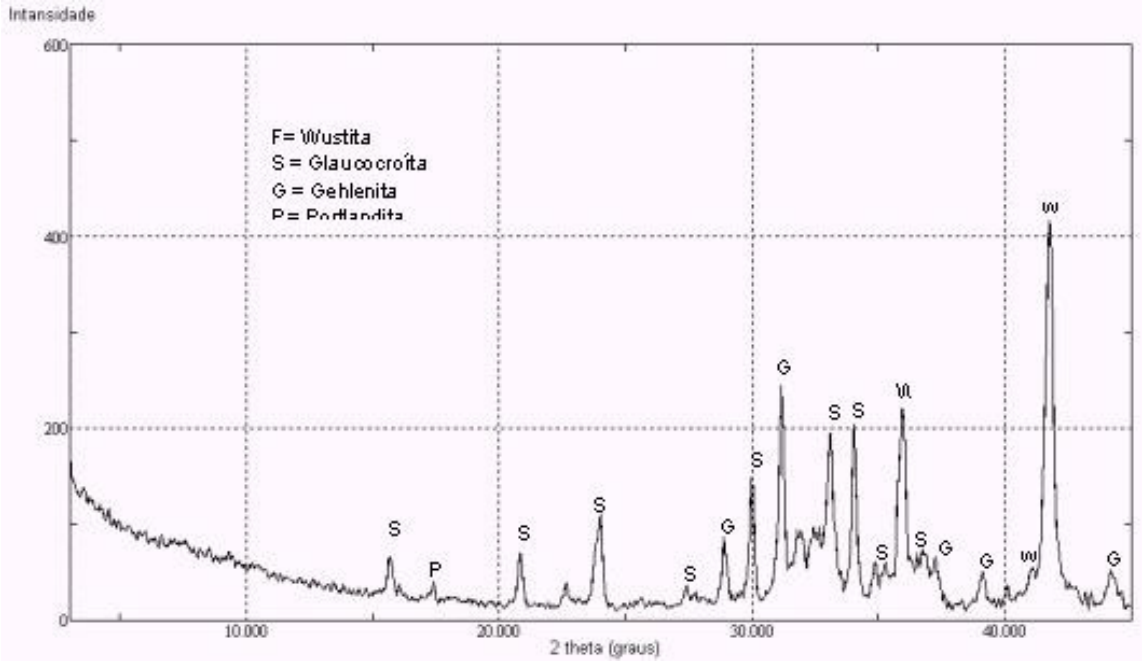


Figura B.10 Difratograma de raios-X do *agregado siderúrgico* – Belgo Mineira/JF.

ANEXO C

Resultados da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com EDS

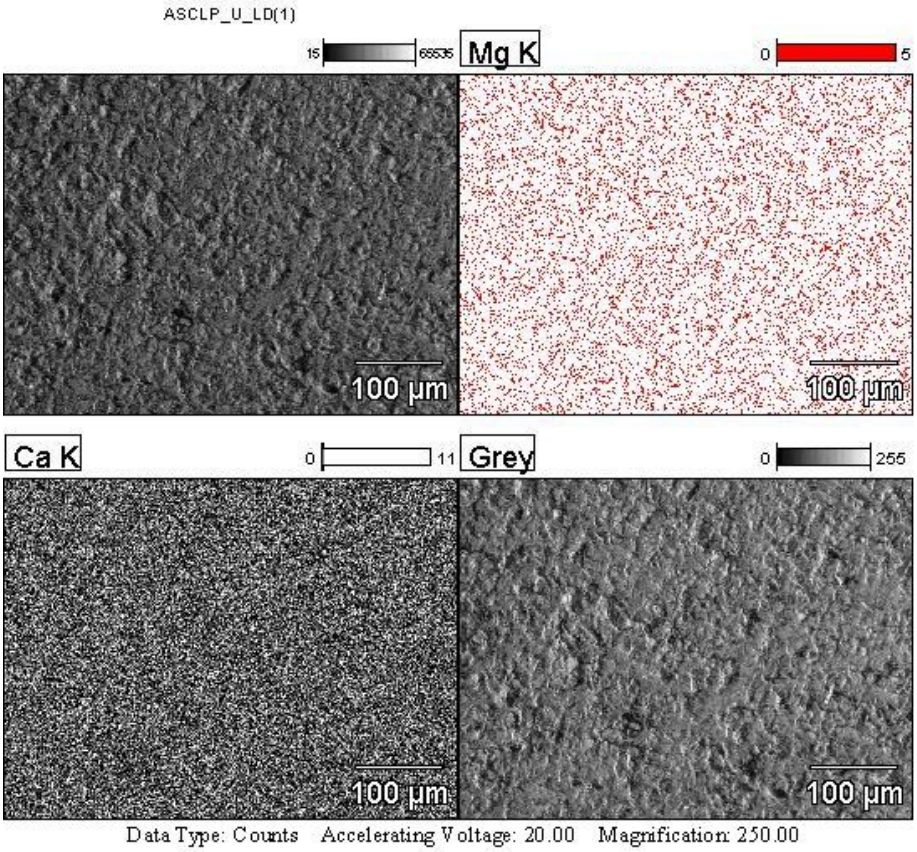


Figura C.1 Micrografia do *agregado siderúrgico*. MEV – elétrons secundários – Ampliação 250x. Usiminas 1,5” a 3”.

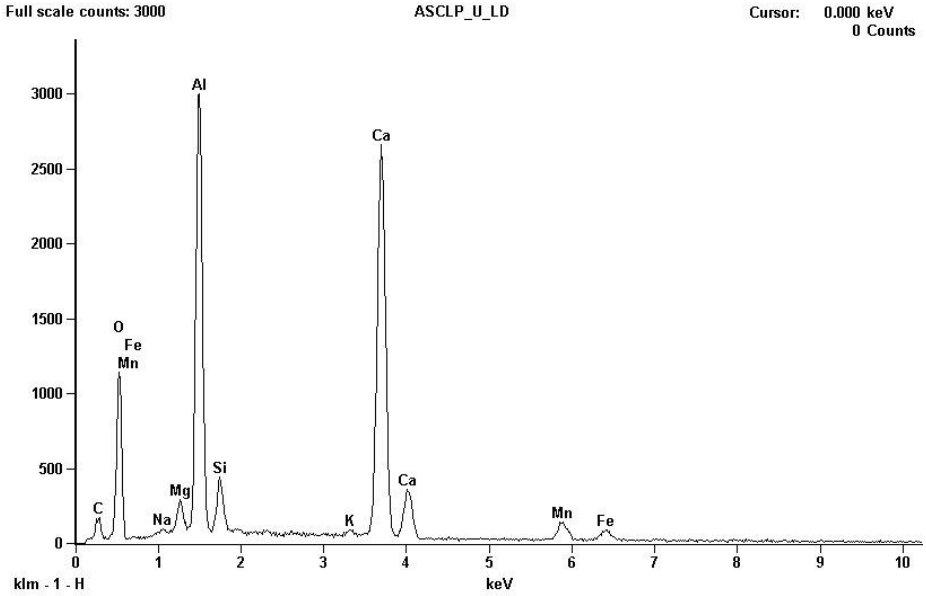


Figura C.2 EDS do *agregado siderúrgico* – Usiminas 1,5” a 3”.

Observam-se na Tabela C.1 os resultados das análises químicas via EDS e os elementos químicos de maior concentração são oxigênio, alumínio e cálcio.

Tabela C.1 Resultados do EDS do *agregado siderúrgico* – Usiminas 1,5” a 3”.

Elem. Line	***Net Counts***	***K-Ratio***	***ZAF***	***Weight Conc %***	***Weight % Error***	***Atom Conc %***	***Atom % Error***	***Comp. Conc %***
C K	1069	0.026	4.794	6.29	+/-0.22	11.85	+/- 0.41	6.29
O K	7681	0.105	6.487	34.91	+/-0.56	49.36	+/- 0.79	34.91
Na K	278	0.003	3.080	0.46	+/-0.09	0.45	+/- 0.09	0.46
Mg K	1634	0.012	2.095	1.30	+/-0.12	1.21	+/- 0.11	1.30
Al K	26011	0.215	1.700	18.82	+/-0.18	15.78	+/- 0.15	18.82
Si K	3005	0.026	1.753	2.38	+/-0.11	1.92	+/- 0.09	2.38
K K	413	0.006	1.092	0.32	+/-0.04	0.18	+/- 0.02	0.32
Ca K	33826	0.537	1.100	30.39	+/-0.26	17.15	+/- 0.15	30.39
Mn K	1796	0.053	1.253	3.40	+/-0.24	1.40	+/- 0.10	3.40
Fe K	846	0.028	1.217	1.72	+/-0.23	0.70	+/- 0.09	1.72
Total				100.00		100.00		100.00

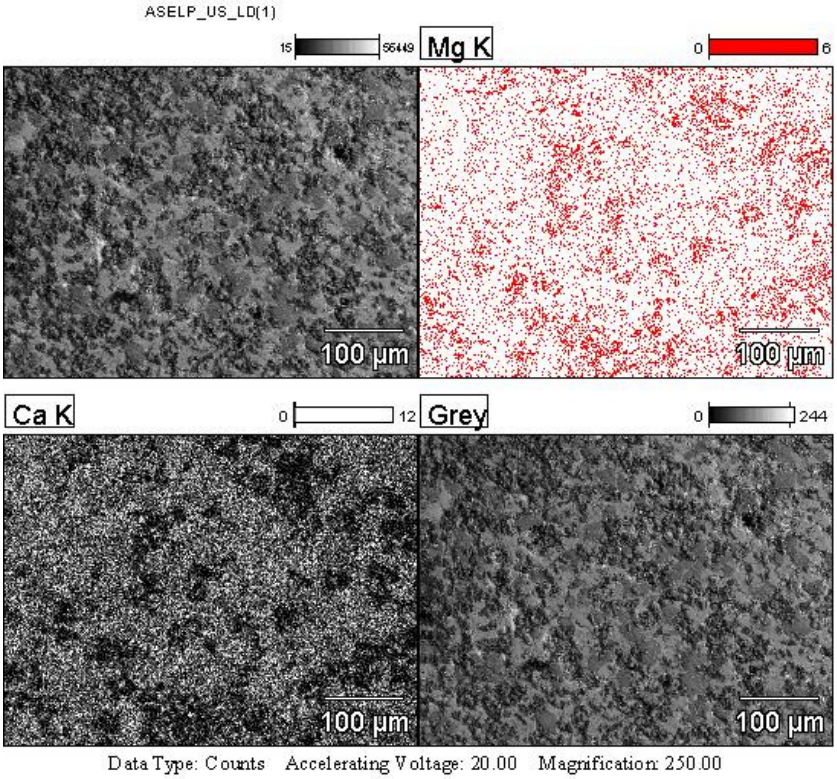


Figura C.3 Micrografia do *agregado siderúrgico*. MEV – elétrons secundários – Ampliação 250x. Usiminas 1” a 2”.

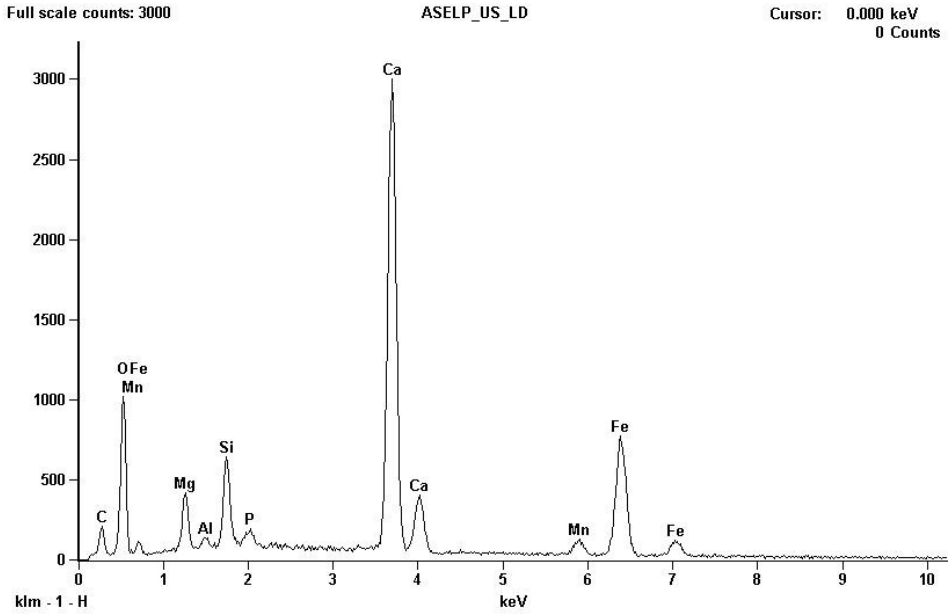


Figura C.4 EDS do *agregado siderúrgico* – Usiminas 1” a 2”.

Observam-se na Tabela C.2, os resultados das análises químicas via EDS e os elementos químicos de maior concentração são oxigênio, cálcio e ferro.

Tabela C.2 – Resultados do EDS do *agregado siderúrgico* – Usiminas 1” a 2”

Elem. Line	*Net Counts*	*K-Ratio*	*ZAF*	*Weight Conc %*	*Weight % Error*	*Atom Conc %*	*Atom % Error*	*Comp. Conc %*
C K	1288	0.026	3.674	5.81	+/-0.18	12.45	+/- 0.39	5.81
O K	6980	0.079	6.230	29.97	+/-0.54	48.23	+/- 0.87	29.97
Mg K	2923	0.018	2.752	2.97	+/-0.11	3.14	+/- 0.11	2.97
Al K	496	0.003	2.144	0.44	+/-0.06	0.42	+/- 0.06	0.44
Si K	4968	0.035	1.640	3.55	+/-0.12	3.26	+/- 0.11	3.55
P K	1280	0.010	1.483	0.93	+/-0.12	0.78	+/- 0.10	0.93
Ca K	38187	0.488	1.056	31.55	+/-0.26	20.27	+/- 0.16	31.55
Mn K	1560	0.037	1.218	2.74	+/-0.13	1.29	+/- 0.06	2.74
Fe K	11643	0.304	1.183	22.04	+/-0.39	10.16	+/- 0.18	22.04
Total				100.00		100.00		100.00

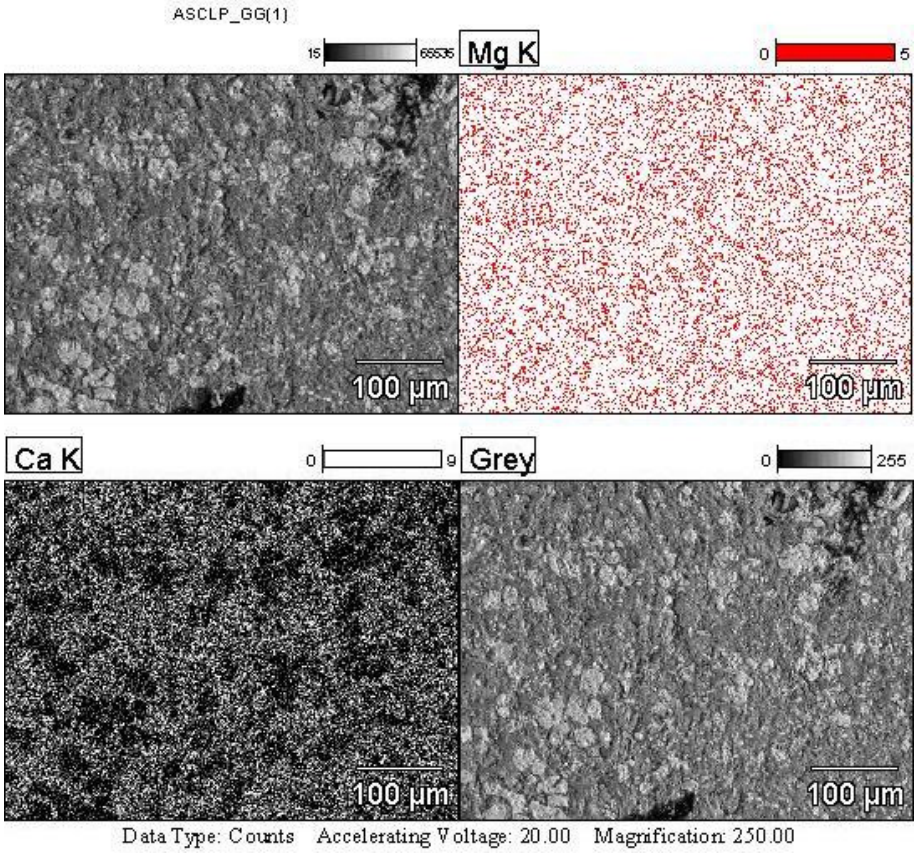


Figura C.5 – Micrografia do *agregado siderúrgico*. MEV – elétrons secundários – Ampliação 250x. Gerdau Guaíra

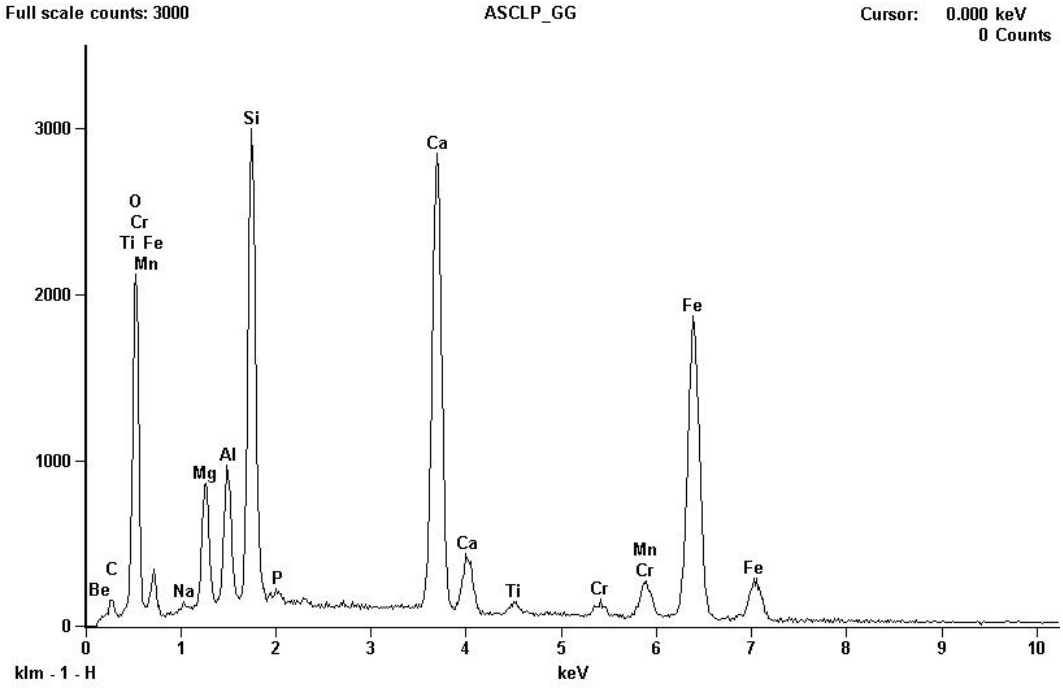


Figura C.6 – EDS do *agregado siderúrgico* – Gerdau Guaíra

Observa-se na Tabela C.3, os resultados das análises químicas via EDS e os elementos químicos de maior concentração são oxigênio, silício, cálcio e ferro.

Tabela C.3 Resultados do EDS do *agregado siderúrgico* – Gerdau Guairá.

Elem. Line	*Net Counts*	*K-Ratio*	*ZAF*	*Weight Conc %*	*Weight % Error*	*Atom Conc %*	*Atom % Error*	*Comp. Conc %*
Be K	0	0,000	6,474	0,00	---	0,00	+/- 0,00	0,00
C K	907	0,009	5,073	2,96	+/-0,13	6,77	+/- 0,31	2,96
O K	16906	0,100	4,213	26,62	+/-0,19	45,64	+/- 0,33	26,62
Na K	290	0,001	3,998	0,33	+/-0,08	0,40	+/- 0,09	0,33
Mg K	6621	0,022	2,617	3,58	+/-0,11	4,04	+/- 0,12	3,58
Al K	6749	0,025	2,070	3,23	+/-0,13	3,28	+/- 0,13	3,23
Si K	26482	0,103	1,654	10,78	+/-0,12	10,53	+/- 0,12	10,78
P K	734	0,003	1,604	0,33	+/-0,04	0,29	+/- 0,03	0,33
Ca K	36305	0,257	1,061	17,20	+/-0,15	11,77	+/- 0,10	17,20
Ti K	981	0,009	1,168	0,68	+/-0,09	0,39	+/- 0,05	0,68
Cr K	1230	0,014	1,095	0,94	+/-0,11	0,49	+/- 0,06	0,94
Mn K	3214	0,042	1,177	3,13	+/-0,20	1,56	+/- 0,10	3,13
Fe K	28651	0,416	1,150	30,22	+/-0,33	14,84	+/- 0,16	30,22
Total				100,00		100,00		100,00

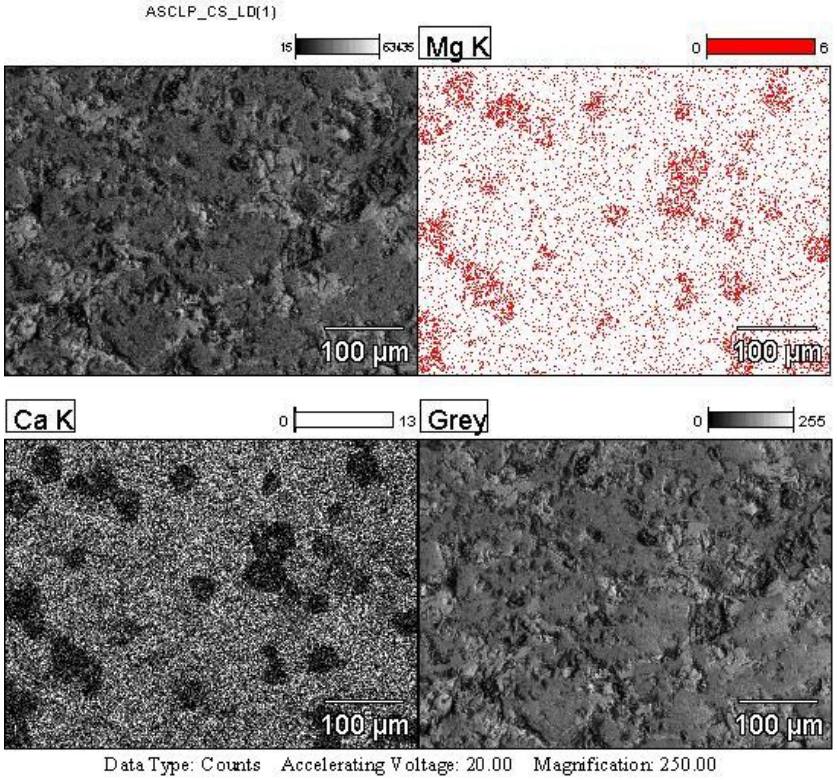


Figura C.7 Micrografia do agregado siderúrgico. MEV – elétrons secundários – Ampliação 250x. CST (Companhia Siderúrgica de Tubarão).

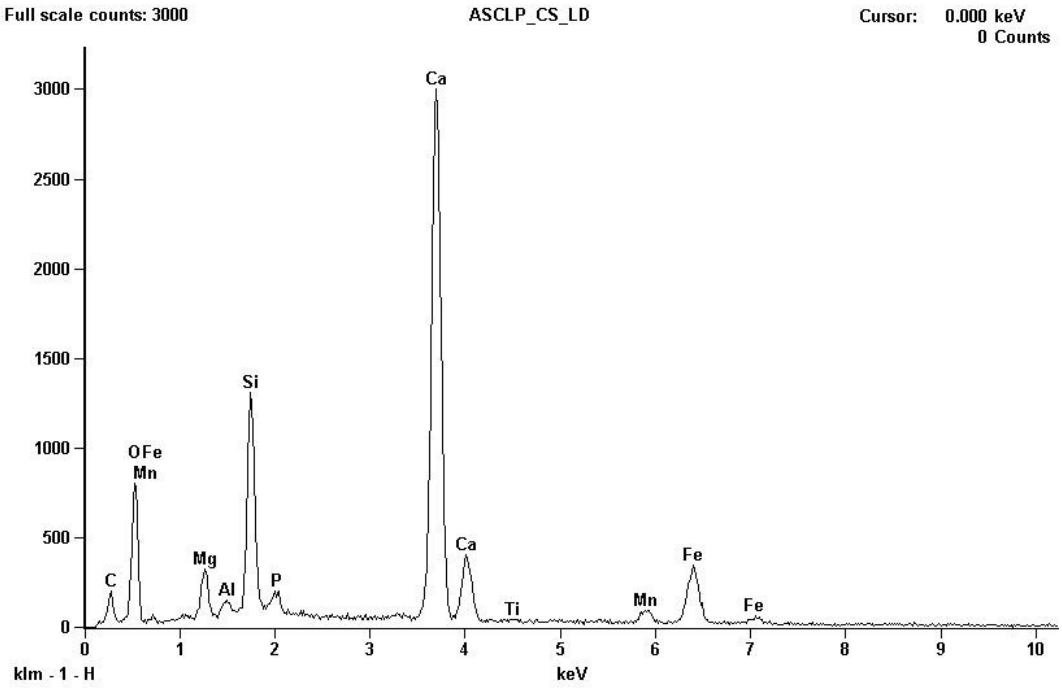


Figura C.8 EDS do *agregado siderúrgico* – CST.

Observa-se na Tabela C.4, os resultados das análises químicas via EDS e os elementos químicos de maior concentração são oxigênio, silício, cálcio e ferro.

Tabela C.4 Resultados do EDS do *agregado siderúrgico* – CST.

Elem. Line	*Net Counts*	*K-Ratio*	*ZAF*	*Weight Conc %*	*Weight % Error*	*Atom Conc %*	*Atom % Error*	*Comp. Conc %*
C K	1276	0,029	3,881	6,57	+/-0,34	13,39	+/- 0,70	6,57
O K	5749	0,074	7,081	30,98	+/-0,65	47,40	+/- 0,99	30,98
Mg K	2159	0,015	2,366	2,13	+/-0,10	2,14	+/- 0,10	2,13
Al K	647	0,005	1,878	0,56	+/-0,06	0,51	+/- 0,05	0,56
Si K	11166	0,094	1,490	8,23	+/-0,13	7,18	+/- 0,11	8,23
P K	1303	0,012	1,460	1,07	+/-0,06	0,84	+/- 0,05	1,07
Ca K	38547	0,584	1,073	37,01	+/-0,29	22,61	+/- 0,18	37,01
Ti K	163	0,003	1,295	0,25	+/-0,07	0,13	+/- 0,03	0,25
Mn K	1054	0,030	1,245	2,17	+/-0,24	0,97	+/- 0,11	2,17
Fe K	4982	0,155	1,208	11,04	+/-0,36	4,84	+/- 0,16	11,04
Total				100,00		100.00		100,00

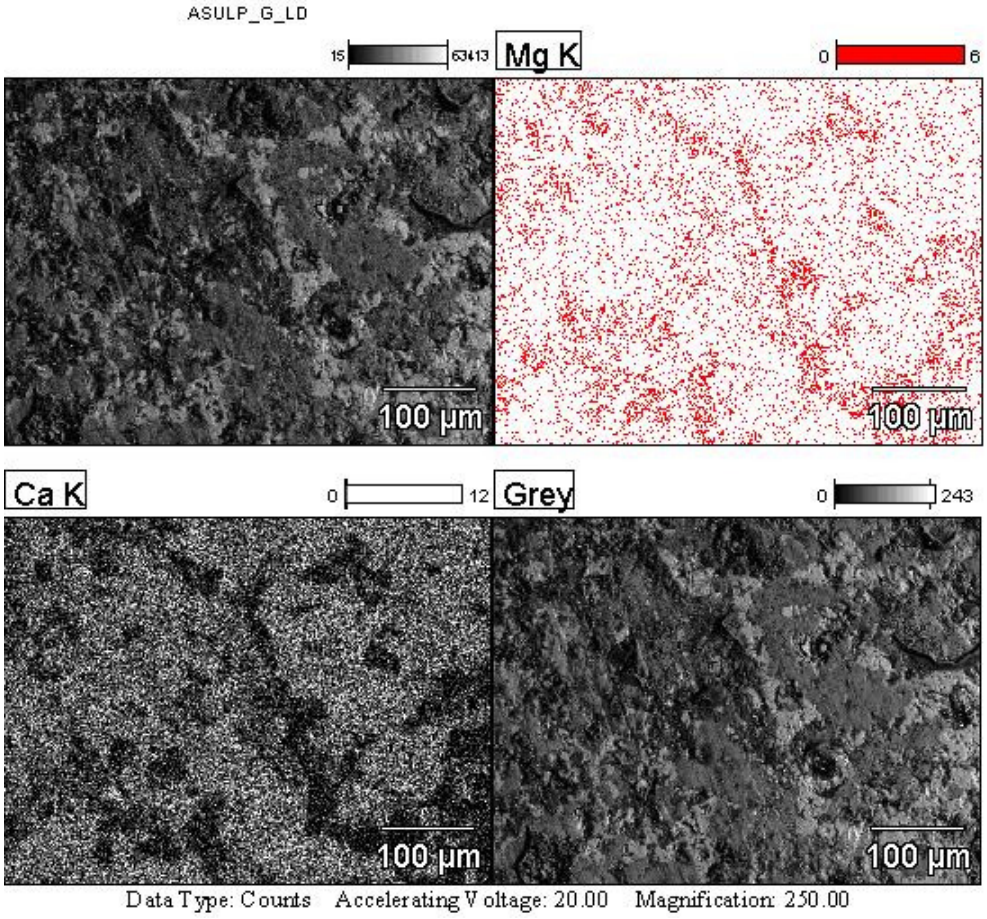


Figura C.9 Micrografia do *agregado siderúrgico*. MEV – elétrons secundários – Ampliação 250x. Gerdau Açominas.

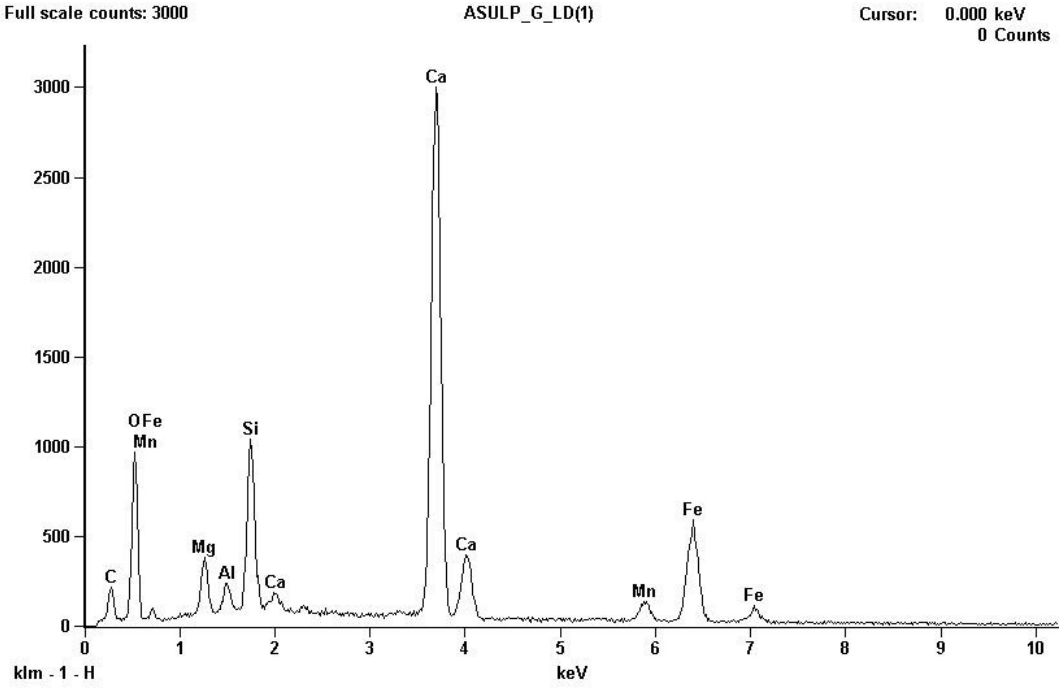


Figura C.10 EDS do *agregado siderúrgico* – Gerdau Açominas.

Observa-se na Tabela C.5, os resultados das análises químicas via EDS e os elementos químicos de maior concentração são oxigênio, cálcio e ferro.

Tabela C.5 Resultados do EDS do *agregado siderúrgico* – Gerdau Açominas.

Elem. Line	*Net Counts*	*K-Ratio*	*ZAF*	*Weight Conc %*	*Weight % Error*	*Atom Conc %*	*Atom % Error*	*Compnd Conc %*
C K	1331	0.027	3.764	6.26	+/-0.18	13.18	+/- 0.39	6.26
O K	6340	0.075	6.525	29.49	+/-0.56	46.63	+/- 0.88	29.49
Mg K	2758	0.018	2.532	2.71	+/-0.10	2.82	+/- 0.11	2.71
Al K	1426	0.010	1.997	1.23	+/-0.06	1.16	+/- 0.06	1.23
Si K	8674	0.066	1.572	6.28	+/-0.11	5.65	+/- 0.10	6.28
Ca K	38548	0.529	1.062	34.02	+/-0.27	21.47	+/- 0.17	34.02
Mn K	1608	0.041	1.227	3.03	+/-0.25	1.40	+/- 0.12	3.03
Fe K	8372	0.235	1.192	16.99	+/-0.38	7.70	+/- 0.17	16.99
Total				100.00		100.00		100.00

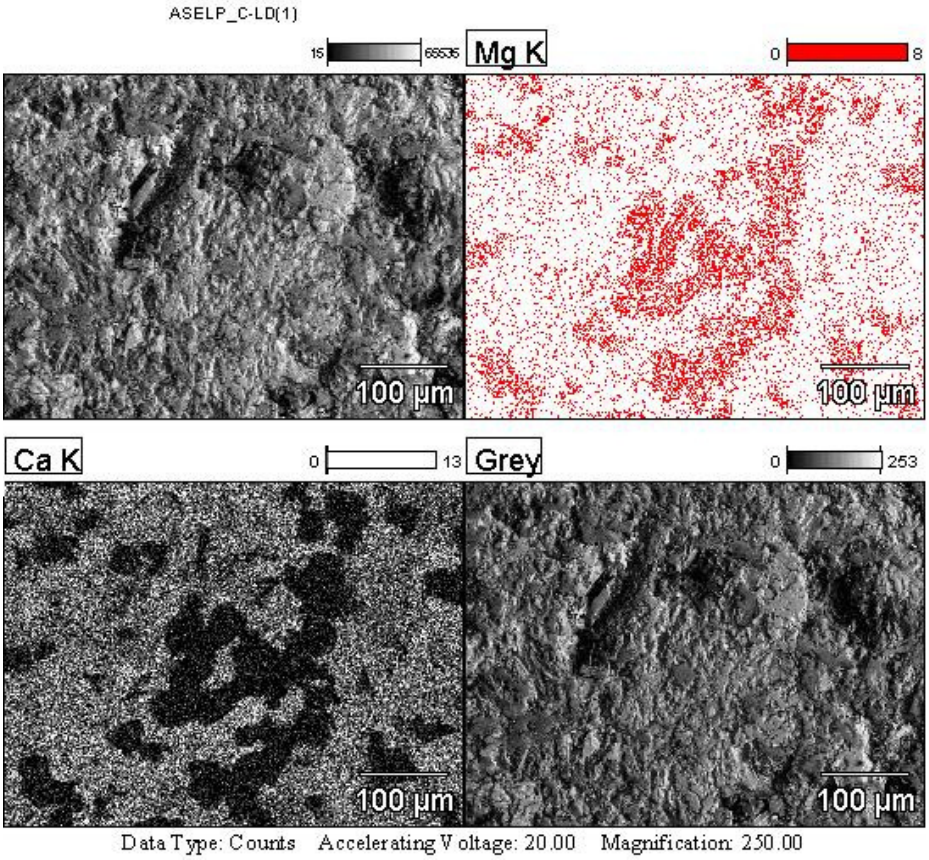


Figura C.11 Micrografia do *agregado siderúrgico*. MEV – elétrons secundários – Ampliação 250x. CSN (Companhia Siderúrgica Nacional).

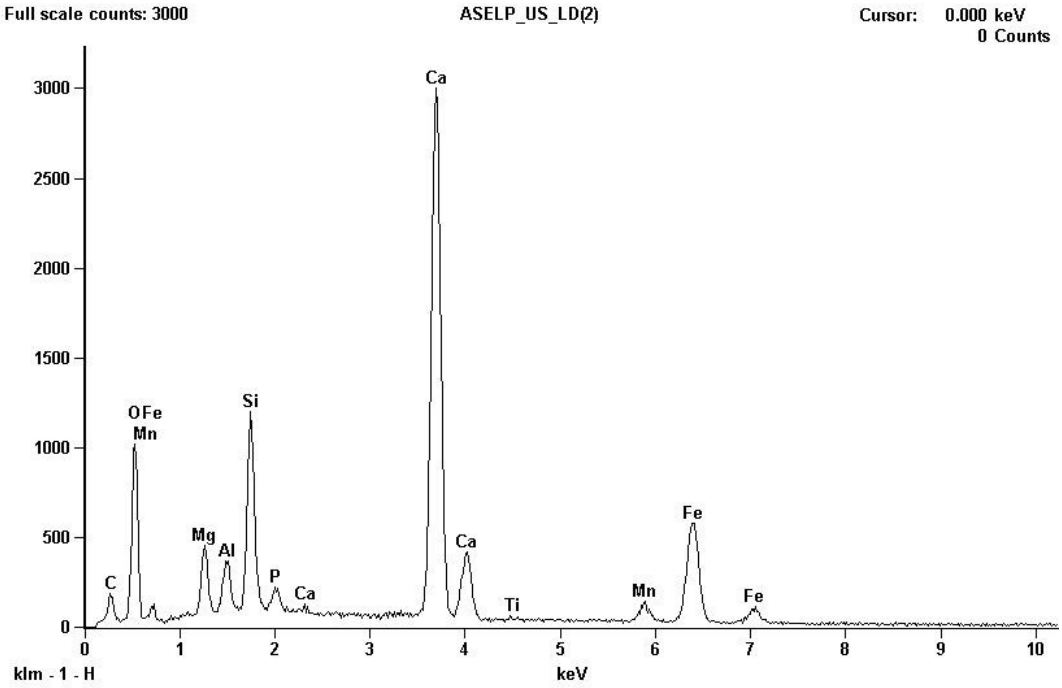


Figura C.12 EDS do *agregado siderúrgico* – CSN.

Observa-se na Tabela C.6, os resultados das análises químicas via EDS e os elementos químicos de maior concentração são oxigênio, cálcio e ferro.

Tabela C.6 Resultados do EDS do *agregado siderúrgico* – CSN.

Elem. Line	*Net Counts*	*K-Ratio*	*ZAF*	*Weight Conc %*	*Weight % Error*	*Atom Conc %*	*Atom % Error*	*Comp. Conc %*
C K	1198	0,024	4,076	5,76	+/-0,34	12,16	+/- 0,72	5,76
O K	6971	0,078	6,300	29,55	+/-0,58	46,84	+/- 0,91	29,55
Mg K	2970	0,018	2,516	2,73	+/-0,12	2,85	+/- 0,13	2,73
Al K	2368	0,016	1,987	1,92	+/-0,15	1,81	+/- 0,14	1,92
Si K	9674	0,070	1,580	6,64	+/-0,15	6,00	+/- 0,13	6,64
P K	1387	0,011	1,495	1,02	+/-0,05	0,83	+/- 0,04	1,02
Ca K	37945	0,496	1,066	31,72	+/-0,26	20,08	+/- 0,16	31,72
Ti K	252	0,004	1,259	0,33	+/-0,06	0,17	+/- 0,03	0,33
Mn K	1625	0,039	1,224	2,88	+/-0,13	1,33	+/- 0,06	2,88
Fe K	9133	0,244	1,189	17,45	+/-0,37	7,93	+/- 0,17	17,45
Total				100,00		100,00		100,00

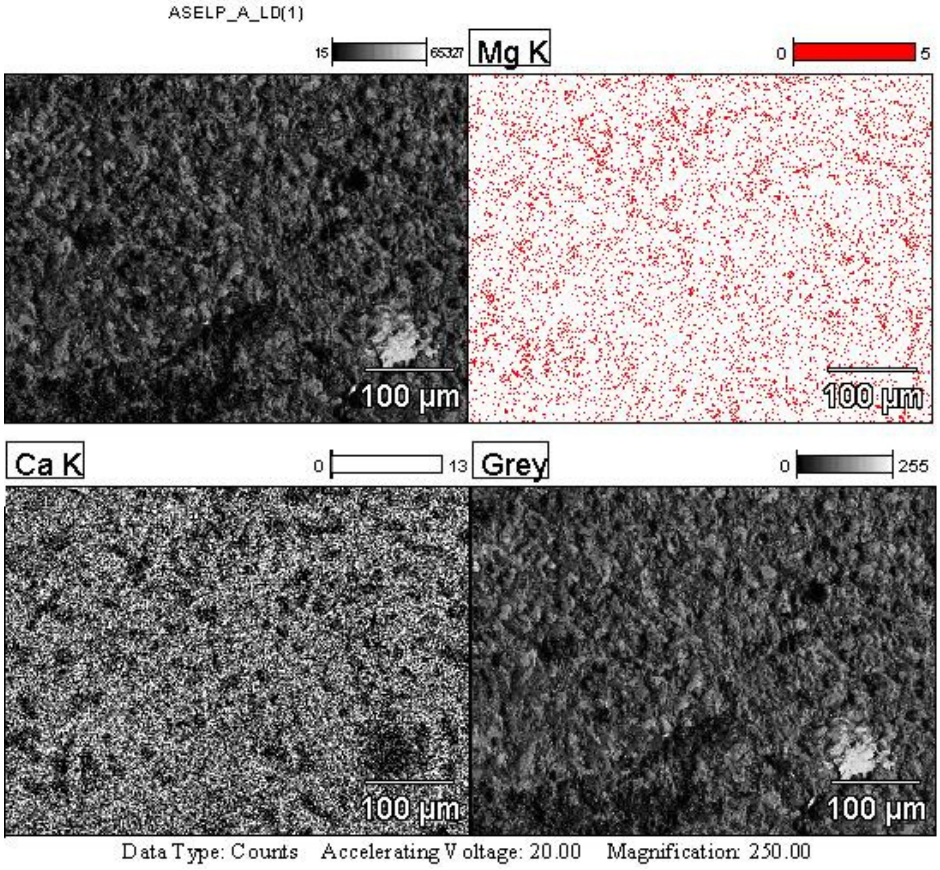


Figura C.13 Micrografia do *agregado siderúrgico*. MEV – elétrons secundários – Ampliação 250x. Aços Villares.

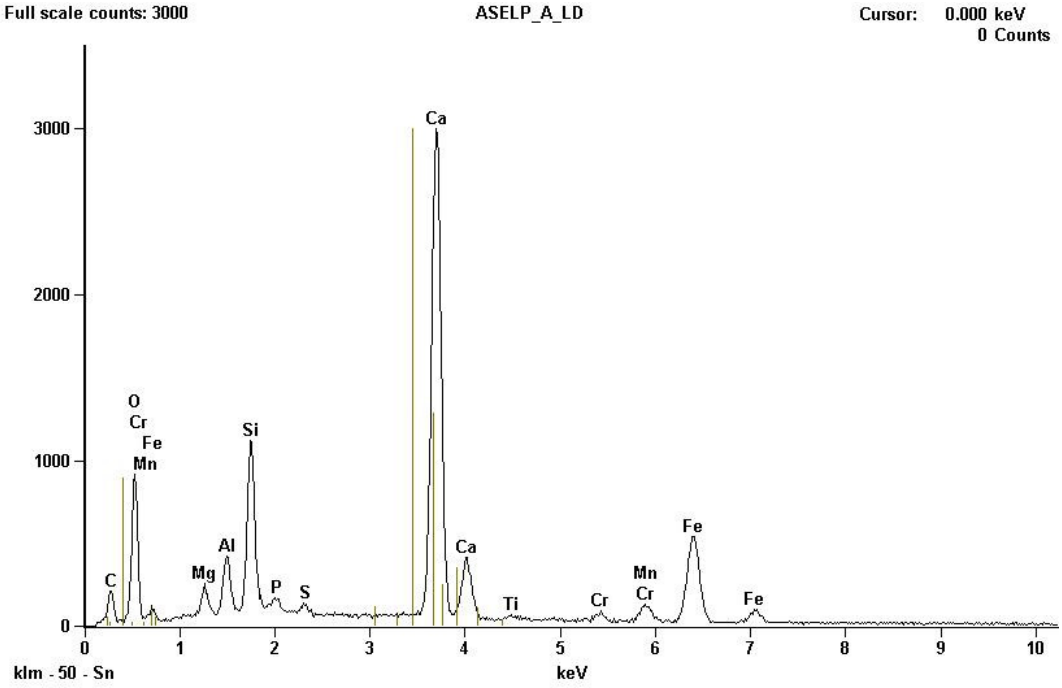


Figura C.14 EDS do *agregado siderúrgico* – Aços Villares.

Observam-se na tabela C.7, os resultados das análises químicas via EDS e os elementos químicos de maior concentração são oxigênio, cálcio e ferro.

Tabela C.7 Resultados do EDS do *agregado siderúrgico* – Aços Villares.

Elem. Line	***Net Counts***	***K-Ratio***	***ZAF***	***Weight Conc %***	***Weight % Error***	***Atom Conc %***	***Atom % Error***	***Comp. Conc %***
C K	1382	0,027	3,971	6,64	+/-0,24	14,39	+/- 0,52	6,64
O K	5708	0,063	6,545	26,09	+/-3,01	42,46	+/- 4,89	26,09
Mg K	1399	0,009	2,467	1,32	+/-0,11	1,42	+/- 0,12	1,32
Al K	2856	0,020	1,918	2,35	+/-0,14	2,27	+/- 0,14	2,35
Si K	9370	0,068	1,544	6,61	+/-0,14	6,13	+/- 0,13	6,61
P K	817	0,007	1,464	0,62	+/-0,05	0,52	+/- 0,05	0,62
S K	817	0,007	1,265	0,57	+/-0,08	0,46	+/- 0,07	0,57
Ca K	38781	0,511	1,060	34,04	+/-0,27	22.11	+/- 0,18	34,04
Ti K	268	0,005	1,257	0,37	+/-0,07	0,20	+/- 0,04	0,37
Cr K	756	0,016	1,182	1,15	+/-0,08	0,58	+/- 0,04	1,15
Mn K	1351	0,033	1,221	2,53	+/-0,26	1,20	+/- 0,12	2,53
Fe K	8771	0,237	1,188	17,71	+/-0,40	8,26	+/- 0,18	17,71
Total				100,00		100,00		100,00

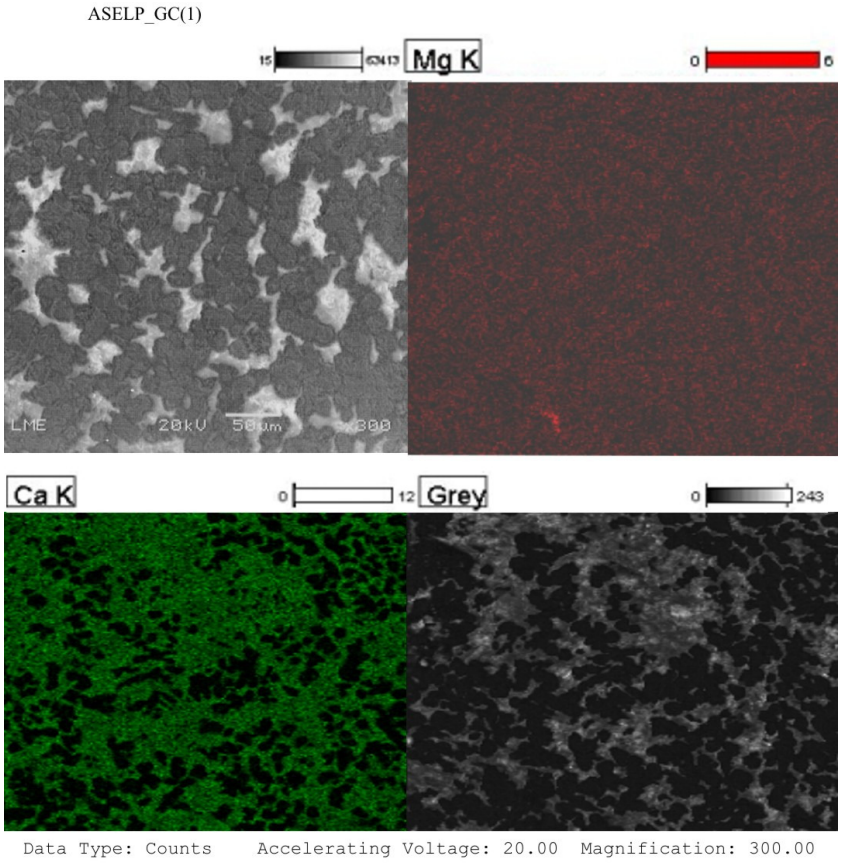


Figura C.15 Micrografia do *agregado siderúrgico*. MEV – elétrons secundários – Ampliação 300x. Gerdau Cosigua (ASELP).

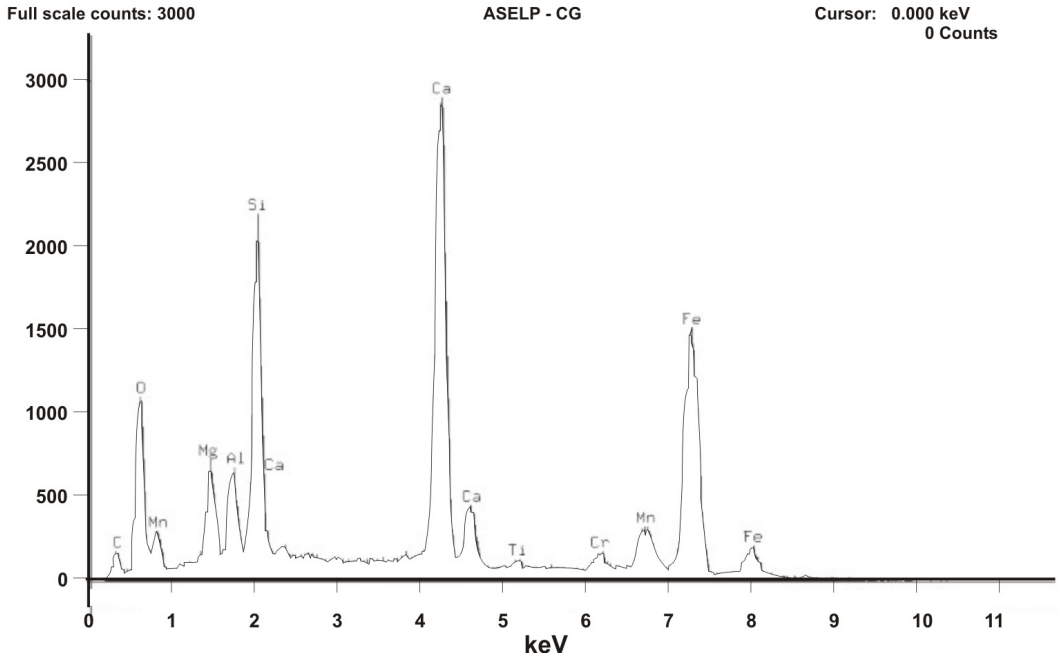


Figura C.16 EDS do *agregado siderúrgico* – Gerdau Cosigua.

Tabela C.8 Resultados do EDS do *agregado siderúrgico* – Gerdau Cosigua.

Elem. Line	*Net Counts*	*K-Ratio*	*ZAF*	*Weight Conc %*	*Weight % Error*	*Atom Conc %*	*Atom % Error*	*Comp. Conc %*
Ti K	1182	0,025	3,657	0,41	+/-0,19	0,38	+/- 0,38	0,41
Cr K	6890	0,080	6,203	1,81	+/-0,53	1,53	+/- 0,89	1,81
Mg K	2832	0,019	2,725	3,09	+/-0,12	5,57	+/- 0,12	3,09
Al K	485	0,002	2,140	2,44	+/-0,05	3,97	+/- 0,05	2,44
Si K	4896	0,034	1,639	9,54	+/-0,11	14,90	+/- 0,10	9,54
Ca K	38178	0,490	1,060	27,75	+/-0,25	30,38	+/- 0,15	27,75
Mn K	1650	0,036	1,220	7,20	+/-0,12	5,75	+/- 0,05	7,20
Fe K	11534	0,305	1,138	47,76	+/-0,40	37,52	+/- 0,19	47,76
Total				100,00		100,00		100,00

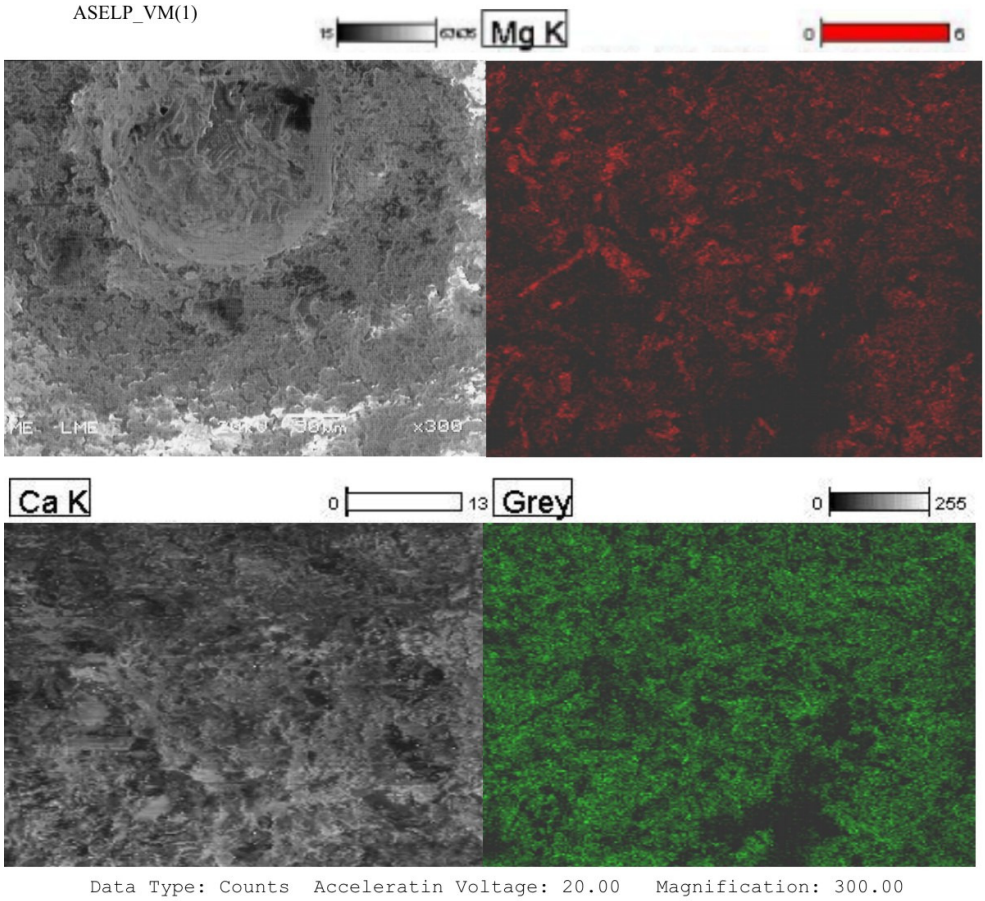


Figura C.17 Micrografia do *agregado siderúrgico*. MEV – elétrons secundários – Ampliação 300x. Villares Metals.

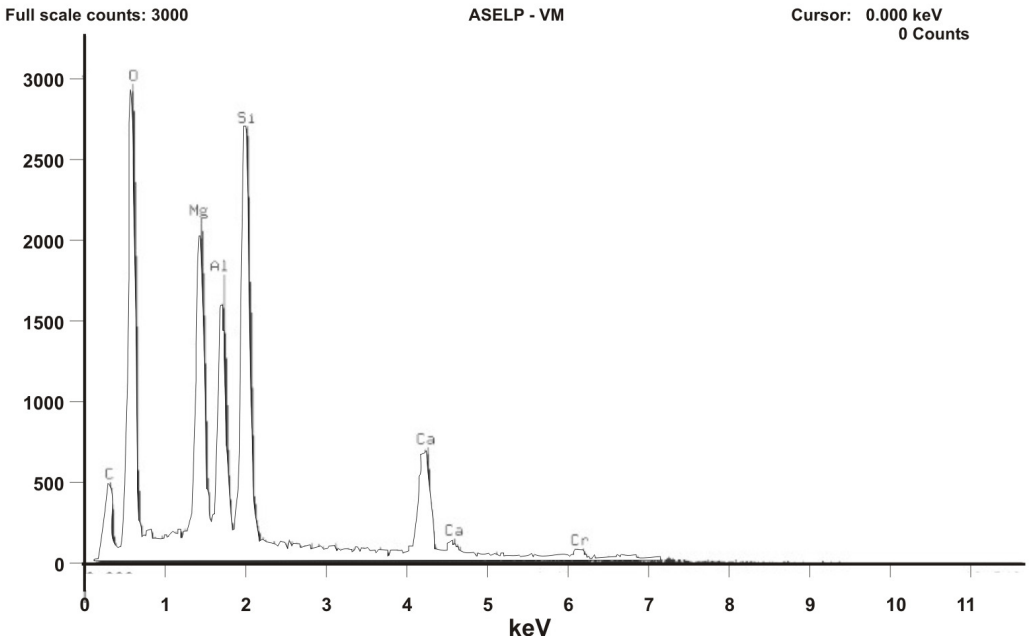


Figura C.18 EDS do *agregado siderúrgico* – Villares Metals.

Tabela C.9 Resultados do EDS do *agregado siderúrgico* – Villares Metals.

Elem. Line	*Net Counts*	*K-Ratio*	*ZAF*	*Weight Conc %*	*Weight % Error*	*Atom Conc %*	*Atom % Error*	*Comp. Conc %*
Mg K	2780	0.019	2.523	19,32	+/-0.11	23,34	+/- 0.10	19,32
Al K	1406	0.009	1.979	17,84	+/-0.05	19,42	+/- 0.05	17,84
Si K	8615	0.065	1.527	37,68	+/-0.12	39,40	+/- 0.11	37,68
Ca K	38564	0.528	1.026	21,61	+/-0.26	15,83	+/- 0.16	21,61
Cr K	8327	0.234	1.129	3,55	+/-0.39	2,01	+/- 0.18	3,55
Total				100.00		100.00		100.00

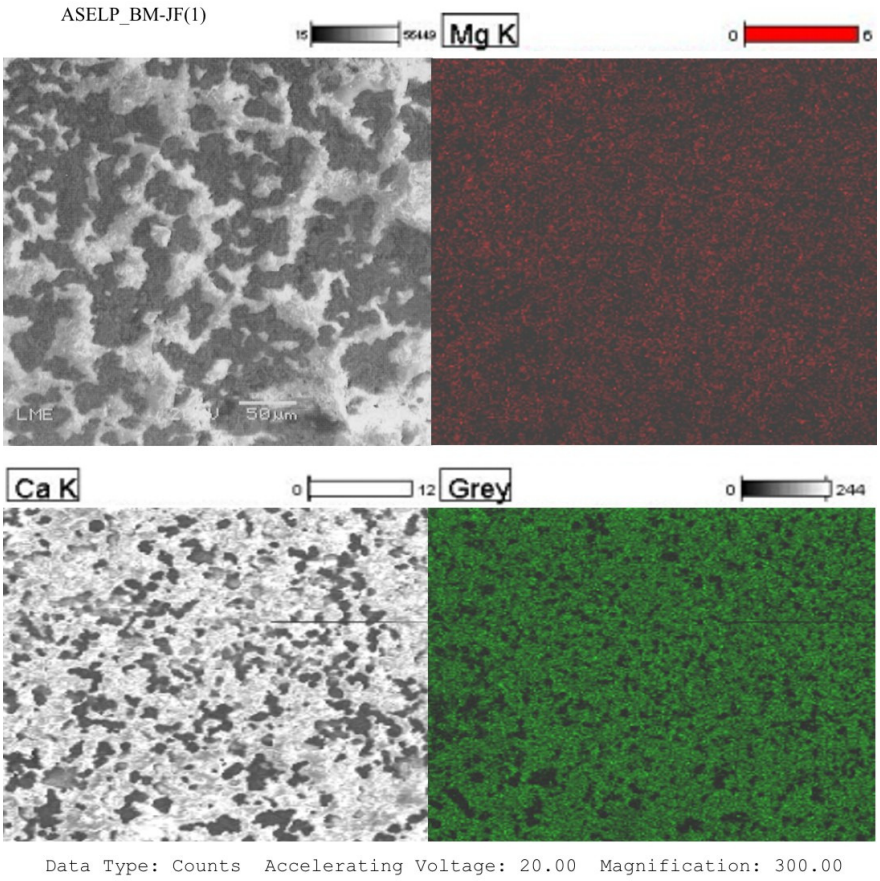


Figura C.19 Micrografia do *agregado siderúrgico*. MEV – elétrons secundários – Ampliação 300x. Belgo Mineira/JF.

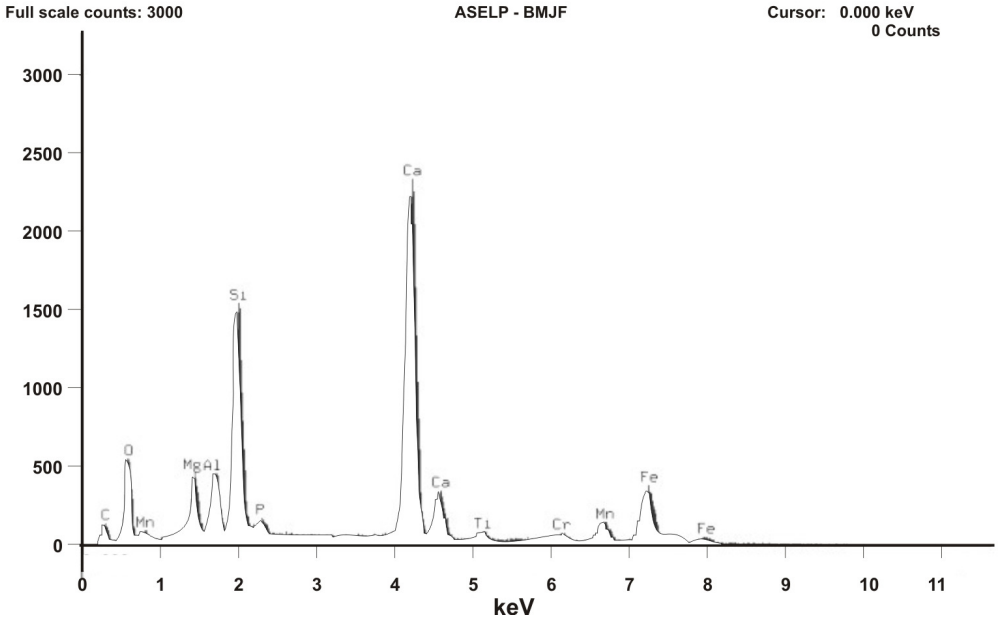


Figura C.20 EDS do *agregado siderúrgico* – Belgo Mineira/JF.

Tabela C.10 Resultados do EDS do *agregado siderúrgico* – Belgo Mineira/JF.

Elem. Line	***Net Counts***	***K-Ratio***	***ZAF***	***Weight Conc %***	***Weight % Error***	***Atom Conc %***	***Atom % Error***	***Comp. Conc %***
Mg K	816	0,007	1,446	4,29	+/-0,04	6,33	+/- 0,04	4,29
Cr K	816	0,007	1,256	4,39	+/-0,09	3,03	+/- 0,08	4,39
Ca K	38718	0,511	1,006	68,58	+/-0,26	61,38	+/- 0,17	68,58
Al K	286	0,005	1,275	4,28	+/-0,08	5,69	+/- 0,05	4,28
Si K	8717	0,237	1,178	18,46	+/-0,41	23,57	+/- 0,19	18,46
Total				100,00		100,00		100,00

ANEXO D

Resultados de Caracterização Ambiental com Resultados Classificatórios dos Ensaios de Lixiviação e Solubilização.

A Tabela D.1 apresenta os resultados classificatórios obtidos nos ensaios de lixiviação e solubilização. Observa-se que alguns parâmetros encontrados ultrapassam os valores máximos permitidos pela norma *NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação* ou apresentam substâncias/elementos que conferem periculosidade ao resíduo.

Tabela D.1 Resumo dos elementos químicos encontrados nos ensaios ambientais.

Extrato	Aços Villares	Usiminas 1"a 2"	Gerdau Guaira	Usiminas 1,5"a 3"	CST	Gerdau Açominas	CSN	Gerdau Cosigua ASELP	Villares Metals	Belgo Mineira (JF)
Lixiviado	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Solubilizado	-	Alumínio	Alumínio, fluoreto	Alumínio	Alumínio	Alumínio, fenóis totais	Alumínio, fenóis totais	-	Alumínio, fluoretos	Alumínio, fluoretos

Pelas características obtidas nas análises físico-químicas dos ensaios realizados, o *agregado siderúrgico* de todas as siderúrgicas pode ser classificado como *Classe II-A – Resíduo não perigoso não inerte*, com exceção das siderúrgicas Aços Villares e Gerdau Cosigua, no qual o *agregado siderúrgico* foi classificado como *Classe II-B – Resíduo não perigoso inerte*.

D.1 Lixiviação

A Tabela D.2 apresenta os resultados da caracterização do *agregado siderúrgico* em relação ao ensaio de lixiviação e os valores de pH final das amostras. O tempo de lixiviação foi de 18 horas e o valor máximo permitido para o pH está compreendido entre 2,0 e 12,5.

Tabela D.2 Resultados do ensaio de lixiviação do *agregado siderúrgico* (NBR 10005/2004)

LIXIVIAÇÃO													
Parâmetro	**un.**	**V.M.P.**	**L.D.**	**Aços Villares**	**Usiminas 1"a 2"**	**Gerdau Guaira**	**Usiminas 1,5"a 3"**	**CST**	**Gerdau Açominas**	**CSN**	**Gerdau Cosigua**	**Villares Metlas**	**Belgo Mineira (JF)**
Arsênio	mg/L	1	0,1	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
Bário	mg/L	70	0,1	9	<	1,2	<	<	<	<	1,8	2,5	2,4
Cadmio	mg/L	0,5	0,05	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
Chumbo	mg/L	1	0,05	<	<	<	0,3	<	<	<	<	<	<
Cromo Total	mg/L	5	0,05	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
Mercurio	mg/L	0,1	0,001	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
Prata	mg/L	5	0,01	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
Selênio	mg/L	1	0,02	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
Fluoreto	mg/L	150	0,1	0,5	0,3	1	1,1	0,9	0,5	0,2	1,16	11,48	5,7
pH final	-	-	-	6,21	11,41	9,17	12,16	11,96	12,21	11,95	9,18	9,87	10,19

V.M.P. = valor máximo permitido.

L.D. = limite de detecção.

D.2 – Solubilização

A Tabela D.3 apresenta os resultados da caracterização do *agregado siderúrgico* em relação ao ensaio de solubilização e os valores de pH final das amostras. O valor máximo permitido para o pH está compreendido entre 2,0 e 12,5.

Tabela D.3 Resultados do ensaio de solubilização do *agregado siderúrgico* (NBR 10006/2004).

SOLUBILIZAÇÃO													
Parâmetro	**un.**	**V.M.P.**	**L.D.**	**Aços Villares**	**Usiminas 1"a 2"**	**Gerdau Guaira**	**Usiminas 1,5"a 3"**	**CST**	**Gerdau Açominas**	**CSN**	**Gerdau Cosigua**	**Villares Metals**	**Belgo Mineira (JF)**
Alumínio	mg/L	0,2	0,1	<	2,5	44	0,3	0,6	1	1,5	<	17,0	1,2
Arsênio	mg/L	0,01	0,01	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
Bário	mg/L	0,7	0,1	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
Cádmio	mg/L	0,005	0,05	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
Chumbo	mg/L	0,01	0,01	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
Cianeto	mg/L	0,07	0,01	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
Cloreto	mg/L	250	10	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
Cobre	mg/L	2	0,05	<	<	<	<	<	<	<	5,0	<	<
Cromo Total	mg/L	0,05	0,05	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
Fenois Totais	mg/L	0,01	0,001	<	<	<	<	<	0,042	0,032	<	<	<
Ferro	mg/L	0,3	0,1	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
Fluoreto	mg/L	1,5	0,1	0,3	<	2,4	0,5	0,4	0,2	<	0,2	6,58	2,58
Manganês	mg/L	0,1	0,05	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
Mercúrio	mg/L	0,001	0,001	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
Nitrato (Expresso em N)	mg/L	10	0,1	0,3	0,5	1,1	0,5	0,3	0,8	1,3	0,5	0,7	<
Prata	mg/L	0,5	0,01	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
Selênio	mg/L	0,01	0,02	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
Sódio	mg/L	200	0,1	1,5	1,5	1	1,4	1,4	2,7	2,2	5,6	3,8	5,4
Sulfato	mg/L	250	10	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
Surfactantes	mg/L	0,5	0,1	0,02	0,02	0,02	0,02	<	0,03	0,02	0,05	0,05	0,05
Zinco	mg/L	5	0,05	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
pH final da solubilização	-	-	-	11,07	12,33	11,7	12,49	12,5	12,24	12,41	10,94	8,86	8,54

V.M.P. = valor máximo permitido.

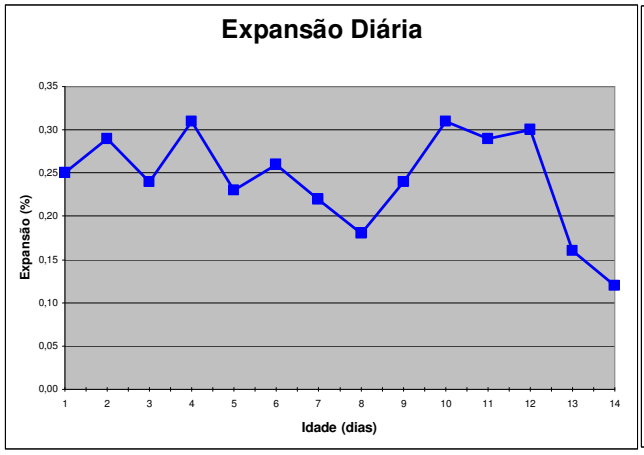
L.D. = limite de detecção.

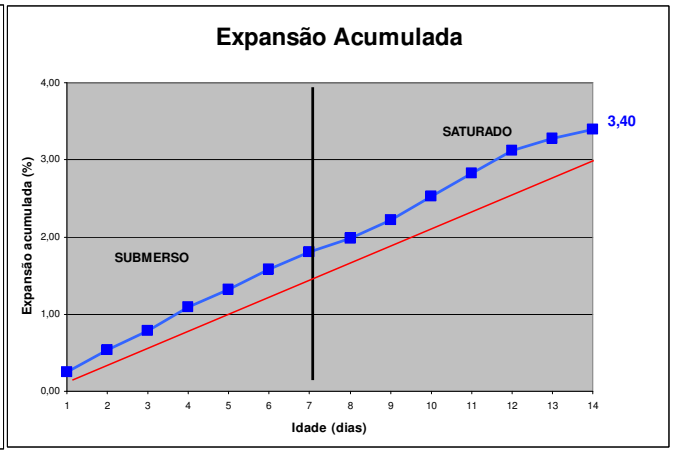
ANEXO E

Apresentação da Caracterização da Expansibilidade com Resultados Classificatórios do Ensaio PTM 130/DER – MG

Tabela E.1 Ensaio de expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG Gerdau Açominas.

IDADE (DIAS)	EXP. DIÁRIA (%)	EXP. ACUMULADA (%)
1	0,25	0,25
2	0,29	0,54
3	0,24	0,78
4	0,31	1,09
5	0,23	1,32
6	0,26	1,58
7	0,22	1,80
8	0,18	1,98
9	0,24	2,22
10	0,31	2,53
11	0,29	2,82
12	0,30	3,12
13	0,16	3,28
14	0,12	3,40



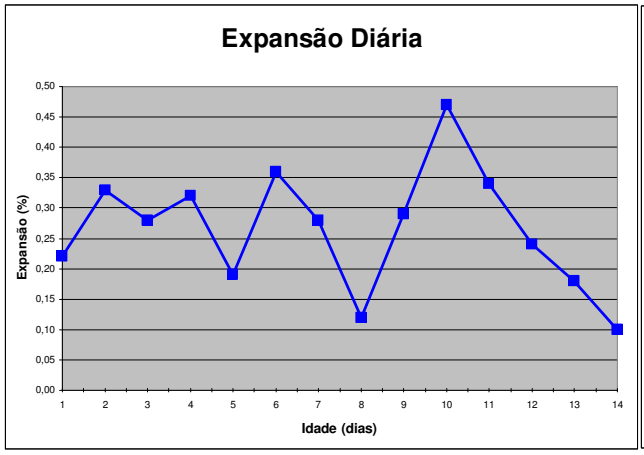


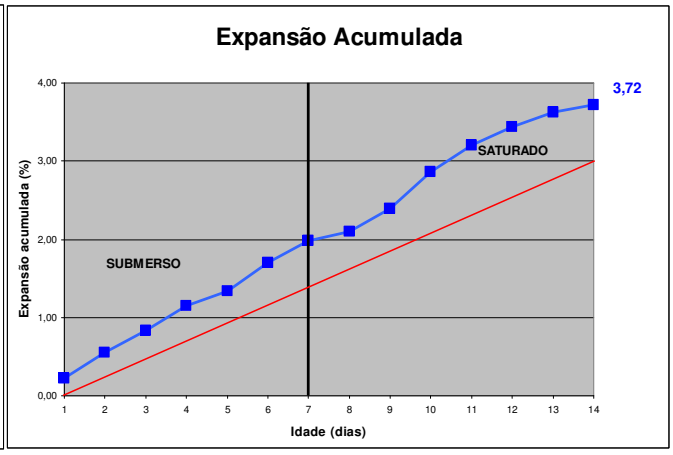
a) b)

Figura E.1 Expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – Gerdau Açominas : a) expansão diária (%) e b) expansão acumulada (%).

Tabela E.2 Ensaio de expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – V&M TUBES.

IDADE (DIAS)	EXP. DIÁRIA (%)	EXP. ACUMULADA (%)
1	0,22	0,22
2	0,33	0,55
3	0,28	0,83
4	0,32	1,15
5	0,19	1,34
6	0,36	1,70
7	0,28	1,98
8	0,12	2,10
9	0,29	2,39
10	0,47	2,86
11	0,34	3,20
12	0,24	3,44
13	0,18	3,62
14	0,10	3,72



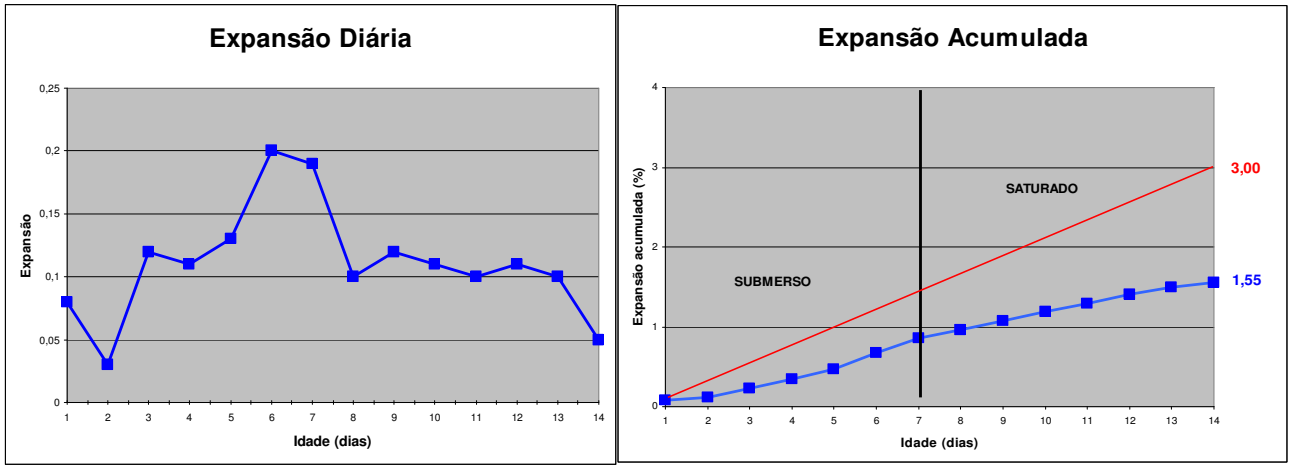


a) b)

Figura E.2 Expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – V&M TUBES: a) expansão diária (%) e b) expansão acumulada (%).

Tabela E.3 Ensaio de expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – CSN.

IDADE (DIAS)	EXP. DIÁRIA (%)	EXP. ACUMULADA (%)
1	0,08	0,08
2	0,03	0,11
3	0,12	0,23
4	0,11	0,34
5	0,13	0,47
6	0,20	0,67
7	0,19	0,86
8	0,10	0,96
9	0,12	1,08
10	0,11	1,19
11	0,10	1,29
12	0,11	1,4
13	0,10	1,5
14	0,05	1,55



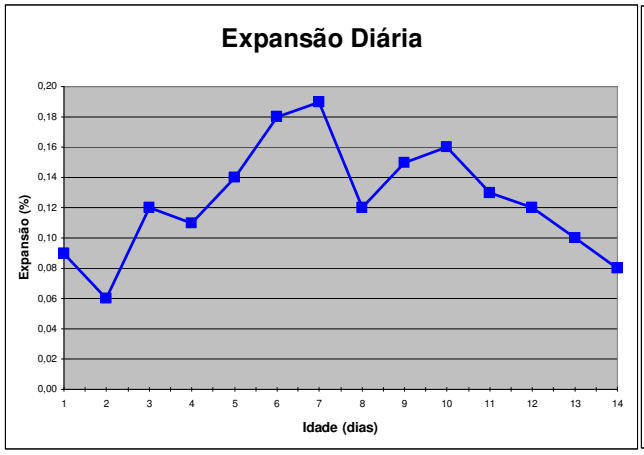
a) b)

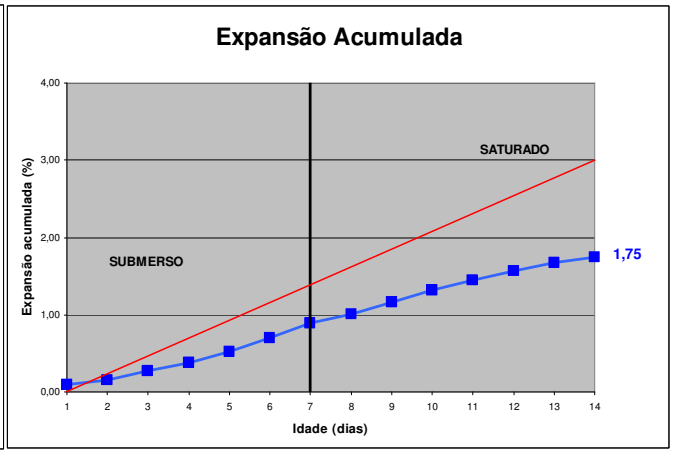
Figura E.3 Expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – CSN : a) expansão diária (%) e b) expansão acumulada (%).

Tabela E.4 Ensaio de expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG

Belgo Mineira – João Monlevade.

IDADE (DIAS)	EXP. DIÁRIA (%)	EXP. ACUMULADA (%)
1	0,09	0,09
2	0,06	0,15
3	0,12	0,27
4	0,11	0,38
5	0,14	0,52
6	0,18	0,70
7	0,19	0,89
8	0,12	1,01
9	0,15	1,16
10	0,16	1,32
11	0,13	1,45
12	0,12	1,57
13	0,10	1,67
14	0,08	1,75



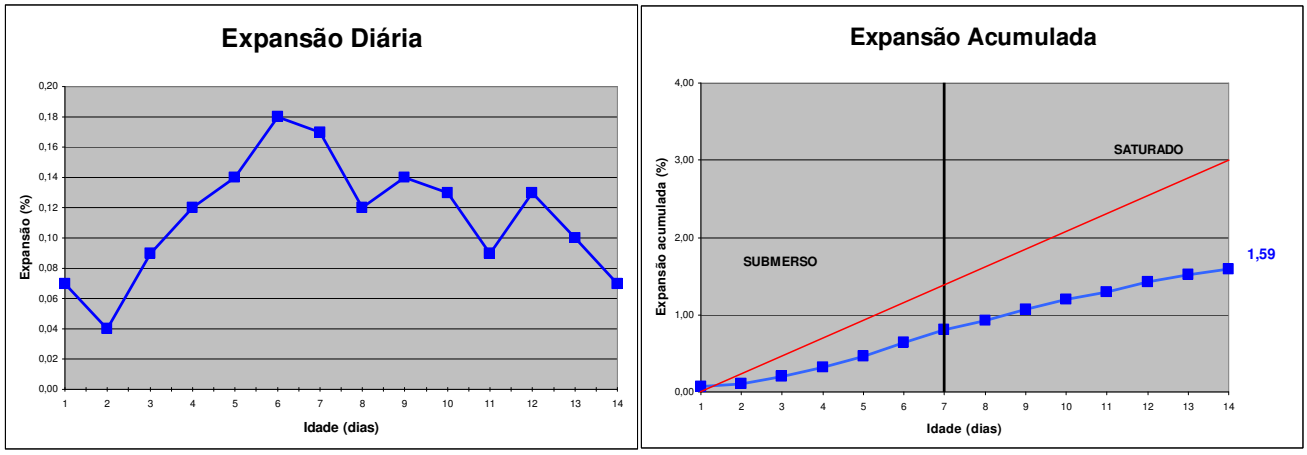


a) b)

Figura E.4 Expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – Belgo Mineira – João Monlevade: a) expansão diária (%) e b) expansão acumulada (%).

Tabela E.5 Ensaio de expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – Usiminas 1,5” a 3”.

IDADE (DIAS)	EXP. DIÁRIA (%)	EXP. ACUMULADA (%)
1	0,07	0,07
2	0,04	0,11
3	0,09	0,20
4	0,12	0,32
5	0,14	0,46
6	0,18	0,64
7	0,17	0,81
8	0,12	0,93
9	0,14	1,07
10	0,13	1,20
11	0,09	1,29
12	0,13	1,42
13	0,10	1,52
14	0,07	1,59



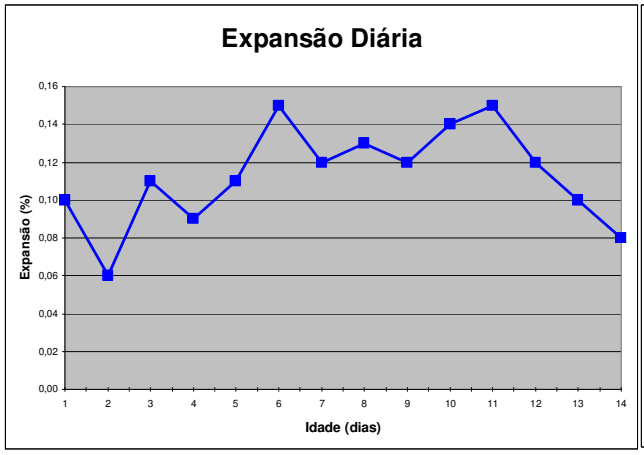
a) b)

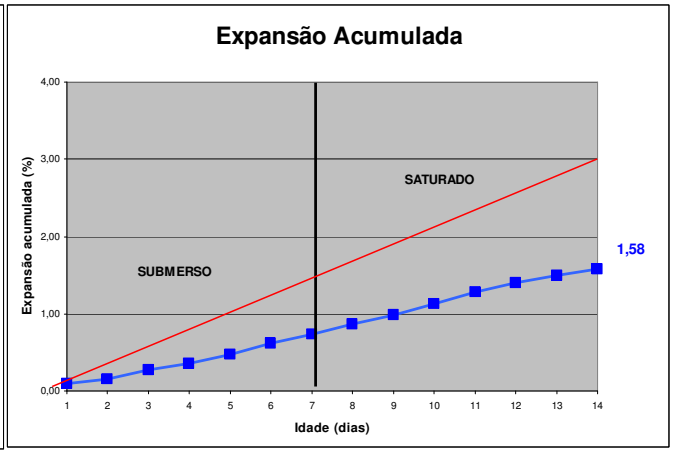
Figura E.5 Expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – Usiminas 1,5” a 3” (ASCLP): a) expansão diária (%) e b) expansão acumulada (%).

Tabela E.6 Ensaio de expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG

Usiminas 1” a 2”.

IDADE (DIAS)	EXP. DIÁRIA (%)	EXP. ACUMULADA (%)
1	0,10	0,10
2	0,06	0,16
3	0,11	0,27
4	0,09	0,36
5	0,11	0,47
6	0,15	0,62
7	0,12	0,74
8	0,13	0,87
9	0,12	0,99
10	0,14	1,13
11	0,15	1,28
12	0,12	1,40
13	0,10	1,50
14	0,08	1,58





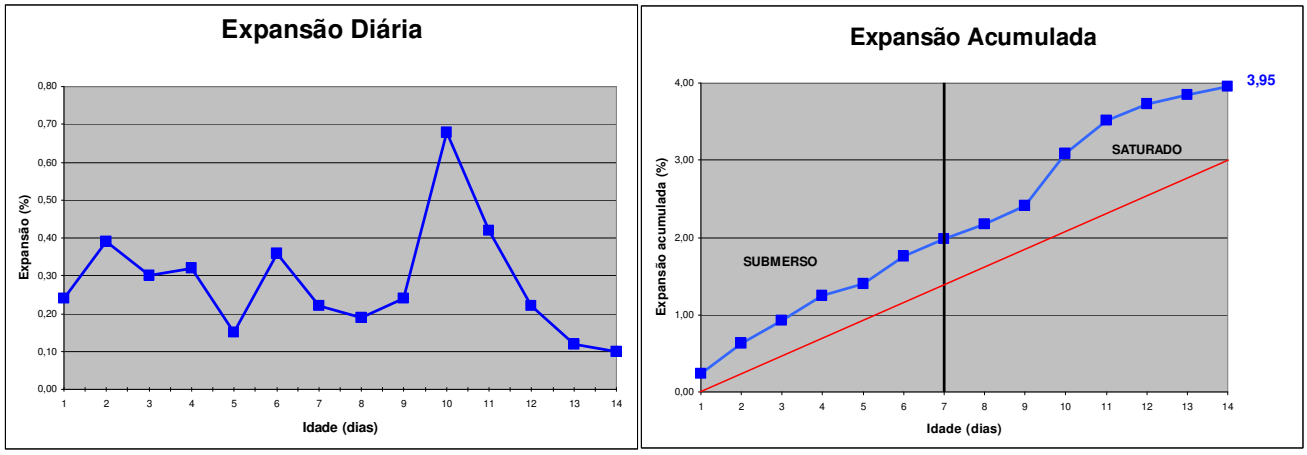
a) b)

Figura E.6 Expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – Usiminas 1” a 2”: a) expansão diária (%) e b) expansão acumulada (%).

Tabela E.7 Ensaio de expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG

Gerdau Cosígua.

IDADE (DIAS)	EXP. DIÁRIA (%)	EXP. ACUMULADA (%)
1	0,24	0,24
2	0,39	0,63
3	0,30	0,93
4	0,32	1,25
5	0,15	1,40
6	0,36	1,76
7	0,22	1,98
8	0,19	2,17
9	0,24	2,41
10	0,68	3,09
11	0,42	3,51
12	0,22	3,73
13	0,12	3,85
14	0,10	3,95



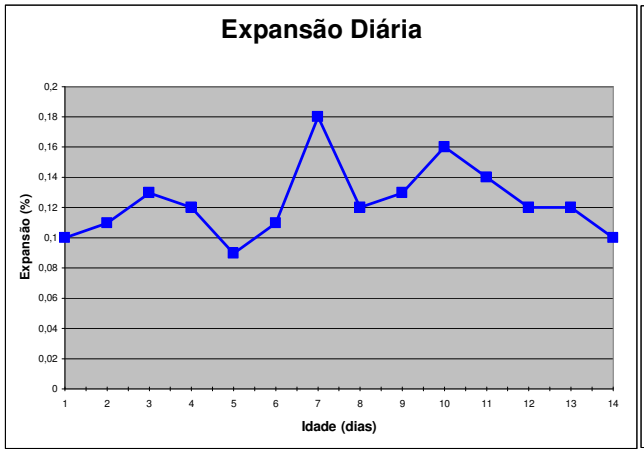
a) b)

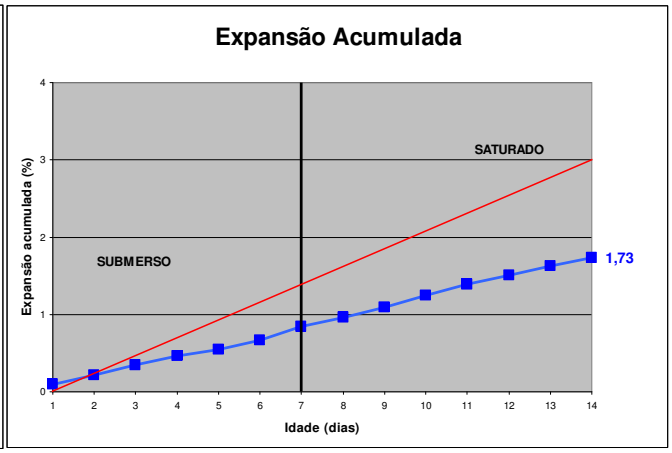
Figura E.7 Expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – Gerdau Cosígua: a) expansão diária (%) e b) expansão acumulada (%).

Tabela E.8 Ensaio de expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG –

Gerdau Cosigua.

IDADE (DIAS)	EXP. DIÁRIA (%)	EXP. ACUMULADA (%)
1	0,10	0,11
2	0,11	0,21
3	0,13	0,34
4	0,12	0,46
5	0,09	0,55
6	0,11	0,66
7	0,18	0,84
8	0,12	0,96
9	0,13	1,09
10	0,16	1,25
11	0,14	1,39
12	0,12	1,51
13	0,12	1,63
14	0,10	1,73



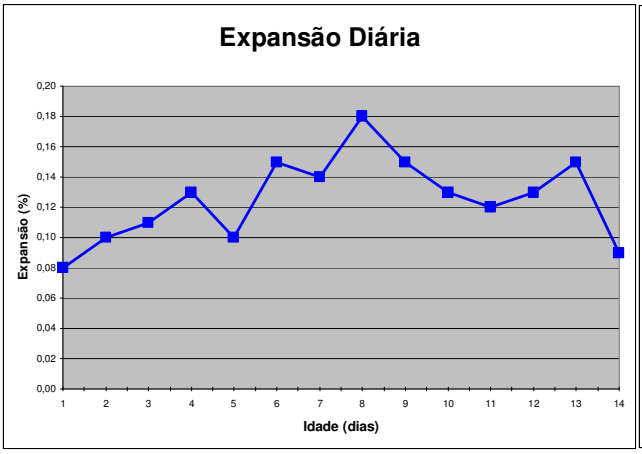


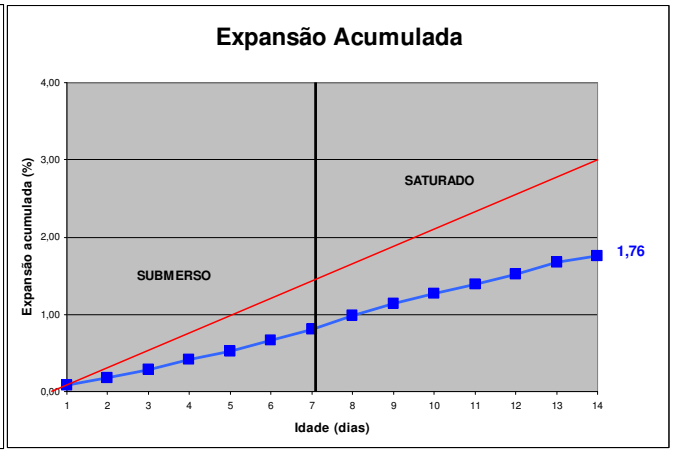
a) b)

Figura E.8 Expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – Gerdau Cosígua: a) expansão diária (%) e b) expansão acumulada (%).

Tabela E.9 Ensaio de expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – Gerdau Guairá.

IDADE (DIAS)	EXP. DIÁRIA (%)	EXP. ACUMULADA (%)
1	0,08	0,08
2	0,10	0,18
3	0,11	0,29
4	0,13	0,42
5	0,10	0,52
6	0,15	0,67
7	0,14	0,81
8	0,18	0,99
9	0,15	1,14
10	0,13	1,27
11	0,12	1,39
12	0,13	1,52
13	0,15	1,67
14	0,09	1,76



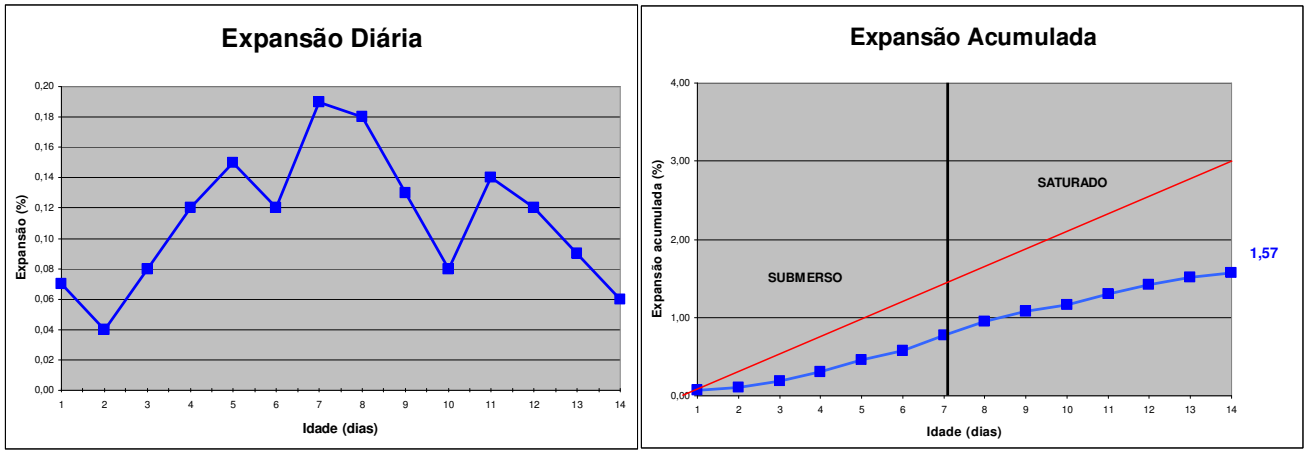


a) b)

Figura E.9 Expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – Gerdau Guaíra: a) expansão diária (%) e b) expansão acumulada (%).

Tabela E.10 Ensaio de expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – CST.

IDADE (DIAS)	EXP. DIÁRIA (%)	EXP. ACUMULADA (%)
1	0,07	0,07
2	0,04	0,11
3	0,08	0,19
4	0,12	0,31
5	0,15	0,46
6	0,12	0,58
7	0,19	0,77
8	0,18	0,95
9	0,13	1,08
10	0,08	1,16
11	0,14	1,30
12	0,12	1,42
13	0,09	1,51
14	0,06	1,57

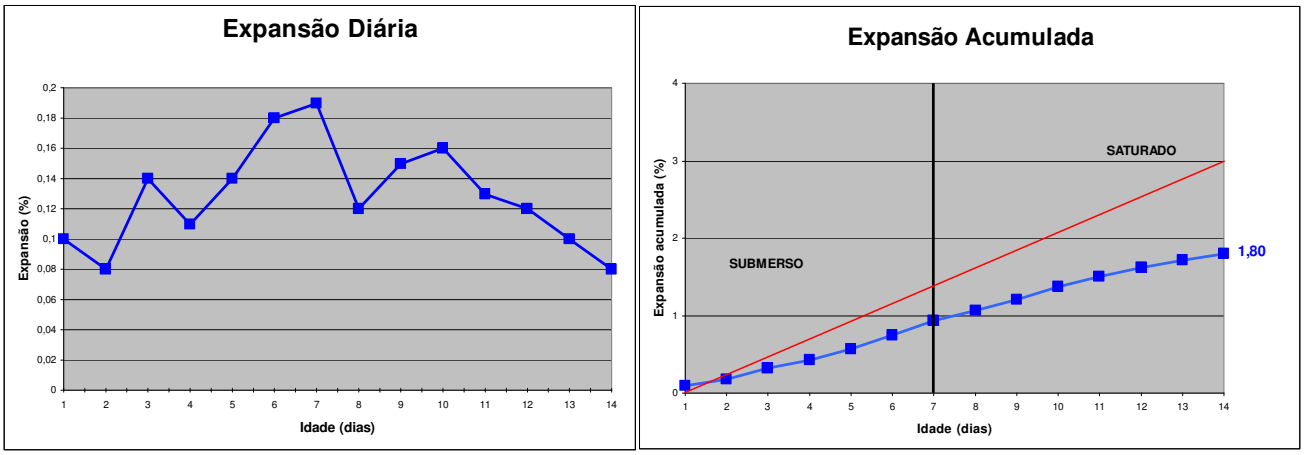


a) b)

Figura E.10 Expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – CST: a) expansão diária (%) e b) expansão acumulada (%).

Tabela E.11 Ensaio de expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – Belgo Mineira – Juiz de Fora.

IDADE (DIAS)	EXP. DIÁRIA (%)	EXP. ACUMULADA (%)
1	0,10	0,10
2	0,08	0,18
3	0,14	0,32
4	0,11	0,43
5	0,14	0,57
6	0,18	0,75
7	0,19	0,94
8	0,12	1,06
9	0,15	1,21
10	0,16	1,37
11	0,13	1,50
12	0,12	1,62
13	0,10	1,72
14	0,08	1,80

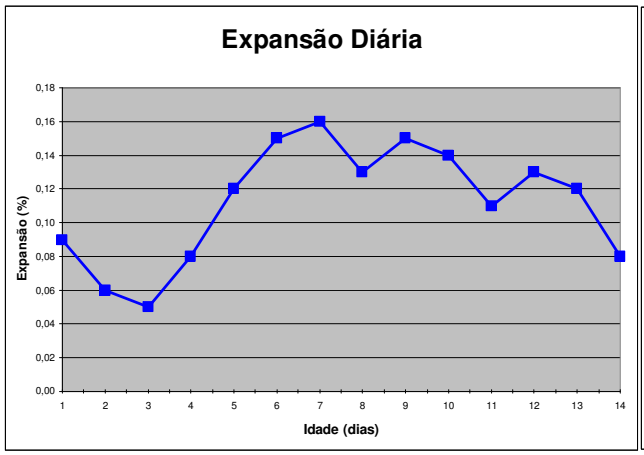


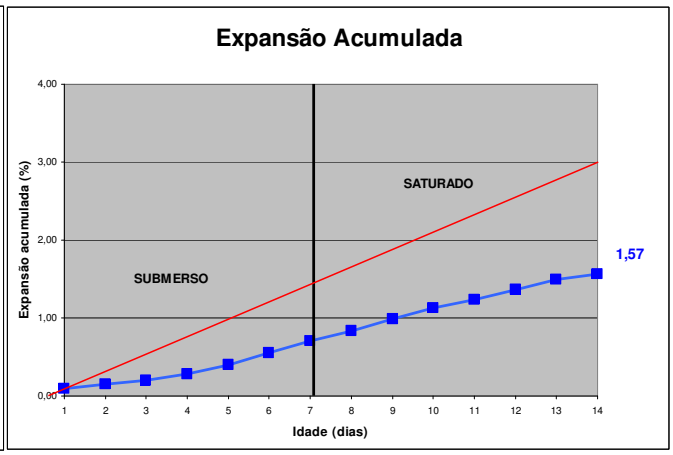
a) b)

Figura E.11 Expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – Belgo Mineira – Juiz de Fora: a) expansão diária (%) e b) expansão acumulada (%).

Tabela E.12 Ensaio de expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – Aços Villares.

IDADE (DIAS)	EXP. DIÁRIA (%)	EXP. ACUMULADA (%)
1	0,09	0,09
2	0,06	0,15
3	0,05	0,20
4	0,08	0,28
5	0,12	0,40
6	0,15	0,55
7	0,16	0,71
8	0,13	0,84
9	0,15	0,99
10	0,14	1,13
11	0,11	1,24
12	0,13	1,37
13	0,12	1,49
14	0,08	1,57



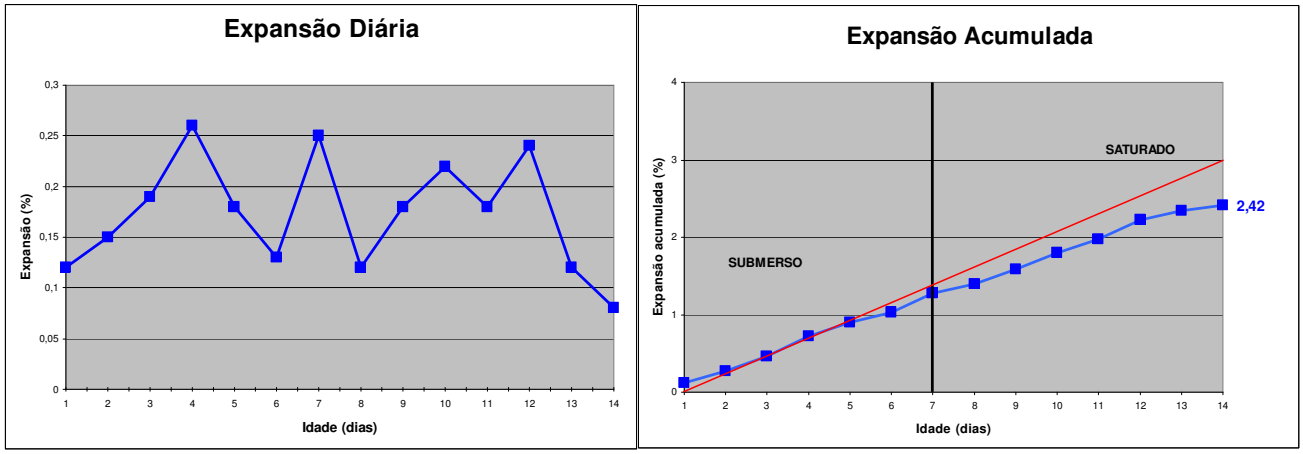


a) b)

Figura E.12 Expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – Aços Villares: a) expansão diária (%) e b) expansão acumulada (%).

Tabela E.13 Ensaio de expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – Villares Metals.

IDADE (DIAS)	EXP. DIÁRIA (%)	EXP. ACUMULADA (%)
1	0,12	0,12
2	0,15	0,27
3	0,19	0,46
4	0,26	0,72
5	0,18	0,90
6	0,13	1,03
7	0,25	1,28
8	0,12	1,40
9	0,18	1,58
10	0,22	1,80
11	0,18	1,98
12	0,24	2,22
13	0,12	2,34
14	0,08	2,42

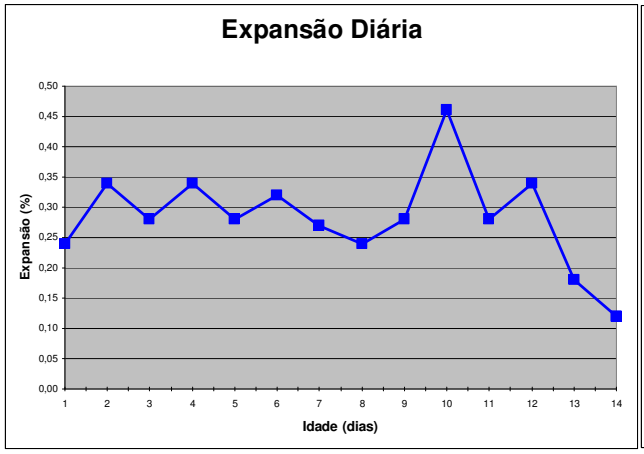


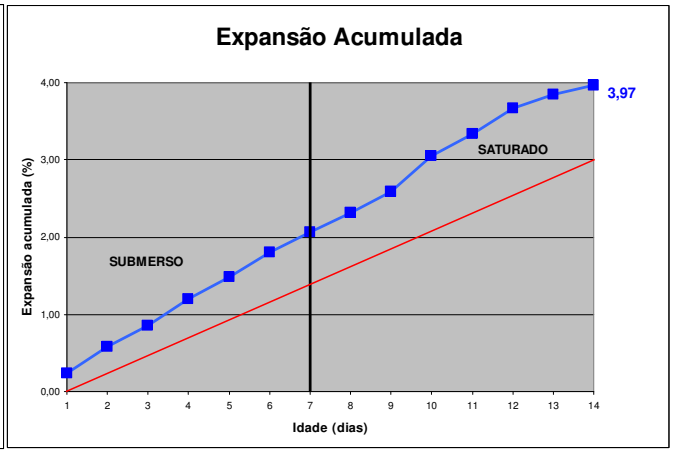
a) b)

Figura E.13 Expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – Villares Metals: a) expansão diária (%) e b) expansão acumulada (%).

Tabela E.14 Ensaio de expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – Cosipa.

IDADE (DIAS)	EXP. DIÁRIA (%)	EXP. ACUMULADA (%)
1	0,24	0,24
2	0,34	0,58
3	0,28	0,86
4	0,34	1,20
5	0,28	1,48
6	0,32	1,80
7	0,27	2,07
8	0,24	2,31
9	0,28	2,59
10	0,46	3,05
11	0,28	3,33
12	0,34	3,67
13	0,18	3,85
14	0,12	3,97





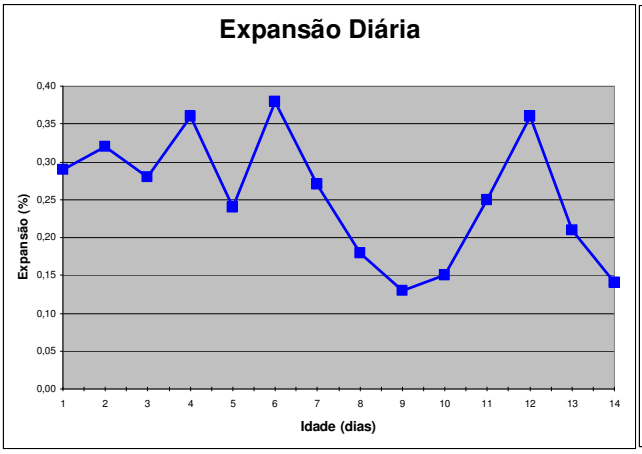
a) b)

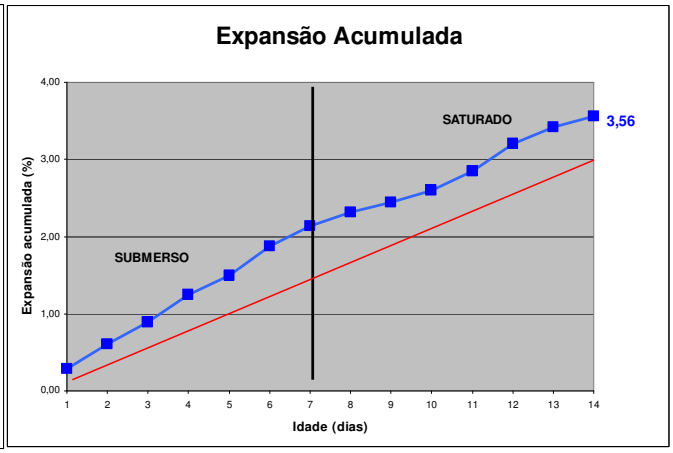
Figura E.14 Expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – Cosipa:

a) expansão diária (%) e b) expansão acumulada (%).

Tabela E.15 Ensaio de expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – Barra Mansa.

IDADE (DIAS)	EXP. DIÁRIA (%)	EXP. ACUMULADA (%)
1	0,29	0,29
2	0,32	0,61
3	0,28	0,89
4	0,36	1,25
5	0,24	1,49
6	0,38	1,87
7	0,27	2,14
8	0,18	2,32
9	0,13	2,45
10	0,15	2,60
11	0,25	2,85
12	0,36	3,21
13	0,21	3,42
14	0,14	3,56





a) b)

Figura E.15 Expansão pelo método PTM 130 modificado / DER-MG – Barra Mansa: a) expansão diária (%) e b) expansão acumulada (%).