

Dissertação de Mestrado

**CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE
FERRO SILÍCIO-MANGANÊS PARA A
APLICAÇÃO COMO AGREGADO EM
PAVIMENTAÇÃO FERROVIÁRIA**

NUGEO

AUTOR: RALPH WERNER HERINGER OLIVEIRA

ORIENTADOR: Prof. Dr. GILBERTO FERNANDES (UFOP)

ESCOLA DE MINAS / UFOP

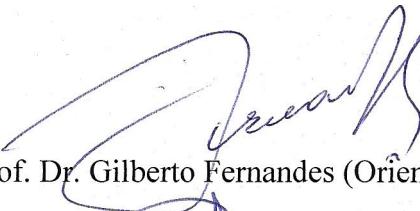
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA DA UFOP

OURO PRETO - DEZEMBRO DE 2013

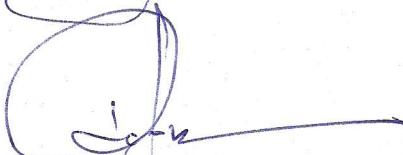
CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE FERRO SILÍCIO-MANGANÊS PARA A APLICAÇÃO COMO AGREGADO EM PAVIMENTAÇÃO FERROVIÁRIA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Geotecnia**.

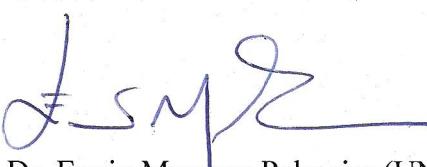
Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 04 de dezembro de 2013, pela Banca Examinadora composta pelos membros:



Prof. Dr. Gilberto Fernandes (Orientador / UFOP)



Prof. Dr. Romero César Gomes (UFOP)



Prof. Dr. Ennio Marques Palmeira (UNB)

O482c

Oliveira, Ralph Werner Heringer

Caracterização da escória de ferro silício-manganês para a aplicação como agregado em pavimentação ferroviária [manuscrito] / Ralph Werner Heringer Oliveira - 2013.

212f.: il., color.; grafos.; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Fernandes.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. NUGEO.

Área de concentração: Geotecnia de pavimentos.

1. Engenharia Civil - Teses. 2. Pavimentos - Teses. 3. Escória - Teses.
I. Fernandes, Gilberto. II. Universidade Federal de Ouro Preto. II. Título.

CDU: 624.13:625.1

Catalogação: sisbin@sisbin.ufop.br

“...Nós sempre temos tendência de ver coisas que não existem, e ficar cegos para as grandes lições que estão diante de nossos olhos.”

Paulo Coelho.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus e Nossa Senhora, por serem essenciais em minha vida, autores de meu destino, meus guias, socorro presente na hora da angústia, aos meus amáveis e eternos pais Cláudio e Idinéa, que, no decorrer da minha vida, proporcionaram-me, além de extenso carinho e amor, o conhecimento e a integridade, para o meu desenvolvimento como ser humano. Aos meus irmãos Régys e Raul, que permaneceram sempre ao meu lado, nos bons e maus momentos; ao meu querido amor Aline, que além de me fazer feliz, ajudou-me, durante todo o percurso, compreendendo-me e ensinando-me para que eu conquistasse um lugar ao sol.

AGRADECIMENTOS

A elaboração deste trabalho não teria sido possível sem a colaboração, estímulo e comprometimento de diversas pessoas. Gostaria, por este fato, de expressar toda a minha gratidão e apreço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para que este trabalho se tornasse uma realidade. A todos quero manifestar os meus sinceros agradecimentos.

Primeiramente, agradeço ao Prof. Dr. Gilberto Fernandes, por acreditar que eu era capaz e pela orientação. Só tenho a agradecer aos seus ensinamentos (pessoais e acadêmicos), orientações, palavras de incentivo, paciência e dedicação;

Aos amigos do Laboratório de Ferrovias e Asfalto da Universidade Federal de Ouro Preto, pela colaboração e empenho prestado durante a realização do trabalho;

À Vale, pelo convênio assinado com a UFOP, pelo apoio financeiro e fornecimento do coproduto siderúrgico (escória de ferro silício-manganês), que possibilitou a realização deste trabalho;

Ao engenheiro Fabiano Carvalho Sousa e a equipe da Estação Ferroviária Mário Carvalho na Estrada de Ferro Vitória - Minas, pela inestimável disposição que tiveram em me auxiliar durante o período dos trabalhos realizados;

À Profa. Tácia Costa Veloso do Departamento de Metalurgia da UFOP, pelo apoio e colaboração na revisão referente às Ferroligas;

Aos Professores Dr. Ennio Marques Palmeira (UNB) e o Dr. Romero César Gomes (UFOP), pela avaliação deste trabalho;

À UFOP, pela concessão da bolsa de estudos que viabilizou a dedicação à pesquisa;

Ao NUGEO, por abrir as portas para que eu pudesse ampliar meus conhecimentos técnicos e científicos;

Aos meus amigos do mestrado, pelos momentos divididos juntos, especialmente à Fernanda, Ronderson, Antônio e Thiago;

À Fundação Gorceix, pelo suporte dado a este trabalho;

À CAPES pelo incentivo, suporte financeiro e por acreditar no potencial desse estudo;

Ao meu PAI e à minha MÃE, pela sólida formação dada durante minha vida, que me proporcionou a continuidade nos estudos até à chegada a este mestrado, os meus eternos agradecimentos;

Aos meus irmãos pela compreensão, apoio e paciência, durante toda a minha vida;

Finalmente a minha amada Aline, agradeço todo o seu amor, carinho, admiração, e pela presença incansável com que me apoiou ao longo do período de elaboração desta dissertação;

A todos obrigado por permitirem que esta dissertação seja uma realidade.

RESUMO

A dissertação trata de um trabalho experimental que foi conduzido em duas etapas paralelas, sendo uma de campo e uma de laboratório. No presente trabalho objetivou-se estudar a escória de ferro silício-manganês de forma simples. Em campo foi montado um simulador de resistividade elétrica para lastro ferroviário, onde foi feito a avaliação da resistividade da escória em todas as condições climáticas, alcançando uma resistividade acima da mínima especificada pela AREMA. Em laboratório foram realizados ensaios de caracterização física, mecânica, química, mineralógica, ambiental e elétrica. Sendo que a caracterização física foi dividida em duas etapas. Na primeira fase foram realizados os ensaios prescritos pela norma NBR 5564 (2011). Na segunda fase foram executados ensaios complementares com a finalidade de obter fundamentos técnicos e científicos para provar que o limite máximo de absorção e porosidade estabelecido pela norma, em se tratando da escória de ferro silício-manganês, pode ser maior. Por este motivo foi identificado à morfologia, organização, distribuição dos poros da escória obtendo assim um conhecimento maior do material para correlacionar a sua resistência com a porosidade e absorção. Para a realização desta nova campanha de ensaios foram selecionadas aleatoriamente amostras da escória de ferro silício-manganês, que foram submetidas a uma análise microscópica dos poros e aos ensaios massa específica aparente, porosidade aparente, absorção de água, carga pontual, com os valores de todos os ensaios realizados com a mesma amostra foi gerado uma análise computacional e modelagem matemática de regressão polinomial e exponencial, que demonstrou que os valores dos ensaios de absorção de água e porosidade podem ser maiores que o limite máximo preconizados pela norma. Comprovando que os valores da norma NBR 5564 (2011), especificado para materiais rochosos não se aplicam à escória de ferro silício-manganês. A escória de ferro silício-manganês apresentou valores superiores aos limites mínimos prescritos pelas normas técnicas nacionais e internacionais, demonstrando que a mesma é um ótimo substituto dos materiais rochosos utilizados para lastro ferroviário.

ABSTRACT

The dissertation is an experimental work that was conducted in two parallel steps, with some field tests and with laboratory tests. The present work aimed to study the iron slag silico-manganese simple. A simulator for railway ballast electrical resistivity was set in the field which was done to evaluate the resistivity of the slag in all weather conditions, reaching a resistivity above the minimum specified by AREMA. In laboratory tests were carried out physical, mechanical, chemical, mineralogical, environmental and electrical. The physical phase was divided into two stages. In the first phase were carried out the tests prescribed by NBR 5564 (2011). In the second phase testing were performed in order to obtain technical and scientific fundaments to prove that the maximum absorption and porosity provided by the standard, in the case of iron slag silico-manganese, may be greater. For this reason, the morphology was identified, organization, pore distribution slag thus obtaining a greater knowledge of the material for its resistance to correlate with the porosity and absorption. For the realization of this new test campaign were randomly selected samples of iron slag silico-manganese, which were subjected to microscopic examination and testing pore bulk density, apparent porosity, water absorption, point charge, with values all tests on the same sample was generated computational analysis and mathematical modeling polynomial regression and exponential demonstrated that the values of absorption of water and porosity may be greater than the maximum limit recommended by the standard. Proving that the values of NBR 5564, (2011), specified for rock materials do not apply to iron slag silico-manganese. The iron slag silico-manganese values were above the minimum limits prescribed by national and international technical standards, demonstrating that it is a great substitute for rock materials used for railway ballast.

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Processo de fabricação do aço e a geração de resíduos (Mancio, 2001)	4
Figura 2.1 - Trilhos inteiramente de ferro com bordas conduzindo vagões com rodas comuns	13
Figura 2.2 - Rodas de aço munida de borda que rolam sobre trilhos de aço	14
Figura 2.3 - Bonde sobre trilhos de ferro puxado por cavalos.....	14
Figura 2.4 - Locomotiva The Rocket.....	16
Figura 2.5 - Perfil típico da via permanente - vista frontal	24
Figura 2.6 - Perfil típico da via permanente - vista transversal	24
Figura 2.7 - Transferência de tensões nos contatos roda-trilho (Selig e Waters, 1994) .	30
Figura 2.8 - Socaria manual com equipamento de pequeno porte	31
Figura 2.9 - Socaria mecânica com equipamento de grande porte	32
Figura 2.10 - Fontes de contaminação do lastro (Selig e Waters, 1994)	33
Figura 2.11 - Efeito do grau de contaminação em recalques no lastro (Han e Selig, 1997)	34
Figura 2.12 - Efeito do grau de contaminação em recalques no lastro para graus diferentes de contaminação dos materiais (Han e Selig, 1997)	35
Figura 2.13 - Gráfico da produção de ferroligas no Brasil (MME, 2012).....	40
Figura 2.14 - Unidades produtoras de ferroligas e silício metálico (Kruger, 2009).....	41
Figura 2.15 - Capacidade mensal instalada (t/mês) do setor de ferroligas (FEAM, 2010)	42
Figura 2.16 - Principais jazidas de manganês no Brasil (Kruger, 2009)	48
Figura 2.17 - Estrutura da produção de manganês (Nóbrega et al., 2007)	50
Figura 2.18 - Produção brasileira de ferroligas de manganês (MME, 2012).....	51
Figura 2.19 - Forno elétrico de redução (FER) (Kruger, 2009).....	55
Figura 2.20 - Esquema de transformação de energia elétrica em energia térmica do forno elétrico de redução (FER) (Rizzo, 2006)	56
Figura 2.21 - Eletrodos do forno (FER) (FEAM, 2010).....	57

Figura 2.22 - Processo de alimentação do forno (FER).....	59
Figura 2.23 - Processo de inserção dos eletrodos no forno (FER)	59
Figura 2.24 - Fase de transição no forno (FER)	60
Figura 2.25 - Processo de fusão no forno (FER)	60
Figura 2.26 - Formação da escória e da ferroliga no forno (FER).....	61
Figura 2.27 - Processo de esgotamento do forno (FER).....	61
Figura 2.28 - Produção das ferroligas	62
Figura 2.29 - Mapa esquemático com as zonas das reações no forno elétrico de redução (Rizzo, 2006)	63
Figura 2.30 - Consumo mensal de matéria prima (FEAM, 2010)	68
Figura 2.31 - Diagrama de equilíbrio metal-escória-gás (Ding e Olsen, 2000).....	72
Figura 2.32 - Escória de ferro silício-manganês (a) rica e (b) pobre	73
Figura 2.33 - Curvas da expansão diária e da expansão acumulada da escória (Nóbrega, 2007)	75
Figura 3.1 - Fluxograma dos ensaios realizados durante a pesquisa	79
Figura 3.2 - Escória de ferro silício-manganês	80
Figura 3.3 - Peneirador e peneiras da série normal e intermediaria	81
Figura 3.4 - Maquina de abrasão Los Angeles e as cargas abrasivas	85
Figura 3.5 - Aparelho Treton	87
Figura 3.6 - Dimensões utilizadas para análise no ensaio	88
Figura 3.7 - Aparelho para a determinação do teor de material macio e friável	90
Figura 3.8 - Características dos poros.....	92
Figura 3.9 - Espaço intersticial numa rocha clástica (Serra, 1984)	94
Figura 3.10 - Balança e o dispositivo para a pesagem hidrostática	95
Figura 3.11 - Microscópio óptico trinocular	96
Figura 3.12 - Interpolação polinomial	97
Figura 3.13 - Corpos de prova e presa	98
Figura 3.14 - Aparelho de carga pontual	100
Figura 3.15 - Difratômetro.....	101
Figura 3.16 - Espectrômetro de raios X.....	103
Figura 3.17 - Microscópio eletrônico de varredura	104
Figura 3.18 - Princípio de funcionamento do microscópio eletrônico de varredura	104

Figura 3.19 - Frascos de lixiviação e aparelho de agitação	109
Figura 3.20 - Esquema da transmissão da corrente na via e o curto-círcuito provocado pelos rodeiros	110
Figura 3.21 - Ensaio experimental da resistividade do agregado da escória	112
Figura 3.22 - Megômetro digital.....	113
Figura 3.23 - Materiais utilizados para a montagem do experimento e o experimento montado	114
Figura 3.24 - Simulador de condutividade elétrica	114
Figura 3.25 - Condutivímetro e o peagâmetro digital.....	115
Figura 3.26 - Projeto da montagem do experimento	115
Figura 3.27 - Geometria da seção teste com dormente de madeira	117
Figura 3.28 - Geometria da seção teste com dormente de aço	117
Figura 3.29 - Seção teste com dormentes de madeira e com dormentes aço.....	117
Figura 3.30 - Método de teste em dormentes de madeira com medida de resistividade nos trilhos	118
Figura 3.31 - Método de teste em dormentes de madeira com medida de resistividade nos eletrodos de cobre	118
Figura 3.32 - Método de teste em dormentes de aço com medida de resistividade nos trilhos	118
Figura 3.33 - Método de teste em dormentes de aço com medida de resistividade nos eletrodos de cobre	118
Figura 4.1 - Quarteamento da amostra.....	120
Figura 4.2 - Curva granulométrica da escória de ferro silício-manganês na faixa padrão A da ABNT	122
Figura 4.3 - Curva granulométrica da escória de ferro silício-manganês na faixa padrão B da ABNT	122
Figura 4.4 - Abrasão Los Angeles da escória de ferro silício-manganês	124
Figura 4.5 - Resistência ao choque da escória de ferro silício-manganês	125
Figura 4.6 - Forma dos fragmentos de escória de ferro silício-manganês.....	126
Figura 4.7 - Ensaio de teor de fragmentos macios e friáveis da escória.....	127
Figura 4.8 - Ensaio de teor de argila em torrões e materiais friáveis da escória	128
Figura 4.9 - Escoria imersa na solução de sulfato de sódio	129

Figura 4.10 - Escoria seca em estufa	129
Figura 4.11 - Aparência final homogênea, normal, sem trincas	130
Figura 4.12 - Pesagem do corpo de prova retirado da água e enxugado com um pano levemente umedecido	131
Figura 4.13 - Corpo de prova submerso em água e pesado usando o dispositivo da balança para pesagem hidrostática	131
Figura 4.14 - Pesagem do corpo de prova após ser retirado da estufa e deixado em repouso para o resfriamento	132
Figura 4.15 - Poros da escória de ferro silício-manganês (aumento de 50x).....	133
Figura 4.16 - Poros da escória de ferro silício-manganês (aumento de 250x).....	133
Figura 4.17 - Poros da escória de ferro silício-manganês (aumento de 400x).....	134
Figura 4.18 - Gráfico da absorção x resistência da escória de ferro silício-manganês.	136
Figura 4.19 - Gráfico da porosidade x resistência da escória de ferro silício- manganês	136
Figura 4.20 - Gráfico da absorção x resistência da brita de gnaisse	137
Figura 4.21 - Gráfico da porosidade x resistência da brita de gnaisse.....	138
Figura 4.22 - Corpos de prova de escória de ferro silício-manganês com 7cm de arestas.....	139
Figura 4.23 - Preparação para o rompimento do corpo de prova de escória de ferro silício- manganês	140
Figura 4.24 - Corpo de prova de escória de ferro silício-manganês rompido e seu plano de ruptura	140
Figura 4.25 - Ensaio de carga pontual da escória de ferro silício-manganês.....	142
Figura 4.26 - Padrões de difratometria de raios X da escória de ferro silício- manganês	143
Figura 4.27 - Pastilhas de escória de ferro silício-manganês.....	144
Figura 4.28 - Corpo de prova com a amostra de escória de ferro silício-manganês na segunda preparação.....	145
Figura 4.29 - Morfologia típica encontrada na escória de ferro silício-manganês pulverizada.....	146
Figura 4.30 - Gráfico da média das espécies químicas compostas da escória pulverizada.....	147

Figura 4.31 - Gráfico de porcentagem de teor de cal livre da escória de ferro silício-manganês	148
Figura 4.32 - Isoterma de adsorção - dessorção da escória de ferro silício-manganês	150
Figura 4.33 - Seção transversal da via permanente fictícia	154
Figura 4.34 - Manta de geotêxtil, a geometria e o sistema de dreno utilizando na via permanente	157
Figura 4.35 - Gráfico da resistividade do agregado no estado saturado e seco	158
Figura 4.36 - Fragmentos da escória no estado seco	159
Figura 4.37 - Fragmentos da escória no estado saturado	159
Figura 4.38 - Ensaio de resistividade do fragmento da escória	159
Figura 4.39 - Gráfico da resistividade do pó no estado saturado e seco	160
Figura 4.40 - Preparação da amostra saturada	161
Figura 4.41 - Ensaios da resistividade do pó da escória saturado e seco	161
Figura 4.42 - Gráfico da condutividade da escória de ferro silício-manganês	162
Figura 4.43 - Gráfico da média do pH por ciclo da escória	162
Figura 4.44 - Escória durante os ensaios de condutividade	163
Figura 4.45 - Escória seca em estufa após os ensaios de condutividade	163
Figura 4.46 - Colocação da grade com dormentes de aço e da escória de ferro silício-manganês	164
Figura 4.47 - Socaria manual da escória de ferro silício-manganês na seção teste com dormentes de aço	164
Figura 4.48 - Colocação da grade com dormentes de madeira e da escória de ferro silício-manganês	165
Figura 4.49 - Socaria manual da escória de ferro silício-manganês na seção teste com dormentes de madeira	165
Figura 4.50 - Grades das seções testes com dormentes de aço e madeira	166
Figura 4.51 - Ensaios de resistividade da escória em dormentes de aço e de madeira no primeiro dia.....	166
Figura 4.52 - Ensaios de resistividade da escória em dormentes de aço e de madeira no décimo dia.....	167
Figura 4.53 - Ensaios de resistividade da escória em dormentes de aço e de madeira no vigésimo dia.....	167

Figura 4.54 - Ensaios de resistividade da escória em dormentes de aço e de madeira no quinquagésimo dia	168
Figura 4.55 - Ensaios de resistividade da escória em dormentes de aço e de madeira no centésimo dia	168
Figura 4.56 - Ensaios de resistividade da escória em dormentes de aço e de madeira no centésimo quadragésimo sétimo dia	168
Figura 4.57 - Gráfico da resistividade da escória na seção teste com dormentes de aço	169
Figura 4.58 - Gráfico da resistividade da escória na seção teste com dormentes de madeira.....	170
Figura V.1 - Ofício nº306/2010/NLA/ SUPES/IBAMA/MG.....	212

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 - Custo da brita de gnaisse e da escória de ferro silício-manganês com frete	8
Tabela 2.1 - Condutividade hidráulica para o lastro (Selig <i>et al.</i> , 1993)	36
Tabela 2.2 - Propriedades físicas do lastro padrão (NBR 5564, 2011)	37
Tabela 2.3 - Distribuição granulométrica do lastro padrão (NBR 5564, 2011).....	38
Tabela 2.4 - Propriedades conferidas pelas ligas aos aços (FEAM, 2010).....	45
Tabela 2.5 - Propriedades conferidas pelas ligas aos aços (FEAM, 2010).....	46
Tabela 2.6 - Características das ferroligas de manganês	50
Tabela 2.7 - Valores de basicidades de SiMn	70
Tabela 2.8 - Traço da escória de ferro silício-manganês	73
Tabela 2.9 - Resultados do ensaio de expansibilidade (Nóbrega, 2007)	76
Tabela 3.1 - Módulo de finura das britas 2, 3 e 4	82
Tabela 3.2 - Limites dos coeficiente de não uniformidade e de curvatura	83
Tabela 3.3 - Estado de contaminação do lastro (Selig e Waters, 1994)	84
Tabela 3.4 - Classificação da forma dos fragmentos do corpo de prova	88
Tabela 3.5 - Composição granulométrica mínima do corpo de prova.....	89
Tabela 4.1 - Granulometria da escória.....	121
Tabela 4.2 - Coeficiente de não uniformidade e de curvatura da escória	123
Tabela 4.3 - Abrasão Los Angeles da escória.....	123
Tabela 4.4 - Resistência ao choque da escória.....	124
Tabela 4.5 - Forma dos fragmentos da escória	125
Tabela 4.6 - Teor de fragmentos macios e friáveis da escória.....	126
Tabela 4.7 - Teor de argila em torrões e materiais friáveis da escória	127
Tabela 4.8 - Resistência à intempérie da escória	128
Tabela 4.9 - Massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água da escória	130
Tabela 4.10 - Massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água da	

escória	134
Tabela 4.11 - Carga pontual da escória.....	135
Tabela 4.12 - Resistência compressão uniaxial da escória	139
Tabela 4.13 - Carga pontual.....	141
Tabela 4.14 - Espécies químicas e sua porcentagem em massa	144
Tabela 4.15 - Espécies químicas e sua porcentagem em massa	144
Tabela 4.16 - Espécies químicas compostas e sua porcentagem em massa	145
Tabela 4.17 - Espécies químicas compostas e sua porcentagem em massa	145
Tabela 4.18 - Espécies químicas compostas e sua porcentagem em massa	147
Tabela 4.19 - Adsorção de nitrogênio - Técnica BET	149
Tabela 4.20 - Classificação de toxicidade por lixiviação	151
Tabela 4.21 - Classificação de toxicidade por solubilização dos resíduos	152
Tabela 4.22 - Classificação de toxicidade por solubilização dos resíduos	153
Tabela 4.23 - Comparação da escória de ferro silício-manganês e outros materiais utilizado como lastro.....	172
Tabela 4.24 - Comparação da escória de ferro silício-manganês e outros materiais utilizado como lastro.....	173
Tabela I.1 - Resultados do teste completo de condutividade elétrica do lastro	198
Tabela I.2 - Resultados do teste completo de condutividade elétrica do lastro	199
Tabela I.3 - Resultados do teste completo de condutividade elétrica do lastro	200
Tabela I.4 - Resultados do teste completo de condutividade elétrica do lastro	201
Tabela I.5 - Resultados do teste completo de condutividade elétrica do lastro	202
Tabela II.1 - Resultados do teste completo do ensaio de resistividade elétrica do agregado da escória na condição saturada.....	203
Tabela II.2 - Resultados do teste completo do ensaio de resistividade elétrica do agregado da escória na condição seca	204
Tabela III.1 - Resultados do teste completo do ensaio de resistividade elétrica do pó da escória	205
Tabela IV.1 - Resultados do teste completo do ensaio de resistividade elétrica do lastro saturado.....	206
Tabela IV.2 - Resultados do teste completo do ensaio de resistividade elétrica do lastro saturado	207

Tabela IV.3 - Resultados do teste completo do ensaio de resistividade elétrica do lastro saturado	208
Tabela IV.4 - Resultados do teste completo do ensaio de resistividade elétrica do lastro seco.. ..	209
Tabela IV.5 - Resultados do teste completo do ensaio de resistividade elétrica do lastro seco.. ..	210
Tabela IV.6 - Resultados do teste completo do ensaio de resistividade elétrica do lastro seco.. ..	211

Lista de Símbolo, Nomenclatura e Abreviações

Ω : Ohms

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

Al: Alumínio

Al_2O_3 : Alumina

AREMA: American Railway Engineering and Maintenance of Way Association

ASTM: American Society for Testing and Materials

B1: Basicidade binária

B2: Basicidade ternária

Ba: Bário

BET: Brunauer, Emmett e Teller

C: Coeficiente Experimental

Ca: Cálcio

CaO : Óxido de Cálcio

$\text{Ca}(\text{OH})_2$: Hidróxido de Cálcio

CBR: Índice de Suporte Califórnia

CBTU: Companhia Brasileira de Treins Urbanos

CBCC: Companhia Brasileira de Carbureto de Cálcio

Cc: Coeficiente de Curvatura

CETESB: Companhia Estadual de Saneamento Básico

Co: Cobalto

CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente

Cr: Cromo

CSN: Companhia Siderúrgica Nacional

Cu: Coeficiente de não Uniformidade

d: Distância (espaçamento) Interplanar

D10: Diâmetro Efetivo (para o qual passa 10% do material)

D30: Diâmetro Efetivo (para o qual passa 30% do material)

D60: Diâmetro Efetivo (para o qual passa 60% do material)

De: Diâmetro Equivalente das Partículas

DECIV: Departamento de Engenharia Civil

DEGEO: Departamento de Geológica

DEMET: Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

DER-MG: Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

EAF: Electric Arc Fumace

EFVM: Estrada de Ferro Vitória - Minas

EUA: Estados Unidos da América

Fe: Ferro

FEAM: Fundação Estadual do Meio Ambiente

FEEMA: Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente

FeMn: Ferro-Manganês

FeMnAC: Ferro-Manganês Alto Carbono

FeMnMC: Ferro-Manganês Médio Carbono

FeMnBC: Ferro-Manganês Baixo Carbono

FeO: Óxido de Ferro

FEPASA: Ferrovia Paulista Sociedade Anônima

FER: Forno Elétrico de Redução

FERBASA: Companhia de Ferroligas da Bahia

FeSiMn: Ferro Silício-Manganês

FI: Fouling Index” ou Índice de Contaminação

IBAMA: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

ICEB: Instituto de Ciências Exatas e Biológicas

IG: Índice de Grupo

IPHAN: Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional

K: Potássio

K_h: Condutividade Hidráulica

IP: Índice de Plasticidade

IPHAN: Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional

LD: Linz-Donawitz
LL: Limite de Liquidez
MDICE: Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior
MEV: Microscopia Eletrônica de Varredura
MMA: Ministério de Meio Ambiente
MME: Ministério de Minas e Energia
MnO: Óxido de Manganês
MgO: Oxido de Magnésio
Mn: Manganês
Mo: Molibdênio
MT: Ministério dos Transportes
Nb: Nióbio
NBR: Norma Brasileira Registrada
NM: Norma Mercosul
Ni: Níquel
NUGEO: Núcleo de Geotecnica da Escola de Minas
P 1: Plataforma Ruim
P 2: Plataforma Média
P 3: Plataforma Boa
P200: Porcentagens em Pesos Passantes na Peneira #200
P4: Porcentagens em Pesos Passantes na Peneira #4
P: Fósforo
PAC: Programa de Aceleração do Crescimento
Pco: Pressão do Monóxido de Carbono
pH: Potencial Hidrogeniônico
PIB: Produto interno bruto
PTM: Pennsylvania Testing Method
QS 0: Qualidade do Solo (solos impróprios por serem orgânicos)
QS 1: Qualidade do Solo (solos ruins que podem ser utilizados após tratados)
QS 2: Qualidade do Solo (solos médios que correspondem a solos granulares)
QS 3: Qualidade do Solo (solos bons, granulares com poucos finos)
RFFSA: Rede Ferroviária Federal Sociedade Anônima

S: Enxofre

Si: Silício

SI: Sistema Internacional

Sr: Estrôncio

SMEWW: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

Tb: Térbio

UFOP: Universidade Federal de Ouro Preto

USCS: Unified Soil Classification System

V: Vanádio

W: Tungstênio

WEF: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

Zr: Zircônio

ÍNDICE

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. JUSTIFICATIVA.....	6
1.2. OBJETIVOS	9
1.3. ESTRUTURA DA PESQUISA.....	10

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1. INTRODUÇÃO	12
2.2. BREVE HISTÓRICO DA FERROVIA	12
2.2.1. A ferrovia no Brasil	16
2.3. PAVIMENTO FERROVIÁRIO	22
2.3.1. Constituição e função da via permanete	24
2.4. LASTRO.....	29
2.4.1. Esforços	29
2.4.2. Contaminação	33
2.5. FERROLIGAS.....	38
2.6. FERROLIGAS DE MANGANÊS.....	47
2.6.1. Balanço de massa.....	52
2.6.2. Forno elétrico a arco submerso.....	54
2.6.3. Processo de produção das ferroligas de manganês	58
2.6.4. Zonas das reações	63

2.6.5. Produção do ferro-manganês alto carbono	66
2.6.6. Produção do ferro silício-manganês	67
2.7. ESCÓRIA DE FERRO SILÍCIO-MANGANÊS	69
2.7.1. Expansão da escória de ferro silício-manganês	74
2.7.2. Aplicações da escória de ferro silício-manganês.....	77

CAPÍTULO 3

3. MATERIAIS E METODOLOGIAS ADOTADAS.....	78
3.1. INTRODUÇÃO	78
3.2. MATERIAL ESTUDADO.....	80
3.3. METODOLOGIAS ADOTADAS.....	80
3.3.1. Ensaios de laboratório	80
3.3.1.1. Granulometria	80
3.3.1.2. Abrasão Los Angeles	85
3.3.1.3. Resistência ao choque - Índice de Tenacidade TRETON.....	86
3.3.1.4. Forma dos fragmentos.....	87
3.3.1.5. Teor de fragmentos macios e friáveis	89
3.3.1.6. Teor de argila em torrões e materiais friáveis.....	90
3.3.1.7. Determinação da resistência à intempérie.....	91
3.3.1.8. Massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água	91
3.3.1.9. Análise microscópica dos poros.....	95
3.3.1.10. Modelagem matemática de regressão polinomial e exponencial....	96
3.3.1.11. Resistência à compressão uniaxial.....	97
3.3.1.12. Carga pontual	98
3.3.1.13. Análise por difração de raios X	100
3.3.1.14. Análise química quantitativa.....	102
3.3.1.15. Análise química por microscopia eletrônica de varredura (MEV / EDS).....	103
3.3.1.16. Teor da cal livre	105
3.3.1.17. Adsorção de nitrogênio - Técnica BET.	106
3.3.1.18. Ensaio de lixiviação	108

3.3.1.19. Ensaio de solubilização.....	109
3.3.1.20. Análise das condições necessárias para a escória solubilizar em campo	110
3.3.1.21. Resistividade elétrica do agregado da escória	110
3.3.1.22. Resistividade elétrica do pó da escória	113
3.3.1.23. Condutividade elétrica do lastro	114
3.3.2. Ensaio de campo	117
3.3.2.1. Resistividade elétrica do lastro	116

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS	119
 4.1. INTRODUÇÃO	119
 4.2. AMOSTRAGEM.....	119
 4.3. ENSAIOS DE LABORATÓRIO	120
4.3.1. Primeira etapa.....	120
4.3.1.1. Granulometria	120
4.3.1.2. Abrasão Los Angeles	123
4.3.1.3. Resistência ao choque - Índice de Tenacidade TRETON.....	124
4.3.1.4. Forma dos fragmentos.....	125
4.3.1.5. Teor de fragmentos macios e friáveis	126
4.3.1.6. Teor de argila em torrões e materiais friáveis.....	127
4.3.1.7. Determinação da resistência à intempérie.....	128
4.3.1.8. Massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água	130
4.3.2. Segunda etapa	132
4.3.2.1. Análise microscópica dos poros.....	133
4.3.2.2. Massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água	134
4.3.2.3. Carga pontual	135
4.3.2.4. Modelagem matemática de regressão polinomial e exponencial....	135
4.3.3. Resistência à compressão uniaxial	138
4.3.4. Carga pontual.....	140
4.3.5. Análise por difração de raios X	142

4.3.6. Análise química quantitativa	143
4.3.7. Análise química por microscopia eletrônica de varredura (MEV/EDS)	148
4.3.8. Teor da cal livre	148
4.3.9. Adsorção de nitrogênio - Técnica BET	148
4.3.10. Ensaio de lixiviação	150
4.3.11. Ensaio de solubilização	152
4.3.12. Análise das condições necessárias para a escória solubilizar em campo	154
4.3.13. Resistividade elétrica do agregado da escória	157
4.3.14. Resistividade elétrica do pó da escória	160
4.3.15. Condutividade elétrica do lastro	161
4.4. ENSAIOS DE CAMPO	164
4.4.1. Resistividade elétrica do lastro	164
4.5. COMPARAÇÃO ENTRE OUTROS MATERIAIS UTILIZADOS COMO LASTRO	172

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS..	174
5.1. INTRODUÇÃO	174
5.2. CONCLUSÕES	176
5.2.1. Conclusões referentes aos ensaios de laboratório.....	175
5.2.1.1. Caracterização física	175
5.2.1.2. Caracterização mecânica.....	177
5.2.1.3. Caracterização química e mineralógica	177
5.2.1.4. Caracterização ambiental	178
5.2.1.5. Caracterização elétrica	178
5.2.2. Conclusões referentes aos ensaios de campo	180
5.2.2.1. Caracterização elétrica	179
5.2.3. Conclusão final	180
5.3. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	181

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 183

ANEXOS

ANEXO I - ENSAIO DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DO LASTRO.....	198
ANEXO II - ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO AGREGADO DA ESCÓRIA.....	203
ANEXO III - ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO PÓ DA ESCÓRIA	205
ANEXO IV - SIMULADOR DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO LASTRO.....	206
ANEXO V - APROVAÇÃO AMBIENTAL DO IBAMA PARA USO DA ESCÓRIA DE FERRO SILÍCIO-MANGANÊS	212

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

A siderurgia sustenta a produção industrial dos países desenvolvidos. A produção e o consumo de metais ferrosos (aço e ferro fundido) são fatores que medem a saúde econômica e o grau de desenvolvimento desses países. O processo siderúrgico começa nas minerações, das quais são extraídas as matérias-primas, tais como minério de ferro, minério de calcário, dolomito e carvão mineral. Essas matérias-primas são transportadas até as usinas e, após o beneficiamento, são levadas aos fornos, para que, conforme ação do calor e do oxigênio, o minério de ferro seja reduzido. Essa primeira redução tem como principal finalidade diminuir o teor de impurezas, ou seja, reduzir a quantidade de substâncias como o fósforo (P) e o enxofre (S) existentes nos minérios, os quais são retirados parcialmente com resíduos e/ou gases (Parente *et al.*, 2003).

O Brasil é um dos países com maior potencial mineral do mundo, devido ao seu potencial geológico abundante a ser explorado em extensão continental, a sua infraestrutura em processo de fortalecimento, a sua mão-de-obra qualificada, a qual se utiliza de tecnologia no estado da arte, fatores que criam um ambiente propício para o crescimento da mineração e da metalurgia no País.

Na mineração, particularmente em recursos minerais como nióbio, minério de ferro, manganês, bauxita, níquel e cobre, há excelentes performances de produção, posicionando o Brasil entre os produtores mundiais (MDICE, 2013).

Desde o início dos anos 1990, o setor siderúrgico brasileiro passa por um processo de reestruturação que se caracteriza pela privatização, fusão e internacionalização do setor. Em seu atual momento de inserção no mercado global, novos investimentos vêm sendo feitos para expandir a capacidade produtiva de produtos semiacabados a fim de abastecer, principalmente, a Europa e os EUA.

A balança comercial do setor metalúrgico, tradicionalmente superavitária, apresentou, em 2011, saldo da ordem de US\$ 9,8 bilhões, superando em mais de 100 % ao mesmo período do ano anterior, com exportações no valor de US\$ 21,5 bilhões e importações de US\$ 11,7 bilhões. As exportações, no ano de 2011, participaram com 8,4 % do total das exportações brasileiras. Os principais responsáveis pelo desempenho positivo das vendas externas brasileira de produtos metalúrgicos são o aço, com participação de 39 % do setor, que superou em 45 % o valor de 2010; ferroligas com 11 % (destacando-se ferro-nióbio com 8 %); ferro gusa e fundidos, ambos com participações da ordem de 7 %. O setor metalúrgico apresenta expressiva importância no cenário econômico brasileiro, com vasta cadeia produtiva dos segmentos ligados à metalurgia, usinagem e produção de manufaturados metálicos, sendo base de outras atividades relevantes para o país, como a indústria automobilística, construção civil e bens de capital. Embora a indústria brasileira venha sendo afetada pela crise internacional, o PIB do setor siderúrgico, em 2011, avançou 1,6 % em relação ao ano anterior, atribuindo esse desempenho principalmente às indústrias de construção civil e automobilística (MME, 2012a).

O crescimento do setor siderúrgico no Brasil, apesar de proporcionar ganhos econômicos, acaba por intensificar impactos negativos à sociedade e ao meio ambiente, impactos estes relacionados às explorações de jazidas de matéria-prima bruta. Esse crescimento está relacionado a uma estratégia de inclusão na economia global, que tem por base a exploração de recursos naturais e as tecnologias poluentes/degradantes. Essas características acendem um modelo de desenvolvimento socialmente injusto e ambientalmente insustentável, fundamentado por decisões que desprezam e externalizam os impactos socioambientais negativos destas atividades.

Da mesma forma que a siderurgia é um indicador de progresso econômico e tecnológico, é também, inegavelmente, um enorme gerador de problemas ambientais. Os impactos no meio ambiente acontecem nas várias fases do processo, desde o transporte, o manuseio e a preparação da matéria-prima, até a transformação dos produtos finais e o destino dado aos diversos resíduos que resultam das etapas de produção.

Segundo Della *et al.* (2005a), é por meio do reaproveitamento dos resíduos produzidos que há a possibilidade de diminuição da exploração de jazidas escassas de matéria-prima bruta, da diminuição da poluição indiscriminada e do auxílio no racionamento de energia.

As empresas siderúrgicas enfrentam dificuldades em relação ao destino final da grande quantidade de resíduos produzidos pelo processo de fabricação do aço, em parte por falta de espaço em seus pátios devido aos anos de armazenamento inadequado, ou por falta de um plano de descarte eficiente que visasse o reaproveitamento e/ou reciclagem dos resíduos.

Os resíduos industriais ainda são repetidamente dispostos em aterros, em contato direto com o solo, ou em recipientes inadequados. Algumas áreas destinadas a estes resíduos encontram-se comprometidas e em algumas empresas têm ocorrido acidentes nestes depósitos, gerando impactos ambientais, paradas operacionais e até perdas fatais (Cunha *et al.*, 2006).

A falta de uma política efetiva de aproveitamento de resíduos no passado tem causado sérios problemas ao setor siderúrgico. As novas legislações ambientais estão mais rigorosas, forçando as empresas a dar destinos mais seguros aos seus resíduos. Por isso, o reaproveitamento destes resíduos significa uma solução técnica, econômica e ecológica para as siderúrgicas (Mancio, 2001a).

Desta maneira, pode-se transformar o que antes era resíduo em coproducto, ou seja, fazendo com que as despesas se tornem uma fonte de faturamento ou, pelo menos, que haja uma redução das despesas de eliminação (Della *et al.*, 2005b).

Segundo John (1996), entende-se por resíduos todos os rejeitos originados dentro do processo de produção, independente do seu valor comercial. Em se tratando do ponto de vista ambiental, o principal propósito é buscar a transformação de um resíduo em um coproduto, uma vez que por meio da reciclagem é possível minimizar o consumo energético na produção de novos produtos, além de favorecer a dispersão de compostos contaminantes, o que não ocorre quando da deposição dos resíduos, seja em pilhas nos pátios ou em contêineres fechados.

É possível citar como resíduos: escórias de alto-forno, de dessulfuração, de aciaria LD, de forno elétrico a arco submerso (forno elétrico de redução - FER) ou ferroligas, pó e lama de alto-forno, lama grossa e lama fina de aciaria, carepa e os finos de carvão e de minério, (Geyer, 2001). Um dos resíduos de maior volume gerado nas indústrias siderúrgicas são as escórias que constituem 67 % de todos os resíduos (Moura, 2000). A Figura 1.1 apresenta o fluxograma da siderurgia.

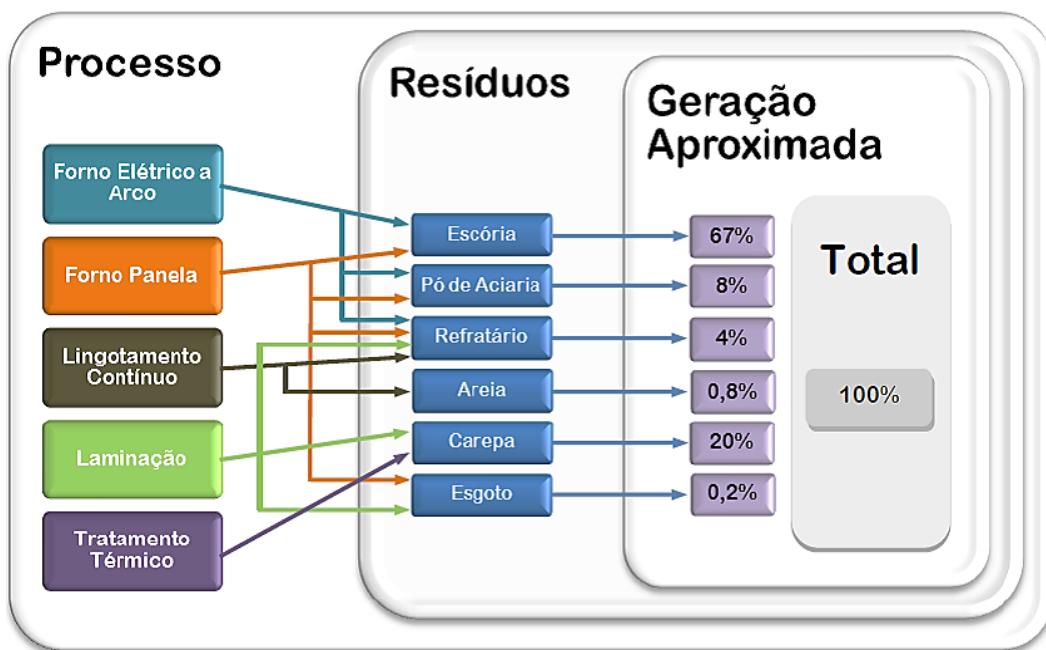


Figura 1.1 - Processo de fabricação do aço e a geração de resíduos (Mancio, 2001).

O autor classifica o material (escória de ferro silício-manganês) utilizado neste trabalho de pesquisa como um coproduto (agregado siderúrgico) produzido em conjunto com as ferroligas de manganês, e não como um resíduo denominado de escória usualmente designado pelo setor metalúrgico. Porém, em respeito aos termos técnicos utilizados por este setor, o autor se refere ao agregado siderúrgico de ferro silício-manganês como escória.

Nos últimos anos, a pesquisa sobre a reciclagem de resíduos industriais vem sendo intensificada em todo o mundo. Muitas empresas vêm investindo em pesquisa e tecnologia para reaproveitamento de rejeitos industriais, o que aumenta a qualidade do produto reciclado e propicia maior eficiência do sistema produtivo (Takano *et al.*, 2000).

O modo mais eficiente para atenuar os danos gerados pelos resíduos é minimizar sua geração, e reutilizá-los ou reciclá-los. Para que isso ocorra, torna-se necessária uma reengenharia dos processos produtivos, buscando uma significativa redução dos resíduos (Fernandes, 2005a).

Como os tipos mais rotineiros de resíduos siderúrgicos são as escórias, a busca pela viabilidade técnica do uso desse tipo de resíduo, tem estimulado o aproveitamento do mesmo. Quer seja, por meio de novas tecnologias de beneficiamento destes resíduos ou pela utilização dos mesmos para outras aplicações.

Para a verificação da possibilidade de aproveitamento destes resíduos é necessária a caracterização tecnológica (caracterização física, mecânica, química, mineralógica, ambiental e ensaios tecnológicos específicos para um determinado emprego).

O resíduo de um minério advindo de determinada planta de processamento mineral apresenta, em geral, características e peculiaridades próprias e, por isso, frequentemente, processos tecnológicos para utilização de um dado resíduo nem sempre poderão ser efetivos para um similar. Daí a necessidade de pesquisas mais específicas e detalhadas para diferentes plantas (Reis, 2005).

Os resíduos industriais têm recebido uma atenção maior para a reciclagem e para a aplicação em outras áreas. Pode-se atribuir a este fato tanto aspectos econômicos quanto ambientais. Pode-se ainda ressaltar que as receitas adicionais geradas e a redução de custos, uma vez que não há mais necessidade de grandes áreas de armazenamento, além da possibilidade do valor agregado pelo seu uso, são motivos que valorizam a proposta de reutilização (Fernandes, 2010a).

A construção civil, por ser um grande consumidor de recursos minerais e de seus próprios resíduos, também constitui um potencial consumidor de outros resíduos como, por exemplo, os siderúrgicos. O reaproveitamento e reutilização destes resíduos, além de reduzir a extração de recursos naturais não renováveis, minimiza a disposição dos mesmos em aterros, firmando a ideia de desenvolvimento sustentável (Silva Filho *et al.*, 2002).

Dentre todas as áreas da construção civil, a área da pavimentação (rodovias e ferrovias) é a maior consumidora dos recursos naturais, como os materiais rochosos, que são transformados em brita, oriunda do desmonte de rocha viva até a granulometria desejada. A presente escassez destes recursos para melhoria da infraestrutura viária motiva a busca de alternativas para a implantação e/ou recuperação da malha rodoviária e ferroviária do país.

Neste contexto, procura-se investigar novos materiais destinados à pavimentação rodoferroviária. O uso de escória como material de base para camadas de pavimentos e como lastro ferroviário vem sendo pesquisado por outros autores, Thomas (1978); Silva (1991); Silva (1994); Kandhal e Hoffman (1998); Khan e Wahhab (1998); Bagampadde *et al.* (1999); Silva e Mendonça (2001a); Alvarenga (2001); Baltazar (2001); Rohde (2002); Fernandes (2005b); Sousa (2007a); Nóbrega (2007a); Fernandes e Prado Filho (2007a); Silva (2010a); Fernandes (2010b).

1.1. JUSTIFICATIVA

No passado, quando se falava em agregado para a construção civil, em especial pavimentação ferroviária e rodoviária, o agregado rochoso (gnaisse) era o mais conhecido e ainda hoje é o mais utilizado. Devido a sua grande variação mineralógica e seu grau metamórfico, o gnaisse tem uma resistência alta e uma porosidade e absorção baixa, tornando-o um excelente material para a construção civil. Além de suas qualidades, o gnaisse era muito abundante, por isso foi amplamente explorado. Com o passar do tempo o gnaisse está mais escasso e a exploração das jazidas vem degradando o meio ambiente.

Como resposta à exploração desenfreada do gnaisse, sanções estão sendo aplicadas, proibindo a exploração de novas jazidas do mesmo. Com isso, o preço, antes muito atrativo, tem aumentado, bem como as licenças ambientais, tanto para exploração, como para venda e transporte do gnaisse. Por estes motivos esta pesquisa tem como objetivo, provar que o coproducto siderúrgico (escória de ferro silício-manganês) produzido em conjunto com as

ferroligas, pode ser utilizado como substituto para o gnaisse ou outro agregado rochoso usualmente utilizado como lastro ferroviário.

Este trabalho tem como parceira a maior empresa do setor de mineração no Brasil, e faz parte de um estudo que se enquadra dentro dos escopos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), por meio do Núcleo de Geotecnica da Escola de Minas (NUGEO), com objetivo de estudar e viabilizar a utilização de materiais alternativos a fim de utilizá-los na construção civil, pavimentação rodoviária e ferroviária.

Por meio de uma pesquisa em duas unidades de uma siderúrgica produtora de ferro silício-manganês em Minas Gerais, foi realizado um custo benefício na utilização da escória como lastro ferroviário na Estrada de Ferro Vitória - Minas (EFVM). Em especial, no projeto Apolo da empresa de mineração, que vai precisar de uma ligação ferroviária até o pátio de Desembargador Drumond.

O projeto Apolo é um dos maiores do setor de mineração no mundo, o mesmo foi orçado em R\$ 4 bilhões, a expectativa é de produzir 24 milhões de toneladas de minério de ferro por ano. No entanto, a empresa de mineração prevê o aumento da capacidade de produção da mina para 37,5 milhões de toneladas ao ano.

Com isso, a mina Apolo poderá ser, em termos de produção, a maior em Minas Gerais e a segunda maior entre todos os ativos da empresa de mineração, atrás apenas da mina N5, no complexo Carajás, no Pará. O pátio de recebimento e formação é composto por linha dupla com 3.980 m e a ligação do pátio à Estrada de Ferro Vitória - Minas tem uma extensão aproximada de 15 km. A quantidade estimada de agregado para lastro no projeto Apolo é de 138.600 t.

O volume de escória que se encontrava em estoque no ano de 2010 nas unidades da siderúrgica produtora de ferro silício-manganês, em Minas Gerais, era de aproximadamente 800.000 t, com aproximadamente 600.000 t na unidade de Ouro Preto-MG e 200.000 t na

unidade de Barbacena-MG. A produção era de 5000 t/mês, sendo de 3000 t/mês de material beneficiado para utilização como lastro ferroviário.

Para fazer a comparação entre o custo benefício do agregado rochoso (brita de gnaisse) normalmente utilizado como lastro e como escória de ferro silício-manganês, foi realizada uma pesquisa do valor da tonelada de cada material e do frete para ser entregue nas unidades de transporte da EFVM. A Tabela 1.1 mostra os valores de cada material com frete.

Tabela 1.1 - Custo da brita de gnaisse e da escória de ferro silício-manganês com frete.

De Ouro Preto – MG para:	Brita (R\$/t)	Escória (R\$/t)	Economia (%)
Santa Luzia – MG	93,9	24,17	74
Ouro Branco – MG	46,54	21,25	54
Ramal ferroviário do funil, em Ouro Preto – MG	48,46	10,50	78
De Barbacena – MG para:	Brita (R\$/t)	Escória (R\$/t)	Economia (%)
Santa Luzia – MG	119,9	30,70	75
Ouro Branco – MG	77,9	23,50	70

Em se tratando somente do contexto financeiro, a escória de ferro silício-manganês é uma alternativa:

- Sustentável para a ferrovia, devido aos baixos custos e à produção contínua;
- Para a reutilização de material, coproduto do processo de ferroligas como insumo nobre de projetos ferroviários;
- Para a diminuição do impacto ambiental provocado pelas explorações de jazidas de materiais rochosos utilizado como insumo predominante em projetos ferroviários;
- Para a redução do estoque de escória de ferro silício-manganês minimizando o impacto ao meio ambiente nos locais de estocagem devido à reciclagem do material em novos processos.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é analisar o comportamento e o desempenho da escória de ferro silício-manganês como lastro ferroviário, com o intuito de verificar se o desempenho operacional está em conformidade com os padrões especificados pelas normas vigentes.

O processo de caracterização e avaliação da escória foi balizado por meio dos ensaios prescritos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), American Railway Engineering and Maintenance of Way Association (AREMA) e American Society of Testing and Materials (ASTM).

Para melhor entendimento dos objetivos, a fim de verificar a possibilidade de aplicação corrente da escória de ferro silício-manganês como material de lastro, se encontram:

- A revisão bibliográfica sobre a origem, a produção, as principais características e as aplicações da escória de ferro silício-manganês, bem como sua utilização atual;
- Determinação da caracterização física (ensaios de granulometria, determinação da abrasão Los Angeles, resistência ao choque, massa específica aparente, absorção de água e porosidade aparente, forma do material, teor de fragmentos macios e friáveis, resistência à intempérie, teor de argila em torrões, análise microscópica dos poros, modelagem matemática de regressão polinomial e exponencial);
- Determinação da caracterização mecânica (ensaios de carga pontual e compressão uniaxial);
- Determinação da caracterização química e mineralógica (ensaios de difração de raios X, análises químicas quantitativas, microscopia eletrônica de varredura - MEV, ensaio de teor de cal livre e adsorção de nitrogênio - Técnica BET);
- Determinação da caracterização ambiental (ensaios de lixiviação, solubilização e análise da condição necessária para solubilização da escória em campo);

- Determinação da caracterização elétrica (ensaios de resistividade elétrica do agregado e do pó da escória e condutividade elétrica do lastro);
- Ensaios de campo (ensaios de resistividade elétrica do lastro);
- Análise e síntese geral dos estudos realizados no referido trabalho de pesquisa.

1.3. ESTRUTURA DA PESQUISA

Esta dissertação de mestrado estrutura-se em cinco capítulos, descritos da seguinte forma:

O primeiro capítulo apresenta uma introdução, destacando a importância e as vantagens econômicas ambientais da aplicação do coproduto na pavimentação ferroviária. Também são apresentados os objetivos da pesquisa, a justificativa do tema proposto e a estrutura da pesquisa.

O segundo capítulo expõe uma revisão bibliográfica a respeito da história da ferrovia, do pavimento ferroviário, do lastro, das ferroligas em geral, das ferroligas de manganês, da escória de ferro silício-manganês, do processo de produção e das principais características desta escória. São abordados os constituintes das escórias que contribuem para o fenômeno da expansibilidade, além da apresentação de um levantamento das diversas formas de aplicação da escória de ferro silício-manganês.

No terceiro capítulo, é exibido o material utilizado no trabalho de pesquisa e a metodologia adotada. Neste capítulo, são apresentados os métodos de caracterização física, mecânica, química, mineralógica, ambiental, elétrica, bem como os ensaios realizados em campo.

No quarto capítulo da dissertação, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de laboratório (caracterização física, mecânica, química, mineralógica, ambiental, elétrica) e nos ensaios realizados em campo (caracterização elétrica), no simulador de resistividade elétrica em escala real na estação ferroviária Mário Carvalho, a qual fica localizada no município de

Timóteo-MG. É apresentada também uma nova campanha de ensaios que tem como principal objetivo obter fundamentos técnicos e científicos para comprovar e justificar os valores encontrados nos ensaios de caracterizações físicas e ambientais que não atingiram os resultados esperados. A caracterização da escória de ferro silício-manganês e os resultados dos ensaios de campo da mesma são abordados de maneira detalhada neste capítulo.

No quinto capítulo, são expostas as análises e as considerações sobre o trabalho de pesquisa, as conclusões referentes aos ensaios de caracterização física, mecânica, química, mineralógica, ambiental, elétrica realizados em laboratório e a caracterização elétrica realizada em campo, além de sugestões para futuros estudos com relação ao assunto proposto nesta pesquisa. Finalizando, encontram-se as referências bibliográficas e os anexos utilizados no trabalho.

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, será apresentada uma revisão da literatura pertinente ao trabalho da dissertação, compreendendo os seguintes temas: breve histórico da ferrovia, pavimento ferroviário, lastro, ferroligas, ferroligas de manganês, expansão das escórias e aplicações da escória de ferro silício manganês, abordando os principais conceitos e definições relevantes para o desenvolvimento da pesquisa. A presente revisão serviu como base para a realização deste trabalho.

2.2. BREVE HISTÓRICO DA FERROVIA

A estrada de ferro inaugurou uma etapa decisiva da história da humanidade. Ela decretou, definitivamente, o fim do antigo regime econômico (que no domínio dos transportes se caracterizava por uma multiplicidade de serviços parciais e independentes), no que diz respeito ao capital e a responsabilidade das empresas. Por sua capacidade de transporte, a ferrovia aumentou a capacidade de produção e intensificou o dinamismo da vida moderna sob o impulso de trocas mais móveis e mais possantes (Clozier, 1969).

No início do século XVI, diversos países europeus já utilizavam transporte sobre trilhos. No entanto, esses caminhos sobre trilhos eram utilizados exclusivamente para o transporte de carvão e minério de ferro extraídos de minas subterrâneas.

Esse meio de transporte consistia em dois trilhos de madeira que penetravam até o interior das minas e, ao longo deles, homens e cavalos empurravam carroças munidas de rodas. As carroças moviam-se com mais facilidade sobre os trilhos do que sobre o solo enlameado cheio de sulcos e carvão das minas.

No século XVIII, algumas empresas de mineração de carvão da Inglaterra começaram a revestir os trilhos de madeira com lâminas metálicas com o objetivo de aumentar a vida útil dos trilhos. Então, descobriram que o deslocamento ficava mais fácil, o que possibilitou o aumento da produção, pois os cavalos podiam tracionar uma série de vagões e não mais apenas uma carroça sobre os trilhos de madeira revestidos. Deste modo, os ferreiros passaram a desenvolver novos meios para aprimorar ainda mais o transporte do carvão. Então começaram a fabricar trilhos inteiramente de ferro com bordas para conduzir vagões com rodas comuns (Get e Lajeunesse, 1980a). A Figura 2.1 mostra os trilhos e os vagões com rodas comuns.



Figura 2.1 - Trilhos inteiramente de ferro com bordas conduzindo vagões com rodas comuns.

No fim do século XVIII fabricavam trilhos inteiramente de ferro sem bordas, que conduziam vagões com rodas providas de bordas usadas atualmente. A Figura 2.2 apresenta as rodas munidas de bordas utilizadas atualmente.



Figura 2.2 - Rodas de aço munida de borda que rolam sobre trilhos de aço.

Esta evolução proporcionou não só um deslocamento mais fácil e a possibilidade de tracionar mais vagões de uma só vez, mas também possibilitou o transporte coletivo das pessoas nas cidades desenvolvidas (Figura 2.3).

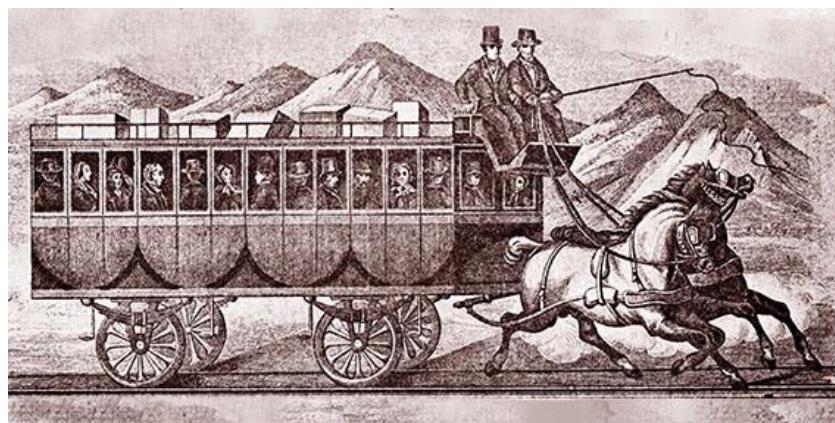


Figura 2.3 - Bonde sobre trilhos de ferro puxado por cavalos.

Com o aumento do volume da produção e a necessidade de transportá-las com rapidez para os mercados consumidores, inúmeros inventos surgiram no século seguinte permitindo um progresso ainda maior que ficou conhecido como a revolução industrial. Dentre todos os inventos, destacam-se a invenção da máquina a vapor pelo engenheiro escocês James Watt em 1769, técnica aperfeiçoada da descoberta de Thomas Newcomen, em 1705. Em 1804 o engenheiro inglês Richard Trevithick construiu uma locomotiva de quatro rodas que podia deslizar sobre trilhos de ferro fundido. No dia 13 de fevereiro de 1804, Trevithick provou

que sua máquina podia transportar tanto pessoas como materiais. Em sua primeira viagem, a máquina de tração conseguiu levar 70 pessoas e nove toneladas de carvão em cinco vagões a uma velocidade de 8 km/h por 15 km de trilhos. Mas devido a alguns problemas, como o elevado peso da máquina, logo a máquina de tração voltou a ser substituída por cavalos. Mais tarde descobriram que as rodas da locomotiva patinavam sobre os trilhos sem conseguir mover o trem. Não existia um estudo para saber qual a proporção entre o peso da locomotiva e a carga que a mesma deveria puxar, com isso, houve várias tentativas de solucionar a questão. Uma delas consistia em lubrificar os trilhos para diminuir o esforço de tração, recurso que teve de ser rejeitado, já que o óleo diminuía a aderência necessária. Estes feitos motivaram os engenheiros a estudar a possibilidade de construir vias férreas e conjuntos de veículos capazes de percorrê-las (Get e Lajeunesse, 1980b).

Em 1814, George Stephenson mecânico de mina, construiu a primeira locomotiva a vapor, chamada Blucher, que era capaz de puxar trinta toneladas de carga a uma velocidade de 6 km/h. O meio utilizado por ele para solucionar o problema da aderência consistiu em unir as rodas por meio de correntes e fazer com que todos os eixos participassem da tração. Com isso, se tornou o primeiro a obter resultados concretos com a construção de locomotivas, dando início à era das ferrovias.

Entre 1823 e 1825, Stephenson construiu uma linha férrea que ligava a pequena cidade de Stockton ao vale mineiro de Darlington, no norte da Inglaterra, a linha tinha 61 km de comprimento, via dupla em dois terços do percurso e foi inaugurada em 27 de setembro de 1825. A partir de então a expansão das ferrovias foi contínua, principalmente em razão do apoio financeiro que começou a receber em todos os países que assistiam, naquele momento, ao começo da revolução industrial. Stephenson também construiu, em 1829, a estrada de ferro Liverpool-Manchester, inaugurada em 15 de setembro de 1830, onde utilizou a locomotiva chamada The Rocket - foi a primeira ferrovia a conduzir trens de passageiros em horários regulares. A velocidade atingida na via era de 32 km/h e foi considerada um grande avanço em relação aos 24 km/h da via Stockton-Darlington. A Figura 2.4 mostra a locomotiva utilizada na estrada de ferro Liverpool-Manchester.

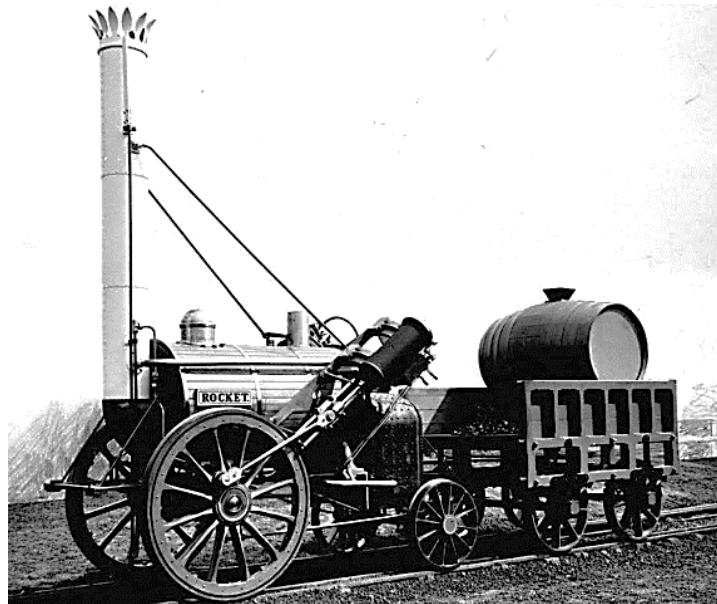


Figura 2.4 - Locomotiva The Rocket.

Stephenson foi também quem, pela primeira vez, sentiu a necessidade de padronizar as bitolas das ferrovias do país. A bitola de 1,435 m, adotada para as ferrovias por ele construídas, tinha a largura dos eixos das carroças puxadas por cavalos, que correspondia a 4 pés e 8,5 polegadas no sistema inglês de medida. Esta bitola foi adotada pela maioria das ferrovias europeias, norte-americanas e canadenses.

Em associação com seu filho, Robert Stephenson, fundou a primeira fábrica de locomotivas do mundo. George Stephenson foi considerado, então, o inventor da locomotiva a vapor e construtor da primeira estrada de ferro. Na segunda metade do século XIX, a invenção de Stephenson já se desenvolvia na Europa e na América do Norte, pelo menos 3.000 quilômetros de via férrea estendiam-se no Velho Continente e 5.000 nos Estados Unidos (DNIT, 2013a).

2.2.1. A ferrovia no Brasil

No Brasil, o transporte terrestre de mercadorias era feito no lombo dos burros em estradas carroçáveis. Naquela época, os portos fluminenses de Parati e Angra dos Reis exportavam

cerca de 100 mil sacas de café provenientes do Vale do Paraíba. Em São Paulo, chegavam ao porto de Santos cerca de 200 mil animais carregados com café e outros produtos agrícolas. Com a notícia da invenção da locomotiva e a construção de estradas de ferro, o Governo Imperial brasileiro autorizou, por carta de lei, a construção e exploração de ferrovias no Brasil com o propósito de interligação das diversas regiões do País. As dificuldades e os desafios para implantar estradas de ferro no Brasil eram muitos, levando o Governo Imperial a ceder concessões com privilégios pelo prazo de 40 anos às empresas estrangeiras que se comprometessem a construir estradas de ferro interligando Rio de Janeiro, São Paulo, Minas Gerais, Rio Grande do Sul e Bahia. Mas o incentivo não despertou o interesse das empresas, pois o lucro referente a tal empreendimento não era suficiente para atrair investidores.

Em 1852, Irineu Evangelista de Souza, mais tarde Barão de Mauá, recebeu a concessão do Governo Imperial para a construção e exploração de uma linha férrea no Rio de Janeiro entre o Porto de Estrela, situado ao fundo da Baía da Guanabara, e a localidade de Raiz da Serra, em direção à cidade de Petrópolis. A ele se devem os primeiros trilhos lançados em terras brasileiras e a primeira locomotiva batizada Baronesa. A primeira seção, de 14,5 km e bitola de 1,68 m, foi inaugurada por D. Pedro II no dia 30 de abril de 1854, e a estação de onde partiu a composição inaugural receberia mais tarde o nome de Barão de Mauá. A Estrada de Ferro Mauá, permitiu a integração das modalidades de transporte aquaviário e ferroviário, introduzindo a primeira operação intermodal do Brasil. Nessa condição, as embarcações faziam o trajeto inicial da Praça XV indo até ao fundo da Baía de Guanabara, no Porto de Estrela, e daí, o trem se encarregava do transporte terrestre até a Raiz da Serra (DNIT, 2013b).

Entre o final do século XIX e início do século XX foram efetuados investimentos significativos para a construção de linhas férreas oriundos, entre outros, de investidores britânicos. A expansão ferroviária teve como objetivo buscar capital estrangeiro para o país e o crescimento da economia exportadora. A ferrovia no Brasil tinha a função de interligar os centros de produção agrícola e de mineração aos portos através da ligação direta, ou vencendo obstáculos, à navegação fluvial. Vários planos de viação foram feitos para ordenar a implantação da ferrovia brasileira, mas a política de concessões estabelecida pelo governo

brasileiro inviabilizou a construção de uma rede integrada da malha ferroviária. Em 1890, após a Proclamação da República, foi nomeada uma comissão responsável pela continuação da implantação e manutenção da existente, e também futura, malha ferroviária brasileira. A comissão estabelecia quais linhas seriam concedidas a partir daquele momento, dando a liberdade para cada empresa fazer a proposta de onde queria se instalar. Várias das linhas estratégicas foram implantadas em consequência dessas diretrizes, como as construídas para a defesa das fronteiras e as que completaram as ligações entre o sudeste, o nordeste e o sul (IPHAN, 2013a).

O que deveria ser um incentivo foi responsável pela construção de péssimas estradas, com efeitos desastrosos e sérios entraves para as ferrovias e para o território nacional. A construção das linhas obedeceu, quase que exclusivamente, a “injunções políticas”. As ferrovias, debruçadas todas elas sobre o litoral, estavam longe de proporcionar um grau aceitável de integração social (Fortes, 1956).

Para Monbeig (1971a) o traçado das estradas de ferro brasileiras não reflete nem um plano de conjunto, nem uma adaptação aos interesses coletivos. Ele foi concebido sob a influência de preocupações locais e políticas nas zonas de antigo povoamento, sobre o interesse dos agricultores em ligar os centros de agricultura aos portos.

Segundo Caixeta-Filho e Gameiro (2001a), a construção das ferrovias brasileiras, por não se enquadrar em objetivos nacionais mais amplos, gerou uma heterogeneidade de tecnologias e bitolas (mais de 10 medidas diferentes). Essas diferenças de caráter técnico entre as empresas ferroviárias não eram tão percebidas, pois funcionavam como sistemas isolados.

Até meados do século XX, as ferrovias apresentavam poucos eixos de integração nacional, configurando-se em um arquipélago desconexo de redes densas e desintegradas, formado por um núcleo central (São Paulo, Belo Horizonte e Rio de Janeiro), três grandes penínsulas (regiões Nordeste, Sul e Centro-Oeste) e uma grande ilha perdida (Amazônia), resultado do projeto inicial de implantação com foco apenas na ligação das zonas produtoras e portos de escoamento (Couto e Silva, 2003).

Na primeira metade do século XX, já se verificava uma progressiva emergência de um sistema cujo principal centro dinâmico era o mercado interno (Furtado, 1959).

As ferrovias, implantadas para atender o escoamento de produtos primários em direção aos portos, revelaram-se inadequadas para responder aos estímulos do intenso processo de industrialização iniciado a partir da década de 1930 (Barat, 1978).

Os sistemas ferroviários regionais contribuíram pouco para a unificação dos mercados. Este redirecionamento das políticas econômicas, agora preocupadas com o mercado interno, requeria meios de transporte que ligassem as regiões do Brasil. Surge, então, o rodoviarismo (Vencovsky, 2006a).

Com a chegada do rodoviarismo, o território brasileiro estava organizado em torno de ferrovias locais, voltadas aos portos. Diferentemente do Brasil, na Europa e nos Estados Unidos, quando o automóvel se impôs, já estava terminada a era da construção ferroviária, ou seja, já existia uma rede coesa de estradas de ferro (Lambert, 1972).

Em meados de 1940, as mudanças nas relações de produção e consumo (decadência das lavouras de café, algodão, fumo, etc.), resultante da “Segunda Guerra Mundial”, levaram muitas linhas a perderem sua renda e, por isso, passaram a dar prejuízo. Por consequência, várias empresas passam para o controle do estado, que atuou no sentido de recuperá-las, equipando-as e estendendo suas linhas entre as várias regiões do país, resultado dos diversos planos viários elaborados (IPHAN, 2013b).

A nacionalização das ferrovias no Brasil colocou sobre os ombros da União ou de certos Estados uma carga pesada, com isso o número de passageiros decresceu e o tráfego de mercadorias não assinalava um progresso senão graças ao minério de ferro (Monbeig, 1971b).

De acordo com Caixeta-Filho e Gameiro (2001b), as ferrovias perderam competitividade para as rodovias devido, principalmente, ao fato do transporte ferroviário ser regulado pelo Estado, tendo menor liberdade para definir as tarifas, além dos custos e tempo elevados de construção e estar voltado aos portos, não atendendo à nova ordem de integração nacional.

Segundo Lopes e Sobrinho (1951), em 1951 existiam 40 empresas deficitárias de um total de 44. Esta situação só foi resolvida com a criação da Rede Ferroviária Federal Sociedade Anônima (RFFSA), em 1957, consolidando as 18 ferrovias regionais, e a Ferrovia Paulista Sociedade Anônima (FEPASA), em 1971.

A RFFSA chegou a possuir 34.207 km, porém, crises econômicas típicas de um país em desenvolvimento aliadas ao crescimento do transporte rodoviário, comprometeram a capacidade de investimentos públicos e privados tanto para a abertura e implantação de novos trechos ferroviários quanto para a manutenção da malha ferroviária existente. Com isso, fizeram com que parte da malha fosse erradicada. Em 1992 a RFFSA entrou em liquidação, enquanto o governo preparava o processo de concessão do transporte de cargas à iniciativa privada. Os leilões de concessão ocorreram a partir de 1996, as linhas da RFFSA foram divididas por várias empresas. E em 2007 a Rede foi extinta oficialmente (MT, 2012a).

Os investimentos realizados pelas concessionárias das linhas férreas, principalmente para fortalecer os corredores de exportação, intensificaram ainda mais a inserção internacional do território brasileiro. Além do minério de ferro, que é o principal produto transportado pelas ferrovias atualmente, a soja dos novos “fronts” surge como uma nova alternativa. Apesar da importância dos sistemas de transporte para a integração do território, a sua implantação no Brasil ainda hoje não ocorreu de uma forma regular e uniforme. O resultado é a constituição de um território com uma distribuição muito desigual de densidades rodoviárias, ferroviárias e hidroviárias, com fluidez insuficiente para promover o desenvolvimento econômico e social de várias regiões e a organização adequada do território brasileiro (Vencovsky, 2006b).

George (1970) chegou a classificar a economia industrial dos países de acordo com a densidade das linhas ferroviárias.

Segundo esse autor, países com densidades superiores a 10 km/100 km² possuem complexos industriais maciços, com base em indústrias pesadas; países com densidades entre 5 e 10 km/100 km² possuem conjuntos regionais que associam zonas ou focos industriais a regiões agrícolas em economias industriais de mercado nacional e importante comércio

internacional; com densidade menor que 5 km/100 km² são países subdesenvolvidos, onde o trem é geralmente importado, no quadro de sistemas de exploração colonial ou semicolonial.

Por traz dessas densidades técnicas está a lógica de implantação e utilização das linhas, que ora realiza integrações intra e inter-regionais e ora realiza integrações internacionais ligando a produção aos portos exportadores.

Com o recente aumento da economia e o crescimento das indústrias e da agricultura, tornou-se necessário ter uma infraestrutura e superestrutura de transporte melhor para o escoamento da produtividade, o que gerou uma sobrecarga no sistema ferroviário.

A malha ferroviária brasileira, em sua maior parte, necessita de técnicas de manutenção mais avançadas, pois apresenta graves problemas de conservação e adequação, e ainda existem várias regiões distantes e muito carentes de ligação ferroviária (Fernandes, 2005c).

A malha ferroviária brasileira voltada para o serviço público de transporte de carga tem 28,5 mil quilômetros de extensão (1.121 eletrificados), espalhados por 22 dos 26 Estados brasileiros e Distrito Federal, divididos em quatro tipos de bitolas e faz ligações ferroviárias com Argentina, Bolívia e Uruguai. Hoje, a malha ferroviária participa com cerca de 20 % na distribuição da matriz de transporte do Brasil (MT, 2012b).

O governo juntamente à iniciativa privada vem reformando e construindo novas ferrovias. Em 2008, o governo federal anunciou a construção do Trem de Alta Velocidade Rio-São Paulo, incluindo o projeto na cartilha do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC). Atualmente o transporte de cargas pela iniciativa privada entra em uma boa fase, recuperando-se parcialmente das perdas durante o fim da era estatal.

Os projetos de ferrovias, assim como os métodos aplicados no dimensionamento de pavimentos ferroviários, utilizam técnicas de engenharia que seguem as prescrições de antigas normas criadas em países da Europa ou nos Estados Unidos. Essas normas empregam materiais granulares e pétreos beneficiados que possuem alto custo econômico e ambiental incorporado (Fernandes, 2005d).

Novas pesquisas são desenvolvidas todos os anos com o propósito de diminuir o custo de implantação e manutenção ferroviária, com isso, novas técnicas de manutenção bem como novos agregados são estudados.

2.3. PAVIMENTO FERROVIÁRIO

Segundo Medina (1997) os pavimentos são sistemas em camadas que recebem todas as tensões geradas pelas cargas dos veículos. Cada tipo de pavimento sofre uma tensão gerada pelo veículo que nele atua. Nos pavimentos rodoviários os veículos responsáveis por essas tensões são os carros e caminhões; nas pistas de pouso, decolagem e manobras dos aeroportos são os aviões; em pavimentos de portos e terminais de carga os guindastes móveis; e nos pavimentos ferroviários as locomotivas e vagões. Medina sugeriu instituir a terminologia “Pavimento Ferroviário” nomeando o sistema estrutural em camadas a ser tratado sob a ótica da “Mecânica dos Pavimentos” composto por trilhos, fixações e demais acessórios metálicos e de apoio, dormentes, lastro, sublastro e subleito.

Seja para pavimentos de rodovias, de aeroportos, de portos ou ferrovias, o sistema dos pavimentos é constituído por camadas de material colocadas sobre leito provido de um revestimento adequado ao rolamento de cada veículo em particular que nele atua (Spada, 2003a).

Segundo Muniz da Silva (2002a), o sistema “Pavimento Ferroviário” tem como objetivo suportar adequadamente as cargas oriundas das passagens das composições ferroviárias, ou seja, as solicitações devem ser não só resistidas no sentido de não haver ruptura global ou localizada, mas também de manter os deslocamentos em um nível conveniente. Nos pavimentos ferroviários os principais problemas geotécnicos são de deslocamento, deformação e de ruptura. A deformação plástica ou permanente é tradicionalmente considerada na manutenção das vias permanentes, uma vez que é a responsável pela perda de geometria da via descarregada, sintoma mais aparente de inadequação operacional. A deflexão elástica é uma condição determinante, tanto da qualidade operacional ou funcional, quanto da vida útil dos

componentes da via permanente, sendo, ainda, parte integrante do problema de perda de geometria.

A deformabilidade da via permanente geralmente é abordada com o objetivo de estabelecer critérios para dimensionamento ou verificação dos elementos que fazem parte da mesma, sempre considerando que as condições de apoio são imutáveis. Sabe-se, no entanto, que os principais parâmetros condicionantes do estado tensão-deformação dos materiais pétreos, granulares e componentes do pavimento ferroviário são mutáveis com o tempo, em períodos que podem ser bastante reduzidos, decorrente da repetição do tráfego e dos eventos de manutenção.

Por esses motivos, as análises da mecânica da via permanente não são mais apenas para um fenômeno estático imutável, e sim função do tempo, no sentido de se tratar o problema da deformabilidade como um dado essencial para o acompanhamento e manutenção da via permanente ao longo de toda sua vida útil.

Hay (1982) afirmou que a deflexão elástica (deflexão vertical) é um dos melhores indicadores da resistência a compressão da vida útil e da qualidade da via permanente, ou seja, quanto maiores as deflexões, maior a tendência a recalques diferenciais e desgaste dos componentes da via permanente e maior a quebra, a abrasão do lastro e o bombeamento (é ocasionado por uma carga de impacto que aumenta com a velocidade da composição ferroviária. Esta carga é transferida ao lastro causando recalques, induzindo a ascensão de materiais contaminantes oriundos das camadas subjacentes -subleito e sublastro-, principalmente em presença de água).

Várias pesquisas voltadas para os estudos das vias permanentes estão sendo desenvolvidas ao longo dos anos por diferentes pesquisadores, de forma a corroborar para a melhoria da segurança e da eficiência do transporte ferroviário. Tendo a Mecânica dos Pavimentos como base para o desenvolvimento e o tratamento mais realístico da via permanente, estabelecendo, assim, métodos racionais para sua construção e manutenção, o que vinha sendo o maior impedimento para o aumento de velocidade e de capacidade de carga das composições ferroviárias.

2.3.1. Constituição e função da via permanente

A via permanente ou estrada de ferro é dividida em infraestrutura e superestrutura. A infraestrutura refere-se à parte inferior da via, compreendendo o lastro, o sublastro, o subleito e o leito, enquanto a superestrutura refere-se à parte do topo da via que contém os trilhos, o sistema de fixação e os dormentes (Selig e Waters, 1994a).

No Brasil, a infraestrutura refere-se à parte que contém o sublastro, o subleito e o leito, enquanto a superestrutura refere-se à parte que contém os trilhos, o sistema de ligação e fixação, os dormentes e o lastro (Muniz da Silva, 2002b). A seguir, as Figuras 2.5 e 2.6 apresentam os perfis da via permanente.

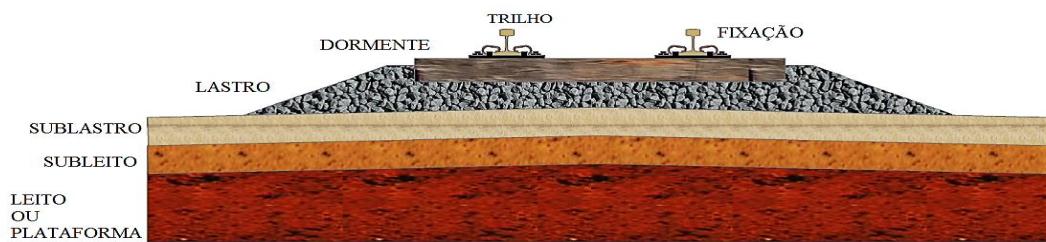


Figura 2.5 - Perfil típico da via permanente - vista frontal.

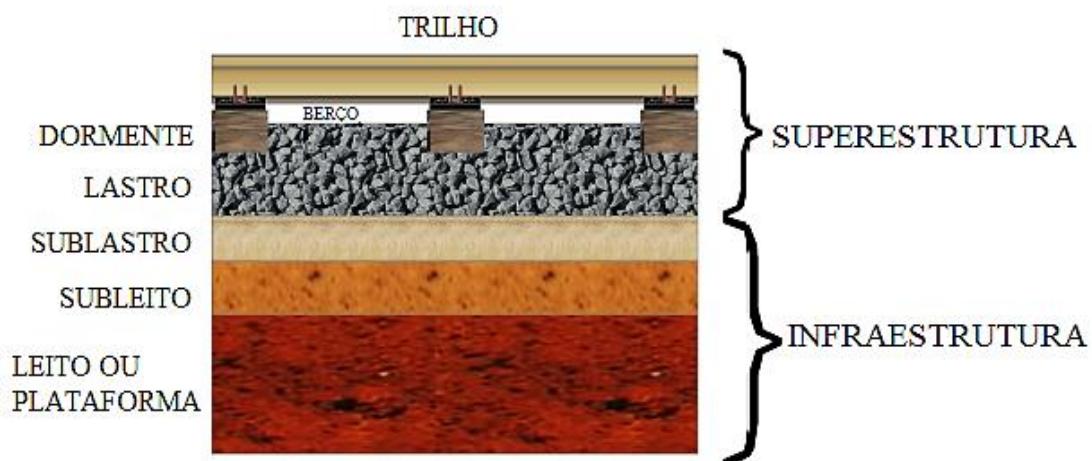


Figura 2.6 - Perfil típico da via permanente - vista transversal.

A construção da infraestrutura é iniciada pelo desmatamento, limpeza e nivelamento do terreno caracterizando o leito ou plataforma (às vezes o leito torna-se o próprio subleito). Em seguida é iniciado a composição das camadas do pavimento ferroviário.

➤ Subleito

O subleito é a principal camada de fundação do sistema da estrutura da via férrea. A função principal do subleito é prover uma fundação estável para a estrutura da via, evitando o colapso da estrutura por perda de capacidade de carga ou por recalques excessivos (Spada, 2003b).

A capacidade de suporte deve obedecer certos requisitos de desempenho se for camada de aterro (compactação a 95 % Proctor Normal e $CBR \geq 6\%$) possui em média espessuras entre 20 e 40 cm e, no caso de corte, deve ser regularizada com grade disco e revolvido, umedecido e compactado. Caso essas características não sejam observadas, pode se proceder com a substituição do solo, por outro.

Existem 4 categorias de rochas e solos para subleito: QS 0 (solos impróprios por serem orgânicos), QS 1 (solos ruins que podem ser utilizados após tratados), QS 2 (solos médios que correspondem a solos granulares), QS 3 (solos bons, granulares com poucos finos) - de modo análogo. Existem três grupos de solos para plataformas: P 1 (plataforma ruim), P 2 (plataforma média) e P 3 (plataforma boa).

➤ Sublastro

O sublastro é a camada final da infraestrutura, e geralmente possui espessuras entre 20 e 40 cm, constituído por solos granulares, misturas de areia-pedregulho que atendem às exigências de filtro tanto para o lastro como para o subleito. As características são $IG = 0$, $LL \leq 35\%$, $IP \leq 6\%$, $CBR \geq 30\%$ e $\text{expansão} \leq 1\%$. Segundo Brina (1983a), o sublastro é a camada que separa o lastro e o subleito. Suas funções são:

- Prevenir a penetração de partículas entre as camadas de lastro e subleito;

- Reduzir as tensões transmitidas ao subleito, oferecendo uma opção alternativa mais econômica do que a de se aumentar diretamente a espessura da camada de lastro;
- Permitir uma relativa elasticidade ao apoio do lastro para que a via permanente não seja rígida, o que pode provocar um efeito denominado chicote (quando as tensões transmitidas pelos equipamentos rodantes são rebatidas pelo sublastro para o lastro provocando um aumento da quebra no mesmo);
- Aumentar e resistência do subleito a erosão e a penetração da água, concorrente para uma boa drenagem da via.

➤ Lastro

A primeira camada da superestrutura é o lastro constituído por material granular britado colocado como camada de topo da infraestrutura, nos berços entre os dormentes e nas ombreiras, após as extremidades dos dormentes. Em princípio, os lastros devem ser constituídos por materiais pesados e duráveis, dotados de grãos angulares, não contaminados e livres de pó. Em função da disponibilidade e de considerações econômicas, uma gama extensiva de materiais tem sido empregada como lastro, tais como gnaisse, granitos, basaltos, rochas calcárias, escórias e outras litologias. Para Brina (1983b) as principais funções do lastro são:

- Distribuir-se convenientemente sobre o sublastro, formando uma superfície contínua e uniforme para os dormentes e trilho;
- Provê resiliência e absorção de tensões geradas pelos veículos, ou seja, reduz as tensões nos materiais subjacentes para níveis aceitáveis;
- Formar um suporte, até certo limite elástico, atenuando as trepidações resultantes da passagem de veículos;
- Facilitar a drenagem da superestrutura;

- Manter a posição da via resistindo às forças verticais, laterais e longitudinais aplicadas aos dormentes.

A espessura do lastro sobre os dormentes é importante, pois deve ser suficiente para dissipar e distribuir as cargas de modo a não ultrapassar a capacidade de suporte do sublastro ou do subleito. A largura das ombreiras do lastro é igualmente importante, pois é dela que se garante a estabilidade lateral da via. Geralmente o lastro precisa ser dimensionado com uma espessura a partir da geratriz do dormente em função da carga de roda. São requeridas para o lastro faixas granulométricas que proporcionem o armazenamento de materiais contaminantes e que facilitem a drenagem da água da via. O lastro também necessita de mobilidade para rearranjar-se durante a manutenção niveladora e as operações de alinhamento.

Experiências de campo evidenciam que ocorre uma quebra progressiva dos materiais de lastro devido, principalmente, às cargas oriundas do tráfego e aos efeitos da socaria utilizada na manutenção da via, bem como à inserção de materiais externos, como excesso de carga do vagão e infiltração de materiais subjacentes ao lastro e que resultam em processos de deterioração da via. A ação dos materiais contaminantes no lastro é altamente dependente do tipo de material, da quantidade de material contaminante e do teor de água presente.

➤ Dormentes

Os dormentes são elementos estruturais que se localizam na direção transversal ao eixo da via permanente, onde estão os trilhos ferroviários, proporcionando uma base para a fixação dos trilhos e manutenção da bitola da via, garantindo, assim, um apoio elástico que atua entre trilho e lastro e uma estabilidade da via permanente. Dentre suas principais funções estão (DNIT, 2013):

- Manter a geometria da via permanente;
- Receber os esforços transmitidos pelos trilhos e repassá-los tão uniformemente quanto possível às camadas inferiores;

- Dar suporte para os trilhos, fixando e assegurando a sua posição e gabarito da via, além de manter a estabilidade da via frente às variações de temperatura, esforços estáticos e dinâmicos.

Quanto ao material, os dormentes podem ser de madeira, concreto armado ou protendido, aço e plástico. Suas dimensões estão ligadas a bitola da via férrea.

➤ Sistema de ligação e fixação

O sistema de ligação e fixação tem como função estabelecer uma união dos trilhos com os dormentes. Oferecem resistência aos movimentos vertical, lateral, longitudinal e de torção dos trilhos provocado por vibração, variação de temperatura e frenagem dos veículos.

As cargas horizontais e verticais devem ser transferidas para os dormentes sem prejudicar o sistema de fixação. Os acessórios de ligação são as talas de junção, parafusos, arruelas e placas de apoio. As fixações devem permitir a substituição dos trilhos sem afrouxar suas conexões no dormente. A fixação pode ser rígida ou elástica:

- As fixações rígidas são os pregos e os parafusos (Tirefond). Elas se soltam com o tempo devido à vibração provocada pela passagem das composições ferroviárias, perdendo sua capacidade de resistir a esforços longitudinais;
- As fixações elásticas são dispositivos de aço doce que oferecem desempenho muito superior ao das rígidas. Elas mantêm pressão constante sobre o trilho, não se afrouxando com o tráfego. Existem vários tipos como GEO ou K, grampo elástico simples, grampo elástico duplo, fixação pandrol, fixação deenik, fixação RN, fixação tipo fist, todas se adaptam a qualquer tipo de dormente.

➤ Trilhos

Os trilhos são os perfis metálicos longitudinais de seção especial, dispostos de forma paralela entre si sobre dormentes, que entram em contato com as rodas do trem.

Segundo Macêdo (2009) as principais funções dos trilhos são:

- Constituir a superfície de rolamento pelo qual trafegam os veículos ferroviários, servindo como guia;
- Funcionar como vigas elásticas com rigidez suficiente para distribuir esforços decorrentes do movimento do veículo (carga dos eixos, esforços de aceleração e frenagem e esforços devido à variação de temperatura) para os dormentes e limitar as deflexões entre os apoios.

2.4. LASTRO

2.4.1. Esforços

Segundo Selig e Waters (1994b) o lastro está submetido a dois tipos principais de esforços:

- Às forças verticais induzidas pelo trem em movimento;
- Às forças de esmagamento da socaria proveniente das operações de manutenção.

A força vertical é uma combinação de uma carga estática e uma componente dinâmica, sobrepostas no carregamento estático. A carga estática é o peso estacionário do trem na superestrutura, enquanto que a componente dinâmica, também conhecida como o incremento dinâmico, depende da velocidade do trem e das condições da via permanente (Lim, 2004a).

As elevadas forças da socaria durante as obras de manutenção podem causar danos substanciais ao lastro. Além dessas duas forças principais, o lastro também sofre o efeito de forças laterais e longitudinais que são muito mais difíceis de prever do que as forças verticais.

A carga estática pode ser quantificada pelo peso do veículo dividido pelo número de rodas. Essa carga proveniente de um trem varia frequentemente de cerca de 53 kN para trens de passageiros até 174 kN para trens de carga em ferrovias norte americanas. O incremento

dinâmico depende das dimensões do trem, bem como das condições da via permanente, como defeitos nos trilhos e irregularidades na via. A força vertical para baixo dos pontos de contato roda-trilho tende a levantar o trilho e os dormentes nas proximidades dos pontos de contato, sendo dependente das cargas de roda e do peso próprio da superestrutura. À medida que a composição ferroviária avança, os dormentes se erguem e retornam à posição inicial repetidas vezes, esse efeito causa uma carga de impacto que aumenta com a velocidade da composição (Figura 2.7). Esse processo ocasiona um efeito de “bombeamento” no lastro, uma vez que os recalques induzidos pelas elevadas forças transferidas ao lastro induzem a ascensão de materiais contaminantes oriundos das camadas subjacentes, principalmente em presença de água (Selig e Waters, 1994c).

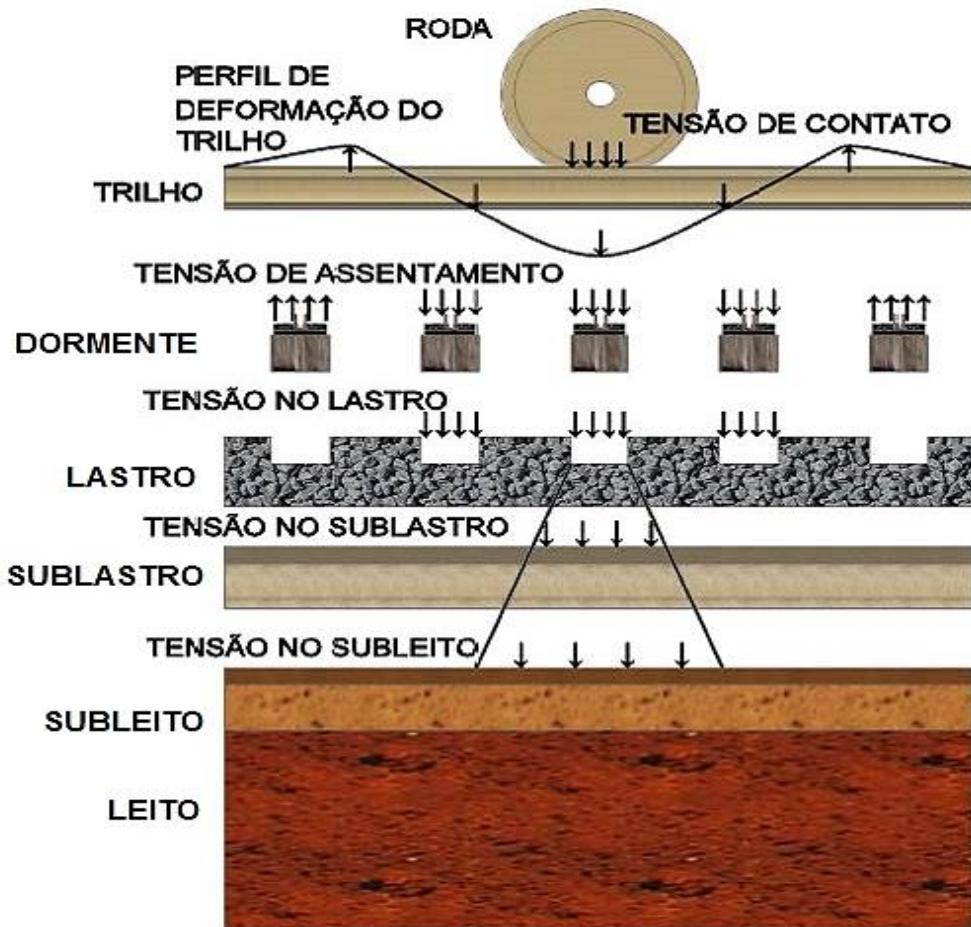


Figura 2.7 - Transferência de tensões nos contatos roda-trilho (Selig e Waters, 1994).

Nota-se também um aumento da carga de impacto com o aparecimento de irregularidades na via permanente ou devido a recalques diferenciais. O aumento da carga de impacto conduziria, então, a um aumento de recalques no lastro provocando uma abertura maior debaixo do dormente. Assim, a geometria da via tende a se degradar de uma maneira acelerada (Lim, 2004b).

A manutenção por meio de socaria é o modo mais eficiente de se restabelecer a geometria da via permanente, especialmente onde se requer grandes correções. A socaria pode ser realizada utilizando equipamentos de pequeno porte manuais ou mecânicos (picareta de socaria, garfo para brita ou forcado, macaco para via férrea e/ou elevador de trilho sem perfil, conjunto de socador Jackson) e de grande porte (socadora e niveladora). A Figura 2.8 mostra a ação da socaria manual.

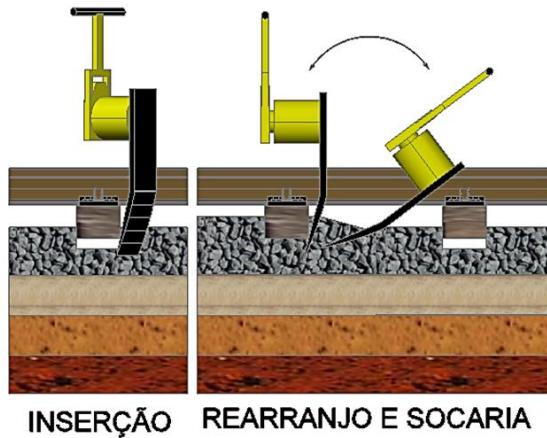


Figura 2.8 - Socaria manual com equipamento de pequeno porte.

Na socaria manual com equipamentos de pequeno porte, a ferramenta de socaria é posicionada junto e paralelamente ao dormente na direção vertical e sempre com a ponteira dirigida para o trilho. Se necessário, retira-se o lastro circundante ao dormente para facilitar a penetração do equipamento garantindo uma melhor socaria da linha. Para realizar a socaria, o executante insere a lâmina no lastro inclinando-a para frente, para trás e para os lados, de modo a abrir passagem para o escoamento do lastro para baixo do dormente. Em seguida, a lâmina será recuada e novamente inserida, sem sair do lastro, até que suficiente quantidade de brita/escória seja

compactada sob o dormente. Não é necessário forçar o equipamento para baixo. O executante deve deixar que o próprio peso do conjunto, associado à vibração, execute o serviço, empurrando e compactando as pedras para baixo do dormente (CBTU, 2005).

O processo de socaria mecânico com equipamento de grande porte envolve o levantamento dos dormentes até o nível desejado, inserindo-se, então, as hastes da socadora no lastro com o dormente erguido entre cada par de hastes. As pontas das hastes da socadora empurram o lastro para efeitos de preenchimento das zonas da superestrutura ferroviária situadas imediatamente abaixo dos dormentes erguidos. A Figura 2.9 mostra o processo da socaria no lastro.

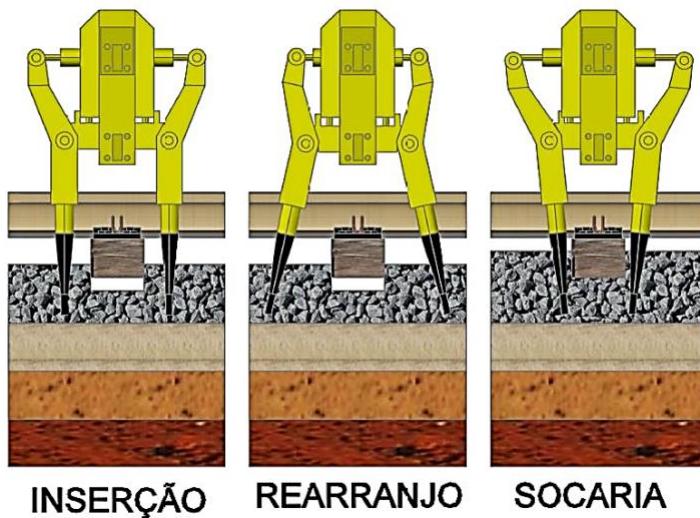


Figura 2.9 - Socaria mecânica com equipamento de grande porte.

O impacto da inserção das hastes da socadora no lastro e as elevadas forças de esmagamento induzem grandes quebras de partículas, o que, na opinião de muitos pesquisadores, constitui a principal causa de contaminação do lastro em função dos efeitos erráticos do processo de preenchimento das zonas sob os dormentes (Wright, 1983).

Assim como a socaria mecânica, a socaria manual também causa o esmagamento que induz a quebras das partículas do lastro, porém em uma escala menor, e que em determinados períodos de tempo contribui para a contaminação do lastro.

A força lateral é a força que age paralelamente ao eixo longitudinal dos dormentes. As fontes principais deste tipo de força são as cargas de roda lateral e a força da reação de fixação dos trilhos. A força de roda lateral surge da reação do trem às divergências de geometria dos movimentos do próprio sistema de locomoção principalmente a velocidades mais elevadas e pelas forças centrífugas em trechos curvilíneos da via. A reação de fixação dos trilhos resulta dos efeitos de compressão longitudinal acentuada do trilho provocada pelo aumento de sua temperatura. A força longitudinal é a força que age paralela aos trilhos. As fontes dessa força são a força de tração da locomotiva, incluindo a força de aceleração do trem, frenagem das locomotivas, expansão térmica e contração dos trilhos e a ação da deformação do próprio trilho (Selig e Waters, 1994d).

2.4.2. Contaminação

Selig e Waters (1994e) sistematizaram as contaminações potenciais dos materiais de construção para uma ferrovia norte americana, sendo a principal causa o resultado da quebra das partículas de material que ocorrem no lastro. Outros materiais contaminantes ocorrem por efeitos de infiltração do sublastro, subleito, materiais da superfície e nos dormentes utilizados (Figura 2.10).

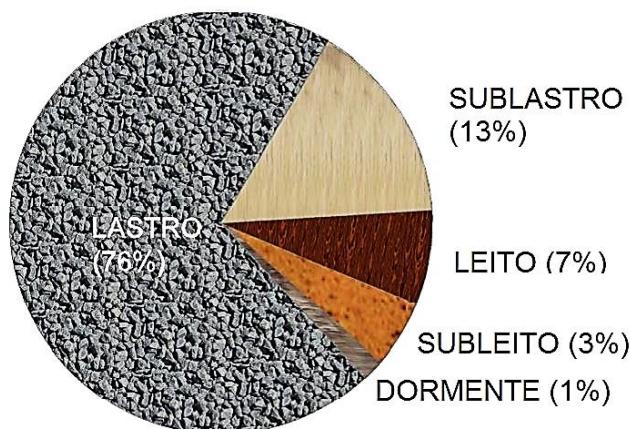


Figura 2.10 - Fontes de contaminação do lastro (Selig e Waters, 1994).

Os materiais contaminantes podem causar efeitos adversos ao lastro contaminado. O efeito depende do tipo de material contaminante, do grau de contaminação e da quantidade de água presente. Han e Selig (1997a) realizaram ensaios em uma caixa teste para investigar o efeito de diferentes materiais contaminantes nos recalques sofridos pelo lastro (Figura 2.11).

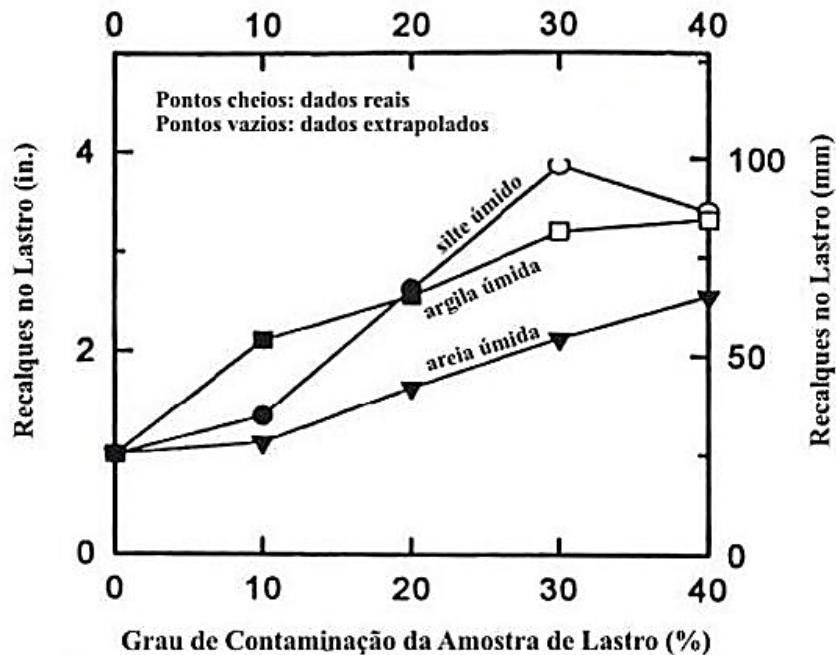


Figura 2.11 - Efeito do grau de contaminação em recalques no lastro (Han e Selig, 1997).

Han e Selig (1997b) constataram que os recalques no lastro tendem a aumentar com o aumento do grau de contaminação para todos os materiais. Observou-se que se o material contaminante fosse silte úmido o lastro recalcaria menos que se fosse uma argila úmida, contanto que o grau de contaminação fosse inferior a 20 %. Contudo, um comportamento inverso foi observado se o grau de contaminação fosse superior a 20 %. Eles propuseram que esse comportamento observado deu-se devido à coesão que se desenvolve com o aumento do grau de contaminação.

A Figura 2.12 mostra alguns resultados adicionais do trabalho em termos dos efeitos do teor de água sobre os recalques sofridos pelo lastro para diferentes graus de contaminação e

materiais contaminantes. As partículas de argila seca mostraram-se menos susceptíveis aos recalques para todos os graus de contaminação por causa da sua elevada resistência e rigidez. Quando se acrescentou água à argila, os recalques tenderam a aumentar substancialmente com o aumento dos graus de contaminação.

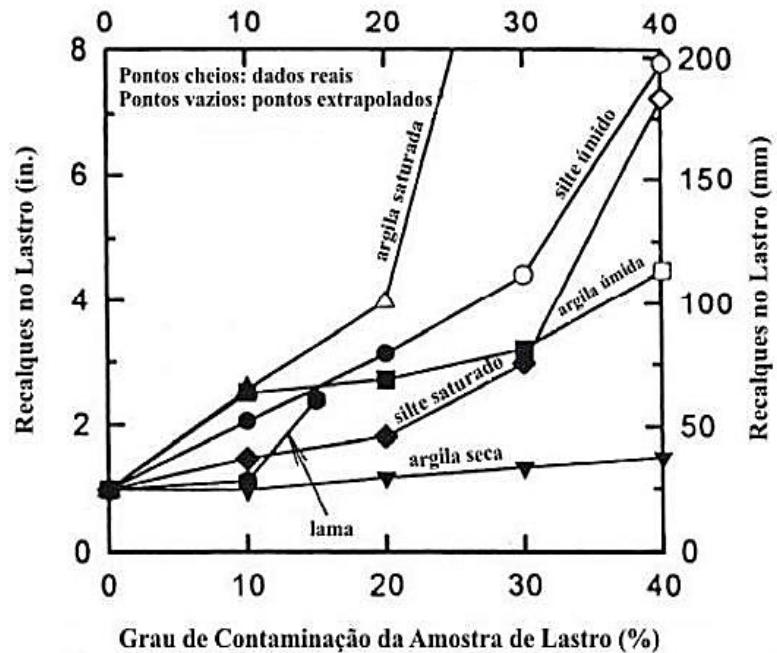


Figura 2.12 - Efeito do grau de contaminação em recalques no lastro para graus diferentes de contaminação dos materiais (Han e Selig, 1997).

Os autores averiguaram, ainda, que os recalques do lastro apresentavam uma pequena diferença para materiais contaminantes e teores de água diferentes, no caso de graus de contaminação inferiores a 20 %. Eles interpretaram esses resultados considerando que, para graus de contaminação inferiores a 20 %, as partículas de lastro ainda conformavam o esqueleto estrutural e, assim, respondiam efetivamente pelas características de resistência do lastro, independentemente da natureza do material contaminante (Han e Selig, 1997c).

Como uma das funções principais do lastro é prover grandes vazios para drenagem, os efeitos da inclusão de materiais contaminantes resultam no preenchimento desses espaços, com uma consequente perda da permeabilidade do lastro. Outros problemas seriam a geração de poro

pressões e os efeitos de lubrificação entre as partículas do lastro pela ação dos materiais contaminantes (Lim, 2004c).

Selig *et al.* (1993a) quantificaram esses efeitos sobre a permeabilidade de lastros. A Tabela 2.1 apresenta os valores medidos da condutividade hidráulica em amostras de lastro limpo até muito contaminado. Na tabela, os graus de contaminação foram expressos em termos do chamado Índice de Contaminação (FI), dado por:

$$FI = P4 + P200 \quad (2.1).$$

Sendo P4 e P200 as porcentagens em massa dos materiais passantes nas peneiras de 4,75 mm e 0,075 mm, respectivamente.

Tabela 2.1 - Condutividade hidráulica para o lastro (Selig *et al.*, 1993).

Grau de contaminação	Índice de contaminação	Condutividade Hidráulica k_h	
		(in./sec)	(mm/s)
Limpo	< 1	1 – 2	25 – 50
Moderadamente Limpo	1 – 9	0,1 – 1	2,5 – 25
Moderadamente Contaminado	10 – 19	0,06 – 0,1	1,5 – 2,5
Contaminado	20 – 39	0,0002 – 0,06	0,005 – 1,5
Altamente Contaminado	> 39	< 0,0002	< 0,005

Os valores da tabela 2.1, evidenciam que a condutividade hidráulica do lastro é reduzida consideravelmente com o aumento do grau de contaminação. Por exemplo, a condutividade hidráulica de um lastro limpo reduz-se de um fator de 10^4 quando ele se torna muito contaminado.

Selig *et al.* (1993b) notaram também que, com o aumento do grau de contaminação, as condutividades hidráulicas das amostras tenderam a ser altamente dependentes do processo de preenchimento sequencial dos poros do lastro. Nesses termos, a permeabilidade do lastro

é afetada, em grande escala, tanto pela natureza do material contaminante, quanto pela forma de distribuição do mesmo ao longo do lastro e também pelo grau de consolidação “in situ” do contaminante em torno dos fragmentos do lastro.

Os materiais para lastro no Brasil são selecionados de acordo com a especificação da ABNT - NBR 5564 (2011) – Via férrea – Lastro ferroviário – Requisitos e métodos de ensaios, contendo basicamente prescrições em termos de granulometria, propriedades de resistência e forma do material de lastro, associadas ao caráter de observância obrigatória ou não da especificação. A seguir, as Tabelas 2.2 e 2.3 mostram as propriedades do lastro padrão e a granulometria do mesmo.

Tabela 2.2 - Propriedades físicas do lastro padrão (NBR 5564, 2011).

Tolerâncias	Especificações	Obrigatoriedade
Absorção de água (máxima)	0,8 %	Obrigatório
Forma da partícula	Cúbica	Obrigatório
Massa específica aparente (mínima)	2,5 g/cm ³	Obrigatório
Material pulverulento (máximo)	1 %	Obrigatório
Partículas não cúbicas (máximo)	15 %	Obrigatório
Porosidade aparente (máxima)	1,5 %	Obrigatório
Resistência ao desgaste – abrasão Los Angeles (máxima)	30 %	Obrigatório
Resistência ao choque – índice de tenacidade TRETON (máximo)	25 %	Obrigatório
Resistência à intempérie (máxima)	10 %	Facultativo
Resistência à compressão uniaxial (mínima)	100 MPa	Obrigatório
Torrões de argila (máximo)	0,5 %	Obrigatório
Teor de fragmentos macios e friáveis (máximo)	5 %	Facultativo

Tabela 2.3 - Distribuição granulométrica do lastro padrão (NBR 5564, 2011).

Malha da peneira (ABNT NBR NM ISSO 3310-1)		Porcentagem em massa acumulada (%)	
Número	Abertura (mm)	Padrão A	Padrão B
3"	76,2	-	0 - 0
2 1/2"	63,5	0 - 0	0 - 10
2"	50,8	0 - 10	-
1 1/2"	38,0	30 - 65	40 - 75
1"	25,4	85 - 100	-
3/4"	19,0	-	90 - 100
1/2"	12,0	95 - 100	98 - 100

2.5. FERROLIGAS

A primeira empresa brasileira a produzir ferroligas em escala industrial foi a Companhia Níquel do Brasil, que entrou em operação em 1935, com o incentivo do governo federal. Em 1966, o país contava com seis empresas operando nesse mercado: Companhia Brasileira de Carbureto de Cálcio (CBCC), Paulista de Ferroligas, Mineração Geral do Brasil, Alumínio Minas Gerais, Companhia de Ferroligas da Bahia (FERBASA) e Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) as quais eram responsáveis por uma produção de 51 mil t/ano, aproximadamente. Impulsionada pelo desenvolvimento siderúrgico brasileiro, a indústria de ferroligas vivenciou um grande avanço na década de 70, quando a produção saltou de 127 mil t (1972) para 552 mil t (1980) de acordo com a Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) (2010a).

Após a segunda crise do petróleo, as nações desenvolvidas produtoras de eletrointensivos sofreram grandes pressões ambientais e tiveram que repensar suas matrizes energéticas. Por isso, abdicaram da produção de eletrointensivos para regiões com maiores vantagens comparativas em insumos, especialmente minério e energia, como a África do Sul, a

Austrália e o Brasil. Na ocasião, o governo brasileiro, também em função da crise energética, desenvolvia um grande esforço para substituir o petróleo importado por energéticos nacionais apoiado por programas do Ministério da Indústria e do Comércio, como o “Conserve”, que foi criado em 1981 para possibilitar a realização de diagnósticos energéticos em empreendimentos industriais a fins de identificar o potencial de conservação de energia. Houve incentivos à implantação e ao desenvolvimento de investimentos destinados à produção em massa de eletrointensivos, especialmente alumínio, metais não-ferrosos e ferroligas. Por meio deste programa a potência do setor passou de 626 MVA, no início da década de 80, para 1.200 MVA em 1990, com a capacidade de produção movendo-se do patamar de 500 mil t/ano para cerca de 1.130 mil t/ano no mesmo período. No início da década de 90, após significativa expansão do setor, o Brasil ocupava o quarto lugar em produção e o terceiro em exportação entre os países produtores de ferroligas do mundo ocidental, sendo responsável por aproximadamente 7 % das trocas internacionais do setor. No fim dos anos 80, mesmo estando em uma situação favorável à indústria nacional de ferroligas, passou por um forte desaquecimento reduzindo em aproximadamente 1/4 sua produção e em 1/3 seu nível de exportações. Nos anos 90, a diminuição da demanda siderúrgica mundial e a queda no consumo específico colaboraram para o encolhimento do mercado mundial de ferroligas, fazendo com que essas tivessem uma maior valorização. Além disso, as volumosas exportações da China e dos países do leste Europeu beneficiaram a queda dos preços internacionais e o acirramento do protecionismo por parte dos importadores tradicionais, agravando a situação do mercado ocidental e afetando negativamente o parque brasileiro (Andrade *et al.*, 1999a).

As ferroligas são divididas pelo tipo de substâncias empregadas na produção da liga. As mais produzidas mundialmente são:

- Ligas de manganês, correspondendo a 39 %;
- Ligas de silício (incluindo silício metálico), que correspondem a 27 %;
- Ligas de cromo, com 26 %;

- Ligas de níquel, com 5 %.

O gênero ferroligas situa-se entre duas importantes atividades econômicas: mineração e siderurgia. As ferroligas são insumos essenciais na indústria siderúrgica, pois são indispensáveis na fabricação de todos os tipos de aço, tanto nos processos básicos como na refinada agregação de propriedades e valor aos aços especiais, sendo 85 % da produção destinada ao setor siderúrgico e o restante para os demais setores como o químico, o farmacêutico, etc. (Andrade *et al.*, 1999b).

Existem em média 57 países produtores de ferroligas, os 10 maiores totalizam 78 % da produção mundial. Ocupando a sexta posição entre eles, o Brasil, com 4,8 % da produção mundial de ferroligas de manganês, é o maior produtor da América Latina (Andrade e Cunha, 2011a).

Em 2011 a produção brasileira de ferroligas foi da ordem de 854 mil toneladas, com declínio, em torno de 8 %, em relação ao ano anterior. Observa-se, no período 2007 a 2011, um recuo da produção da ordem de 16 %, atribuído à crise de 2008 que afetou a indústria, registrando nos anos 2008 e 2009 quedas da produção. Em 2010, o setor iniciou um processo de recuperação, quando obteve crescimento de 65 %, voltando, porém, a recuar em 2011 (MME, 2012b). A Figura 2.13 que apresenta a produção de ferroligas de 2007 a 2011.

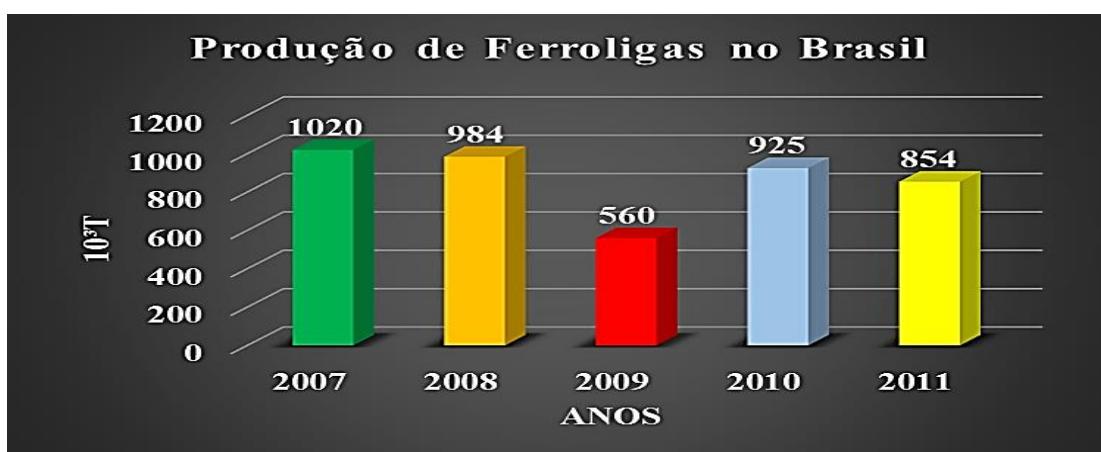


Figura 2.13 - Gráfico da produção de ferroligas no Brasil (MME, 2012).

As siderúrgicas brasileiras são constituídas de trinta unidades produtoras como mostra a Figura 2.14. Nela também constam quatro unidades, em cinza, que ainda estão na fase de projeto/construção. Algumas unidades menores, menos relevantes, não foram plotadas, para evitar um congestionamento maior da mesma. O mapa destaca a grande concentração de unidades em Minas Gerais, a concentração de produção de silício e ligas no norte do estado e a concentração de unidades produtoras de ferro-níquel em Goiás. Observa-se, ainda, um grande número de unidades produtoras de ligas de manganês, também em Minas Gerais (Kruger, 2009a).

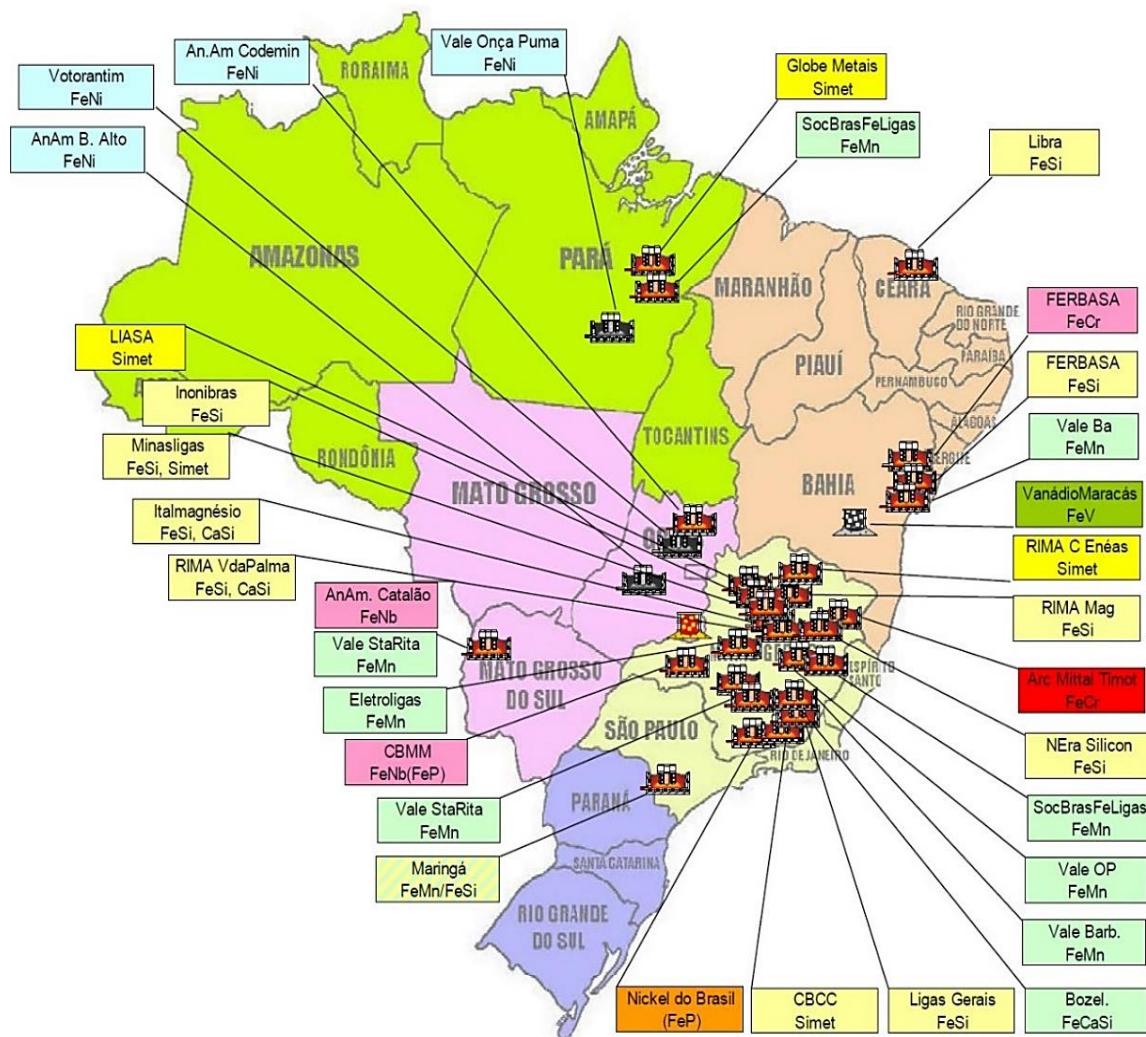


Figura 2.14 - Unidades produtoras de ferroligas e silício metálico (Kruger, 2009).

A grande concentração de unidades em Minas Gerais é uma decorrência natural da vocação do estado que, com as suas grandes reservas de minério de ferro, estimulou a implantação de usinas siderúrgicas, que são os principais usuários das ferroligas. Além disso, a sinergia advinda da existência de grandes reservas de manganês e quartzo grau metalúrgico, alavancou a implantação de unidades produtoras dos dois tipos de liga predominantes (Kruger, 2009b).

A FEAM (2010b) realizou um diagnóstico do setor de produção de ferroligas no Estado de Minas Gerais, no qual se observou a capacidade mensal instalada do setor de ferroligas, em toneladas, por tipo de liga. A Figura 2.15 apresenta um gráfico com esta capacidade em (t/mês).

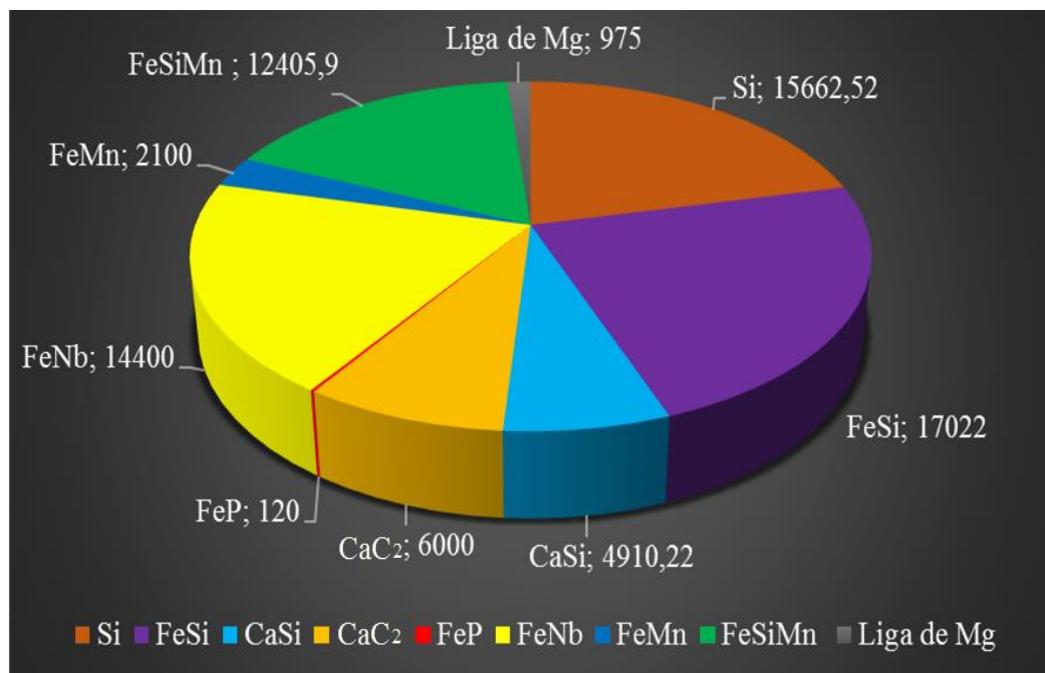


Figura 2.15 - Capacidade mensal instalada (t/mês) do setor de ferroligas (FEAM, 2010).

A maior capacidade instalada é a do setor de ferro-silício, seguida pelos setores de silício metálico e ferro-nióbio. Atualmente, cerca de 96 % da produção mundial utiliza fornos elétricos no processo produtivo. Dessa forma, a oferta e o custo da energia elétrica se caracterizam como fatores importantes na determinação da competitividade dentro da indústria.

As ferroligas são ligas de ferro com outros metais, nos quais o teor do metal é maior do que o teor de ferro, que tem por principal finalidade a incorporação de elementos de liga ao aço (menores pontos de fusão e densidade que os metais puros). As propriedades do aço são acentuadamente melhoradas pela incorporação de certos elementos de liga, tais como níquel, manganês, cromo, tungstênio, molibdênio, nióbio, titânio, vanádio, etc., que são, às vezes, introduzidos no aço na forma pura.

A prática usual, contudo, é adicioná-los na forma de ferroligas, pois custam muito menos que o metal puro. Além disso, a incorporação no aço é muito facilitada quando esses elementos estão sob a forma de ferroligas. Os aços ligados incluem os aços resistentes à corrosão (aços inoxidáveis), aços resistentes a ácidos, aços refratários e outros. As propriedades mecânicas dos aços ligados são bem melhores do que aquelas dos aços ao carbono. A combinação de diversos elementos de liga produz aços e ligas com uma larga faixa de propriedades (Lúcio *et al.*, 1980a).

Um importante emprego das ferroligas é na desoxidação do aço. A etapa final do refino do aço consiste numa importante operação tecnológica denominada “desoxidação” que tem por objetivo extrair o oxigênio dissolvido no aço.

Essa operação é essencial, pois esse oxigênio dissolvido afeta fortemente as propriedades mecânicas do aço. A desoxidação é efetuada mediante a adição de ferroligas, principalmente de silício, manganês e titânio, que se combinam com o oxigênio formando óxidos estáveis insolúveis no aço. Esses elementos são denominados desoxidantes.

Dependendo da matéria-prima que é utilizada, a produção de ferroligas pode ser realizada como um processo primário ou secundário. As principais reações químicas de ambos os processos podem ser apresentadas da seguinte forma:

➤ Processos primários:

Minério de óxido de metal + óxido de ferro/sucata de ferro + redutor → ferroliga + óxido redutor + escória.

➤ Processos secundários:

Sucata de metal + sucata de ferro → ferroligas.

As ferroligas primárias são produzidas, principalmente, por redução metalotérmica ou redução carbotérmica de óxidos de minérios e concentrados. Um processo muito importante é a redução carbotérmica, em que carbono na forma de coque (coque metalúrgico), carvão mineral ou carvão vegetal é normalmente utilizado como agente redutor. A redução metalotérmica é realizada, principalmente, tendo a sílica ou o alumínio como agente redutor. As equações químicas a seguir mostram os princípios básicos das rotas carbotérmica e metalotérmica de redução (FEAM, 2010c).

Redução carbotérmica: Óxido-Metálico + Carbono → Metal + Monóxido de Carbono;

Redução silicotérmica: Óxido-Metálico+ Silício ↔ Metal+ Óxido de Silício;

Redução aluminotérmica: Óxido-Metálico+ Alumínio → Metal + Óxido de Alumínio.

O processo de redução carbotérmica em fornos elétricos a arco submerso é o mais empregado e envolve, basicamente, as seguintes etapas:

- Preparação das matérias-primas;
- Fusão e redução das cargas;
- Preparação do produto.

Dentre as etapas mencionadas, a fusão redutora é a mais importante, tanto do ponto de vista de produção física quanto sob o aspecto do consumo de energia (Tolmasquim e Szklo, 2000).

O processo produtivo das ferroligas, com vistas à homogeneidade química do produto final, exige uma rígida classificação química e granulométrica das matérias-primas empregadas. Basicamente as ferroligas mais convencionais são ferro-silício, ferro-cromo, ferro silício-manganês e ferro-manganês, que estão presentes na quase totalidade dos processos de

produção de ferro e aço comum ou especial (Leite *et al.*, 2010). As Tabelas 2.4 e 2.5 a seguir mostram uma descrição das propriedades das ligas nos aços.

Tabela 2.4 - Propriedades conferidas pelas ligas aos aços (FEAM, 2010).

Elemento de Liga	Influência na Estrutura	Influência nas Propriedades	Aplicações	Produtos
Níquel (Ni)	Refina o grão e diminui a velocidade de transformação na estrutura do aço.	Aumento da resistência à tração e alta ductilidade.	Aço para construção mecânica, aço inoxidável e aço resistente a altas temperaturas.	Peças para automóveis, utensílios domésticos e caixas para tratamento térmico.
Tungstênio (W)	Forma carbonetos muito duros.	Aumento da dureza, aumento da resistência a altas temperaturas.	Aços rápidos e aços ferramentas.	Ferramentas de corte.
Silício (Si)	Auxilia na desoxidação, auxilia na grafitação e aumenta a fluidez.	Aumento da resistência à oxidação em temperaturas elevadas e melhora da temperabilidade e da resistência à tração.	Aços com alto teor de carbono e aços para fundição em areia.	Peças fundidas.
Molibdênio (Mo)	Influência na estabilização do carboneto.	Alta dureza ao rubro. Aumento da resistência à tração. Aumento da temperabilidade.	Aços-ferramenta, aços-cromo-níquel, substituto do tungstênio em aços rápidos.	Ferramentas de corte.
Cobalto (Co)	Forma carbonetos (fracamente) e desloca a curva TTT para esquerda.	Aumento da dureza, aumento da resistência à tração e resistência à corrosão e à erosão.	Aços rápidos e elementos de liga em aços magnéticos.	Lâminas de turbina de motores a jato.

Tabela 2.5 - Propriedades conferidas pelas ligas aos aços (FEAM, 2010).

Elemento de Liga	Influência na Estrutura	Influência nas Propriedades	Aplicações	Produtos
Nióbio (Nb)	Promove estabilização nos aços austeníticos, impedindo o empobrecimento de cromo via precipitação em forma de carbonetos.	Aumenta a resistência à corrosão e capacidade de solda de aço e aço inoxidável.	Indústrias de construção civil, automotiva, naval, aeronáutica e espacial.	Tubulações (grades, estruturas, gasodutos e oleodutos) e ferramentas de alta precisão.
Cromo (Cr)	Forma carbonetos e acelera o crescimento dos grãos.	Aumento da resistência à corrosão e a oxidação e a aumento da resistência a altas temperaturas.	Aços para construção mecânica, aços-ferramenta e aços inoxidáveis.	Produtos para indústria química, talheres, válvulas e peças para fornos e ferramentas de corte.
Manganês (Mn)	Estabiliza os carbonetos, ajuda a criar microestrutura dura por meio de têmpera e diminui a velocidade de resfriamento.	Aumento da resistência mecânica e temperabilidade da peça e a resistência ao choque.	Aço para construção mecânica.	Peças para automóveis e peças para uso geral em engenharia mecânica.
Vanádio (V)	Inibe o crescimento dos grãos e forma carbonetos.	Maior resistência mecânica, maior tenacidade e temperabilidade e resistência à fadiga e à abrasão.	Aços cromo-vanádio.	Ferramentas de corte.

As ferroligas são produzidas em forno elétrico a arco submerso. Também podem ser produzidas em alto-forno, contudo, a quantidade de coque necessária para geração de energia tornou essa forma de produção economicamente inviável.

2.6. FERROLIGAS DE MANGANÊS

Um dos grandes destaques da indústria de ferroligas mundial é o manganês. Aproximadamente 90 % de todo manganês produzido no mundo está na forma de ferroligas de manganês das quais pelo menos 98 % são consumidas pela indústria do aço. Os minérios de manganês possuem uma variada e complexa mineralogia. Existem mais de 300 minerais que contêm manganês, mas apenas uma pequena parte possui uma quantidade significativa do elemento, e são, portanto, constituintes dos minérios de maior valor agregado (Olsen *et al.*, 2007a).

O manganês pode se apresentar nos estados bivalente, trivalente e tetravalente. Devido a essa variabilidade no estado de oxidação é comum a presença de álcalis nas redes cristalinas dos minerais (Faria, 2008a).

A maioria dos minérios de manganês do mundo é encontrada no estado tetravalente, como óxidos ou hidróxidos. A pirolusita e a criptomelana são os minerais tetravalentes de maior importância econômica. Há também a rodocrosita que é um carbonato muito comum em alguns minérios de manganês do mundo, inclusive no Brasil (Gonçalves e Serfaty, 1976a).

O insumo chave na produção das ligas de manganês é o minério, que representa em torno de 33 % a 46 % dos custos totais de produção. Desse modo, a indústria buscou a integração e a proximidade com a mineração. As reservas mundiais de minério de manganês estão estimadas em 5 bilhões de toneladas, das quais 80 % detidas exclusivamente pela África do Sul. Destacam-se, ainda, a Ucrânia (10 %), o Gabão (3 %), a China (2 %), a Austrália (1,6 %) e o Brasil (1 %). Tal disparidade de participação, todavia, não se reflete na produção, que é bem dividida entre esses principais países (Andrade *et al.*, 1999c). A seguir, a Figura 2.16 mostra o mapa da distribuição das reservas de manganês no Brasil.

MINÉRIO DE MANGANÊS

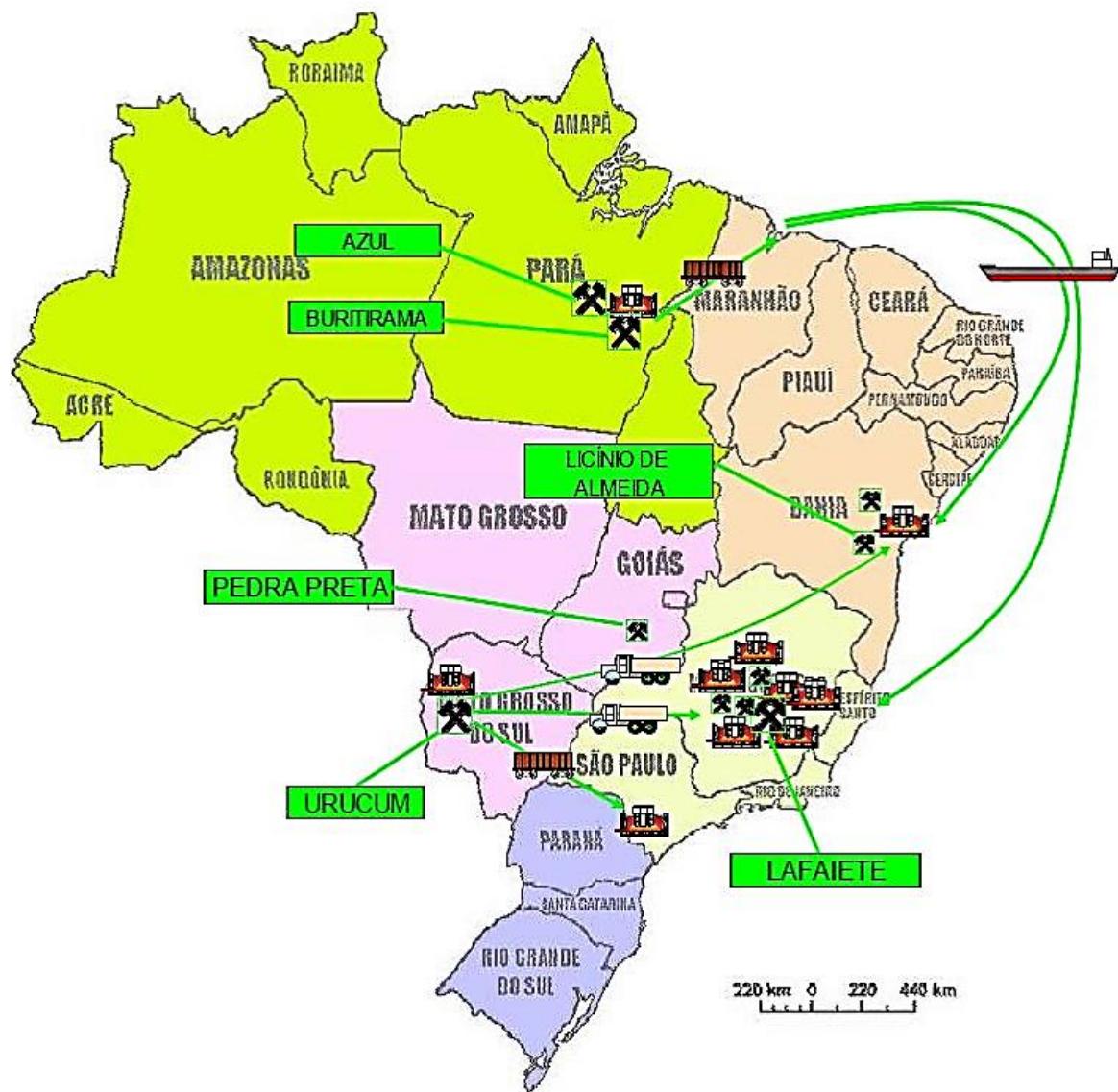


Figura 2.16 - Principais jazidas de manganês no Brasil (Kruger, 2009).

As ligas de manganês são os tipos mais produzidos mundialmente, devido à sua propriedade dessulfurante e desoxidante são aplicadas na fabricação de praticamente todo tipo de aço e ferro fundido. No processo de produção são adicionados em média 10 kg de liga por tonelada de aço. O minério de manganês é a matéria-prima para a produção das ligas de ferro silício-manganês (FeSiMn) e o ferro-manganês (FeMn) (Andrade e Cunha, 2011b).

O manganês, acrescentado na forma de ferroligas, auxilia no refinamento da estrutura de grãos, aumentando a resistência mecânica e melhorando a temperabilidade e a ductilidade do aço. O manganês em altos teores, adjunto a teores mais elevados de enxofre, facilita a usinagem, melhorando o acabamento superficial dos aços (Chiaverini, 1990; Chaudhary *et al.*, 2001).

De acordo com Silveira e Almeida (1987a), dada à grande afinidade do manganês pelo oxigênio, esse elemento é amplamente utilizado como agente desoxidante do aço. O manganês reage com o oxigênio dissolvido no banho de refino do aço formando óxidos e evitando a formação de CO que, ao sair do banho, poderia gerar quantidades consideráveis de poros no metal prejudicando suas propriedades.

O manganês também é amplamente utilizado como agente dessulfurante, sendo empregado para evitar a formação de FeS que apresenta baixo ponto de fusão. O manganês apresenta maior afinidade com o enxofre (S) do que o ferro (Fe), formando MnS, que apresenta ponto de fusão semelhante ao do aço. A presença de FeS prejudica o processamento mecânico aquecente do aço (Abreu, 1973).

Segundo Kruger (2009c), as ligas e ferroligas de manganês são classificadas de acordo com a quantidade de carbono e silício utilizados em sua produção. Existem as ligas com alto teor de carbono e as com médios e baixos teores. São, respectivamente:

- Ferro-manganês alto carbono (FeMnAC);
- Ferro-manganês médio carbono (FeMnMC);
- Ferro-manganês baixo carbono (FeMnBC);
- Ferro silício-manganês (FeSiMn).

O quarto tipo corresponde às ligas que, além do manganês, tem quantidades importantes de silício em sua composição. A Tabela 2.6 apresenta os elementos das ferroligas de manganês e a Figura 2.17 mostra a estrutura da indústria produtora de ferroligas de manganês.

Tabela 2.6 - Características das ferroligas de manganês.

Elementos das Ligas	Ferro-manganês alto carbono (FeMnAC)	Ferro-manganês médio carbono (FeMnMC)	Ferro-manganês baixo carbono (FeMnBC)	Ferro-silício-manganês (FeSiMn)
Manganês – Mn (%)	74 -78	80	80	80
Carbono – C (% máx.)	7	0,5	3	3
Silício – Si (% máx.)	1	2,5	2	12 - 20
Fósforo – P (% máx.)	0,38	0,30	0,30	0,2
Enxofre – S (% máx.)	0,03	0,03	0,03	0,03
Ferro – Fe (%)	Balanço	Balanço	Balanço	Balanço

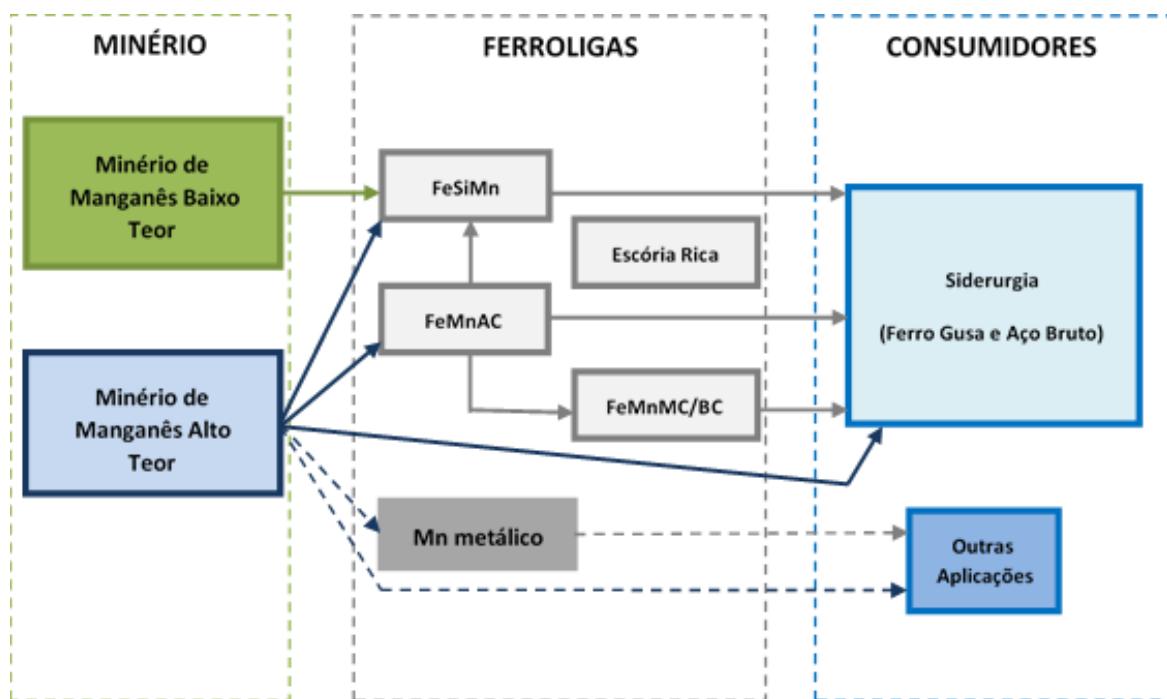


Figura 2.17 - Estrutura da produção de manganês (Nóbrega *et al.*, 2007).

O FeMnAC é a liga de manganês mais utilizada, sendo aplicada principalmente na desoxidação do aço. O FeSiMn é empregado como um desoxidante complexo, assim como na produção de aços de baixa liga. As ligas FeMnMC e FeMnBC são, entre outros, utilizadas na fabricação de chapas para estampagem profunda que requerem baixos teores de carbono e fósforo, tubulações soldáveis para trabalho em baixas temperaturas, estabilizador da austenita nos aços inoxidáveis austeníticos, fabricação de eletrodos de soldas, entre outros. Devido a essas características, o ferro-manganês e o ferro silício-manganês são as matérias-primas essenciais à produção de praticamente todos os tipos de aços (Liu, 1993).

As ligas de manganês estão diretamente relacionadas ao setor de ferro e aço, isto é, aos segmentos siderúrgicos e de fundição, que são seus únicos mercados. Assim, a sua evolução, ou retrocesso, é sempre relacionado às tendências daqueles setores, com ampla predominância da siderurgia (Kruger, 2009d).

Como pode ser observado, na Figura 2.18 que mostra a produção de ferroligas de manganês, o setor passa por oscilações devido à crise de 2008 que afetou a indústria, registrando no ano 2009 quedas da produção. Observa-se, também, a predominância das ligas FeSiMn, como já comentado anteriormente.

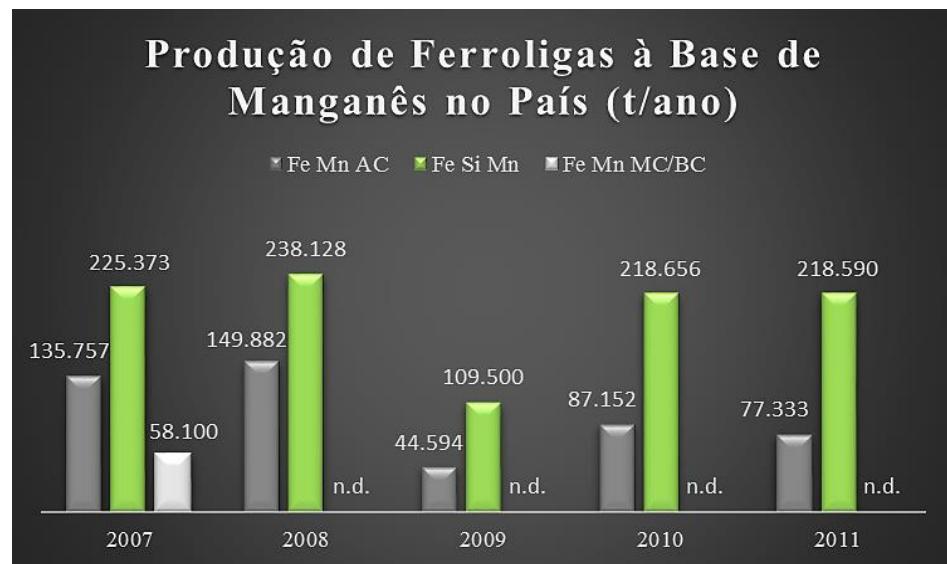


Figura 2.18 - Produção brasileira de ferroligas de manganês (MME, 2012).

2.6.1. Balanço de massa

No processo de produção das ferroligas procura-se, inicialmente, estimar a chamada mistura, ou o balanço de massas, que é realizada em conformidade com as características químicas e físicas das matérias primas e da liga a ser produzida. Essa mistura é composta de:

- Matéria prima mineral;
- Fundentes;
- Redutores;
- Escória.

As misturas seguem alguns requisitos para garantir uma boa operação no forno. Para Silveira e Almeida (1987b) devem ter:

- Uma faixa granulométrica estreita com diâmetro médio de grão adequado para cada componente individual da carga;
- Elevada resistência à degradação sob os pontos de vista de abrasão, queda, crepitação e redução;
- Elevada resistividade elétrica mesmo em altas temperaturas.

A classificação eficiente dos componentes individuais da carga, assim como a resistência à degradação, permitirá obter uma distribuição uniforme do fluxo de gás em qualquer seção transversal do forno, o que proporciona melhor pré-aquecimento da carga pelo gás ascendente, assim como um maior contato gás-sólido. Além disso, uma carga bem classificada apresenta reduzida tendência de segregação (FEAM, 2010d).

A elevada resistividade elétrica da carga é importante para se obter uma imersão mais profunda das extremidades dos eletrodos na carga, melhor distribuição de energia no forno e maior aproveitamento da capacidade dos eletrodos em transportar a corrente elétrica. E, como

vantagem adicional, a elevada resistividade elétrica da carga conduz a maiores valores de fator de potência, o que não só permite operar com potência ativa mais elevada, como também reduzir custos de investimento quando a compensação para a potência reativa é requerida (Silveira e Almeida, 1987c).

➤ Matéria prima mineral

A granulometria da matéria prima deve ser ajustada para que os gases gerados na reação atravessem a fase sólida de maneira uniforme. Além disso, a matéria prima também deve ser escolhida conforme a quantidade máxima de óxidos (impurezas) especificada para o produto. Dentre essas impurezas, as principais são SiO₂, Al₂O₃, e MgO. O coque utilizado deve ser seco a menos de 2 % de umidade e deve conter menos que 15 % de cinzas. Adicionalmente, para fornos fechados, deve ser utilizada uma granulometria entre 3 mm e 25 mm.

A produção de ferro-manganês e silício-manganês é baseada em uma mistura de manganês contendo óxidos como matéria-prima primária. O manganês é encontrado em uma variedade de rochas sob a forma de óxidos, dióxidos, hidróxidos, silicatos e carbonatos. Os dióxidos constituem as mais importantes fontes comerciais do metal, destacando-se a pirolusita (MnO₂), o psilomelano [Ba Mn⁺² Mn₈⁺⁴ O₁₆ (OH)₄] e a manganita (Mn₂O₃.H₂O) (FEAM, 2010e). Para se obter uma boa eficiência do processo, o minério de manganês e concentrados (com baixo teor de ferro) devem ser granulares ou materiais sinterizados.

➤ Fundentes

Em todas as operações redutoras de fusão torna-se necessária a utilização de um fundente. Muitas impurezas têm o ponto de fusão acima da temperatura de operação do forno elétrico de redução. Sua presença em estado sólido não permite a sua saída do forno, tornando a separação do metal um processo quase impossível.

A função do fundente é tornar as impurezas fusíveis mais facilmente, ajustando-se quimicamente a elas, formando um composto de ponto de fusão mais baixo que os constituintes da escória (Silva, 2011).

Para que as ferroligas alcancem uma alta qualidade e um rendimento aceitável do forno, materiais auxiliares como quartzo (SiO_2), bauxita [$\text{AlO}_x(\text{OH})_{3-2x}$], alumina (Al_2O_3), óxido de cálcio (CaO), olivina ($\text{Mg}_{1,5}\text{Fe}_{0,5}\text{SiO}_4$), calcário (CaCO_3) e dolomita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] podem ser adicionados como agentes de fluxo.

➤ Redutores

Os agentes redutores utilizados na redução carbotérmica são o carvão e o coque. Há também a possibilidade de realizar a redução silico térmica quando a quantidade de carbono requerida na liga for baixa.

No Brasil são utilizados como redutores o carvão vegetal, coque metalúrgico, coque de petróleo, coque verde de petróleo e cavacos de madeira. A escolha do agente redutor, assim como a combinação entre os redutores, é de grande importância para uma boa operação do forno.

2.6.2. Forno elétrico a arco submerso

A principal tecnologia utilizada na produção de ferroligas é a do forno elétrico a arco submerso (também conhecido como fornos elétricos de redução - FER).

Segundo Silva (2006a) o forno elétrico a arco é um dos reatores mais versáteis para produção do aço, e vem se tornando um dos mais eficientes nas últimas décadas, por apresentar algumas vantagens como alta eficiência energética, produção de praticamente qualquer tipo de aço em função do controle do aquecimento virtualmente independente de reações químicas, flexibilidade de carga metálica, podendo ser operado com até 100 % de carga sólida, e possibilidade de operação intermitente e mudanças rápidas na produção, em escalas desde dezenas até centenas de toneladas.

O forno elétrico de redução é um reator em formato cônico responsável pela redução do minério para a produção das ligas. Ele apresenta uma carcaça metálica exterior revestido

internamente por isolantes térmicos e material refratário. Os fornos podem ser abertos, fechados ou semifechados (Silveira e Almeida, 1987d). No Brasil, utilizam-se mais frequentemente fornos abertos para produção de ferroligas. Na Figura. 2.19 podemos ver um desenho esquemático de dois fornos.

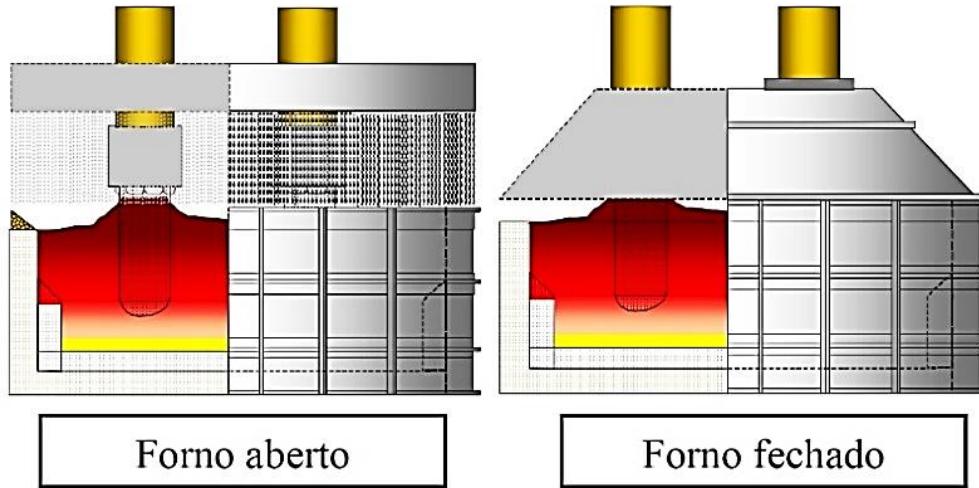


Figura 2.19 - Forno elétrico de redução (FER) (Kruger, 2009).

O forno aberto tem um menor custo de investimento e o controle operacional é mais flexível, enquanto o fechado tem um menor consumo de energia, melhor aproveitamento energético e menor volume de gases para tratar (Kruger, 2009e).

Fornos abertos possuem sistema de exaustão, posicionados até um metro acima do forno. Painéis móveis ou telas podem ser utilizados para reduzir o espaço aberto entre o forno e o exaustor melhorando a captura das emissões de gases e particulados. O monóxido de carbono, que passa através da carga, queima na sua superfície, o que aumenta significativamente o volume do gás. Adicionalmente, a vigorosa combustão arrasta finos de minério da carga. Filtros de manga são geralmente utilizados para controle das emissões desse tipo de forno.

Fornos fechados têm uma cobertura de aço resfriada com a utilização de água. O objetivo desse forno é reduzir a entrada de ar, o que diminui a combustão do gás reduzindo, assim, o volume de gás a ser tratado. A cobertura possui furos para permitir a entrada da carga e por

onde passam os eletrodos. Fornos que têm esses furos parcialmente fechados são denominados de fornos semifechados.

Os fornos elétricos de redução são equipamentos que transformam energia elétrica em energia térmica (Figura 2.20) por meio de eletrodos que são utilizados para produção de arco elétrico.

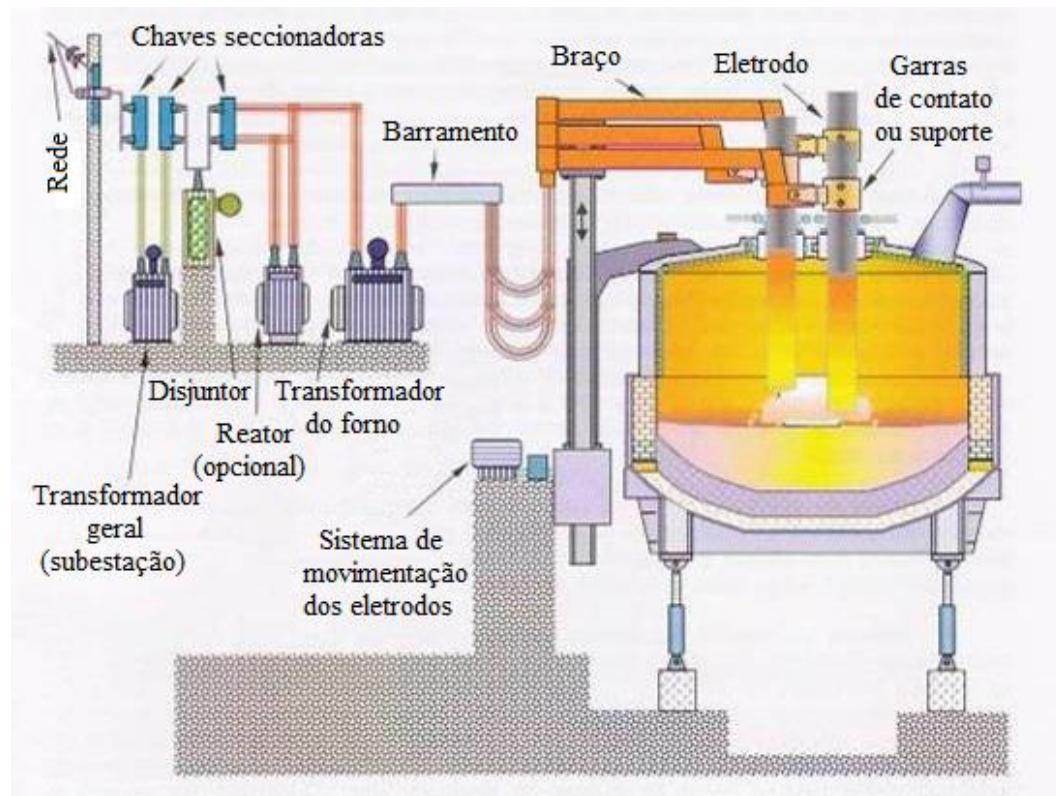


Figura 2.20 - Esquema de transformação de energia elétrica em energia térmica do forno elétrico de redução (FER) (Rizzo, 2006).

Os eletrodos utilizados podem ser eletrodos de grafite, eletrodos amorfos de carbono ou eletrodos Soderberg. Os eletrodos Soderberg consistem em uma “camisa”, um invólucro de aço macio ou aço inoxidável, reforçada internamente e preenchida com uma pasta carbonácea, geralmente antracita calcinada, e uma pasta de carvão tap pitch. Por aquecimento dentro do forno a pasta é carregada e, durante a operação, é gradualmente transformada em um condutor sólido com boas propriedades elétricas e mecânicas (FEAM, 2010f).

Cada forno elétrico de redução apresenta geralmente três eletrodos com diâmetro que variam entre 76 a 100 cm arranjados em uma formação triangular e estendem-se através da abertura do forno. Figura 2.21 mostra a disposição dos eletrodos no forno elétrico de redução.

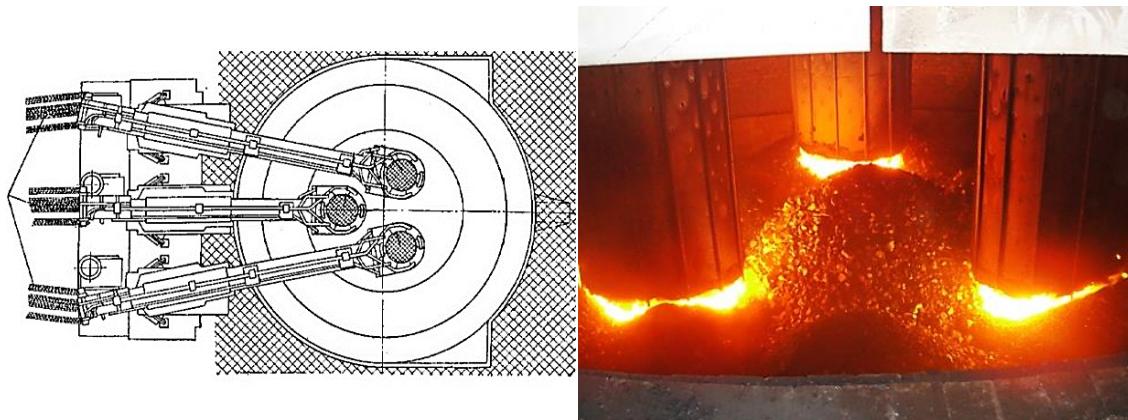


Figura 2.21 - Eletrodos do forno (FER) (FEAM, 2010).

O triângulo formado pelos eletrodos está inscrito em um círculo cujo diâmetro, denominado “diâmetro do círculo positivo”, é pré-estabelecido em função da ferroliga que se deseja produzir. Dentre outros fatores, esse diâmetro é um parâmetro importante para o dimensionamento do projeto do forno (Santos, 2007a).

Quando os três eletrodos, ligados a uma fonte de energia elétrica, são colocados em contato entre si e, em seguida, afastados um do outro, ou então colocados em contato com a carga e logo depois afastados desta, forma-se o “arco elétrico” (é um tipo de descarga elétrica na qual a corrente passa através de um gás ionizado, vapores de metais e óxidos). Ou seja, à medida que esses eletrodos se tornam mais distantes, a resistência nos pontos de contato aumenta elevando a potência liberada, produzindo altas temperaturas, disponibilizadas para que as reações do processo ocorram (Silva, 2006b).

A coluna do arco consiste de moléculas neutras de gás, íons positivos e elétrons. Nessa região de plasma do arco não há carga no espaço e a eletricidade é transferida por elétrons. No processo de produção de ferroligas, o arco está submerso na carga e flui entre o eletrodo de carbono e a liga.

Os pontos de fusão e vaporização de todos os elementos numa liga são muito inferiores à temperatura do arco. Portanto, vapores de todos os elementos de uma liga estão sempre presentes na atmosfera dele.

Para controlar o processo de fusão, a operação do forno pode ser baseada no controle da corrente ou resistência. Ou seja, conforme a fusão prossegue, a eficiência na transferência de calor reduz e mais calor é irradiado do arco para as paredes. Com o objetivo de amenizar esse problema, os eletrodos são imersos na camada de escória com a intenção de cobrir o arco elétrico. Porém, caso a espessura da escória não seja suficiente para cobrir completamente o arco, parte dessa energia é perdida e a taxa de oxidação dos eletrodos é elevada, obrigando a redução na potência do forno e no comprimento do arco elétrico (Ávila, 2011a).

Segundo Cardoso (1987), a emissão de elétrons tem lugar principalmente no ponto catódico onde a temperatura pode alcançar 3000 °C ou mais. Os elétrons adquirem uma alta energia na zona catódica e ionizam o gás. Os íons positivos do gás bombardeiam o catodo aumentando a temperatura. Para que se tenha um melhor controle na operação do forno é necessário que se conheçam alguns de seus componentes elétricos principais. Nos fornos a potência elétrica útil se transforma em calor, em parte no arco e em parte nas matérias primas.

2.6.3. Processo de produção das ferroligas de manganês

No processo de produção inicialmente procura-se estimar a chamada mistura ou o balanço de massas que é realizada em conformidade com as características químicas e físicas das matérias primas e da liga a ser produzida. Essa mistura geralmente contém minérios dos elementos de liga a serem produzidos, minérios de ferro, quartzo, calcário, dolomita, eventualmente, escória reciclada e carvão vegetal ou coque abastece o forno (FER) (Faria, 2008b).

O carregamento do forno elétrico a arco normalmente é feito pela abertura da abóbada, que gira deixando o forno livre para carga. A Figura 2.22 apresenta alimentação do forno elétrico de redução (FER).

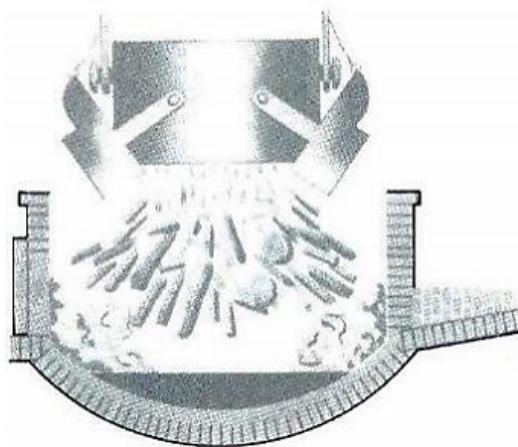


Figura 2.22 - Processo de alimentação do forno (FER).

Após o carregamento o forno é fechado e os eletrodos são inseridos (Figura 2.23). Uma corrente alternada aplicada aos eletrodos provoca o fluxo de corrente através da carga entre as pontas dos eletrodos (Olsen *et al.*, 2007b).

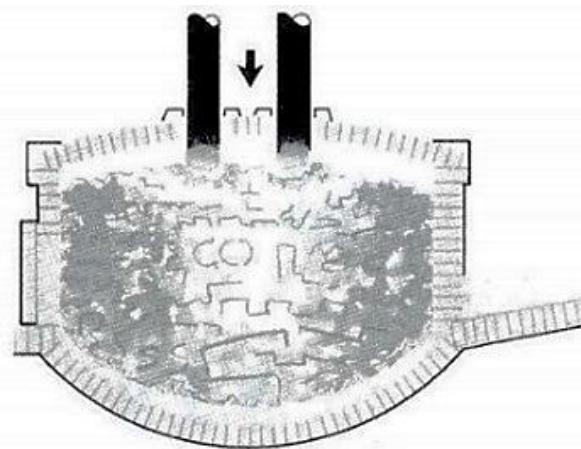


Figura 2.23 - Processo de inserção dos eletrodos no forno (FER).

Isso proporciona uma zona de reação com temperaturas de 3000 °C. A ponta de cada eletrodo muda de polaridade continuamente com os fluxos da corrente alternada entre as pontas. Para manter uma carga elétrica uniforme, a profundidade dos eletrodos é variada continuamente por meios mecânicos ou hidráulicos (Olsen *et al.*, 2007c). A Figura 2.24 apresenta o início do processo de transição no forno elétrico de redução (FER).

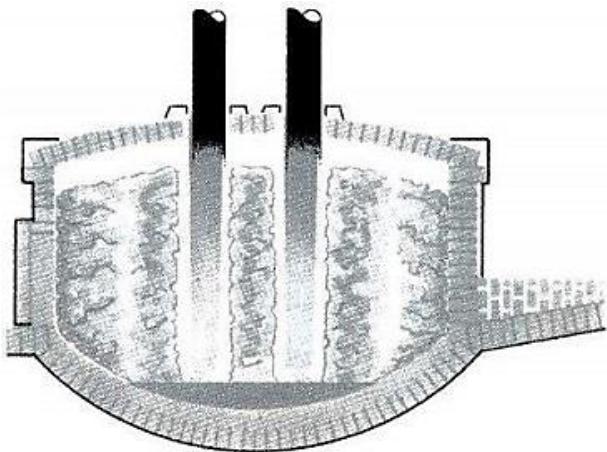


Figura 2.24 - Fase de transição no forno (FER).

À medida que a carga desce no interior do forno, ela sofre um aumento gradual de temperatura que favorece as reações químicas importantes para o processo (Figura 2.25), ou seja, a fonte de carbono reage com o óxido de metal para formar monóxido de carbono e reduzir os óxidos para formação do metal (Olsen *et al.*, 2007d).

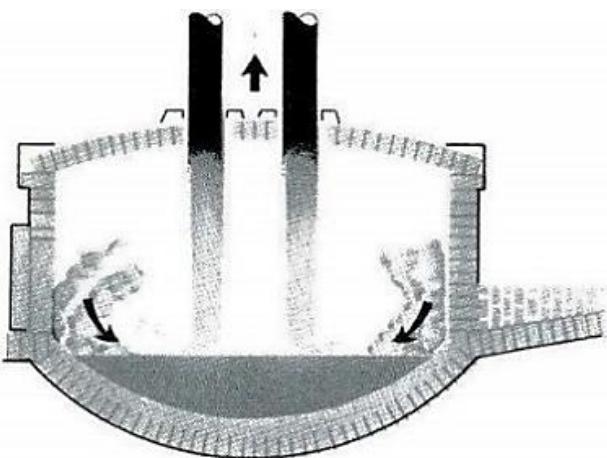


Figura 2.25 - Processo de fusão no forno (FER).

Ao atingir determinada faixa de temperatura e composição química adequadas, a carga, exceção feita ao carbono amolece e funde. Os líquidos produzidos, ferroliga e escória depositam-se no cadiinho, onde ocorre a separação dos dois por diferença de densidades (Figura 2.26).

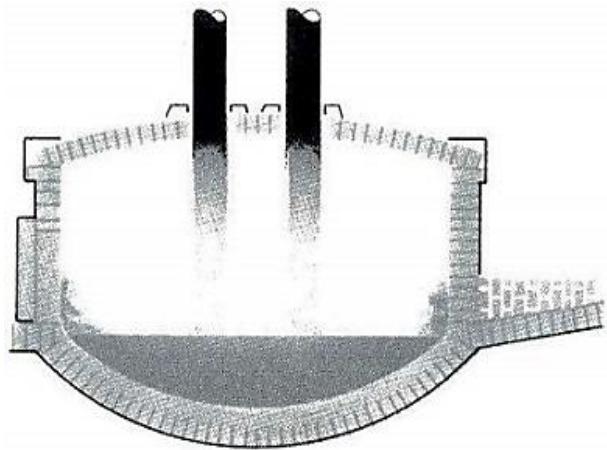


Figura 2.26 - Formação da escória e da ferroliga no forno (FER).

Então, a ferroliga e escória são esgotadas (Figura 2.27). O esgotamento da ferroliga ocorre pela bica ou furo de corrida para o pote de ferroliga. No processo as ferroligas são transformadas em lingotes através de moldes formados com o próprio fino da liga (Rocha, 2011a).



Figura 2.27 - Processo de esgotamento do forno (FER).

Oposta a essa, há uma bica de corrida da escória que é uma porta por onde podem ser adicionados materiais como ligas, formadores de escórias, etc. A escória é vazada em um local chamado “box de escória” (piscina forrada com finos da própria escória), e então, é resfriada com água e posteriormente é retirada com a utilização de uma retroescavadeira e levada para o “bota fora”, onde pilhas de escória são formadas (Olsen *et al.*, 2007e; Tangstad, 1996a).

Tanto a ferroliga quanto a escória são esgotadas mediante o basculamento do forno. A ferroliga vaza no pote de ferroliga e do outro lado a escória vaza no box ou no pote de escória.

A retirada da escória tem a finalidade de remover as impurezas do forno e ocorre durante todo processo, uma vez que durante as etapas de fusão e refino algumas das impurezas escorificadas tendem a voltar para a liga (Rocha, 2011b). A Figura 2.28 apresenta o processo simplificado de produção de ferroligas.

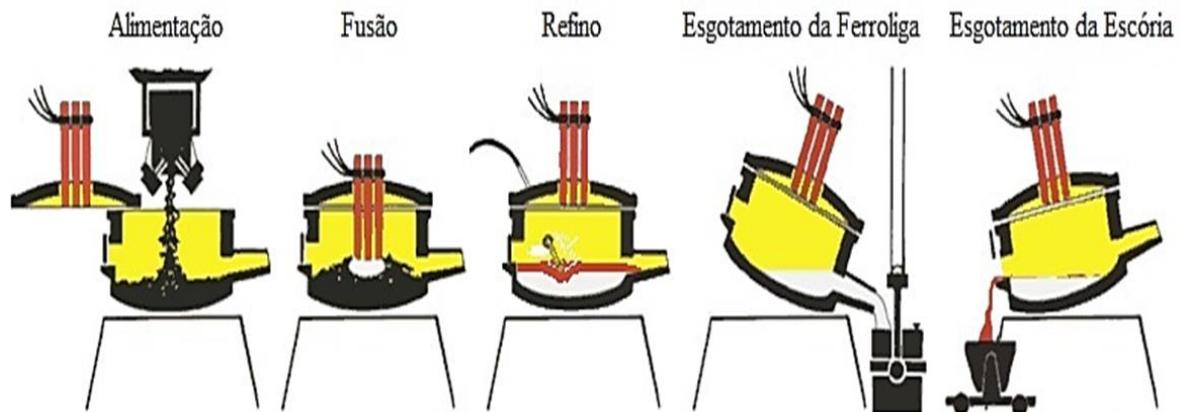


Figura 2.28 - Produção das ferroligas.

O gás produzido no processo é eliminado através de aberturas existentes na abóbada e direcionado ao sistema de despoeiramento.

Segundo Olsen *et al.* (2007f); Santos (2007b) e Tangstad (1996b), as reações químicas e físicas ocorrem em zonas específicas ao longo do forno, sendo denominadas zonas seca, de transição, de amolecimento e fusão, de escória e de liga, que são representadas na Figura 2.29.

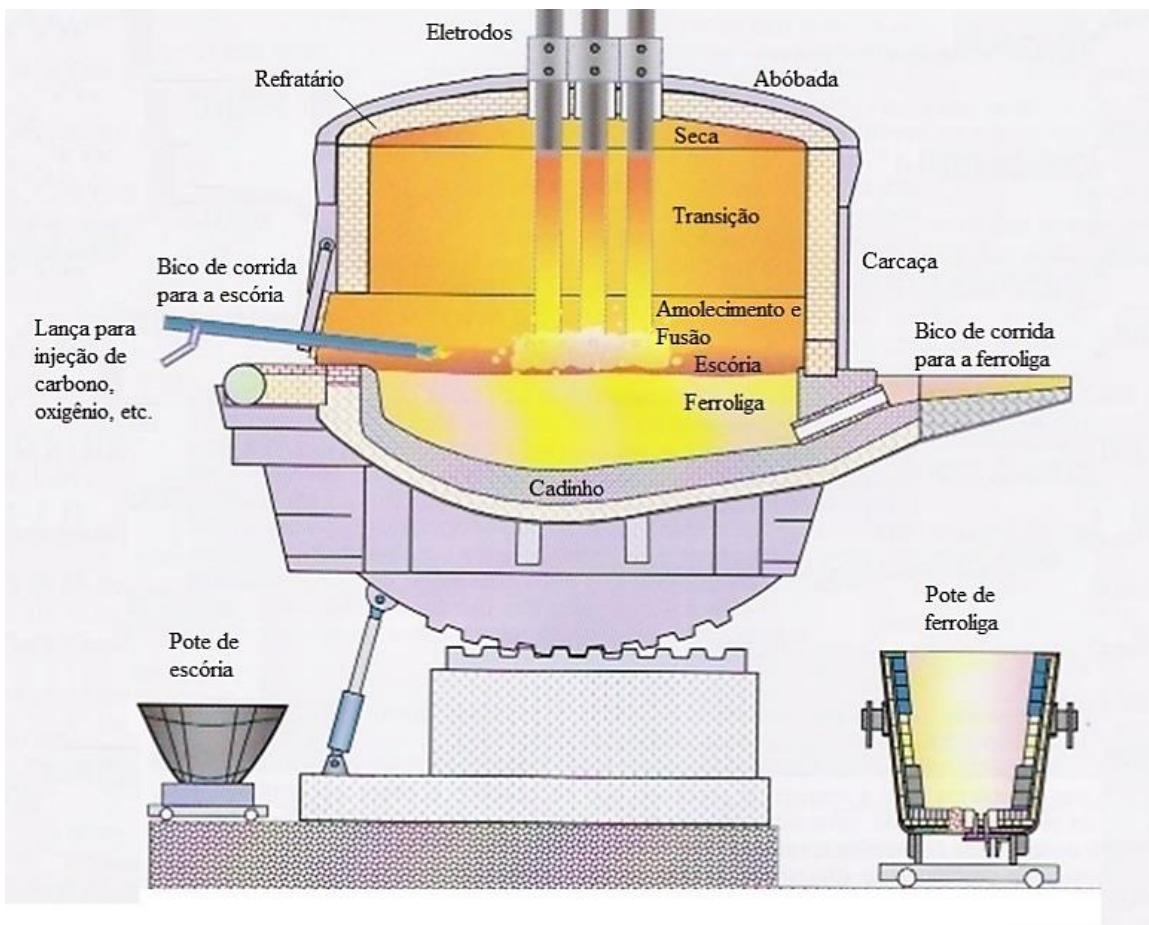


Figura 2.29 - Mapa esquemático com as zonas das reações no forno elétrico de redução (Rizzo, 2006).

2.6.4. Zonas das reações

- Zona seca

A primeira reação que ocorre é a vaporização da água, cuja origem é a umidade dos componentes da carga. Posteriormente, a água de hidratação também é removida, ocasionando certa crepitação dos minérios. O vapor liberado reage com o carbono ou o monóxido de carbono produzindo hidrogênio, que também funciona como redutor de acordo com as seguintes reações:





Dependendo do elemento de liga a ser produzido, a redução pode iniciar-se na zona seca, a temperaturas mais baixas, ou numa zona inferior, onde temperaturas superiores são alcançadas. Entretanto, na maioria dos casos, a redução final do óxido que contendo o elemento de liga desejado somente ocorrerá em temperaturas elevadas e a ferroliga será produzida pela redução do óxido líquido na interface liga-escória (Olsen *et al.*, 2007g; Santos, 2007c; Tangstad, 1996c).

Portanto, na zona seca haverá somente uma redução parcial do óxido metálico de acordo com a reação genérica:



➤ Zona de transição

A zona de transição separa a zona seca da região de amolecimento e fusão. Dentro da zona de transição, algumas reações da zona seca continuam a ocorrer. Iniciam-se, nessa zona, o processo de amolecimento e fusão da carga e algumas reações de formação de carbonetos de ferro e dos metais de liga.

As temperaturas de início e de final dessa zona são determinadas de acordo com as composições dos diferentes minérios que formam a carga do processo (Olsen *et al.*, 2007h; Santos, 2007d; Tangstad, 1996d).

➤ Zona de amolecimento e fusão

A zona de amolecimento e fusão apresenta como principal característica o fato das reações ocorrerem em alguma extensão entre os gases e sólidos (como na zona seca) e também entre líquidos e sólidos (entre sólidos e sólidos e entre gases e líquidos). Essa zona do forno é formada por uma mistura de material em fusão, coexistindo com sólidos e gases, resultando, daí, sua importância para as questões elétricas do forno, pois é nesse local que os eletrodos

devem estar corretamente posicionados (Olsen *et al.*, 2007i; Santos, 2007e; Tangstad, 1996e).

➤ Zona da escória

A escória funciona como um filtro, retendo as impurezas que comprometem a qualidade da liga. O seu controle é de fundamental importância para a operação adequada do forno elétrico de redução.

Dependendo da liga a ser produzida, haverá um grande arraste desse metal para a escória, tornando-a rica no mesmo. O controle de sua basicidade é essencial para promover a recuperação do metal, visando à manutenção de taxas mais elevadas de produtividade.

Entretanto, invariavelmente, ao invés do controle do processo, evitando perda de metal, adotam-se práticas de reciclagem e reaproveitamento de escória para recuperação do metal da liga.

Cada tipo de ferroliga a ser produzida irá gerar uma escória com composição, viscosidade e basicidade específicas. A basicidade binária da liga exerce forte influência na partição do metal de liga entre a liga metálica e a escória (Olsen *et al.*, 2007j; Santos, 2007f; Tangstad, 1996f).

➤ Zona da ferroliga

A zona da ferroliga é onde se encontra o metal fundido, que é a ferroliga desejada. Ela situa-se abaixo da zona da escória e são divididas por diferença de densidade (Olsen *et al.*, 2007k; Santos, 2007g; Tangstad, 1996g).

As zonas onde ocorrem as reações químicas dependem do tipo de ferroliga que está sendo produzida. Abaixo está representada a reação básica que ocorre na produção das ferroligas de manganês:



2.6.5. Produção do ferro-manganês alto carbono

Na produção do ferro-manganês alto carbono (FeMnAC), as misturas de minérios devem conter alta relação manganês/ferro (superiores a 7) sílica (para formar escória com óxido de manganês) e alumina (para assegurar uma produção eficiente de FeSiMn) com teor mais alto de silício (Si) e menos carbono (C), a partir da escória. Deve-se procurar teores baixos de fósforo (P), e outras impurezas, de forma a não exceder os limites especificados de cada liga (Lúcio *et al.*, 1980b; Silveira e Almeida, 1987e).

A alumina (Al_2O_3) tem seu teor limitado devido à grande influência que ela exerce nas propriedades de fusão e escoamento da escória. Minérios com elevado teor de alumina podem gerar elevados volumes de escória, muitas vezes prejudiciais ao rendimento de manganês e à produtividade do processo, além de elevar o consumo específico de energia. Limitação semelhante existe para o teor de SiO_2 (Olsen *et al.*, 2007l; Tangstad, 1996h).

O fósforo do minério requer grande atenção devido às condições termodinâmicas existentes no interior do forno, mas de 80 % do fósforo carregado é incorporado à liga.

O processo de produção da liga FeMnAC gera cerca de 600 - 700 kg de escória líquida por tonelada de liga. Essa escória consiste principalmente em MnO (30 - 50 %) e SiO_2 (20 - 30 %) e é um produto comercial útil, que é normalmente utilizada como uma matéria-prima para a produção de ligas de FeSiMn (Gall *et al.*, 2004).

De acordo com Lúcio *et al.* (1980c), existem dois processos para a produção do FeMnAC:

O primeiro é o processo com escória rica que apresenta menor consumo de energia e redutor, sendo necessários minérios com teor mais elevado de manganês (mais caros). Entretanto, o custo global é menor, já que a escória gerada é de natureza ácida, apresentando altos teores de Mn (superior a 40 %), sendo reutilizada para a produção de ferro silício-manganês.

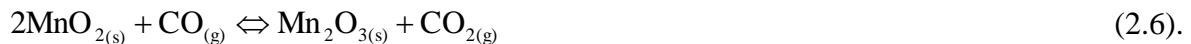
Além disso, a escória rica possui baixíssimo teor de fósforo, o que representa uma vantagem para a produção de ferro silício-manganês.

O segundo é o processo com escória pobre que é utilizado somente em circunstâncias especiais, normalmente quando os minérios existentes não permitem produzir pela outra via, ou seja, pelo processo com escória rica. No processo com escória pobre, a escória gerada é básica, possui baixo teor de manganês ($MnO < 20\%$), e é descartada.

Dentro dos fornos, o principal responsável pela redução dos óxidos de manganês é o monóxido de carbono. A temperatura na qual os óxidos são reduzidos depende da composição dos gases do forno (Silveira e Almeida, 1987f).

É importante fazer a análise da composição química dos gases que saem das chaminés dos fornos fechados para monitorar as condições de operação. A relação $CO / (CO + CO_2)$ é um importante parâmetro para se avaliar a redução dos óxidos de manganês, em geral essa relação deve estar em torno de 0,6. Também é importante avaliar o teor de H_2 , pois esse está relacionado com a umidade de entrada da carga ou a existência de um vazamento de água (Faria, 2008c).

O manganês possui as seguintes fórmulas oxidadas: MnO_2 , Mn_2O_3 , Mn_3O_4 e MnO . Na zona seca do forno só os óxidos superiores do Mn, que são mais facilmente reduzidos, sofrem redução parcial que são apresentadas pelas seguintes equações:



2.6.6. Produção do ferro silico-manganês

Na produção do ferro silico-manganês (FeSiMn) pode-se utilizar o método a partir de minério de manganês e quartzo, com redução simultânea do manganês e silício, ou aquele a partir de

minério de manganês silicoso, escória rica de FeMnAC, escória de FeSi75 (ferro silício com 75 % de silício) e quartzo (Faria, 2008e). A Figura 2.30 apresenta consumo de matéria prima para a produção de Ferro Silício Manganês.

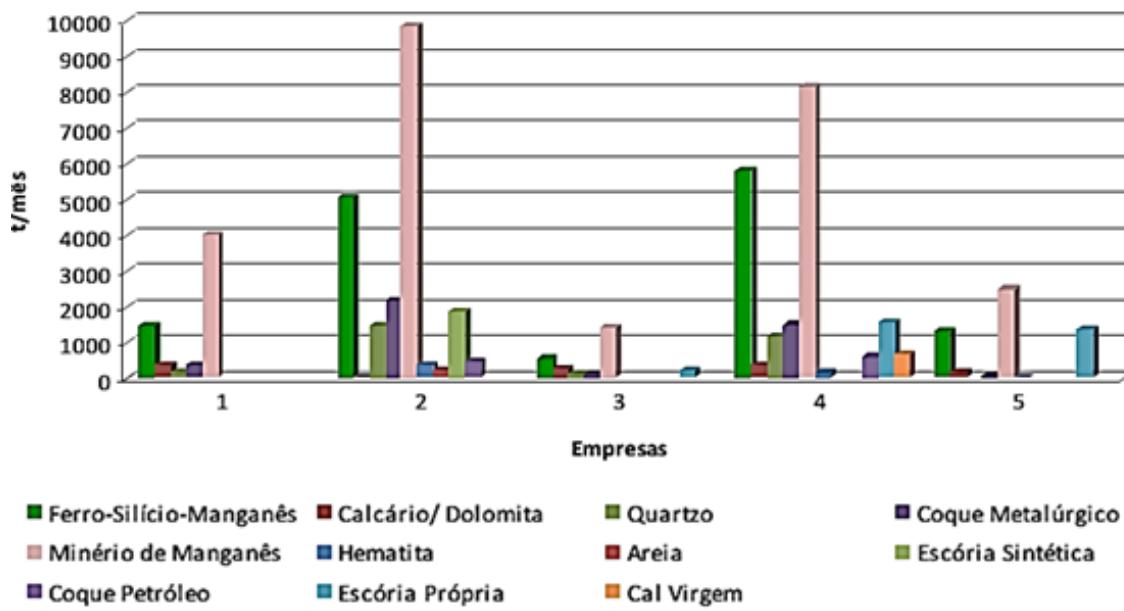


Figura 2.30 - Consumo mensal de matéria prima (FEAM, 2010).

Segundo Silveira e Almeida (1987g) a inclusão de escória de FeMnAC e de FeSi75 na carga aumenta a sua porosidade melhorando a permeabilidade da carga ao fluxo de gases, aumentando a eficiência de trocas térmicas gás-sólidos e gerando uma quantidade menor de finos. Produção de liga com menor teor de fósforo proporciona menor consumo de redutor e fundentes produzindo menos escória.

De acordo com Lúcio *et al.* (1980d) as principais reações do processo são representadas pelas equações:





Somando as equações 2.9 e 2.10 e as equações 2.11 e 2.10, chega-se às equações 2.12 e 2.13, respectivamente.



Segundo Ding e Olsen (2000a) essas são as duas equações que podem representar basicamente as reações entre metal, escória e fase gasosa na produção do ferro silício-manganês. Esse processo ocorre a temperaturas superiores às de produção de FeMnAC. Apenas nas proximidades de 1600 °C verifica-se o equilíbrio entre metal (FeSiMn) e escória.

2.7. ESCÓRIA DE FERRO SILÍCIO-MANGANÊS

Como mencionado anteriormente, a escória funciona como um filtro que retém as impurezas do processo de produção das ligas. Cada tipo de ferroliga a ser produzida irá gerar uma escória com composição, viscosidade e basicidade específicas.

Segundo Tangstad (1996j) e Olsen *et al.* (2007m) o controle da basicidade das escórias é essencial para a liga, elevando a produtividade. Mas, em alguns casos, em vez de gerar a escória pobre que evita a perda de produto a ser incorporado à liga, como o manganês, é adoto práticas de reciclagem e reaproveitamento de escória rica para recuperação do manganês.

O principal fator que afeta o processo de recuperação do manganês é o óxido de manganês na escória fundida, o qual é determinado pela composição da escória. Óxidos básicos desempenham um papel significativo na melhoria do comportamento de escória. Os óxidos CaO e MgO aumentam a atividade do MnO, mas diminui a atividade de SiO₂, que é necessário para produzir FeSiMn (Nikolaev, 1974a).

O termo basicidade da escória é definido para avaliar a função e as propriedades da mesma. As definições da basicidade da escória, depende das práticas e valores dos constituintes.

A basicidade binária – B1, é apresentada pela equação:

$$B1 = \frac{CaO}{SiO_2} \quad (2.14).$$

A equação a seguir apresenta a basicidade ternária – B2:

$$B2 = \frac{(CaO + MgO)}{SiO_2} \quad (2.15).$$

Vários autores estudaram os efeitos da basicidade (B1 ou B2) e deram diferentes valores para a produção SiMn como vemos na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Valores de basicidades de SiMn.

Autores	Basicidade binária – B1	Basicidade ternária – B2:
Gobdullin <i>et al.</i> (1982)	33 - 48	-
Emlin <i>et al.</i> (1986)	60 - 75	-
Chaichenko <i>et al.</i> (1986)	-	0,65 - 0,9

Para a avaliação correta da basicidade da escória, quanto ao teor de Si, a magnitude da basicidade da escória é feita a partir da equação 2.16, razão B3, em vez do B1 ou B2, porque o B3 está afetando mais a recuperação do manganês e silício que o B1 ou B2, devido à redução de SiO_2 em processo de fundição (Nikolaev, 1974b).

$$B3 = \frac{(CaO + MgO)}{Al_2O_3} \quad (2.16).$$

Segundo Nikolaev (1974c) descobriram que um valor ótimo para B3 é 2,5, enquanto Emlin *et al.* (1986) concluíram que um valor ótimo para B3 está na faixa de 1,2 - 2,2.

A temperatura de redução do manganês ($MnO + C = Mn + CO$) depende da atividade do MnO na escória, que é função da sua basicidade. Quanto maior a basicidade, maior a liberação do MnO e, portanto, menor a sua temperatura de redução.

De acordo com Olsen e Tangstad (2004a), a distribuição de Si entre ligas $SiMn$ e as escórias ($MnO-SiO_2-CaO-Al_2O_3-MgO$) é determinada, pela temperatura do processo, o teor de sílica da escória e da sua razão B_3 . Como exemplo, se a razão B_3 é reduzida 2 - 1, o teor de equilíbrio do Si na liga irá aumentar em cerca de 6 %, se a temperatura e o teor de sílica forem constantes. O efeito da temperatura é também considerável. O equilíbrio do teor de silício a partir da sílica é dado pela equação.



O teor de silício a partir da sílica irá aumentar em cerca de 6 % a cada aumento de 50 °C no intervalo de temperatura 1550 °C a 1700 °C. Esse processo só será factível se as temperaturas de redução de ambos os óxidos estiverem próximas uma da outra. No caso de atividades altas do MnO , haverá escorificação da sílica, resultando em uma escória viscosa e no acúmulo de carvão sem reagir no forno. Outro aspecto a ser considerado é o ponto de fusão da escória: se ela estiver abaixo da temperatura de redução da sílica, o forno despenderá, continuamente, energia na fusão, em detrimento da reação de redução.

Assim, dois procedimentos básicos se impõem na formação da escória. O primeiro contempla a diminuição da atividade do MnO (menores basicidades da escória) para aumentar a temperatura de redução do manganês aproximando-a da temperatura de redução do silício. Desse modo, a energia fornecida ao processo é distribuída mais igualmente entre as duas reações de redução. No segundo, pode-se obter a formação da escória com pontos de fusão mais elevados compatíveis com as temperaturas do processo. Isso é feito atuando na formulação da carga. Um dos aspectos mais relevantes para o processo é a distribuição do Si e Mn entre as ligas $Mn-Fe-Si-Csat$ e as escórias do sistema $MnO-SiO_2-CaO-MgO-Al_2O_3$. As relações de equilíbrio entre os dois sistemas para a pressão do Monóxido de Carbono (P_{CO}) igual a 1atm são mostradas na Figura 2.31 que traz o diagrama do sistema considerado (Ding e Olsen, 2000b).

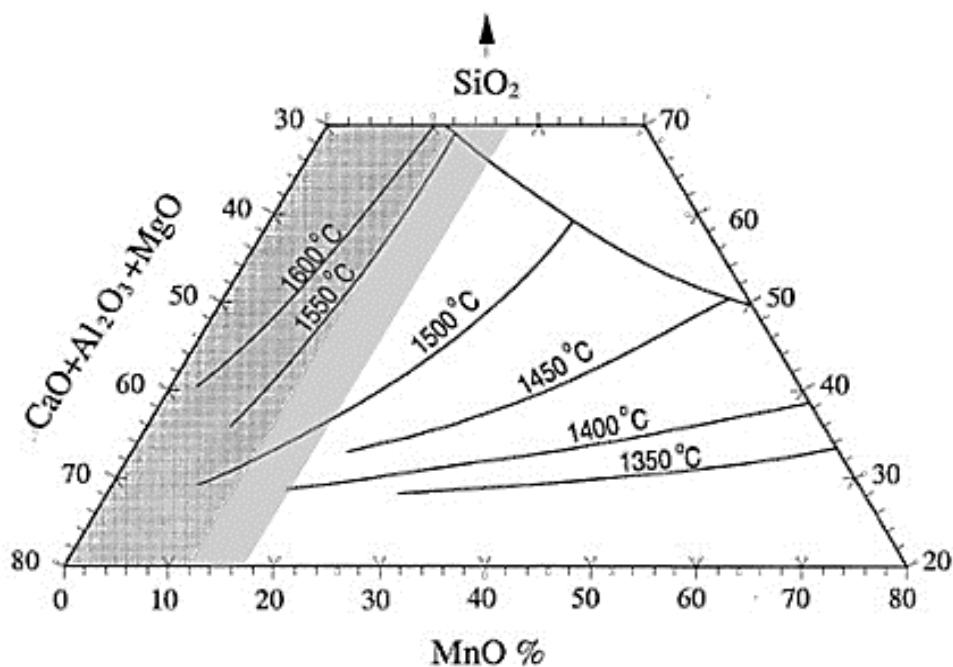


Figura 2.31 - Diagrama de equilíbrio metal-escória-gás (Ding e Olsen, 2000).

As áreas escurecidas correspondem aos teores de MnO das escórias de FeSiMn. A quantidade de escórias por tonelada de SiMn metálico é determinada principalmente pela relação minério/escória. O aumento da quota de escória FeMn às custas de minério Mn levará a maior proporção de escória/metal no processo de SiMn. Um grande volume de escória leva a um aumento do consumo de energia e, provavelmente, a maiores perdas de inclusões de metal na escória final (Olsen e Tangstad, 2004b).

Como dito anteriormente, há dois tipos de escória formada pelos processos de produção descritos: a escória rica, que é ácida, apresenta altos teores de Mn (superior a 40 %), sendo reciclável e reaproveitada como insumo na produção de FeSiMn (além de possuir baixíssimo teor de fósforo, o que representa uma vantagem para a produção de FeSiMn), e a escória pobre, que é básica, possui baixo teor de manganês ($MnO < 20\%$) e cerca de 30 % Si é produzida por meio da atualização da liga padrão através da adição de resíduos de silício da indústria de ferro silício e, ao final do processo de produção da ferroliga, é descartada (Olsen e Tangstad, 2004c).

Por possuir altos teores de Mn ela apresenta uma vitrificação que diminui sua resistência e a torna perigosa para o manuseio. A Figura 2.32 mostra a escória de ferro silício manganês e a Tabela 2.8 mostra a composição da escória.

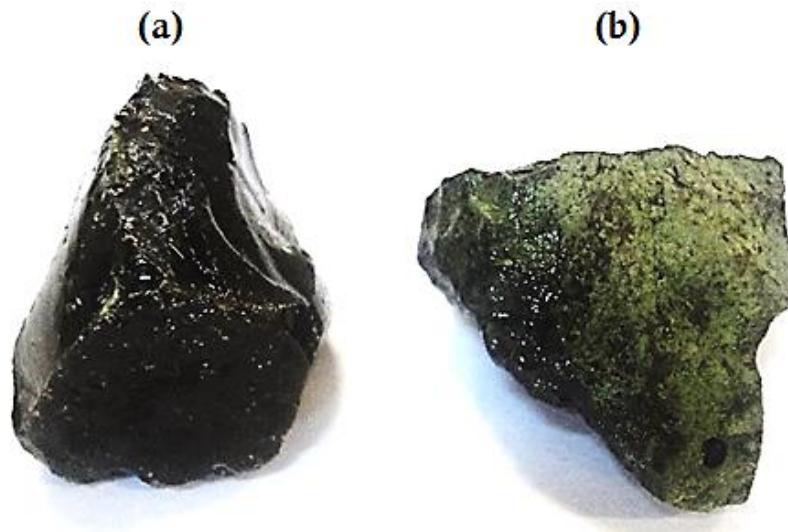


Figura 2.32 - Escória de ferro silício-manganês (a) rica e (b) pobre.

Tabela 2.8 - Traço da escória de ferro silício-manganês.

Compostos	FeSiMn (escoria pobre) (%)	FeMnAC (escoria rica) (%)	FeMnMC (escoria rica) (%)
MnO	14,00	26,00	24,50
SiO ₂	39,00	16,70	26,70
CaO	20,60	14,20	28,50
MgO	4,86	1,00	4,00
Al ₂ O ₃	17,28	18,00	6,90
FeO	0,28	0,70	0,48

2.7.1. Expansão da escória de ferro silício-manganês

O grande problema na utilização das escórias em obras de infraestruturas e superestruturas rodoviárias e ferroviárias se dá pelo fato de as escórias, como a de aciaria e alto forno, possuírem características expansivas devido, principalmente, à hidratação de cal livre (CaO) e do periclásio (MgO) e à corrosão e oxidação do ferro metálico residual, gerando tensões internas que originam trincas e até resultam na fragmentação do material, ou seja, numa expansão destrutiva. A hidratação de cal livre (CaO) e do periclásio (MgO) são os maiores responsáveis pela desintegração e enfraquecimento por diferença de volume molar nas suas reações, (Alexandre e Raguin, 1984; Ângulo *et al.*, 2001; Fernandes, 2010c; Geiseler *et al.*, 1999; Gumieri *et al.*, 2000; Machado, 2000a; Motz e Geiseler, 1998; Sahay *et al.*, 2000).

O óxido de cálcio total se encontra em teores que variam de 39 % a 50 % nas escórias de aciaria e alto forno, por isso se torna o maior responsável por sua expansibilidade, especialmente a baixas idades.

A procedência dos óxidos de cálcio e de magnésio nas escórias de aciaria está no final do processo do refino do aço, quando parte da cal e do óxido de magnésio presentes nas escórias se precipitam, ao ultrapassar os limites de solubilidade das escórias fundidas. Isso se deve à elevada quantidade de cal que é adicionada nessa fase do processo para proteger o refratário, (Fernandes, 2010d; Filev, 2003; Maas, 1984; Machado, 2000b; Tosticarelli *et al.*, 1985; Sbrighi e Battagin, 2002).

Esse potencial de expansão na escória de aciaria pode também ser vinculado à sua basicidade, pois escórias mais ácidas tendem a ser menos expansivas (Machado, 2000c).

Os problemas provenientes da expansibilidade das escórias podem ser impedidos por meio de um tratamento que proporcione a estabilização dos óxidos expansivos por meio de um período de estabilização química, ou cura, dessas escórias na forma sólida, ou também por meio de tratamento de escórias líquidas, modificando-se o processo de resfriamento aplicado nas escórias, ou ainda, adicionando-se agentes redutores e estabilizantes, visando à

estabilização e a melhoria das propriedades das escórias estudadas. A cura distingue pelo fim das reações de hidratação e carbonatação das substâncias expansivas por meio da exposição da escória ao intemperismo (Fernandes, 2010e).

Nóbrega (2007b), ao utilizar a escória de ferro silício-manganês em obras de infraestruturas e superestruturas rodoviárias, realizou, durante 14 dias, o ensaio de expansibilidade na escória submetendo a uma temperatura constante de 71 °C e deixando-a 7 dias completamente submersa em água e 7 dias saturada, segundo o método PTM 130/78 (Método de ensaio para avaliação do potencial de expansão de escória de aciaria), adaptado pelo Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais (DERMG).

Antes da realização do ensaio de expansibilidade a amostra de escória de ferro silício-manganês foi compactada, segundo os procedimentos do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), norma ME 049 (1994) para a obtenção da umidade ótima de compactação. O resultado é mostrado no gráfico das curvas da expansão (Figura. 2.33) e na Tabela 2.9.

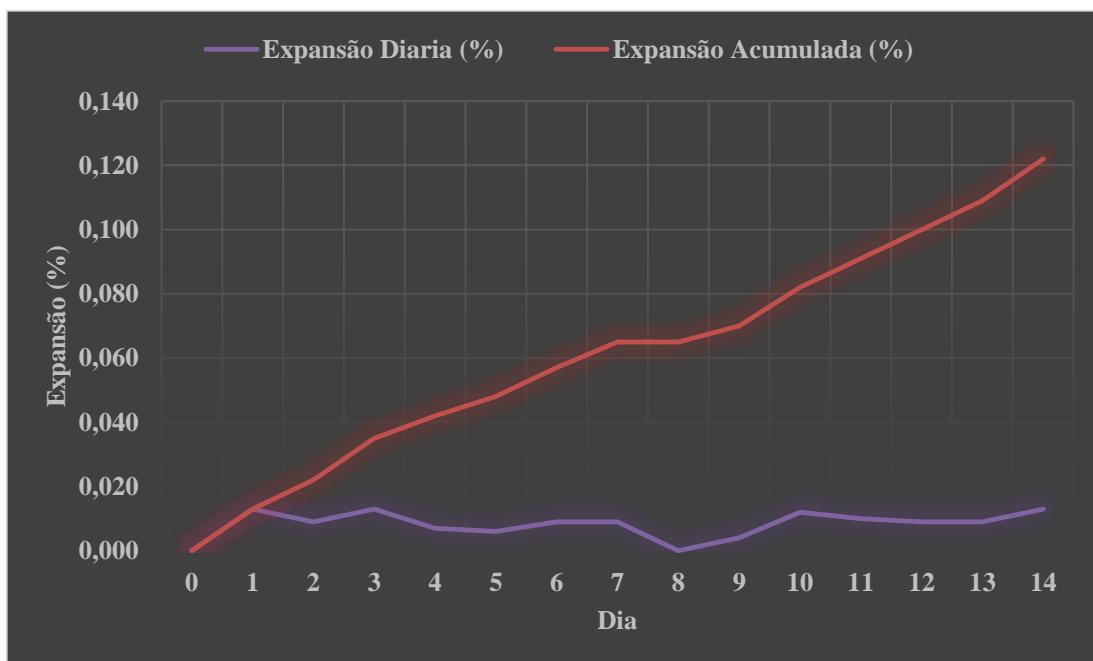


Figura 2.33 - Curvas da expansão diária e da expansão acumulada da escória (Nóbrega, 2007).

Tabela 2.9 - Resultados do ensaio de expansibilidade (Nóbrega, 2007).

Condição	Dia	Expansão Diária (%)	Expansão Acumulada (%)
Submersa	0	0,000	0,000
	1	0,013	0,013
	2	0,009	0,022
	3	0,013	0,035
	4	0,007	0,042
	5	0,006	0,048
	6	0,009	0,057
Saturada	7	0,009	0,065
	8	0,000	0,065
	9	0,004	0,070
	10	0,012	0,082
	11	0,010	0,091
	12	0,009	0,100
	13	0,009	0,109
	14	0,013	0,122

A expansão acumulada após 14 dias de ensaio foi de 0,12 %. De acordo com o DNER - ME 262 (1994), esse valor é inferior ao limite máximo especificado, que é de 3 %, e pela norma americana ASTM D 4792 (2000), que é de 0,5 %. O resultado demonstra que esse tipo de escória não é expansivo, de acordo com esse ensaio específico que avalia a expansão, apenas devido à hidratação dos óxidos de cálcio e magnésio. As condições que este ensaio foi submetido são severas e servem para avaliar o grau de expansão da escória nesses 14 dias, com o intuito de verificar a presença de quantidades excessivas de óxidos de cálcio e magnésio livres no material. Só assim ocorre o processo de hidratação por meio da aceleração

das reações, pela alta temperatura e pelas condições de umidade a que o material é submetido (Nóbrega, 2007c).

A escória de ferro silício-manganês tem grandes vantagens em relação às de aciaria e alto-forno, pois não têm necessidade de passar por cura, seu teor de cal livre é inferior a 1 %.

2.7.2. Aplicações da escória de ferro silício-manganês

A escória possui várias aplicações comerciais, entretanto, novas pesquisas estão sendo desenvolvidas com o objetivo de encontrar novos mercados para este resíduo, buscando um maior valor para o seu reaproveitamento. Depois que ela é reprocessada para separar quaisquer metais que possa conter, os subprodutos deste processo podem ser usados em cimento, lastro para ferroviário, pavimentação de estradas, fertilizante, vidro, cerâmica, e diversos outros fins.

A seguir, são listadas algumas das aplicações em uso das escórias de ferro silício-manganês.

- Matéria-prima para produção de cimento - os resultados obtidos mostram que escória SiMn em cimentos misturados não demonstram instabilidade de volume, os valores da resistência são muito próximos à argamassa de controle e têm uma matriz mais densa (Frias *et al.*, 2005);
- Matéria-prima para a indústria de vidro e materiais cerâmicos - obtida com êxito a partir de silício-manganês (Khater, 2001);
- Material para a produção de fertilizante silicato cálcico (Lúcio *et al.*, 1980e);
- Material para utilização nas infraestruturas rodoviárias - a escória de ferroliga de manganês não é expansiva e tem pequena absorção mostrando que, se usada como agregado na confecção de misturas asfálticas, é tão boa quanto um agregado convencional (Nóbrega, 2007d).

CAPÍTULO 3

3. MATERIAIS E METODOLOGIAS ADOTADAS

3.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentada a metodologia adotada para a determinação da caracterização física, mecânica, química, mineralógica, ambiental e elétrica.

Para tal, foram utilizadas amostras de escória de ferro silício-manganês fornecidas pela siderúrgica produtora de ferro silício-manganês em Minas Gerais, em sua unidade no município de Ouro Preto-MG. A escória foi amostrada e caracterizada por meio das especificações prescritas pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), AREMA (American Railway Engineering and Maintenance Association) e ASTM (American Society of Testing Materials).

Os ensaios de caracterização física, mecânica, ambiental e elétrica em laboratório, foram realizadas no Laboratório de Ferrovias e Asfalto do Departamento de Engenharia Civil (DECIV)/UFOP. Os ensaios de caracterização química e mineralógica foram realizados no Laboratório de Microscopia Eletrônica do Departamento de Geológica (DEGEO)/UFOP, Laboratório de Bio&Hidrometalurgia do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMET)/UFOP, Laboratório de Fluorescência de Raios X do Instituto de Ciências Exatas e Biológicas (ICEB)/UFOP e no Laboratório de Fluorescência de Raios X da Fundação Gorceix/Ouro Preto-MG.

Os ensaios de caracterização elétrica de campo foram realizados no simulador de resistividade em escala real na estação ferroviária de Mário Carvalho, localizada no município de Timóteo-MG. O material e as metodologias utilizadas para as caracterizações, análises e trabalhos de monitoramento em campo da escória ferro silício-manganês, estão sintetizados no fluxograma apresentado na Figura 3.1.

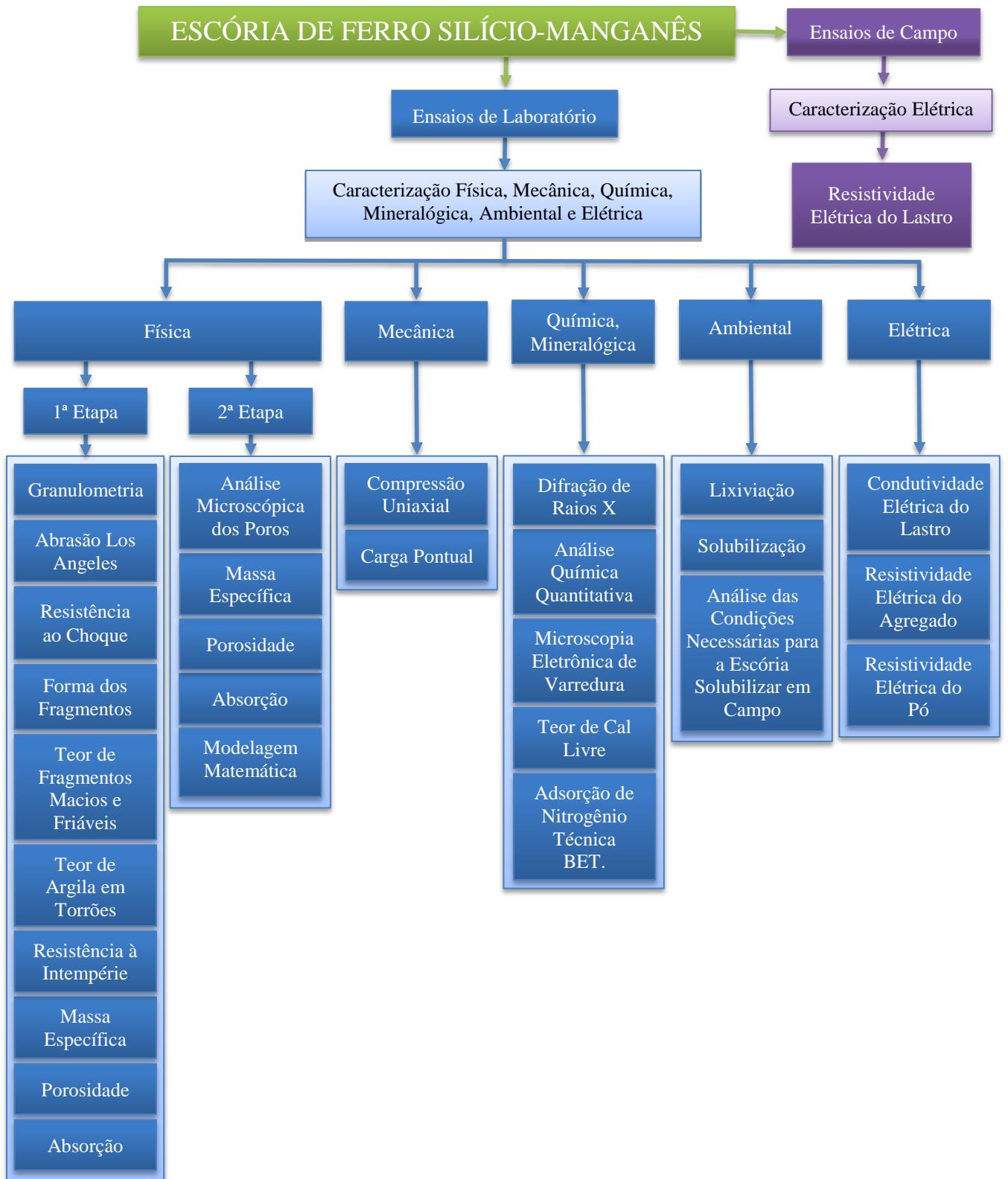


Figura 3.1 - Fluxograma dos ensaios realizados durante a pesquisa.

3.2. MATERIAL ESTUDADO

A escória de ferro silício-manganês utilizada para este estudo foi a escória básica, que possui baixo teor de manganês ($MnO < 20\%$) e cerca de 30 % Si, é produzida por meio da atualização da liga padrão através da adição de resíduos de silício da indústria de ferro silício. A Figura 3.2 mostra a escória utilizada para este estudo.



Figura 3.2 - Escória de ferro silício-manganês.

3.3. METODOLOGIAS ADOTADAS

3.3.1. Ensaios de laboratório

3.3.1.1. Granulometria

A granulometria constitui um indicativo indireto muito importante de diversas outras características do lastro, entre as quais a resistência à quebra, à resiliência, à acumulação de deformação plástica e ao cisalhamento.

A granulometria dos materiais foi avaliada de acordo com a norma NBR NM 248 (2003) – Agregados – Determinação da composição granulométrica. Nos ensaios, empregou-se um peneiramento manual e mecânico, com a série de peneiras padronizadas pela metodologia da norma. A Figura 3.3 mostra as peneiras utilizadas nos ensaios de granulometria.



Figura 3.3 - Peneirador e peneiras da série normal e intermediaria.

O ensaio de granulometria é o processo que visa definir, para determinadas faixas preestabelecidas de tamanho de grãos, a porcentagem em peso que cada fração possui em relação à massa total da amostra em análise, ou seja, são obtidos os pesos retidos e acumulados e, consequentemente, as porcentagens retidas e passantes em cada peneira. Além de definir a dimensão máxima característica, o módulo de finura, o coeficiente de não uniformidade, o coeficiente de curvatura, o índice de contaminação do material estudado e o teor de materiais pulverulento.

A dimensão máxima característica é a grandeza associada à distribuição granulométrica do agregado, correspondente à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5 % em massa. Ao observar as faixas granulométricas recomendadas pela NBR 5564 (2011), verifica-se que o diâmetro máximo característico do material para lastro ferroviário varia de 63 a 50 mm.

O módulo de finura é a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100. De acordo com a norma NBR 7211 (2009) – Agregados para concreto – Especificação, o material para lastro ferroviário tem suas faixas granulométricas entre as faixas granulométricas especificadas para brita 2, 3 e 4. A Tabela 3.1 mostra a variação do módulo de finura das britas.

Tabela 3.1 - Módulo de finura das britas 2, 3 e 4.

Material	Módulo de finura
Brita 2	7,68
Brita 3	8,87
Brita 4	9,78

Ao observar as faixas granulométricas recomendadas pela NBR 5564 (2011), e as faixas granulométricas recomendadas pela NBR 7211 (2009), verifica-se que o módulo de finura do material para lastro ferroviário varia entre 8 e 8,90.

O coeficiente de não uniformidade é determinado pela seguinte equação.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (3.1).$$

O coeficiente de curvatura é calculado pela seguinte equação.

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{60} \cdot D_{10})} \quad (3.2).$$

Sendo:

D₁₀ - Diâmetro correspondente a porcentagem passante (10) no gráfico das partículas;

D₃₀ - Diâmetro correspondente a porcentagem passante (30) no gráfico das partículas;

D₆₀ - Diâmetro correspondente a porcentagem passante (60) no gráfico das partículas.

Quando os vazios do lastro estão totalmente preenchidos de finos, o valor de Cu é aproximadamente 36 e, ainda, lastros contaminados com Cu > 36 mostram um acentuado decréscimo de estabilidade porque os finos passam a comandar o comportamento tensão-deformação (Reinschmidt *et al.*, 1989; Muniz da Silva, 2002c).

A Tabela 3.2 apresenta o coeficiente de não uniformidade e o coeficiente de curvatura para solos de acordo com o Unified Soil Classification System – (USCS) e ABNT.

Tabela 3.2 - Limites dos coeficientes de não uniformidade e de curvatura.

Material	USCS		ABNT	
	Cu	Cc	Cu	Cc
Bem graduado	> 4	Entre 1 e 3	-	Entre 1 e 3
Uniforme	< 4	-	-	-
Muito uniforme	-	-	< 5	-
Uniformidade média	-	-	Entre 5 e 15	-
Não uniforme	-	-	> 15	-

Segundo Muniz da Silva (2002d), de acordo com as faixas granulométricas recomendadas pela NBR5564 (2011), verificou-se que o Cu do lastro padrão é menor que 4, ou seja, tanto à luz da USCS quanto da ABNT, o lastro padrão especificado constitui um material de granulometria uniforme.

O ciclo de vida útil do lastro é inversamente proporcional ao índice de contaminação, pois quanto mais contaminado o lastro, menor será sua vida útil, ou seja, menor será sua capacidade de exercer suas funções estruturais. Um dos pontos mais críticos é a perda da capacidade de drenagem. Se houver uma grande quantidade de partículas finas, pode ocorrer cimentação dessas partículas na presença de água e de outros materiais contaminantes oriundos do sublastro e do excesso de carga dos vagões. Por isso é importante, no ensaio de granulometria, a determinação do teor de material pulverulento.

Para determinar se os materiais de lastro apresentam contaminação granulométrica, Selig e Waters (1994f), definiram o chamado “fouling index” ou índice de contaminação do lastro, que é calculado pela equação:

$$FI = P4 + P200 \quad (3.3).$$

Sendo:

FI - Índice de contaminação do lastro;

P4 e P200 - Percentagens em pesos passantes, respectivamente, nas peneiras 4 e 200.

A Tabela 3.3 apresenta as faixas de valores para os índices com a contaminação do lastro, de acordo com estes autores.

Tabela 3.3 - Estado de contaminação do lastro (Selig e Waters, 1994).

Grau de contaminação	Índice de contaminação
Limpo	< 1
Moderadamente Limpo	1 – 9
Moderadamente Contaminado	10 – 19
Contaminado	20 – 39
Altamente Contaminado	> 39

O teor de material pulverulento refere-se ao somatório das partículas com dimensões inferiores a 75 µm (0,075 mm), incluindo os materiais solúveis em água presentes nos materiais de lastro. A determinação deste teor é feita de acordo com NBR NM 46 (2003) – Agregados – Determinação do material fino que passa pela peneira 75 µm, por lavagem.

O material mais fino que a abertura da malha de 75 µm pode ser separado das partículas maiores de forma mais eficiente e completa por peneiramento úmido do que através do uso de peneiramento seco. Portanto, quando se deseja fazer determinações precisas do material mais fino que 75 µm em agregado miúdo ou graúdo, este método de ensaio deve ser utilizado previamente ao peneiramento seco para a análise granulométrica do agregado. Usualmente é pequena a quantidade adicional de material mais fino que 75 µm obtida pelo processo de

peneiramento seco. Caso essa quantidade seja expressiva, a eficiência da operação de lavagem deve ser verificada, podendo tal fato ser uma indicação da degradação do agregado.

3.3.1.2. Abrasão Los Angeles

O ensaio de abrasão Los Angeles permite quantificar o desgaste sofrido pelo material quando inserido no equipamento padrão (máquina de abrasão Los Angeles), juntamente com uma carga abrasiva (12 esferas de aço, as quais, juntas, têm massa aproximada de 5 kg) submetendo-o a um número determinado de rotações e a uma velocidade de 30 e 33 rpm. O número de esferas e o número de rotações dependem da faixa de graduação a qual o material em estudo se encaixa, de acordo com a norma NBR NM 51 (2001) – Agregado graúdo – Ensaio de abrasão Los Angeles. A Figura 3.4 mostra a máquina de abrasão Los Angeles utilizadas no ensaio.



Figura 3.4 - Máquina de abrasão Los Angeles e as cargas abrasivas.

O índice de abrasão Los Angeles é calculado pela equação:

$$A_n = \frac{m_n - m'_n}{m_n} \cdot 100 \quad (3.4).$$

Sendo:

A_n - Abrasão “Los Angeles” na graduação n;

m_n - Massa total seca colocada na máquina;

m'_n - Massa da amostra lavada na peneira de 1,7 mm e seca após o ensaio.

De acordo com a norma NBR 5564 (2011), o limite máximo especificado para o ensaio de abrasão Los Angeles é de 30 %.

3.3.1.3. Resistência ao choque - Índice de Tenacidade TRETON

A resistência ao choque é um índice empregado para a diferenciação de materiais utilizados como lastro em via férrea, pois esse tipo de esforço é muito comum em ferrovias durante as passagens das composições. Desta forma, o resultado do ensaio pode antever o comportamento do material quando aplicado como material de lastro.

O ensaio consiste em uma amostra de 60 fragmentos, divididos em três conjuntos de 20 fragmentos cada, escolhidos ao acaso com dimensões entre 16 a 19 mm. Depois da escolha dos fragmentos, os mesmos são lavados e posteriormente secos em estufa com temperaturas entre 100 °C e 110 °C, por 24 horas. Os fragmentos são retirados da estufa e assim que atingem a temperatura ambiente suas massas são verificadas, então, os fragmentos são colocados no aparelho Treton, sendo submetidos a dez choques provocados pela queda livre de uma massa pesando 16 kg a uma altura de queda de 380 mm. O material obtido é lavado em água corrente até que fique livre de pó, sendo seco em estufa entre 100 °C e 110 °C por mais 24 horas. Após os fragmentos atingirem a temperatura ambiente, são verificadas as suas massas. De posse das massas, é calculada a resistência ao choque como especificado na norma NBR 5564 (2011) – Anexo E – Determinação da resistência ao choque. A mesma preestabelece o limite máximo de 25 % de resistência ao choque. A Figura 3.5 apresenta o aparelho utilizado no ensaio.



Figura 3.5 - Aparelho Treton.

3.3.1.4. Forma dos fragmentos

A forma apropriada do material de lastro é fundamental para o bom funcionamento do mesmo. Portanto, formas laminares e alongadas dos grãos não são desejadas, aconselhando-se a utilização de formatos cúbicos.

A determinação do formato dos materiais em estudo seguiu os procedimentos e a classificação prescrita na norma NBR 5564 (2011) – Anexo A – Determinação da forma dos fragmentos da pedra britada. Para o ensaio foram pesados 35 kg de escória de ferro silício-manganês e passadas nas peneiras de 63, 50, 38, 25 e 19 mm, obtendo-se as porcentagens retidas e acumuladas de cada peneira. A partir dessas porcentagens foram obtidos 100 fragmentos por meio da equação:

$$N_i = \left(\frac{100}{F_1 + F_2 + \dots + F_i + \dots + F_n} \right) \times F_i \quad (3.5).$$

Sendo:

100 - Quantidade de fragmentos estipulados para o ensaio;

N_i - Quantidade de fragmentos para medição, da fração i ;

F_i - Porcentagem em massa retida individualmente correspondendo à fração i ;

$F_1+F_2+\dots+F_n$ - Soma das porcentagens em peso retidas individuais das frações obtidas.

Com os 100 fragmentos obtidos pela equação acima, as dimensões dos fragmentos foram analisadas com base na terminologia indicada na Figura 3.6 que apresenta o desenho esquemático utilizado para análise nos ensaios, e com base nos critérios de classificação prescritos na Tabela 3.4.

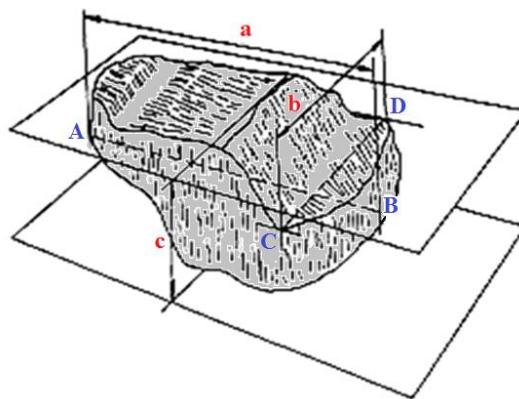


Figura 3.6 - Dimensões utilizadas para análise no ensaio.

Tabela 3.4 - Classificação da forma dos fragmentos do corpo de prova.

Medida das relações b/a e c/b	Forma
$b/a > 0,5$ e $c/b > 0,5$	Cúbica
$b/a < 0,5$ e $c/b > 0,5$	Alongada
$b/a > 0,5$ e $c/b < 0,5$	Lamelar
$b/a < 0,5$ e $c/b < 0,5$	Alongada ou lamelar

De acordo com a norma NBR 5564 (2011), o material deve apresentar uma forma cúbica e um limite máximo de partículas não cúbicas de 15 %.

3.3.1.5. Teor de fragmentos macios e friáveis

O material para lastro deve ser composto, em quase toda sua totalidade, preferencialmente por partículas consideradas sãs, livres de fragmentos macios ou facilmente friáveis. Para que este ensaio possa ser realizado, as amostras devem estar dentro das faixas granulométricas indicadas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Composição granulométrica mínima do corpo de prova.

Tamanho do fragmento (mm)	Massa mínima (g)
9,5 a 12,5	200
12,6 a 19,0	600
19,1 a 25,0	1500
25,1 a 37,5	4500
37,5 a 50,0	12000

Dessa forma, é contada a quantidade de partícula constituinte em cada amostra. No aparelho para a determinação do teor de material macio e friável, cada partícula é submetida ao movimento esclerométrico da vareta de bronze, separando as partículas macias e friáveis.

A partícula que apresentar sulco, sem o depósito do metal da vareta ou aquela separada do corpo de prova, deve ser considerada macia e friável. Após todas as partículas serem ensaiadas, é verificada a massa e a quantidade de partículas que são consideradas macias e friáveis, para que possa ser calculada a porcentagem média ponderada destas partículas em relação ao total dos corpos de prova.

As determinações desses teores foram feitas de acordo com a norma NBR 5564 (2011) – Anexo F – Determinação do teor de fragmento macio e friável, que descreve a confecção de um equipamento específico para este ensaio que é apontado na Figura 3.7.



Figura 3.7 - Aparelho para a determinação do teor de material macio e friável.

A norma NBR 5564 (2011), preestabelece o limite máximo de 5 % de teor de material macio e friável.

3.3.1.6. Teor de argila em torrões e materiais friáveis

Argila em torrões e outros materiais friáveis são partículas presentes nos agregados, suscetíveis a serem desfeitas pela pressão entre os dedos polegar e indicador. O teor de argila em torrões e materiais friáveis é determinado de acordo com a NBR 7218 (1987) – Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis, editada pela ABNT. A determinação desse teor é importante para que o material de lastro não seja levado à via com significativa contaminação. O limite máximo preestabelecido pela norma NBR 5564 (2011), para o teor de argila em torrões e materiais friáveis é de 0,5 %.

3.3.1.7. Determinação da resistência à intempérie

Este ensaio simula os danos provocados pelas intempéries após anos de exposição do material ao meio ambiente. O procedimento deste ensaio está descrito na norma NBR 5564 (2011) – Anexo C – Determinação da resistência à intempérie.

Esta norma recomenda avaliar a porcentagem em massa de resíduos coletados em relação à massa total do corpo de prova e observar modificações em relação ao mesmo, especialmente quanto à evolução de trincas e/ou à falta de homogeneidade entre os 10 fragmentos com massas entre 100 e 200 g, durante 40 ciclos de imersão em solução de sulfato de sódio e secagem em estufa dos mesmos.

Cada ciclo de imersão e secagem deve ser de, no mínimo, 8 horas. De acordo com a norma NBR 5564 (2011), o limite máximo especificado para o ensaio de resistência às intempéries é de 10 %.

3.3.1.8. Massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água

A absorção é a capacidade de o material reter água nos poros, calculado como o aumento da massa do material, devido ao preenchimento dos poros permeáveis por água. O tamanho e a distribuição dos tamanhos dos poros podem determinar a quantidade e o mecanismo de absorção.

Ao comparar a porosidade e a absorção por meio da densidade aparente do agregado, constata-se que, quanto menor a densidade aparente dos agregados de mesma origem, maior é a absorção de água, em uma escala linear. Portanto, a absorção do agregado, como função da densidade, está diretamente relacionada com a porcentagem de interstícios (poros) na massa cristalina das partículas (Lettier *et al.*, 1949).

Lee (1969), em seus estudos sobre absorção, ao determinar as curvas de distribuição dos tamanhos dos poros, verificou que os agregados possuem poros de tamanhos distintos e que

estes variam de maneira desigual, evidenciando que a absorção depende não somente da porosidade, mas também da frequência de ocorrência dos tamanhos dos poros.

Logo, o índice de absorção da água pode não ser superior ao índice de porosidade aparente, destacando que uma rocha com alta porosidade não tem necessariamente alta absorção de água, pois, seus poros e cavidades podem não ser conectados. Os tamanhos dos poros podem não ser suficientemente grandes para absorver água ou podem conter ar, o que impediria a absorção. Com o conhecimento do processo de formação dos agregados, podemos compreender como são formadas suas estruturas internas e, com isso, estimar sua porosidade, formação das partículas, superfície e caracterização dos poros, absorção, massa específica e resistência.

A porosidade é uma característica que resulta da formação de espaços não preenchidos por matéria sólida, mas que podem ser ocupados por água ou ar. Os espaços vazios são designados como poros ou vazios. Existem outras formações criadas por material rochoso, em que os poros correspondem a diáclases e fraturas e não propriamente poros. Assim, a porosidade é considerada a razão entre o volume dos poros e o volume total da rocha (Sing *et al.*, 1985a).

A superfície interna do material consiste em poros e em fraturas que são mais fundos do que largos. Existem dois tipos de poros: os poros abertos, que são cavidades ou canais que se comunicam com a superfície da partícula, ou os poros fechados, os quais são encontrados no interior do material. Ambos podem receber o nome de porosidade intraparticular. A Figura 3.8 mostra uma representação dos poros.



Figura 3.8 - Características dos poros.

Poros são classificados de acordo com seu tamanho, em três categorias: microporos (diâmetro dos poros menores que 2 nm), mesoporos (poros de diâmetro entre 2 – 50 nm) e macroporos (diâmetro dos poros maiores que 50 nm) de acordo com Sing *et al.* (1985b).

Em geral, a porosidade tende a ser menor em rochas mais antigas e profundas. Este decréscimo na porosidade é devido, principalmente, à cimentação e ao confinamento das camadas sobrepostas. Porém há muitas exceções a esse padrão, principalmente quando as condições normais de sobrecarga não prevalecem (Lima, 2000).

Nas rochas sedimentares e sedimentos não consolidados, os espaços vazios são poros intergranulares, homogeneamente distribuídos. Nas rochas ígneas e metamórficas, os espaços vazios são constituídos por fraturas, que podem ser abertas e conectadas entre si, permitindo a infiltração e o fluxo da água ou do ar.

As características dos poros geralmente determinadas são: porosidade, tamanho do poro, distribuição dos tamanhos dos poros e área interna específica, chamada de superfície específica. Os poros em escórias são cavidades de formas irregulares, basicamente abertos e fechados que não se conectam por capilares e não apresentam fraturas, pois a escória é composta por uma massa densa formada a alta temperatura (Kandhal e Lee, 1972).

A porosidade dos agregados pode ser determinada, direta ou indiretamente, por meio de vários métodos. Um método muito utilizado para determinar a porosidade total é o de determinar a densidade aparente (poros, canais, fraturas), sejam eles interconectados ou não e a densidade real, e calcular a porosidade pela razão entre as duas densidades utilizando a seguinte equação:

$$PT = 100 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_r} \times 100 \quad (3.6).$$

Sendo:

PT - Porosidade Total, %;

ρ_{ap} - Densidade aparente do agregado;

ρ_r - Densidade real do agregado.

A porosidade total é um indicador da capacidade de absorção máxima do agregado, que na prática, pode nunca vir a ocorrer. A Figura 3.9 mostra o espaço numa rocha.

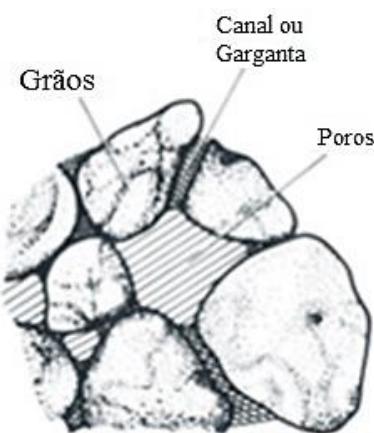


Figura 3.9 - Espaço intersticial numa rocha clástica (Serra, 1984).

Para os ensaios de massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água, foram selecionados 10 corpos de prova, com dimensão de aproximadamente 5 cm. Os mesmos foram lavados e escovados, sendo então colocados em um recipiente adequado, no qual foi adicionada água destilada até 1/3 da altura dos corpos de prova.

Após 4 horas adicionou-se mais água até atingir 2/3 da altura dos corpos de prova, os quais foram novamente deixados em descanso por mais 4 horas, até que os corpos de prova foram totalmente cobertos por água destilada, ficando submersos por um tempo total de 48 horas.

Após 48 horas os corpos foram retirados da água e enxugados com um pano levemente umedecido, sendo, então, pesados separadamente, para obter a massa saturada M_{sat} . Em seguida, os corpos de prova foram submersos em água e novamente pesados separadamente usando o dispositivo da balança para pesagem hidrostática. Para assim serem determinadas as respectivas massas submersas M_{sub} .

Por último, os corpos de prova foram colocados na estufa a uma temperatura de 70 ± 5 °C por 48 horas. Após essas 48 horas, os corpos de prova foram retirados da estufa e deixados em repouso para resfriamento, sendo, em seguida, pesados individualmente para a obtenção da massa seca M_{sec} . De posse dos valores das massas, foram calculados os valores da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água. Estas propriedades foram determinadas de acordo com a norma NBR 5564 (2011) – Anexo B – Determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água.

A norma NBR 5564 (2011) especifica para os ensaios de massa específica aparente um limite mínimo de 2,5 g/cm³; para porosidade aparente um limite máximo de 1,5 % e para o ensaio de absorção de água um limite máximo de 0,8 %. A Figura 3.10 apresenta o equipamento utilizado no ensaio.

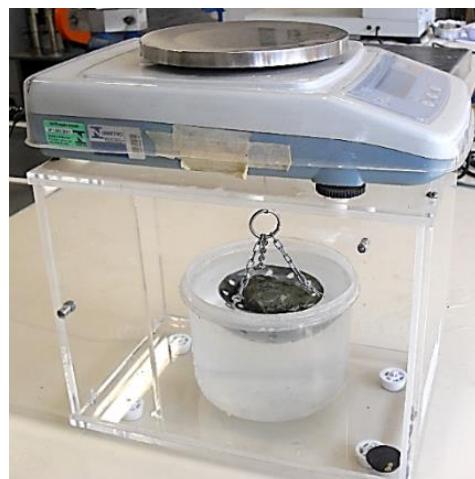


Figura 3.10 - Balança e o dispositivo para a pesagem hidrostática.

3.3.1.9. Análise microscópica dos poros

A escória de ferro silício-manganês foi submetida a uma análise microscópica por meio de um microscópio óptico trinocular, acoplado a uma micro câmera digital de captura de vídeo e imagem com zoom de até 800x, da marca PANTEC, na qual foram identificados e analisados os poros da escória (Figura 3.11).



Figura 3.11 - Microscópio óptico trinocular.

3.3.1.10. Modelagem matemática de regressão polinomial e exponencial

Todo material possui certa porosidade associada a ele, decorrente de imperfeições no que tratamos ser um contínuo de massa. A existência dos poros está associada ao processo de geração do material, seja este processo natural ou artificial (Yoshimura *et. al.*, 2005; Norton, 1973).

Para determinar experimentalmente como a porosidade influênciava nas tensões geradas no sólido, foi utilizada uma série de ensaios, determinando assim a porosidade e a tensão de ruptura de diversos fragmentos. Então, usou-se o método da interpolação polinomial para construir uma função que relaciona as duas grandezas. Usa-se o método da interpolação polinomial quando se conhece uma função desejada $f(x)$ em apenas $n + 1$ pontos de um dado intervalo $[a, b]$ e se deseja conhecer a função em qualquer ponto deste intervalo.

Para tal, com base nos pontos conhecidos, construiu-se uma função que substitua $f(x)$ dentro de um limite de precisão. Esta função designa-se por função aproximante. A escolha da função aproximante é aqui um polinômio, mas poderia ser outra. Se a escolha fosse por

funções racionais teria uma interpolação racional, se fosse por funções exponenciais encontrar-se-ia uma interpolação exponencial. Um exemplo de interpolação pode ser visto na Figura 3.12.

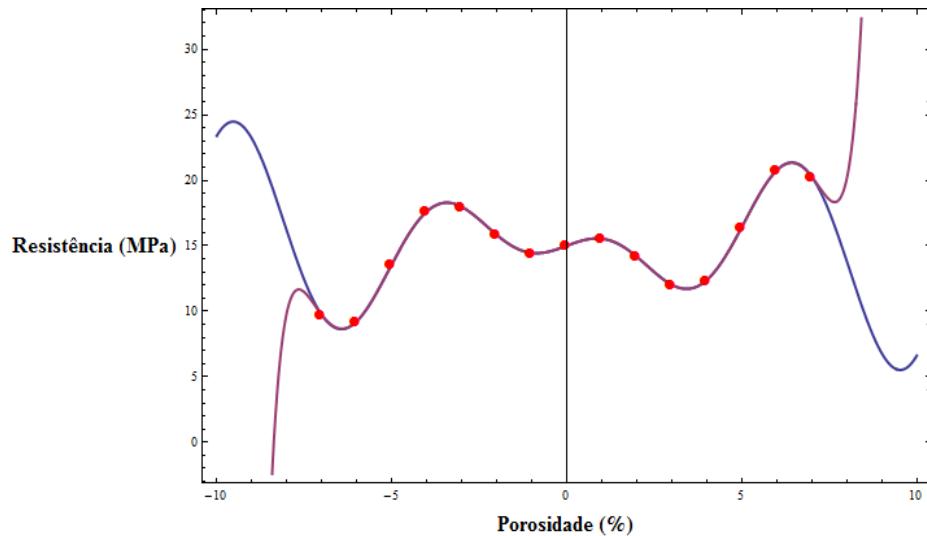


Figura 3.12 - Interpolação polinomial.

Nesta Figura a função verdadeira é a que está em azul e a função aproximante é a que está em vermelho. Nota-se que no intervalo dos pontos a função aproximante e a função real são praticamente iguais, contudo fora deste intervalo há uma rápida divergência entre as duas.

Os resultados da carga pontual, massa específica aparente, absorção e porosidade aparente, foram aplicados no modelo de regressão polinomial e exponencial, sendo que a equação polinomial de quinto grau foi a que melhor se ajustou à curva experimental, embora dentro do intervalo dos dados as equações polinomiais tendem a se aproximar. A equação apresentou um grau de confiabilidade de 70 % para os intervalos especificados.

3.3.1.11. Resistência à compressão uniaxial

Com referência na norma NBR 5564 (2011) – Anexo D – Determinação da resistência à compressão uniaxial no estado saturado, foi realizado o ensaio de resistência do material

estudado. A resistência à compressão uniaxial é um dos indicadores mais importantes para a aferição da qualidade do lastro. A norma NBR 5564 (2011), especifica um limite de compressão máxima de 100 MPa. A Figura 3.13 mostra o formato dos corpos de prova e a presa usada para o ensaio de compressão uniaxial.

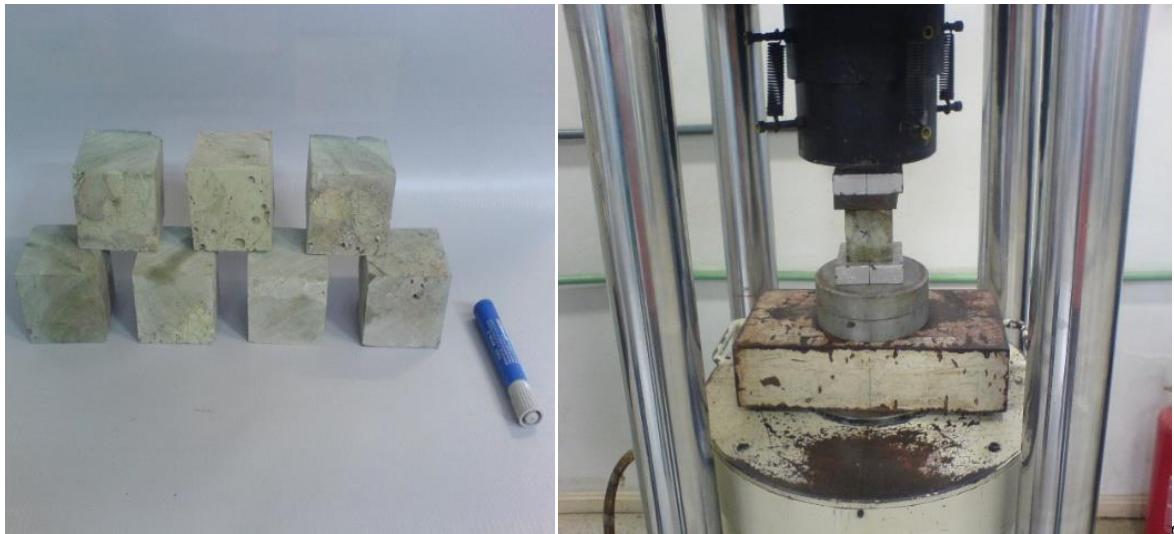


Figura 3.13 - Corpos de prova e presa.

A norma prescreve 5 cubos de aresta de 7 a 8 cm para a realização do ensaio. Os resultados do ensaio foram utilizados para a obtenção do parâmetro C (coeficiente experimental) usado para o ensaio de carga pontual.

Os corpos de prova, moldados de forma a obter cubos são colocados na câmara úmida imersos em água durante 48 horas, em seguida os corpos de prova são colocados na prensa e são rompidos.

3.3.1.12. Carga pontual

Um método alternativo de aferir a resistência à compressão simples da amostra consiste na determinação do índice de resistência ou índice de carga pontual através do ensaio de carga pontual prescrito pela norma ASTM D5731 (2008) – Standard Test Method for

Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications.

O ensaio tem como objetivo provocar a ruptura da amostra com forma aproximadamente prismática, com diâmetros variando entre 30 e 80 mm. A amostra é comprimida entre duas ponteiras na posição correspondente à metade do comprimento e à metade da largura de cada corpo de prova. Nos ensaios realizados, o carregamento foi aplicado com orientações distintas dos corpos de prova. O ensaio só tem validade quando o plano de ruptura coincide com a seção transversal de cada corpo de prova. Para cada ensaio determinou-se o índice de carregamento pontual a partir da carga de ruptura, estimado com base na equação:

$$Is = \frac{P}{De^2} \quad (3.7).$$

Onde:

Is - Índice de carregamento pontual;

P - Carga de ruptura;

De - Diâmetro equivalente das partículas.

O diâmetro equivalente das partículas da escória é definido pela seguinte equação:

$$De = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (3.8).$$

Onde:

A - Área de seção mínima do plano através dos pontos de apoio e carga.

Com isso, as áreas do plano de ruptura são definidas de forma aproximada, de acordo com a norma ASTM D5731 (2008). A Figura 3.14 mostra o sistema de aplicação e de execução de ensaio de carga pontual.



Figura 3.14 - Aparelho de carga pontual.

3.3.1.13. Análise por difração de raios X

Por meio da difração de raios X pode-se identificar a composição cristalina de um determinado material. As células cristalinas são formadas por planos definidos, relacionados diretamente ao raio atômico de cada um dos átomos e aos seus tipos de ligações. As distâncias interplanares, característica dos minerais presentes, aparecem como picos no difratograma. Esta técnica possui uma limitação para minerais com distâncias atômicas parecidas ou bastante heterogêneas.

A amostra é submetida a uma radiação monocromática de raios X, tendo como resposta o espaçamento d obtido pela equação de Bragg:

$$n\lambda = 2d \cdot \sin\theta \quad (3.9).$$

Onde:

n - É um inteiro conhecido como a ordem do feixe difratado;

λ - Comprimento da onda do tubo do aparelho;

θ - Ângulo de incidência;

d - Distância (espaçamento) interplanar.

Este processo ótico tem seus registros coletados em um detector na forma de um sinal elétrico amplificado, que é registrado na forma digital ou analógica, correspondentes aos difratogramas. Os difratogramas apresentam picos característicos que são os resultados da difração de raios X em planos cristalográficos da amostra, relacionados à posição, à intensidade e à forma da estrutura cristalina, caracterizando assim, a composição mineralógica dos materiais analisados.

A análise dos resultados é processada por meio de software específico - MDJ Jades, que compara o pico da incidência de elétrons com um banco de dados disponíveis para caracterização dos minerais constituintes.

Nas análises efetuadas, utilizou-se um difratômetro da marca Shimadsu, modelo D/MAXB, com tubo de ferro e intervalo de varredura de 7° a 70° e radiação de 20 kV e 5 μA . A velocidade adotada no ensaio foi de 2 graus/minutos com duração de ± 35 minutos. A Figura 3.15 demonstra o aparelho usado no ensaio.



Figura 3.15 - Difratômetro.

3.3.1.14. Análise química quantitativa

O espectrômetro de fluorescência de raios X é um instrumento que permite a determinação quantitativa dos elementos presentes em uma determinada amostra, por meio da aplicação de raios X na amostra e a posterior análise dos raios fluorescentes emitidos.

Sendo uma técnica não destrutiva, é comumente utilizada para pesquisa e controle de qualidade de uma ampla gama de materiais. A análise por fluorescência de raios X resumidamente consiste em três fases: excitação dos elementos que constituem a amostra, dispersão dos raios X característicos emitidos pela amostra e detecção desses raios X emitidos.

Em uma amostra, quando um elemento é excitado, este tende a expulsar os elétrons do interior dos níveis dos átomos. Por consequência, os elétrons dos níveis mais afastados realizam um salto quântico para preencher a vacância. Cada mudança eletrônica constitui uma perda de energia para o elétron, e esta energia é emitida na forma de um fóton de raios X, energia característica e bem definida para cada elemento.

A medida da intensidade (número de raios X detectados por unidade de tempo) dos raios X característicos emitidos pelos elementos que constituem a amostra, se baseia na análise quantitativa por fluorescência de raios X. Por meio de uma fonte radioativa são emitidos os raios X, que excitam os elementos constituintes e, por sua vez, emitem linhas espectrais com energias características do elemento e cujas intensidades estão relacionadas à concentração do elemento na amostra.

As amostras utilizadas nesse ensaio passaram por dois tipos de preparação. A primeira preparação foi realizada com 20 g de amostra pulverizada passante na peneira de 75 µm, então, a amostra foi aquecida de 100 °C a 120 °C em forno, e em seguida, foi adicionado 0,6 g de ácido estuário - C₁₈H₃₆O₂ (atua como ‘cola’ para fixar a amostra), então a amostra passou por uma nova pulverização por 4 minutos, para misturar o material da amostra com o ácido estuário, em seguida a mistura foi prensada na forma de pastilha.

Na segunda preparação, foram utilizadas 10 g de amostra pulverizada passante pela peneira de 75 µm, em seguida, a amostra foi colocada em um anel plástico vedado por filtro de plástico e inserida uma sacola plástica com as pontas cortadas para formar vácuo na amostra durante o ensaio. Nas análises, foi utilizado um espectrômetro de raios X, modelo EDX – 700 HS / 800 HS / 900 HS da marca Shimadsu Energy Dispersion, apresentado na Figura 3.16.



Figura 3.16 - Espectrômetro de raios X.

3.3.1.15. Análise química por microscopia eletrônica de varredura (MEV/EDS)

Para a observação e a distinção de diferentes tipos de minerais, a partir da emissão e interação de feixes de elétrons sobre uma amostra, foi usada a técnica da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), a qual permite a caracterização do ponto de vista de sua morfologia, sua organização e sua composição química. O que se observa no microscópio eletrônico de varredura é decorrente da variação de contraste, que ocorre quando um feixe de elétrons primário varre a superfície da amostra em análise de ponto a ponto.

A distinção qualitativa da morfologia de partículas das amostras do material em estudo foi realizada utilizando-se um microscópio eletrônico de varredura do tipo JEOL JSM – 5510. A Figura 3.17 mostra o equipamento utilizado no ensaio de MEV.



Figura 3.17 - Microscópio eletrônico de varredura.

O funcionamento do microscópio incide na emissão de feixes de elétrons por um filamento capilar de tungstênio (eletrodo negativo), através da aplicação de uma diferença de potencial que pode variar de 0,5 a 30 kV. Essa variação de voltagem admite a variação da aceleração dos elétrons e também provoca o aquecimento do filamento. A parte positiva em relação ao filamento do microscópio (eletrodo positivo) atrai fortemente os elétrons gerados, resultando em uma aceleração em direção ao eletrodo positivo. As lentes condensadoras são as responsáveis pelo alinhamento dos feixes em direção à abertura da objetiva, que ajusta o foco antes que os elétrons atinjam a amostra analisada, corrigindo assim o percurso dos feixes. A Figura 3.18 apresenta o funcionamento do microscópio.

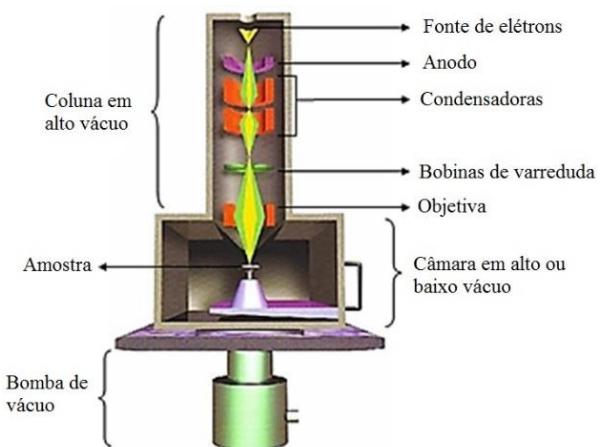


Figura 3.18 - Princípio de funcionamento do microscópio eletrônico de varredura.

No ensaio as amostras precisam ser condutoras em presença de carbono e, para isso, sofrem o processo de metalização. Com isso, as amostras são arranjadas sob a forma de monocamadas em peças cilíndricas metálicas (pastilhas), revestidas de grafite por uma fita de dupla face, então são depositadas em um evaporador de vácuo por um período de aproximadamente 1 hora.

Em seguida, faz-se a vaporização dos eletrodos de grafite por cerca de 10 minutos. Terminado este processo, as amostras tornam-se condutoras e as pastilhas são introduzidas na câmara do microscópio, fazendo um vácuo de 3 minutos.

As amostras são, então, submetidas a processos de bombardeamento de elétrons e feitas fotomicrografias. Neste estudo, os aumentos adotados foram de 50x, 100x, 150x e 270x nas amostras, sendo utilizados diferentes equipamentos, tais como os espectrômetros de raios-x, detector de elétrons retro espalhados, detector de elétrons absorvidos e detector de elétrons transmitidos.

3.3.1.16. Teor de cal livre

Na determinação do teor de cal livre, foi usado como referência o método de ensaio prescrito pela NBR NM 13 (2004) – Cimento Portland – Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol.

Esta norma especifica a determinação do óxido de cálcio livre por dissolução em etileno glicol e subsequente titulação em solução padronizada de ácido clorídrico (HCl), utilizando-se uma mistura como indicador de pH (solução mista de indicadores).

Para o ensaio foram pesadas três amostras contendo 1,00 g cada e misturadas em três elemayers com tampa, cada um contendo 30 ml de etileno glicol com pH corrigido (verde) e cacos de vidro pequenos. Depois foram aquecidos os elemayers em banho-maria entre 65 °C a 70 °C durante 30 minutos, agitando o frasco a cada 5 minutos.

Após este processo, foi feita a filtragem com filtro de filtragem lenta. A filtragem foi feita molhando-se o filtro com água destilada e em seguida ligando a bomba de vácuo para que o filtro fique bem aderido, depois foi despejado no filtro o conteúdo do elemayer, então se lava o precipitado do elemayer 2 a 3 vezes com o etileno glicol com o pH corrigido aquecido no banho-maria até no máximo 70 °C.

Após estes processos, o filtrado é transferido para o elemayer limpo e são adicionadas de 3 a 5 gotas de indicador misto. Então, se titula a solução acima com HCl 0,1 mol/l até mudar de verde para rosa. Deste modo, é utilizada a fórmula abaixo para calcular o teor de cal livre:

$$\text{CaO}_{\text{livre}} = \frac{F \cdot V \cdot 0,002804}{m} \quad (3.10).$$

Onde:

F - Fator de HCl, calculado;

m - Massa da amostra triturada empregada no ensaio;

V - Volume de HCl utilizado na titulação.

Quando o tempo é inferior a 30 dias, este método não diferencia óxido (CaO) de hidróxido [Ca(OH)₂] e não determina o cálcio que está quimicamente combinado em solução sólida com o óxido de ferro (FeO) e o óxido de manganês (MnO) ou na forma de silicatos. Entretanto, no escopo das análises pretendidas neste trabalho, os resultados deste teste são mais que satisfatórios.

3.3.1.17. Adsorção de nitrogênio - Técnica BET.

Muitos parâmetros que descrevem a estrutura de poros de uma amostra, por exemplo, o volume de poros, o volume total de distribuição de tamanho de poros e a área de superfície específica, podem ser determinados por meio da adsorção de nitrogênio. Dependendo do

equipamento utilizado para realizar o ensaio de adsorção de nitrogênio, faixa de diâmetro de poro de 0,3 – 300 nm, ou seja, mesoporos e macroporos são determinados.

No ensaio de adsorção de nitrogênio, apenas os poros abertos são determinados, e o modelo de poros cilíndricos é assumido no valor da distribuição de tamanho dos poros. A dessorção na caracterização da distribuição de tamanho dos poros é afetada pela rede de poros, quando a pressão é reduzida, o líquido irá evaporar se os poros abertos forem grandes, mas os poros do mesmo tamanho que estão ligados à superfície por canais estreitos continuam cheios (Allen, 1997).

O volume total de poros, ou seja, volume de poros em um intervalo de tamanho de poros pré-determinado podem ser verificados a partir de qualquer adsorção ou fase de dessorção. O volume de distribuição de poros é determinado de acordo com o modelo BJH (Barrett *et al.*, 1951).

A distribuição de tamanho dos poros pode ser determinada a partir dos dados de adsorção e dessorção da isoterma. Um modelo de poros cilíndricos é assumido, com a suposição de poros abertos e a ausência de redes de poros. A distribuição de tamanho de poros determinado a partir dos dados de dessorção de nitrogênio descreve a estrutura dos poros (Conner *et al.*, 1986).

Área de superfície específica é calculada de acordo com a equação (Brunauer *et al.*, 1938):

$$\frac{p}{V(p_0 - p)} = \frac{1}{V_m \cdot c} + \left(\frac{c - 1}{V_m \cdot c} \cdot \frac{p}{p_0} \right) \quad (3.11).$$

Sendو:

V - Volume adsorvido;

V_m - Volume da monocamada;

p - Pressão da amostra;

p_0 - Pressão de saturação;

c - Constante relacionada à entalpia de adsorção (BET constante).

Conhecendo o valor de V_m pode-se calcular a área superficial específica pela equação abaixo:

$$S_{\text{BET}} = \frac{V_m \cdot n_a \cdot a_m}{m \cdot v_L} \quad (3.12).$$

Onde:

n_a - Número Avogadro que é constante;

a_m - Área transversal ocupada por cada molécula de nitrogênio ($0,162 \text{ nm}^2$);

m - Peso da amostra;

v_L - Volume molar de gás nitrogênio (22.414 cm^3).

A teoria se baseia no pressuposto de que a primeira camada adsorvida envolve energias adsorção/adsorvente, e as seguintes camadas as energias de interação absorção/adsorção.

3.3.1.18. Ensaio de lixiviação

Os resíduos são caracterizados como perigosos quando, submetidos a testes de lixiviação, conforme NBR 10005 (2004) – Lixiviação de resíduos, apresentarem teores de poluentes no extrato lixiviado em concentração superior aos padrões constantes na listagem nº 07 anexa à norma.

O ensaio consiste na pesagem de 100 g de amostra triturada abaixo da peneira de 9,5 mm, que é, então, transferida a um frasco de lixiviação, para mistura com a solução de extração nº 01 ou nº 02 (ácido acético glacial ou solução de ácido acético e hidróxido de sódio, dependendo do pH do resíduo). Na sequência, o frasco é mantido em agitação durante 18

horas à temperatura de 25 °C, com rotação de 30 vezes por minuto em agitador rotatório. Após esse período, procede-se à filtração do produto e o extrato lixiviado é analisado (Fernandes e Prado Filho, 2007b). A Figura 3.19 apresenta os equipamentos utilizados no ensaio.



Figura 3.19 - Frascos de lixiviação e aparelho de agitação.

3.3.1.19. Ensaio de solubilização

Para a avaliação da solubilidade dos compostos presentes utilizou-se a metodologia especificada pelo Teste de Solubilização, executado conforme prevê a norma NBR 10006 (2004) – Solubilização de resíduos. O ensaio consiste em utilizar 250 g de amostra triturada abaixo da peneira de 9,5 mm, misturá-la com 1000 ml de água destilada, sem correção do pH. A mistura permanece em repouso, sendo agitada manualmente de tempos em tempos, durante um período de 7 dias. Após este período, a amostra é filtrada e o material filtrado analisado.

Na norma de classificação de resíduos, este ensaio é utilizado para diferenciar um resíduo inerte (Classe IIB) de um não inerte (Classe IIA). A análise do filtrado foi feita de acordo com a metodologia proposta pelo "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater" (WEF, 1998a).

3.3.1.20. Análise das condições necessárias para a escória solubilizar em campo

Por meio de uma análise do procedimento descrito para a realização do ensaio de solubilização, como a granulometria, a massa da amostra, a quantidade de água, o tempo e a condição de confinamento a qual a amostra é submetida, foi feito o cálculo da quantidade de água necessária para a solubilização em escala real, e mediante os resultados do cálculo, foram analisadas as condições necessárias para a escória solubilizar em campo.

3.3.1.21. Resistividade elétrica do agregado da escória

Em vias férreas que possuem sistemas de bloqueio automático ou circuito de sinalização de via, utilizam um circuito elétrico que passa pelos trilhos uma tensão elétrica, transformando os trilhos em condutores elétricos para a transmissão e a recepção do circuito de via. Este sistema é utilizado para detectar a presença do trem na via, a partir do curto-circuito provocado pelos rodeiros deste trem nos trilhos. Este curto-circuito em termos ferroviários é definido como ocupação na via. A Figura 3.20 mostra um esquema da sinalização na via permanente.

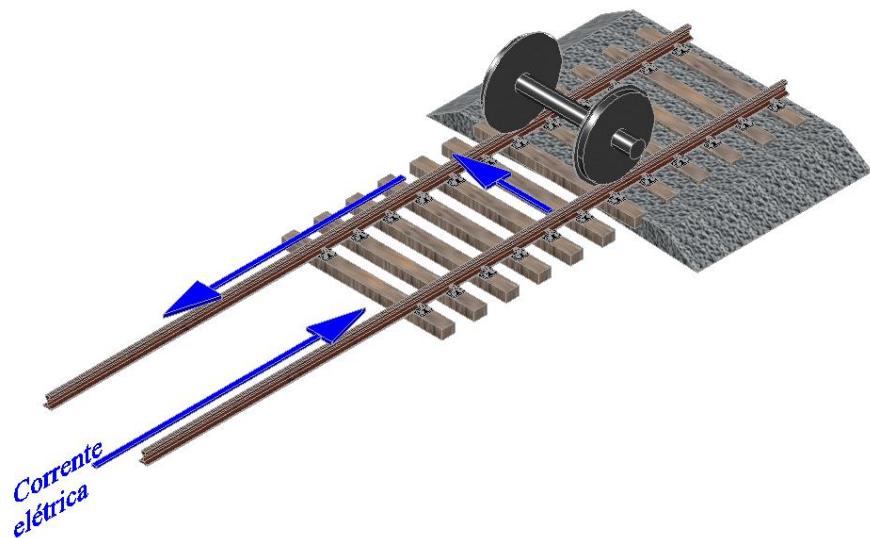


Figura 3.20 - Esquema da transmissão da corrente na via e o curto-círcito provocado pelos rodeiros.

Os dormentes e o lastro atuam como isolantes elétricos entre os trilhos e entre estes e o sublastro. Por este motivo os materiais utilizados como lastro não devem ser condutores.

Para o estudo da resistividade foram realizados ensaios de laboratório e de campo, todos os ensaios seguiram os conceitos da resistividade elétrica, também chamada de resistência elétrica específica, que representa o quanto o material se opõe à passagem da corrente elétrica.

Quanto menor for o valor da resistividade de um determinado material, mais facilmente ele permite a passagem de corrente elétrica, ou seja, maior é sua condutividade elétrica. A resistividade é diretamente proporcional à resistência que o material apresenta e inversamente proporcional ao seu comprimento. A unidade de resistividade no Sistema Internacional de Unidades (SI) é o ohm vezes metro ($\Omega \cdot m$). Matematicamente temos que a resistividade de um material pode ser calculada a partir da equação da segunda lei de Ohm:

$$R = \frac{\rho \times l}{A} \Rightarrow \rho = \frac{R \times A}{l} \quad (3.13).$$

Onde:

ρ - Resistividade elétrica;

R - Resistência;

l - Comprimento;

A - Área da secção.

Para a realização dos ensaios experimentais da resistividade do agregado da escória em estudo, foram escolhidos aleatoriamente 5 fragmentos com dimensões entre 84,3 mm e 75,66 mm. Foi utilizado na montagem do experimento um tripé com uma garra metálica isolada com borracha e um megômetro digital. Os ensaios foram realizados com os fragmentos no estado saturado e seco. Os fragmentos da escória foram lavados e escovados, então foram

colocados em um recipiente adequado onde foi adicionado água destilada e mantidos submersos à temperatura média de 18 °C por um período de 48 horas. Após as 48 horas os corpos foram retirados da água e enxugados com um pano levemente umedecido, dessa forma, foram submetidos ao ensaio de resistividade elétrica no estado saturado.

Por último os fragmentos foram colocados na estufa a uma temperatura de (70 ± 5) °C por 48 horas. Ao término das 48 horas os fragmentos foram retirados da estufa e deixados em repouso para o resfriamento dos mesmos. Assim, foram submetidos ao ensaio de resistividade elétrica no estado seco. A Figura 3.21 mostrar a montagem do ensaio de resistividade do agregado da escória.



Figura 3.21 - Ensaio experimental da resistividade do agregado da escória.

A resistividade elétrica tanto em laboratório quanto em campo foi determinada com um aparelho chamado megômetro, o aparelho é capaz de gerar várias tensões de teste variando entre 100, 250, 500 e 1000 V.

Após uma bateria de testes preliminares, cada um com duração de 10 minutos e variando as tensões, foi escolhida uma tensão de teste de 500 V, pois não houve mudanças significativas nos valores das resistividades medidas em relação às outras tensões. Todos os ensaios de laboratório foram submetidos a mesma tensão. A Figura 3.22 apresenta o equipamento utilizado nos ensaios para medir a resistividade elétrica da escória.



Figura 3.22 - Megômetro digital.

3.3.1.22. Resistividade elétrica do pó da escória

Com o passar do tempo o lastro sofre um desgaste proveniente da passagem de veículos, gerando partículas finas na via permanente, se houver uma grande quantidade de partículas finas, pode ocorrer cimentação dessas partículas na presença de água e de outros materiais.

Esta cimentação causada pelo excesso de finos pode conduzir eletricidade gerando uma falsa ocupação (sinal de linha ocupada nas seções de bloqueio sem que haja um trem ou uma equipe da manutenção na via), provocando paralisações das operações causando vários transtornos e até mesmo o caos na ferrovia. Por este motivo é fundamental estudar a resistividade da escória tanto em pó como na forma de agregado.

Em laboratório foi montado um ensaio experimental para medir a resistividade do pó da escória de ferro silício-manganês. O ensaio foi realizado com material retido e passante na peneira 200 no estado saturado e seco. Foi utilizado na montagem do experimento um tripé com uma garra metálica isolada com borracha, duas rolhas de borracha furadas, duas hastas de aço e um tubo de acrílico com um comprimento (l) de 37,5 cm, raio interno (R) de 1,55 cm e área da secção do tubo (A) de $380,113 \text{ cm}^2$. A Figura 3.23 mostrar os materiais utilizados realização do ensaio.

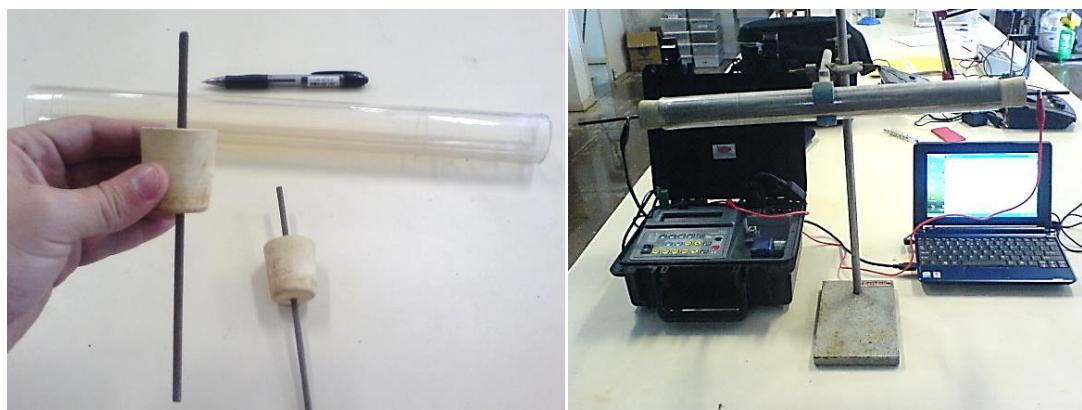


Figura 3.23 - Materiais utilizados para a montagem do experimento e o experimento montado.

3.3.1.23. Condutividade elétrica do lastro

Para os ensaios de condutividade elétrica foi montada uma caixa teste simulando uma seção transversal ferroviária. A caixa foi construída em madeira e revestida por uma membrana plástica, a qual possui 2,20 m de comprimento, 1,20 m de largura e 0,50 m de altura, sendo preenchida com escória a uma altura de 0,35 m e água até o nível de 0,10 m acima da escória. A montagem do simulador seguiu as especificações de Sousa (2007b). A Figura 3.24 mostra a caixa teste construída para o ensaio de condutividade.



Figura 3.24 - Simulador de condutividade elétrica.

Utilizando um aparelho chamado condutivímetro, foi medida a condutividade elétrica do meio, no qual o material encontra-se imerso em água. O ensaio procurou simular uma

situação sem drenagem do lastro e da via permanente sobre uma intensa e prolongada chuva, gerando com isso, a saturação do lastro. Na montagem, também foram medidos o pH e a temperatura durante o teste. As Figuras 3.25 e 3.26 mostram os equipamentos e um desenho esquemático da montagem do experimento.



Figura 3.25 - Condutivímetro e o peagâmetro digital.

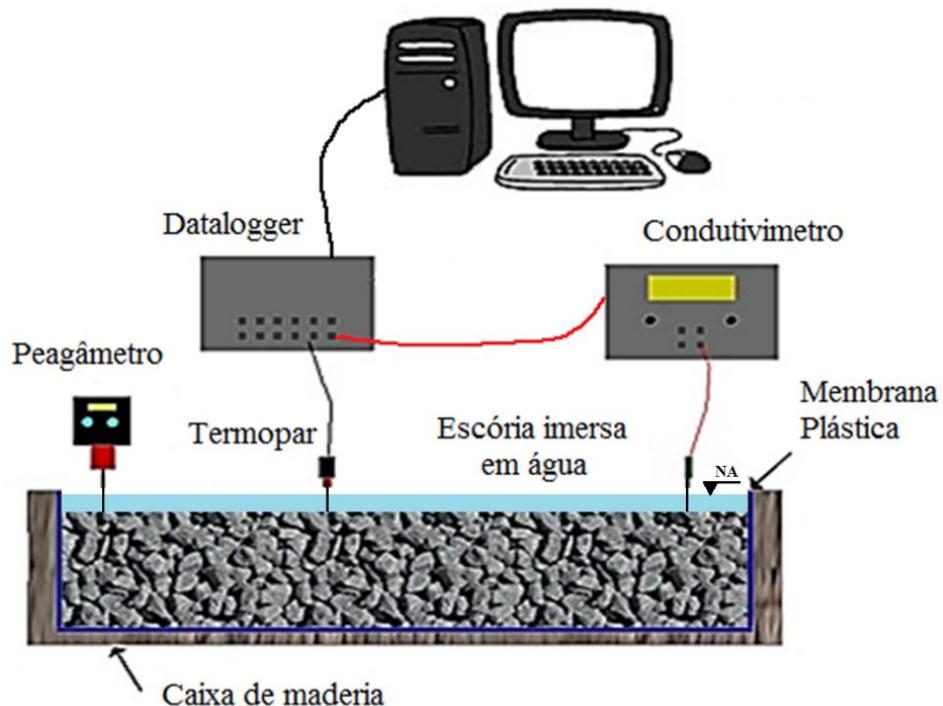


Figura 3.26 - Projeto da montagem do experimento.

Durante todo o experimento foram coletados continuamente os dados de condutividade, de temperatura e do pH da água. O objetivo da montagem foi investigar o efeito da condutividade da escória de ferro silício-manganês utilizada como lastro, o tempo de investigação foi fixado em 90 dias.

Este tempo de investigação foi baseado em estudos prévios de Nascimento (2003), que constatou que, após 45 dias de tratamento com água, a expansão volumétrica da escória tendia a estabilizar. A retirada da água contida na caixa foi feita a cada 6 dias e o enchimento feito após 24 horas. A unidade da condutividade no Sistema Internacional de Unidades (SI) é o Micro Siemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

3.3.2. Ensaios de campo

3.3.2.1. Resistividade elétrica do lastro

Um simulador de resistividade elétrica em escala real foi construído na estação ferroviária Mário Carvalho, localizada no município de Timóteo - MG, para estudar a resistividade elétrica da escória de ferro silício-manganês *in situ*, e identificar a influência do tipo de elemento utilizado na construção da via permanente sobre a resistividade do material. O simulador de resistividade foi construído baseado no simulador desenvolvido pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) em parceria com a Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) (Silva *et al.*, 2000; Sousa, 2007c).

O simulador é formado por duas seções testes, sendo uma com dormentes de madeira e a outra com dormentes de aço, cada uma possuindo 200 cm de comprimento e seção transversal idêntica à adotada no projeto da Estrada de Ferro Vitória - Minas (EFVM). Na construção das seções testes, foram executados os mesmos procedimentos de fixação e socaria empregados convencionalmente em campo pela equipe de manutenção ferroviária da EFVM. As Figuras 3.27 a 3.29 apresentam a geometria das seções testes e as mesmas construídas em campo.

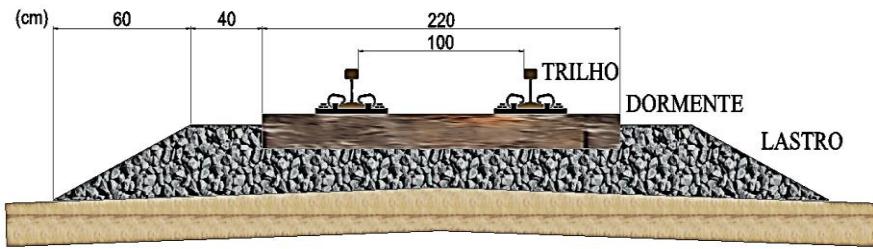


Figura 3.27 - Geometria da seção teste com dormente de madeira.

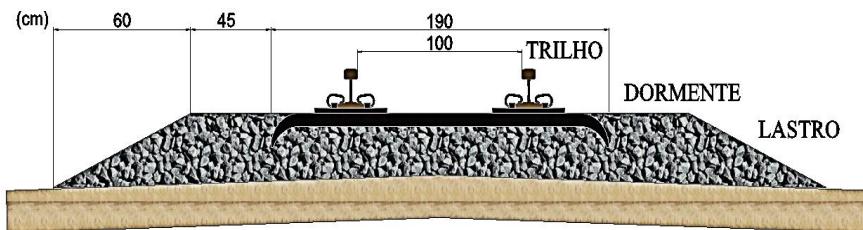


Figura 3.28 - Geometria da seção teste com dormente de aço.



Figura 3.29 - Seção teste com dormentes de madeira e com dormentes aço.

Os ensaios de resistividade elétrica foram realizados com uma tensão teste de 500 V, monitoradas com auxílio de um megômetro. A resistividade elétrica foi avaliada entre trilhos e entre eletrodos nas seções testes de dormentes de madeira e de dormentes de aço, sendo em ambos os casos os eletrodos instalados adjacentes aos trilhos e espaçados entre si de 135 cm. As Figuras 3.30 a 3.33 demonstram de forma mais detalhada os esquemas dos testes utilizados nas seções.

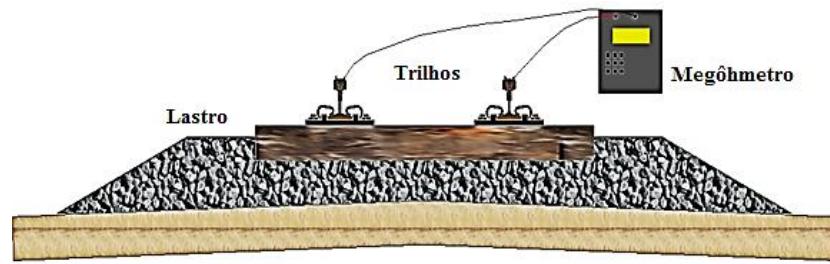


Figura 3.30 - Método de teste em dormentes de madeira com medida de resistividade nos trilhos.

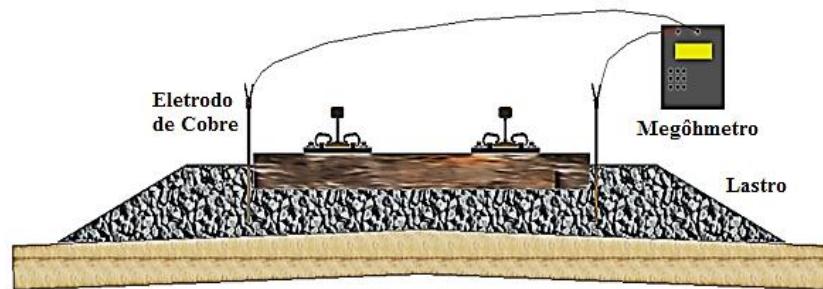


Figura 3.31 - Método de teste em dormentes de madeira com medida de resistividade nos eletrodos de cobre.

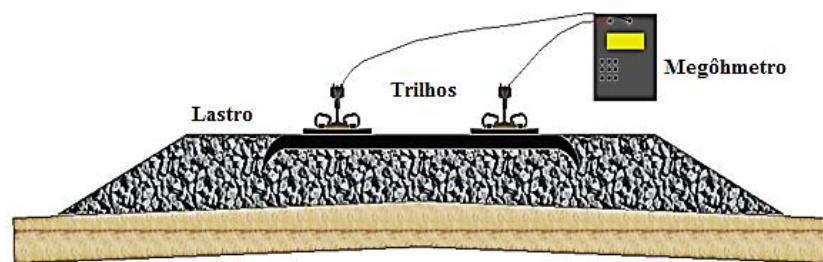


Figura 3.32 - Método de teste em dormentes de aço com medida de resistividade nos trilhos.

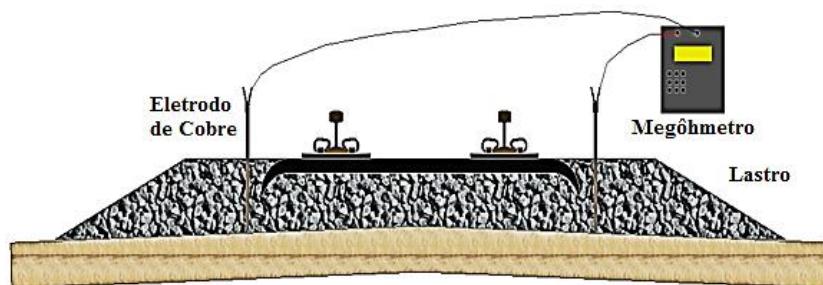


Figura 3.33 - Método de teste em dormentes de aço com medida de resistividade nos eletrodos de cobre.

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais e de campo, feitos com as amostras de escórias de ferro silício-manganês estudadas. Em laboratório, foram realizados os ensaios de caracterização física, mecânica, química, mineralógica, ambiental e elétrica. Os resultados da caracterização física são apresentados em duas etapas. Na primeira etapa da caracterização física, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de granulometria, abrasão Los Angeles, resistência ao choque - índice de tenacidade TRETON, forma do material, teor de fragmentos macios e friáveis, teor de argila em torrões, resistência a intempéries, massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água. Na segunda etapa, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de análise microscópica dos poros, massa específica aparente, porosidade aparente, absorção de água e uma modelagem matemática de regressão polinomial e exponencial. Em campo foram realizados os ensaios de caracterização elétrica, por meio de um simulador de resistividade em escala real construído na estação ferroviária Mário Carvalho, em Timóteo-MG.

4.2. AMOSTRAGEM

A amostragem foi feita utilizando-se dos procedimentos indicados na norma NBR 6490 (1985) – Reconhecimento e amostragem para fins de caracterização de ocorrência de rochas e na norma NBR 5564 (2011) – Anexo G – Amostragem de material para lastro para via férrea. A escória de ferro silício-manganês foi amostrada na unidade de Ouro Preto da siderúrgica produtora de ferro silício-manganês e transportada pela mesma em bag plástico até o Laboratório de Ferrovias e Asfalto do DECIV/UFOP.

Para cada ensaio foram coletadas 3 amostras com cerca de 100 kg cada, somando um total de 300 kg. A amostragem foi realizada no local de produção em uma pilha. A coleta do material foi realizada em partes diferentes da pilha, deslocando-se o material desde o ponto mais alto até o recipiente de coleta, de forma que fossem recolhidos fragmentos de todas as alturas. A coleta foi feita em tantos pontos opostos na pilha quanto possíveis.

O material coletado foi misturado manualmente com uma pá sobre uma superfície limpa e plana formando um círculo com espessura constante. Esse círculo foi então dividido em quatro partes iguais. Foram removidos dois quartos opostos de material. Os outros dois quartos opostos que sobraram foram reunidos e um novo quarteamento foi feito da mesma forma como descrito até aqui. Essa operação foi repetida até se obter a quantidade necessária requerida para a realização dos ensaios. A Figura 4.1 mostra o esquema para a preparação da amostra.



Figura 4.1 - Quarteamento da amostra.

4.3. ENSAIOS DE LABORATÓRIO

4.3.1. Primeira etapa

4.3.1.1. Granulometria

O ensaio de granulometria foi realizado em conformidade com as especificações descritas na NBR NM 248 (2003). A Tabela 4.1 apresenta os resultados encontrados no ensaio.

Tabela 4.1 - Granulometria da escória.

Peneiras		Material	Porcentagem em Peso		
Número	Abertura (mm)	Retido (kg)	% Retido	% Acumulada	% Passante
3"	76,20	0,00	0,00	0,00	100,00
2 1/2"	63,00	4,63	1,50	1,50	98,50
2"	50,00	15,84	5,30	6,80	93,20
1 1/2"	37,50	122,44	40,80	47,60	52,40
1"	25,00	125,34	41,80	89,40	10,60
3/4"	19,00	25,39	8,50	97,90	2,10
1/2"	12,50	1,33	0,40	98,30	1,70
3/8"	9,50	0,85	0,30	98,60	1,40
1/4"	6,30	0,49	0,20	98,80	1,20
4	4,75	0,24	0,08	98,90	1,10
8	2,36	1,15	0,38	99,20	0,80
10	2,00	1,28	0,43	99,70	0,30
16	1,18	0,00	0,00	99,70	0,30
30	0,600	0,00	0,00	99,70	0,30
50	0,300	0,00	0,00	99,70	0,30
100	0,150	0,00	0,00	99,70	0,30
200	0,075	0,00	0,00	99,70	0,30
Prato		1,02	0,34	100,00	0,00
Total		299,99	100,00		

Com base nos resultados da Tabela 4.1, pode-se observar que a escória apresentou uma granulometria concentrada entre 63 mm e 12,5 mm, com uma pequena quantidade de finos, o que caracteriza sua adequada inserção nas faixas granulométricas da ABNT. As Figuras 4.2 e 4.3 mostram as curvas granulométricas das faixas padrões A e B da ABNT.

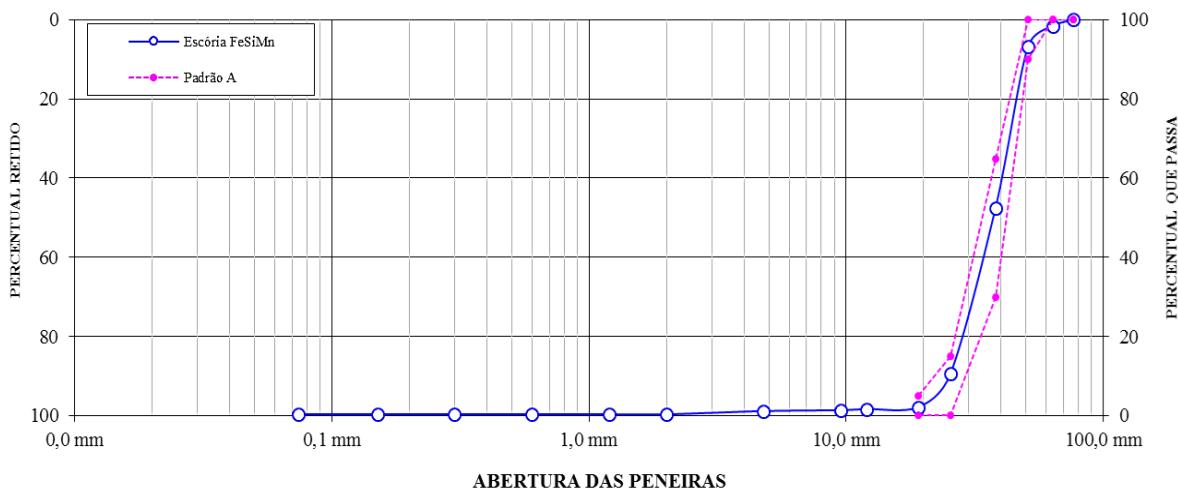


Figura 4.2 - Curva granulométrica da escória de ferro silício-manganês na faixa padrão A da ABNT.

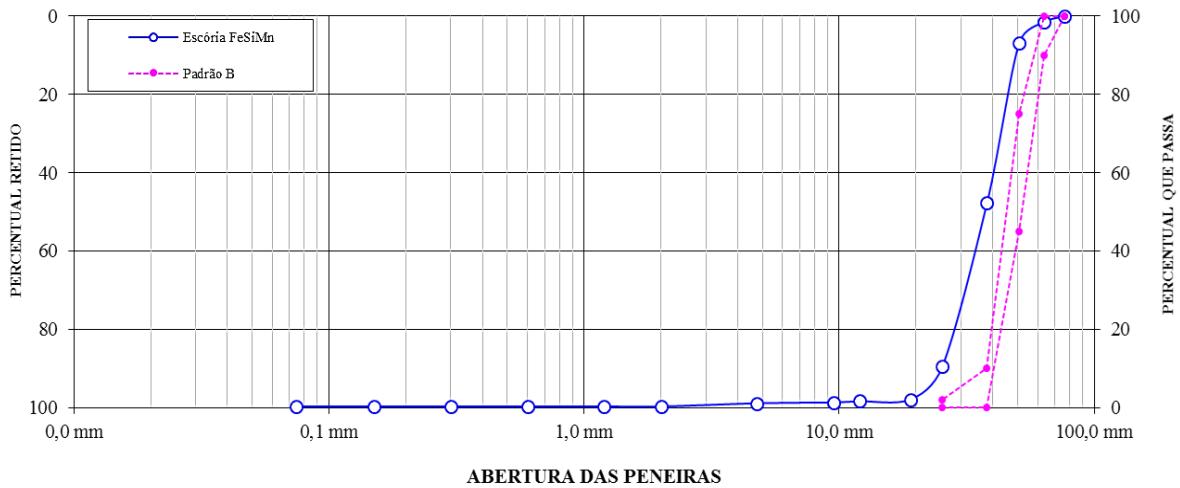


Figura 4.3 - Curva granulométrica da escória de ferro silício-manganês na faixa padrão B da ABNT.

Assim, a escória mostrou-se em conformidade com as especificações da norma NBR 5564 (2011) para a faixa padrão A da ABNT, que se refere ao material de lastro para a aplicação em linhas principais. A distribuição granulométrica da escória não se enquadrou na faixa padrão B da ABNT que se refere a material de lastro para a aplicação em linhas de pátios.

Com base nos resultados dos ensaios de granulometria da escória de ferro silício-manganês, obtém-se um diâmetro máximo característico igual a 63 mm, o que mostra que o material possui um diâmetro máximo, em conformidade com o observado nas faixas granulométricas

recomendadas pela NBR 5564 (2011). Um módulo de finura igual a 8,41, valor intermediário entre os módulos de finura das faixas granulométricas especificadas para brita 2, 3 e 4, de acordo com a norma NBR7211 (2009), esses valores variam entre 8 e 8,90.

A Tabela 4.2 apresenta parâmetros granulométricos da escória de ferro silício-manganês em termos dos coeficientes de não uniformidade e de curvatura.

Tabela 4.2 - Coeficientes de não uniformidade e de curvatura da escória.

Material	Parâmetro Cu	Parâmetro Cc
Escória	1,60	0,90

Em se tratando de uma matéria com coeficiente de não uniformidade inferior a 4, a escória de ferro silício-manganês consiste em um material de granulometria uniforme, segundo as prescrições da USCS e da ABNT.

Com o resultado das porcentagens em pesos passantes, respectivamente, nas peneiras de número 4 e de número 200 no ensaio de granulometria, foi determinado um índice de contaminação da escória de 1,5 que confere a mesma um grau de contaminação moderadamente limpo. O teor de material pulverulento da escória igual a 0,003 %, mostrou-se dentro do limite máximo de 1 % estabelecido pela norma NBR 5564 (2011).

4.3.1.2. Abrasão Los Angeles

A Tabela 4.3 apresenta o resultado encontrado no ensaio de abrasão Los Angeles.

Tabela 4.3 - Abrasão Los Angeles da escória.

Material	Graduação da Amostra	Número de Esferas	Peso total da Amostra seca (kg)	Peso total da Amostra após o ensaio (kg)	Desgaste (%)
Escória	F	12	10,2	8,8	13,20

Limites preestabelecidos pela norma NBR 5564 (2011), para o ensaio:

- Limite máximo igual a 30 %.

O resultado encontrado no ensaio da escória se enquadrou no limite da norma para lastro apresentando uma abrasão de no máximo 13,2 %. A Figura 4.4 mostra a escória de ferro silício-manganês antes e depois do ensaio de abrasão Los Angeles.



Figura 4.4 - Abrasão Los Angeles da escória de ferro silício-manganês.

4.3.1.3. Resistência ao choque - Índice de Tenacidade TRETON

O resultado do ensaio de resistência ao choque para a escória de ferro silício-manganês é apresentado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Resistência ao choque da escória.

Material	Nº de Fragmentos	Nº de Golpes	Resistência ao Choque (%)
Escória	60	10	9,97

Limites preestabelecidos pela norma NBR 5564 (2011), para o ensaio:

- Limite máximo igual a 25 %.

A escória apresentou uma resistência ao choque dentro do limite estabelecido por norma NBR 5564 (2011). Tal resistência é de grande importância, pois mostra que a escória pode ter uma vida útil superior como lastro ferroviário, demandando uma menor manutenção. A Figura 4.5 mostra a escória de ferro silício-manganês após o ensaio de resistência ao choque.



Figura 4.5 - Resistência ao choque da escória de ferro silício-manganês.

4.3.1.4. Forma dos fragmentos

Todos os fragmentos de um material têm um contorno e configuração geométrica, que é especificada pelo ensaio de forma dos materiais. A Tabela 4.5 apresenta a classificação da forma do material estudado segundo a NBR 5564 (2011) – Anexo A – Determinação da forma dos fragmentos da pedra britada.

Tabela 4.5 - Forma dos fragmentos da escória.

Material	Relação a/b	Relação c/b	Relação $\Sigma a / \Sigma c$	Classificação
Escória	0,77	0,73	1,86	Cúbica

Limites preestabelecidos pela norma NBR 5564 (2011), para o ensaio:

- Forma: Cúbica;
- Limite máximo de partículas não cúbica igual a 15 %.

No ensaio 95 % dos corpos de prova exibiram uma forma cúbica, 4 % lamelar, 1 % alongada e 0 % alongada-lamelar, totalizando 5 % de partículas não cúbicas. Concluindo assim que a escória apresenta uma forma cúbica, enquadrando-se nos limites especificados pela norma. A Figura 4.6 mostra o ensaio de forma da escória.

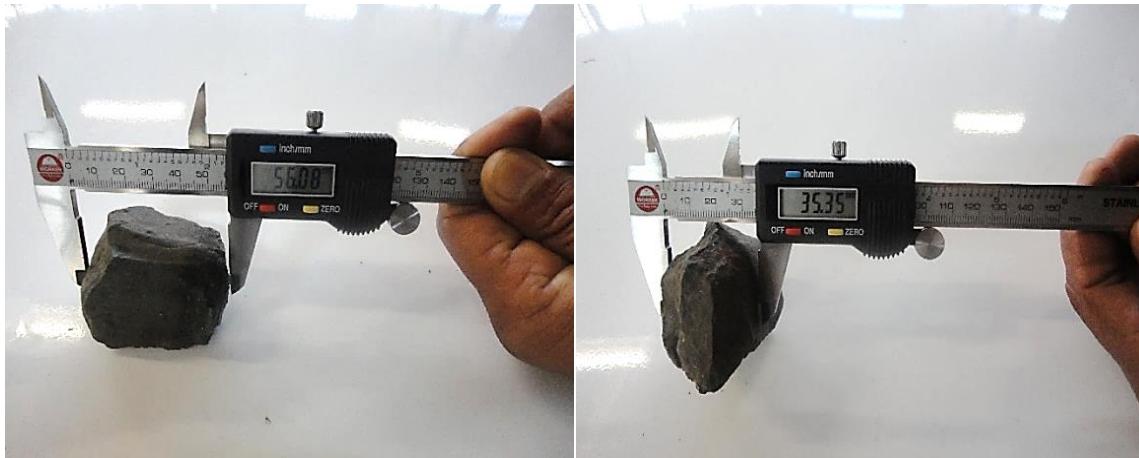


Figura 4.6 - Forma dos fragmentos de escória de ferro silício-manganês.

4.3.1.5. Teor de fragmentos macios e friáveis

Por meio deste ensaio pode ser obtida a porcentagem da massa total do corpo de prova que não é considerada “sã”. Para o ensaio de teor de fragmentos macios e friáveis os resultados são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Teor de fragmentos macios e friáveis da escória.

Material	Números de Fragmentos analisados	Teor de Fragmentos Macios e Friáveis (%)
Escória	1332	4,7

Limite preestabelecido pela norma NBR 5564 (2011), para o ensaio:

- Limite máximo igual a 5 %.

O resultado do ensaio mostra que a escória obteve um teor de fragmentos macios e friáveis abaixo do valor máximo de 5 % recomendado por norma. A Figura 4.7 apresenta a escória de ferro silício-manganês durante o ensaio de teor de fragmentos macios e friáveis.

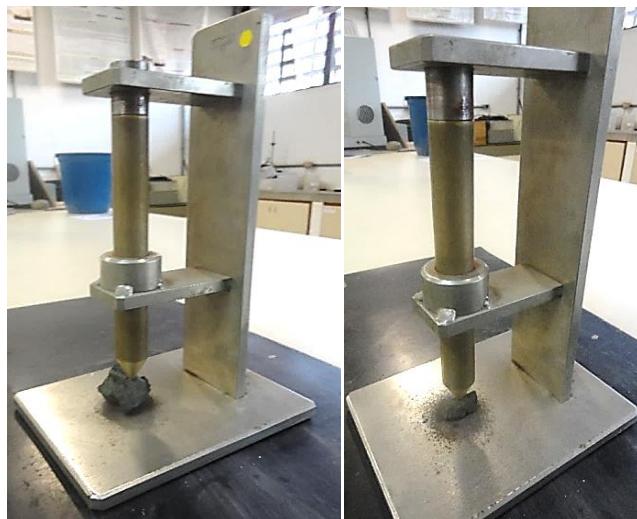


Figura 4.7 - Ensaio de teor de fragmentos macios e friáveis da escória.

4.3.1.6. Teor de argila em torrões e materiais friáveis

Segundo a norma NBR 5564 (2011) é essencial para a qualificação deste material que os níveis de teor de argila em torrões e materiais friáveis estejam abaixo de 0,5 %. A Tabela 4.7 apresenta o resultado do ensaio.

Tabela 4.7 - Teor de argila em torrões e materiais friáveis da escória.

Material	Massa inicial total (g)	Massa total retida nas peneiras (4,75; 9,5; 19; 37,5) (g)	Teor de Argila em Torrões (%)
Escória	11130,00	11129,90	0,15

Limite preestabelecido pela norma NBR 5564 (2011) para o ensaio:

- Limite máximo igual a 0,5 %.

De acordo com o resultado do ensaio realizado, pode-se observar que o material, escória de ferro silício-manganês em análise, apresentou 0,15 % de teor de argila em torrões e materiais friáveis se enquadrando no limite especificado para lastro da ABNT. A Figura 4.8 mostra o ensaio realizado.



Figura 4.8 - Ensaio de teor de argila em torrões e materiais friáveis da escória

4.3.1.7. Determinação da resistência à intempérie

Na Tabela 4.8 são apresentados os resultados do ensaio de resistência à intempérie, que foi realizado de acordo com as especificações da NBR 5564 (2011) – Anexo C – Determinação da resistência à intempérie. Este ensaio simula os danos provocados pelas intempéries após anos de exposição dos materiais ao ambiente. Para sua determinação são realizados 40 ciclos de imersão em solução de sulfato de sódio e secagem em estufa.

Tabela 4.8 - Resistência à intempérie da escória.

Material	Massa inicial total (g)	Massa final total (g)	Resíduos gerados (%)
Escória	651,24	649,71	0,23

Limite preestabelecido pela norma NBR 5564 (2011), para o ensaio:

- Limite máximo igual a 10 %.

O material estudado, escória de ferro silício-manganês, apresentou uma ótima resistência à intempérie, com apenas 0,23 % de resíduos na solução de sulfato, apresentando uma aparência final homogênea, normal e sem trincas, o que normalmente ocorre devido à expansão de volume nos fragmentos do corpo de prova do material. O resultado do ensaio da escória em análise se enquadra no limite especificado pela NBR 5564 (2011). As Figuras 4.9 a 4.11 apresentam o ensaio de determinação da resistência à intempérie da escória de ferro silício-manganês.



Figura 4.9 - Escória imersa na solução de sulfato de sódio.



Figura 4.10 - Escória seca em estufa.



Figura 4.11 - Aparência final homogênea, normal, sem trincas.

4.3.1.8. Massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água

A Tabela 4.9 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de massa específica aparente, de porosidade aparente e de absorção de água.

Tabela 4.9 - Massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água da escória

Material	Massa específica (g/cm ³)	Porosidade aparente (%)	Absorção de água (%)
Escória	2,96	2,00	1,01

Limites preestabelecidos pela norma NBR 5564 (2011), para o ensaio:

- Limite mínimo da massa específica aparente igual a 2,5 g/cm³;
- Limite máximo da porosidade aparente igual a 1,5 %;
- Limite máximo da absorção de água 0,8 %.

Por meio dos resultados mostrados na Tabela 4.9 a escória, apresentou valores de massa específica aparente em conformidade com o limite recomendado pela norma, mas ultrapassou

os limites máximos recomendados para o ensaio de porosidade aparente e absorção de água. No entanto, pela normatização da AREMA (2013), o valor da absorção de água se encontra dentro do limite recomendado pela mesma (a absorção de água máxima para a escória é de 2 %). As Figuras 4.12 a 4.14 mostram os procedimentos realizados nos ensaios de massa específica aparente, de porosidade aparente e de absorção de água da escória de ferro silício-manganês.



Figura 4.12 - Pesagem do corpo de prova retirado da água e enxugado com um pano levemente umedecido.

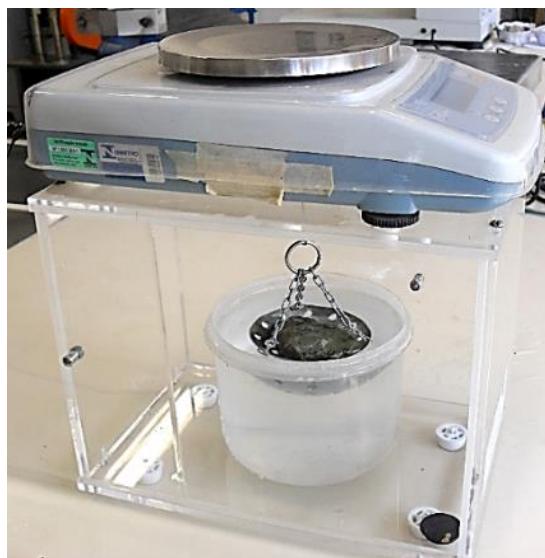


Figura 4.13 - Corpo de prova submerso em água e pesado usando o dispositivo da balança para pesagem hidrostática.



Figura 4.14 - Pesagem do corpo de prova após ser retirado da estufa e deixado em repouso para o resfriamento.

4.3.2. Segunda etapa

Estes ensaios têm como função a complementação dos ensaios de porosidade aparente e de absorção de água descritos anteriormente a fim de que sejam obtidos fundamentos técnicos e científicos para provar que o limite de no máximo 0,8 % de absorção e 1,5 % de porosidade estabelecidos pela norma NBR 5564 (2011) necessário para atingir o limite mínimo 100 MPa de resistência à compressão uniaxial, não se enquadra para a escória de ferro silício-manganês. Os valores de porosidade aparente e absorção de água da escória de ferro silício-manganês podem ser maiores.

Por este motivo foi identificada a morfologia, a organização e a distribuição dos poros da escória de ferro silício-manganês obtendo assim um conhecimento maior do material para correlacionar a sua resistência com a sua porosidade aparente e a sua absorção de água.

Para a realização desta nova campanha de ensaios foi selecionada, aleatoriamente, uma amostra de escória de ferro silício-manganês contendo 15 fragmentos com dimensões entre 50 mm e 75 mm. A amostra foi submetida aos ensaios de análise microscópica dos poros, massa específica aparente, porosidade aparente, absorção de água e carga pontual. Com os valores de todos os ensaios realizados com a mesma amostra, foi gerada uma modelagem

matemática de regressão polinomial e exponencial, que proporcionou obter uma correlação entre os mesmos.

4.3.2.1. Análise microscópica dos poros

A escória de ferro silício-manganês foi submetida a uma análise microscópica realizada com um microscópio óptico trinocular acoplado a uma micro câmera digital, na qual foram identificados e analisados os poros da escória. As Figuras 4.15 a 4.17 mostram os poros da escória de ferro silício-manganês que podem ser identificados pelas áreas escuras.

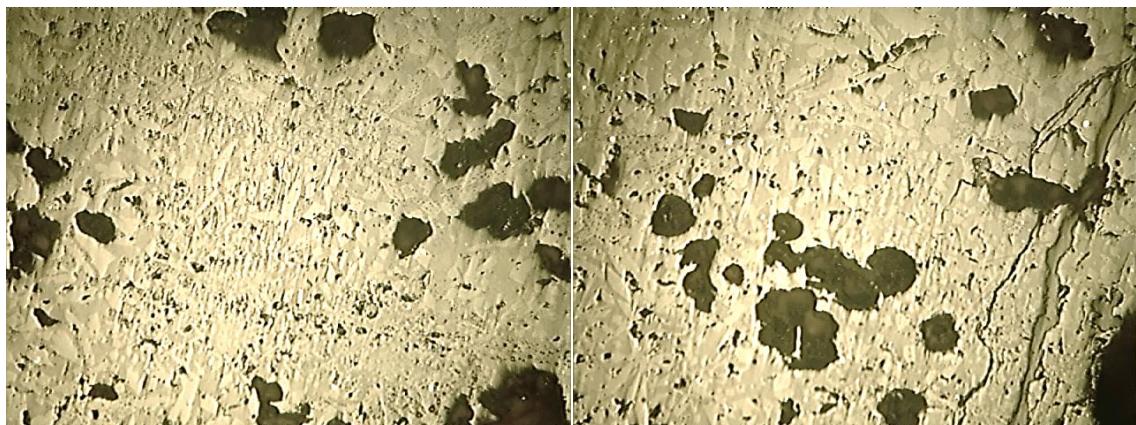


Figura 4.15 - Poros da escória de ferro silício-manganês (aumento de 50x).



Figura 4.16 - Poros da escória de ferro silício-manganês (aumento de 250x).

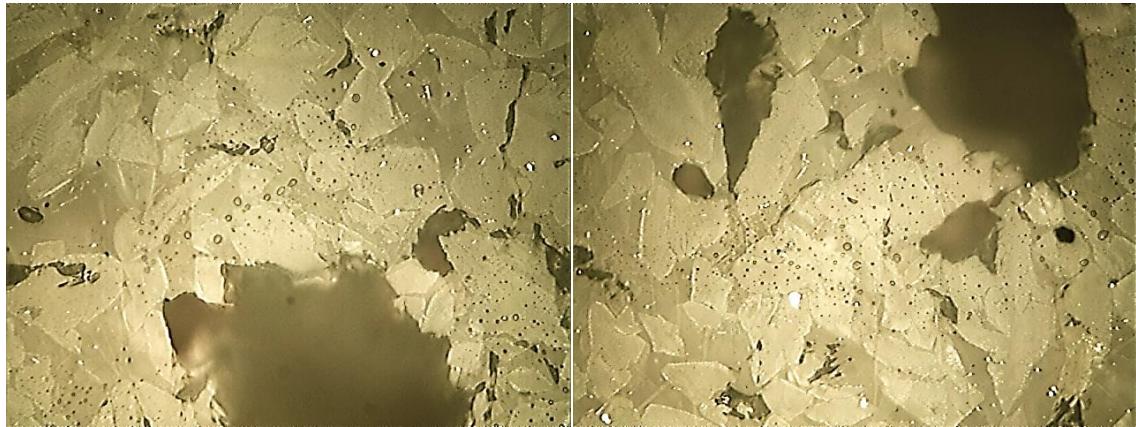


Figura 4.17 - Poros da escória de ferro silício-manganês (aumento de 400x).

As microfotografias da escória de ferro silício-manganês permitem ver a morfologia, a organização e a distribuição dos poros, e possibilitam identificar que não existe ligações por capilares entre os poros, e nem foliações e segregação de minerais em camadas. Os poros da escória de ferro silício-manganês são em sua maioria abertos.

4.3.2.2. Massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água

A Tabela 4.10 mostra os resultados dos ensaios de massa específica aparente, de absorção de água e de porosidade aparente.

Tabela 4.10 - Massa específica aparente, absorção de água e porosidade aparente da escória.

Material	Massa específica aparente (kN/m ³)	Porosidade aparente (%)	Absorção de água (%)
Escória	29,00	2,05	1,08

Os resultados encontrados na segunda etapa da caracterização física a partir dos novos ensaios de massa específica aparente, de porosidade e de absorção de água demonstram que a escória de ferro silício-manganês obteve valores aproximados aos valores encontrados na primeira etapa da caracterização física.

4.3.2.3. Carga pontual

Os resultados do ensaio de carga pontual se encontram na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Carga pontual da escória.

Material	Índice de carregamento $I_{S(50)}$ (MPa)		Resistência a Compressão Uniaxial δ_{uc} (MPa)		Índice de Anisotrópico $I_{a(50)}$
	Plano⊥	Plano//	Plano⊥	Plano//	
Escória	10,87	5,50	231,00	105,10	1,98

4.3.2.4. Modelagem matemática de regressão polinomial e exponencial

Com os dados obtidos dos ensaios de carga pontual, de massa específica, de porosidade aparente e de absorção de água, foram realizados os ajustes matemáticos de modo a obter as equações polinomiais que mais se ajustam a curva experimental. Os ajustes foram obtidos utilizando-se o software Wolfram Mathematica 7.0.

Realizando os ajustes até o quinto grau para a escória de ferro silício-manganês, obtiveram-se as seguintes equações:

Equação da absorção:

$$R(a) = 1151.57 - 2326.53a + 2016.85a^2 - 814.506a^3 + 154.015a^4 - 11.0316a^5 \quad (4.1).$$

Equação da porosidade:

$$R(p) = 444.999 - 133.76p + 22.3819p^2 + 0.30149p^3 - 0.221644p^4 \quad (4.2).$$

Para a absorção e porosidade até 5 % x resistência, as curvas experimentais que melhor se ajustaram aos polinômios estão representadas pelas Figuras 4.18 e 4.19 que mostram os gráficos da curva plotada até 5 % da absorção e porosidade x resistência.

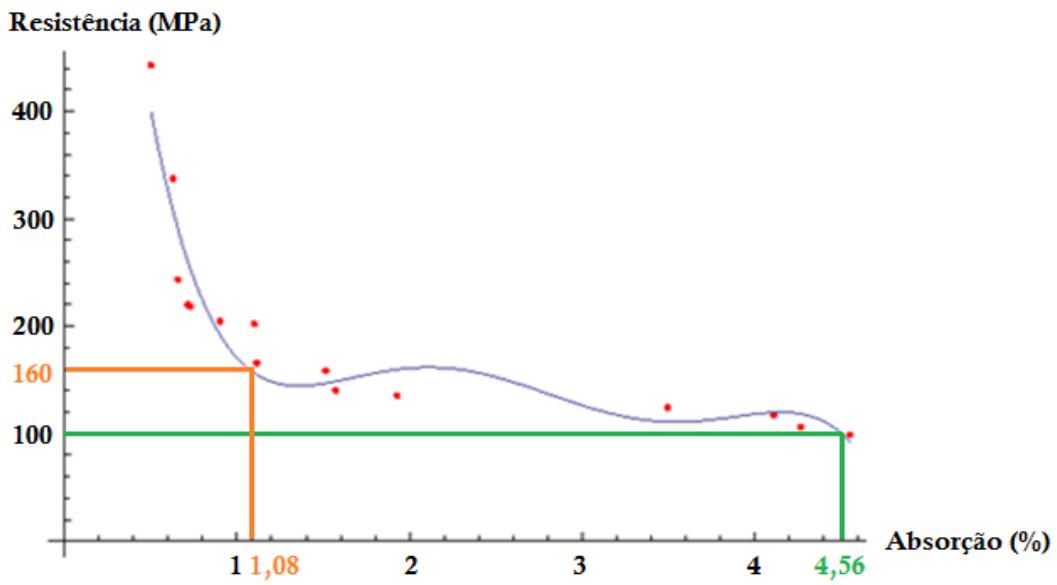


Figura 4.18 - Gráfico da absorção x resistência da escória de ferro silício-manganês.

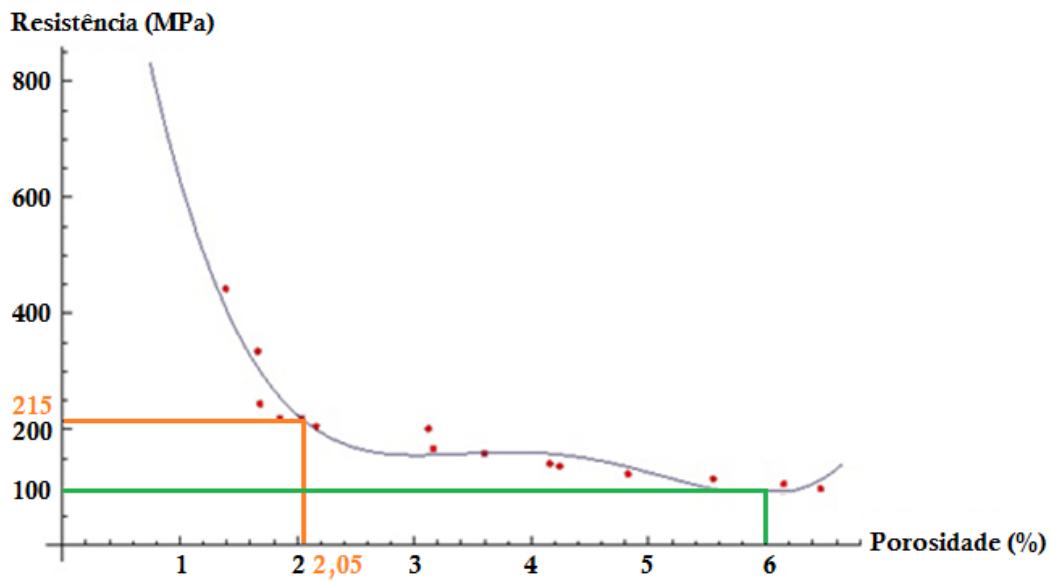


Figura 4.19 - Gráfico da porosidade x resistência da escória de ferro silício-manganês.

O modelo matemático possibilitou a obtenção das equações polinomiais e das curvas experimentais, as quais, comprovaram que a escória de ferro silício-manganês com absorção de 1,08 % apresentou uma resistência de 160 MPa e com uma porosidade de 2,05 % apresentou uma resistência de 215 MPa. Por meio destes resultados, a escória de ferro silício-

manganês, mesmo com uma absorção de 1,08 % e porosidade de 2,05 %, apresentou uma resistência à compressão uniaxial de 60 a 115 % maior que o limite da norma.

De acordo com a norma NBR 5564 (2011) para um material ser classificado com lastro deve ter uma resistência à compressão uniaxial de no mínimo de 100 MPa e apresentar uma absorção de água máxima igual a 0,8 % e porosidade máxima igual a 1,5 %.

A escória de ferro silício-manganês com uma resistência à compressão uniaxial de 100 MPa como especificado pela NBR 5564 (2011), apresentou uma absorção igual a 4,56 % e porosidade igual a 6 %. Estes resultados comprovam que a escória em estudo pode ter uma absorção de água máxima igual a 4 % e uma porosidade máxima igual a 6 %. Demostrando que os valores atualmente preconizados pela norma NBR 5564 (2011) para a absorção de água e para a porosidade não se aplicam à escória de ferro silício-manganês.

Como comparação, foi realizada a mesma metodologia da segunda etapa da caracterização física utilizando uma amostra de gnaisse britado que atendeu a todos os limites da norma para lastro ferroviário. As Figuras 4.20 e 4.21 mostram os gráficos da curva plotada até 5 % da absorção e porosidade x resistência.

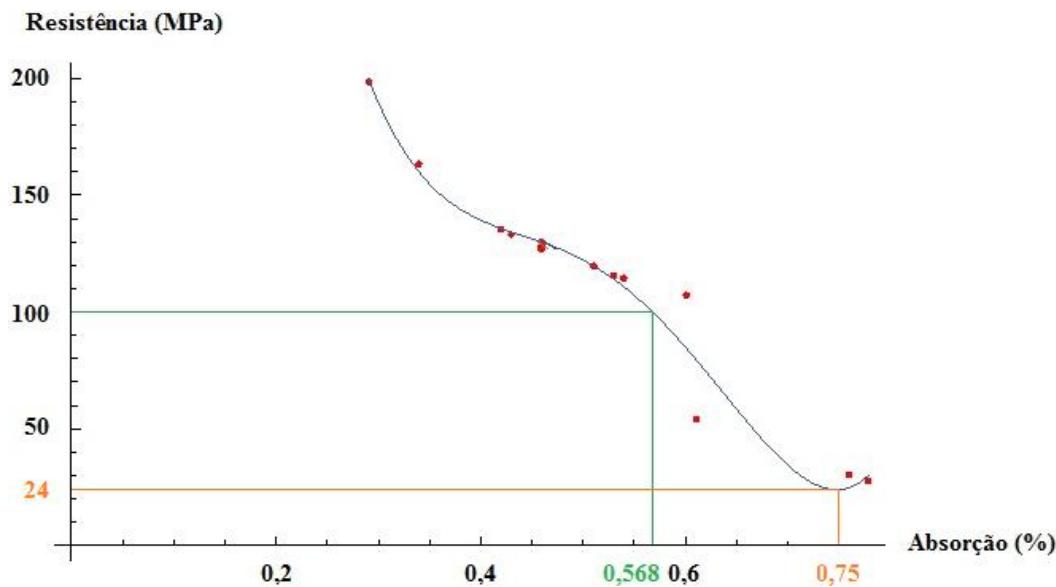


Figura 4.20 - Gráfico da absorção x resistência da brita de gnaisse.

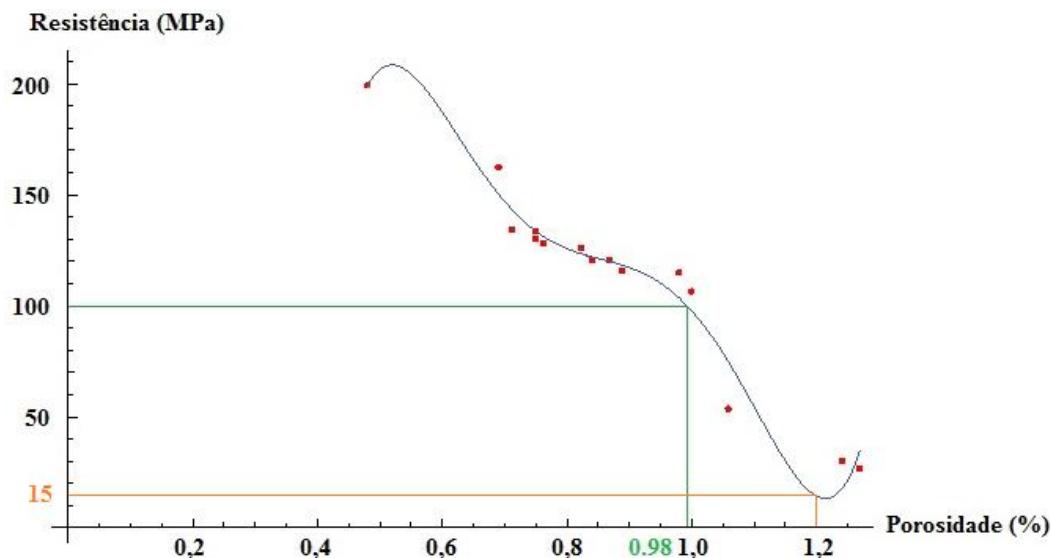


Figura 4.21 - Gráfico da porosidade x resistência da brita de gnaisse.

A amostra de gnaisse britado com uma resistência à compressão uniaxial de 100 MPa apresentou uma absorção igual a 0,568 % e porosidade igual a 0,98 %, ficando assim dentro dos limites da norma em relação ao ensaio de resistência a compressão uniaxial. Porém, para uma absorção igual a 0,85 % apresenta uma resistência de 24 MPa e com uma porosidade igual a 1,20 %, apresentou uma resistência a compressão uniaxial de 15 MPa.

Este estudo demonstra que há necessidade de uma adequação da norma NBR 5564 (2011) – Anexo B – Determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água. Tendo como principal objetivo a criação de limites não só, para materiais rochosos, com também, para coprodutos siderúrgicos (escória).

4.3.3. Resistência à compressão uniaxial

O ensaio de compressão uniaxial da escória de ferro silício-manganês foi avaliado de acordo com a norma NBR 5564 (2011) – Anexo D – Determinação da resistência à compressão uniaxial no estado saturado. A Tabela 4.12 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova da escória de ferro silício-manganês com arestas de 7 cm.

Tabela 4.12 - Resistência compressão uniaxial da escória.

Material	Forma	Arestas (cm)	Carga de Ruptura (kgf)	Resistência (MPa)
Escória	Cúbica	7	75100	153,27
	Cúbica	7	74250	151,53
	Cúbica	7	73200	149,39
	Cúbica	7	71200	145,31
	Cúbica	7	70010	142,88
Média				148,47

Limites preestabelecidos pela norma NBR 5564 (2011), para o ensaio:

- Limite mínimo igual a 100MPa.

Todos os corpos de prova apresentaram resistência à compressão uniaxial maior que o valor exigido pela NBR 5564 (2011), obtendo assim uma média dos resultados acima deste valor descrito pela norma. Todas as amostras ensaiadas apresentaram o mesmo plano de ruptura.

Para o ensaio de compressão uniaxial, os valores encontrados comprovam que a escória de ferro silício-manganês é adequada para a utilização como lastro ferroviário. As Figuras 4.22 a 4.24 mostram as amostras e a preparação para o rompimento; e as amostras rompidas e seus planos de rupturas.

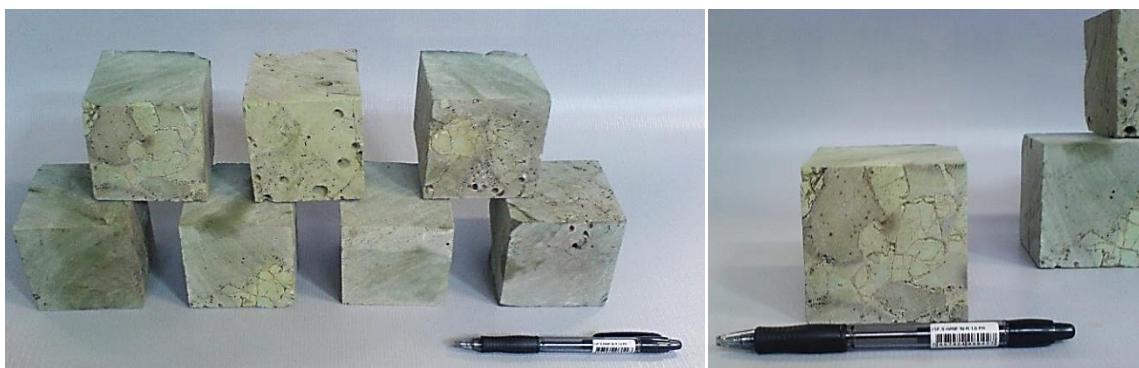


Figura 4.22 - Corpos de prova de escória de ferro silício-manganês com 7cm de arestas.



Figura 4.23 - Preparação para o rompimento do corpo de prova de escória de ferro silício-manganês.



Figura 4.24 - Corpo de prova de escória de ferro silício-manganês rompido e seu plano de ruptura.

4.3.4. Carga pontual

Para a determinação do índice $I_{S(50)}$, utilizou-se o diâmetro $D_e = 50$ mm como sendo a dimensão de referência para os corpos de prova ensaiados. As cargas de ruptura são plotadas com os referentes diâmetros equivalentes, tanto para o plano paralelo como para o plano perpendicular ao plano de ruptura. Quando comparados aos índices de rochas naturais como o basalto ($I_{S(50)} = 9,5$) (Maia *et al.*, 2004) e também o Gnaisse ($I_{S(50)} = 5,35$) (Sousa, 2007), a escória de ferro silício-manganês apresentou resultados compatíveis com os de materiais rochosos, com bons resultados para os índices de carregamento pontual, tanto para o fator

$I_{s(50)}$ paralelo como para o fator $I_{s(50)}$ perpendicular. Com os fatores $I_{s(50)} \perp$ e $I_{s(50)} //$, foi possível obter o índice de resistência anisotrópico por meio da seguinte equação:

$$I_{a(50)} = \frac{I_{s(50)} \perp}{I_{s(50)} //} \quad (4.3).$$

Sendo:

$I_{a(50)}$ - Índice anisotrópico;

$I_{s(50)} \perp$ - Índice de resistência pontual (puntiforme) ou índice de carregamento no plano perpendicular de ruptura;

$I_{s(50)} //$ - Índice de resistência pontual (puntiforme) ou índice de carregamento no plano paralelo de ruptura.

O índice de carregamento pontual é um parâmetro que representa as características de resistência, levando em conta a geometria das partículas e a porosidade (Goodman, 1989a). Os resultados do ensaio de carga pontual e do índice de resistência anisotrópico se encontram na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Carga pontual.

Material	Índice de carregamento $I_{s(50)}$ (MPa)		Resistência a Compressão Uniaxial δ_{uc} (MPa)		Índice de Anisotrópico $I_{a(50)}$
	Plano \perp	Plano //	Plano \perp	Plano //	
Escória	11,30	5,78	229,66	102,85	1,95

O valor do índice de anisotropia mostrou que a escória de ferro silício-manganês estudada apresentou um plano preferencial de ruptura. O plano paralelo mostrou-se mais apto a sofrer uma ruptura, pois sua resistência é menor. A Figura 4.25 mostra a aplicação da carga pontual na escória de ferro silício-manganês.



Figura 4.25 - Ensaio de carga pontual da escória de ferro silício-manganês.

Para a obtenção do coeficiente experimental C, foi utilizado o resultado do ensaio de resistência à compressão uniaxial realizado anteriormente. O diâmetro de 70 mm foi usado como sendo a dimensão de referência para a determinação do índice $I_{s(70)}$. O valor do coeficiente experimental C para a escória de ferro silício-manganês, foi obtido pela equação:

$$\delta_{uc} = C \cdot I_{s(70)} \Rightarrow C = \frac{\delta_{uc}}{I_{s(70)}} \quad (4.4)$$

Onde:

δ_{uc} - Resistência à compressão uniaxial;

C - Coeficiente experimental.

A escória apresentou um valor de coeficiente experimental C igual a 23,80, ficando dentro do limite de 18 a 24 estabelecido por Goodman (1989b).

4.3.5. Análise por difração de raios X

Os padrões de difratometria de raios X da escória de ferro silício-manganês mostram as fases mineralógicas do material (Figura 4.26).

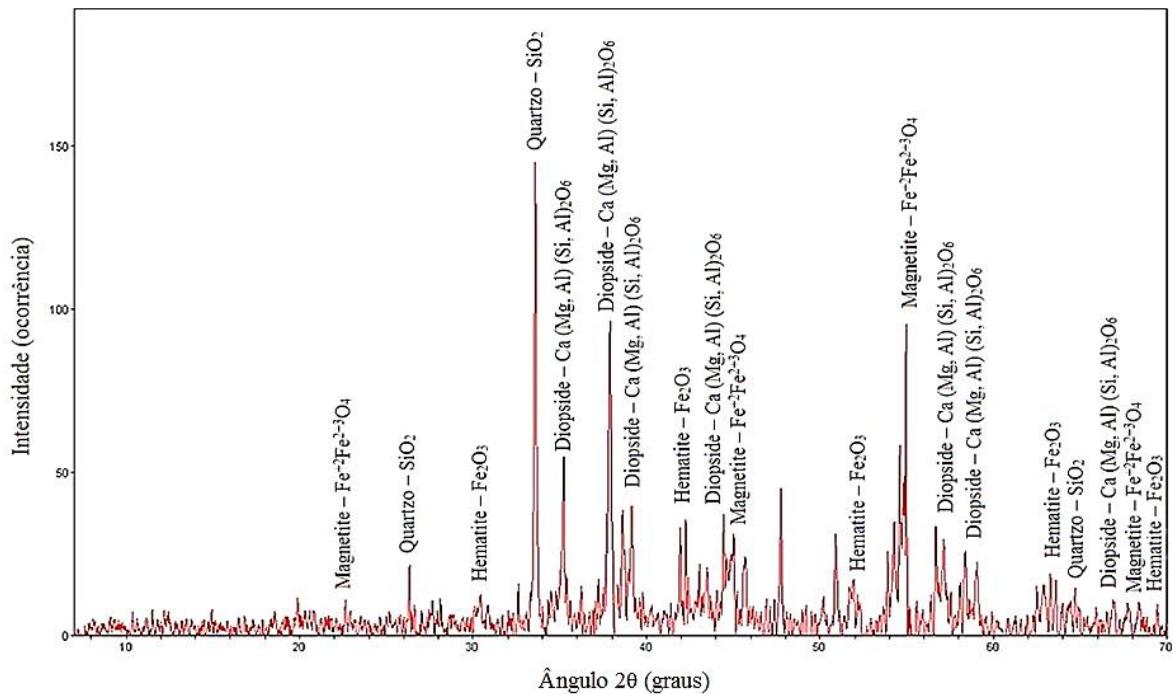


Figura 4.26 - Padrões de difratometria de raios X da escória de ferro silício-manganês.

Os constituintes mineralógicos predominantes que foram encontrados na amostra de escória de ferro silício-manganês são: Magnetita – Fe_3O_4 (ferro e óxido); Quartzo – SiO_2 (silício e óxido); Diopsídio – $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Al})(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$ (cálcio, manganês, alumínio, silício e óxido); Hematita – Fe_2O_3 (ferro e óxido).

4.3.6. Análise química quantitativa

Este ensaio foi realizado utilizando duas técnicas diferentes para a preparação das amostras de escória de ferro silício-manganês.

A primeira preparação foi realizada com 20 g de amostra pulverizada passante na peneira de 75 μm , então, a amostra foi aquecida a uma temperatura entre 100 °C a 120 °C em forno, e em seguida, foi adicionado 0,6 g de ácido estuário - $\text{C}_{18}\text{H}_{36}\text{O}_2$ (atua como uma ‘cola’ de forma a fixar a amostra), assim a amostra passou por uma nova pulverização por aproximadamente

4 minutos, para misturar o material da amostra com o ácido estuário e em seguida a mistura foi prensada na forma de pastilha.

Para esta primeira preparação analisaram-se as espécies químicas puras. A Figura 4.27 mostra a montagem do corpo de prova com a amostra de escória de ferro silício-manganês prensada na forma de pastilha e as Tabela 4.14 e 4.15 apresentam as espécies químicas na primeira preparação.



Figura 4.27 - Pastilhas de escória de ferro silício-manganês.

Tabela 4.14 - Espécies químicas e sua porcentagem em massa.

Material	Si	Mn	Al	Ca	Fe	K
Escória	38,594	21,277	16,131	14,680	5,541	2,299

Tabela 4.15 - Espécies químicas e sua porcentagem em massa.

Material	S	Tb	Ba	Sr	Cr	Zr
Escória	0,446	0,442	0,387	0,109	0,077	0,017

Na segunda preparação, foi utilizado 10 g de amostra pulverizada passante na peneira de 75 μm , em seguida, a amostra foi colocada em um anel plástico vedado por um filtro plástico e inserido em uma sacola plástica com as pontas cortadas para formar vácuo na amostra durante o ensaio. A Figura 4.28 apresenta a amostra de escória de ferro silício-manganês no anel plástico.



Figura 4.28 - Corpo de prova como a amostra de escória de ferro silício-manganês na segunda preparação.

Para a segunda preparação, na qual foi utilizada a amostra de escória de ferro silício-manganês sem ser prensada na forma de pastilha, analisaram-se as espécies químicas compostas. As Tabelas 4.16 e 4.17 apresentam espécies químicas compostas na segunda preparação.

Tabela 4.16 - Espécies químicas compostas e sua porcentagem em massa.

Material	SiO ₂	MnO	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃
Escória	14,490	45,946	8,417	11,558	9,663

Tabela 4.17 - Espécies químicas compostas e sua porcentagem em massa.

Material	K ₂ O	SO ₃	Tb ₄ O ₇	BaO	SrO
Escória	8,389	0,133	1,123	0,000	0,281

Para o lastro de escória de aciaria ser utilizado deve haver uma percentagem de óxido de cálcio (CaO) menor que 45 % e um somatório de óxidos de alumínio (Al₂O₃) e de ferro (Fe₂O₃ e FeO) inferior a 30 % (AREMA, 2013).

A análise química da escória de ferro silício-manganês mostrou que a maior percentagem de óxido de cálcio (CaO) encontrada foi de 11,558 %, e o somatório de óxidos de alumínio (Al₂O₃) e de ferro (Fe₂O₃) foram de 18,080 %, provando que os resultados ficaram abaixo dos valores recomendados pela AREMA (2013).

4.3.7. Análise química por microscopia eletrônica de varredura (MEV/EDS)

Com a microscopia eletrônica de varredura (MEV) pode-se observar e caracterizar as diferentes fases minerais existentes, ao contrário dos ensaios químicos realizados anteriormente, este é realizado pontualmente.

A amostra de escória de ferro silício-manganês pulverizada foi, então, submetida a processos de bombardeamento de elétrons e à fotomicrografias. Neste estudo, os aumentos adotados foram de 50x, 100x, 150x e 270x na amostra, sendo utilizados diferentes equipamentos, tais como os espectrômetros de raios-x, detector de elétrons retro espalhados, detector de elétrons absorvidos e detector de elétrons transmitidos.

As Figuras 4.29 e 4.30 ilustram a distribuição morfológica obtida nas análises do pó e o gráfico da média das espécies químicas da escória de ferro silício-manganês. A Tabela 4.18 sistematiza as espécies químicas compostas encontradas e suas respectivas porcentagens para cada análise pontual.

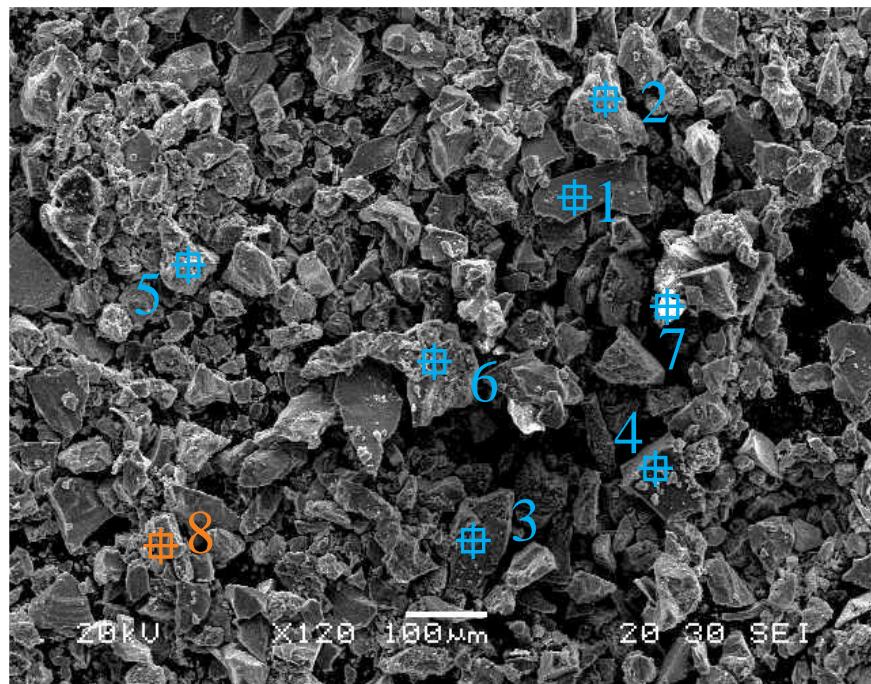


Figura 4.29 - Morfologia típica encontrada na escória de ferro silício-manganês pulverizada.

Tabela 4.18 - Espécies químicas compostas e sua porcentagem em massa.

Pontos	CO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	MnO	Fe ₂ O ₃
1	50,56	2,79	6,07	22,14	1,11	5,30	12,03	
2	61,82		7,99	12,40	1,35	1,79	10,63	4,03
3	61,74	1,49	6,47	17,56	1,33	5,23	6,18	
4	36,05			63,95				
5		4,69	15,88	31,00		31,74	16,70	
6	30,01	1,61	1,69	6,55	1,60	5,31	53,23	
7			10,05	26,07	4,52	16,54	42,81	
8				12,01		14,76	73,23	

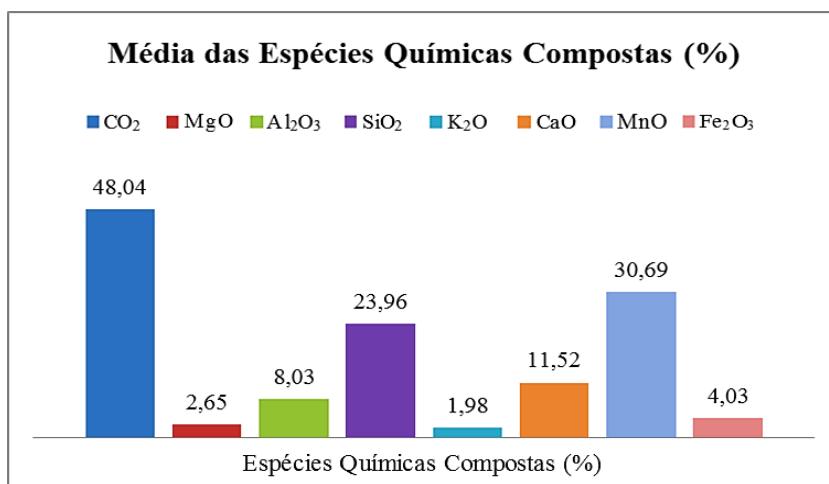


Figura 4.30 - Gráfico da média das espécies químicas compostas da escória pulverizada.

Como pode ser visto na Figura 4.30 e na Tabela 4.18, nos pontos analisados os teores de óxido de carbono, óxido de silício, óxido de cálcio e óxido de manganês apresentaram maior porcentagens, sendo que, o óxido de carbono apresentou entre todos os elementos, a maior porcentagem. A análise da escória de ferro silício-manganês mostrou que o ponto 5 apresentou os maiores valores de percentagem de óxido de cálcio (31,74 %), e somatório de óxidos de alumínio e de ferro (15,88 %), provando que os resultados encontrados ficaram abaixo dos valores recomendados pela AREMA (2013).

4.3.8. Teor de cal livre

Na determinação do teor de cal livre, foi usado como referência o método de ensaio prescrito pela NBR NM 13 (2004) – Cimento Portland – Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol. A Figura 4.31 mostra o gráfico de teor de cal livre.

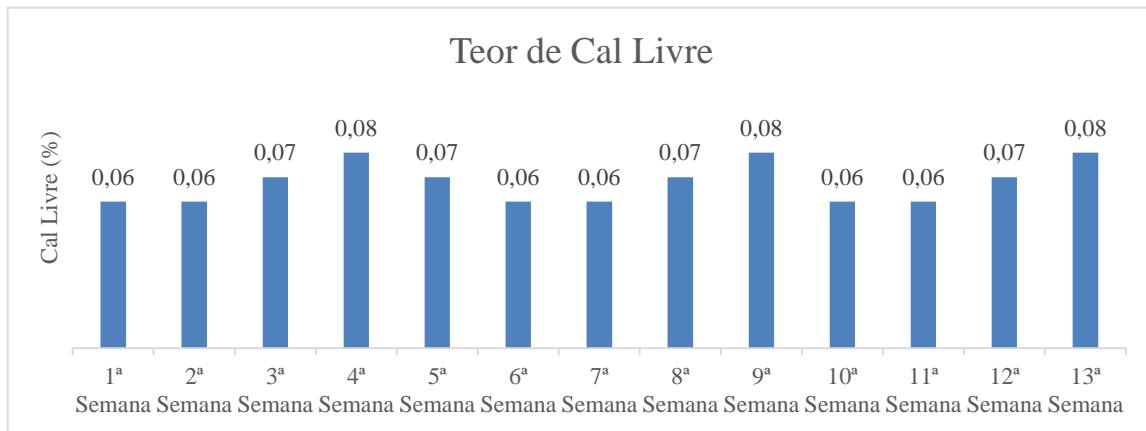


Figura 4.31 - Gráfico de porcentagem de teor de cal livre da escória de ferro silício-manganês.

A escória de ferro silício-manganês apresentou uma média total de 0,07 % de cal livre em um total de 13 ensaios em 13 semanas. Os resultados mostram que as porcentagens de cal livre encontradas na escória são praticamente zero.

Estes resultados comprovam que a quantidade de cal existente na escória não causa a expansão, a qual é responsável por provocar quebra espontânea dos grãos causando o excesso de fino que é prejudicial ao lastro, pois diminui sua propriedade de drenagem, dando a ele uma maior rigidez devido à ocupação dos vazios, que na presença de água e compostos químicos solubilizados causam a cimentação.

4.3.9. Adsorção de nitrogênio - Técnica BET.

O tamanho das partículas, da área superficial e da estrutura mórfica de uma amostra pode ter um impacto significativo sobre os resultados dos experimentos de análise técnica. Os

parâmetros mais comumente utilizados para a caracterização da forma de partículas ou de superfície são: distribuição de tamanho de partícula; área de superfície específica; volume específico dos poros; distribuição de tamanho dos poros e densidade demográfica. A Tabela 4.19 mostra os resultados do ensaio com a escória de ferro silício-manganês.

Tabela 4.19 - Adsorção de nitrogênio - Técnica BET.

Material	Densidade (g/cm ³)	Superfície Específica BET. (m ² /g)	Volume de Micrósporos (cm ³ /kg)	Área de Micrósporos (m ² /g)
Escória	3,10	1,89	0,0009	2,47
Material	Tamanho Médio dos Micrósporos (nm)	Volume Total de Poros (cm ³ /kg)	Diâmetro Máx. dos Poros (A)	Diâmetro Médio dos Poros (A)
Escória	6,19	0,00458	1413,0	96,8

O resultado final do ensaio de adsorção de nitrogênio-técnica BET, é a superfície específica, que possui o seu valor válido se a equação BET estabelecer uma relação linear para pressões relativas P/P₀ até 0,35.

Este valor é constituído em função do número de moléculas de gás nitrogênio aderidas às partículas do arcabouço sólido da escória originando uma película contínua, cuja área total é dividida pela massa da amostra analisada.

A isoterma de adsorção e de dessorção representa as variações dos volumes de nitrogênio adsorvidos em função das pressões aplicadas, tanto na etapa de adsorção quanto na dessorção. A forma da isoterma é correlacionada diretamente ao tamanho médio de poros e à interação adsorção - adsorvente.

A forma da histerese, entre as fases de adsorção e dessorção, é correlacionada com a forma geométrica dos poros. A Figura 4.32 apresenta a isoterma obtida no ensaio adsorção de nitrogênio da escória de ferro silício-manganês.

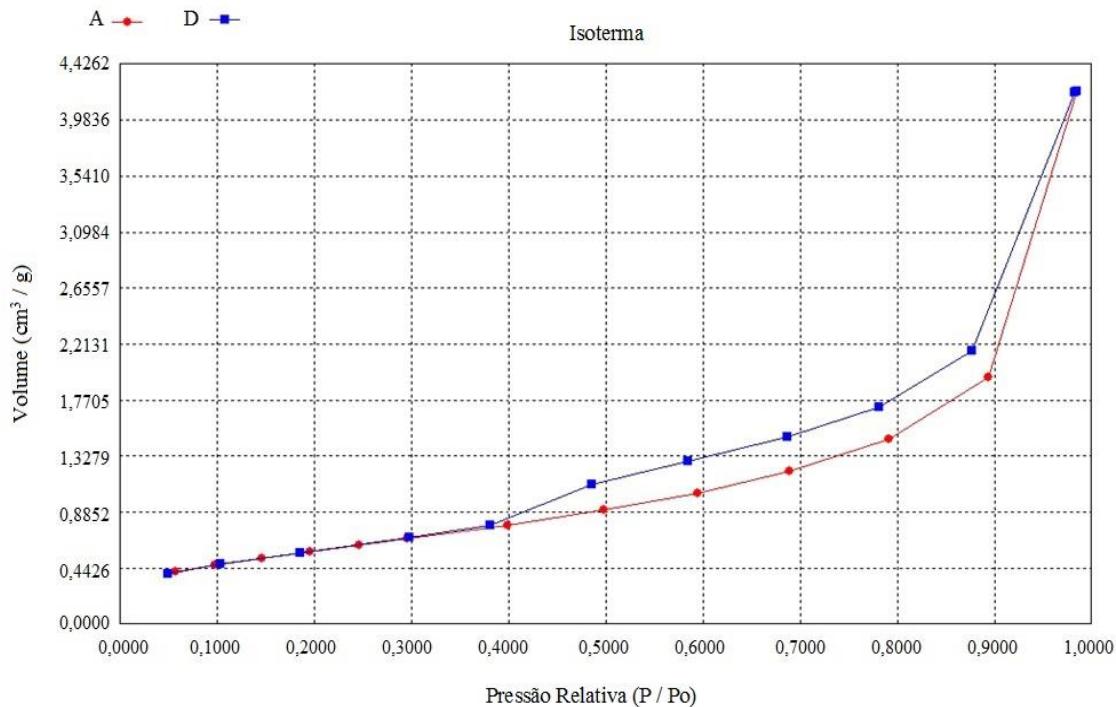


Figura 4.32 - Isoterma de adsorção – dessorção da escória de ferro silício-manganês.

A isoterma tendeu a ser concordante a partir de um valor de pressão relativa P/P_0 da ordem de 0,40 e a se fechar para pressões próximas à pressão de saturação.

De maneira geral a isoterma do material estudado pode ser classificada como tipo IV (de acordo com o International Union of Pureand Applied Chemistry - IUPAC), indicando a presença conjugada de microporos, mesoporos e macroporos no arcabouço estrutural destes materiais.

4.3.10. Ensaio de lixiviação

Os dados obtidos nos procedimentos de lixiviação para ensaios de toxicidade com parâmetros inorgânicos (separação de certas substâncias inorgânicas contidas nos resíduos industriais por meio de lavagem ou percolação) encontram-se listados na Tabela 4.20 que mostra os resultados dos ensaios de lixiviação.

Tabela 4.20 - Classificação de toxicidade por lixiviação.

Parâmetros	Método Analítico	Limites da NBR10004 (2004) (mg/L)	Concentração no Resíduo Lixiviado Amostra (mg/L)	Concentração no Resíduo Lixiviado Duplicada (mg/L)
Arsênio (As)	SMEWW 3114-B	1	< 0,01	< 0,01
Bário (Ba)	SMEWW 3030, 3120-B	70,0	1,46	0,85
Cádmio (Cd)	SMEWW 3030, 3120-B	0,5	< 0,001	< 0,001
Chumbo (Pb)	SMEWW 3030, 3120-B	1	0,03	0,03
Cromo total (Cr)	SMEWW 3030, 3120-B	5	< 0,01	< 0,01
Fluoreto (F)	SMEWW 4500F-C	150	1,91	0,25
Mercúrio (Hg)	SMEWW 3112-B	0,1	< 0,0002	< 0,0002
Prata (Ag)	SMEWW 3030, 3120-B	5	0,01	0,02
Selênio (Se)	SMEWW 3114-B	1	< 0,01	< 0,01

De acordo com os resultados da Tabela 4.20, o resíduo originário da amostra ensaiada não é corrosivo, por não apresentar características corrosivas, segundo item 4.2.1.2 subitem (a), da norma NBR10004 (2004). E não é reativo, por não apresentar características reativas, segundo item 4.2.1.3 subitens (a, b, c, e), da norma NBR10004 (2004).

Todas as substâncias ficaram dentro dos limites prescritos pela norma NBR10004 (2004). Portanto, a escória é classificada como Classe II não perigoso.

4.3.11. Ensaio de solubilização

Os dados obtidos nos procedimentos de solubilização para ensaios de toxicidade por solubilização encontram-se listados nas Tabelas 4.21 e 4.22.

Tabela 4.21 - Classificação de toxicidade por solubilização dos resíduos.

Inorgânicos				
Parâmetros	Método Analítico	Limites da NBR10004 (2004) (mg/L)	Concentração no Resíduo Lixiviado Amostra (mg/L)	Concentração no Resíduo Lixiviado Duplicada (mg/L)
Alumínio (mg Al/L)	SMEWW 3030,3120-B	0,2	3,64	4,17
Arsênio (mg As/L)	SMEWW 3114-B	0,01	< 0,01	< 0,01
Bário (mg Ba/L)	SMEWW 3030,3120-B	0,7	0,03	0,04
Cádmio (mg Cd/L)	SMEWW 3030,3120-B	0,005	< 0,001	< 0,001
Cianeto (mg CN/L)	SMEWW 4500CN-B, C	0,07	< 0,01	< 0,01
Cobre (mg Cu/L)	SMEWW 3030,3120-B	2	< 0,009	< 0,009
Chumbo (mg Pb/L)	SMEWW 3030,3120-B	0,01	< 0,01	< 0,01
Cloreto (mg Cl/L)	SMEWW 4500Cl-B	250	10,3	11,3
Cromo total (mg Cr/L)	SMEWW 3030,3120-B	0,05	< 0,01	< 0,01
Ferro (mg Fe/L)	SMEWW 3030,3120-B	0,3	< 0,1	< 0,1

Tabela 4.22 - Classificação de toxicidade por solubilização dos resíduos.

Inorgânicos				
Parâmetros	Método Analítico	Limites da NBR10004 (2004) (mg/L)	Concentração no Resíduo Lixiviado Amostra (mg/L)	Concentração no Resíduo Lixiviado Duplicada (mg/L)
Sódio (mg Na/L)	SMEWW 3030,3120-B	200	0,86	1,00
Sulfato (mg SO₄⁻²/L)	SMEWW 4500SO4-E	250	14,9	17,1
Zinco (mg Zn/L)	SMEWW 3030,3120-B	5	< 0,1	< 0,1
Fluoreto (mg F/L)	SMEWW 4500FC	1,5	0,48	0,56
Manganês (mg Mn/L)	SMEWW 3030,3120-B	0,1	< 0,05	< 0,05
Mercúrio (mg Hg/L)	SMEWW 3112-B	0,001	< 0,0002	< 0,0002
Nitrato (mg N/L)	SMEWW 4500NO3-B	10	< 0,05	< 0,05
Prata (mg Ag/L)	SMEWW 3030,3120-B	0,05	< 0,01	< 0,01
Selênio (mg Se/L)	SMEWW 3114-B	0,01	< 0,01	< 0,01
Orgânicos				
Parâmetros	Método Analítico	Limites da NBR10004 (2004) (mg/L)	Concentração no Resíduo Lixiviado Amostra (mg/L)	Concentração no Resíduo Lixiviado Duplicada (mg/L)
Fenóis totais (mg C₆H₅OH/L)	SMEWW 5530-B, C, D	0,01	< 0,001	< 0,001
Surfactantes (mg MBAS/L)	SMEWW 5540-C	0,5	< 0,10	< 0,10

De acordo com os resultados das Tabelas 4.21 e 4.22, a amostra da escória de ferro silício-manganês foi classificada como Classe II A (não perigoso – não inerte) por apresentar teor de Alumínio solubilizado acima do limite máximo permitido.

4.3.12. Análise das condições necessárias para a escória solubilizar em campo

De acordo com os resultados do ensaio de solubilização realizados anteriormente, o Alumínio (Al) apresentou um valor acima do limite máximo estabelecido da norma NBR10004 (2004).

Considerando o procedimento do ensaio de solubilização, e que o composto Alumínio presente na escória também se encontra presente na crosta terrestre, foi realizado um cálculo da quantidade de água necessária para a solubilização em escala real.

Mediante os resultados do cálculo, foram analisadas as condições necessárias para a escória solubilizar em campo. Esta análise trata não só da quantidade de água necessária para a escória solubilizar em campo, mas também das técnicas utilizadas na construção das vias permanentes.

Por meio de uma seção ferroviária fictícia (1 m de comprimento e seção transversal idêntica à representada na Figura 4.33), em escala menor em relação aos projetos de seções ferroviárias reais, foi calculada a quantidade de água necessária para a solubilização em campo da escória de ferro silício-manganês.

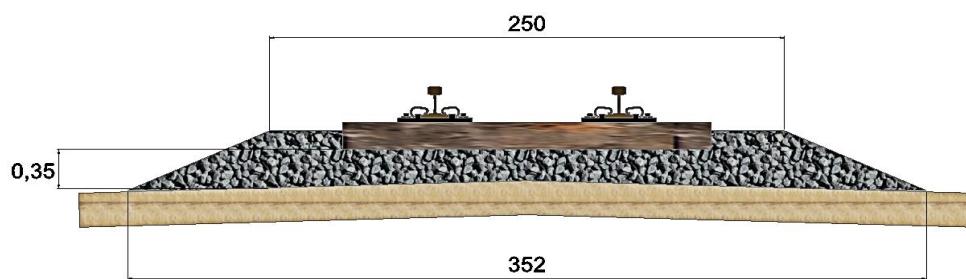


Figura 4.33 - Seção transversal da via permanente fictícia.

Foi calculada a área da seção (S), utilizando a equação:

$$S = \left(\frac{B+b}{2} \right) \cdot h \quad (4.5).$$

Onde:

B - Base maior;

b - Base menor;

h - Altura.

O valor da área da seção obtido é de 1,05 metros lineares. Dessa forma obteve-se 3,12 t de massa de escória presente em 1,05 metros lineares de seção.

O procedimento do ensaio de solubilização descrito pela NBR 10006 (2004) – Solubilização de resíduos, recomenda que se misture 250 g de amostra (passante na peneira de 9,5 mm), com 1000 ml de água destilada em um recipiente fechado. Ou seja, uma proporção de 4 vezes a massa para 1 vez o volume da água. Com isso, para que a escória solubilize em campo, é necessário um volume de 12.480 l de água para encher a seção (que tem 35 cm de altura e 1,05 metros lineares de área), que deve ser completamente estancada (ou seja, não haverá perda de água na seção e a mesma se manterá com seus 35 cm de altura totalmente imersa em água).

Para calcular a quantidade de água necessária para a solubilização em campo foi realizada uma pesquisa pluviométrica do ano de 2000 ao ano de 2009, no município de Belo Horizonte - MG. Os dados obtidos na pesquisa pluviométrica foram encontrados no site Tempo e Clima (<http://meteorologiaeclima.blogspot.com/2010/01/total-de-chuva-mm-bh-2009.html>).

Foi utilizado como parâmetro de comparação o índice da precipitação no ano de 2009, na região de Belo Horizonte, este índice da precipitação de 2.165,10 mm/m² ou 2.165,10 l/m² foi o maior encontrado. Utilizando os dados do índice da precipitação de 2009 na seção em

estudo, com 1,05 metros lineares de área, a quantidade de água que cai na seção será de aproximadamente 2.273,36 l/m em 1 ano.

Pressupondo-se que a seção esteja estancada, este volume de 2.273,36 l/m de água, encheria somente 6,38 cm de altura ou 18 % da seção, provando assim que a quantidade de escória que possa solubilizar estará dentro do recomendado pela norma NBR 10006 (2004) – Solubilização de resíduos. Ressalta-se também, que, de acordo com a norma NBR 10006 (2004) a massa de escória triturada abaixo da peneira de 9,5 mm deve ficar imersa por 7 (sete) dias em água, ou seja, os frascos de solubilização, mantém a água destilada utilizada no ensaio sempre em contato com o resíduo triturado.

Esta condição não ocorre na via permanente, pois a seção não é estanque, as chuvas não são constantes, e a seção está sempre sujeita a evaporação e infiltração, e as técnicas utilizadas nas construções das vias permanentes, têm como uma das principais funções promover uma drenagem rápida da via.

Em síntese, o lastro possui um diâmetro que varia de 63 a 12 mm, e uma das funções do mesmo é a de prover uma drenagem eficiente de eventuais líquidos ou fluidos que venham a entrar em contato com a via permanente. Da mesma forma, o sublastro é constituído de materiais compostos por misturas de areia-pedregulho com CBR superior a 30 %, que atendem às exigências de filtro para o subleito. Há também o sistema de drenagem existente na via permanente, que não permite o acúmulo de água no lastro, pois o abaulamento da plataforma de 3 % cria um caminho preferencial para a água em direção as valetas.

Além disso, existe uma drenagem profunda que rebaixa o lençol freático a uma profundidade de 1,5 m, eliminando com isso, qualquer risco de contaminação do lençol freático. Em algumas vias permanentes existe sobre o sublastro e no contorno das valetas a manta de geotêxtil, que também exerce a função de elemento filtrante e separador entre o sublastro e a camada de lastro, evitando a contaminação do sublastro. Para proteger a manta de geotêxtil do efeito de punctionamento do agregado que constitui o lastro, é aconselhado colocar entre a manta de geotêxtil e o lastro uma camada de areia grossa e uma camada de agregado

rochoso britado, ambas com 5 cm de espessura. A camada de areia grossa junto com a camada de agregado rochoso britado forma mais um filtro. Ou seja, tanto a geometria e os materiais utilizados na construção da via permanente impedem o acumulo de água no lastro e consequentemente impedem que a amostra solubilize apresentando teor de Alumínio acima do especificado pela norma. A Figura 4.34 mostra um projeto geométrico de uma via permanente.

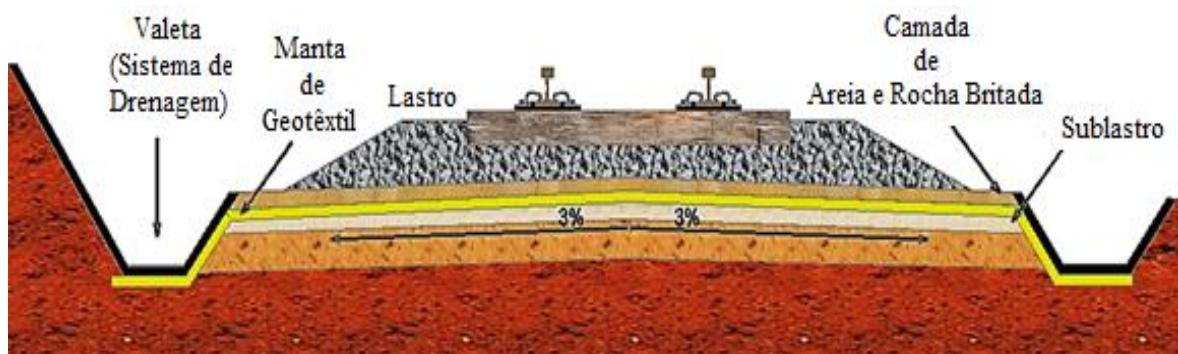


Figura 4.34 - Manta de geotêxtil, a geometria e o sistema de dreno utilizado na via permanente.

Toda a caracterização ambiental foi apresentada ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) para a aprovação do uso da escória de ferro silício-manganês como lastro ferroviário, a respeito da sua caracterização e classificação ambiental.

O estudo obteve o parecer positivo, por meio do Ofício nº306/2010/NLA/SUPES/IBAMA/MG que aprova a utilização da escória de ferro silício-manganês como lastro ferroviário, a respeito da caracterização e classificação ambiental. O ofício encontra-se em anexo nesta dissertação.

4.3.13. Resistividade elétrica do agregado da escória

Para o ensaio de resistividade do agregado da escória de ferro silício-manganês foram utilizados 5 fragmentos com granulometria entre $1\frac{1}{2}''$ e $2''$. Para o cálculo da área da seção,

foi determinado o diâmetro equivalente dos fragmentos da escória de acordo com a equação 3.7 no Capítulo 3. O ensaio foi realizado com os fragmentos no estado saturado e seco. A Figura 4.35 mostra o gráfico da resistividade do agregado da escória de ferro silício-manganês feito em laboratório.

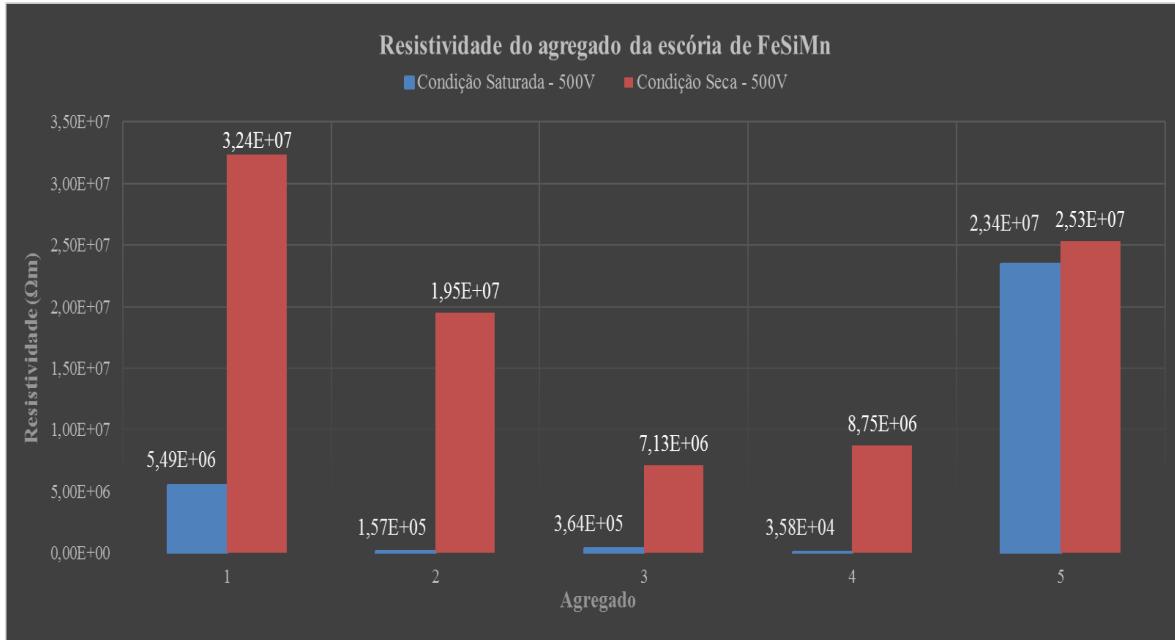


Figura 4.35 - Gráfico da resistividade do agregado no estado saturado e seco.

Os ensaios realizados com os fragmentos da escória de ferro silício-manganês, foram realizados em laboratório sobre condições controladas, sem a fuga da tensão aplicada pelo megômetro, e com temperatura variando entre 13 °C e 16 °C.

O menor valor medido foi de 35822,15 $\Omega \cdot m$ no fragmento de número 4 na condição saturada, demonstrando que a resistividade da escória na pior condição (saturada) ficou 35522,15 $\Omega \cdot m$ acima do mínimo recomendado pela norma.

Os resultados demonstram que os fragmentos da escória tanto na condição saturada quanto na seca, ficaram acima do valor mínimo de 300 $\Omega \cdot m$ recomendado pela AREMA (2013). As Figuras 4.36 a 4.38 apresentam os fragmentos no estado seco e saturado e o ensaio de resistividade do fragmento da escória.



Figura 4.36 - Fragmentos da escória no estado seco.



Figura 4.37 - Fragmentos da escória no estado saturado.



Figura 4.38 - Ensaio de resistividade do fragmento da escória.

4.3.14. Resistividade elétrica do pó da escória

Para o ensaio de resistividade do pó da escória de ferro silício-manganês foi utilizada uma amostra com granulometria máxima de 0,075 mm. O ensaio foi realizado com a amostra no estado saturado e seco. A Figura 4.39 mostra o gráfico da resistividade do pó da escória de ferro silício-manganês feito em laboratório.

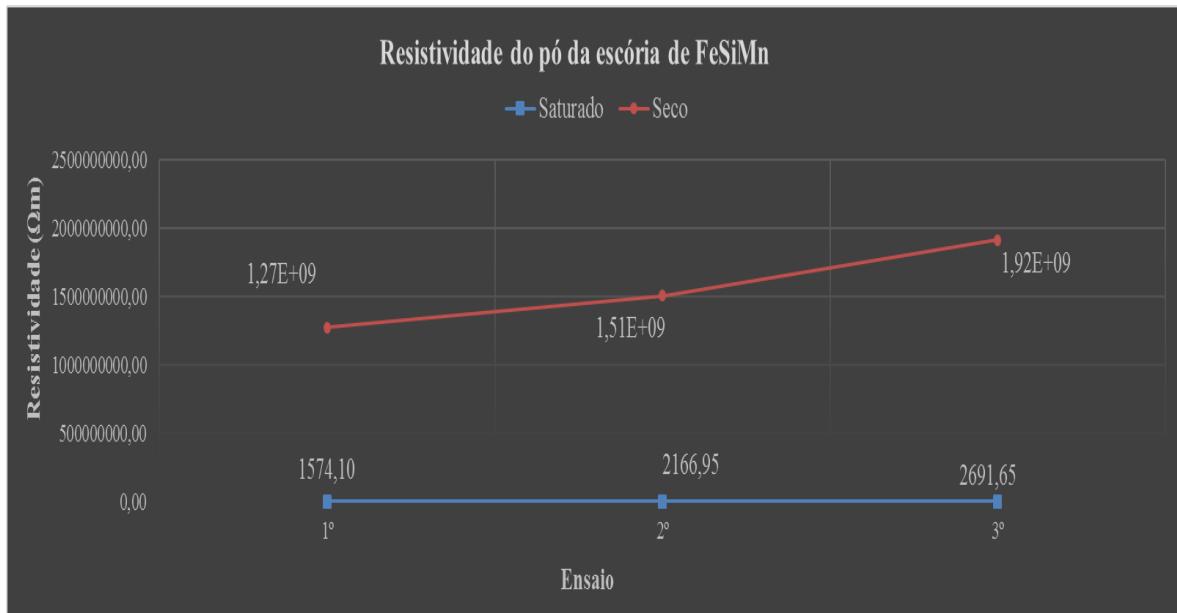


Figura 4.39 - Gráfico da resistividade do pó no estado saturado e seco.

Os ensaios com o pó da escória de ferro silício-manganês, foram realizados em laboratório sobre condições controladas, sem a fuga da tensão aplicada pelo megômetro, e com temperatura variando entre 18 °C e 23,6 °C.

O menor valor medido foi de 1500 Ω.m na condição saturada, demonstrando que a resistividade da escória na pior condição (saturada) ficou 1200 Ω.m acima do mínimo recomendado pela norma.

Tanto os resultados dos ensaios nas condições saturada ou seca, ficaram acima dos 300 Ω.m como recomendado pela AREMA (2013). As Figuras 4.40 e 4.41 apresentam a preparação da amostra saturada e os ensaios de resistividade do pó da escória.



Figura 4.40 - Preparação da amostra saturada.

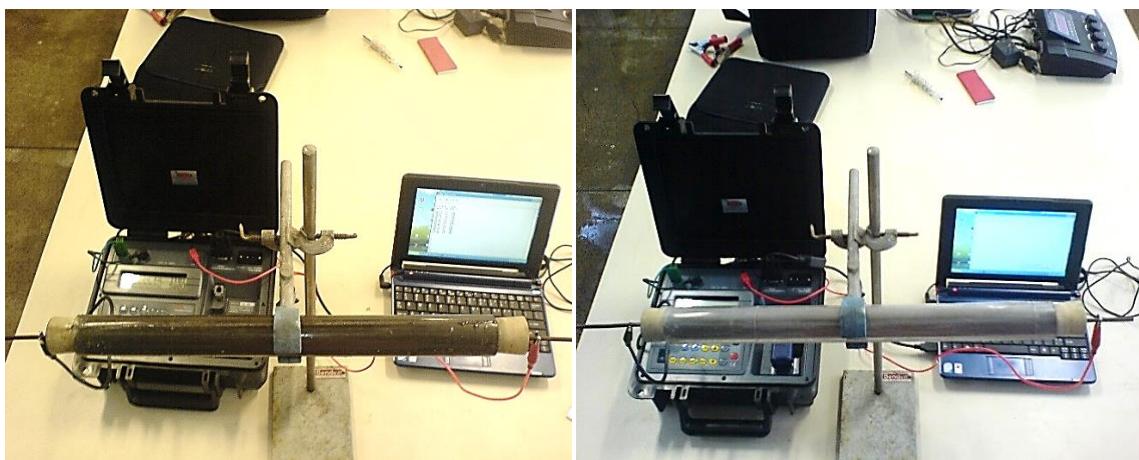


Figura 4.41 - Ensaios da resistividade do pó da escória saturado e seco.

4.3.15. Condutividade elétrica do lastro

O monitoramento da condutividade foi realizado durante 147 dias decorridos de ensaios, totalizando 36 ciclos de carga e descarga da água.

Cada ciclo ensaiado comportou uma duração de 2 a 10 dias, sendo também monitorados o pH e a temperatura interna e externa nos tanques. A Figura 4.42 mostra a condutividade da escória.

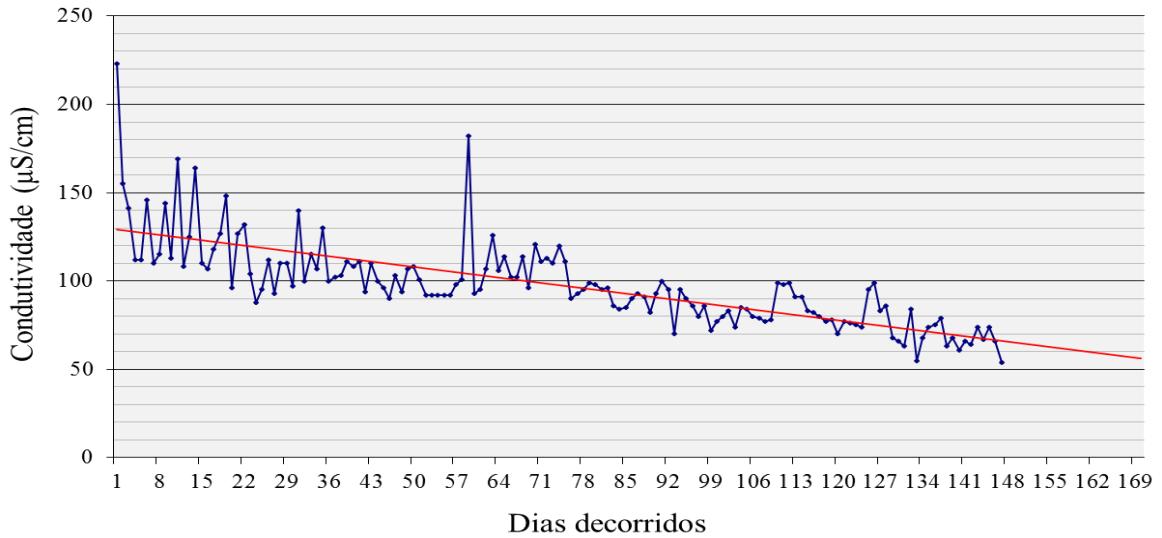


Figura 4.42 - Gráfico da condutividade da escória de ferro silício-manganês.

A condutividade inicial da escória de ferro silício-manganês no primeiro dia de ensaio foi de $223 \mu\text{S}/\text{cm}$, caindo para $70 \mu\text{S}/\text{cm}$ aos 92 dias e caindo para $54 \mu\text{S}/\text{cm}$ aos 147 dias de ensaio, mostrando que a escória atingiu a condutividade da água potável ($70 \mu\text{S}/\text{cm}$). Para água potável, os valores de condutividade variam da ordem de 20 a $70 \mu\text{S}/\text{cm}$ (FATMA, 2007). A Figura 4.43 apresenta o gráfico de pH da escória de ferro silício-manganês.

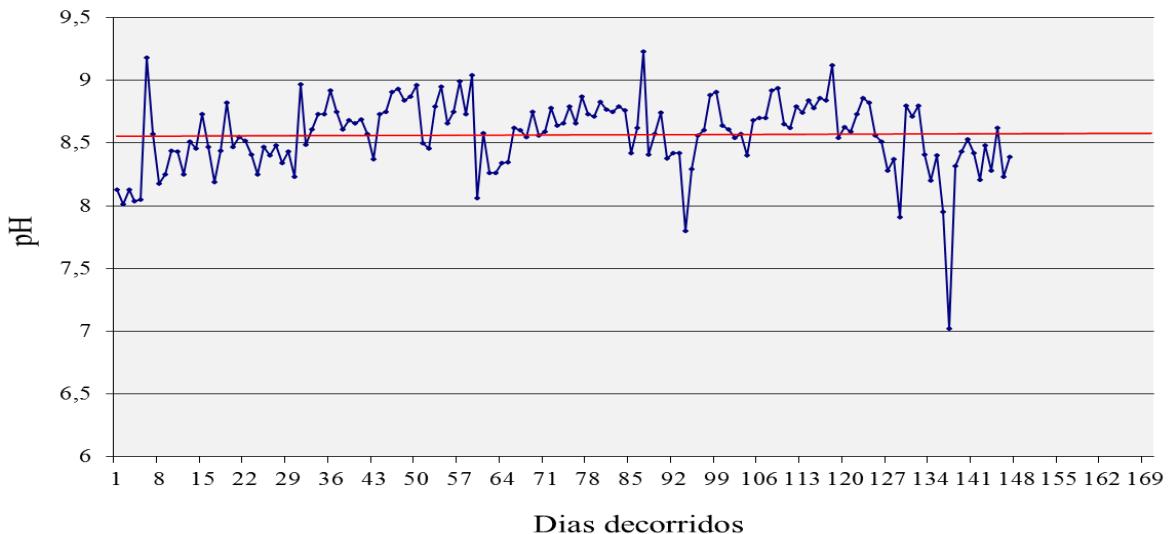


Figura 4.43 - Gráfico da média do pH por ciclo da escória.

Durante os ensaios de condutividade as temperaturas internas (submersa) e externas (ar) da escória de ferro silício-manganês variaram entre 14 °C a 30 °C e 17 °C a 31 °C. A escória de ferro silício-manganês mostrou um pH sempre básico e com valores entre 8,0 e 9,0 ao longo do período de 36 ciclos de análises.

Após o ensaio de condutividade elétrica a escória de ferro silício-manganês não apresentou fissuras nem quebra em suas partículas, causadas geralmente em decorrência da expansão volumétrica. As Figuras 4.44 e 4.45 mostram o ensaio de condutividade da escória de ferro silício-manganês.



Figura 4.44 - Escória durante os ensaios de condutividade.



Figura 4.45 - Escória seca em estufa após os ensaios de condutividades.

4.4. ENSAIOS DE CAMPO

4.4.1. Resistividade elétrica do lastro

É importante salientar que, na montagem das seções testes, foram usadas todas as técnicas de construção adotadas pela equipe de superestrutura ferroviária da Estrada de Ferro Vitoria - Minas. As Figuras 4.46 a 4.49 mostram a construção das seções testes com dormentes de aço e de madeira.



Figura 4.46 - Colocação da grade com dormentes de aço e da escória de ferro silício-manganês.



Figura 4.47 - Socaria manual da escória de ferro silício-manganês na seção teste com dormentes de aço.



Figura 4.48 - Colocação da grade com dormentes de madeira e da escória de ferro silício-manganês.



Figura 4.49 - Socaria manual da escória de ferro silício-manganês na seção teste com dormentes de madeira.

A montagem das grades das seções testes se difere em dois aspectos: pelo tipo de dormentes (aço e madeira) e pelo isolamento entre os trilhos e o dormente. Na grade com dormentes de aço são utilizadas, entre os trilhos e o dormente, palmilhas isolantes que proporcionam um isolamento elétrico adequado entre os mesmos e as fixações elásticas. Na grade com dormentes de madeira são utilizadas entre os trilhos e o dormente, placas de apoio em aço e fixações elásticas. A Figura 4.50 mostra as grades com os trilhos, dormentes de aço e madeira, além das palmilhas isolantes na cor verde, placas de apoio e as fixações elásticas.



Figura 4.50 - Grades das seções testes com dormentes de aço e madeira.

O monitoramento do simulador de resistividade da escória de ferro silício-manganês foi realizado durante 147 dias. Os ensaios dos primeiros 20 dias foram realizados em clima chuvoso e os demais ensaios foram realizados em clima seco. Na condição de clima chuvoso, no primeiro e no vigésimo ensaio, as seções testes foram saturadas por um tempo mínimo de 3 dias de chuva, já no décimo ensaio as seções testes foram saturadas por 13 dias de chuva constantes, ficando 80 % imersa em água. Os ensaios foram realizados sempre entre 9 e 12 horas, com temperaturas em torno de 20 °C, e entre 16 e 18 horas, com temperaturas em torno de 18 °C. As Figuras 4.51 a 4.53 mostram os ensaios de resistividade da escória na condição de clima chuvoso em dormentes de aço e de madeira.



Figura 4.51 - Ensaios de resistividade da escória em dormentes de aço e de madeira no primeiro dia.



Figura 4.52 - Ensaios de resistividade da escória em dormentes de aço e de madeira no décimo dia.



Figura 4.53 - Ensaios de resistividade da escória em dormentes de aço e de madeira no vigésimo dia.

Na condição de clima seco, sem a ocorrência de chuva nos últimos 20 dias foram realizados o quinquagésimo, o centésimo e o centésimo quadragésimo sétimo ensaios com temperaturas variaram entre 28 °C e 37 °C.

Os ensaios de resistividade da escória de ferro silício-manganês foram realizados entre as 16 e 18 horas, com temperaturas em torno de 28 °C; entre as 13 e 15 horas, com temperaturas em torno de 32 °C e entre as 14 e 16 horas, com temperaturas em torno de 37 °C. As Figuras 4.54 a 4.57 mostram os ensaios de resistividade da escória na condição de clima seco em dormentes de aço e de madeira e o gráfico da resistividade da escória de ferro silício-manganês em dormentes de aço.



Figura 4.54 - Ensaios de resistividade da escória em dormentes de aço e de madeira no quinquagésimo dia.



Figura 4.55 - Ensaios de resistividade da escória em dormentes de aço e de madeira no centésimo dia.



Figura 4.56 - Ensaios de resistividade da escória em dormentes de aço e de madeira no centésimo quadragésimo sétimo dia.

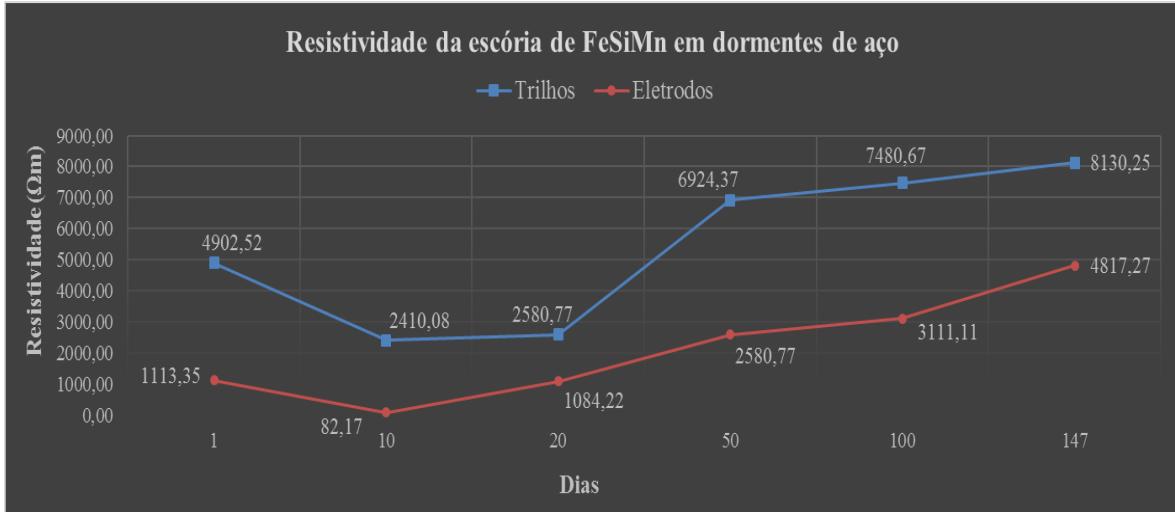


Figura 4.57 - Gráfico da resistividade da escória na seção teste com dormentes de aço.

Como pode ser visto na Figura 4.57, para dormente de aço a resistividade cai no décimo dia de ensaio em relação ao primeiro dia. No décimo dia de ensaio a seção teste ficou parcialmente imersa em água, com isso, a saturação foi maior do que a do primeiro dia ensaio. É importante salientar que as seções testes foram construídas em uma área propícia ao acúmulo de água e sem a existência de sistemas de drenagem (valetas), como encontrados em vias permanentes reais.

Essa área e a falta de um sistema de drenagem nas seções testes foram propositais, tendo como objetivo o acúmulo de água nos ensaios de resistividade elétrica na condição de clima chuvoso. À medida que a chuva diminuía, a resistividade começou a aumentar, e, no vigésimo dia de ensaio, com menos saturação, a resistividade continuou a aumentar. No quinquagésimo, no centésimo e no centésimo quadragésimo sétimo dia de ensaios com o clima seco e sem saturação, a resistividade atingiu valores acima de $8000 \Omega\text{m}$.

A resistividade da escória de ferro silício-manganês na seção teste com dormentes de aço apresentou variações nos ensaios realizados entre trilhos e entre eletrodos. Entre os trilhos, as resistividades medidas do primeiro ao centésimo quadragésimo sétimo dia de ensaios ficaram entre $2400 \Omega\text{m}$ e $8100 \Omega\text{m}$. Esses resultados ficaram acima dos $300 \Omega\text{m}$, como recomendado pela AREMA (2013). Entre os eletrodos, as resistividades medidas do primeiro

ao centésimo quadragésimo sétimo dia de ensaios ficaram entre 82 $\Omega\cdot m$ e 4800 $\Omega\cdot m$. Esse resultado de 82 $\Omega\cdot m$ abaixo do valor recomendado pela AREMA foi medido no décimo dia de ensaio quando a seção teste ficou parcialmente imersa em água, tendo assim, como principal fonte de condutividade a água ionizada.

Os ensaios de resistividade do pó e do agregado da escória feitos no laboratório na condição saturada obtiveram valores acima de 1500 $\Omega\cdot m$ para o pó e 71600 $\Omega\cdot m$ para o agregado. Esses ensaios comprovam que a resistividade medida em campo da escória de ferro silício-manganês na condição saturada não conduz eletricidade. A Figura 4.58 mostra o gráfico da resistividade da escória de ferro silício-manganês em dormentes de madeira.

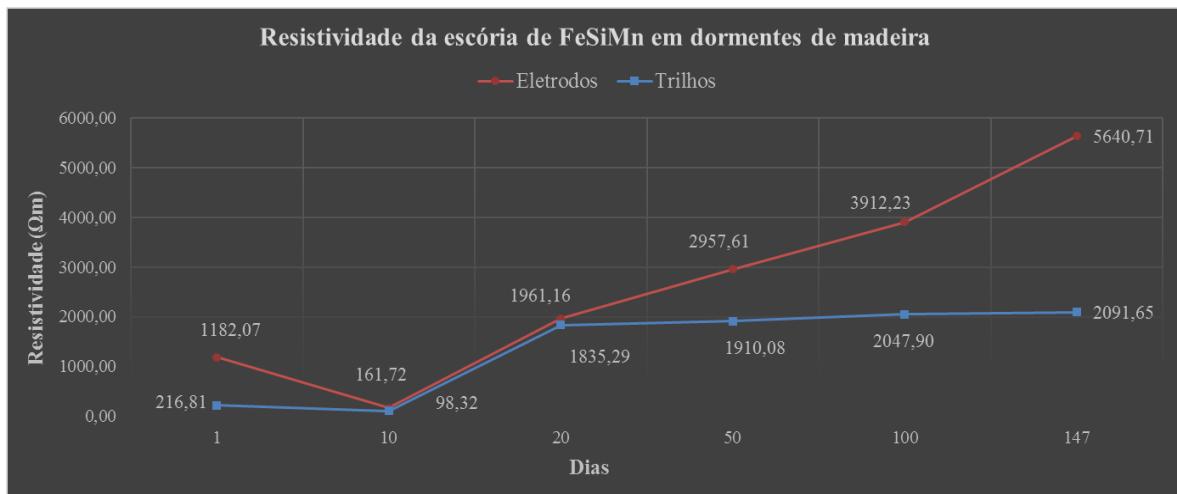


Figura 4.58 - Gráfico da resistividade da escória na seção teste com dormentes de madeira.

Para os resultados dos testes feitos em dormente de madeira pode-se observar que ocorreu a mesma situação vista acima para dormente de aço, no qual a resistividade cai no décimo dia de ensaio em relação ao primeiro dia e aumenta-nos outros dias de ensaios ficando acima do limite 300 $\Omega\cdot m$ como recomendado pela AREMA (2013).

A resistividade da escória na seção teste com dormentes de madeira, assim como na seção teste com dormentes de aço, apresentou variações nos ensaios realizados entre trilhos e entre eletrodos. Entre os trilhos, as resistividades medidas do primeiro ao centésimo quadragésimo sétimo dia de ensaios ficaram entre 98 $\Omega\cdot m$ e 2090 $\Omega\cdot m$. A seção com dormentes de madeira

apresenta uma discrepância dos valores de resistividade medida entre trilhos em relação à resistividade medida entre trilhos na seção com dormentes de aço.

Dentre os componentes, o dormente de madeira torna-se o mais propício a conduzir esta tensão. Este fato se verifica por diversas razões:

- Na montagem da grade de dormente de madeira é utilizada entre os trilhos e o dormente uma placa de apoio feita em aço, e não possui nenhuma palmilha isolante, como na montagem da grade de dormente de aço. Ao contrário da crença popular a madeira, quando úmida, conduz eletricidade. A condutividade varia pouco com a aplicação de voltagem, mas praticamente dobra a cada elevação de 10 °C. A condutividade elétrica da madeira, ou o seu valor recíproco (resistência elétrica), varia muito com o teor de umidade (U), especialmente abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF);
- E, por último, o tratamento químico que os dormentes de madeira sofrem no processo da secagem e controle de pragas pode aumentar a condutividade da madeira quando saturada. Segundo Moreschi (2012), quando a madeira contém quantidades de sais solúveis anormais, ou outras substâncias eletrolíticas tais como preservativos salinos, a condutividade elétrica pode aumentar substancialmente. O aumento da condutividade é pequeno quando o teor de umidade da madeira é menor que 8 %, no entanto, torna-se rapidamente alto quando o teor de umidade excede 10 % ou 12 %.

Essa discrepância dos valores de resistividade medida entre trilhos na seção com dormentes de madeira comprova que a condutividade ocorreu por causa do dormente de madeira e não por causa da escória de ferro silício-manganês, já que esse fato não ocorreu nas seções testes com dormente de aço como dito anteriormente.

Entre os eletrodos, as resistividades medidas do primeiro ao último dia de ensaios ficaram entre 161 Ω.m e 5600 Ω.m. Esses resultados foram obtidos sobre as mesmas condições da seção teste com dormentes de aço, e seguem os mesmos princípios.

4.5. COMPARAÇÃO ENTRE OUTROS MATERIAIS UTILIZADOS COMO LASTRO

Para fazer uma comparação entre os materiais estudados por outros autores e a escória de ferro silício-manganês, foram elaboradas Tabelas de comparação entre os valores encontrados (Tabela. 4.23 e 4.24).

Tabela 4.23 - Comparação da escória de ferro silício-manganês e outros materiais utilizado como lastro.

Propriedade	Sousa (2007)		Fernandes (2010)	Material em estudo	Limites da NBR 5564 (2011)
	Brita de Gnaisse	Escória de Aciaria LD sem tratamento	Escória de Aciaria LD com tratamento	Escória de FeSiMn	Agregado Rochoso
Coeficiente de não uniformidade	1,73	12,67	2,75	1,60	-
Coeficiente de curvatura	1,42	6,88	1,37	0,90	-
Diâmetro máximo característico (mm)	50	50	63,50	63	-
Módulo de finura	8,35	7,74	8,03	8,41	-
Material pulverulento (%)	n.d.	n.d.	8,60	0,003	Máx. 1
Índice de contaminação	3,60	11,20	10,50	1,50	-
Resistência ao desgaste – Abrasão Los Angeles (%)	21,10	11,80	13,14	13,20	Máx. 30
Resistência ao choque – Índice de Tenacidade TRETON (%)	16,00	16,10	7,14	9,97	Máx. 25
Forma da partícula	Cúbica	Cúbica	Cúbica	Cúbica	Cúbica
Partículas não cúbicas (%)	n.d.	n.d.	n.d.	5	Máx. 15
n.d – Não divulgado					

Tabela 4.24 - Comparação da escória de ferro silício-manganês e outros materiais utilizado como lastro.

Propriedade	Sousa (2007)		Fernandes (2010)	Material em estudo	Limites da NBR 5564 (2011)
	Brita de Gnaissse	Escória de Aciaria LD sem tratamento	Escória de Aciaria LD com tratamento	Escória de FeSiMn	Agregado Rochoso
Teor de fragmentos macios e friáveis (%)	18,30	7,40	5,10	4,70	Máx. 5
Teor de argila em torrões (%)	0,38	0,35	0,12	0,15	Máx. 0,5
Resistência à intempérie (%)	0,80	11,10	0,74	0,23	Máx. 10
Resistência à compressão uniaxial (MPa)	n.d.	67,47	n.d.	148,47	Mín. 100
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,60	3,39	3,34	2,96	Mín. 2,5
Absorção de água (%)	0,23	1,96	1,66	1,01	Máx. 0,8
Porosidade aparente (%)	0,36	4,55	4,2	2,00	Máx. 1,5
Teor de cal livre (%)	n.d.	n.d.	0,87	0,07	-
Condutividade após 90 dias (µS/cm)	n.d.	169	65	70	-
n.d. – Não divulgado					

A escória de ferro silício-manganês mostrou-se superior na maioria dos ensaios em comparação com os outros materiais.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentadas as considerações finais, conclusões referentes aos resultados dos ensaios realizados e sugestões para pesquisas futuras.

O aumento da economia e o crescimento industrial e populacional do país nas últimas décadas, gerou uma sobrecarga no sistema de transporte brasileiro. Por esse motivo, tornou-se necessário uma melhor infraestrutura de transporte, tendo como principal objetivo uma malha de integração nacional que ligue todas as regiões brasileiras e não só os pólos industriais. Melhorando, assim, o deslocamento da população bem como o escoamento da produtividade, formando um eficiente sistema de modais.

O governo, junto à iniciativa privada, vem reformando e construindo novas rodovias, ferrovias, aeroportos e portos, com isso, aumentou-se a preocupação com o meio ambiente em relação à exploração de jazidas de matéria-prima bruta. A construção civil tem consumindo a cada dia mais esse tipo de recurso natural e seus próprios resíduos, por este motivo, ela se torna um potencial consumidor de novos produtos que possam substituir os recursos naturais cada vez mais escassos.

Devido às preocupações, de ordem principalmente econômica e ambiental, é fundamental, que se busque novas alternativas para a construção e/ou recuperação da infraestrutura de transporte do país. A alternativa, atualmente mais viável, é o reaproveitamento e reutilização dos coprodutos siderúrgicos. O reaproveitamento e reutilização, total ou parcial, dos coprodutos geram vantagens que tornam o fabricante fortemente competitivo no mercado, não apenas economicamente, mas também proporciona a oportunidade de usar deste princípio como “marketing” ecológico.

Em se tratando da pavimentação ferroviária, o uso do coproduto siderúrgico escória de ferro silício-manganês como material para lastro ferroviário, é uma ótima alternativa tanto nos aspectos econômicos quanto nos aspectos ambientais e estruturais.

A utilização da escória de ferro silício-manganês é extremamente favorável ambiental e economicamente, pois minimiza a exploração de recursos naturais não renováveis, diminui as áreas de descarte da mesma na siderúrgica, diminui a poluição indiscriminada e auxilia no racionamento de energia.

Reduzindo, assim, o seu custo e as despesas de eliminação, gerando uma receita adicional pelo seu uso como material para lastro ferroviário, pois a escória de ferro silício-manganês apresenta características superiores tanto em resistência quanto em durabilidade. Além de ser um material de produção contínua e ter um preço menor que o agregado natural.

São esses motivos que valorizam a proposta de reciclagem e reutilização da escória de ferro silício-manganês como alternativa para construção e/ou recuperação da infraestrutura de transporte no país possibilitando, assim, um desenvolvimento sustentável.

5.2. CONCLUSÕES

5.2.1. Conclusões referentes aos ensaios de laboratório

5.2.1.1. Caracterização física

A escória de ferro silício-manganês apresentou uma granulometria uniforme com dimensões entre 63 e 12,5 mm, exibindo um diâmetro máximo característico e um módulo de finura adequados, e um grau de contaminação moderadamente limpo, sem excesso de material pulverulento.

Nos ensaios de abrasão Los Angeles, a escória de ferro silício-manganês apresentou uma abrasão abaixo do limite máximo recomendado por norma. Isso mostra que a escória possui

uma boa resistência aos desgastes, possibilitando manter sua integridade por um período de tempo maior, ou seja, aumentar a vida útil do lastro.

A escória de ferro silício-manganês apresentou uma resistência ao choque “TRETON” de 15,03 % maior que as dos materiais usualmente utilizados para lastro, se enquadrando dentro do limite da NBR 5564 (2011).

O ensaio de massa específica aparente apresentou valores dentro dos limites preconizados por norma. O modelo matemático gerado com os resultados dos ensaios de porosidade aparente e absorção de água, demonstrou que os valores dos ensaios podem ser maiores que os limites máximos preconizados pela norma, comprovando que os valores da norma NBR 5564 (2011) especificado para materiais rochosos não se aplicam à escória de ferro silício-manganês.

No ensaio de forma do material, a escória de ferro silício-manganês apresentou uma forma cúbica e uma quantidade mínima de partículas não cúbicas. A predominância da forma cúbica na amostra da escória estudada é favorável à aplicação deste coproduto siderúrgico como material de lastro ferroviário, visto que fragmentos com formatos cúbicos tendem a provocar um maior imbricamento entre os fragmentos oferecendo maior rigidez à camada de lastro.

No ensaio de teor de fragmentos macios e friáveis, a escória de ferro silício-manganês obteve resultado positivos. Esse resultado comprova que as quantidades de fragmentos macios e friáveis da escória, encontram-se dentro do limite máximo prescrito pela norma NBR 5564 (2011).

Devido principalmente ao processo de produção da escória de ferro silício-manganês, a mesma não apresenta em sua composição teores significativos de argila em torrões e materiais friáveis. O valor obtido de argila em torrões e materiais friáveis, é referente à fração de material macio e friável. Esse valor encontra-se abaixo do limite máximo normatizado.

No ensaio de resistência às intempéries da escória de ferro silício-manganês o valor encontrado ficou 9,77 % abaixo do limite máximo preconizado. A escória apresentou uma baixa quantidade

de resíduos na solução de sulfato, exibindo uma aparência final homogênea, normal, sem trincas, que normalmente ocorre em escórias não tratadas devido à expansão de volume nos fragmentos do corpo de prova do material. Tais resultados comprovam que a escória possui uma alta resistência às intempéries.

5.2.1.2. Caracterização mecânica

Em comparação com o limite de resistência à compressão uniaxial estabelecido pela NBR 5564 (2011), o ensaio de compressão uniaxial da escória de ferro silício-manganês obteve uma resistência média de 48 % acima do limite mínimo.

Este resultado qualifica a escória para a utilização como lastro ferroviário, pois a resistência é fundamental para manter a posição da grade na via, resistindo às forças verticais, laterais e longitudinais aplicadas aos dormentes.

No ensaio de carga pontual a escória apresentou um plano preferencial de ruptura. O plano paralelo mostrou-se mais apto a sofrer uma ruptura, pois sua resistência é menor neste plano.

5.2.1.3. Caracterização química e mineralógica

O ensaio de difração de raios X mostrou que a amostra possui em composição mineralógica: magnetita, quartzo, diopsídio e hematita.

A análise química da escória de ferro silício-manganês mostrou que a maior porcentagem de óxido de cálcio (CaO) e o somatório dos óxidos de alumínio (Al_2O_3) e de ferro (Fe_2O_3) encontrados ficaram abaixo dos valores recomendados pela AREMA (2013), ou seja, a amostra encontra-se em conformidade com os limites de óxido de cálcio (CaO) menor do que 45 % e um somatório dos óxidos de alumínio (Al_2O_3) e de ferro (Fe_2O_3 e FeO) inferior a 30 % prescritos pela norma.

No ensaio de microscopia eletrônica de varredura os pontos analisados que apresentaram, em média, maiores porcentagens foram os teores de óxido de carbono, óxido de silício, óxido de cálcio e óxido de manganês, sendo que o óxido de carbono apresentou, entre todos os elementos, a maior porcentagem. Os valores encontrados comprovaram que os óxidos encontrados ficaram abaixo dos valores máximos recomendados pela AREMA (2013).

O ensaio de teor de cal livre demonstrou que a escória de ferro silício-manganês apresentou uma porcentagem média total de cal livre aproximadamente nula, comprovando que a quantidade de cal existente está muito abaixo do limite máximo preconizado por norma, o que atesta a inexistência de expansão volumétrica.

5.2.1.4. Caracterização ambiental

Os ensaios de lixiviação apresentaram resultados que demonstram que os resíduos originários da amostra ensaiada não são perigosos, por tanto, Classe II.

Nos ensaios de solubilização, os resíduos originários da amostra de escória de ferro silício-manganês foram classificados como Classe II A (não perigoso – não inerte), após uma análise das condições necessárias para a escória solubilizar em campo que foi submetida ao IBAMA. O mesmo, por meio do Ofício nº306/2010/NLA/SUPES/IBAMA/MG, aprovou a utilização da escória de ferro silício-manganês como lastro ferroviário, em se tratando da caracterização e classificação ambiental.

5.2.1.5. Caracterização elétrica

A condutividade da escória de ferro silício-manganês, após noventa e dois dias de ensaios, atingiu a condutividade da água potável. Isso demonstra que a escória obteve uma estabilização e alcançou um estado de não condutiva. O pH da escória permaneceu básico ao longo de todos os ciclos de análises. E, por meio de uma análise visual final da escória, a mesma

não apresentou quebras em suas partículas devido à expansão. Essa análise é comprovada por meio dos ensaios químicos vistos anteriormente, pois eles demonstram que a quantidade de CaO é tão pequena que a formação de hidróxido de cálcio - Ca(OH)₂, ou cal hidratada -, principais responsáveis pela expansão, é praticamente nula.

Os resultados dos ensaios de resistividade elétrica realizados com os fragmentos e com o pó da escória de ferro silício-manganês em laboratório sobre condições controladas, e com temperaturas variadas, demonstram que, tanto os fragmentos como o pó da escória nas condições saturada e seca, apresentaram um valor mínimo de resistividade 1200 vezes maior que o limite mínimo recomendado pela AREMA (2013).

5.2.2. Conclusões referentes aos ensaios de campo

5.2.2.1. Caracterização elétrica

Nos ensaios realizados entre trilhos na seção teste com dormentes de aço, as resistividades medidas do primeiro ao centésimo quadragésimo sétimo dia de ensaios ficaram acima do limite mínimo preconizado por norma.

Nos ensaios realizados entre trilhos na seção teste com dormentes de madeira, as resistividades medidas do primeiro ao centésimo quadragésimo sétimo dia de ensaios apresentaram uma discrepância dos valores de resistividade em relação à medida entre trilhos na seção com dormentes de aço. Por esse motivo, foram identificando, assim, todos os componentes presentes na seção teste com dormentes de madeira que poderiam conduzir a tensão aplicada. Dentre os componentes os dormentes de madeira tornam-se os mais propícios a conduzir essa tensão.

Esse fato se verifica, em primeiro lugar, pela montagem da grade com dormentes de madeira. Na montagem não são utilizadas palmilhas isolantes entre os trilhos e os dormentes como na montagem da grade com dormentes de aço. Isso possibilita a condução entre trilhos e os

dormentes de madeira que, quando úmidos, podem conduzir eletricidade, já que a condutividade elétrica da madeira varia muito com o teor de umidade e com o ponto de saturação das fibras, ou seja, à medida que o teor de umidade aumenta de 0 % até o ponto de saturação das fibras, a condutividade elétrica cresce. Com o preenchimento dos espaços existentes na estrutura da madeira pela água, houve a elevação do teor de umidade acima do ponto de saturação das fibras proporcionando o aumento de condutividade.

Em segundo lugar o tratamento químico, que os dormentes de madeira sofrem no processo da secagem e controle de pragas, aumenta a condutividade da madeira quando saturada. Pois, após esses processos a madeira passa a conter quantidades de sais solúveis anormais, ou outras substâncias eletrolíticas, tais como preservativos salinos, que aumentam substancialmente a condutividade elétrica.

Entre os eletrodos, as resistividades medidas nos ensaios e nas seções testes com dormentes de aço e de madeira apresentaram resultados abaixo do valor mínimo recomendado pela norma no décimo dia de ensaios, quando a seção teste ficou parcialmente imersa em água, tendo assim, como principal fonte de condutividade, a água ionizada. Sendo, assim, comprovado por meio dos ensaios de laboratório da resistividade do agregado e do pó da escória de ferro silício-manganês na condição saturada, que obtiveram valores muito acima do limite mínimo recomendado. Esses ensaios demonstram que a resistividade medida em campo da escória de ferro silício-manganês na condição saturada não conduz eletricidade. Todos os ensaios realizados, em condição saturada ou seca, demonstraram que a escória de ferro silício-manganês apresenta uma resistividade elétrica em conformidade com os limites estabelecidos por norma.

5.2.3. Conclusão final

Os ensaios realizados nesta dissertação comprovaram que a escória de ferro silício-manganês atende a todos os requisitos necessários para um material ser considerado apto para a

utilização com lastro ferroviário. Tanto para os parâmetros normativos nacionais quanto para os internacionais a escória apresentou valores superiores aos limites mínimos prescritos pelas normas.

Diferente dos demais agregados siderúrgicos utilizados na pavimentação ferroviária, a escória de ferro silício-manganês é um coproduto de utilização imediata, pois não demanda nenhum tipo de processo de cura para controlar a expansão volumétrica. Necessita somente de ser britada na granulometria desejada, e como qualquer material utilizado na pavimentação, é necessário o controle da granulometria.

Diante da crescente necessidade de uma adequação e ampliação da infraestrutura de transporte atual no Brasil, a escória de ferro silício-manganês evidencia-se como um coproduto sustentável para a pavimentação devido ao baixo custo, produção contínua, comportamento e o desempenho superiores, que tornam a mesma, um ótimo substituto dos materiais rochosos utilizados para lastro ferroviário.

5.3. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Como sugestões para pesquisas futuras e para o prosseguimento dos estudos desenvolvidos nesta dissertação, é proposto:

- Buscar a inserção de ensaios novos na caracterização da escória de ferro silício-manganês para uso como lastro ferroviário, como o ensaio de esmagamento de índices de quebra dos grãos, padronizando os índices de qualidade para os referidos ensaios;
- O estudo técnico com o objetivo de alterar a classificação ambiental de IIA para IIB, ainda na fase líquida da escória;
- Realizar novos ensaios de correlação entre a resistência e a absorção da escória;

- Estudar a possível utilização da escória de ferro silício-manganês como agregado na construção civil;
- Estudar a possível utilização da escória de ferro silício-manganês como agregado na construção de dormentes de concreto para as ferrovias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Disponível em <http://www.abnt.org.br/>. Acesso em 02/10/2012.

ABREU, S. F. **Recursos minerais do Brasil**. São Paulo, SP, Editora Edgard Blucher LTDA, 1973. vol. 2.

ALEXANDRE, J.; RAGUIN, J. **Beneficiation of blast furnace slag and converter slag in the french iron and steel industry**. In: Committee on environmental affair. Utilisation of blast furnace and BOF slag. Brussels, Belgium: International Iron and Steel Institute, section A2, 1984.

ALLEN, T. **Particle size measurement**, 5th Ed., Chapman & Hall, New York, USA, 1997.

ALVARENGA, J. C. A. **Um estudo de avaliação estrutural e econômica de pavimentos flexíveis de escória de aciaria**. Anais do XV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Campinas, 2001. vol. 1.

ANDRADE, M. L. A.; CUNHA, L. M. S. **O setor siderúrgico**. Disponível em: www.bnDES.gov.br/conhecimento/livrosetorial/setorial03.pdf. Acesso em 22/10/2011.

ANDRADE, M. L. A.; CUNHA, L. M. S.; GANDRA, G. T. **Panorama da indústria mundial de ferroligas**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, 1999. n. 10.

ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JONH, V. M. **Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil**. In: IV Seminário desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil. CT206 – IBRACON, São Paulo, 2001.

AREMA – American Railway Engineering and Maintenance Association. **Manual for Railway Engineering**. Lanham, 2013. vol. I - IV.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **ASTM D573 - Determining of point load strength index of rocks**, 2008.

ÁVILA, T. A. **Condicionamento de escórias em forno elétrico a arco para otimização das condições de espumação da escória e refino do aço**. Dissertação de mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

BAGAMPADDE, U.; WAHHAB, H. I. A.; AIBAN, S. A. **Optimization of steel slag aggregates for bituminous mixes in Saudi Arabia**. Journal of Materials in Civil Engineering, 1999.

BALTAZAR, R. P. **Caracterização do fator expansão de uma escória de aciaria em diferentes processos de cura para uso em pavimentação**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

BARAT, J. A. **Evolução dos transportes no Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE: IPEA, 1978.

BARRETT, E. P.; JOYNER, L. G.; AND HALEND, P. P. **The determination of pore volume and area distributions in porous substances. I. Computations from nitrogen isotherms**. J. Amer. Chem. Soc., 1951.

BRINA, H. L. **Estradas de Ferro 1 – Via Permanente**. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos S. A., 1983.

BRUNAUER S.; EMMETT P. H.; TELLER E. **Adsorption of gases in multimolecular layers**. J. Am. Chem. Soc., 1938.

CAIXETA – FILHO, J. V.; GAMEIRO, A. H. **Especificidade das modalidades de transporte para a movimentação de produtos agrícolas**. Transporte e logística em sistemas agroindustriais. São Paulo, Atlas, 2001.

CARDOSO, J. J. **Eletrotermia: fornos elétricos a arco**. Imprensa Universitária da UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1987. vol. 1.

CBTU – Companhia Brasileira de Trens Urbanos. **Especificação de serviço via permanente ESVG 04. Socaria manual de lastro**. DENG – Departamento de Engenharia Civil, 2005.

CLOZIER, R. **Geographie de la circulation: l'économie des transports terrestres (rail, route et eau)**. Genin. Geographie économique et sociale. Paris, 1969. vol.3.

CONNER, W. C.; CEVALLOS-CANDAU, J. F.; WEIST, E. L.; PAJARES, J.; MENDIOROZ, S.; CORTÉS, A. **Characterization of pore structure**. Porosimetry and sorption. Langmuir, 1986.

COUTO E SILVA, G. **Geopolítica e poder**. Rio de Janeiro, 2003.

CUNHA, A. F.; FILHO, G. A.; JÚNIOR, A. M.; GOMES, O. C. B.; ASSIS, P. S. **Aspectos técnicos da utilização da carepa gerada em processos siderúrgicos e tratada por desagregação ultrassônica**. Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, 2006. vol. 3.

CHAICHENKO, A. A.; KASHAKASHVILI, G. V.; ARABULI, I. A.; AKHABADZE, T. V.; TSKITASHVILI, YU. A.; VERETENNIKOV, O. K.; MURAKHOVSKII, V. V.; SEDOV, A. A. **Smelting of silicomanganese**. Otkrytiya, Izobret, 1986.

CHAUDHARY, P. N.; GOEL, R. P.; ROY, G. G. **Dephosphorization of high carbon ferromanganese using BaCO₃ based fluxes**. Ironmaking and Steelmaking, 2001. vol. 28, nº 5.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. ABM, 6^a Edição. São Paulo, 1990.

DELLA, V. P.; JUNKES, J. A.; KUHN, I.; HIELLA, H. G.; HOTZA, D. **By-product Utilization of metallic recovering of stainless steel slags in the ceramic pigments synthesis: Raw material characterization**. Cerâmica, 2005. vol. 51.

DING, W.; OLSEN, S. E. **Manganese and silicon distribution between slag and metal in silicomanganese production.** ISIJ International, 2000. vol. 40.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. Disponível em <http://www.dnit.gov.br/ferrovias/historico>. Acesso em 20/05/2013.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **Especificação técnica de material, ETM - 003: Dormentes.** Disponível em <http://www.dnit.gov.br/consultas-publicas/etm-003-dormentes.pdf>. Acesso em 20/05/2013.

EMLIN, B. I.; POGREBNYAK, A. I.; VODIN, I. I.; MATYASHENKO, N. K.; BELAN, V. D.; SARANKIN, V. A.; CHUPAKHIN, YU. M.; SHAPOSHNIK, I. I.; SHCHEDROVITSKII, V. YA. **Silicomanganese smelting.** Otkrytiya Izobret, 1986.

FARIA, G. L. **Estudo da intensidade de crepitação de minérios granulados de manganês do Brasil.** Dissertação de mestrado, REDEMAT - Rede Temática em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

FARIA, G. L. **Estudo geometalúrgico de granulados e pelota de minério de manganês.** Dissertação de doutorado, REDEMAT - Rede Temática em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

FATMA – Fundação do Meio Ambiente: Programa Nacional de Meio Ambiente, 2007. Disponível em www.fatma.sc.gov.br/projetos/conveio_pnmaII.htm. Acesso em 12/07/2012.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Levantamento da situação ambiental e energética do setor de ferroligas e silício metálico no estado de minas gerais, prospecção de ações para o desenvolvimento sustentável da atividade.** Relatório técnico. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento, Gerência de Desenvolvimento e Apoio Técnico às Atividades Industriais, 2010.

FERNANDES, G. **Comportamento de estruturas de pavimentos ferroviários com utilização de solos finos e/ou resíduos de mineração de ferro associados à geossintéticos.** Tese de doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

FERNANDES, D. P.; PRADO FILHO, J. F. **Caracterização da escória de aciaria como base para indicação de uso em lastros de ferrovias.** Relatório de pesquisa. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto/FAPEMIG, Ouro Preto, 2007.

FERNANDES, D. P. **Estudo de estabilização química, geomecânica a ambiental da escória de aciaria LD para fins de aplicação como material de lastros de ferroviário.** Dissertação de mestrado, NUGEO - Núcleo de Geotécnica da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

FRIAS, M; SANCHEZ DE ROJAS, M. I; SANTA MARIA, J; RODRIGUEZ, C. **Recycling of silicomanganese slag as pozzolanic material in portland cements.** Basic and engineering properties, 2005.

FILEV, R. **Escória de aciaria.** Ficha técnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. Disponível em www.reciclagem.pcc.usp.br/escoria_de_aciaria.htm. Acesso em 26/04/2012.

FORTES, A. B. **Aspectos dos transportes no Brasil.** Bibliex. Rio de Janeiro, 1956.

FURTADO, C. **Formação econômica do Brasil.** Fundo de Cultura. Rio de Janeiro, 1959.

GAAL, S.; BERG, K.; TRANELL, G.; OLSEN, S.; TANGSTAD, M. **An investigation into aspects of liquid phase reduction of manganese and silica containing slag.** VII International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts, The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2004.

GEISELER, J.; DRISSEN P.; KUEHN, M.; SCHREY, H. **Liquid slag treatment guarantees high product quality of steel slags.** Iron and Steel Slags - Properties and utilization – Reports, 1999.

GEORGE, P. **Geografia econômica**. Fundo de Cultura. Rio de Janeiro, 1970.

GEYER, R. M. T. **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

GET, F.; LAJEUNESSE, D. **Encyclopédie des chemins de fer**. Editions de la Courtille, Paris, 1980.

GOBDULLIN, T. G.; TOLYMBEKOV, M. ZH.; TAKENOV, T. D.; BAISANOV, S.; BUKETOV, E. A.; DRUINSKII, M. I. **Smelting of silicomanganese**. Otkrytiya, Izobret, Prom. Obraztsy, Tovarnye. Znaki, 1982.

GOODMAN, R. E. **Introduction to Rock Mechanics**. 2ed. New York: John Wiley & Sons, 1989.

GONÇALVES, E.; SERFATY, A. **Perfil analítico do manganês**. DNPM – Departamento Nacional da Produção Mineral, Boletim n 37, Brasília, 1976.

GUMIERE, A. G. **Estudo da Viabilidade Técnica da Utilização de Escórias de Aciaria do Processo LD em Materiais de Construção Civil**. Proposta de Tese. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000.

HAN, X.; SELIG, E. T. **Effects of fouling on ballast settlement**. In: International Heavy haul Conference, 6, St Louis. Annals St Louis: Int. Heavy Haul Association. Spoornet, 1997. vol. 1.

HAY, W. **Railroad Engineering**. 2nd ed., New York, John Wiley & Sons, 1982.

IPHAN – Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional. Disponível em <http://portal.iphan.gov.br/portal/montarDetalheConteudo.do?id=15833&sigla=Institucional&retorno=detalheInstitucional>. Acesso em 19/04/2013.

JOHN, V. M. Pesquisa e desenvolvimento de mercado para resíduos. In: Workshop sobre Reciclagem e reutilização de resíduos como materiais de construção civil, São Paulo, 1996.

KANDHAL, P. S.; LEE, D. Asphalt absorption as related to pore characteristics of aggregates. Highway Research Record, 1972. n. 404.

KANDHAL, P. S.; HOFFMAN, G. L. Evaluation of steel slag fine aggregate in hot-mix asphalts mixtures. Transportation Research Record, Washington, D.C., 1998.

KHAN, M. I.; WAHHAB, H. I. A. Improving slurry seal performance in Eastern Saudi Arabia using steel slag. 12º Construction and Building Materials, 1998.

KHATER, G. A. The use of Saudi slag for the production of glass-ceramic materials, 2001.

KRUGER, P. V. Relatório Técnico 60 - Perfil de Ferroligas. Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação MINERAL. Banco Mundial. BIRD - Banco Internacional para a Reconstrução e Desenvolvimento, 2009.

LAMBERT, J. Os dois Brasis. São Paulo: Cia Editora Nacional, 1972.

LEE, D. Y. The relationship between physical and chemical properties of aggregates and their asphalt absorption. Association of Asphalt Paving Technologists, 1969. vol. 38.

LEITE, A. A. F.; BAJAY, S. V.; GORLA, F. D. Oportunidades de eficiência energética para a indústria. Relatório setorial, Ferroligas, Brasília, 2010.

LETTIER, J. A.; FINK, D. F.; WILSON, N. B.; FARLEY, F. F. Mechanism of absorption of bituminous materials by aggregate. Association of Asphalt Pavement Technologists, 1949. vol.18.

LIM. W. L. Mechanics of railway ballast behaviour. United Kingdom, Doctor thesis. University of Nottingham, 2004.

LIMA, K. T. P. **Determinação automática da porosidade e zoneamento de perfis através de rede neural artificial competitiva.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Pará, Belém, PA, 2000.

LIU, X. **Dephosphorization of ferro-manganese under oxidizing conditions.** Tese de Ph.D., TRITA-PT-93-01, The Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Suécia, 1993.

LOPES, J. C.; SOBRINHO, B. M. **Dois estudos sobre transportes.** Bibliex. Rio de Janeiro, 1951.

LÚCIO, A; MINES, C. R. C.; CASTRO, L. F. A.; FIGUEIRA, R. M.; SAMPAIO, R. S.; SILVEIRA, R. C. **Metalurgia dos Ferroligas.** Belo Horizonte, editora UFMG, 1980. vol. I e II.

MASS, H. G. **Steelmaking Slags.** In: Committee on environmental affair. Utilisation of blast furnace and BOF slag. Brussels, Belgium: International Iron and Steel Institute, 1984.

MACÊDO, F. B. **Estudo do desgaste de trilhos ferroviários.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2009.

MACHADO, A. T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria.** Dissertação de mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2000.

MAIA, P. C. A.; NUNES, A. L. L. S.; ANTUNES, F. S. **Alterabilidade de rocha basáltica - Caracterização Mecânica.** IN: Solos e Rochas, Revista Latino - Americana de Geotecnica. ABMS/ABGE, 2004. vol.26.

MANCIO, M. **Caracterização e avaliação das escórias de aciaria elétrica.** Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

MEDINA, J. Mecânica dos Pavimentos. Editora UFRJ, Rio de Janeiro, 1997.

MDICE – Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Disponível em <http://www.desenvolvimento.gov.br>. Acesso em 10/04/2013.

MMA – Ministério de Meio Ambiente. Disponível em <http://www.mma.gov.br/>. Acesso em 15/04/2012.

MME – Ministério de Minas e Energia. **Anuário estatístico do setor metalúrgico**. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, Departamento de Transformação e Tecnologia Mineral, 2012.

MT – Ministério dos Transportes, 2012. Disponível em <http://www.transportes.gov.br>. Acesso em 26/04/2013.

MONBEIG, P. O Brasil. Difusão Europeia do Livro. São Paulo, 1971.

MORESCHI, J. C. Propriedades da madeira. Ministério da Educação e do Desporto, Setor de Ciências Agrárias da UFPR, Centro de Ciências Florestais e da Madeira, Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, 4^a edição, novembro, Curitiba, PR, 2012.

MOURA, W. A. Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

MOTZ, H.; GEISELER, J. The steel slags - characteristics, properties and quality assurance, Iron and Steel Slags - Properties and utilization – Reports, 1998.

MUNIZ DA SILVA, L. F. Fundamentos Teórico-experimentais da Mecânica dos Pavimentos Ferroviários e Esboço de um Sistema de Gerência Aplicado à Manutenção da Via Permanente. Tese de doutorado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

NASCIMENTO, J. F. **Estudo da expansibilidade em escória de aciaria para uso em pavimentação rodoviária.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

NBR NM 248:2003. **Agregados – Determinação da composição granulométrica.**

NBR 7211:2009. **Agregados para concreto – Especificação.**

NBR NM 46:2003. **Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75µm, por lavagem.**

NBR NM 51:2001. **Agregado graúdo – Ensaio de abrasão Los Angeles.**

NBR 7218:1987. **Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis.**

NBR NM 13:2004. **Cimento Portland – Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol.**

NBR 5564:2011. **Via férrea – Lastro ferroviário – Requisitos e métodos de ensaios.**

NBR 5564:2011. **Anexo A – Determinação da forma dos fragmentos da pedra britada.**

NBR 5564:2011. **Anexo B – Determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água.**

NBR 5564:2011. **Anexo C – Determinação da resistência à intempérie.**

NBR 5564:2011. **Anexo D – Determinação da resistência à compressão uniaxial no estado saturado.**

NBR 5564:2011. **Anexo E – Determinação da Resistência ao Choque.**

NBR 5564:2011. **Anexo F – Determinação do teor de fragmento macio e friável.**

NBR 5564:2011. Anexo G – Amostragem de material para lastro para via férrea.

NBR 6490:1985. Reconhecimento e Amostragem para fins de caracterização de ocorrência de rochas.

NBR 10004:2004. Resíduos sólidos - Classificação.

NBR 10005:2004. Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólido.

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

NIKOLAEV, V. I. Selection of optimum slag basicity in ferromanganese production. Steel in USSR, 1974. n. 4.

NÓBREGA, L. M. Caracterização mecânica de misturas asfálticas utilizando escória de ferroliga de manganês como agregado. Tese de mestrado, Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Salvador, 2007.

NORTON, F. H. Introdução à tecnologia cerâmica. Edgard Blucher Ltda: São Paulo, 1973.

OLSEN, S. E.; TANGSTAD, M.; LINDSTAD, TOR. Production of ferromanganese alloys in the submerged arc furnace. Trondheim, Norway, 2007.

OLSEN, S. E.; TANGSTAD, M. Silicomanganese production - process understanding. Dep. of Materials Technology, Norwegian University of Science and Technology; N-7491 Trondheim, Norway, 2004.

PARENTE, E. B.; BOAVISTA, A. H.; SOARES, J. B. Estudo do comportamento mecânico de misturas de solo e escória de aciaria para aplicação na construção rodoviária na região metropolitana de fortaleza, 2003. Departamento de Engenharia de Transportes – DET, Universidade Federal do Ceará – UFC. Disponível em

http://www.det.ufc.br/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=127&Itemid=159&theme=artigos. Acesso em 26/04/2013.

REIS, E. L. Caracterização de resíduos provenientes da planta de beneficiamento do minério de manganês sílico carbonatado da RDM-Unidade Morro da Mina. Dissertação mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

REINSCHMIDT, A. J.; SELIG, E. T.; KLASSEN, M. J.; CHRISMER, S. M. Development of a performance specification for ballast in the north american railroad freight environment. In: Proceedings of The Fourth International Heavy Haul Railway Conference, Brisbane, Austrália, 1989.

RIZZO, E. M. S. Introdução aos processos de refino primário dos aços nos fornos elétricos a arco. Editora ABM, 2006.

ROCHA, B. P. Estudo da viabilidade da reutilização da escória do refino secundário no forno elétrico a arco. Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

ROHDE, L. Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

SANTOS, L. M. M. Siderurgia para Cursos Tecnológicos. ETFOP – Escola Técnica Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

SAHAY, J. S.; NAGPAL, O. P.; PRASAD, S. Waste management of steel slag. In: Steel times international, 2000.

SBRIGHI, C. N.; BATTAGIN, I. L. S. Precauções e limitações do uso de escórias como agregados na construção civil. CPTI, São Paulo, 2002.

SELIG, E. T.; WATERS, J. M. Track geotechnology and substructure management. Thomas Telford Services Ltd. London, 1994.

SELIG, E. T.; PARSONS, B. K.; COLE, B. E. **Drainage of railway ballast**, 1993. In: International Heavy Haul Conference, 5, 1997, Beijing. Proceedings Beijing: Int. Heavy Haul Association.

SERRA, O. **Fundamentals of well-log interpretation**. V.1, Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V., 1984.

SILVA, A. L. V. C. **Elaboração do aço em forno elétrico a arco**. ABM-FEI Pós Graduação, 2006. Disponível em http://equilibriumtrix.net/refino/-forno_eletrico_acs_rev4.pdf. Acesso em: 20/10/2012.

SILVA, E. A. **El uso de escoria de acería tratados con emulsiones catiónicas en diversos pavimentaciones**. 6º Congresso Ibero-Latino Americano Del Asfalto, Santiago, Tomo, 1991.

SILVA, E. A. **Uso de escória de aciaria em pavimentação viária**. 28ª Reunião Anual de Pavimentação, Belo Horizonte, 1994.

SILVA, E. A.; MENDONÇA, R. L. **Utilização da escória de aciaria em todas as camadas do pavimento**. Revista Engenharia Ciência e Tecnologia, 2001. vol. 4.

SILVA FILHO, A. F.; MOURA, W. A.; LEITE, R. S. **Caracterização de escória de ferro-cromo como agregado graúdo para a produção de concreto**. Sitientibus, Feira de Santana, 2002. n. 26.

SILVA, J. N. S. **Siderurgia**. IFPA - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, Universidade Federal de Santa Maria, Sistema Escola Técnica Aberta do Brasil – e-Tec Brasil, Santa Maria, Belém, 2011.

SILVA, N. S.; JUSTUS, S. M.; ANDRADE, R. M.; LONGO, E.; CUNHA, F. N.; OLIVEIRA, B. H. L.; BALDUINO, F. **Aplicação de Escória LD como Pavimento Rodoviário e Lastro Ferroviário**. In: Seminário de Redução de Minério de Ferro, XXXI, Santos. Anal. ABM, 2000.

SILVA, R. G. O. **Estudo laboratorial do desempenho mecânico de misturas asfálticas com resíduos industriais de minério de ferro.** Dissertação de mestrado. NUGEO - Núcleo de Geotécnica da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

SILVEIRA, R. C.; ALMEIDA, A. M. M. **Projeto e operação dos fornos elétricos de redução.** São Paulo: editora Associação Brasileira de Metais, 1987.

SING, K. S. W.; EVERETT, D. H.; HAUL, R. A. W.; MOSCOU, L.; PIEROTTI, R. A.; ROUQUÉROL, J.; SIEMIENIEWSKA, T. **Reporting physisorption date for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity.** Pure Appl. Chem., 57. 1985.

SOUZA, G. M. **Estudo experimental de escórias de aciaria para fins de caracterização tecnológica como material de lastro ferroviário em vias sinalizadas.** Dissertação de mestrado. NUGEO - Núcleo de Geotécnica da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

SPADA, J. L. G. **Uma abordagem de mecânica dos pavimentos aplicada ao entendimento do mecanismo de comportamento tensão deformação da via férrea.** Tese de doutorado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

TAKANO, C.; CAPOCCHI J. D. T.; NASCIMENTO, R. C.; MOURÃO, M. B.; SANTOS, D. M.; LENZ G. **A reciclagem de resíduos siderúrgicos sólidos.** Seminário nacional sobre reuso/reciclagem de resíduos sólidos industriais, São Paulo, 2000.

TANGSTAD, M. **The high carbon ferromanganese process – Coke Bed Relations.** Tese (Doktor Ingeniøravhandling) – Metallurgist Institutt. Trondheim, 1996.

THOMAS, G. H. **Expériences britanniques d'utilisation des scories LD comme revêtements routiers.** Revue de Métallurgie, Paris, 1978.

TOLMASQUIM, M. T.; SZKLO, A. S. **A matriz energética brasileira na virada do milênio.** ENERGE. Rio de Janeiro, 2000.

TOSTICARELLI, J.; ANGELONE, S.; ANDREONI, R. **Escoria de aceria. Estado actual de estudios sobre su utilização.** Memoria técnica de las primeras jornadas técnicas de escorias siderúrgicas. Buenos Aires, 1985.

VENCOVSKY, V. P. **Sistema ferroviário e o uso do território brasileiro. Uma análise do movimento de produtos agrícolas.** Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, Campinas, 2006.

WEF - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 1998.

WRIGHT, S. E. **Damage caused to ballast by mechanical maintenance techniques.** British Rail Research Technical Memorandum, United Kingdom, TM TD 15, May, 1983.

YOSHIMURA, H. N.; MOLISANI, A. L.; SIQUEIRA, G. R.; CAMARGO, A. C.; NARITA, N. E.; CESAR, P. F.; GOLDENSTEIN, H. **Efeito da porosidade nas propriedades mecânicas de uma alumina de elevada pureza,** 2005.

ANEXOS

ANEXO I - ENSAIO DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DO LASTRO

Os resultados do teste de condutividade do lastro de escória de ferro silício-manganês com todas as variáveis investigadas ao longo dos 147 dias, são apresentados nas Tabelas I.1 a I.5.

Tabela I.1 - Resultados do teste completo de condutividade elétrica do lastro.

Dias Decorridos	Data	Horário	Temp. int. (°C)	Temp. ext. (°C)	Condutividade (µS/cm)	pH	Descarga
1	06/03/2011	16:10	25	22	223	8,13	x
2	18/03/2011	15:50	26	22	155	8,01	
3	19/03/2011	15:55	27	24	141	8,13	x
4	24/03/2011	15:20	23	19	112	8,04	
5	25/03/2011	15:40	22	20	112	8,05	
6	26/03/2011	16:04	21	23	146	9,18	x
7	31/03/2011	14:30	26	24	110	8,57	
8	01/04/2011	17:55	22	23	115	8,18	
9	02/04/2011	16:58	21	24	144	8,25	
10	03/04/2011	16:00	23	24	113	8,44	x
11	07/04/2011	16:58	23	21	169	8,43	
12	08/04/2011	14:15	22	23	108	8,25	x
13	14/04/2011	14:40	24	23	125	8,51	
14	15/04/2011	15:40	23	22	164	8,46	
15	16/04/2011	15:00	22	22	110	8,73	
16	17/04/2011	15:20	28	27	107	8,47	x
17	23/04/2011	14:45	23	21	118	8,19	
18	24/04/2011	14:30	21	20	127	8,44	
19	25/04/2011	14:15	22	24	148	8,82	x
20	28/04/2011	15:40	24	22	96	8,47	
21	29/04/2011	15:52	19	20	127	8,55	
22	30/04/2011	15:05	22	27	132	8,52	x
23	07/05/2011	15:00	24	25,5	104	8,41	x

Tabela I.2 - Resultados do teste completo de condutividade elétrica do lastro.

Dias Decorridos	Data	Horário	Temp. int. (°C)	Temp. ext. (°C)	Condutividade (µS/cm)	pH	Descarga
24	14/05/2011	14:30	21	22	88	8,25	
25	15/05/2011	15:00	22	23	95	8,47	x
26	19/05/2011	15:30	24	25	112	8,4	
27	20/05/2011	16:20	19	19	93	8,48	
28	21/05/2011	16:00	20	18	110	8,34	
29	22/05/2011	15:20	22	21	110	8,43	x
30	26/05/2011	15:20	19	20	97	8,23	
31	27/05/2011	15:00	21	26	140	8,97	
32	28/05/2011	14:20	23	26	100	8,49	
33	29/05/2011	14:05	23	25	115	8,61	x
34	02/06/2011	15:00	22	26	107	8,73	
35	03/06/2011	15:15	20	21	130	8,73	
36	04/06/2011	15:00	14	15	100	8,92	
37	05/06/2011	15:30	22	27	102	8,75	x
38	16/06/2011	15:30	20	18	103	8,61	
39	17/06/2011	15:45	19	20	111	8,68	
40	18/06/2011	15:00	27	25	108	8,66	
41	19/06/2011	15:15	20	21	111	8,69	x
42	23/06/2011	14:20	18	25	94	8,57	
43	24/06/2011	16:05	17	23	110	8,37	
44	25/06/2011	15:00	21	20	100	8,73	
45	26/06/2011	15:00	19	19	96	8,75	x
46	29/06/2011	13:15	19	21	90	8,91	
47	30/06/2011	13:20	19	25	103	8,93	
48	01/07/2011	15:20	20	20	94	8,84	
49	02/07/2011	16:30	20	20	107	8,87	
50	03/07/2011	17:46	18	19	108	8,96	x
51	07/07/2011	16:30	20	16	101	8,5	
52	08/07/2011	17:00	19	16	92	8,46	
53	09/07/2011	14:30	18	20	92	8,79	
54	10/07/2011	13:30	20	28	92	8,95	x
55	14/07/2011	13:30	22	28	92	8,66	

Tabela I.3 - Resultados do teste completo de condutividade elétrica do lastro.

Dias Decorridos	Data	Horário	Temp. int. (°C)	Temp. ext. (°C)	Condutividade (µS/cm)	pH	Descarga
56	15/07/2011	15:50	19	20	92	8,75	
57	16/07/2011	17:00	18	17	98	8,99	x
58	20/07/2011	11:36	17	18	101	8,73	x
59	17/08/2011	15:58	20	25	182	9,04	
60	18/08/2011	14:00	21	21	93	8,06	
61	19/08/2011	17:30	20	19	95	8,58	
62	20/08/2011	17:30	20	19	107	8,26	
63	21/08/2011	16:25	21	23,5	126	8,26	x
64	25/08/2011	12:15	18	19	106	8,34	
65	26/08/2011	15:20	16	15	114	8,35	
66	27/08/2011	13:55	16	18	102	8,62	
67	28/08/2011	12:30	20	24	102	8,6	x
68	01/09/2011	13:00	22	23	114	8,55	
69	02/09/2011	15:20	24	26	96	8,75	
70	03/09/2011	15:00	26	27	121	8,56	
71	04/09/2011	12:30	21	24	111	8,59	
72	08/09/2011	12:00	26	28	113	8,78	
73	09/09/2011	16:00	23	21	110	8,64	
74	10/09/2011	13:00	25	22	120	8,66	
75	11/09/2011	12:00	24	24	111	8,79	x
76	15/09/2011	12:00	20	21	90	8,66	
77	16/09/2011	15:00	23	23	93	8,87	
78	17/09/2011	12:00	14	24	95	8,73	
79	18/09/2011	11:00	23	23	99	8,71	
80	21/09/2011	10:40	24	23	98	8,83	
81	22/09/2011	11:45	19	21	95	8,77	
82	23/09/2011	15:00	21	21	96	8,75	
83	24/09/2011	13:00	22	22	86	8,79	
84	25/09/2011	15:45	22	18	84	8,76	x
85	30/09/2011	11:40	24	22	85	8,42	
86	01/10/2011	12:00	21	18	90	8,62	
87	05/10/2011	11:00	20	21	93	9,23	x

Tabela I.4 - Resultados do teste completo de condutividade elétrica do lastro.

Dias Decorridos	Data	Horário	Temp. int. (°C)	Temp. ext. (°C)	Condutividade (µS/cm)	pH	Descarga
88	07/10/2011	16:40	24	23	91	8,41	
89	08/10/2011	17:10	19	18	82	8,57	
90	09/10/2011	11:00	19	18	93	8,74	x
91	20/10/2011	11:40	22	22	100	8,38	
92	21/10/2011	15:00	24	24	95	8,42	
93	22/10/2011	13:00	19	20	70	8,42	
94	23/10/2011	16:30	22	25	95	7,8	x
95	28/10/2011	12:30	21	20	90	8,29	
96	29/10/2011	13:00	21	21	86	8,56	
97	03/11/2011	13:20	20	26	80	8,6	
98	04/11/2011	12:50	23	27	86	8,88	
99	05/11/2011	14:00	25	31	72	8,91	
100	06/11/2011	12:30	23	27	77	8,64	x
101	10/11/2011	17:00	24	21	80	8,61	
102	11/11/2011	16:00	25	22	83	8,54	
103	12/11/2011	17:41	23	23	74	8,57	
104	13/11/2011	17:26	23	23	85	8,4	
105	16/11/2011	11:45	26	28	84	8,68	
106	17/11/2011	15:20	24	20	80	8,7	
107	18/11/2011	15:20	26	26	79	8,7	
108	19/11/2011	12:00	24	26	77	8,92	
109	20/11/2011	12:00	25	26	78	8,94	x
110	24/11/2011	17:00	27	25	99	8,65	
111	25/11/2011	13:00	30	29	98	8,62	
112	26/11/2011	16:30	27	25	99	8,79	
113	27/11/2011	18:00	25	26	91	8,74	x
114	30/11/2011	17:20	23	23	91	8,84	
115	01/12/2011	12:30	27	24	83	8,78	
116	02/12/2011	12:00	25	23	82	8,86	
117	03/12/2011	12:45	22	22	80	8,84	
118	04/12/2011	16:00	22	22	77	9,12	x
119	08/12/2011	13:30	23	22	78	8,54	

Tabela I.5 - Resultados do teste completo de condutividade elétrica do lastro.

Dias Decorridos	Data	Horário	Temp. int. (°C)	Temp. ext. (°C)	Condutividade (µS/cm)	pH	Descarga
120	09/12/2011	14:20	22	21	70	8,63	
121	10/12/2011	11:50	20	21	77	8,59	
122	11/12/2011	11:00	22	25	76	8,73	
123	14/12/2011	17:30	21	19	75	8,86	
124	15/12/2011	12:00	18	19	74	8,82	
125	04/02/2012	17:40	27	26	95	8,56	
126	05/02/2012	17:30	27	26	99	8,51	x
127	11/02/2012	19:00	23	20	83	8,28	
128	12/02/2012	19:00	24	24	86	8,37	x
129	01/03/2012	15:50	20	20	68	7,91	
130	02/03/2012	16:10	20	18	66	8,8	
131	03/03/2012	13:25	19	18	63	8,71	
132	04/03/2012	09:10	19	19	84	8,8	
133	05/03/2012	14:00	22	23	55	8,41	x
134	09/03/2012	17:05	26	26	68	8,2	
135	10/03/2012	15:00	25	30	74	8,4	
136	11/03/2012	09:25	25	28	75	7,95	
137	12/03/2012	16:50	28	27	79	7,02	x
138	16/03/2012	17:00	23	22	63	8,32	
139	17/03/2012	13:00	23	22	68	8,43	
140	18/03/2012	08:50	21	20	61	8,53	
141	19/03/2012	13:30	24	31	66	8,42	x
142	23/03/2012	13:45	27	28	64	8,21	
143	24/03/2012	12:50	25	26	74	8,48	
144	25/03/2012	09:00	22	24	67	8,28	
145	26/03/2012	11:10	23	25	74	8,62	x
146	30/03/2012	13:30	27	28	66	8,23	
147	05/04/2012	13:15	24	26	54	8,39	x

ANEXO II - ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO AGREGADO DA ESCÓRIA

Os resultados dos ensaios de resistividade elétrica do agregado da escória de ferro silício-manganês nas condições saturada e seca, são apresentados nas Tabelas II.1 e II.2.

Tabela II.1 - Resultados do teste completo do ensaio de resistividade elétrica do agregado da escória na condição saturada.

Condição Saturada - 500V			
Amostra	1 ^a	Temperatura (°C)	16
Peneira	1½"	Megômetro Média de R (Ω)	139538739,50
Hora	18:10:00	Média de Resistividade (Ω.m)	5491115,10
<hr/>			
Amostra	2 ^a	Temperatura (°C)	16
Peneira	1½"	Megômetro Média de R (Ω)	9714789,92
Hora	18:30:00	Média de Resistividade (Ω.m)	156873,21
<hr/>			
Amostra	3 ^a	Temperatura (°C)	16
Peneira	1½"	Megômetro Média de R (Ω)	30813529,41
Hora	18:50:00	Média de Resistividade (Ω.m)	363593,53
<hr/>			
Amostra	4 ^a	Temperatura (°C)	16
Peneira	2"	Megômetro Média de R (Ω)	3021848,74
Hora	19:10:00	Média de Resistividade (Ω.m)	35822,15
<hr/>			
Amostra	5 ^a	Temperatura (°C)	16
Peneira	1½"	Megômetro Média de R (Ω)	1466478991,60
Hora	19:30:00	Média de Resistividade (Ω.m)	23428545,76

Tabela II.2 - Resultados do teste completo do ensaio de resistividade elétrica do agregado da escória na condição seca.

Condição Seca - 500V			
Amostra	1 ^a	Temperatura (°C)	13
Peneira	1½"	Megômetro Média de R (Ω)	1645546218,49
Hora	08:00:00	Média de Resistividade (Ω.m)	32377688,54
Amostra	2 ^a	Temperatura (°C)	13
Peneira	1½"	Megômetro Média de R (Ω)	604058823,53
Hora	08:20:00	Média de Resistividade (Ω.m)	7127774,27
Amostra	3 ^a	Temperatura (°C)	13
Peneira	1½"	Megômetro Média de R (Ω)	604058823,53
Hora	08:40:00	Média de Resistividade (Ω.m)	7127774,27
Amostra	4 ^a	Temperatura (°C)	13
Peneira	2"	Megômetro Média de R (Ω)	738092436,97
Hora	09:00:00	Média de Resistividade (Ω.m)	8749629,67
Amostra	5 ^a	Temperatura (°C)	13
Peneira	1½"	Megômetro Média de R (Ω)	1585546218,49
Hora	09:20:00	Média de Resistividade (Ω.m)	25330770,06

ANEXO III - ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO PÓ DA ESCÓRIA

Os resultados dos ensaios de resistividade elétrica do pó da escória de ferro silício-manganês nas condições saturada e seca, são apresentados na Tabela III.1.

Tabela III.1 - Resultados do teste completo do ensaio de resistividade elétrica do pó da escória.

Dia 20/08/2012			
Condição Saturada			
Ensaio	1°	Temperatura (°C)	18
Amostra	Escória FeSiMn	Megômetro Média de R (Ω)	15529,41
Hora	08:00:00	Média de Resistividade (Ω.m)	1574,10
Condição Seca			
Ensaio	1°	Temperatura (°C)	18
Amostra	Escória FeSiMn	Megômetro Média de R (Ω)	5,98E+09
Hora	08:50:00	Média de Resistividade (Ω.m)	1,28E+07
Dia 21/08/2012			
Condição Saturada			
Ensaio	2°	Temperatura (°C)	20
Amostra	Escória FeSiMn	Megômetro Média de R (Ω)	21378,15
Hora	11:00:00	Média de Resistividade (Ω.m)	2166,95
Condição Seca			
Ensaio	2°	Temperatura (°C)	20
Amostra	Escória FeSiMn	Megômetro Média de R (Ω)	7,03E+09
Hora	11:30:00	Média de Resistividade (Ω.m)	1,51E+07
Dia 22/08/2012			
Condição Saturada			
Ensaio	3°	Temperatura (°C)	23,6
Amostra	Escória FeSiMn	Megômetro Média de R (Ω)	26554,62
Hora	15:00:00	Média de Resistividade (Ω.m)	2691,65
Condição Seca			
Ensaio	3°	Temperatura (°C)	23,6
Amostra	Escória FeSiMn	Megômetro Média de R (Ω)	8,94E+09
Hora	15:30:00	Média de Resistividade (Ω.m)	1,92E+07

ANEXO IV – SIMULADOR DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO LASTRO

Os resultados dos ensaios realizados em campo de resistividade elétrica do lastro da escória de ferro silício-manganês nas condições saturada e seca, são apresentados nas Tabelas IV.1 a IV.6.

Tabela IV.1 - Resultados do teste completo do ensaio de resistividade elétrica do lastro saturado.

1º Dia de ensaio - 23/10/2011			
Condição: 3 dias chuva - Saturado			
Voltagem de 500V			
ENTRE TRILHOS			
Dormente	Aço	Temperatura (°C)	20
Hora	09:05:00	Megômetro Média de R (Ω)	49025,21
Clima	Úmido	Média de Resistividade ($\Omega \cdot m$)	4902,52
ENTRE ELETRODOS			
Dormente	Aço	Temperatura (°C)	20
Hora	09:20:00	Megômetro Média de R (Ω)	25050,42
Clima	Úmido	Média de Resistividade ($\Omega \cdot m$)	1113,35
ENTRE TRILHOS			
Dormente	Madeira	Temperatura (°C)	20
Hora	09:38:00	Megômetro Média de R (Ω)	2168,07
Clima	Úmido	Média de Resistividade ($\Omega \cdot m$)	216,81
ENTRE ELETRODOS			
Dormente	Madeira	Temperatura (°C)	20
Hora	09:54:00	Megômetro Média de R (Ω)	26596,64
Clima	Úmido	Média de Resistividade ($\Omega \cdot m$)	1182,07

Tabela IV.2 - Resultados do teste completo do ensaio de resistividade elétrica do lastro saturado.

10º Dia de ensaio - 01/11/2011			
Condição: 13 dias chuva - Saturado			
Voltagem de 500V			
ENTRE TRILHOS			
Dormente	Aço	Temperatura (°C)	18
Hora	16:48:00	Megômetro Média de R (Ω)	2410084,00
Clima	Úmido	Média de Resistividade ($\Omega \cdot m$)	2410,08
ENTRE ELETRODOS			
Dormente	Aço	Temperatura (°C)	18
Hora	17:11:00	Megômetro Média de R (Ω)	1848,74
Clima	Úmido	Média de Resistividade ($\Omega \cdot m$)	82,17
ENTRE TRILHOS			
Dormente	Madeira	Temperatura (°C)	18
Hora	17:31:00	Megômetro Média de R (Ω)	983,19
Clima	Úmido	Média de Resistividade ($\Omega \cdot m$)	98,32
ENTRE ELETRODOS			
Dormente	Madeira	Temperatura (°C)	18
Hora	17:54:00	Megômetro Média de R (Ω)	3638,66
Clima	Úmido	Média de Resistividade ($\Omega \cdot m$)	161,72

Tabela IV.3 - Resultados do teste completo do ensaio de resistividade elétrica do lastro saturado.

20º Dia de ensaio - 11/11/2011			
Condição: 9 dias chuva - Saturado			
Voltagem de 500V			
ENTRE TRILHOS			
Dormente	Aço	Temperatura (°C)	20
Hora	10:58:00	Megômetro Média de R (Ω)	58067,23
Clima	Úmido	Média de Resistividade ($\Omega \cdot m$)	2580,77
ENTRE ELETRODOS			
Dormente	Aço	Temperatura (°C)	20
Hora	11:22:00	Megômetro Média de R (Ω)	24394,96
Clima	Úmido	Média de Resistividade ($\Omega \cdot m$)	1084,22
ENTRE TRILHOS			
Dormente	Madeira	Temperatura (°C)	20
Hora	11:38:00	Megômetro Média de R (Ω)	18352,94
Clima	Úmido	Média de Resistividade ($\Omega \cdot m$)	1835,29
ENTRE ELETRODOS			
Dormente	Madeira	Temperatura (°C)	20
Hora	12:04:00	Megômetro Média de R (Ω)	44126,05
Clima	Úmido	Média de Resistividade ($\Omega \cdot m$)	1961,16

Tabela IV.4 - Resultados do teste completo do ensaio de resistividade elétrica do lastro seco.

50º Dia de ensaio - 11/12/2011			
Condição: 22 dias sem chuva - Seco			
Voltagem de 500V			
ENTRE TRILHOS			
Dormente	Aço	Temperatura (°C)	28
Hora	16:58:00	Megômetro Média de R (Ω)	69243,70
Clima	Seco	Média de Resistividade ($\Omega \cdot m$)	6924,37
ENTRE ELETRODOS			
Dormente	Aço	Temperatura (°C)	28
Hora	17:15:00	Megômetro Média de R (Ω)	58067,23
Clima	Seco	Média de Resistividade ($\Omega \cdot m$)	2580,77
ENTRE TRILHOS			
Dormente	Madeira	Temperatura (°C)	28
Hora	17:31:00	Megômetro Média de R (Ω)	19100,84
Clima	Seco	Média de Resistividade ($\Omega \cdot m$)	1910,08
ENTRE ELETRODOS			
Dormente	Madeira	Temperatura (°C)	28
Hora	17:44:00	Megômetro Média de R (Ω)	665546,22
Clima	Seco	Média de Resistividade ($\Omega \cdot m$)	2957,61

Tabela IV.5 - Resultados do teste completo do ensaio de resistividade elétrica do lastro seco.

100º Dia de ensaio - 30/01/2012			
Condição: 72 dias sem chuva - Seco			
Voltagem de 500V			
ENTRE TRILHOS			
Dormente	Aço	Temperatura (°C)	32
Hora	13:18:00	Megômetro Média de R (Ω)	74806,72
Clima	Seco	Média de Resistividade ($\Omega \cdot m$)	7480,67
ENTRE ELETRODOS			
Dormente	Aço	Temperatura (°C)	32
Hora	13:32:00	Megômetro Média de R (Ω)	70000,00
Clima	Seco	Média de Resistividade ($\Omega \cdot m$)	3111,11
ENTRE TRILHOS			
Dormente	Madeira	Temperatura (°C)	32
Hora	13:57:00	Megômetro Média de R (Ω)	20478,99
Clima	Seco	Média de Resistividade ($\Omega \cdot m$)	2047,90
ENTRE ELETRODOS			
Dormente	Madeira	Temperatura (°C)	32
Hora	14:30:00	Megômetro Média de R (Ω)	88025,21
Clima	Seco	Média de Resistividade ($\Omega \cdot m$)	3912,23

Tabela IV.6 - Resultados do teste completo do ensaio de resistividade elétrica do lastro seco.

147º Dia de ensaio - 17/03/2012			
Condição: 119 dias sem chuva - Seco			
Voltagem de 500V			
ENTRE TRILHOS			
Dormente	Aço	Temperatura (°C)	37
Hora	14:58:00	Megômetro Média de R (Ω)	81302,52
Clima	Seco	Média de Resistividade ($\Omega \cdot m$)	8130,25
ENTRE ELETRODOS			
Dormente	Aço	Temperatura (°C)	37
Hora	15:11:00	Megômetro Média de R (Ω)	108388,66
Clima	Seco	Média de Resistividade ($\Omega \cdot m$)	4817,27
ENTRE TRILHOS			
Dormente	Madeira	Temperatura (°C)	37
Hora	15:31:00	Megômetro Média de R (Ω)	20916,47
Clima	Seco	Média de Resistividade ($\Omega \cdot m$)	2091,65
ENTRE ELETRODOS			
Dormente	Madeira	Temperatura (°C)	37
Hora	15:54:00	Megômetro Média de R (Ω)	126915,97
Clima	Seco	Média de Resistividade ($\Omega \cdot m$)	5640,71

ANEXO V – APROVAÇÃO AMBIENTAL DO IBAMA PARA USO DA ESCÓRIA DE FERRO SILÍCIO-MANGANÊS

A Figura V.1 mostra o Ofício nº306/2010/NLA/SUPES/IBAMA/MG que aprova a utilização escória de ferro silício-manganês como lastro ferroviário, em se tratando da caracterização e classificação ambiental.

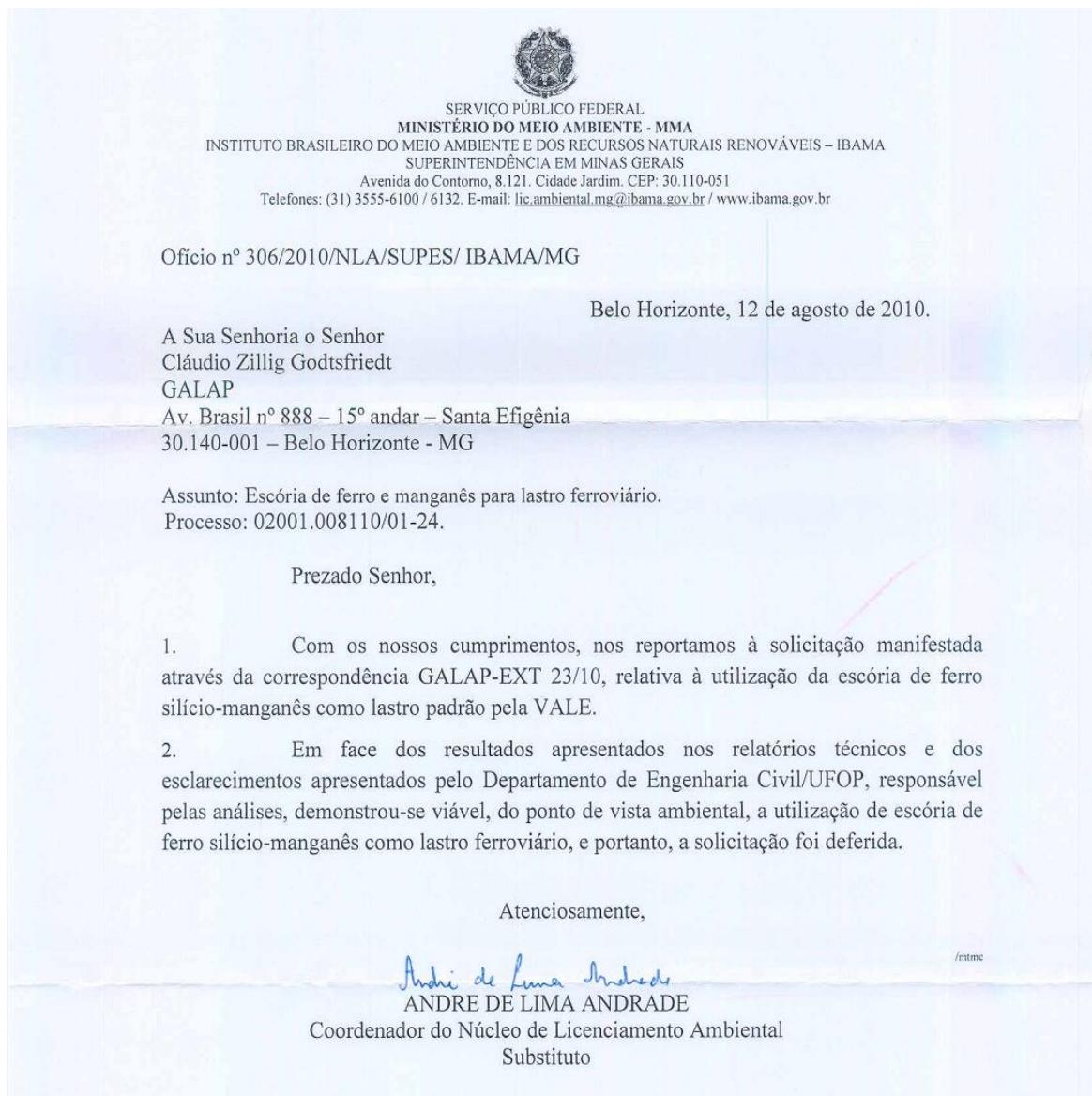


Figura V.1 - Ofício nº306/2010/NLA/ SUPES/IBAMA/MG.