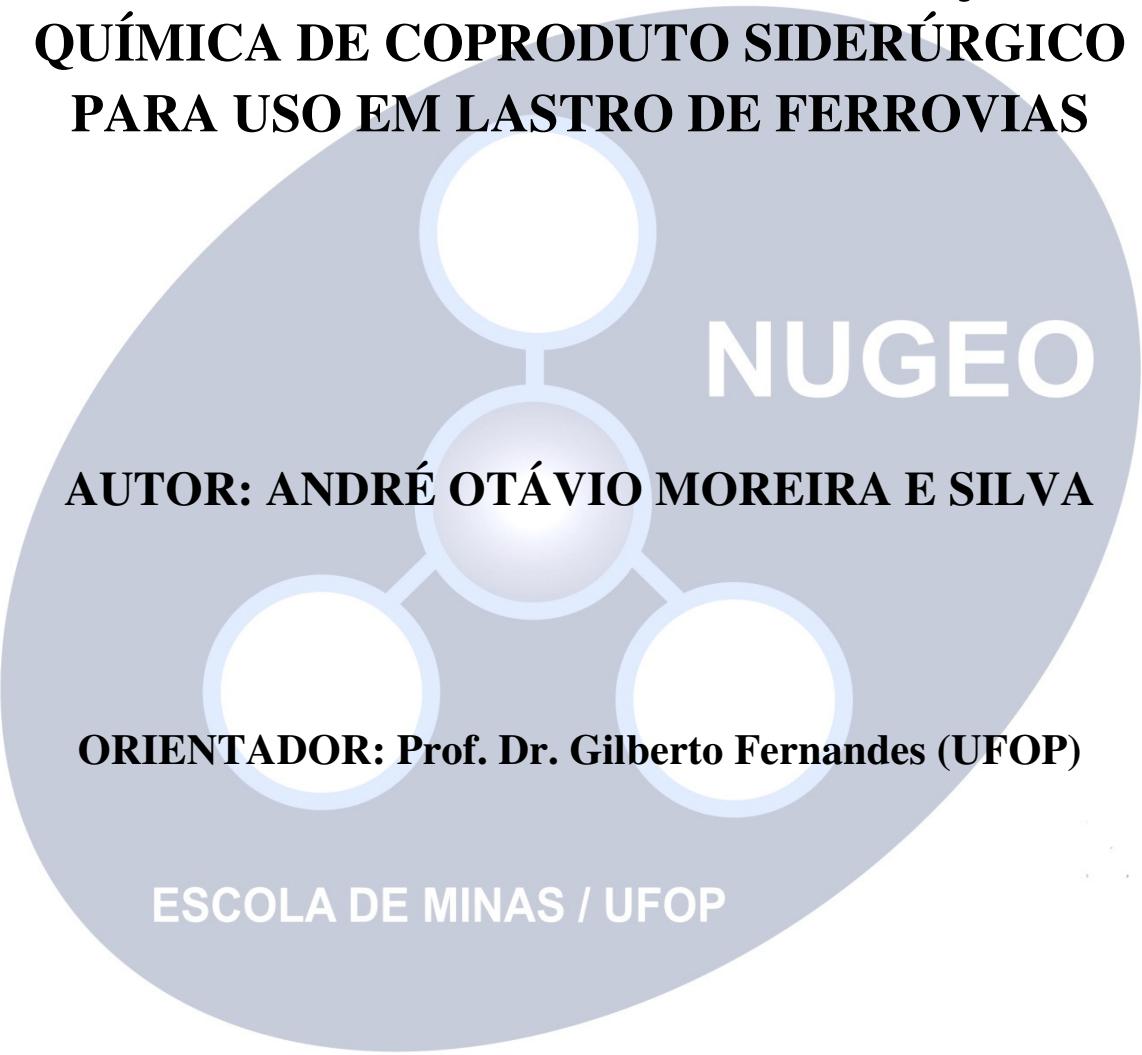


Dissertação de Mestrado

**METODOLOGIA DE ESTABILIZAÇÃO
QUÍMICA DE COPRODUTO SIDERÚRGICO
PARA USO EM LASTRO DE FERROVIAS**



NUGEO

AUTOR: ANDRÉ OTÁVIO MOREIRA E SILVA

ORIENTADOR: Prof. Dr. Gilberto Fernandes (UFOP)

ESCOLA DE MINAS / UFOP

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA DA UFOP

OURO PRETO - JUNHO DE 2013

METODOLOGIA DE ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE COPRODUTO SIDERÚRGICO PARA USO EM LASTRO DE FERROVIAS

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**.

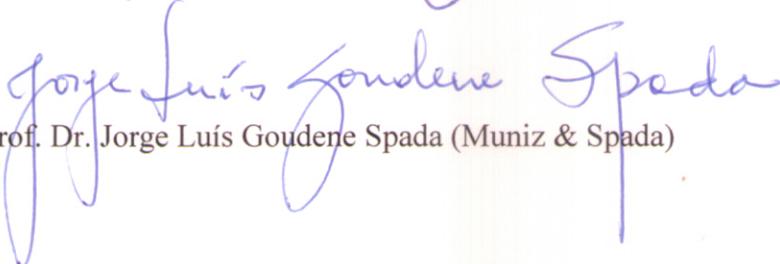
Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 28 de junho de 2013, pela Banca Examinadora composta pelos membros:



Prof. Dr. Gilberto Fernandes (Orientador / UFOP)



Prof. Dr. Geraldo Luciano de Oliveira Marques (UFJF)



Prof. Dr. Jorge Luís Goudene Spada (Muniz & Spada)

S586m

Silva, André Otávio Moreira e.

Metodologia de estabilização química de coproduto siderúrgico para uso
em lastro de ferrovias [manuscrito] / André Otávio Moreira e Silva - 2013.
138f.: il., color.; graf.; tab.; mapas.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Fernandes.

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

Área de concentração: Geotecnica de Pavimentos.

1. Ferrovias - Teses. 2. Engenharia de transportes - Teses. 3.
Reciclagem - Indústria - Teses. 4. Resíduos industriais - Teses. I. Fernandes,
Gilberto. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 625.141:628.54

Catalogação: sisbin@sisbin.ufop.br

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Francisco e Graça por sempre fazerem de tudo que esteve ao seu alcance para guiar os melhores caminhos, de maneira a tornar possível minha chegada até o fim desta etapa.

AGRADECIMENTOS

AGRADEÇO SINCERAMENTE:

- À Deus por iluminar todos os caminhos e decisões tomadas durante a realização deste trabalho, mostrando sempre a melhor maneira de lidar com os contratempos, possibilitando sua conclusão de maneira tranquila e gratificante;
- À minha família, em especial meu pai Francisco, minha mãe Graça e minha irmã Lívia, pelo incentivo constante para que eu chegassem a obter uma formação além da graduação;
- Ao professor Gilberto Fernandes pela orientação e conselhos para realização deste trabalho de pesquisa e pela oportunidade de trabalhar desde a graduação como bolsista no Laboratório de Ferrovias e Asfalto da Escola e Minas – UFOP;
- À estrutura fornecida pela UFOP e Fundação Gorceix que possibilitou o fornecimento dos recursos necessários à realização das atividades em todas as etapas deste trabalho;
- Aos amigos e membros do Laboratório de Ferrovias e Asfalto da Escola de Minas – UFOP, em especial, Hebert, Miguel, Danila, Ronderson e Daniel, que foram de grande ajuda seja na realização dos ensaios de campo, laboratório ou no fornecimento de materiais de pesquisa, desempenhando importante papel na realização deste trabalho;
- À Thais pelo companheirismo, compreensão, apoio e paciência em todos os momentos;
- Aos amigos e colegas do mestrado pelo companheirismo e pelas longas horas de dedicação aos estudos, em especial, Marco, Felipe, Amintas e Alan;
- Aos professores do NUGEO pelos ensinamentos e aos funcionários pelo pronto atendimento e empenho em atender as necessidades dos alunos;

- Aos amigos da Geopetrus Engenharia, em especial à Oscar de Mattos; da JMSouto Engenharia e Consultoria, em especial à Ronaldo Gontijo e Wagner Gomes; e da Pimenta de Ávila Consultoria.

André Otávio Moreira e Silva

Junho de 2013

RESUMO

A escória de aciaria é um coproducto produzido no processo de fabricação do aço, resultante da agregação de elementos importantes para o processo de geração, que, no entanto, não trazem benefícios para sua aplicação nas mais diversas finalidades quando presentes em quantidades elevadas na composição deste material. Por ser constituída de óxidos como CaO e MgO, o coproducto tem como característica a expansibilidade em função da reação química destes elementos na presença de água. Este fenômeno, observado inúmeras vezes no decorrer do seu tempo de aplicação, vem a limitar o seu uso, razão pela qual são realizadas pesquisas para desenvolvimento de uma metodologia de cura da escória de aciaria no intuito de se controlar o efeito da expansão. O presente trabalho contou com a elaboração, aplicação e avaliação de uma metodologia para a cura do coproducto recém vazado gerado por um conversor LD. Foram avaliados os efeitos gerados pela aplicação desta metodologia quanto às características físicas e mecânicas, resistividade e condutividade elétrica, além do acompanhamento das alterações químicas e mineralógicas ocorridas durante todo o período de aplicação do sistema proposto. Tais avaliações atestaram a eficácia da metodologia definida, que atuou de maneira a estabilizar quimicamente a escória de aciaria, eliminando os inconvenientes ocorridos até então em sua utilização, como a quebra excessiva dos grãos, o que diminui a vida útil lastro, além da queda do desempenho operacional, uma vez que, em decorrência de sua condutividade elétrica, principalmente em períodos chuvosos, é gerada uma falsa ocupação no circuito de bloqueio de linha, levando o Centro de Tráfego Centralizado (CTC) a realizar interrupções e acionar a manutenção de linha. Tornar o coproducto apto à utilização torna menor a demanda por exploração de jazidas naturais, fazendo com que um material que inicialmente seria disposto no ambiente gerando um passivo ambiental seja destinado a um fim nobre por meio da reutilização. Desta forma, o presente trabalho de pesquisa, por meio dos estudos para elaboração da metodologia de cura, sua aplicação, monitoramento periódico e ensaios realizados, credenciou o uso da escória de aciaria como lastro para ferrovias. Sua aplicação trás consigo benefícios econômicos e auxiliam as entidades responsáveis por sua geração e tratamento, a se tornarem referência no que concerne a sustentabilidade e consciência socioambiental.

ABSTRACT

Steel slag is a coproduct produced in the manufacturing process of steel, resulting from the aggregation of important elements for the generation process, that, however, don't bring benefits for its application in diverse purposes when present in high amounts in the composition of this material. By being consisted of oxides such as MgO and CaO, the coproduct has as characteristic the expansibility due to the chemical reaction of these elements in the presence of water. This phenomenon, observed numerous times during the application process, comes to limit its use, reason why researches are carried out to develop methodologies for the cure of steel slag in order to control the expansion's effect. This work included the development, implementation and evaluation of a curing method for the recently leaked coproduct generated by an LD converter. The effects generated by the application of this methodology concerning the physical and mechanical characteristics, electrical resistivity, besides the monitoring of chemical and mineralogical changes that occurred throughout the course of the curing process proposed have been evaluated. Such evaluations have attested the effectiveness of the defined methodology, which acted so as to chemically stabilize the steel slag, eliminating the inconveniences occurred hitherto in its use, such as excessive breakage of the grains, which reduces the ballast's useful life, besides the decrease of operational performance, since that, due to their electrical conductivity, especially during rainy periods, a false occupation is generated in the circuit of line blocking, leading the Centralized Traffic Center (CTC) to perform outages and trigger the line maintenance. Render the coproduct suitable for use decreases the demand for exploration of natural mineral deposits, causing a material that would be initially disposed in the environment generating an environmental liability, to be destined to a noble purpose through the reuse. Thus, the present research work, through studies to the development of a curing methodology, its applications, the periodic monitoring and the realized testing, have accrediting the use of steel slag as ballast for railroads. Its application brings with it economic benefits and helps the authorities responsible for their generation and treatment to become benchmark regarding sustainability and environmental awareness.

ÍNDICE

Capítulo 1	1
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 JUSTIFICATIVA.....	6
1.2 OBJETIVOS.....	8
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	10
Capítulo 2	12
2. REVISÃO BILBIOGRÁFICA	12
2.1 PAVIMENTO FERROVIÁRIO	12
2.1.1 Via Permanente	12
2.1.2 Infra-estrutura ferroviária.....	12
2.1.3 Superestrutura ferroviária	14
2.2 TENSÕES E DEFORMAÇÕES NO PAVIMENTO FERROVIÁRIO	23
2.3 ANÁLISE MECÂNICA DA VIA PERMANENTE.....	27
2.4 ESCÓRIA DE ACIARIA.....	40
Capítulo 3	57
3. METODOLOGIA E MATERIAIS	57
3.1 INTRODUÇÃO	57
3.2 MATERIAIS ESTUDADOS E PROCEDIMENTOS ADOTADOS	58
3.3 ETAPAS DE CAMPO	59
3.3.1 Sistema de cura – Metodologia de Referência Técnica	59
3.3.2 Montagem do experimento	61
3.3.3 Ensaios de Resistividade.....	70
3.4 ETAPAS DE LABORATÓRIO.....	73
3.4.1 Ensaios para caracterização física e mecânica da escória de aciaria	74
3.4.2 Ensaios de caracterização química e mineralógica da escória de aciaria	
82	

3.4.3	Caracterização ambiental da escória	86
3.4.4	Ensaios de Condutividade Elétrica	89
Capítulo 4		92
4.	RESULTADOS DOS ENSAIOS	92
4.1	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	93
4.1.1	Análise Granulométrica	93
4.1.2	Índice de contaminação	97
4.1.3	Abrasão Los Angeles	98
4.1.4	Determinação da resistência ao choque - Índice de tenacidade “Treton”	
4.1.4	99	
4.1.5	Determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água.....	100
4.1.6	Forma do material	101
4.1.7	Fragmentos Macios e Friáveis	102
4.1.8	Resistência à Intempérie	102
4.2	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	104
4.2.1	Carga Pontual.....	104
4.3	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA .	106
4.3.1	Análises Químicas por MEV/EDS	106
4.3.2	Análises Químicas por TG.....	111
4.3.3	Determinação do teor de cal livre	114
4.4	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL.....	115
4.4.1	Ensaios de lixiviação e solubilização.....	115
4.5	ENSAIOS DE CONDUTIVIDADE E RESISTIVIDADE	117
4.5.1	Avaliação da condutividade elétrica do material	117
4.5.2	Avaliação da resistividade elétrica do material	119
4.6	AVALIAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE CURA E DAS CONDICIONANTES AMBIENTAIS DE CAMPO	122

4.6.1	Dados pertinentes ao funcionamento do sistema de cura	122
4.6.2	Monitoramento das condições ambientais de campo	124
Capítulo 5		126
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	126
5.1	CONCLUSÕES REFERENTES À CAMPANHA DE ENSAIOS LABORATORIAIS E DE CAMPO.....	126
5.2	CONCLUSÕES REFERENTES AO FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE CURA E AS CONDICIONANTES AMBIENTAIS DE CAMPO	130
5.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	131
5.4	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	132
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	134

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - As ferrovias de carga no Brasil (ANTF, 2011).....	1
Figura 1.2 – Densidade do transporte ferroviário (CNT, 2011).....	2
Figura 1.3 – Setor ferroviário brasileiro: principais gargalos e demandas (IPEA, 2008)	3
Figura 1.4 - Comparativo do Transporte Ferroviário x PIB (ANTF, 2011).....	4
Figura 1.5 – Empregos Diretos e Indiretos na Malha existente (ANTF, 2011)	5
Figura 2.1- Trilho Vignole adaptado de Brina (1983).....	20
Figura 2.2 – Movimentos de um veículo ferroviário em tráfego (COÊLHO et al., 1982; MUNIZ DA SILVA, 2002).....	25
Figura 2.3 – Representação da distribuição de tensões em uma via permanente (SELIG e WATERS, 1994; KLINCEVICIUS, 2011).....	26
Figura 2.4 – Conceito do espraiamento do carregamento (BROWN E SELIG, 1991; SPADA, 2003)	27
Figura 2.5 – Viga apoiada continuamente sobre uma base elástica e submetida a uma carga vertical (KERR, 1978; BASTOS, 1999)	29
Figura 2.6 – Diagrama Mestre (GUIMARÃES, 1999)	33
Figura 2.7 – Modelo de Zimmermann para viga com apoios contínuos (RIVES et al., 1977; BASTOS, 1999)	34
Figura 2.8 – Resultados obtidos por Zimmermann (RIVES et al., 1977; BASTOS, 1999).....	36
Figura 2.9– Processo de produção do aço	41
Figura 2.10 – Representação esquemática de uma aciaria LD	42
Figura 2.11– Detalhe do conversor a oxigênio.....	44
Figura 2.12 – Sequência de operação do conversor LD onde: (1) carregamento do conversor; (2) sopro de oxigênio; (3) basculamento do aço; (4) escória remanescente no fundo do conversor, e; (5) basculamento da escória	45
Figura 3.1– Fluxograma das atividades desenvolvidas no projeto.....	59
Figura 3.2 – Aspecto final da Metodologia de Referência Técnica	60
Figura 3.3– Local de montagem do experimento.....	62
Figura 3.4– Detalhe dos conduítes de proteção dos fios e “casulos” para proteção dos sensores	63

Figura 3.5– Mangueira fixada ao pórtico e ligada a bomba no interior da casa de força.....	64
Figura 3.6– Posicionamento dos sensores e término de construção da pilha.....	65
Figura 3.7– Bomba ligada ao gerador, Data Logger ligada e fixada ao painel, pluviômetro e painel solar posicionados sobre a casa de força	65
Figura 3.8– Posicionamento da caixa d’água, filtro na extremidade da mangueira ligada caixa d’água e detalhe do bico aspersor em funcionamento.....	66
Figura 3.9– Modelo da Data Logger utilizada no experimento	66
Figura 3.10 – Modelos do pluviômetro, sensor de molhamento foliar e sensor de temperatura utilizados no experimento	67
Figura 3.11– Computador ligado a Data Logger para coleta de dados	68
Figura 3.12 – Dados coletados pela Data Logger e decodificados pelo software	69
Figura 3.13 – Termômetro para medição da temperatura interna da pilha e aparelho medidor da emissão de dióxido de carbono, temperatura ambiente e umidade relativa do ar	69
Figura 3.14– Coleta de amostras	70
Figura 3.15– Construção do simulador de resistividade em escala real.....	71
Figura 3.16– Seção experimental para aferição da resistividade – dormentes de aço.....	71
Figura 3.17– Seção experimental para aferição da resistividade – dormentes de madeira	72
Figura 3.18– Medição da resistividade com auxílio de um Megômetro	72
Figura 3.19– Fluxograma dos ensaios laboratoriais para caracterização da escória	74
Figura 3.20 – Tambor cilíndrico utilizado no ensaio de Abrasão Los Angeles	76
Figura 3.21 – Aparelho “Treton” utilizado nos ensaios	77
Figura 3.22 – Orientação das medidas para determinação da forma dos fragmentos	79
Figura 3.23– Vareta de bronze e suporte utilizados na realização dos ensaios	80
Figura 3.24– Corpo-de-prova posicionado entre as ponteiras cônicas para ensaio de carga pontual.....	81
Figura 3.25 – Procedimentos do ensaio para determinação do teor de cal livre	83
Figura 3.26 – Desenho esquemático de um equipamento de termogravimetria (RODRIGUES e MARCHETTO).....	84
Figura 3.27 - Gráfica de TGA em vermelho e sua derivada, DTG em azul (RODRIGUES e MARCHETTO).....	84

Figura 3.28 – Elementos constituintes do MEV (DEDAVID et al., 2007).....	86
Figura 3.29 – Microscópio Eletrônico de Varredura utilizado no experimento.....	86
Figura 3.30 – Frascos de lixiviação posicionados no equipamento de ensaio	88
Figura 3.31 – Caixa-teste para medição da condutividade na escória.....	90
Figura 3.32 – Esquema utilizado na realização do experimento (SOUZA, 2007)	91
Figura 4.1 - Enquadramento das amostras na Faixa padrão A da ABNT	95
Figura 4.2 – Enquadramento das amostras na Faixa padrão B da ABNT	95
Figura 4.3 – Morfologia característica da escória utilizada na pilha experimental	107
Figura 4.4 – Espectro obtido por microanálises de raios-X - Ponto 1.....	107
Figura 4.5 – Espectro obtido por microanálises de raios-X - Ponto 2.....	107
Figura 4.6 – Espectro obtido por microanálises de raios-X - Ponto 3.....	108
Figura 4.7 – Espectro obtido por microanálises de raios-X - Ponto 4.....	108
Figura 4.8 – Espectro obtido por microanálises de raios-X - Ponto 5.....	108
Figura 4.9 – Espectro obtido por microanálises de raios-X - Ponto 6.....	109
Figura 4.10 – Espectro obtido por microanálises de raios-X - Ponto 7.....	109
Figura 4.11 – Espectro obtido por microanálises de raios-X - Ponto 8.....	109
Figura 4.12 – Espectro obtido por microanálises de raios-X - Ponto 9.....	110
Figura 4.13 – Espectro obtido por microanálises de raios-X - Ponto 10.....	110
Figura 4.14 – Espectro obtido por microanálises de raios-X - Ponto 11.....	110
Figura 4.15 – Curvas DTA/TGA/DTG do material aos 30 dias de cura.....	112
Figura 4.16 – Curvas DTA/TGA/DTG do material aos 45 dias de cura.....	112
Figura 4.17 – Curva representativa do teor de cal livre em função do período de cura do coproduto.....	115
Figura 4.18 – Valores da condutividade em função do tempo de cura do material	118
Figura 4.19 – Valores do PH em função do tempo de cura do material.....	118
Figura 4.20 – Resistividade para seções com dormentes de madeira - clima seco	120
Figura 4.21 – Resistividade para seções com dormentes de madeira - clima chuvoso	120
Figura 4.22 – Resistividade para seções com dormentes de aço - clima seco.....	121

Figura 4.23 – Resistividade para seções com dormentes de aço - clima chuvoso	121
Figura 4.24 – Representação da temperatura interna da pilha no decorrer do tratamento	123
Figura 4.25 – Representação dos valores de emissão de CO ₂ no decorrer do tratamento.....	123
Figura 4.26 – Representação dos valores da temperatura ambiente no decorrer do tratamento	124
Figura 4.27 – Representação dos valores da umidade relativa do ar no decorrer do tratamento	125
Figura 4.28 – Representação dos valores de precipitação no decorrer do tratamento (INMET, 2012)	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Valores do coeficiente de lastro (RIVES, PITA e PUENTES, 1977; SPADA, 2003)	37
Tabela 2.2 – Coeficiente de lastro em função de sua espessura (RIVES, PITA e PUENTES, 1977; SPADA, 2003)	37
Tabela 3.1 – Distribuição Granulométrica do lastro ferroviário	75
Tabela 3.2 – Índices de contaminação do lastro (Selig et al., 1993)	76
Tabela 3.3 – Classificação da forma dos fragmentos por meio da correlação entre as medidas.	79
Tabela 3.4 – Composição granulométrica mínima do corpo de prova.....	80
Tabela 4.1 – Análise granulométrica da amostra inicial	93
Tabela 4.2 – Análise granulométrica da amostra aos 60 dias de cura.....	94
Tabela 4.3 – Evolução dos parâmetros de caracterização granulométrica antes e após o experimento.....	96
Tabela 4.4 – Índice e grau de contaminação dos materiais	98
Tabela 4.5 – Percentual de desgaste em função do tempo de cura do coproduto	98
Tabela 4.6 – Percentual de resistência ao choque em função do tempo de cura do coproduto...	99
Tabela 4.7 – Resultados dos ensaios em função do tempo de cura do material.....	100
Tabela 4.8 – Limites normativos para os ensaios.....	100
Tabela 4.9 – Resultados do ensaio de forma do material em função do tempo de cura.....	101
Tabela 4.10 – Percentual de fragmentos macios e friáveis em função do tempo de cura do material.....	102
Tabela 4.11 – Percentual de resíduos gerados em função do tempo de cura do material	103
Tabela 4.12 – Comparativo das propriedades da escória tratada em relação à brita de gnaisse	103
Tabela 4.13 – Valores de C adotados para escória de aciaria LD (FERNANDES, 2005)	105
Tabela 4.14 – Resultados obtidos no ensaio de carga pontual em função do tempo de cura do material.....	105
Tabela 4.15 – Resumo dos percentuais em massa dos componentes em cada ponto avaliado .	111
Tabela 4.16 – Resultados das análises químicas por termogravimetria	113
Tabela 4.17 – Percentuais de cal livre obtidos em função do período de cura do coproduto ...	115

Tabela 4.18 – Classificação de toxicidade por solubilização	116
Tabela 4.19 – Classificação de toxicidade por lixiviação	117
Tabela 4.20 – Resultados das medições realizadas no simulador de resistividade	119

LISTA DE ABREVIATURAS E NOMENCLATURA

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials
ABM: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração
ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANTF: Associação Nacional do Transporte Ferroviário
AREA: American Railway Engineering Association
AREMA: American Railway Engineering and Maintenance of Way Association
ASTM: American Society for Testing and Materials
BOF: Blast Oxygen Furnace
BTX: Benzeno, Tolueno, Xileno
CAP: Cimento Asfáltico de Petróleo
CBR: California Bearing Ratio
CNI: Confederação Nacional da Indústria
CNT: Confederação Nacional do Transporte
CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente
CTC: Centro de Tráfego Centralizado
DAI: Índice de Absorção Dielétrica
DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT: Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes
DTG: Termogravimetria Derivada
EAF: Electric Arc Furnace
EB: Especificação Brasileira
EFVM: Estrada de Ferro Vitória-Minas
H.R.B: Highway Research Board
IBS: Instituto Brasileiro de Siderurgia
IG: Índice de Grupo
IP: Índice de plasticidade
IPEA: Instituto de pesquisa econômica aplicada
IPT: Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISC: Índice de suporte Califórnia
JIS: Japan Industrial Standard
LD: Linz-Donawitz
LL: Limite de liquidez

ME: Método de Ensaio

MEV: Microscopia Eletrônica de Varredura

NBR: Norma Brasileira Registrada

OH: Open Hearth

pH: Potencial Hidrogeniônico

PI: Índice de Polarização

PIB: Produto Interno Bruto

SB: Seção de Bloqueio

SI: Sistema Internacional

TG: Termogravimetria

TKU: Toneladas por Quilômetro Útil

UFOP: Universidade Federal de Ouro Preto

LISTA DE SÍMBOLOS

Ω : ohms

A_n : Abrasão “Los Angeles”

A_s : Área do plano de ruptura

b : Largura da via

C : Carbono

C : Coeficiente de lastro ou coeficiente de Winkler

C : Condutividade

C_2S : Silicato dicálcico

C_3S : Silicato tricálcico

$Ca(OH)_2$: Hidróxido de cálcio

$CaCO_3$: Carbonato de cálcio (calcário)

CaO : Óxido de Cálcio

d : Distância (espaçamento) interplanar.

D_{10} : Diâmetro efetivo para o qual passa 10% do material.

D_{30} : Diâmetro efetivo para o qual passa 30% do material

D_{60} : Diâmetro efetivo para o qual passa 60%

D_e : Diâmetro equivalente das partículas de escória

e : Neperiano

E : Módulo de elasticidade do trilho

EI : Rigidez a flexão do trilho e dos apoios longitudinais

FeO : óxido de ferro

FI : Fouling index” ou índice de contaminação do lastro

I : Momento de inércia do trilho

$I_{a(50)}$: Índice de resistência anisotrópico

I_s : Índice de carregamento pontual

l : comprimento

L : Comprimento elástico

l : fator de amortecimento

M : Momento Fletor

m'_{n} : Massa da amostra lavada na peneira de 1.7mm

MgO : Óxido de Magnésio

Mn: Manganês

m_n : Massa total seca

MnO: Óxido de magnésio

P: carga de roda simples

p: Pressão de contato contínua entre o apoio longitudinal e sua base

P_{200} : Porcentagens em pesos passantes na peneira #200

P_4 : Porcentagens em pesos passantes na peneira #4

q: Carga ou reação vertical distribuída

Q: Carga pontual estática

R: resistência de um condutor

ρ : Resistividade

S: Siemens

Si: Silício

u: Coeficiente de rigidez ou elasticidade da via

x: distância do ponto de aplicação de carga em relação a algum ponto do trilho

y: Deflexão da via

δ_{uc} : Resistência à compressão uniaxial

θ : Ângulo de incidência;

λ : Comprimento da onda

Capítulo 1

1. INTRODUÇÃO

A concepção do transporte ferroviário foi feita com a finalidade de suprir uma demanda da sociedade em se vencer grandes distâncias geradas pela crescente descoberta de terras, transportando com maior rapidez e em maiores volumes pessoas e bens materiais (IPEA, 2010). O sistema ferroviário brasileiro teve sua construção iniciada em meados do século XIX e atualmente conta, segundo dados da Confederação Nacional do Transporte – CNT, publicados em 2011, com 30.051 km de extensão e é composto por 12 malhas concedidas, sendo 11 à iniciativa privada, somando 28.614 km. A Figura 1.1 apresenta a atual distribuição territorial da malha ferroviária brasileira.

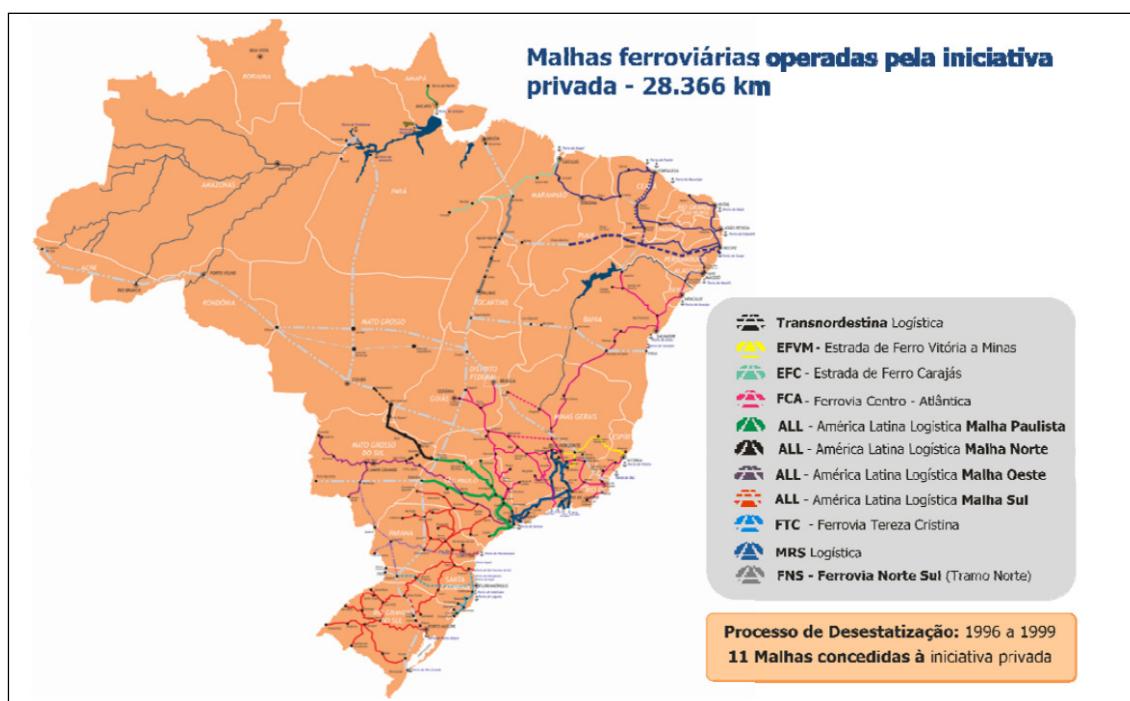


Figura 1.1 - As ferrovias de carga no Brasil (ANTF, 2011)

Uma característica marcante da malha ferroviária brasileira, que influenciou sua criação e condicionou fortemente sua distribuição territorial atual é sua distribuição para atender o modelo econômico agroexportador não apresentando indícios de relação com a criação de novos polos de desenvolvimento socioeconômico. Tal característica fez com que as ferrovias brasileiras tivessem uma maior concentração na região centro-sul do

país, fazendo a ligação dos centros economicamente dinâmicos às suas portas de entrada e saída, principalmente aos portos.

O modal ferroviário apresenta vantagens como elevada velocidade operacional, pelo benefício de se trafegar em vias exclusivas, capacidade de transportar grandes volumes de mercadorias com baixo custo operacional em relação ao peso total transportado, possui baixo consumo de energia além do provimento de estoques em transito (RODRIGUES, 2004 apud FILHO, 2006).

Tais características aliadas à densidade da malha existente, em geral, conferem ao modal ferroviário uma participação significativa na matriz de transportes de países com grandes extensões territoriais, onde produtos como minério de ferro, produtos agrícolas e carvão são responsáveis por um grande percentual do total de cargas transportadas.

Mesmo com todas as vantagens oferecidas pelo modal e com dimensões territoriais que favorecem seu uso, o Brasil tem feito pouco proveito do transporte ferroviário. Ao se fazer um comparativo da participação deste modal entre países com grandes extensões territoriais, fica clara a defasagem do Brasil em relação aos demais como pode ser observado na Figura 1.2 a seguir.

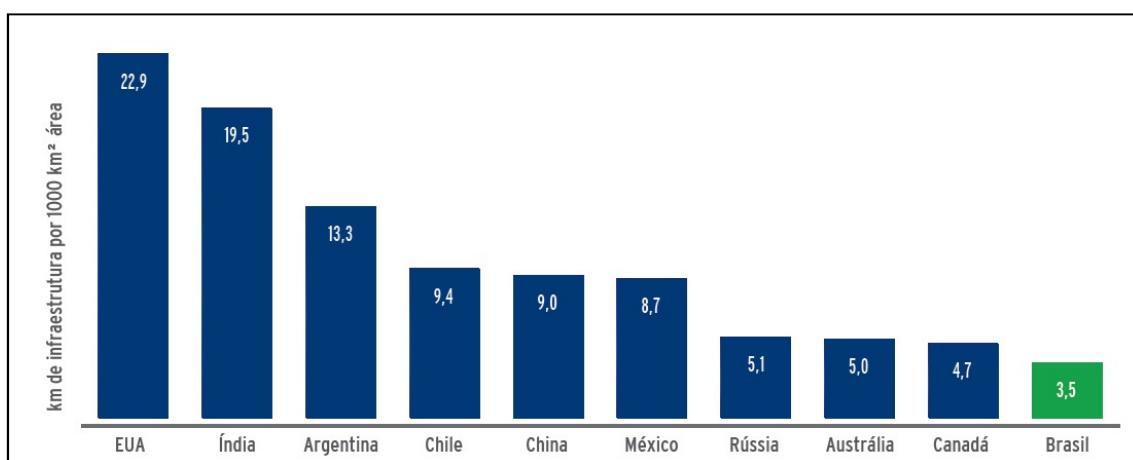


Figura 1.2 – Densidade do transporte ferroviário (CNT, 2011)

A baixa participação do modal ferroviário na matriz de transporte brasileira está diretamente ligada a fatores como indisponibilidade de rotas, redução da flexibilidade nas operações e a indisponibilidade de vagões (FLEURY, 2007). Estes fatores poderiam

ser reduzidos ou até mesmo eliminados por meio de investimentos para realização de obras de infraestrutura ferroviária, o que proporciona ganhos com eficiência operacional e tornaria o setor mais competitivo.

A Figura 1.3 mostra que a principal demanda é pela construção de novas ferrovias, sendo que estas deverão ser capazes de transportar cargas das mais diversas cidades até as ferrovias estruturantes que irão percorrer todo o país, levando-as até pontos de distribuição interna e portos que as levem aos mercados externos além de receber e distribuir as cargas que chegam ao país para os mais variados destinos.

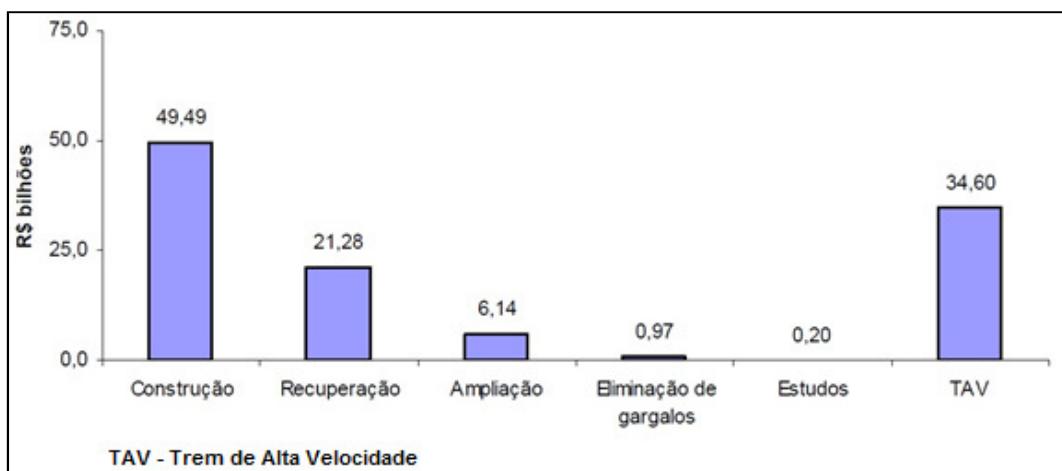


Figura 1.3 – Setor ferroviário brasileiro: principais gargalos e demandas (IPEA, 2008)

A maior utilização do modal ferroviário é necessária e gera inúmeros benefícios à economia do país. Segundo dados que constam no Balanço do Transporte Ferroviário de Cargas entre 1997 e 2011, realizado pela Associação Nacional dos Transportes Ferroviários – ANTF, os quinze anos de concessões ferroviárias corroboram a importância das ferrovias para o desenvolvimento nacional.

O transporte de cargas por vias férreas cresceu 87,6% desde o início da gestão das malhas por órgãos privados, partindo de 253,3 milhões de toneladas em 1997 para 475 milhões de toneladas em 2011.

A produção das ferrovias no país obteve um crescimento de 111,7%, passando de 137,2 bilhões em 1997 para 290,5 bilhões de TKU (tonelada por quilômetro útil) em 2011. Ao se comparar a evolução do crescimento produtivo das ferrovias nos últimos quinze

anos com o produto interno bruto (PIB) para o mesmo período, podemos observar que a produção no setor ferroviário cresceu mais que o dobro em relação ao valor monetário de bens e serviços produzidos pelo país como mostra a Figura 1.4.

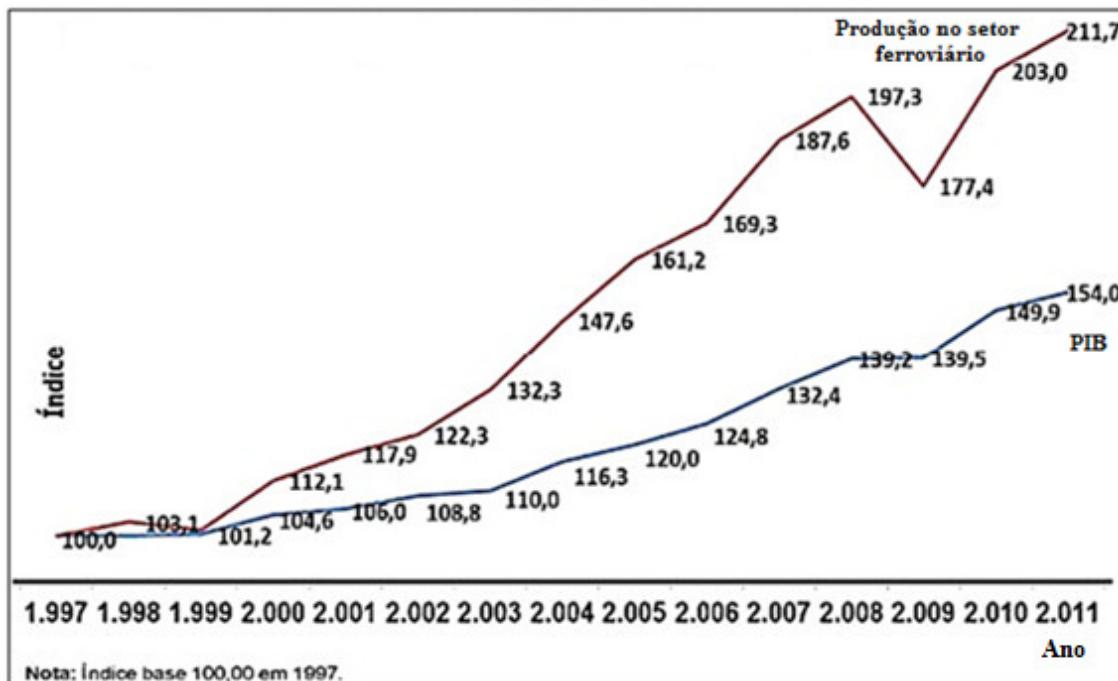


Figura 1.4 - Comparativo do Transporte Ferroviário x PIB (ANTF, 2011)

O desenvolvimento do setor ferroviário refletiu também no crescimento da indústria nacional nos últimos quinze anos. Em 1997 havia 1.154 locomotivas 43.816 vagões em operação nas malhas concedidas, já em 2011 a frota chegou a 3.045 locomotivas e 100.924 vagões, totalizando um aumento de 131,2%.

A atividade das concessionárias de transporte ferroviário de cargas passou a empregar em 2011, um total de 41.455 trabalhadores contra 16.662 empregos registrados pelo setor em 1997. Tal diferença aponta para um aumento de 148,8% em empregos diretos e indiretos na malha existente (Figura 1.5).

Durante o período analisado houve uma redução em 21% do consumo de combustíveis nas ferrovias em função da aplicação de novas tecnologias e materiais. Podemos tomar como exemplo de eficiência energética do modal ferroviário, o comparativo com o modal rodoviário onde, um único trem composto por 100 vagões graneleiros com capacidade de carga em 100 toneladas por vagão, substitui 357 caminhões que

transportam 28 toneladas cada. Isto demonstra que o uso da ferrovia é mais viável que o transporte rodoviário também em termos ambientais.

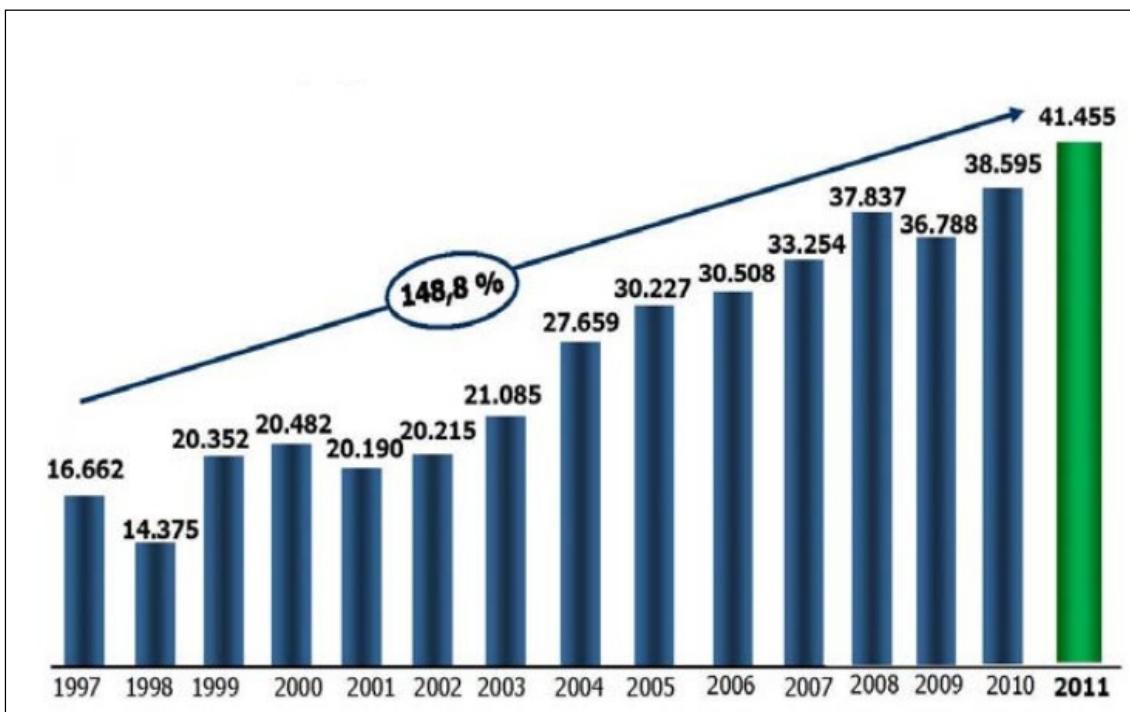


Figura 1.5 – Empregos Diretos e Indiretos na Malha existente (ANTF, 2011)

Outro ponto favorável é a maior segurança oferecida pelo transporte ferroviário, que durante o período compreendido entre os anos de 1997 e 2011 houve uma queda de 81,2% no total de acidentes, passando de 75,5 para 14,2 por milhão de trens/km.

Os resultados positivos apresentados pelo segmento nos últimos anos e os crescentes investimentos tanto por parte da iniciativa pública com o Programa de Aceleração do Crescimento – PAC, quanto privada, por parte das concessionárias, indicam que os próximos anos serão de trabalhos constantes em prol da evolução do transporte ferroviário no país.

Os investimentos no setor objetivam o alcance até 2025, de uma participação na matriz de transporte brasileira por parte das ferrovias de 32%, já que atualmente conta com apenas 25%. Este crescimento trará a integração ferroviária de inúmeras regiões, possibilitando crescimento econômico e social de locais distantes dos centros economicamente dinâmicos do país.

Tida como a “espinha dorsal” do desenvolvimento brasileiro, a ferrovia Norte-Sul terá 2,5 mil km de extensão e interligará as regiões Norte e Nordeste ao Sul e Sudeste por meio de suas conexões com 5 mil km de ferrovias privadas, sua construção objetiva a viabilização de uma logística adequada ao potencial de desenvolvimento da região, incrementando os negócios, aumentando a renda interna, abrindo novas frentes de trabalho, melhorando a distribuição da riqueza nacional e a qualidade de vida da população.

Além da demanda por novas ferrovias, vêm sendo alocados recursos para melhoria da condição operacional das malhas existentes no país com aquisição de material rodante bem como recuperação e manutenção da frota existente e introdução de novas tecnologias de controle de tráfego, no intuito de se obter aumento na produtividade, segurança e confiabilidade das operações. No entanto, o crescimento deve estar aliado à preservação do meio ao qual está inserido, pois o desenvolvimento, seja ele qual for, deve vir acompanhado de atividades voltadas para a crescente preocupação com a sustentabilidade.

Na busca por soluções técnica, econômica e ambientalmente viáveis o presente trabalho vem apresentar o estudo que engloba a definição e avaliação de uma metodologia de cura que torne a escória de aciaria produzida por meio de convertedores LD apta a ser aplicada como lastro em vias férreas, como alternativa aos materiais britados convencionalmente utilizados. A metodologia em estudo será aferida por meio de ensaios que atestem a viabilidade de suas características físicas, químicas, mineralógicas, ambientais e de condutividade, para só então serem destinadas ao fim proposto.

1.1 JUSTIFICATIVA

Segundo dados publicados pelo Instituto Aço Brasil em 2010, o processo siderúrgico do país gera em média 600 kg de resíduos e coprodutos por tonelada de aço produzida. Sendo que os principais resíduos são pós, lamas e escórias (bruta) e os coprodutos da indústria do aço são benzeno, alcatrão, BTX (benzeno, tolueno, xileno), escórias de alto forno e aciaria (beneficiadas).

De acordo com a norma NBR ISO 14040 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura (ABNT, 2001), os coprodutos são definidos como “um ou mais produtos oriundos do mesmo processo ou sistema produtivo”.

O Brasil, segundo divulgação do IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas, é o 9º maior produtor de aço do mundo, com participação de 2,3% na produção mundial e 32,8 milhões de toneladas produzidas em 2010. Da produção total do aço bruto no país, uma parcela aproximada de 76% é gerada pelo processo LD, o que representa, tendo como base a geração média de 150 kg de escória por tonelada de aço bruto produzido, cerca de 3,75 milhões de toneladas de escória no ano de 2010.

Os valores apresentados demonstram a proporção da escória produzida no país e indicam uma necessidade crescente das instituições geradoras pelo desenvolvimento de métodos de disposição e reaproveitamento dos agregados siderúrgicos de forma a propiciar uma diminuição dos impactos ambientais associados ao processo de produção do aço.

Os resíduos e coprodutos, quando dispostos de maneira inadequada, geram passivo ambiental. Uma empresa possui um passivo ambiental quando ela interfere de maneira nociva no meio ambiente e não desenvolve meios para recuperá-lo.

Ao longo dos últimos anos as empresas do setor vêm investindo para se obter o aprimoramento do desempenho ambiental de suas operações, tais investimentos englobam a adequação de equipamentos, controle de emissão de poluentes, equipamentos de controle, tratamento de efluentes, reaproveitamento de resíduos e eficiência energética (CNI, 2012).

Dentre benefícios de cunho ambiental gerados pela aplicação da escória de aciaria como lastro de vias férreas estão a redução do volume escavado de jazidas para obtenção do produto britado, a diminuição da degradação da camada vegetal que se sobrepõe ao material das jazidas, redução do desmonte de rocha por meio do uso de explosivos que geram partículas em suspensão no ar, diminuição da liberação de dióxido de carbono na atmosfera e a redução da demanda por áreas destinadas ao descarte de resíduos e coprodutos industriais.

Tendo de posse o conhecimento da demanda atual por planos de viabilização da destinação de resíduos e coprodutos, e de todos os benefícios sociais, ambientais e econômicos que acompanham este processo, o presente trabalho vem apresentar um estudo técnico que consiste no desenvolvimento de uma metodologia para estabilizar quimicamente a escória de aciaria de maneira a torná-la apta para ser utilizada como lastro de ferrovias.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho de pesquisa objetiva o fornecimento do estudo da escória de aciaria como material alternativo a ser aplicado em lastros de ferrovias. Para que o material se torne apto a ser utilizado para o fim desejado, torna-se necessária a criação de uma metodologia de estabilização química que tenha como função estabilizar quimicamente o coproducto, e que defina diretrizes que orientem as atividades de pesquisa com a obtenção de informações, articulação de conceitos e utilização de ferramentas pertinentes ao seu desenvolvimento.

A pesquisa irá compreender a obtenção de dados sobre a geração da escória, o estudo de suas propriedades e os efeitos indesejáveis causados pelo seu uso na ausência de tratamento adequado, para só então se desenvolver um sistema a ser testado em local apropriado. Esse sistema será alvo de monitoramento periódico por medições no local de sua construção e inspecionado para se averiguar a necessidade de possíveis manutenções. A avaliação de sua eficácia será feita por meio da análise dos dados de monitoramento e pela coleta de material feita de acordo com a periodicidade estipulada na pesquisa, a ser ensaiado ora em laboratório obedecendo aos procedimentos e métodos apropriados, ora por seção ferroviária experimental.

Os resultados fornecerão a caracterização física, mecânica, química, mineralógica, ambiental além dos parâmetros condutivos e de resistividade. Por meio destes resultados, poderá ser verificada a eficácia do método proposto na redução da quebra excessiva dos grãos que diminui a vida útil do lastro e na redução da condutividade elétrica evitando paralisações no tráfego ferroviário devido a falsa ocupação ocorrida nos períodos chuvosos. Deverá ser feita também a comparação dos parâmetros obtidos com as propriedades dos produtos britados convencionalmente utilizados para uma

avaliação do desempenho mediante as solicitações impostas pelo tráfego das composições após sua aplicação na superestrutura ferroviária.

Como objetivos específicos, fixados como referencial na elaboração de cada etapa que compõe este trabalho de pesquisa, podem ser citados:

- Desenvolvimento de uma pesquisa bibliográfica, que aborde o pavimento ferroviário e a dinâmica das tensões a ele impostas pelo tráfego do material rodante, o estudo sobre a escória de aciaria LD, reunindo dados a respeito de sua geração, suas principais aplicações, as razões pelas quais ocorre a expansão e os problemas decorrentes deste fenômeno;
- Estudo e definição de uma metodologia de estabilização química da escória de aciaria LD, e sua aplicação por meio da montagem de um sistema experimental em campo;
- Caracterização física, mecânica, química, mineralógica, ambiental e de condutividade por meio de ensaios de laboratório e avaliação da resistividade com auxílio de uma seção experimental montada em campo;
- Determinação do teor de cal livre presente na composição da escória de aciaria LD, por meio de ensaios de etileno-glicol;
- Avaliação da evolução das propriedades da escória de aciaria LD em função do tempo de exposição ao tratamento de estabilização química;
- Definição do período necessário a aplicação da metodologia de estabilização química da escória de aciaria LD, em função do tempo de ciclo para o enquadramento de suas propriedades nos limites normativos que viabilizam sua aplicação;
- Apresentação e discussão dos resultados obtidos, e elaboração de um parecer sobre a eficácia da metodologia aplicada.

O processo de caracterização e avaliação da escória de aciaria será balizado meio dos ensaios prescritos pela norma brasileira NBR 5564 – Via Férrea – Lastro Ferroviário – Requisitos e métodos de ensaio (ABNT, 2011).

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho é constituído por seis capítulos, os quais abordam os seguintes temas:

No primeiro capítulo é apresentada a parte introdutória da pesquisa, onde consta um panorama da situação atual do transporte ferroviário brasileiro com o crescimento do setor e a demanda por novas ferrovias, inserindo neste contexto a necessidade de se aliar a evolução às preocupações com sustentabilidade, demonstrando a importância de se viabilizar o uso do coproducto siderúrgico como lastro de vias férreas. São apresentados também a justificativa pertinente ao desenvolvimento do estudo, os objetivos a serem alcançados com sua realização e a estrutura da dissertação.

O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica onde é abordada uma pesquisa que abrange a via férrea com os elementos que a constitui , os critérios de dimensionamento já desenvolvidos para o pavimento ferroviário, bem como as solicitações a ele impostas. É feito também um estudo sobre a produção da escória de aciaria LD, a forma como este coproducto é gerado, sua composição, seu comportamento quanto a variação volumétrica e suas principais aplicações.

O conteúdo presente no terceiro capítulo conta com a descrição dos estudos para definição da metodologia capaz de hidratar os óxidos presentes na escória tornando-a estável volumetricamente. Neste capítulo consta ainda a descrição detalhada da montagem do experimento de estabilização química em pátio siderúrgico, seu monitoramento, os ensaios de campo e laboratoriais para caracterização química, mineralógica, física, mecânica, ambiental, bem como a avaliação da resistividade elétrica da escória de aciaria.

No quarto capítulo são apresentados os resultados da campanha de ensaios tanto de campo quanto laboratoriais, juntamente a uma criteriosa avaliação dos mesmos para

obtenção de um parecer a respeito da evolução das propriedades da escória em relação ao tempo de exposição ao tratamento e verificação do enquadramento dos resultados aos limites normativos que viabilizam a aplicação do coproduto ao fim desejado.

As conclusões obtidas ao final da pesquisa estão presentes no quinto capítulo onde é apresentado um parecer final a respeito da eficácia obtida ao se aplicar a metodologia de tratamento proposta, as considerações a respeito das disposições construtivas e as sugestões a serem implementadas em futuros estudos.

Por fim, constam as referências bibliográficas que serviram de embasamento para realização da pesquisa.

Capítulo 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PAVIMENTO FERROVIÁRIO

2.1.1 Via Permanente

A via permanente é constituída pelo conjunto das obras civis necessárias à construção de uma linha férrea e comumente é subdividida em superestrutura e infra-estrutura (SILVA, 2002).

Silva (2002) comenta a diferença entre conceitos adotados para estas subdivisões no Brasil e em outras partes do mundo. Pela concepção brasileira, a superestrutura é composta pelo trilho; fixação do trilho ao dormente; retentores; talas de junção; outros componentes metálicos; as palmilhas ou outros dispositivos de apoio do trilho, a depender do tipo de dormente ou fixação; o dormente; o lastro e, em alguns casos o sublastro. A constituição da infra-estrutura fica a cargo dos componentes complementares que são o subleito; elementos de drenagem superficial e profunda; os taludes de cortes e aterros; as obras de arte correntes e especiais.

Pelo conceito adotado em diversas outras partes do mundo a superestrutura é composta unicamente pelos trilhos, os acessórios metálicos e de apoio e os dormentes, estando o lastro e demais elementos inclusos na constituição da infra-estrutura.

Neste trabalho, será adotada a concepção brasileira, citada de forma mais ampla pelo material de referência utilizado na pesquisa.

2.1.2 Infra-estrutura ferroviária

Brina (1983) define a terraplenagem e as obras situadas abaixo do greide de terraplenagem como elementos constituintes da infra-estrutura e atribui à camada final de terraplenagem o conceito de leito ou plataforma da via férrea.

A plataforma deve oferecer a via uma estruturação de forma a não permitir a ocorrência de deformações que impeçam ou tragam inconvenientes ao tráfego das composições ferroviárias. É importante que a plataforma adquira algumas propriedades de resistência que devem ser obtidas preferencialmente no momento da construção, por meio da seleção dos materiais e da correta aplicação dos mesmos para que tais deformações prejudiciais ao tráfego não venham a ocorrer (STOPATTO, 1987).

As obras de terraplenagem são constituídas por cortes em caixão ou em meia encosta e aterros. Quando se iniciou o processo construtivo das primeiras ferrovias, não se dava a devida importância às investigações geotécnicas para avaliação das propriedades dos materiais utilizados na confecção dos aterros ou aqueles constituintes dos maciços onde eram feitos os cortes necessários a implantação da via (STOPATTO, 1987).

Em meados do século XX, com os avanços nos estudos realizados em países dotados de grande progresso ferroviário, como a França, Alemanha, Inglaterra, Rússia e Estados Unidos, e pelo crescente aprimoramento da mecânica dos solos, surgiram na literatura técnica ferroviária, estudos da plataforma providos de maior detalhamento quanto a forma, os elementos constituintes e as tensões geradas pelo tráfego das composições (STOPATTO, 1987).

O autor explica que as obras de arte correntes levam consigo esta denominação pela possibilidade de obedecerem a projetos padronizados. Podem ser superficiais (sarjetas, valetas, descidas d'água, bacias de dissipação, bueiros e pontilhões), profundas (drenos longitudinais de corte, espinhas de peixe, colchão drenante, etc.), ou sub-horizontais (drenos sub-horizontais de taludes).

As obras de arte especiais, diferentemente das correntes, têm sua concepção por meio de projetos específicos, como no caso das pontes, pontilhões e viadutos (em estrutura metálica, concreto armado ou protendido), túneis (escavados ou falsos), conteções de taludes (muros, cortinas, etc.) e passagens (superiores, inferiores, travessias, condutores de energia ou tubulações).

2.1.3 Superestrutura ferroviária

A plataforma ferroviária, bem como a via permanente, são os elementos integrantes da superestrutura ferroviária. Segundo Brina (1983), a via permanente é construída de modo que ela possa ser restaurada quando seu desgaste, ocorrido em função do tráfego das rodas dos veículos e do meio (intempéries), atingir os limites normativos que dizem respeito à segurança ou comodidade da circulação das composições ferroviárias. Pode ocorrer também a necessidade de substituição dos principais componentes em função da intensidade do tráfego e aumento do peso do material rodante.

Os principais elementos constituintes da superestrutura ferroviária são os trilhos, dormentes, lastro e sublastro. O material rodante aplica carga ao trilho por meio do contato roda-trilho, esta carga é transmitida para as placas de apoio e elementos de fixação e dissipada para os dormentes, depois para o lastro que transmite os esforços à plataforma (MACHADO, 2006).

2.1.3.1 Sublastro

O sublastro é a camada da plataforma que mantém contato direto com o lastro, devendo, desta forma, receber as solicitações por ele impostas e transmiti-las ao subleito com uma ordem de valor compatível com a capacidade de suporte dos materiais que o constituem. Ele tem ainda o dever de impedir a penetração dos agregados da parte do lastro com a qual mantém contato direto além de drenar as águas dele provenientes (STOPATTO, 1987).

Elemento pertencente a superestrutura e que mantém contato direto com a infraestrutura, o sublastro, de acordo com Brina (1983) deverá exercer de maneira tal qual a esperada em sua concepção durante o dimensionamento as seguintes funções:

- 1- Aumentar a capacidade de suporte da plataforma;
- 2- Evitar a penetração do lastro na plataforma quando submetido a cargas e vibrações provenientes do tráfego de trens;
- 3- Aumentar a resistência do leito a erosão e a penetração de água;

- 4- Possuir potencial drenante, sendo capaz de escoar as águas provenientes do lastro;
- 5- Tornar a implantação mais viável economicamente reduzindo a espessura do lastro, pois o mesmo é constituído de material britado com alto consumo e valor elevado.

O autor sugere ainda que o material a ser empregado para confecção do sublastro obedeça as seguintes características:

- Índice de grupo (IG) igual a zero;
- Limite de liquidez (LL) máximo de 35;
- Índice de plasticidade (IP) máximo de 6;
- Enquadramento segundo classificação de solos H.R.B preferencialmente no grupo A1;
- Expansão máxima de 1%;
- Índice de suporte Califórnia (ISC) mínimo de 30.

Stopatto (1987) cita como especificações gerais ao uso do material a ser empregado como sublastro as seguintes:

- A composição granulométrica deve se enquadrar nas faixas A, B, C e D da AASHO;
- O Limite de Liquidez estipulado para fração do material que passa na peneira nº 40 deve ser < 25% com exceção dos solos lateríticos para os quais é admitido um LL < 35%;
- O Índice de Plasticidade estipulado para a fração do material que passa na peneira nº 40 deve ser < 6%, já para os solos lateríticos admitti-se IP < 10%;
- O percentual de desgaste da fração passante na peneira nº 10 obtido no ensaio de abrasão “Los Angeles” deve ser < 50%;
- O Índice de Suporte Califórnia (ISC) mínimo que deve ser apresentado pelo material é igual a 20 e a expansão máxima de 0,5%;
- Permite-se, quando for necessária a obtenção da granulometria especificada, a mistura de solos com areia, agregados ou cimento;

- A espessura da camada do sublastro está condicionada a característica de fluxo de transporte e a carga por eixo do material rodante.

2.1.3.2 Lastro

Como componente da via permanente que é o objeto de estudo do presente trabalho, o lastro, de acordo com Stopatto (1987), bem como a adequação de sua espessura, exerce papel fundamental conceito de qualidade de uma ferrovia.

Muniz da Silva (2002), explica que para o lastro desempenhar de maneira satisfatória seu papel frente à estruturação da via, é importante que ele seja capaz de desempenhar as seguintes funções:

- 1- Resistir a forças verticais, laterais e longitudinais, a fim de manter a via férrea em condições operacionais;
- 2- Dotar a via férrea de resiliência adequada;
- 3- Possuir vazios suficientes para alojar possíveis materiais finos contaminantes e permitir a movimentação destas partículas;
- 4- Facilitar a recomposição da geometria da via férrea, principalmente por equipamentos mecânicos;
- 5- Ser dotado de alta capacidade drenante;
- 6- Reduzir as tensões, principalmente na região de apoio dos dormentes, a níveis compatíveis com a capacidade de suporte do subleito;
- 7- Inibir o crescimento de vegetação (essencial para a capacidade drenante, resiliência e condições de rolamento da via);
- 8- Diminuir a propagação sonora da passagem dos trens;
- 9- Constituir adequada resistência elétrica entre os trilhos;
- 10- Facilitar a conservação, remodelação e renovação da via férrea.

Stopatto (1987) cita a durabilidade do material que constitui o lastro como um dos fatores de grande relevância quando se fala em qualidade da via. Durabilidade significa baixa abrasão ou desgaste das partículas que resultam na formação de pó, que em grande quantidade podem colmatar o lastro. O “Los Angeles” ideal para uma boa durabilidade deve ser inferior a 40%, salvo em casos de obras de arte e túneis cujas

estruturas apresentam elevada rigidez, deve ser adotado preferencialmente um valor de abrasão inferior a 30%.

Silva (2002) explica que a socaria com adição de lastro é o procedimento mais difundido para recuperação da conformação geométrica da via, no entanto, apesar do termo “socaria” sugerir compactação ou densificação, Selig e Waters (1994) demonstram que o fenômeno ocorrido após sua aplicação contradiz seu significado. Ocorre um afastamento do lastro, o que leva a uma redução da resistência ao deslocamento lateral do dormente e a quebra dos grãos do lastro da região situada no entorno da base do dormente. A quebra dos grãos gera um vazio entre a base do dormente e a superfície do lastro referido pelo autor como “gap”, este vazio, no momento da passagem das composições se fecha de maneira abrupta majorando o impacto.

Um processo de grande relevância é a contaminação do lastro, que está diretamente associada à presença de finos entre os grãos, ocorre geralmente em meio saturado e acarreta a perda de capacidade da via. Na geotecnia, é comum referir-se aos finos como a porcentagem passante na peneira #200, entretanto, o autor se refere como sendo apenas partículas de dimensões muito inferiores às do lastro o que torna sua definição mais abrangente. Ao resultado deste processo dá-se o nome de “bolsões de lama”, tratado no Brasil como sendo produto da subpenetração do material que constitui a plataforma em função da baixa resistência ao cisalhamento de subleitos saturados em condições de carregamento não drenado.

A constituição predominante do material que contamina o lastro condiciona o efeito causado pela poluição. Partículas com granulometria de areia ou maiores tendem a proporcionar um aumento da resistência ao cisalhamento e aumento de rigidez levando a ocorrência de deformações permanentes menores, e diminuição da resiliência do lastro. Em presença de finos argilosos e siltosos, quando em baixa umidade, faz com que o material endureça podendo até mesmo cimentar, o que prejudica a execução da socaria, em meio saturado acontece a lubrificação do contato entre os grãos também trazendo inconvenientes a socaria além de possibilitar a ocorrência de deformações tanto resilientes quanto permanentes em maior grau (SILVA, 2002).

Os critérios para escolha do material que irá constituir o lastro, segundo Stopatto (1987) são as características da ferrovia quanto à intensidade do fluxo, carga transportada pelo material rodante, velocidade de tráfego, a possibilidade de aquisição e o custo. No entanto, atualmente, com a necessidade de se tornar a ferrovia competitiva em relação a outras opções de transporte, é importante a construção de uma linha férrea que possibilite um transporte eficiente e econômico, desta forma, é usual o emprego da produto britado como lastro, não se admitindo outro material, salvo em casos excepcionais e quando dotado de excelente qualidade o cascalho.

Amaral (1957) cita os materiais britados provenientes de rochas ígneas, principalmente granito e basalto ou silicosas como constituintes do lastro na grande maioria dos casos.

2.1.3.3 Dormente

O dormente é o componente da superestrutura ferroviária que exerce as funções de suporte dos trilhos permitindo a fixação dos mesmos de maneira a manter a bitola bem como receber e transmitir ao lastro as solicitações provenientes do material rodante (BRINA, 1983).

O autor cita as como características necessárias ao bom desempenho dormente as seguintes:

- 1- As dimensões, sendo elas o comprimento e a largura, devem ser definidas com a finalidade de criar uma superfície de apoio que transmita esforços de maneira a não exceder a capacidade de suporte do lastro;
- 2- A espessura deve ser definida com a finalidade de se obter rigidez e alguma elasticidade;
- 3- Tenha resistência suficiente às solicitações impostas pelo tráfego ferroviário;
- 4- Seja durável;
- 5- Permita o nivelamento do lastro na sua base;
- 6- Impeça deslocamentos longitudinais e transversais na via;
- 7- Permita uma fixação estável do trilho, mas não excessivamente rígida.

Segundo Alves (2005), a quantidade de dormentes a ser distribuída na linha férrea está condicionada ao material que o constitui e ao tipo de via. Em uma via que possui bitola métrica, a quantidade de dormentes de madeira a ser empregada em sua implantação tem valor situado entre 1600 e 1750 unidades por quilômetro, caso sejam utilizados dormentes de aço, a quantidade irá variar entre 1500 e 1600 unidades por quilômetro. É importante observar que, os valores ora mencionados baseiam-se em médias provenientes de casos estudados pela autora e que sua correta definição deve ser feita por meio do dimensionamento do pavimento ferroviário.

Pacha (2003 apud ALVES, 2005) cita que os dormentes são compostos usualmente por:

- Madeira: tem como característica boas propriedades mecânicas propiciadas pelo módulo de elasticidade e flexibilidade elevados;
- Aço: reduz a quantidade de peças por quilômetro em 20% além de permitir a reciclagem, no entanto, o fato de ser um material leve o torna prejudicial à estabilidade da via;
- Concreto: tem menor elasticidade quando comparado ao dormente de madeira;
- Plástico: é tão durável quanto um dormente de aço e tão leve quanto um dormente de madeira, no entanto, quando comparado ao outros materiais possui custo elevado.

Atualmente, vêm sendo estudados novos materiais a serem empregados na dormentação em alternativa principalmente à madeira, tanto por razões econômicas quanto ambientais. Podemos tomar como exemplo o trabalho desenvolvido por David et al (2006) que aborda a implantação de dormentes ambientalmente corretos por meio da proposta que trata do desenvolvimento de dormentes constituídos por pneu reciclado, que segundo os autores possui características mecânicas superiores e preços pelo menos equivalentes ao dormente de madeira tratada com qualidade superior em termos tecnológicos em ambientais.

2.1.3.4 Trilho

Brina (1983) define trilho como sendo o elemento constituinte da superestrutura que funciona como superfície de rolamento para as rodas do veículo ferroviário.

Porto (2004) os define como elementos que guiam o veículo durante seu trajeto fornecendo a ele a devida sustentação. O autor menciona ainda que os trilhos funcionam como uma viga contínua, que recebem as solicitações do material rodante e as transfere para os dormentes.

A evolução dos trilhos quanto as sua forma e comprimento ocorreu de forma gradativa em função das necessidades impostas pela via, até que se chegasse aos perfis modernos com grande seção e peso, de forma a tornar viável a circulação dos trens atuais dotados de elevadas cargas por eixo (BRINA, 1983).

Atualmente, o perfil mais empregado na implantação de linhas férreas é o Vignole (Figura 2.1), que segundo Porto (2004) possui geometria que favorece a resistência a flexão. O autor explica que um maior momento de inércia indica que a conformação geométrica da seção proporciona ao trilho uma maior concentração de massa nos pontos onde as tensões normais são maiores, propiciando um melhor aproveitamento das propriedades do material.

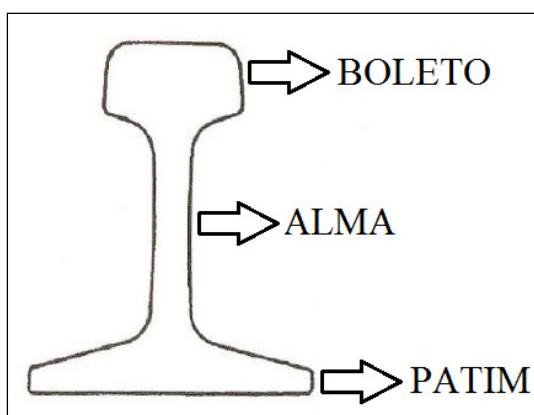


Figura 2.1- Trilho Vignole adaptado de Brina (1983)

Porto (2004) apresenta os requisitos em função das partes constituintes dos trilhos para que seu conjunto exerça de maneira satisfatória a função que lhe cabe, são eles:

Boleto:

- O boleto deve ter massa suficiente para que o desgaste provocado pela passagem das composições não afete o momento de inércia da seção.

Alma:

- A alma deve ter altura suficiente para obtenção de resistência a flexão, uma vez que a maior altura proporciona um distanciamento maior do boleto e do patim em relação a linha neutra da seção propiciando um maior momento de inércia;
- Quanto maior a massa que estiver concentrada no boleto e no patim, maior será a resistência do trilho à flexão, no entanto a alma deve ter uma espessura mínima de maneira a serem obtidas resistência e rigidez transversais adequadas.

Patim:

- O patim não deve ser pouco espesso de maneira a garantir a permanência da alma perpendicular ao dormente mesmo quando sujeita a solicitações transversais, caso contrário, pode haver o acúmulo de deformações permanentes ao longo do tempo provocando acidentes;
- A espessura deve também ter valor adequado para que seja capaz de reduzir o nível de tensões residuais ocasionadas em função do resfriamento diferenciado entre o boleto e o patim, este processo ocorre durante a produção do trilho;
- A espessura com a qual se produz o patim, assim como na alma, deve ser definida considerando-se as perdas por corrosão com o passar do tempo;
- As extremidades do patim têm sua espessura definida em função das dimensões da fixação elástica;

- Como o patim é a parte do trilho que mantém contato com o dormente de forma direta ou com auxílio de placa de apoio, sua largura irá definir o nível de tensão a ele transferida.

Neto (2010) cita como características indispensáveis ao bom desempenho do trilho a dureza, tenacidade, elasticidade e resistência a flexão, sendo que, dentre os materiais disponíveis, o aço é aquele que melhor atende aos requisitos propostos.

Ainda segundo o autor, com relação aos principais componentes do aço e aos atributos a ele fornecidos, pela presença de cada um destes elementos em sua constituição, podemos citar:

- Ferro: elemento responsável por uma parcela correspondente a 98% da constituição do trilho, sendo o agente determinante das principais características, dentre elas a dureza, ductibilidade, maleabilidade, tenacidade e resistência a flexão;
- Carbono: sua presença confere dureza ao aço, no entanto, quando em grande quantidade, principalmente em presença de concentração excessiva de fósforo, torna-o quebradiço;
- Manganês: também proporciona dureza ao aço, mas pode torná-lo de difícil trabalhabilidade quando presente em grande quantidade e até mesmo frágil quando combinado a elevadas concentrações de carbono;
- Silício: sua presença eleva o potencial de resistência a ruptura sem que sejam alteradas as características de tenacidade e ductibilidade;
- Fósforo: torna o aço quebradiço, sendo, desta forma, um elemento indesejável. Tem a incidência de suas propriedades condicionada ao teor de carbono presente na composição do aço, sendo que seu efeito torna-se menos prejudicial em presença de concentrações reduzidas de carbono;

- Enxofre: também é um elemento indesejável, já que quando combinado ao ferro, faz com que ocorra “segregação” em decorrência da perda de suas principais qualidades.

Porto (2004) explica que a vida útil do trilho é condicionada ao seu desgaste ou a ruptura por fadiga em função da incidência do carregamento cíclico, sendo que, em geral, o desgaste ocorre primeiro.

2.2 TENSÕES E DEFORMAÇÕES NO PAVIMENTO FERROVIÁRIO

No século dezenove, quando se iniciou a introdução dos trilhos metálicos à via férrea, era comum o seu dimensionamento de forma intuitiva, embasado pelo método da tentativa e erro, no entanto, a partir da segunda metade deste mesmo século, começou a ser desenvolvida por engenheiros ferroviários tentativas de análise da via e dos elementos que a constituem (GUIMARÃES, 1999).

Atualmente, o chamado Modelo Mecanístico vem fazer a inter-relação dos componentes que constituem a via (trilhos, dormentes, fixação, lastro, sublastro e subleito), procurando representar de maneira mais próxima à realidade a forma como o sistema se comporta frente às tensões e deformações induzidas pelo efeito do carregamento por complexas interações (NETO, 2010).

Este modelo começa a ser moldado quando em 1867 Winkler desenvolveu equações diferenciais as quais possibilitaram um grande desenvolvimento da análise da via apoiada sobre uma base elástica. Engenheiros ferroviários americanos foram os primeiros a abordarem o modelo de viga apoiada sobre uma base elástica, principalmente por Talbot, tendo ainda hoje suas equações utilizadas na prática corrente americana. Eisenmann desenvolveu posteriormente, baseado no trabalho de Zimmermann, estudos que contemplam a análise da via sobre dormentes longitudinais que evoluiu para análise de dormentes discretos e, atualmente, é o método predominante na engenharia ferroviária europeia (GUIMARÃES, 1999).

Spada (2003) explica que a mecânica dos pavimentos avalia as reações dos materiais quando submetidos a diferentes níveis de tensões, em geral mais baixas em relação

àquelas que induzem a estrutura à ruptura, no que diz respeito tanto a deformações elásticas quanto plásticas. A relação entre as tensões transientes e as deformações recuperáveis a ela correspondente, constitui o módulo de resiliência do material.

Segundo Silva (2002), a deformação elástica (resiliência) deveria ter seu limite superior definido em função da segurança e/ou conforto dos passageiros, de modo que o pavimento ferroviário não tenha baixo módulo de resiliência que resultaria em deformações elásticas elevadas, evitando que o trem “catapultasse” em seu movimento de galope, podendo levá-lo ao descarrilamento ou a causar desconforto ou mal-estar aos passageiros em decorrência das vibrações excessivas. Quanto ao limite inferior, este não deveria permitir elevados módulos de resiliência, que resultariam em baixas deformações a ponto de levarem as tensões de contato roda-trilho e impactos a níveis prejudiciais para vida útil do pavimento por provocar desgastes excessivos em seus componentes.

A interação entre os elementos que compõe a via permanente torna possível a transferência das cargas advindas do material rodante para a fundação. Cada elemento absorve parte das tensões que nele incidem, transmitindo-as em menor valor para as camadas subsequentes (KLINCEVICIUS, 2011).

Para melhor compreensão das tensões atuantes na via, torna-se necessário conhecimento da natureza destes esforços e a forma como ocorre sua transmissão entre os elementos. Desta forma, Brina (1983) divide os esforços provenientes da passagem das composições sobre a via da seguinte forma:

- **Esforços verticais:** têm direção normal ao plano dos trilhos e são constituídos pela carga estática oriunda do peso das composições, força centrífuga vertical, movimento de galope, movimento de trepidação e movimento de balanço;
- **Esforços longitudinais:** são constituídos pela variação térmica dos trilhos, deformação elástica sofrida pelo trilho em decorrência do contato com as rodas das composições, que deixam o trilho flexionado, possibilitando a geração de tensões de tração e flexão (movimento de reptação), golpes de

roda no topo dos trilhos, frenagem, esforço trator e atrito dos frisos das rodas nos trilhos;

- **Esforços transversais:** são constituídos pela força centrífuga, movimento de lacêt e pelo vento.

A Figura 2.2 representa os movimentos de um veículo ferroviário em tráfego.

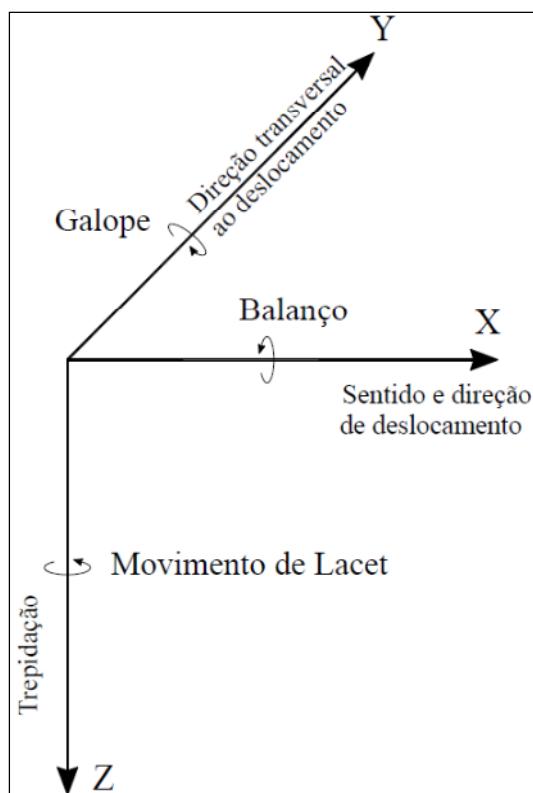


Figura 2.2 – Movimentos de um veículo ferroviário em tráfego (COÊLHO et al., 1982; MUNIZ DA SILVA, 2002)

A transmissão de tensões verticais que incide sobre a via férrea ocorre inicialmente nos trilhos, os quais recebem as tensões provenientes do contato direto com as rodas dos veículos ferroviários, este contato exerce uma força de compressão no trilho fazendo com que sua parte superior se desloque em movimento descendente tracionando a parte inferior do mesmo. As seções dos trilhos situadas em certos pontos distanciados em relação ao local de aplicação da carga tendem a fazer um movimento oposto (ascendente), de forma a tracionar a parte superior do trilho. A incidência das tensões verticais podem levar a ocorrência de sub-pressões que consistem no fenômeno de

suspensão momentânea dos dormentes (KLINCEVICIUS, 2011). A Figura 2.3 representa a transmissão de tensões na via permanente ferroviária.

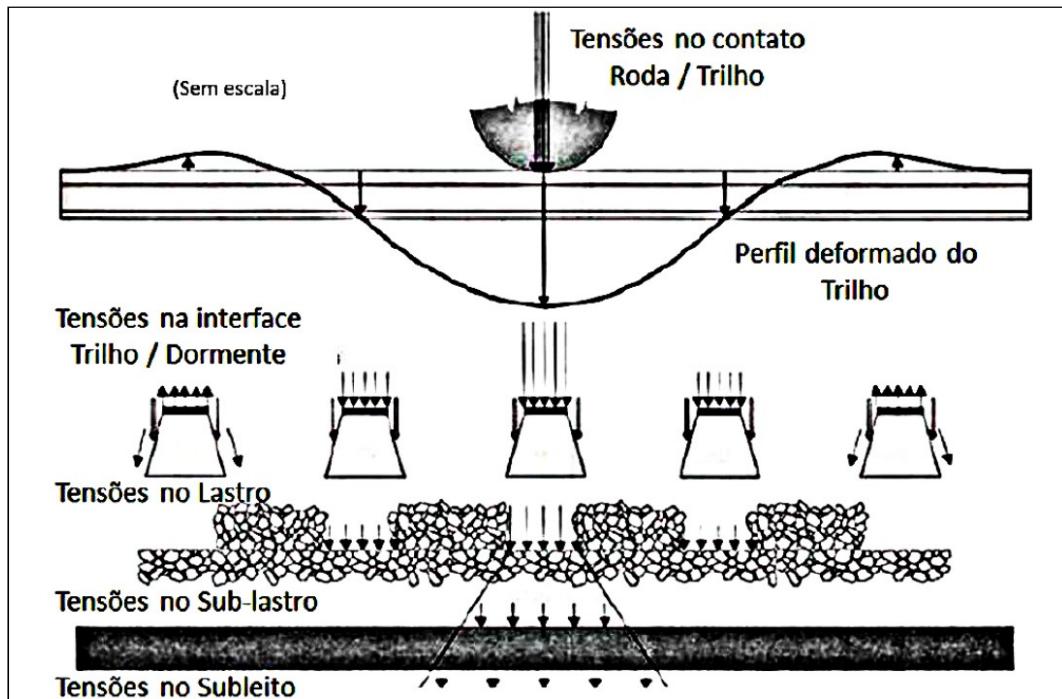


Figura 2.3 – Representação da distribuição de tensões em uma via permanente (SELIG e WATERS, 1994; KLINCEVICIUS, 2011)

Spada (2003) define o pavimento ferroviário de maneira sucinta com sendo a sobreposição de uma camada compacta dotada de certa rigidez e constituída por material resistente a deformação, menciona ainda o solo natural como material dotado rigidez mais baixa, sendo, desta forma, possível da ocorrência de deformações de caráter permanente. O autor explica que se considerarmos o conjunto lastro e sublastro como sendo uma única camada, o modelo discreto pode ser aplicado para o dimensionamento do pavimento ferroviário.

O projeto de um pavimento objetiva o dimensionamento de uma ou mais camadas estruturais com propriedades de rigidez e espessuras suficientemente capazes de manter sua integridade, impedindo o surgimento de trincas e deformações plásticas, assegurando a proteção do subleito, mantendo a tensão vertical resultante do carregamento da roda em um nível baixo e aceitável na superfície. Normalmente, projeta-se um pavimento considerando uma vida útil de vinte anos, período no qual

estará sujeito a milhões de repetições de carregamento por eixo (SPADA, 2003). A Figura 2.4 ilustra a forma como o espraiamento de tensões ocorre em função da variação de rigidez da camada superior.

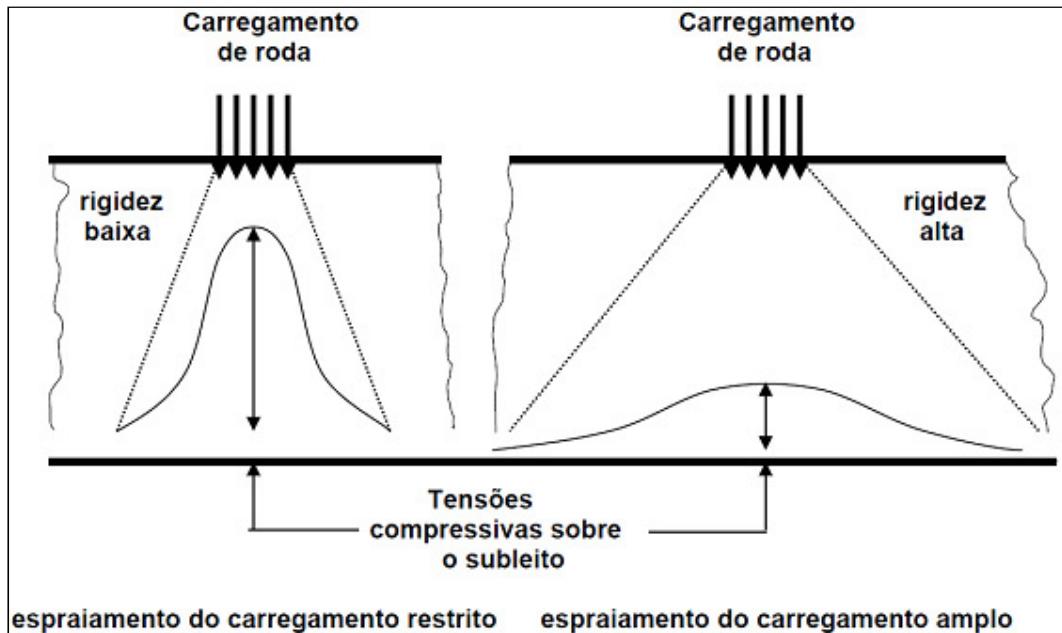


Figura 2.4 – Conceito do espraiamento do carregamento (BROWN E SELIG, 1991; SPADA, 2003)

2.3 ANÁLISE MECÂNICA DA VIA PERMANENTE

Silva (2002) explica que os modelos para estudo do comportamento mecânico levam em consideração unicamente as cargas verticais provenientes do tráfego, mesmo a via estando sujeita também a esforços na direção horizontal (lateral e longitudinalmente).

O autor divide os critérios de análise tradicionais em dois principais grupos que se distinguem entre si pela teoria adotada como base por cada um deles:

- Os que consideram o trilho como uma viga direta e continuamente apoiada em meio elástico, homogêneo e isotrópico. Modelo este que representa a antiga configuração da via permanente ferroviária, onde os trilhos se apoiavam de forma contínua em dormentes longitudinais, ficando a manutenção da bitola a cargo de barras transversais dispostas ao longo da via;

- Os que consideram o trilho como uma viga contínua, com apoios discretos e equidistantes, descarregando em meio elástico, homogêneo e isotrópico. Esta concepção representa o modelo atual de via permanente ferroviária, onde os trilhos se apoiam em dormentes transversais dispostos em intervalos uniformes ao longo da via.

Winkler em 1867 realizou a análise das tensões nos trilhos de vias longitudinais considerando-os como vigas continuamente apoiadas, obtendo a seguinte equação diferencial para uma viga elástica:

$$EI \frac{d^4y}{dx^4} + p(x) = q(x) \quad (2.1)$$

Sendo:

y = deslocamento vertical do trilho na posição x

q = carga ou reação vertical distribuída

EI = rigidez a flexão do trilho e dos apoios longitudinais

p = pressão de contato contínua entre o apoio longitudinal e sua base

Winkler propõe ainda a seguinte relação para a reação na base:

$$p(x) = Cy(x) \quad (2.2)$$

Em que C é o coeficiente de lastro ou coeficiente de Winkler, que irá depender das características do material pelo qual será composto o lastro bem como das propriedades do solo.

A equação de Winkler para uma viga apoiada sobre base elástica (Figura 2.5) é gerada pela substituição da equação 2.2 na equação 2.1 como representado a seguir:

$$EI \frac{d^4y}{dx^4} + Cy = q \quad (2.3)$$

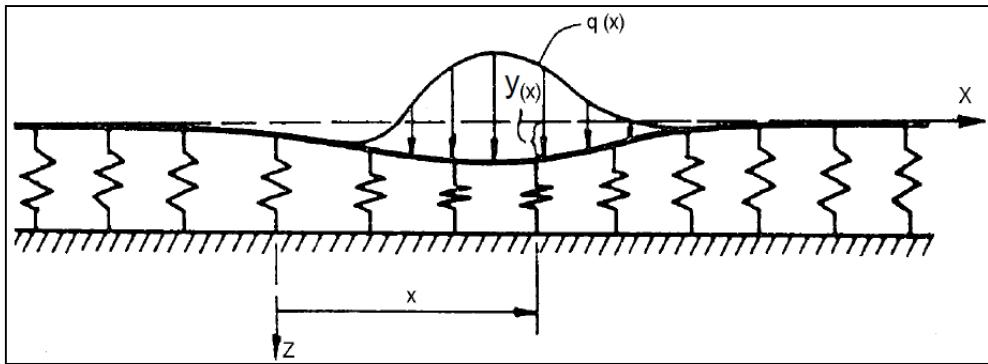


Figura 2.5 – Viga apoiada continuamente sobre uma base elástica e submetida a uma carga vertical (KERR, 1978; BASTOS, 1999)

Silva (2002) cita os métodos de Zimmermann e Talbot, ambos embasados pela hipótese da viga continuamente apoiada, ou aqueles elaborados a partir deles como os mais difundidos no meio técnico ferroviário.

Spada (2003) explica que nestes modelos a resposta da via é expressa por um único parâmetro, sendo que para o método de Talbot é utilizado o módulo de via e para o método de Zimmermann o coeficiente de lastro.

2.3.1 Método de Talbot

Talbot baseia-se na teoria que trata da ideia de que uma carga de origem em um grupo de rodas se distribui sobre os dormentes adjacentes em magnitude decrescente. A parcela da carga que incide em sua devida proporção, em cada dormente, é função da rigidez do trilho, do espaçamento entre dormentes, do tamanho e da rigidez dos dormentes e da rigidez da subestrutura da via férrea (GUIMARÃES, 1999). A equação 2.4 demonstra a relação fundamental, elaborada a partir da solução básica criada por Winkler, que representa a via férrea como uma viga contínua apoiada elasticamente.

$$p(x) = -uw(x) \quad (2.4)$$

Onde $p(x)$ é definida como sendo a pressão por unidade de comprimento ao longo do eixo x , orientada para cima, proporcional a $w(x)$ (deflexão vertical) e modificada por u (coeficiente de rigidez ou elasticidade da via), desta forma, pode ser obtida a equação 2.5 que é a equação diferencial para uma viga elástica.

$$EI \frac{d^4w}{dx^4} + uw(x) = 0 \quad (2.5)$$

A equação 2.5 é satisfeita para x de acordo com a equação 2.6 representada na sequencia.

$$w(x) = \frac{P}{(64EIu^3)^{\frac{1}{4}}} \exp^{-\lambda x} (\cos \lambda x + \sin \lambda x) \quad (2.6)$$

Sendo que:

P = carga de roda simples

EI = rigidez a flexão do trilho

λ = fator de amortecimento

O fator de amortecimento pode ser obtido a partir da relação representada na equação 2.7.

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{u}{4EI}} \quad (2.7)$$

A equação 2.6, quando derivada de forma sucessiva, nos fornece como produto as equações para determinação da declividade, momento fletor, cisalhamento e a intensidade da pressão no contato com o trilho. Estas equações são apresentadas a seguir:

Declividade:

$$\frac{dw(x)}{dx} = \frac{2P}{(16EIu)^{1/2}} \exp^{-\lambda x} \sin \lambda x \quad (2.8)$$

Momento fletor:

$$EI \frac{d^2w(x)}{dx^2} = P \sqrt{\frac{u}{64EI}} \exp^{-\lambda x} (\cos \lambda x - \sin \lambda x) \quad (2.9)$$

Cisalhamento:

$$EI \frac{d^3 w(x)}{dx^3} = -\frac{P}{2} \exp^{-\lambda x} \cos \lambda x \quad (2.10)$$

Pressão contra o trilho:

$$EI \frac{d^4 w(x)}{dx^4} = P^4 \sqrt{\frac{u}{64EI}} \exp^{-\lambda x} (\cos \lambda x + \sin \lambda x) = -uw(x) \quad (2.11)$$

Sabe-se que no ponto de aplicação da carga ($x=0$) é onde são obtidos os valores máximos para as equações anteriormente mencionadas. Desta forma, quando atribuímos o valor $x=0$ e substituímos nas equações, obtemos como resultado as seguintes expressões:

Máxima deflexão:

$$Y_0 = \frac{P}{(64EIu^3)^{1/4}} \quad (2.12)$$

Declividade:

$$m_0 = 0 \quad (2.13)$$

Máximo momento fletor:

$$M_0 = P^4 \sqrt{\frac{u}{64EI}} \quad (2.14)$$

Máximo cisalhamento:

$$S_0 = -\frac{P}{2} \quad (2.15)$$

Máxima pressão contra o trilho:

$$P_0 = P^4 \sqrt{\frac{u}{64EI}} = -uY_0 \quad (2.16)$$

Quando se avalia a igualdade obtida na equação 2.16 observamos o valor negativo, que indica uma deflexão em sentido descendente, estando de acordo com a convenção adotada por Talbot. Quando se resolve a equação 2.6 (momento fletor) para $M=0$, obtemos a distância em relação ao ponto onde a carga é aplicada e a partir da qual o

momento fletor se torna nulo. Esta distância é chamada x_1 e pode ser obtida pela equação 2.17.

$$x_1 = \frac{\pi^4}{4} \sqrt{\frac{u}{64EI}} \quad (2.17)$$

Segundo a mesma linha de raciocínio, torna-se possível a obtenção do ponto chamado x_2 no qual a deflexão é nula, para isto, é necessário considerar $w(x)=0$ na equação 2.6. A equação 2.18 é resultado de tal procedimento:

$$x_2 = \frac{3\pi^4}{4} \sqrt{\frac{u}{64EI}} \quad (2.18)$$

Hay (1982 apud GUIMARÃES, 1999) explica que as expressões anteriormente citadas têm validade apenas em casos nos quais as vias em análise possuem espaçamento entre dormentes pequeno com uma elástica estendendo-se a uma quantia mínima de oito dormentes, seções de trilhos com rigidezes elevadas, existência de pressões negativas possibilitadas pela forma de construção da via férrea e presença de carregamento estático.

Com o intuito de fazer uma simplificação do processo de cálculo, Talbot criou uma maneira de obter as deflexões, os momentos fletores, e as pressões contra o trilho ao longo de sua extensão quando submetido a uma carga de roda simples. O chamado diagrama mestre (Figura 2.6) possibilita a determinação destas componentes por meio de seus valores máximos.

Tanto os momentos fletores quanto as deflexões que ocorrem sob a roda são considerados unitários e os demais valores situados em pontos distintos são considerados relativos em relação às mesmas. Desta forma, as distâncias que podem ser verificadas ao longo dos eixos das abcissas são dadas em termos da distância x_1 . O valor máximo pode ser obtido quando se calcula a distância entre o ponto x_1 até o ponto onde o momento é nulo. O valor do momento fletor nos demais pontos, sejam eles quais forem, têm sua determinação feita a partir da relação expressa por x/x_1 . Tomando este valor como abcissa, a partir do diagrama mestre é possível a obtenção da ordenada

correspondente. A operação dada pela multiplicação desta ordenada pelo valor do momento máximo nos fornece o valor do momento fletor no ponto em análise. Analogamente podem ser determinadas as pressões contra o trilho e as deflexões.

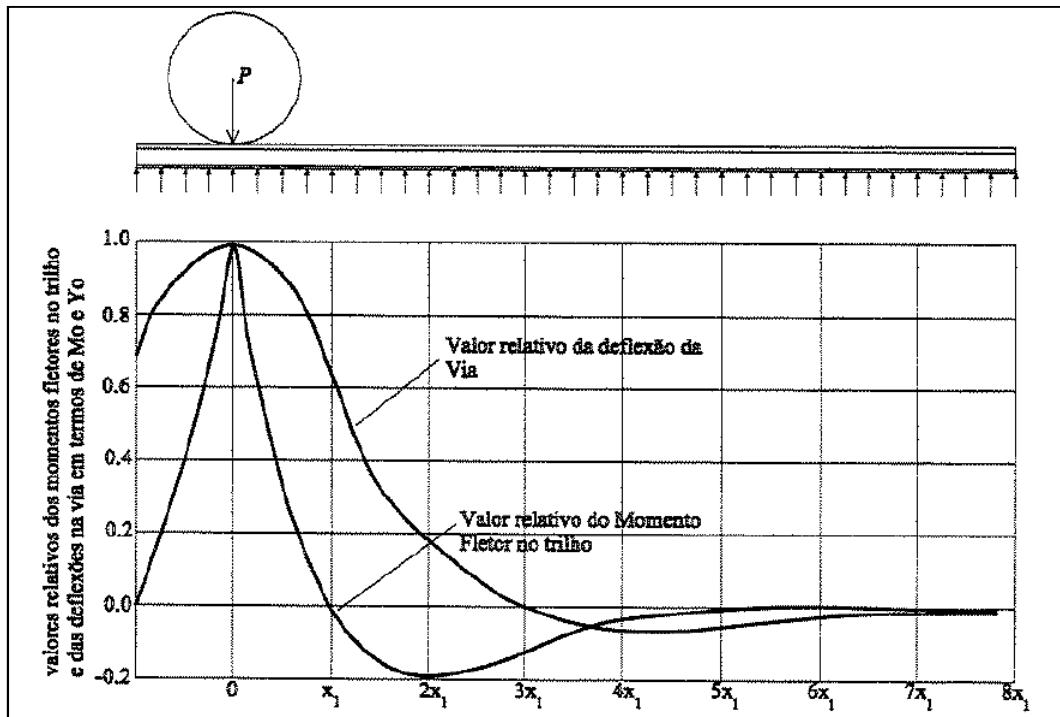


Figura 2.6 – Diagrama Mestre (GUIMARÃES, 1999)

Quando se trata de rodas múltiplas, as deflexões e os momentos fletores são calculados em função da posição ocupada por cada roda. Desta forma, as curvas originadas dos momentos fletores e deflexões têm sua obtenção dada por meio da soma algébrica das ordenadas de cada curva. Em casos de grande proximidade entre as rodas, a curva composta de deflexões tende a se tornar “plana”, acarretando uma redução da declividade, dos momentos fletores e das tensões. Quando ocorre o inverso, com o distanciamento maior das rodas, acontece o aumento dos valores das deflexões, das declividades e dos momentos fletores. De acordo do Talbot, devem ser considerados no momento da análise fatores que exercem influência, tais como o grupo de rodas do lado oposto do veículo e do veículo ou locomotiva adjacente. Sendo assim, quando efetuados os cálculos das pressões contra o trilho, deve-se modificar o valor da carga de roda por um fator multiplicador que é baseado no efeito das deflexões das rodas adjacentes (GUIMARÃES, 1999).

2.3.2 Método de Zimmermann

Spada (2003) explica que para determinação de seu método de cálculo dos esforços atuantes na via férrea, Zimmermann baseou-se no modelo de Winkler que considera os trilhos dotados de comprimento infinito, equidistantes, apoiados de forma contínua sobre molas dotadas de módulos de rigidez constantes. A configuração adotada pelo modelo cria uma proporcionalidade entre as reações dos apoios e suas deflexões. A equação que expressa o modelo descrito é apresentada a seguir:

$$P = Cy \quad (2.19)$$

Em que:

P = força por unidade de área

y = deflexão

C = coeficiente de lastro

O coeficiente de lastro é definido como uma tensão por unidade de comprimento que gera no lastro uma deflexão unitária.

É a partir da suposição de que o trilho se apoia sobre uma viga de largura b e por sua vez a viga se apoia de maneira contínua sobre molas que se desenvolve o método de Zimmermann. No intuito de simular as solicitações impostas a via pelo tráfego ferroviário, é atribuída a viga uma carga pontual Q estática (SPADA, 2003). A figura 2.7 ilustra o modelo no qual Zimmermann se baseou para elaboração de seus estudos.

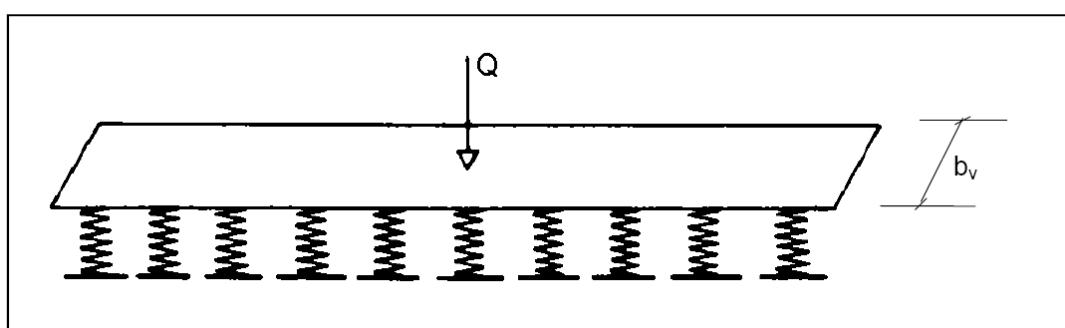


Figura 2.7 – Modelo de Zimmermann para viga com apoios contínuos (RIVES et al., 1977; BASTOS, 1999)

A equação diferencial para o modelo anteriormente citado é estabelecida por meio da Resistência dos Materiais bem como das solicitações atuantes num elemento de viga dx , e é apresentada a seguir:

$$EI \frac{dy^4}{dx^4} + bCy = 0 \quad (2.20)$$

Em que:

E = módulo de elasticidade do trilho

I = momento de inércia do trilho

b = largura da via

C = coeficiente de lastro

y = deflexão da via

Os valores da deflexão e do momento fletor para qualquer ponto do trilho são obtidos pela equação diferencial integrada considerando a carga pontual Q como pode ser observado a seguir:

$$y = \frac{Q}{2bC} \frac{1}{L} e^{-\frac{x}{L}} \left[\cos \frac{x}{L} + \sin \frac{x}{L} \right] \quad (2.21)$$

$$M = \frac{Q}{4} L e^{-\frac{x}{L}} \left[\cos \frac{x}{L} - \sin \frac{x}{L} \right] \quad (2.22)$$

Onde:

L = comprimento elástico

x = distância do ponto de aplicação de carga em relação a algum ponto do trilho

$e= 2,7183$ (neperiano)

O comprimento elástico pode ser obtido pela equação 2.23 apresentada a seguir:

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{bc}} \quad (2.23)$$

Os resultados obtidos por Zimmermann em 1885 são apresentados na Figura 2.8 onde pode ser observado que tanto o deslocamento máximo quanto o momento fletor máximo acontecem no ponto onde a carga Q é aplicada.

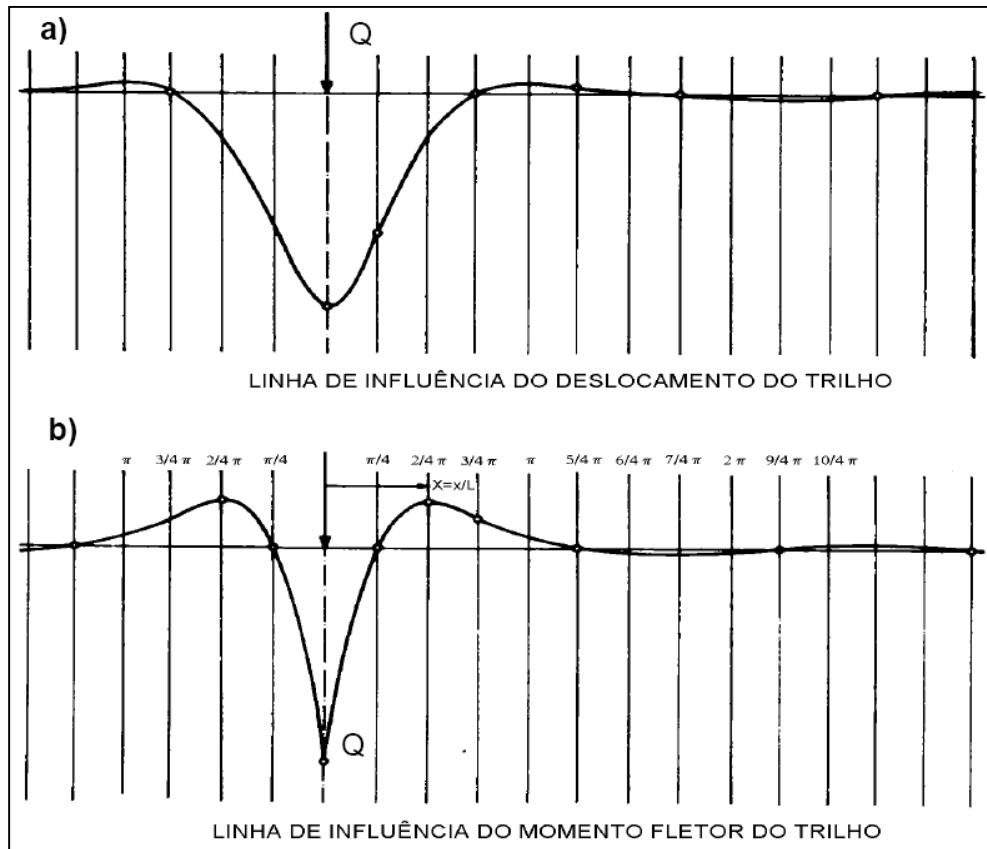


Figura 2.8 – Resultados obtidos por Zimmermann (RIVES et al., 1977; BASTOS, 1999)

A partir da hipótese considerada por Winkler, pode-se efetuar o cálculo da tensão atuante em cada ponto de apoio (P_1) de acordo com a equação 2.24.

$$P_1 = Cy = \frac{Q}{2b} \sqrt{\frac{bC}{4EI}} e^{\frac{-x}{L}} \left[\cos \frac{x}{L} + \sin \frac{x}{L} \right] \quad (2.24)$$

Rives, Pita e Puentes (1977 apud SPADA, 2003) apresentam na Tabela 2.1 os valores para o coeficiente de lastro propostos por Eisenmann e na Tabela 2.2 os valores por eles propostos para o coeficiente lastro condicionados pela qualidade da infra-estrutura e pela espessura do lastro (h).

Tabela 2.1 – Valores do coeficiente de lastro (RIVES, PITA e PUENTES, 1977; SPADA, 2003)

Infra-estrutura	Coeficiente de lastro (Kgf/cm ³)
Ruim	2
Boa	5
Muito Boa	10

Tabela 2.2 – Coeficiente de lastro em função de sua espessura (RIVES, PITA e PUENTES, 1977; SPADA, 2003)

Infra-estrutura	Coeficiente de lastro (Kgf/cm ³)
Ruim	$0,275h + 0,972$
Boa	$0,194h + 0,101$
Muito Boa	$0,106h + 0,212$

2.3.3 Outros modelos de análise da via férrea

2.3.3.1 Modelo linear elástico

Os modelos de análise linear elástica mais difundidos são o semi-espacô de Boussinesq, o método da espessura equivalente e modelo multi-camadas.

Através das equações de equilíbrio, de compatibilidade e das equações provenientes da teoria da elasticidade, Boussinesq elaborou expressões que possibilitaram o cálculo analítico dos deslocamentos, deformações e tensões de acordo com a profundidade e distância radial surgidos em decorrência da incidência de uma carga pontual (P) orientada verticalmente, atuante na superfície de um maciço semi-infinito constituído por material elástico, homogêneo e isotrópico. Posteriormente, foram elaboradas equações que possibilitaram a análise considerando a incidência de uma carga linear e uniformemente distribuída em uma área circular (FERNANDES, 2011).

O autor explica que o método da espessura equivalente, também conhecido como método de Odemark, se baseia na transformação de um sistema de camadas onde cada uma delas possui diferentes módulos de elasticidade, em um sistema no qual todas as camadas que o constitui possuem o mesmo módulo, de forma que as equações de Boussinesq possam ser aplicadas. Neste método, considera-se que as tensões e deformações abaixo de uma camada dependem unicamente dessa camada.

O modelo multi-camadas, adotado por Burmister considera que os materiais das camadas são homogênicos, isotrópicos e elásticos, neste modelo não são considerados os efeitos provocados pela inércia, as camadas são consideradas contínuas, horizontais e infinitas, todas elas, exceto a fundação têm espessura finita, a fundação é considerada como o meio semi-infinito, a solicitação imposta à superfície é uniformemente distribuída em uma área circular e a axissimetria é uma característica inerente ao sistema (FONTUL, 2004 *apud* FERNANDES, 2011).

2.3.3.2 Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos consiste num processo no qual é feita a discretização de um meio contínuo, este meio é dividido em diversos pequenos elementos onde são mantidas as propriedades dos elementos dos quais foram originados. Os elementos finitos são ligados por meio de pontos nodais e podem ser de uma, duas ou três dimensões de acordo com a necessidade imposta pelo modelo a ser avaliado. Dependendo do refinamento do resultado pretendido, o meio pode ser dividido em uma malha de elementos tão densa quanto for necessário (FERNANDES, 2011).

Dentre os diversos programas computacionais já desenvolvidos, os mais utilizados para execução de análises em diversos trabalhos que serviram como referência para elaboração do presente estudo são o Geotrack e o Ferrovia.

O modelo Geotrack permite que os elementos que constituem a via (trilhos, dormentes, lastro, sublastro e subleito) sejam considerados individualmente, sujeitos a solicitações provenientes do carregamento de roda vertical. É um modelo tridimensional, multicamadas, considera os módulos resilientes do lastro e do subleito condicionados ao estado de tensões para possibilitar a previsão da resposta elástica da via férrea. As deformações permanentes na via são previstas pelo estado de tensões do solo calculado pelo modelo (SPADA, 2003).

Segundo o autor os grupos de resultados que compõe os dados de saída do programa são:

- Deflexão vertical do trilho, reação trilho dormente e a deflexão do dormente sob o trilho para cada dormente;

- Os valores dos momentos fletores que atuam no trilho, no dormente na posição do trilho e sobre o centro do dormente;
- O valor do módulo de via;
- O deslocamento vertical bem como o completo estado de tensões tridimensionais e tensões principais decorrentes do carregamento de roda em um determinado ponto de cada camada;
- Em caso de aplicação de carregamento composto, constituído por dois eixos ou mais de carga, inicialmente a saída de dados se dá para um eixo simples para que, em seguida, sejam apresentados os resultados para os eixos superpostos.

No programa Ferrovia, para se elaborar modelo que representa a grade ferroviária composta pelos trilhos e dormentes, foi utilizado o método dos elementos finitos. A representação dos trilhos e dormentes é feita por meio de elementos de viga interconectados. É por intermédio de molas que representam o sistema de fixação que se dá a ligação entre trilhos e dormentes (SPADA, 2003).

Ainda de acordo com o autor, o programa tem suas propriedades distintivas orientadas pelas seguintes requisitos:

- Calcular as reações da via frente as solicitações impostas pelos veículos ferroviário, sendo elas as tensões e deformações que ocorrem no lastro, sublastro e subleito;
- Considerar a natureza tridimensional do pavimento ferroviário e, no entanto, manter os níveis de exigência da atividade computacional de maneira a tonar viável sua utilização rotineira;
- Incorporar as vantagens apresentadas pelos principais modelos existentes.

2.4 ESCÓRIA DE ACIARIA

As escórias de aciaria, atualmente denominadas agregados siderúrgicos, constituem um total aproximado de 60% dos coprodutos gerados no processo de produção do aço (IAB, 2012). São geradas, em sua maioria, por meio da solução da mistura entre óxidos e silicatos, sendo que podem estar presentes compostos como aluminatos, fosfatos e boratos. Exercem papel fundamental na produção do aço, atuando de maneira a garantir qualidade ao produto final (GRAFFITTI, 2002).

Em função da aplicação de processos distintos para produção do aço são gerados consequentemente diferentes tipos de escórias. Os processos se diferem em função do emprego de diferentes fornos para fusão e refino de sucata, os mais utilizados mundialmente são o conversor a oxigênio LD (Linz e Donawitz) ou BOF (Blast Oxygen Furnace) e o forno de arco elétrico (Electric Arc Furnace). Há ainda o processo realizado por meio do uso do forno Siemens-Martin (Open Heart - OH), no entanto, este tem caído em desuso não sendo utilizado no Brasil (ROHDE, 2002).

Tais processos objetivam a remoção do C, Mn, P e Si até se que se alcancem os teores necessários a cada aplicação. O oxigênio funciona como elemento oxidante e o CaO atua como agente escorificante no fluxo de refino. Os processos LD e OH geram escórias oxidantes, já o processo EAF gera escórias oxidantes e redutoras (MACHADO, 2000).

No decorrer do processo de fusão, o metal fundido interage com a escória diretamente por meio do contato entre os materiais. A qualidade do aço é diretamente influenciada por características inerentes à escória sendo que as principais são sua composição, temperatura e fluidez.

A escória tem como função a remoção de impurezas do metal, sendo estas em grande parte constituídas por enxofre e fósforo, de maneira a evitar seu retorno ao banho metálico. Outra importante função se da pelo impedimento da reoxidação e perda da temperatura devido ao isolamento do banho metálico, não permitindo seu contato com a atmosfera.

O controle da composição química e da qualidade do aço produzido se torna possível por meio da variação da composição, temperatura, e algumas propriedades da escória (KUDRIN, 1985 apud GRAFFITI, 2002). O sistema produtivo para obtenção aço é apresentado de forma simplificada na Figura 2.9.

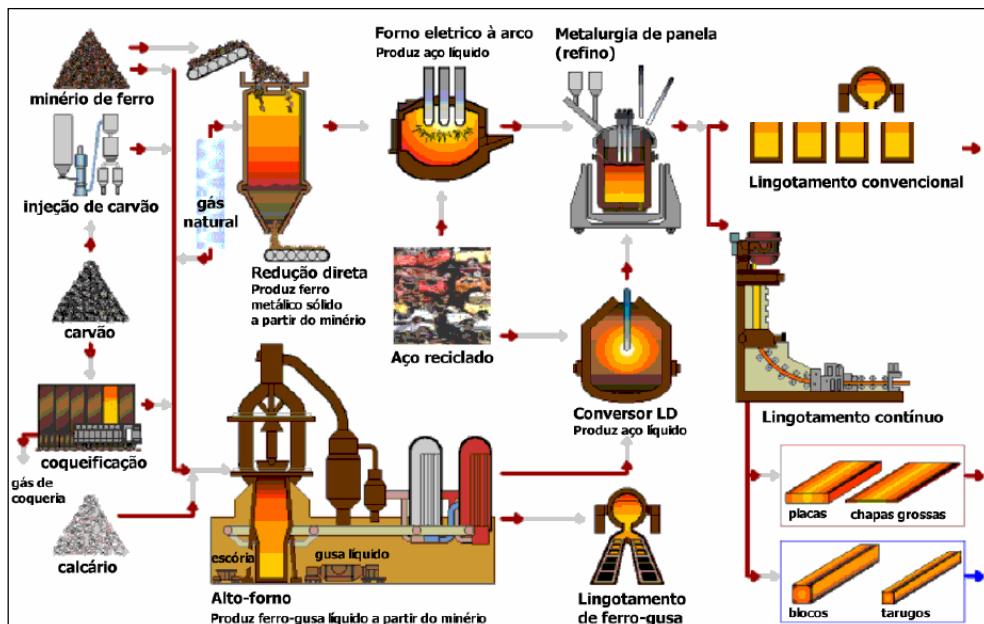


Figura 2.9– Processo de produção do aço

Ao final do processo onde se realiza o refino, após a oxidação do silício e do fósforo, ocorrem, ao se ultrapassar os limites de solubilidade da escória fundida, as precipitações de parte da cal e do magnésio. Os principais elementos constituintes da composição mineralógica das escórias de aciaria são β - silicato dicálcico (larnita), ferrita cárlica, wüstita (FeO), cal livre (CaO), periclásio (MgO), portilandita ($Ca(OH)_2$) e calcita ($CaCO_3$) (MACHADO, 2000).

As escórias de aciaria sendo elas oxidantes (LD, OH ou EAF) ou redutoras (EAF), são vazadas em um pote de escória ou descarregadas em locais onde sofrem solidificação e adquirem forma cristalina, depois de resfriada, a escória é britada e separada por correias rolantes em diferentes faixas granulométricas. Enquanto se processa a separação, o coproduto passa por um eletroímã que faz a seleção da escória rica em ferro para que esta possa retornar ao forno, sendo caracterizada como sucata recuperada (GEYER, 2001).

2.4.1 Escória de aciaria LD

A denominação LD tem origem na abreviação de nomes das cidades “Linz” e “Donawitz” na Áustria onde em 1949 foram feitas as aplicações deste processo de forma experimental.

Da carga utilizada no processo LD, uma parcela de 80% corresponde ao gusa líquido, seu aquecimento bem como as reações exotérmicas, geram calor que propicia o fornecimento da energia necessária ao funcionamento do sistema. A parcela restante da carga é constituída por sucata.

O processo se inicia com a inserção da carga metálica no forno, seguida injeção de oxigênio por meio de uma lança refrigerada a água. Com pressões e velocidades altas, o oxigênio é aplicado de forma a promover reações, em sua maior parte exotérmicas, entre os elementos constituintes da carga metálica. No momento da inserção da carga metálica, são inseridos também os fundentes, constituídos em sua maior parte por cal calcítica, cal dolomítica, minério de ferro e fluorita que representam papel fundamental no balanço térmico e na geração da escória (GONÇALVES, 2005). A Figura 2.10 ilustra de forma esquemática uma aciaria LD.

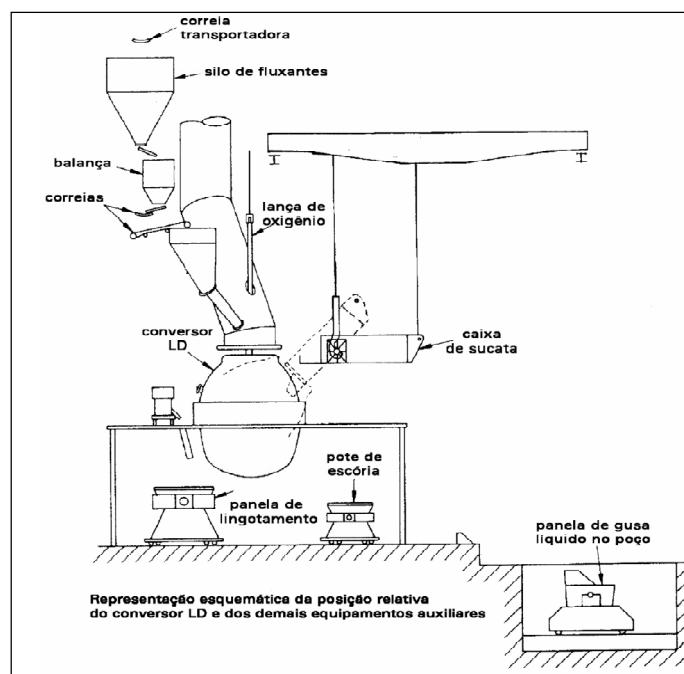


Figura 2.10 – Representação esquemática de uma aciaria LD

2.4.2 Formação da escória

Alguns dos elementos com representativa importância que constituem a carga metálica além do ferro que representa a maior parte são o carbono, o manganês e o silício. Estes elementos sofrem oxidação quando em contato com o oxigênio no momento da injeção. As reações de maior relevância no processo são apresentadas a seguir.



Os fatores que influenciam na velocidade e na duração das reações de oxidação desses elementos são a quantidade de cada composto presente na carga metálica, da taxa de penetração do jato de oxigênio no banho metálico, da temperatura e da escória já formada.

A incorporação dos óxidos CaO e MgO constitui uma etapa de grande importância na geração da escória, resultando na alteração das atividades dos compostos SiO₂, FeO e MnO com a redução na atividade da sílica facilitando a oxidação do silício em maior quantidade e aumento das atividades do MnO e FeO atribuindo a ela características que viabilizam seu retorno ao banho metálico (GONÇALVES, 2005).

Para se obter um domínio da composição química da escória, mesmo que não em sua totalidade devido a alguns fatores que fogem ao controle do aciaria, é essencial que se tenha conhecimento do mecanismo de oxidação do silício, manganês e ferro, o mecanismo de dissolução da cal e da evolução de sua composição química.

A cal é um componente de suma importância na fabricação do aço, já que sua presença tem como principais funções o retardo e diminuição da oxidação de elementos da liga cuja oxidação geralmente forma óxidos básicos, a criação de condições para eliminação de impurezas tais como fósforo e enxofre, e retardar e diminuir o ataque aos refratários (principalmente o MgO) pela escória.

É importante que a cal seja incorporada o mais rapidamente para que se tenha um alto nível de basicidade durante o maior tempo possível no decorrer do processo. Como o tempo de refino no processo LD é mais curto em relação aos demais, a dissolução rápida da cal torna-se essencial. A dissolução da cal tem maior influência na viscosidade da escória quanto maior for a presença da CaO em sua composição, atuando de forma a aumentá-la. Por outro lado a viscosidade tem valor menor quanto maior for o teor de FeO, o que proporciona também maior velocidade de dissolução da cal.

A variação de temperatura também pode condicionar a dissolução da cal, uma vez que seu aumento pode propiciar acontecimentos indesejados como o recozimento do grão, aumentando seu tamanho e consequentemente dificultando sua dissolução. No entanto, este mesmo aumento pode fazer com que a viscosidade da escória seja diminuída, fator considerado benéfico. A agitação do banho intervém de maneira a diminuir a camada limite e manter a cal em contato com a escória sempre renovada melhorando assim sua dissolução (CAMPOS, 1980).

O refino pelo processo LD se dá inicialmente pela inclinação do conversor para carregamento com sucata sólida, ao término de inserção da carga ele é verticalizado para acomodação da mesma. O procedimento se repete para o carregamento do gusa líquido e, quando estacionado novamente na posição vertical são introduzidas as lanças para injeção do oxigênio. Após a injeção, o conversor é inclinado de forma que possibilite a realização de amostragem para análise. A cal é adicionada por meio do uso de um silo ao término da fusão. A Figura 2.11 ilustra o detalhe do conversor a oxigênio em posição de sopro, e a Figura 2.12 demonstra como ocorre a sequência de operação em um conversor LD.

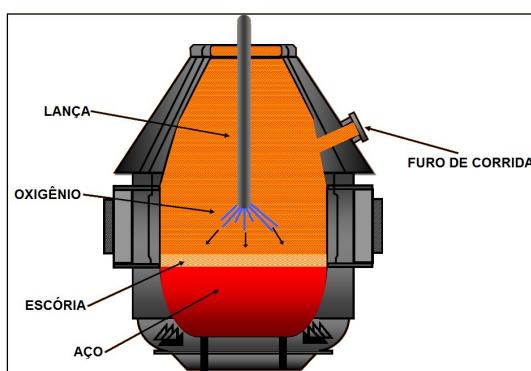


Figura 2.11– Detalhe do conversor a oxigênio

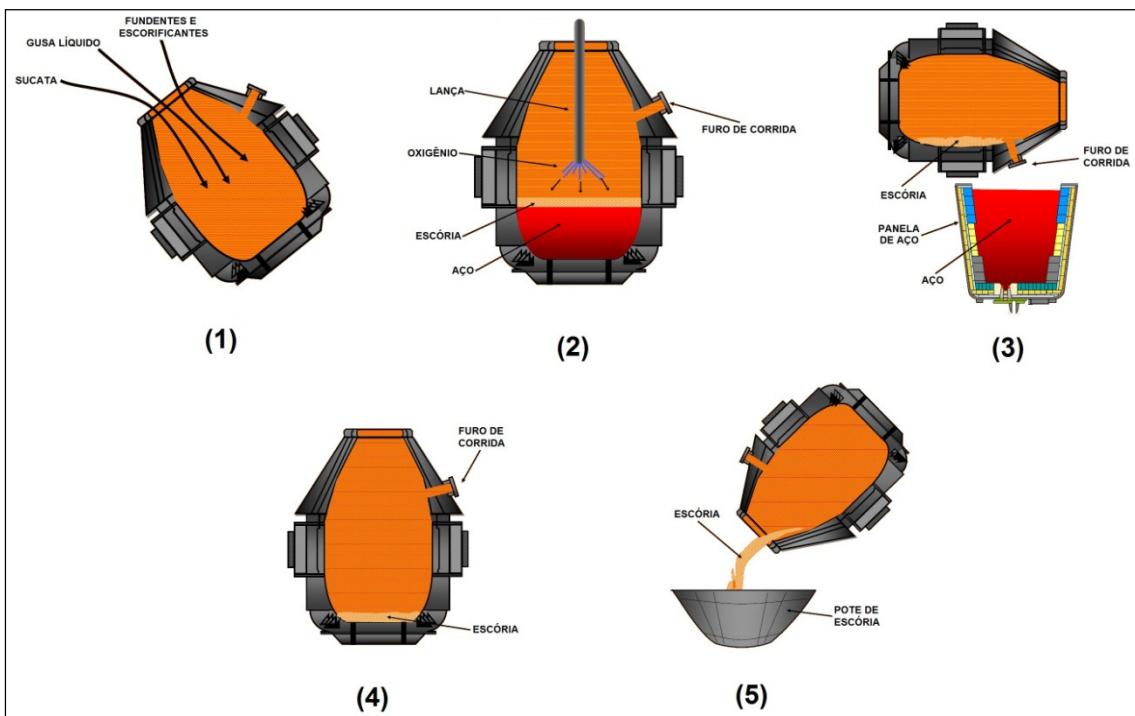


Figura 2.12 – Sequência de operação do conversor LD onde: (1) carregamento do conversor; (2) sopro de oxigênio; (3) basculamento do aço; (4) escória remanescente no fundo do conversor, e; (5) basculamento da escória

Em função da diferença de densidade entre os materiais, a escória permanece sobrenadante ao aço após o término do processo. O bico conversor conduz o aço a uma panela, logo em seguida, a escória é vazada em um pote e transportada até um pátio onde é resfriada (GUMIERI, 2002).

O resfriamento da escória é feito por meio do jateamento de água direcionado às valas ou leitos de deposição com dimensões variando de 12 a 15 metros de largura e 4 a 5 metros de altura (SOUZA, 2007).

As escórias, quando resfriadas, sofrem solidificação e adquirem forma cristalina, a partir daí, são transportadas até a planta de britagem onde são separadas por correias rolantes em três faixas granulométricas distintas: escória in natura de 0 a 19 mm e de 19 a 32 mm além da escória que pode ser aplicada como lastro ferroviário, que se enquadra em uma faixa superior aos 32 mm. No momento da separação, as escórias passam por um eletroímã para recuperação da fração metálica, denominada “sucata de retorno” ou “sucata recuperada”, para que estas possam retornar ao processo de produção do aço.

Para sua aplicação nas mais diversas áreas da engenharia e demais segmentos, as escórias, em geral passam por um processo de cura para que seja reduzido o efeito da expansão até um nível que a torne apta ao uso (SILVA et al., 2000; NASCIMENTO, 2003; PENA, 2004; POLISSENI, 2005; SOUSA, 2007).

2.4.3 Expansibilidade da escória

Um dos grandes inconvenientes à aplicação da escória aos mais variados fins de interesse da engenharia e demais segmentos que lhe permitem o uso, é a instabilidade volumétrica, que se da pelo aumento de volume seguido da quebra excessiva dos grãos, fato que acarreta a perda de suas características de resistência do material.

A expansão tem relação direta com o tipo, a quantidade e a dimensão dos grãos dos elementos presentes na composição química das escórias (POLISSENI, 2005). Tal fenômeno ocorre principalmente pela hidratação do óxido de cálcio livre e do óxido de magnésio não reagido, mas pode também estar ligada ao polimorfismo do silicato dicálcico (C_2S) e a oxidação do ferro metálico residual (GUMIERI, 2002).

2.4.3.1 Expansão devido ao óxido de cálcio livre

Em diferentes tipos de escória o teor de cal livre pode variar entre 1 e 15% e a expansibilidade torna-se maior quanto maior for a quantidade de cal na escória e quanto mais alta for a temperatura (RUBIO e CARRETO, 1991 apud GEYER 2001).

A expansão acontece pela hidratação do óxido de cálcio livre (CaO) transformando-o em hidróxido de cálcio, esta reação, além da variação volumétrica, gera também a desagregação do material. A equação a seguir demonstra como acontece a hidratação do óxido assinalando os índices físicos dos componentes constituintes da reação por abreviaturas subscritas do estado sólido (S) e líquido (L) (ROHDE, 2002).



Segundo estudo realizado por Weast (1971), que apresenta a caracterização das espécies químicas isoladas presentes na escória antes e após a hidratação, há um aumento de

volume da ordem de 99% após o óxido de cálcio livre ter reagido com a água. Machado (2000) explica que a desagregação do material acontece em função das tensões criadas pela diferença de volume molar.

Ainda segundo Machado (2000) o teor de cal livre pode ser quantificado por meio de técnicas como termogravimetria (TG), termogravimetria derivada (DTG), difração por raios X ou dissolução em etilenoglicol.

2.4.3.2 Expansão devido ao óxido de magnésio

Rohde (2002) explica que o teor de magnésio pode representar até 10% da composição da escória de aciaria sendo que este pode se apresentar na forma livre, como periclásio (MgO), susceptível a expansão, ou até mesmo combinado quimicamente em uma solução sólida junto a outros componentes tendo comportamento estável como característica recorrente.

A equação a seguir apresenta a reação de hidratação do óxido de magnésio livre, que acontece em função da migração de água pela estrutura porosa da escória gerando o hidróxido de magnésio (POLISSENI, 2005).



De acordo com estudos realizados por Weast (1971), o óxido de magnésio, quando hidratado apresenta aumento de volume dos cristais em 119,54%, gerando como consequência, a expansão da escória, tendo, portanto, influência direta no comportamento instável do material quanto ao volume.

Estima-se com base em estudos feitos na escória pelo processo LD, que o magnésio livre se origina essencialmente pelo processo incompleto de dissolução do dolomito no decorrer do refino. Pesquisadores sugerem como forma de minimizar o problema, que o dolomito seja adicionado ao se iniciar o processo de fabricação do aço e que o grão tenha menor dimensão possível para que a dissolução e a reação completa desse óxido sejam facilitadas (MONTGMERY e WANG, 1991 apud MACHADO, 2000).

Machado (2000) cita as técnicas de difração por raios x, análise termogravimétrica (TG) e termogravimétrica derivada (DTG) como meios para determinação da presença do magnésio nas escórias de aciaria.

2.4.3.3 Expansão devido ao óxido de ferro metálico

Após a separação magnética, pequenas partículas metálicas se tornam presentes no decorrer da injeção de oxigênio ou, durante o vazamento permanecem presentes na escória de aciaria LD. Estas partículas fazem com que a escória adquira um elevado teor de ferro, normalmente encontrado como Wustita, que se converte em partículas de maior volume quando submetida ao processo de oxidação (CRUZ et al., 1999 apud GUMIERI, 2002).

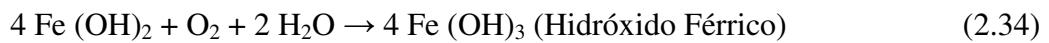
Weast (1971) mostra em seus estudos que as transformações volumétricas da escória pela diferença de volume molar em decorrência da oxidação e corrosão do ferro metálico (Fe^0), podem levá-lo a uma expansão com valores oscilando entre 77% e 329% em relação ao seu volume inicial.

Machado (2000) explica que após os processos de oxidação e corrosão do ferro metálico (Fe^0), inicialmente pode aparecer sob a forma de íons Fe^{+2} e Fe^{+3} e apresenta as principais reações ocorridas em cada processo como descrito nas equações a seguir:

Reações de Oxidação



Reações de corrosão



Na composição da escória de aciaria encontra-se óxido de ferro em quantidades elevadas. Podemos tomar como exemplo a corrosão do ferro metálico, que pode levar uma barra de aço a se desintegrar. Tal fato ocorre em decorrência da expansão do cristal formado neste processo que pode chegar a percentual igual 600% em relação ao seu volume inicial. A analogia deste fenômeno é totalmente cabível quando se avalia a corrosão da fração metálica contida na escória de aciaria (POLISSENI, 2005).

2.4.3.4 Expansão pela transformação alotrópica do silicato dicálcico

O silicato dicálcico (2CaO SiO_2 ou C_2S) possui quatro fases polimorfas sendo elas α , α' , b e γ . As transformações que ocorrem no resfriamento têm a seguinte ordem: $\alpha \rightarrow \alpha' \rightarrow b \rightarrow \gamma$, no decorrer do aquecimento tem-se $\gamma \rightarrow \alpha' \rightarrow \alpha$. Este elemento entra em processo de fusão ao atingir a temperatura de 2310° (GUMIERI, 2002).

Quando se encontra sob a forma de α , o C_2S apresenta estrutura trigonal e se estabiliza ao atingir temperaturas entre 2130°C e 1447°, sob a forma α' (Bredigita), o C_2S possui sistema cristalino ortorrômbico e se torna estável entre 1147°C e 830°, sob a forma b (Larnita), tem sistema cristalino monoclinico e se torna instável em temperaturas abaixo de 670°C e sob a forma γ (Calco-Olivina), é constituído por estrutura ortorrômbica e se torna estável em temperaturas até 830°C.

Segundo Masuero et al. (2000) a forma a acontece quando as escórias encontram-se em estado líquido com temperaturas acima de 1420°C. Ao sofrer queda de temperatura até se chegar a 670°C o C_2S adquiri forma b que é instável e posteriormente transforma-se em γ . Ao se transformar da forma b para γ , que acontece por meio do resfriamento ou ate mesmo a temperaturas ambientes, ocorre o aparecimento de manchas brancas na escória, e se o silicato estiver presente em grandes quantidades, este irá gerar uma expansão volumétrica da ordem de 12% podendo ocorrer a desagregação ou ate mesmo a desintegração da massa sólida. Esta expansão se justifica pela diferença de volume molar entre o $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ e $b\text{-C}_2\text{S}$.

Gumieri (2002) explica que os fatores condicionantes da estabilidade do silicato dicálcico são a taxa de resfriamento e a presença de outras substâncias em estado de

soluções sólidas, para que se torne estável e adquira propriedades hidráulicas, o resfriamento deve acontecer de maneira rápida.

Após estudos dos fatores que condicionam a expansão das escórias, observa-se que este fenômeno acontece basicamente em função da hidratação do óxido de cálcio livre e do óxido de magnésio reativo. A expansão condicionada pela corrosão e oxidação do óxido de ferro metálico e das transformações alotrópicas do silicato dicálcico que ocorrem durante o resfriamento lento das escórias são menos expressivas. A combinação destes processos pode fazer com que as escórias tenham uma expansão de até 14% em relação ao seu volume inicial (MACHADO, 2000).

O estudo dos elementos presentes na escória e entendimento da forma como se processam as reações que provocam sua expansão são de suma importância para o desenvolvimento de metodologias de estabilização para que este não se torne um empecilho à sua aplicação.

2.4.4 Parâmetros que condicionam a expansão

Como já mencionados, os elementos químicos de maior influência na expansão das escórias de aciaria são o CaO e o MgO que se transformam por hidratação, o Fe^o que reage por meio da oxidação e o C₂S pelo mecanismo de transformação alotrópica. Todos estes elementos estão sujeitos a fatores que condicionam a expansão.

Segundo Machado (2000), a Cal livre (CaO) e o MgO têm sua estabilização condicionada pelo teor destes elementos presentes na escória, tempo de estocagem do material, pela umidade, temperatura, teor de CO₂ do ambiente e pelo tamanho dos grãos da escória.

O tempo de envelhecimento que consiste no período de estocagem do material disposto em pilhas e sujeito a ação da umidade ambiente, é o principal fator que influencia na estabilização do CaO e do MgO reativos. A presença de água é essencial no processo, pois, sua ausência no ambiente onde o material permanecerá exposto impedirá a formação de produtos hidratados, não ocorrendo a estabilização.

Para se obter maior eficácia no processo de cura, Machado (2000) sugere a redução da granulometria do material para aumentar a superfície de contato do grão de escória com a água, acelerando as reações de hidratação e o aumento do teor de umidade do meio até a saturação.

Estudos realizados por Gupta et al. (1994 apud MACHADO, 2000), demonstram a não uniformidade da ação da umidade e do CO₂ na pilha de escória para estoque. A ação destes elementos tem maior intensidade na camada superficial da pilha, tendo, como consequência, o aumento do teor de cal livre associado ao aumento da profundidade da pilha, não permitindo que toda ela seja curada durante o período de estocagem.

Ainda segundo Machado (2000), ao se tratar das reações do ferro metálico que culminam na expansão da escória, temos como principais fatores que condicionam a ocorrência da oxidação e da corrosão, o tempo de exposição ao ar, o teor de oxigênio no resfriamento e o tamanho dos grãos da material.

O oxigênio do ar em contato com o ferro metálico presente na escória leva a sua expansão pela mudança do estado de oxidação de +2(Fe++) para o estado +3. Já a umidade ambiente, ao reagir com o ferro metálico, faz com que ocorra a expansão da escória por gerar produtos de corrosão, podendo ser o hidróxido ferroso [Fe(OH)₂] ou o hidróxido férrico [Fe(OH)₃].

Desta forma, para que seja mantido o controle da expansão do ferro metálico, torna-se necessária a avaliação do ambiente ao qual a escória permanecerá exposta.

Para controle da expansão ocasionada pelas transformações alotrópicas do silicato dicálcico (C₂S), torna-se necessário impedir a formação da fase γ uma vez que esta apresenta expansão na solidificação. Entre os principais fatores que impedem a geração da forma alotrópica γ estão a velocidade de resfriamento da escória e a adição de outras espécies químicas em paralelo a este processo.

Com relação ao resfriamento, este deve ser feito de forma rápida para que a completa formação do C₂S não ocorra, tal fato impede a nucleação dos cristais o que dificulta a formação da fase γ .

Para estabilização da forma β -C₂S, processo este que também impede o surgimento da forma alotrópica γ , podem ser adicionados os íons Al³⁺, Ba²⁺, P⁵⁺, B³⁺, Mo⁴⁺ e até mesmo o Fe³⁺ que funcionam como estabilizadores da estrutura cristalina do silicato dicálcico (MACHADO, 2000).

2.4.5 Principais aplicações da escória de aciaria

A indústria siderúrgica é constituída de processos que, para sua realização, demandam usos em elevadas quantidades de energia, água e materiais. Segundo a CNI (2012), para cada tonelada de aço produzido, são gerados aproximadamente 600kg de coprodutos, que antigamente eram classificados como resíduos, pois se grande potencial de utilização era desconhecido.

Caso não houvesse o reaproveitamento desses materiais, é provável que seu acúmulo tornasse a produção do aço inviável em decorrência de fatores econômicos e ambientais. Seu gerenciamento e processamento de forma adequada viabilizam sua inserção na cadeia produtiva sendo considerados como materiais alternativos de importante valor econômico. Tal fato permite que os resíduos sólidos obtenham a classificação de coprodutos da produção do aço (ABM, 2008).

Ainda segundo a ABM (2008), a utilização em larga escala das escórias geradas pelo processo siderúrgico, vem sendo feita desde o início do século XX, desempenhando importante papel econômico pela geração de receitas e servindo como matéria prima, podendo ser destinada a uma abrangente e diversificada gama de aplicações tais como a fabricação do cimento, lastro ferroviário, base e sub-base rodoviária, fertilizantes e corretivos de solo.

O fato de possuir propriedades hidráulicas mais pobres quando comparado à escória granulada de alto – forno faz com que a escória de aciaria seja utilizada em pequenas

quantidades na produção de cimento. Pode ser usada como matéria prima para produção clínquer na indústria do cimento, por possuir, quando expressa em óxidos, uma composição semelhante à encontrada no cimento Portland, o que permite temperatura de queima mais baixa, redução do consumo de energia, redução do uso de matérias primas naturais e da emissão de CO₂. A falta de tecnologia desenvolvida para este fim torna a utilização ainda pouco explorada e ainda há dificuldades relacionadas ao uso da escória de aciaria em virtude da variação de sua composição química e do seu baixo controle de qualidade (ROHDE, 2002).

A autora cita ainda que a utilização da escória de aciaria na produção de clínquer está condicionada a redução da quantidade de ferro metálico existente e ao ajuste da composição química, a basicidade representada pela relação CaO/SiO₂ e a dissolução do MgO, de forma que o teor de cal livre presente na forma de periclásio não exceda o limite de 5% imposto para este fim.

A escória de aciaria pode ser utilizada como agregado na produção do concreto, Masuero *et al* (2000), obtiveram como resultado da adição de 20% de escória de aciaria no concreto, resistências a compressão e tração superiores em relação ao concreto sem a presença da mesma. Outro fator de relevância é a diminuição do consumo cimento quando se adiciona escoria ao concreto. Castelo Branco (2004) menciona a alta resistência a compressão e resistência a abrasão como sendo características que tornam viável a aplicação da escória, no entanto, a autora alerta para o alto potencial de desintegração do material.

Castelo Branco (2004) cita a escória de aciaria como tendo potencial para assumir a função de material que compõe o lastro ferroviário em função de sua elevada massa específica. Para tanto, se torna necessário que o material tenha como característica baixa condutividade, para assegurar a não formação de fagulhas quando em situações onde ocorre transporte de cargas inflamáveis.

Ainda quanto a aplicação como lastro de ferrovias, Sousa (2007) desenvolveu um trabalho o qual objetivou o estabelecimento do procedimento para melhoria do desempenho operacional da via férrea, atuando de maneira a reduzir a ocorrência de paralisações no tráfego ferroviário, principalmente nos períodos chuvosos, em

decorrência da condução de eletricidade através das escórias de aciaria utilizadas como lastro. No entanto, foi observado em seu estudo, que a escória analisada apresentou teores elevados de óxido de cálcio (CaO) e ferro (FeO), não atendendo aos limites proposto pela AREMA (2002); resistividades elétricas muito menores que as da brita de gnaisse, material convencionalmente utilizado como lastro, fato atribuído ao óxido de cálcio livre presente em sua composição. Foi observado também que o teor de ferro encontrado, apesar de proporcionar uma elevada resistência, a abrasão e ao choque, aumenta o desgaste mecânico e reduz a vida útil dos equipamentos de manutenção. O autor recomenda que para minimizar a ocorrência destes inconvenientes a aplicação da escória, a mesma deveria estar devidamente curada no momento de sua utilização.

Neste sentido, Fernandes (2010) vem elaborar um trabalho no qual é desenvolvida uma metodologia de adequação química, mecânica e ambiental da escória de aciaria LD, objetivando sua aplicação como lastro de ferrovias sinalizadas, adequando as conformidades referentes às normas. Tal metodologia buscou também minimizar a condutividade elétrica da escória a fim de evitar as paralisações do tráfego ferroviário. Os resultados apresentados ao fim dos estudos foram satisfatórios, uma vez que reduziu o teor de cal livre levando-o a limites bem inferiores ao valor máximo de 3% fixado pela AREMA. A metodologia adotada foi suficientemente capaz de reduzir a condutividade a níveis inferiores ao da água potável, tornando a escória apta a ser aplicada como lastro de ferrovias.

Silva (2010) aponta o uso da escória de aciaria como matéria prima para pavimentação como sendo viável técnica e economicamente por beneficiar o meio ambiente com a redução do passivo ambiental gerado pela estocagem deste material nas siderúrgicas e por reduzir a demanda por jazidas de materiais naturais convencionalmente utilizados para este fim, tais como rochas britadas, areia e cascalho.

Na pavimentação a escória compete com materiais como areia e a brita principalmente, tendo a dureza que proporciona elevada resistência ao esmagamento, a durabilidade que permite sua utilização por longos períodos demandando a mínima manutenção, e a drenagem livre como atributos que a tornam apta a este fim (ROHDE, 2002).

Desde que a condição de não apresentar variação volumétrica esteja garantida, a aplicação da escória de aciaria pode ser feita nas diversas camadas do pavimento, abrangendo desde o reforço do subleito até o revestimento betuminoso, substituindo os materiais pétreos (CERJAN-STEFANOVIĆ *et al*, 1997 *apud* ROHDE, 2002). A escória é um material que pode atender a todas as faixas granulométricas além de possuir características como valores elevados de CBR, baixo desgaste por abrasão, boa adesividade para emulsões e CAPs, além de como anteriormente mencionado, elevado potencial hidráulico.

No entanto, de acordo com a autora, a utilização da escória de aciaria não é recomendada quando próxima a águas paradas como poços, lagos e terrenos alagadiços, por apresentar alcalinidade e pH podendo atingir valores entre 10 e 14, características estas que propiciam a escória elevado potencial de influência no ambiente ao seu redor.

Machado (2000) explica que a escória de aciaria pode ser aplicada como agregado pétreo ou aditivo na estabilização de solos, atuando de maneira a promover o aumento da resistência dos mesmos. O autor cita a elevada rugosidade superficial, o excelente coeficiente de forma, a elevada angulosidade, e a alta resistência ao desgaste como características inerentes a escória que a tornam aptas a serem utilizadas com a finalidade de estabilizar solos.

Outra possível aplicação da escória de aciaria é como fertilizantes ou aditivos no cultivo de plantas ou algas em função de seus elevados teores de CaO e P₂O₅. Dziarmogowski *et al* (1992 *apud* MACHADO, 2000) explica que muitas vezes, em atendimento as exigências para fabricação de fertilizantes tipo Ca-Mg, a composição química da escória deve passar por um ajuste, pois a quantidade de CaO deve ser maior que 45%, 5% de carbono e deve também possuir FeO, Fe₂O₃, MnO e óxidos de cromo em baixa concentração. O autor menciona ainda que elementos como P, Si, Fe e Mn, que geralmente estão presentes na composição da escória, como sendo essenciais ao cultivo de algas.

O uso da escória de aciaria na drenagem de ácidos se dá devido às suas altas taxas de alcalinidade que são capazes de neutralizar os mesmos. A escória não absorve CO₂ e reconverte em calcita insolúvel, tal fato torna possível a manutenção das taxas de

alcalinidade durante anos a céu aberto. Seu pH, em função da presença em quantidades elevadas de CaO, MgO e SiO₂, tem valor próximo de 10, possui alta permeabilidade em decorrência de seu aspecto poroso , permitindo a passagem de água e por consequência, facilitando a drenagem dos ácidos (CASTELO BRANCO, 2004).

Capítulo 3

3. METODOLOGIA E MATERIAIS

3.1 INTRODUÇÃO

As etapas de pesquisa e campanha de ensaios laboratoriais que constam no presente trabalho foram desenvolvidas no Laboratório de Ferrovias e Asfalto da Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, os experimentos de campo foram executados em um pátio de estocagem de escória situado em uma em uma empresa siderúrgica de grande porte situada no estado do Espírito Santo e na estação ferroviário de Mário Carvalho no município de Timóteo – MG.

A partir de estudos bibliográficos, foi estabelecido um método que tem como objetivo estabilizar quimicamente o coproduto siderúrgico, desde que sejam obedecidos os procedimentos por ele definidos durante sua aplicação. A estabilização química ou cura consiste na hidratação do óxido de cálcio livre e demais óxidos presentes na constituição da escória aciaria e que proporcionam algum inconveniente ao seu desempenho quando aplicada, de forma a reduzi-los a níveis compatíveis aos limites normativos existentes.

Para obtenção de uma metodologia que atenda aos objetivos propostos, foram realizados ensaios laboratoriais no intuito de determinar o tempo e a velocidade de percolação da água nos grãos e na pilha do coproduto bem como o período levado pela água aspergida para infiltrar e hidratar os óxidos instáveis presentes na escória de aciaria.

A princípio foi estudada a forma como se processava a reação entre as espécies químicas no coproduto pulverizado. Para se conhecer o processo de hidratação, foram realizados ensaios com a fração de material passante na peneira #200 de forma que o mesmo estivesse sujeito à incidência de água em quantidades distintas.

Os dados fornecidos pelos estudos indicaram uma velocidade de percolação da água de aproximadamente 0,095m/s, desta maneira, para incidir por toda uma pilha de altura

igual a 2,0 metros seria necessário um período de 21 segundos. O tempo gasto pela água aspergida para infiltrar no grão da escória e hidratar os óxidos instáveis presentes em sua constituição foi estimado em cerca de 6 horas considerando para isto, uma velocidade de 0,17mm/s.

A criteriosa avaliação das informações obtidas possibilitou a elaboração de um método de aspersão de água em função do tempo adequado para redução do teor dos óxidos, principalmente os de cálcio e magnésio, a quantidades aceitáveis à aplicação do coproduto. Desta forma, para uma pilha com altura igual a 2,0 metros seriam necessários períodos de hidratação de 10 minutos com intervalos de 30 minutos até que se inicie um novo processo.

Através das referências e devidas análises, fundamentou-se a chamada Metodologia de Referência Técnica a ser testada em pátio siderúrgico.

3.2 MATERIAIS ESTUDADOS E PROCEDIMENTOS ADOTADOS

As amostras utilizadas na pesquisa são escórias de aciaria geradas pelo processo LD. Antes de ser utilizado no experimento, o material passou por um processo de resfriamento e cristalização, depois de separação granulométrica e só então seguiu para o pátio de estocagem, de onde foi retirado para ser utilizado na montagem da pilha experimental.

De posse da metodologia definida e dos materiais a serem avaliados durante a pesquisa, foi feito o estudo dos efeitos da aplicação do processo de estabilização química das escórias de aciaria no intuito de torná-las aptas a serem aplicadas como lastro de vias férreas. O trabalho foi realizado em quatro etapas paralelamente sendo duas de campo e duas de laboratório.

As etapas de campo são constituídas primeiramente da montagem do sistema de cura definido mediante as pesquisas realizadas no pátio de estocagem de escória em uma siderúrgica de grande porte. A segunda etapa consiste na montagem de um simulador resistividade elétrica para lastro ferroviário na estação ferroviária de Mário Carvalho, em Timóteo – MG.

As etapas de laboratório abrangem a realização de ensaios para caracterização química, mineralógica, física, mecânica e ambiental da escória e também a construção de um simulador de condutividade elétrica utilizado para realização dos ensaios dos quais foram obtidos resultados que serviram como parâmetro comparativo com os resultados obtidos nos ensaios em campo pelo simulador de resistividade.

O fluxograma do projeto representado na Figura 3.1 ilustra as etapas do trabalho realizado.

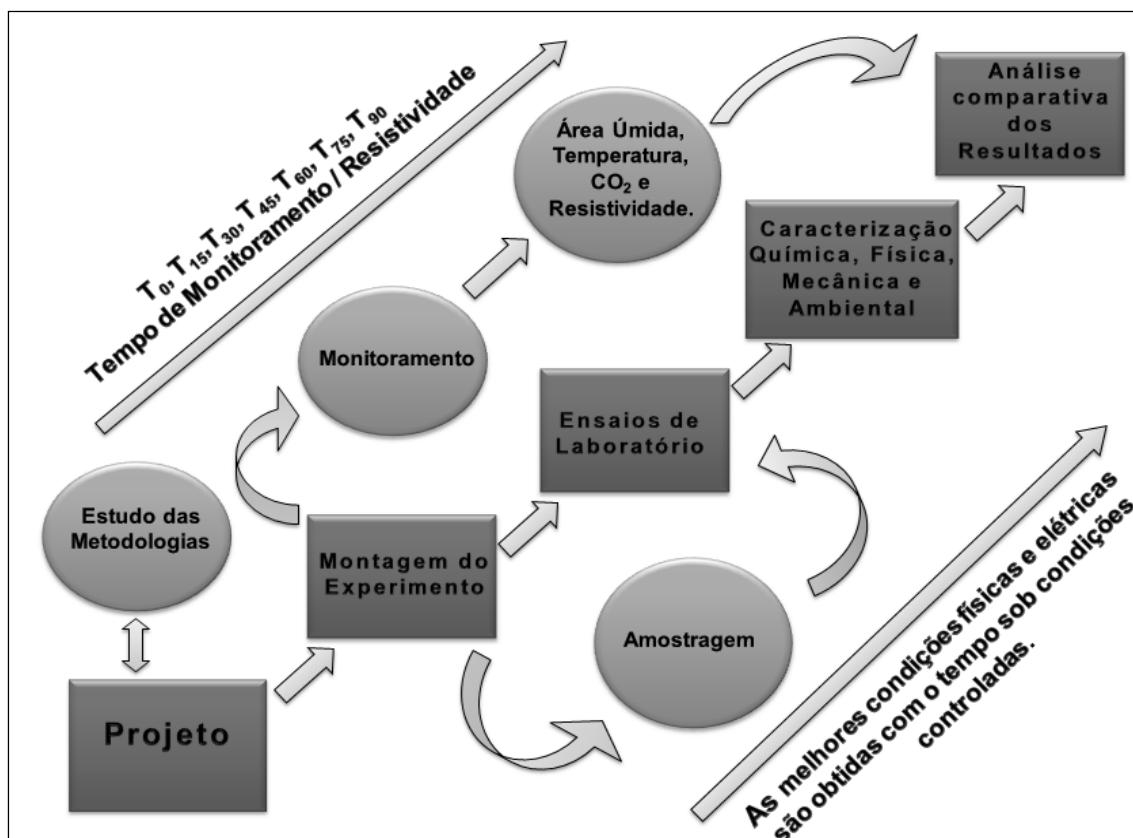


Figura 3.1– Fluxograma das atividades desenvolvidas no projeto

3.3 ETAPAS DE CAMPO

3.3.1 Sistema de cura – Metodologia de Referência Técnica

É objetivo do presente trabalho o estudo e elaboração de uma metodologia de cura para escórias de aciaria de forma que o sistema idealizado durante a pesquisa fosse montado e monitorado em campo de onde seriam coletadas amostras que passariam por uma bateria de ensaios para atestar sua eficiência, ou seja, verificar se o teor de cal livre seria

reduzido a um percentual adequado ao seu uso e qual seria o tempo necessário para que o processo surtisse o efeito desejado. Desta forma, foi estudado e montado em pátio siderúrgico sistema baseado na Metodologia de Referência Técnica.

A metodologia de cura para escórias de aciaria adotada pela Referência Técnica consiste na montagem de uma pilha em formato de cone com diâmetro da base igual a 6,0 metros, altura igual a 2,0 metros, ângulo de espraiamento igual $33,66^\circ$ e área lateral de $34,0\text{m}^2$ esta configuração totaliza um volume de $18,84\text{m}^3$. Considerando-se a densidade real dos grãos de escória com valor de $3,39\text{g/cm}^3$ a pilha terá massa aproximada de 64 toneladas (Figura 3.2).



Figura 3.2 – Aspecto final da Metodologia de Referência Técnica

Seu sistema de molhamento é feito através de uma mangueira de alta pressão, ligada em uma bomba d'água em uma de suas extremidades e a um bico aspersor com leque de banho de 120° em outra, sendo que a mangueira é sustentada por um pórtico que mantém o bico distanciado de um metro da parte superior do centro da pilha com o objetivo de realizar o molhamento por completo. A aspersão de água ocorre durante um período de dez minutos com intervalos de trinta minutos entre cada molhamento, funcionando durante todo o dia de maneira ininterrupta.

O tempo de aspersão definido foi aquele que, durante a fase de estudos e experimentos, demonstrou-se suficientemente capaz de hidratar o coproduto de maneira gradual, evitando a quebra dos grãos durante o processo de cura.

Quando submetida ao contato com a água sem o devido controle, especificamente quando se trata de quantidades superiores à utilizada no experimento, as reações de hidratação provocam uma excessiva liberação de calor, levando a temperaturas capazes de provocar o derretimento de material no interior do grão e consequente fechamento dos poros.

Esse fenômeno ocorre quando ainda não se deu a hidratação completa da escória, criando uma camada isolante entre as partes hidratada e não hidratada do grão. Na porção hidratada, as reações que provocam a liberação de calor continuam a ocorrer, gerando um gradiente de tensão interno que, estruturalmente, o material não é capaz de absorver, levando-o à fragmentação.

O intervalo entre cada molhamento foi dimensionado em função da temperatura do local onde foi realizado o experimento, sendo suficiente para iniciar o processo de perda da umidade superficial do grão, indicando que a escória já estaria em condições de ser submetida a um novo período de aspersão.

3.3.2 Montagem do experimento

O pátio siderúrgico onde se realizou a montagem do experimento foi determinado em função de oferecer a estrutura necessária para o correto funcionamento do sistema de cura proposto. Além de possuir uma casa de força em alvenaria que ofereceria toda segurança necessária para abrigar os equipamentos necessários a montagem, serviria também como ponto de captação da energia para atender a demanda das instalações elétricas necessárias ao funcionamento do sistema (Figura 3.3).



Figura 3.3– Local de montagem do experimento

O suprimento de água foi cedido pela empresa que ofereceu apoio ao experimento assegurando a instalação de uma caixa d’água de 15000 litros, responsabilizando-se também por abastecê-la duas vezes ao dia além de efetuar a troca da mangueira de alta pressão caso fosse necessário.

Foi montado um pórtico com estrutura em aço de altura igual a 3,0m e braço de comprimento igual a 4,0m. A sustentação do pórtico foi feita por uma espessa base concreto, suficiente para mantê-lo estável no decorrer do experimento. Sua função é sustentar a mangueira de alta pressão e manter seu correto posicionamento em relação à pilha.

O processo de montagem do experimento se deu inicialmente pela locação da pilha, obedecendo às dimensões de base fixadas durante a elaboração da metodologia. Tomou-se a atenção necessária para se definir uma menor distância possível entre a pilha e a casa de força, uma vez que a conexão entre os sensores posicionados no interior da pilha e a central de armazenamento de dados, abrigada pela casa de força, é feita por fios e, o menor número de emendas atuará de maneira a minimizar possíveis inconvenientes associados a mal contatos e rompimentos.

Após a definição do local onde seria posicionada a pilha, foi feita a separação dos fios e dos sensores que seriam ligados a eles. Os sensores foram separados em dois conjuntos, cada um deles constituído por um sensor de molhamento foliar e outro de temperatura, ligados através dos fios a central de armazenamento de dados denominada “Data Logger”. Feita a ligação, identificou-se cada sensor bem como o fio a ele conectado para se fazer a correta interpretação no momento da leitura dos dados. Como o peso do material constituinte da pilha poderia danificar os componentes que auxiliam na coleta de dados, foi feita a proteção da fiação por meio de conduítes e dos sensores por meio da utilização de uma malha de aço onde os mesmos foram fixados (Figura 3.4).



Figura 3.4– Detalhe dos conduítes de proteção dos fios e “casulos” para proteção dos sensores

Terminada a ligação dos componentes de coleta de dados, foi posicionado o pórtico, ao qual foi fixada a mangueira de alta pressão por meio de braçadeiras. A mangueira foi ligada em uma de suas extremidades a bomba situada no interior da casa de força, que induziria o fluxo da água até a pilha, e a outra seria acoplado um bico aspersor responsável pela execução do molhamento em conformidade com as premissas definidas pela metodologia (Figura 3.5).



Figura 3.5– Mangueira fixada ao pórtico e ligada a bomba no interior da casa de força

A escória com a qual seria montada a pilha foi levada até a área do experimento através de um caminhão cedido pela empresa e com auxílio de uma retroescavadeira foi iniciada a montagem. No momento da montagem foi feito também o posicionamento dos sensores.

Inicialmente foi disposta uma camada de aproximadamente dez centímetros de material dentro da área de base da pilha delimitada no momento da locação, sobre esta camada, no centro da área por ela abrangida, foi posicionado o primeiro par de sensores já devidamente protegidos. Em seguida foi sendo colocado mais material até o posicionamento do segundo par de sensores no centro geométrico da pilha. Por fim, foi terminada a montagem da pilha, com a disposição do restante do material, cobrindo o segundo par de sensores, até que a mesma adquirisse a conformação geométrica definida pela metodologia. A Figura 3.6 ilustra as etapas de montagem da pilha.



Figura 3.6– Posicionamento dos sensores e término de construção da pilha

Com a montagem da pilha instrumentada e dos componentes responsáveis pela aspersão, foi fixado no interior da casa de força, um painel para abrigar a central de armazenamento de dados (Data Logger) e, sobre ela, posicionados um pluviômetro e um painel solar. Foi preciso acoplar ao sistema, dispositivos para fornecer a energia necessária ao seu funcionamento, desta forma, a bomba foi ligada a um gerador e a Data Logger ao painel que captaria a energia solar. Tais procedimentos encontram-se ilustrados na Figura 3.7.



Figura 3.7– Bomba ligada ao gerador, Data Logger ligada e fixada ao painel, pluviômetro e painel solar posicionados sobre a casa de força

Para finalizar a montagem do sistema, a caixa d’água foi posicionada ao lado da casa de força e abastecida por um caminhão pipa cedido pela empresa responsável. A ligação da bomba a caixa d’água foi feita também por uma mangueira de alta pressão com um filtro na extremidade, que ficaria em contato com a água para evitar a passagem de impurezas que poderiam levar ao mau funcionamento do sistema. Desta forma a bomba pôde ser ligada e a aspersão iniciada. A Figura 3.8 ilustra as etapas supracitadas.



Figura 3.8– Posicionamento da caixa d’água, filtro na extremidade da mangueira ligada caixa d’água e detalhe do bico aspersor em funcionamento

3.3.2.1 Coleta de dados e amostras

O monitoramento da pilha é feito por meio da Data Logger, que é um coletor de dados de alta precisão e elevada estabilidade (Figura 3.9). É alimentado por um painel solar e uma bateria, sendo que o painel alimenta a bateria e o coletor de dados durante o dia para que, durante a noite, na ausência de energia solar, o sistema de coleta de dados capte a energia armazenada na bateria no decorrer do dia para se manter operante.



Figura 3.9– Modelo da Data Logger utilizada no experimento

Os dados fornecidos pela Data Logger são: voltagem da bateria a ela ligada; sua temperatura interna durante o funcionamento; precipitação causada pela chuva; molhamento e temperatura da pilha de escória. Os três últimos dados citados são coletados respectivamente por um pluviômetro situado na parte superior da casa de

força, sensores de molhamento foliar e temperatura distribuídos nas pilhas em pares como citado anteriormente.

A Data Logger armazena os dados permanentemente e os grava a cada quinze minutos, possibilitando assim, um monitoramento detalhado do sistema, indicando se a metodologia adotada esta operando corretamente.

O pluviômetro automático utilizado no experimento é constituído por um sistema simples, eficiente e remoto de coleta de dados de chuva. Composto por um sensor de precipitação tipo báscula construído em plástico ABS, possibilita o monitoramento automático e contínuo do volume pluviométrico disponibilizando dados de máxima, mínima e média intensidade de chuvas no período.

O sensor de molhamento é constituído por uma superfície foliar artificial construída sobre uma placa de circuitos de fibra de vidro. A umidade presente na superfície aumenta a frequência de saída de um oscilador de circuito integrado. As mudanças na frequência do sensor são facilmente contadas pela Data Logger e convertidas e dados para posterior leitura.

O sensor de temperatura é montado em um cabo e encapado por um plástico termoconformado. O cabo é composto de transdutores que produzem uma tensão de saída linearmente proporcional à temperatura presente na ponta do corpo da sonda. Os sensores podem ser facilmente utilizados pela Data Logger ou equipamento de leitura que aceite uma entrada de tensão e a converta em forma de dados a serem coletados. A Figura 3.10 apresenta os modelos dos equipamentos anteriormente descritos.



Figura 3.10 – Modelos do pluviômetro, sensor de molhamento foliar e sensor de temperatura utilizados no experimento

Com auxílio de um computador portátil ligado à Data Logger (Figura 3.11), são coletados os dados através de um software denominado Hyper Terminal, que os decodifica e grava em formato de arquivo de texto para facilitar a visualização e o armazenamento.



Figura 3.11– Computador ligado a Data Logger para coleta de dados

Na Figura 3.12, que mostra de forma representativa os dados coletados pela Data Logger, a coluna “batt” fornece valores da voltagem da bateria, a coluna “t_int” corresponde a temperatura interna da Data Logger em graus Celsius, a coluna “prec_ac” fornece valores relativos à precipitação em mm/cm².

As colunas “temp” fornecem os valores das temperaturas em graus Celsius obtidos através dos sensores de temperatura distribuídos na pilha, as colunas “mfol” fornecem os valores obtidos através dos sensores de molhamento foliar, sendo que, se o valor indicado for 1, indica presença de água no sensor e se o valor indicado for 0 indica que o sensor está seco.

2009/10/09 10:05:50 www.agssolve.com.br AgLogger SN:01401005 ufop.b1 log=15 min bvolt:13.8 degc:30 Logged:1711/14336 (L)og (V)iew (Z)oom (O)ffload (N)ewRun (C)lock (P)arams (F)eed >00							
date-time	batt	t_int	temp_1	temp_2	mfol_1	mfol_2	prec_ac
2009/09/21 14:00:00	13.2	30.5	14.7	26.4	1	1	0.0
2009/09/21 14:15:05	13.2	30.0	12.3	26.3	1	1	0.0
2009/09/21 14:30:02	13.1	30.5	13.2	26.2	1	1	0.0
2009/09/21 14:45:01	13.3	30.5	14.8	25.9	1	1	0.0
2009/09/21 15:00:00	13.6	31.0	16.0	25.9	1	1	0.0
2009/09/21 15:15:05	13.7	31.5	19.1	25.8	1	1	0.0
2009/09/21 15:30:07	13.7	32.5	4.8	25.8	1	1	0.0
2009/09/21 15:45:01	13.7	33.0	10.7	25.7	1	1	0.0
2009/09/21 16:00:00	13.7	32.5	6.0	25.4	1	1	0.0
2009/09/21 16:15:04	13.3	32.0	19.1	25.4	1	1	0.0
2009/09/21 16:30:02	13.0	31.5	19.1	25.4	1	1	0.0
2009/09/21 16:45:00	12.9	31.5	16.4	25.2	1	1	0.0
2009/09/21 17:00:04	12.9	31.5	16.3	25.2	1	1	0.0
2009/09/21 17:15:04	12.8	31.5	16.2	25.2	1	1	0.0
2009/09/21 17:30:03	12.8	31.0	15.4	25.0	1	1	0.0
2009/09/21 17:45:00	12.8	31.0	15.4	24.8	1	1	0.0
2009/09/21 18:00:05	12.8	31.0	14.5	25.0	1	1	0.0
2009/09/21 18:15:00	12.8	30.5	13.9	24.9	1	1	0.0
2009/09/21 18:30:02	12.8	30.5	11.3	24.8	1	1	0.0
2009/09/21 18:45:06	12.8	30.5	11.2	24.8	1	1	0.0
2009/09/21 19:00:00	12.8	30.5	10.0	24.8	1	1	0.0
2009/09/21 19:15:04	12.8	30.0	9.5	24.6	1	1	0.0
2009/09/21 19:30:07	12.8	30.0	9.7	24.6	1	1	0.0
2009/09/21 19:45:01	12.8	30.0	9.3	24.5	1	1	0.0
2009/09/21 20:00:00	12.7	30.0	9.8	24.4	1	1	0.0
2009/09/21 20:15:05	12.7	29.5	7.5	24.5	1	1	0.0
2009/09/21 20:30:02	12.7	29.5	7.3	24.4	1	1	0.0
2009/09/21 20:45:01	12.7	29.5	6.8	24.4	1	1	0.0
2009/09/21 21:00:00	12.7	29.5	6.6	24.4	1	1	0.0
2009/09/21 21:15:00	12.7	29.5	4.7	24.3	1	1	0.0
2009/09/21 21:30:02	12.7	29.5	4.9	24.4	1	1	0.0
2009/09/21 21:45:01	12.7	29.5	5.1	24.3	1	1	0.0
2009/09/21 22:00:00	12.7	29.0	4.5	24.3	1	1	0.0
2009/09/21 22:15:04	12.7	29.0	4.1	24.2	1	1	0.0
2009/09/21 22:30:07	12.7	29.0	3.9	24.2	1	1	0.0
2009/09/21 22:45:01	12.7	29.0	3.0	24.1	1	1	0.0
2009/09/21 23:00:00	12.7	29.0	3.6	24.2	1	1	0.0

Figura 3.12 – Dados coletados pela Data Logger e decodificados pelo software

Além dos dados coletados pela Data Logger, são coletados a cada quinze dias a temperatura interna da pilha no momento da coleta das amostras, por um termômetro nela inserido, a quantidade de dióxido de carbono (CO₂) emitida, a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar, medidos por um aparelho, que com um sensor situado na parte superior da haste mede a concentração de gás pela difusão através dos orifícios dos sensores (Figura 3.13).



Figura 3.13 – Termômetro para medição da temperatura interna da pilha e aparelho medidor da emissão de dióxido de carbono, temperatura ambiente e umidade relativa do ar

Após coletados os dados, foi feita a amostragem da escória, por meio da coleta de material em partes aleatórias da pilha, colocando-as em sacos plásticos com identificação, onde constam o tempo de molhamento e a data da coleta (Figura 3.14). Estas amostras foram utilizadas em ensaios de laboratório para avaliação do andamento do processo cura.



Figura 3.14– Coleta de amostras

3.3.3 Ensaios de Resistividade

Para se observar a evolução comportamental da escória de aciaria avaliada no presente estudo, quanto a sua resistividade elétrica no decorrer do tempo em que esteve submetida ao experimento, foi construído um simulador de resistividade em escala real (Figura 3.15), sendo a Estação Ferroviária de Mário Carvalho, situada no município de Timóteo – MG, determinada como local de sua implantação.



Figura 3.15– Construção do simulador de resistividade em escala real

O simulador é constituído de duas seções de teste sendo uma com dormentes de aço (Figura 3.16) e outra com dormentes de madeira (Figura 3.17), cada seção possui comprimento igual a 2,0 m e seção transversal com as mesmas dimensões adotadas no projeto da estrada de ferro Vitória – Minas. Na execução da via experimental foram efetuados os mesmos procedimentos de fixação e socaria utilizados convencionalmente em campo.

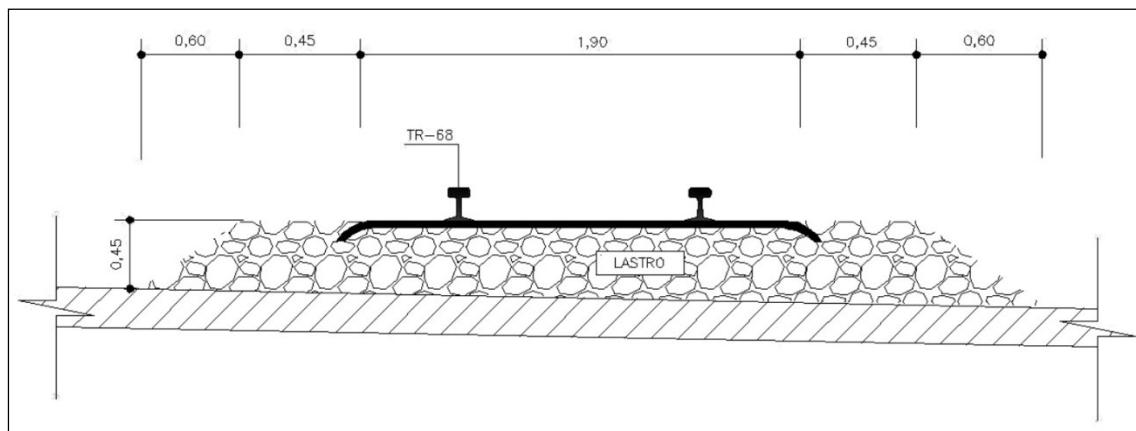


Figura 3.16– Seção experimental para aferição da resistividade – dormentes de aço

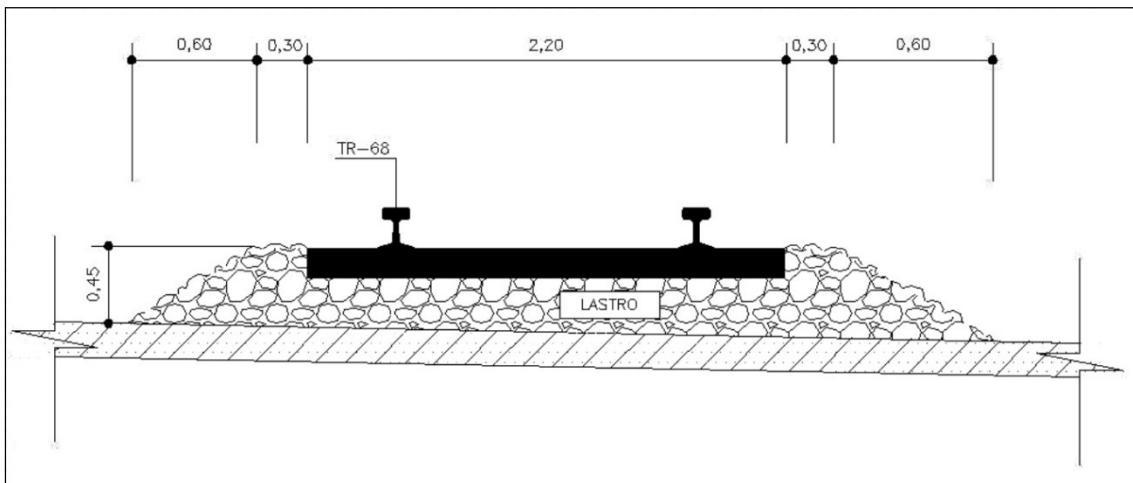


Figura 3.17– Seção experimental para aferição da resistividade – dormentes de madeira

A resistividade foi medida entre trilhos e entre eletrodos tanto para seção com dormentes de madeira quanto para aquela construída com dormentes de aço, sendo que em ambos os casos os eletrodos foram afixados adjacentes aos trilhos a uma profundidade de 35,0 centímetros e distanciados 1,35 metros entre si. Os valores da resistividade elétrica do material foram obtidos através dos cálculos de correlação da resistência obtidos por meio das medições realizadas com auxílio de um aparelho denominado Megômetro (Figura 3.18).



Figura 3.18– Medição da resistividade com auxílio de um Megômetro

O Megômetro é um aparelho que pode gerar diferentes tensões de teste a depender das necessidades impostas pelo experimento. Desta forma, de acordo com as proposições de Silva *et al.* (2000), adotadas também por Sousa (2007) após a realização de uma série de testes de caráter preliminar, a tensão de teste determinada para experimento foi de 500V.

A resistência de um condutor é expressa por:

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (3.1)$$

Onde:

R = resistência

ρ = resistividade (depende da natureza do material e de sua temperatura)

l = comprimento

S = seção do condutor

Explicitando-se ρ , temos que a equação da resistividade elétrica é dada por:

$$\rho = \frac{R * S}{l} \quad (3.2)$$

3.4 ETAPAS DE LABORATÓRIO

Foram realizadas no Laboratório de Ferrovias e Asfalto da Universidade Federal de Ouro Preto duas campanhas de ensaios, sendo uma para caracterização química, física, mecânica e ambiental da escória de aciaria e outra para acompanhar a evolução da sua condutividade e expansibilidade com o tempo. A Figura 3.19 apresenta o fluxograma dos ensaios laboratoriais para caracterização da escória, utilizado como referência no presente trabalho.

Escória de Aciaria LD

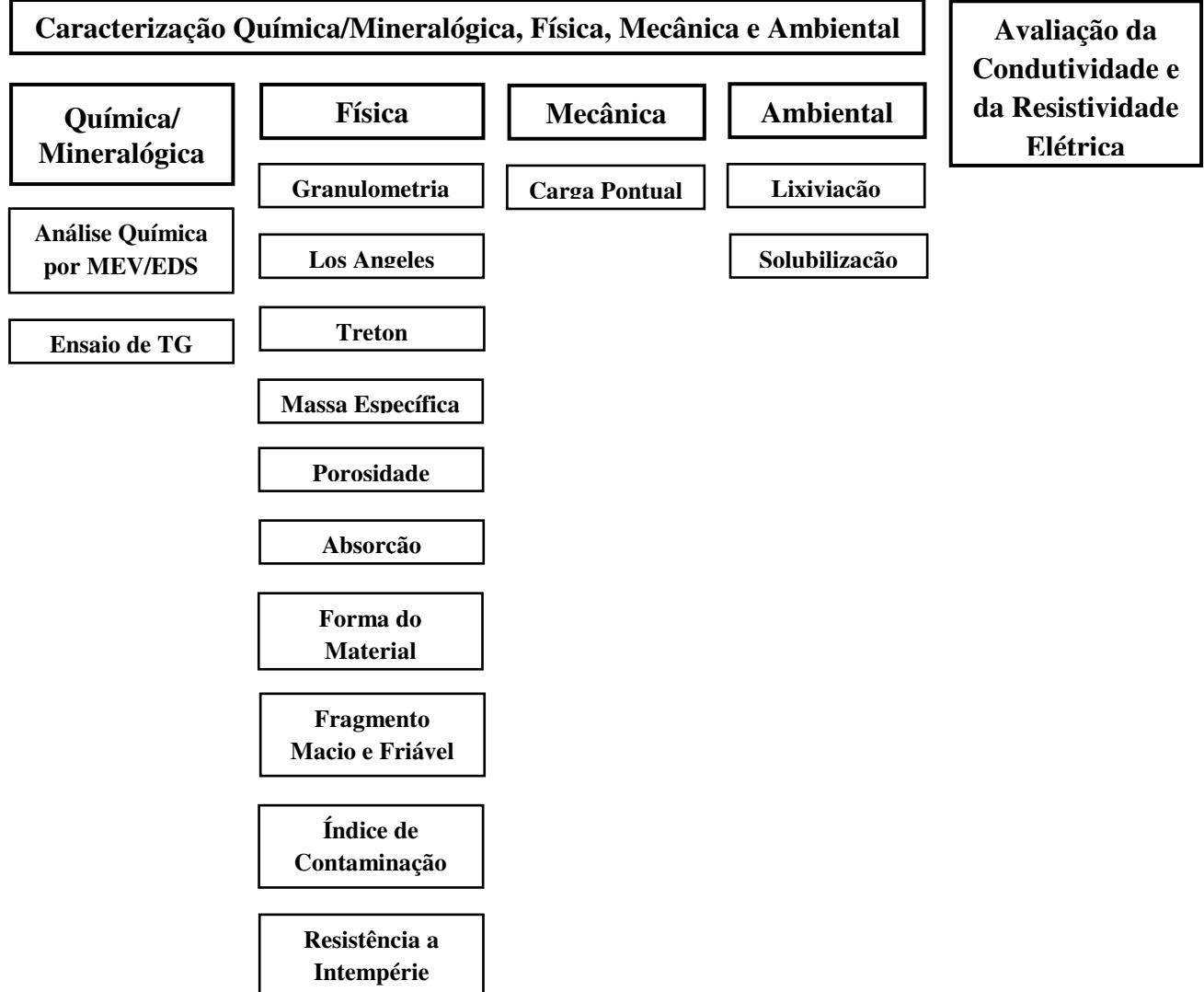


Figura 3.19– Fluxograma dos ensaios laboratoriais para caracterização da escória

3.4.1 Ensaios para caracterização física e mecânica da escória de aciaria

3.4.1.1 Ensaio de Granulometria

A norma que rege a granulometria do lastro é a ABNT NBR NM 248 – Agregados – Determinação da composição granulométrica. O material de lastro deverá ser disposto de forma a reduzir ao máximo os vazios para que a carga imposta pela solicitação da composição ferroviária seja uniformemente distribuída. O lastro deve caracterizar uma estrutura auto drenante e sem a presença excessiva de finos.

Para que todas as características supracitadas sejam satisfeitas e o comportamento do lastro seja satisfatório no que diz respeito à integridade da via e da interação entre seus componentes, sua faixa granulométrica deve se enquadrar nos limites descritos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Distribuição Granulométrica do lastro ferroviário

Lado da malha da peneira de acordo com a ABNT NBR NM ISSO 3310-1 (mm)	Porcentagem em massa acumulada %	
	Padrão A	Padrão B
76,2	-	0 - 0
63,5	0 - 0	0 - 10
50,8	0 - 10	-
38,0	30 - 65	40 - 75
25,4	85 - 100	-
19,0	-	90 - 100
12,0	95-100	95-100

NOTA 1 - Padrão A e B referem-se, respectivamente, a lastro para aplicação em linhas principais e a lastro para aplicação em linhas de pátios.
NOTA 2 - Na falta das letras A ou B, entende-se como sendo A.

3.4.1.2 Índice de contaminação

O lastro ferroviário é considerado contaminado quando nele é detectada a presença de partículas com diâmetro inferior a 6 mm. Estas partículas, comumente chamadas de finos, com o decorrer do tempo podem ir preenchendo os vazios existentes no lastro fazendo com que diminua sua capacidade drenante e causando também a perda de resistência da estrutura.

Ao se avaliar as consequências decorrentes da presença deste material, Selig e Waters (1994) quantificaram a contaminação do lastro a partir de sua curva granulométrica utilizando para isto o Índice de Contaminação FI (Fouling Index), expresso pela seguinte expressão:

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

Onde P4 e P200 são as percentagens em pesos passantes nas peneiras 4 e 200 respectivamente. A Tabela 3.2 apresenta a classificação do lastro de limpo a altamente contaminado de acordo com o índice de contaminação (SELIG et al., 1993).

Tabela 3.2 – Índices de contaminação do lastro (Selig et al., 1993)

Classe de contaminação do lastro	Índice de contaminação (FI)
Limpo	<1
Moderadamente limpo	1 - 9
Moderadamente contaminado	10 – 19
Contaminado	20 – 39
Altamente contaminado	> 39

3.4.1.3 Abrasão Los Angeles

O ensaio consiste em preparar a amostra ensaiada selecionando-a de acordo com sua graduação e o tipo de material em estudo, para o presente trabalho foi utilizada a faixa F, que recomenda uma amostra com massa aproximada de 10,0kg, que será inserida juntamente a uma carga abrasiva constituída de 12 esferas de aço que totalizam aproximadamente 6,0kg no tambor cilíndrico (Figura 3.20) que tem seu eixo horizontal fixado por um dispositivo externo lhe permite a realização de rotações ao redor do próprio eixo. Para a faixa F o número de rotações determinado é igual a 1000 (mil).

No decorrer das rotações acontecem choques consecutivos das amostras com a carga abrasiva levando-as ao desgaste. Depois de completadas todas as revoluções, o material é peneirado e o desgaste é medido pelo cálculo da razão entre a massa do material passante na peneira de 1,7mm e a massa total inserida inicialmente no tambor.

Os procedimentos seguidos na execução desse ensaio são normatizados que ABNT NBR NM 51 – Agregado Graúdo – Ensaio de abrasão “Lós Angeles”.



Figura 3.20 – Tambor cilíndrico utilizado no ensaio de Abrasão Los Angeles

3.4.1.4 Determinação da resistência ao choque - Índice de tenacidade “Treton”

O ensaio de resistência ao choque é feito a partir da seleção de 20 fragmentos obtidos da fração passante na peneira de 19 mm e retidos na peneira de 16 mm. Depois de selecionados, os corpos-de-prova que são submetidos por meio do uso do “aparelho Treton” a dez choques provocados por uma massa de 16 kg em 380 mm de queda livre. A normatização deste ensaio é feita pela NBR 8938 – Determinação da resistência ao choque (ABNT, 1985). A Figura 3.21 apresenta o equipamento utilizado para realização dos ensaios.

O impacto do “aparelho Treton” caracteriza um esforço de natureza dinâmica, que se assemelha às solicitações impostas pela composição à superestrutura ferroviária. A avaliação do comportamento do material estudado frente à aplicação da energia de impacto indica seu grau de tenacidade que está diretamente relacionado à sua capacidade de absorver e dissipar os esforços.



Figura 3.21 – Aparelho “Treton” utilizado nos ensaios

3.4.1.5 Determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água

A massa específica aparente, a porosidade aparente e absorção de água do material analisado são características diretamente ligadas. A massa específica e a absorção de

água são dependentes da porosidade. Tal relação se explica pelo fato de que quanto maior o número de poros presente em determinado material, mais vazios ele terá, o que fará com que ele tenha um peso específico menor ao ser comparado com uma massa sólida, desprovida de vazios. A absorção de água também irá aumentar proporcionalmente ao número de poros, pois, desta maneira a água terá mais locais susceptíveis a sua entrada e consequente deposição.

Além do apresentado, a resistência e dureza de um material também estão diretamente ligadas à porosidade, isto porque quanto mais maciço o material mais duro e resistente ele será, comportando-se de melhor maneira frente às solicitações a ele aplicadas.

Tais propriedades são avaliadas seguindo as premissas normativas da NBR 7418 – Determinação da massa específica parente, da absorção de água e da porosidade aparente do material (ABNT, 1987).

3.4.1.6 Determinação da forma dos fragmentos

A forma do material tem sua classificação definida de acordo com as dimensões de suas partículas. Para obtenção desta classificação, são selecionados ao acaso 25 fragmentos de cada lote de amostra do material estudado, dos quais são medidas as dimensões “A”, “B” e “C” considerando um paralelogramo onde o fragmento possa ser circunscrito. Este procedimento, assim como o arranjo esquemático com a orientação das medidas indicado na Figura 3.22 e a classificação da forma dos fragmentos por meio da correlação entre as medidas apresentada na Tabela 3.3 são prescritos pela norma NBR 6954 – Lastro padrão – Determinação da Forma do Material (ABNT, 1989).

Os fragmentos classificam-se pela correlação entre suas medidas em, alongados, lamelares e cúbicos. Esta classificação tem influência direta no que se refere à compacidade do material e da interação proveniente do contato entre os grãos.

Sendo assim, o material utilizado como lastro ferroviário deve constituído por fragmentos de forma cúbica, dispensando-se materiais alongados e lamelares. Materiais com maior cubicidade apresentam resistência mais elevada, característica imprescindível ao bom funcionamento da estrutura.

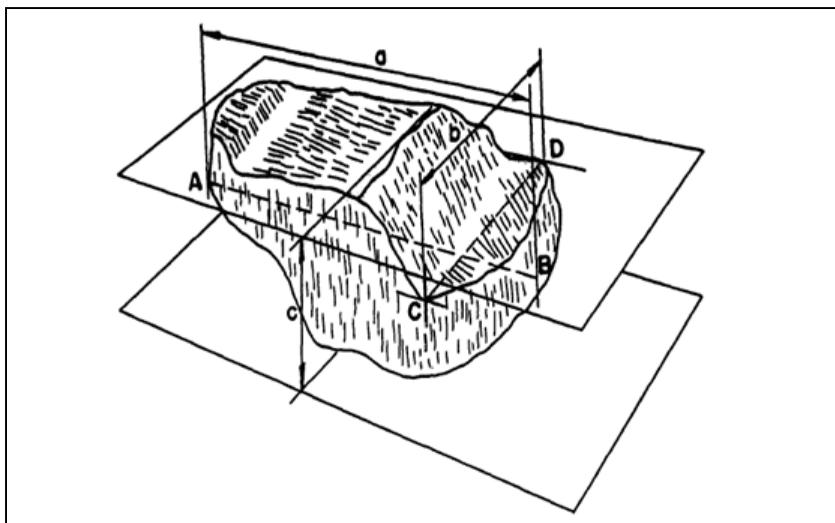


Figura 3.22 – Orientação das medidas para determinação da forma dos fragmentos

Tabela 3.3 – Classificação da forma dos fragmentos por meio da correlação entre as medidas

Classificação NBR 6954		
Medida das relações B/A e C/B		Forma
1	B/A > 0,5 e C/B > 0,5	Cúbica
2	B/A < 0,5 e C/B > 0,5	Alongada
3	B/A > 0,5 e C/B < 0,5	Lamelar
4	B/A < 0,5 e C/B < 0,5	Alongada ou lamelar

Classificação Raymond e Diyaljee, 1979		
Medida das relações ΣA e ΣC		Forma
1	$\Sigma A / \Sigma C \leq 2$	Cúbica
2	$\Sigma A / \Sigma C > 2$	Alongada / Lamelar

3.4.1.7 Determinação do teor de fragmentos macios e friáveis

Esse ensaio segue os procedimentos normativos da NBR 8697 – Lastro padrão – Determinação do teor de material macio e friável (ABNT, 1984). Os corpos de prova são selecionados de acordo com a Tabela 3.4, e após a verificação da massa e de sua quantidade em função do tamanho das partículas, eles são submetidos ao movimento esclerométrico da vareta de bronze (Figura 3.23) separando-se os fragmentos macios e

friáveis para só então se aferir sua massa e quantificar as partículas que se enquadram na classificação analisada.

O material a ser empregado na via, deverá ser isento de fragmentos macios e friáveis, estes, definidos pela presença de sulco sem o depósito do metal da vareta ou pelo desprendimento de parte do corpo de prova após o impacto.

Tabela 3.4 – 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
37,6 a 50,0	12000



Figura 3.23– Vareta de bronze e suporte utilizados na realização dos ensaios

3.4.1.8 Determinação da resistência à intempérie

Esse ensaio é realizado por meio da submersão de corpos-de-prova em recipientes contendo solução de sulfato de sódio por um período mínimo de 8h com posterior secagem e resfriamento. Este ciclo é repetido por 40 vezes e após cada dez ciclos é feita a inspeção visual para identificação de trincas, fissuras, escamações, oxidação de

minerais, desagregação, etc. Em cada inspeção deve ser identificada também partículas desagregadas que possam ser coletadas manualmente, estas devem ser secas e pesadas.

A resistência à intempérie é fornecida pela relação que quantifica o percentual de perda do material por desagregação. Tal relação tem como parâmetros de cálculo os pesos iniciais e finais dos corpos-de-prova ensaiados.

Os procedimentos de ensaio são regidos pela NBR7702 – Lastro Ferroviário – Determinação da resistência do material a intempérie (ABNT, 1983).

3.4.1.9 Carga pontual

Para realização do ensaio de carga pontual, é necessário inicialmente se fazer as correta seleção dos corpos de prova obedecendo aos critérios estabelecidos pela norma ASTM D5731-95 onde é especificado que as partículas a serem ensaiadas devem ter forma prismática e diâmetros variando entre 30 e 80 mm.

A carga pontual é aplicada por meio do posicionamento do corpo de prova entre duas ponteiras cônicas constituídas de metal duro que rompem a amostra com a criação de fissuras paralelas ao eixo da carga (Figura 3.24). Metade dos corpos de prova foram rompidos com o posicionamento da carga em paralelo ao eixo de aplicação de cargas e para os demais, a solicitação foi aplicada com orientação normal ao referido eixo.



Figura 3.24– Corpo-de-prova posicionado entre as ponteiras cônicas para ensaio de carga pontual

A validação do ensaio é feita pela verificação do plano de ruptura da amostra, o mesmo deve coincidir com a seção transversal do material ensaiado.

Após realização dos procedimentos de ensaio, o índice de carga pontual I_s é calculado pela relação entre a carga ruptura P e o diâmetro equivalente das partículas D_e , sendo que:

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad (3.4)$$

Onde D_e é obtido em função da área do plano de ruptura A_s explicitado na equação a seguir:

$$D_e = \sqrt{\frac{4A_s}{\pi}} \quad (3.5)$$

Assim como o critério de seleção das amostras, todos os demais procedimentos do referido ensaio seguem a mesma referência normativa.

3.4.2 Ensaios de caracterização química e mineralógica da escória de aciaria

3.4.2.1 Ensaio para determinação do teor de cal livre

A determinação do óxido de cálcio livre é o componente de maior importância para se viabilizar o uso da escória de aciaria nas mais diversas formas de aplicação na engenharia civil. Isto se deve ao fato de que a cal livre em contato com a água forma hidróxidos provocando a expansão aliada a quebra excessiva dos grãos e consequente perda da resistência.

O ensaio consiste na extração de óxido de cálcio livre da escória de aciaria ($1,000g \pm 0,001g$ da amostra triturada) por meio do uso do etileno-glicol a uma temperatura entre $65^{\circ}C$ e $70^{\circ}C$ durante aproximadamente 30 min. É feita a filtragem da solução sendo que após este processo é adicionado ao filtrado a solução mista de indicadores para posterior titulação com ácido clorídrico (HCl). A Figura 3.25 ilustra os procedimentos anteriormente mencionados.

Os procedimentos do presente ensaio são normatizados pela NBR NM13– Cimento Portland – Análise química – Determinação do óxido de cálcio livre pelo etileno-glicol (ABNT, 2004).



Figura 3.25 – Procedimentos do ensaio para determinação do teor de cal livre

3.4.2.2 Ensaio de Termogravimetria – TG

O ensaio de termogravimetria tem como função avaliar a variação de massa da amostra após ser submetida a uma programação controlada de temperatura. Esta técnica fornece o comportamento dos materiais frente ao aquecimento, tendo como principais parâmetros analíticos o conhecimento da faixa de temperatura na qual a amostra estudada obtém uma composição química constante, a temperatura onde se inicia seu processo de decomposição e o acompanhamento de como se processam as reações de desidratação, oxidação, combustão, etc.

Para execução do ensaio é utilizado um equipamento (Figura 3.26) que é composto basicamente por uma microbalança, um forno, termopares e um sistema de fluxo de gás que possibilita a realização do experimento sob as mais diversas condições tais como diferentes massas de amostras, variáveis razões de aquecimento e condições isotérmicas.

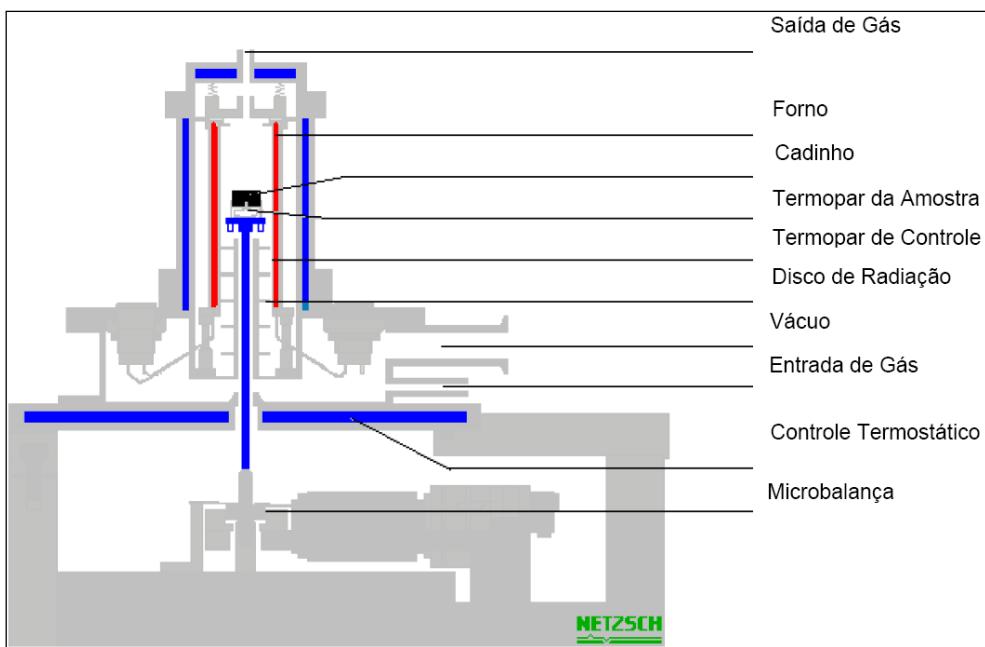


Figura 3.26 – Desenho esquemático de um equipamento de termogravimetria (RODRIGUES e MARCHETTO)

Os resultados são expressos por meio da curva termogravimétrica e da curva da derivada primeira da termogravimétrica em função do tempo (t) ou da temperatura (T) expressa pela nomenclatura DTG, que demonstram o comportamento da amostra quanto sua composição, estabilidade térmica, estabilidade dos compostos intermediários e dos compostos finais. A Figura 3.27 apresenta uma representação típica curvas geradas na análise termogravimétrica.

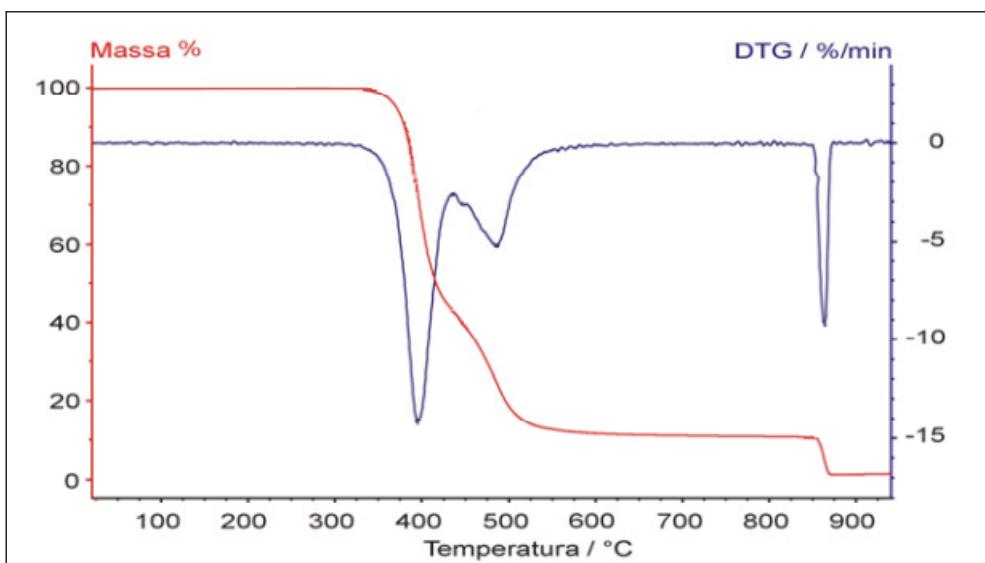


Figura 3.27 - Gráfica de TGA em vermelho e sua derivada, DTG em azul (RODRIGUES e MARCHETTO)

Em termos comparativos, quando há variação da massa inicial das amostras na realização dos ensaios, pode haver mudanças significativas principalmente no que diz respeito à temperatura. Desta forma, torna-se necessária a conservação das características das amostras e o conhecimento dos fatores causadores de imprecisão nos ensaios, para que estes sejam minimizados, de maneira que os processos químicos ou físicos representados pelas curvas TG geradas, apresentem resultados da forma mais fiel possível.

3.4.2.3 Microscopia eletrônica de varredura – MEV

A técnica aplicada no presente ensaio permite a avaliação da microestrutura dos materiais sólidos, fornecendo informações no que concerne a morfologia e identificação de seus elementos químicos.

Para estarem aptas a serem ensaiadas, as amostras tiveram que passar por um processo de metalização que as tornam condutoras na presença de carbono. O processo consiste na disposição da amostra sob a forma de monocamadas em peças cilíndricas metálicas revestidas de grafite para serem depositadas em um evaporador de vácuo por um intervalo de tempo de aproximadamente uma hora. Em seguida é feita a vaporização dos eletrodos de grafite por um período aproximado de 10 minutos. Ao ser submetida a este processo, a amostra torna-se condutora e a peça metálica é posicionada na câmara do microscópio passando por um vácuo de 3 minutos.

Após se submeter a todo o processo de preparação, a amostra está pronta para ser analisada pelo microscópio eletrônico de varredura que tem como seus principais componentes, uma fonte emissora de elétrons, uma câmara de varredura, uma câmara de amostra, um sistema de detectores e um sistema de visualização da imagem.

Grande parte dos equipamentos utiliza um filamento de tungstênio (W) como fonte de elétrons. No processo o filamento é aquecido para trabalhar em um intervalo de tensões de aceleração compreendido entre 1 e 50 kV. A fonte emissora utiliza um feixe de pequeno diâmetro que incide na amostra para explorar sua superfície, a incidência gera um sinal que é captado pelo detector e transmitido a uma tela catódica possibilitando a geração da imagem. A Figura 3.28 representa os elementos constituintes do MEV.

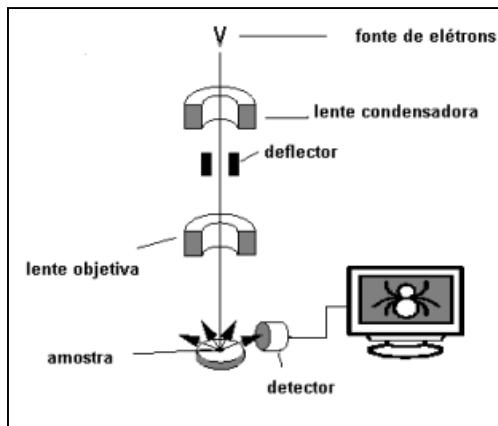


Figura 3.28 – Elementos constituintes do MEV (DEDAVID et al., 2007)

No presente estudo os aumentos adotados para avaliação das amostras foram de 50X, 100X, 150X e 270X, gerados por um microscópio eletrônico de varredura do modelo JEOL JSM – 5510 (Figura 3.29), pertencente ao Laboratório de Microscopia Eletrônica do Departamento de Geologia da UFOP (DEGEO).



Figura 3.29 – Microscópio Eletrônico de Varredura utilizado no experimento

3.4.3 Caracterização ambiental da escória

3.4.3.1 Legislação e classificação

Considerando a necessidade da obtenção de informações sobre os tipos e destinos dos resíduos gerados no parque industrial do país e as características prejudiciais à saúde

humana e ao meio ambiente que os mesmos podem apresentar, foram elaboradas pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, diretrizes visando o controle e gerenciamento destes resíduos.

Tais diretrizes buscam orientar as entidades geradoras com relação aos procedimentos a serem obedecidos no que diz respeito à manipulação e utilização de seus resíduos. Quando aplicados da maneira correta, estes procedimentos impedem o surgimento de atividades não conformes, evitando que a saúde e o meio ambiente sejam prejudicados além de não se sujeitarem às punições previstas pela Lei de Crimes Ambientais – Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998.

As disposições legais destinadas as atividades descritas, abrangem o Decreto nº 96044/1988 e as Resoluções CONAMA 006/1988, 002/1991, 008/1991, 005/1993, 009/1993, 019/1994, 024/1994 e 023/1996.

A classificação dos resíduos sólidos é constituída pelo estudo e avaliação dos processos que os geraram e dos elementos que os constituem. É feita por meio da avaliação quanto ao risco à saúde pública e ao meio ambiente e dividida em dois grupos caracterizados como perigosos e não perigosos. Os resíduos sólidos não perigosos são subdivididos em inerte e não inerte.

De acordo com a NBR 10004:2004 – Resíduos sólidos – Classificação, os resíduos são classificados como Classe I – Perigosos; Classe II – Não perigosos subdivididos em Classe II A – Não inertes e Classe II B – Inertes. As demais normas utilizadas com a finalidade de se obter parâmetros classificatórios para os resíduos são a NBR 10005:2004 – Procedimentos para obtenção do extrato lixiviado de resíduos sólidos e a NBR10006:2004 – Procedimento para obtenção do extrato solubilizado de resíduos sólidos.

Os resíduos Classe I (perigosos) são aqueles que apresentam riscos a saúde pública provocando mortalidade, surgimento ou agravamento de doenças e ao meio ambiente quando não administrado de maneira correta.

Quanto aos resíduos Classe II (não perigosos), a eles é atribuída a característica de não inerte quando apresentam propriedades tais como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Quando os resíduos não perigosos são caracterizados como inertes, indicam que os mesmos não tiveram nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade quando submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada à temperatura ambiente.

3.4.3.2 Ensaios de lixiviação

O processo de lixiviação tem como finalidade determinar a capacidade de transferência de substâncias inorgânicas presentes no resíduo sólido por meio de um extrator.

O procedimento de ensaio consiste inicialmente na obtenção de 100g de amostra constituída de partículas que passem na peneira de malha 9,5mm. Quando devidamente selecionadas, as amostras serão colocadas em um frasco de lixiviação onde serão misturadas à solução de extração (Figura 3.30) sendo que, em função do pH apresentado pelo resíduo, esta poderá ser constituída de ácido acético glacial ou solução de ácido acético e hidróxido de sódio. Depois de misturados à solução, o frasco passará por um processo de agitação que é feito por meio de 30 rotações por minuto com duração de 18h a uma temperatura de 25°C para então passar o material ensaiado por uma filtração para obtenção do extrato lixiviado a ser analisado.



Figura 3.30 – Frascos de lixiviação posicionados no equipamento de ensaio

A análise do extrato lixiviado tem como função a diferenciação dos resíduos classificados como Classe I (Perigosos) e Classe II (Não perigosos), de acordo com o teor de poluentes nele contido.

O ensaio de lixiviação tem seus procedimentos normatizados pela NBR10005 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos (ABNT, 2004).

3.4.3.3 Ensaios de solubilização

Este ensaio objetiva, por meio da obtenção do extrato solubilizado de resíduos sólidos, diferenciar os resíduos classificados pela ABNT NBR 10004:2004 como Classe IIA (Não Inerte) e Classe IIB (Inerte).

O processo de execução do ensaio se dá pela inserção de 250g da amostra seca em estufa, em um frasco de 1500 ml onde será feita também a adição de 1000 ml de água destilada, desionizada e isenta de orgânicos. Em seguida a amostra deverá ser agitada em baixa velocidade por um período igual a 5 min.

Após o processo de agitação, o frasco deverá ser coberto com filme PVC e mantido em repouso durante 7 dias com temperaturas até 25°, quando então, a solução contida no frasco será filtrada para obtenção do extrato solubilizado que terá seu pH aferido.

A análise dos parâmetros do extrato solubilizado é realizada em concordância com as metodologias propostas pelo “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”.

Os métodos propostos para o ensaio de solubilização encontram-se descritos na NBR10006 – Procedimentos para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos (ABNT, 2004).

3.4.4 Ensaios de Condutividade Elétrica

Havendo a necessidade de simular a condição de saturação do lastro que pode ocorrer em muitos trechos da ferrovia, em decorrência dos sistemas de drenagem da via se

encontrarem em situações precárias e de sua exposição a períodos de chuva muito intensos e prolongados, foi montada no laboratório de Ferrovias e Asfalto da Universidade Federal de Ouro Preto uma caixa-teste onde seriam executadas medições da condutividade elétrica da escória de acaria LD estudada.

Sabe-se que o fenômeno da saturação do lastro gera expansão excessiva que resulta na quebra dos grãos da escória, desta forma, o experimento realizado com auxílio da caixa-teste vem verificar a relevância do fenômeno da expansão sobre a condutividade elétrica do material.

A caixa que simula uma seção de linha férrea foi montada em madeira e possui comprimento de 2,20 m, largura de 1,20m e altura igual 0,50m. Para sua vedação, foi utilizado um revestimento em membrana plástica. A disposição do material em seu interior foi feita em uma camada de 35,0 cm coberta com água até uma cota de 5,0 cm acima de seu nível superior (Figura 3.31).



Figura 3.31 – Caixa-teste para medição da condutividade na escória.

A condutividade elétrica do meio no qual o material se encontra imerso foi medida por meio de um aparelho denominado condutivímetro, foram medidos também o pH e a temperatura do sistema no decorrer do experimento. De acordo com estudos realizados por Nascimento (2003) no qual se embasaram também as medições realizadas por Sousa

(2007), o período em que sujeita ao tratamento com água, a escória teria tendência a adquirir estabilidade volumétrica seria de 45 dias, no entanto o período estipulado para realização das medições da condutividade foi de 90 dias para maior precisão dos resultados obtidos. Na Figura 3.32 consta uma representação esquemática do experimento realizado.

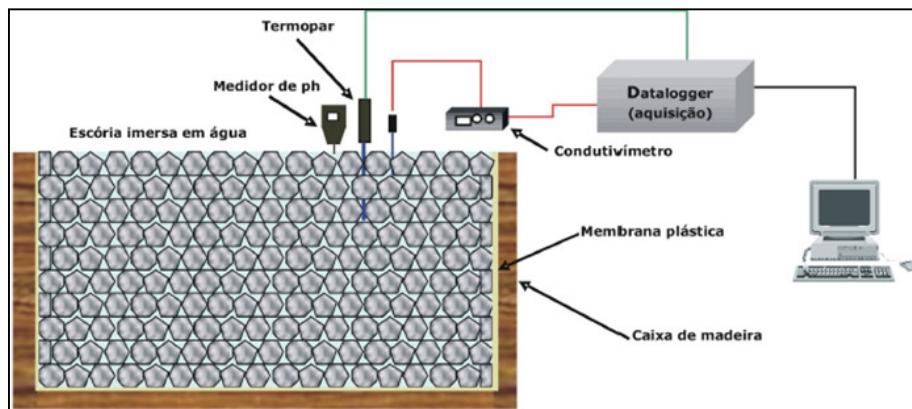


Figura 3.32 – Esquema utilizado na realização do experimento (SOUSA, 2007)

Capítulo 4

4. RESULTADOS DOS ENSAIOS

Este capítulo contempla os resultados obtidos nos ensaios de campo e de laboratório para que o comportamento da escória de aciaria LD estudada possa ser avaliado quanto a suas propriedades físicas, mecânicas, químicas, ambientais e de condutividade frente ao tratamento de estabilização química a que foi submetida e na ausência do mesmo.

Os ensaios de campo realizados nos forneceram dados para avaliação quanto a resistividade do material. Quanto à campanha de ensaios laboratoriais, esta nos forneceu resultados que possibilitou a análise quanto aos seguintes parâmetros:

- Enquadramento do material nas faixas padrão de lastro ferroviário;
- Classificação quanto a presença de finos;
- Desgaste do material por atrito entre partículas;
- Capacidade resistência frente a impactos;
- Massa específica, porosidade e absorção;
- Relação entre dimensões das partículas;
- Quantificação de partículas providas de características compatíveis a rocha “sã”;
- Perda de massa por desagregação;
- Resistência ao carregamento para diferentes planos susceptíveis a ruptura;
- Identificação e quantificação das espécies químicas presentes na escória;
- Mudança de massa quanto submetida a temperaturas controladas;
- Teor do óxido de cálcio livre;
- Toxicidade; e
- Condutividade.

Todos os ensaios foram executados de acordo com os procedimentos normativos cabíveis. As análises foram realizadas tomando-se como referência os limites propostos essencialmente pela ABNT e AREMA ou aqueles definidos em estudos prévios, possibilitando desta forma, que ao final de execução de todas as etapas de trabalho

tenhamos um parecer a respeito da viabilidade de aplicação do coproduto como lastro em vias sinalizadas.

4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

4.1.1 Análise Granulométrica

Os ensaios de granulometria foram realizados em conformidade com a ABNT NBR NM 248 – Agregados – Determinação da composição granulométrica, que apresenta de acordo com a Tabela 3.1 os intervalos de percentual em massa retido em cada peneira para que o material de composição do lastro ferroviário se enquadre nas faixas padrão por ela propostas.

A Tabela 4.1 apresenta os resultados da análise granulométrica da amostra inicial.

Tabela 4.1 – Análise granulométrica da amostra inicial

Peneiras		Material Retido (g)	Percentagem em Peso		
Número	(mm)		% Retido	% Acumulada	% Passante
3"	76	6287,0	3,5	3,5	96,5
2 1/2"	63	38495,000	21,4	24,9	75,1
2"	50	60653,000	33,8	58,7	41,3
1 1/2"	38		0,0	75,7	24,3
1"	25	70242,000	39,1	97,8	2,2
3/4"	19	3279,000	1,8	99,6	0,4
1/2"	12,5	632,000	0,4	100,0	0,0
3/8"	9,5	65,000	0,0	100,0	0,0
1/4"	6,3	6,000	0,0	100,0	0,0
4	4,8	5,000	0,00	100,0	0,0
8	2,4	4	0,00	100,0	0,0
10	2		0,00	100,0	0,0
16	1,2		0,00	100,0	0,0
30	0,6		0,00	100,0	0,0
50	0,3		0,00	100,0	0,0
100	0,15		0,00	100,0	0,0
200	0,074		0,00	100,0	0,0
Prato			0,00	100,00	0,0
Total		179668,000	100,0		

Dimensão Máxima Característica (mm)	75
Módulo de Finura	8,75

A análise granulométrica da amostra inicial indica uma retenção de partículas nas peneiras de 3", 2 1/2", 2" e 1 1/2" em quantidade inferior ao recomendado pela norma para o enquadramento das amostras tanto na Faixa A quanto na Faixa B de lastro ferroviário. Tal fato aponta para a presença de partículas com dimensões maiores que as

recomendadas, necessitando, portanto, de adequações para que o material possa ser aplicado tanto em linhas principais quanto em linhas de pátios ferroviários.

A Tabela 4.2 apresenta os resultados da análise granulométrica da amostra aos 60 dias de cura.

Tabela 4.2 – Análise granulométrica da amostra aos 60 dias de cura

Peneiras		Material Retido (g)	Percentagem em Peso		
Número	(mm)		% Retido	% Acumulada	% Passante
3"	76	821,375	1,4	1,4	98,6
2 1/2"	63	4944,905	8,2	9,6	90,4
2"	50	11686,520	19,5	29,1	70,9
1 1/2"	38	15748,120	26,2	55,3	44,7
1"	25	15643,540	26,1	81,4	18,6
3/4"	19	2219,570	3,7	85,1	14,9
1/2"	12,5	1348,205	2,2	87,4	12,6
3/8"	9,5	940,965	1,6	88,9	11,1
1/4"	6,3	938,800	1,6	90,5	9,5
4	4,8	759,670	1,27	91,8	8,2
8	2,4	1069,92	1,78	93,5	6,5
10	2		0,00	93,5	6,5
16	1,2		0,00	93,5	6,5
30	0,6		0,00	93,5	6,5
50	0,3		0,00	93,5	6,5
100	0,15		0,00	93,5	6,5
200	0,074		0,00	93,5	6,5
Prato		3878,715	6,46	100,00	0,0
Total		60000,305	100,0		

Dimensão Máxima Característica (mm)	75
Módulo de Finura	7,89

Ao observar o comportamento da amostra quanto a sua composição granulométrica após decorridos 60 dias de cura, percebe-se que em relação a faixa padrão A, que o percentual de material retido se manteve acima do recomendado nas peneiras 2 ½", 2", no entanto, quando se avalia as diferenças em relação aos limites da faixa nas peneiras 1" e ½", o percentual em massa acumulado é inferior ao proposto, tal fato se justifica pela redução do tamanho das partículas em decorrência da fragmentação do material ocasionada pelo processo de hidratação ao qual o material foi submetido. Como consequência desta fragmentação, ocorreu um aumento no percentual de finos gerados em relação à amostra inicial e uma ligeira redução do módulo de finura do material. Quando se trata do enquadramento na faixa padrão B, foi constatada a presença de material acumulado em percentual mais elevado que o recomendado pelos limites normativos apenas na peneira 3", já as discordâncias observadas em relação as peneiras ¾" e ½" foram relacionadas a percentuais inferiores aos recomendados, justificados

pelas mesmos fatores descritos anteriormente para faixa padrão A causados pelo processo de estabilização química do coproduto.

A seguir, são apresentados graficamente nas Figuras 4.1 e 4.2 o comportamento acima descrito em relação ao enquadramento das amostras inicial e submetida ao tratamento de cura, nas Faixas padrão da ABNT, que se referem a faixas de lastro para aplicação em linhas principais (Padrão A) e em linhas de pátios ferroviários (Padrão B), de forma que possa ser observada de maneira mais clara as modificações de comportamento do material no período pós-cura.

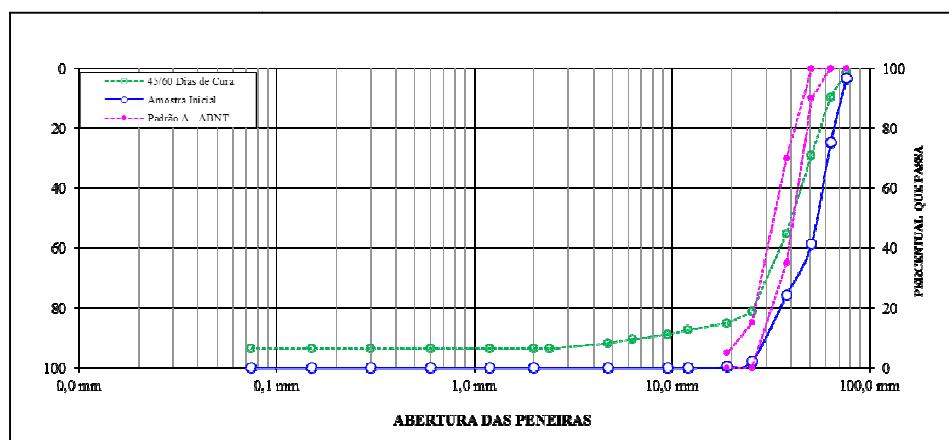


Figura 4.1 - Enquadramento das amostras na Faixa padrão A da ABNT

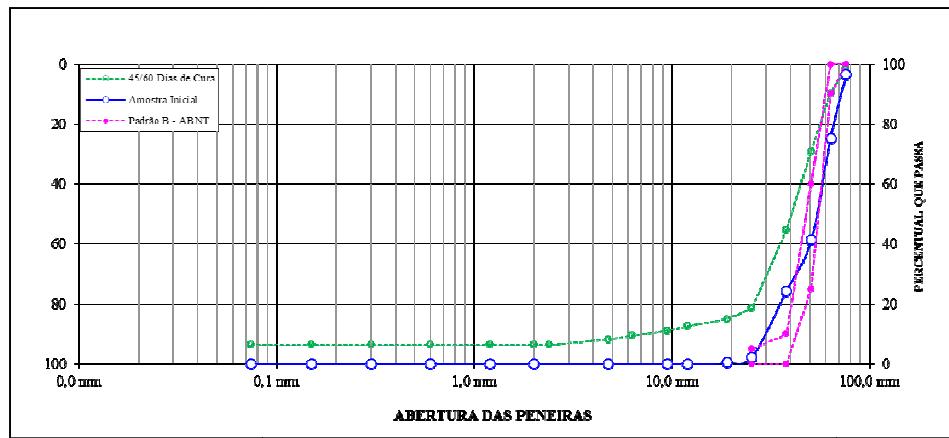


Figura 4.2 – Enquadramento das amostras na Faixa padrão B da ABNT

Os resultados dos ensaios de granulometria nos fornecem dados que possibilitam a obtenção de parâmetros de caracterização da escória quanto a sua graduação, de forma que possamos também avaliar sua evolução no decorrer do processo de cura. Os

parâmetros obtidos são: diâmetro máximo característico (DMC), módulo de finura do material (MF), coeficiente de não uniformidade (Cu) e coeficiente de curvatura (Cc).

O diâmetro máximo característico (DMC) é definido como o valor correspondente à abertura nominal da malha da peneira da série normal, onde o material ensaiado apresenta um percentual retido e acumulado em massa menor ou igual a 5%. O módulo de finura (MF) é dado pelo soma das porcentagens retidas e acumuladas em massa do material ensaiado, em todas as peneiras pertencentes à série normal, divida por 100.

Os coeficientes de não uniformidade (Cu) e de curvatura (Cc) são obtidos por meio da classificação unificada dos solos criada por Casagrande em 1948, cujas equações são apresentadas a seguir:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (4.1)$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} D_{60}} \quad (4.2)$$

Em que:

D_{60} corresponde ao diâmetro abaixo do qual se encontra 60% em peso da amostra;

D_{30} corresponde ao diâmetro abaixo do qual se encontra 30% em peso da amostra; e

D_{10} corresponde ao diâmetro abaixo do qual se encontra 10% em peso da amostra;

A Tabela 4.3 apresenta os resultados obtidos para caracterização granulométrica da escória no momento de início do experimento e a depois de submetida ao processo de cura por hidratação.

Tabela 4.3 – Evolução dos parâmetros de caracterização granulométrica antes e após o experimento

Amostra \ Parâmetro Analisado	Diâmetro Máximo Característico (DMC)	Módulo de Finura (MF)	Coeficiente de não Uniformidade (Cu)	Coeficiente de Curvatura (Cc)
Inicial (T_0)	75 mm	8,75	1,41	1,06
Metodologia UFOP (T_{60})	75 mm	7,89	4,18	1,90

O DMC apresentado pela escória avaliada no presente estudo foi igual a 75mm, valor este, superior ao encontrado no trabalho desenvolvido por SOUSA (2007), que obteve um DMC igual a 50mm e acima também do valor de 63,5mm obtidos nos trabalhos de Sousa *et al* (2004), Fernandes (2005) e Fernandes (2010).

Quanto à característica apresentada por um determinado material em função da magnitude de seu módulo de finura, pode-se afirmar que quanto maior for esta propriedade, mais grosso será o material a ser empregado como lastro em vias férreas. Desta forma, os valores obtidos para o módulo de finura em função dos parâmetros fornecidos pelo ensaio de granulometria foram iguais a 8,75 e 7,89 para a escória não tratada e para a escória depois de submetida ao processo de cura respectivamente.

O valor de Cu apresentado pela amostra inicial indica um material de graduação uniforme, já que, para classificação apresentada, valores de Cu inferiores a 2,0 permitem a atribuição de tal característica à escória avaliada. Para amostra tratada, os valores de Cu e Cc indicam um material bem graduado, pois, pela classificação unificada, deve ser atribuída tal característica ao material de lastro caso o mesmo possua valores de Cu maior que 4 e Cc entre 1 e 3.

4.1.2 Índice de contaminação

O índice de contaminação é de suma importância para se avaliar o material estudado quanto à presença de finos que são prejudiciais a vida útil do lastro ferroviário, uma vez que estes, quando em elevadas quantidades, podem preencher os vazios existentes entre os grãos do material de composição do lastro levando a perda da capacidade drenante e consequentemente, acarretando a diminuição da capacidade de estruturação do mesmo.

É por meio das porcentagens em peso passantes nas peneiras 4 e 200, obtidas por meio dos ensaios de granulometria, que podemos calcular o índice de contaminação e por sua vez, definir a classe de contaminação do lastro de acordo com a Tabela 3.2. Os resultados para as amostras inicial e após submetida ao tratamento de cura são apresentados na Tabela 4.4 a seguir.

Tabela 4.4 – Índice e grau de contaminação dos materiais

Amostra avaliada	Índice de Contaminação (FI)	Grau de contaminação
Inicial (T_0)	0,40	Limpo
Metodologia UFOP (T_{60})	14,70	Moderadamente contaminado

A amostra inicial foi classificada como limpa e a amostra submetida ao processo de cura foi classificada como moderadamente contaminada em função do aumento no percentual de finos gerados no decorrer do tratamento.

O comportamento em relação ao percentual de finos gerados pelo material durante o tratamento assemelha-se ao ocorrido no trabalho desenvolvido por Fernandes (2010). Nestes casos, assim como recomendado pelo autor, o material deve ser submetido novamente ao processo de peneiramento na planta de britagem para eliminação da parcela de finos presentes e posteriormente deverá ser reavaliado quanto a sua composição granulométrica.

4.1.3 Abrasão Los Angeles

O ensaio de abrasão Los Angeles quantifica o desgaste superficial dos grãos da amostra ensaiada quando estes atritam entre si e com as esferas de aço do tambor cilíndrico. Desta forma, a resistência à abrasão vem mensurar a capacidade que tem o material a ser empregado como lastro ferroviário, de não se alterar quando submetido a processos tais como carregamento, basculamento, socaria e o de maior relevância, quando sujeito às solicitações impostas pelo tráfego das composições ferroviárias.

A Tabela 4.5 apresenta os resultados obtidos nos ensaios para amostra recém-vazada (T_0) e para amostra submetida ao período de cura de 60 dias (T_{60}).

Tabela 4.5 – Percentual de desgaste em função do tempo de cura do coproduto

Amostra	Graduação da Amostra	Número de Esferas	Desgaste (%)
Inicial (T_0)	F	12	11,51
Metodologia UFOP (T_{60})	F	12	11,43

De acordo com os resultados apresentados, podemos observar que houve uma pequena queda no percentual de desgaste do material ao compará-lo no estado recém-vazado e após ter passado pelo processo de cura. No entanto, os resultados obtidos demonstram que mesmo antes de passar pelo processo de cura o coproduto já apresentava valores aceitáveis de acordo com os critérios normativos, já que o limite máximo de desgaste por abrasão recomendado pela AREMA (2002) é de 30% para escórias de aciaria. Menor percentual de desgaste significa maior resistência do material à abrasão e, portanto uma maior vida útil do material quando plicado a via.

4.1.4 Determinação da resistência ao choque - Índice de tenacidade “Treton”

Como mencionado no capítulo 3 do presente trabalho, o impacto aplicado pelo “Aparelho Treton” ao corpo de prova simula um esforço de natureza dinâmica semelhante às solicitações aplicadas à superestrutura pelo material rodante. O material estar apto ao fim que lhe foi designado quando avaliado neste quesito, significa que o grau de tenacidade por ele apresentado indica sua eficácia quanto à capacidade de absorver e dissipar esforços. Os resultados dos ensaios realizados com corpos de prova selecionados das amostras inicial (T_0) e ao final do tratamento (T_{60}) são apresentados na Tabela 4.6 a seguir.

Tabela 4.6 – Percentual de resistência ao choque em função do tempo de cura do coproduto

Amostra	Nº de Fragmentos	Número de Golpes	Resistência ao Choque (%)
Inicial (T_0)	20	10	7,50
Metodologia UFOP (T_{60})	20	10	6,60

O limite máximo estabelecido pela NBR 5564 (ABNT, 2011) para o índice de tenacidade *Treton* é de 25%. Os resultados obtidos apontam para um distanciamento do percentual de resistência ao choque em relação aos limites máximos estabelecidos por norma para o presente ensaio. Tal fato indica melhoria nas propriedades do material fazendo com que ele, quando disposto na via em forma de lastro, tenha maior resistência frente às solicitações impostas pelas composições ferroviárias, adquirindo com isso, maior vida útil e menor necessidade de manutenção.

4.1.5 Determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água

Os resultados dos ensaios laboratoriais para determinação da massa específica aparente, da porosidade aparente e absorção de água são apresentados na Tabela 4.7. Os limites normativos recomendados pela NBR 5564 (ABNT, 2011) e pela AREMA (2002), para avaliação quanto a aptidão do material a ser aplicado como lastro ferroviário quando avaliado por estes quesitos, são descritos na Tabela 4.8.

Tabela 4.7 – Resultados dos ensaios em função do tempo de cura do material

Amostra	Massa Específica Aparente (t/m³)	Absorção de Água (%)	Porosidade Aparente (%)
Inicial (T_0)	3,38	1,74	4,21
Metodologia UFOP (T_{60})	3,50	0,81	2,03

Tabela 4.8 – Limites normativos para os ensaios

Parâmetro Avaliado	Limites Normativos	
	NBR 5564	AREMA
Massa Específica Aparente Mínima (t/m ³)	2,50	2,90
Absorção de Água Máxima (%)	0,80	2,00
Porosidade Aparente Máxima (%)	1,50	-

Os resultados obtidos pelo ensaio de massa específica aparente do material atendem aos limites estabelecidos por norma. É possível se observar que houve um pequeno ganho de massa da amostra aos 60 dias de cura em relação ao resultado apresentado pela amostra inicial, caracterizando um afastamento de limite mínimo. Esta propriedade quando dentro dos padrões, representa um importante fator de auxílio a resistência no que diz respeito aos movimentos transversais e longitudinais da grade (trilhos e dormentes) em ausência de tráfego.

A absorção de água atendeu somente ao valor limite estabelecido pela AREMA, tanto para amostra inicial quanto para submetida ao processo de cura. No entanto, tais valores não atendem aos limites propostos pela norma brasileira, ficando ligeiramente acima depois de decorridos os 60 dias de cura do material.

A porosidade máxima aparente não atendeu o limite normativo estabelecido pela NBR 5564 para os ensaios em ambas as fases de avaliadas, no entanto, este fato não inviabiliza o uso do material para o fim designado, pois estudos realizados comprovam que a escória de aciaria pode ter valores de porosidade e absorção variando em um intervalo maior do que o recomendado pela norma sem que haja perda em suas propriedades. Estão sendo providenciadas medidas para readequação dos valores destes parâmetros de forma a diferenciar a escória dos demais agregados.

Estes valores podem nos dar uma ideia de como estes materiais irão se comportar em uma via, podendo assim, prever eventuais problemas e ajudando a detectar a necessidade de possíveis intervenções.

4.1.6 Forma do material

A geometria apresentada pelos grãos do material a ser empregado como lastro ferroviário deve possibilitar uma correlação entre suas dimensões de maneira que a forma predominante seja cúbica. Esta característica está diretamente ligada ao embricamento do material e a interação proveniente do contato entre os grãos. Grãos de formato cúbico possibilitam um maior grau de intertravamento entre si, fornecendo maior rigidez e resistência ao lastro, características imprescindíveis ao correto funcionamento da estrutura. Outra característica importante propiciada pela forma cúbica das partículas é a prevenção de recalques, que poderiam vir a ocorrer com a passagem do material rodante caso apresentassem forma predominantemente lamelar.

A Tabela 4.9 apresenta os resultados obtidos no ensaio para determinação da forma do material em concordância com as classificações propostas pela NBR 6954 bem como por Raymond e Diyaljee (1979).

Tabela 4.9 – Resultados do ensaio de forma do material em função do tempo de cura

Amostra	Relação B/A	Relação C/B	Relação $\sum A / \sum C$	Classificação NBR 6954	Classificação Raymond e Diyaljee, 1979
Inicial (T_0)	0,76	0,81	1,65	Cúbica	Cúbica
Metodologia UFOP (T_{60})	0,77	0,72	1,87	Cúbica	Cúbica

Os resultados demonstram uma predominância da forma cúbica obtida por meio das relações entre as dimensões das partículas que constituem as amostras avaliadas. Este fato torna favorável a aplicação do coproduto siderúrgico em linhas férreas, por conferir a via um lastro com boa composição e características que lhe permitem um bom desempenho funcional.

4.1.7 Fragmentos Macios e Friáveis

O ensaio para identificação do teor de fragmentos macios e friáveis consiste na determinação do percentual em massa total da amostra ensaiada que não é considerada “sã”. Na Tabela 4.10 são apresentados os resultados obtidos que demonstram a evolução deste parâmetro com o tratamento.

Tabela 4.10 – Percentual de fragmentos macios e friáveis em função do tempo de cura do material

Amostra	Números Fragmentos Analisados	Teor de Fragmentos Macios e Friáveis (%)
Inicial (T_0)	278	11,51
Metodologia UFOP (T_{60})	367	2,20

Os resultados obtidos demonstram que as amostras recém-vazadas, ao serem ensaiadas, apresentaram um percentual de fragmentos macios e friáveis cerca de 6% maior que o limite máximo recomendado pela NBR 5564 (ABNT, 2011) que é de 5%. Depois de decorridos os 60 dias de cura, o material apresentou queda significativa no teor de fragmentos macios e friáveis, atendendo aos limites normativos, fato este que demonstra a importância da cura antes da aplicação do coproduto ao fim desejado.

4.1.8 Resistência à Intempéries

O ensaio de resistência a intempéries é feito por meio da imersão dos corpos de prova em sulfato de sódio com posterior secagem e resfriamento. Este procedimento tem o intuito de simular o comportamento do material que compõe o lastro ferroviário frente a ação de variações climáticas intensas no decorrer de sua vida útil no período de operação da

via. Os resultados dos ensaios executados para as distintas fases do experimento são apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Percentual de resíduos gerados em função do tempo de cura do material

Amostra	Massa Inicial Total do Corpo-de-prova (g)	Massa Final Total do Corpo-de-prova (g)	Resíduos Gerados (%)
T0	698,04	697,43	0,10
T60	670,81	669,18	0,23

Como pode ser observado pelos resultados, houve um aumento na porcentagem de resíduos gerados na amostra de 60 dias em relação à amostra inicial, mas este fato não inviabiliza seu uso visto que o valor encontrado ainda está muito abaixo do limite máximo estabelecido pela NBR5564 (ABNT, 2011) que é de 10%, e em ambos os ensaios as amostras apresentaram aparência final homogênea, normal sem trincas devido à expansão de volume para todos os fragmentos da amostra.

A Tabela 4.12 apresenta um comparativo entre os parâmetros físicos da brita de gnaisse ensaiada por Sousa (2007) e da escória submetida ao tratamento de estabilização química. São apresentados também os limites normativos, de forma a possibilitar a verificação do enquadramento de ambos os materiais.

Tabela 4.12 – Comparativo das propriedades da escória tratada em relação à brita de gnaisse

Propriedade	NBR 5564/2011 (Lastro Padrão)	Manual AREMA/2002 (Escória)	Brita de Gnaisse (SOUSA, 2007)	Escória Tratada
Massa específica aparente mínima (t/m ³)	2,5	2,9	2,6	3,5
Absorção de água máxima (%)	0,8	2	0,23	0,81
Porosidade aparente máxima (%)	1,5	-	0,36	2,03
Los Angeles máxima (%)	30	30	21,10	11,43
Treton máximo (%)	25	-	16,0	6,60
Formato da partícula	cúbica	cúbica	cúbica	cúbica
Resistência a intempéries (%)	-	5	0,80	0,23
Fragmentos macios e friáveis (%)	5	5	18,30	2,20

A análise comparativa demonstra que, com exceção da absorção de água e da porosidade aparente, o coproduto apresentou superioridade em relação a todos os parâmetros apresentados pela brita de gnaisse.

4.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

4.2.1 Carga Pontual

Para obtenção do conjunto de dados necessários a correta interpretação dos ensaios de carga pontual, foi necessária a definição do Índice de Carregamento I_{S50} , do Índice de Anisotropia $I_{a(50)}$ e, por fim, da Resistência a Compressão Uniaxial δ_{UC} .

Para obtenção do Índice de Carregamento I_{S50} , foram consideradas as cargas de ruptura representadas com os respectivos diâmetros equivalentes, tomados como dimensão de referência dos corpos-de-prova utilizados no ensaio, o diâmetro $D_e=50\text{mm}$, para ambos os planos de ruptura avaliados.

O Índice de Resistência Anisotrópico ($I_{a(50)}$), é determinado a partir da divisão entre o Índice de Carregamento Perpendicular e o Índice de Carregamento Paralelo, expressa da seguinte forma:

$$I_{a(50)} = \frac{I_{S(50)\perp}}{I_{S(50)\parallel}} \quad (4.3)$$

A Resistência a Compressão Uniaxial (δ_{UC}) é obtida por meio da relação expressa por:

$$\delta_{UC} = C * I_{S(63,5)} \quad (4.4)$$

Em que C é o coeficiente experimental, condicionado pelo diâmetro dos corpos-de-prova e pelas características apresentadas pelo material. Para obtenção deste coeficiente, assim como nos trabalhos elaborados por Sousa (2007) e Fernandes (2010) foram adotados os valores estimados por Fernandes (2005) para escórias de aciaria LD, representados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Valores de C adotados para escória de aciaria LD (FERNANDES, 2005)

Diâmetro dos corpos-de-prova (mm)	Valores de C FERNADES (2005)
20	15,82
30	17,17
40	18,53
50	19,88
54	20,42
60	21,24

Os valores relativos às etapas inicial e final do tratamento de estabilização química do coproduto bem como aqueles referentes à brita de gnaisse ensaiada por Sousa (2007), são apresentados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Resultados obtidos no ensaio de carga pontual em função do tempo de cura do material

Amostra	Índice de Carregamento I_{S50} (MPa)		Resistência a Compressão Uniaxial δ_{UC} (MPa)		Índice de Anisotropia $I_{a(50)}$
	Plano L	Plano //	Plano L	Plano //	
Inicial (T0)	7,46	7,92	143,50	131,40	0,94
Metodologia UFOP (T60)	10,30	10,21	203,8	227,6	1,01
Brita de Gnaisse (SOUSA, 2007)	5,50	5,21	126,50	120,02	1,05

O comparativo entre os resultados apresentados nas diferentes etapas do tratamento possibilitam o acompanhamento da evolução dos parâmetros obtidos no ensaio. A apresentação dos dados referentes à brita de gnaisse é válida, pois ao compará-la com a escória tratada, podemos avaliar a compatibilidade entre a resistência mecânica apresentada por ambas.

A avaliação dos resultados obtidos possibilita a percepção de melhorias significativas dos parâmetros de resistência da escória após o tratamento de cura. Foram obtidos bons índices de carregamento para ambos os planos avaliados. Houve um expressivo aumento na resistência a compressão axial, sendo que estes foram da ordem de 42% e 73% para os planos perpendicular e paralelo respectivamente. Estes aumentos resultam em um afastamento do limite mínimo para Resistência a Compressão Uniaxial indicado pela NBR5564 (ABNT, 2011) que tem valor igual a 100MPa.

Quando comparada com a brita de gnaisse, a escória de aciaria tratada, apresenta expressiva superioridade em relação ao índice de carregamento e a resistência a compressão em ambos os planos avaliados.

Os índices de anisotropia obtidos (próximos a 1,0) indicam que as escórias ensaiadas não apresentam plano preferencial de ruptura, sendo sua resistência praticamente uniforme em todas as direções.

4.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA

4.3.1 Análises Químicas por MEV/EDS

A denominada microanálise eletrônica consiste na emissão de raios-X em uma região microscópica da amostra na qual incide um feixe de elétrons. Os comprimentos de onda bem como sua energia podem auxiliar na identificação do elemento emissor de radiação, já que, as linhas de raios-X características pertencem exclusivamente ao número atômico da amostra. Desta forma, espectros de raios-X podem ser obtidos para todos os elementos da tabela periódica com exceção do hidrogênio (H).

O detector de raios-X e o MEV partem do mesmo princípio físico para resultados diferenciados. O feixe de elétrons tem energia suficiente para ionizar camadas profundas de átomos e realizar a emissão de raios-X, além da emissão de elétrons retroespalhados que são utilizados na formação das imagens (DEDAVID *et al*, 2007).

No experimento do presente trabalho foi utilizado o detector que faz a captação dos raios-X por dispersão de energia (EDS). Este detector torna possível a obtenção de um histograma onde na abscissa são representadas as energias dos fôtons (keV) e na ordenada o número de fôtons recebidos (contagens).

Os raios-X característicos em microscopia eletrônica foram utilizados para formação de imagens que fazem uma aplicação do mapeamento por elementos. Na Figura 4.3 é representada a imagem para o estudo da distribuição de precipitados na escória recém-vazada e pulverizada onde são indicados onze pontos de análise. As Figuras 4.4 a 4.14

indicam os espectros correspondentes à composição da matriz dos precipitados em cada ponto indicado.

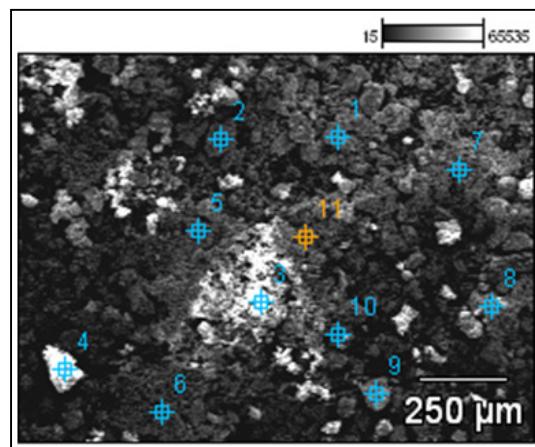


Figura 4.3 – Morfologia característica da escória utilizada na pilha experimental

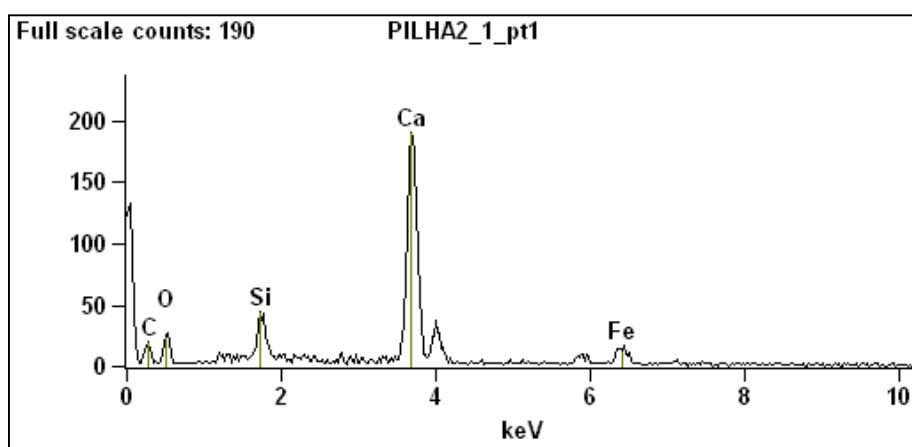


Figura 4.4 – Espectro obtido por microanálises de raios-X - Ponto 1

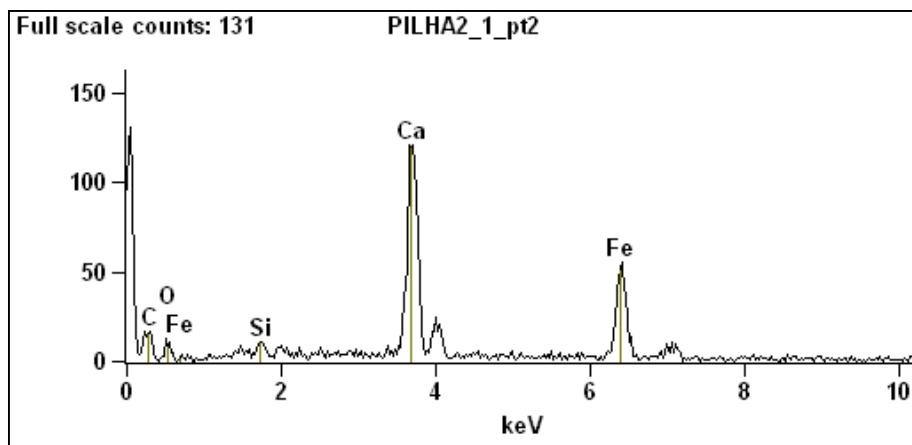


Figura 4.5 – Espectro obtido por microanálises de raios-X - Ponto 2

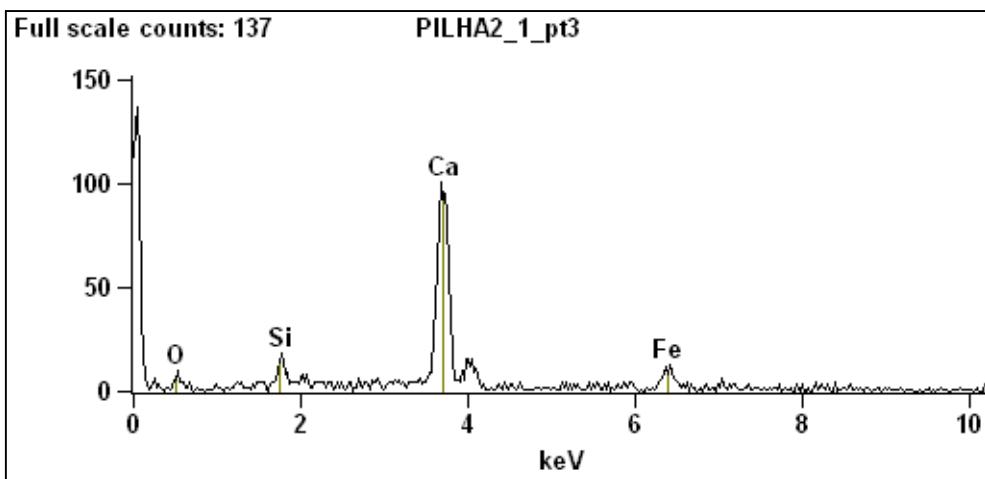


Figura 4.6 – Espectro obtido por microanálises de raios-X - Ponto 3

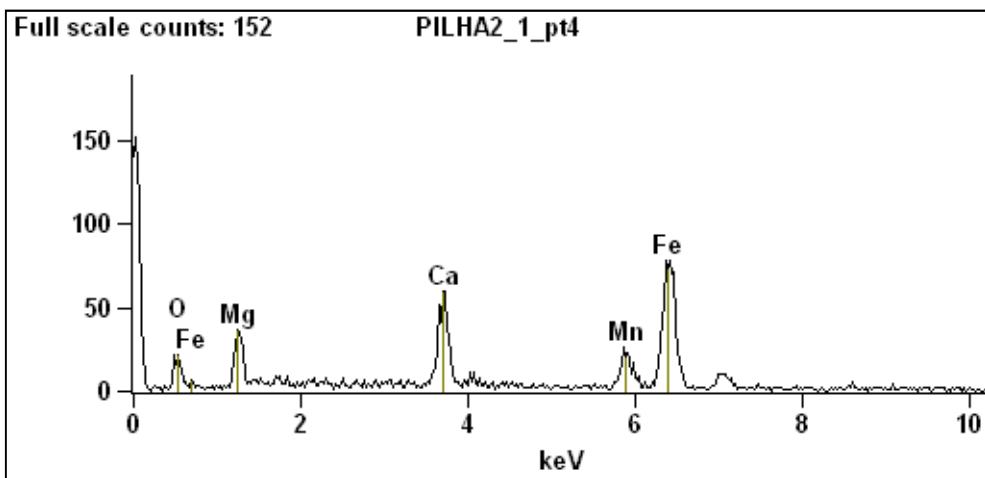


Figura 4.7 – Espectro obtido por microanálises de raios-X - Ponto 4

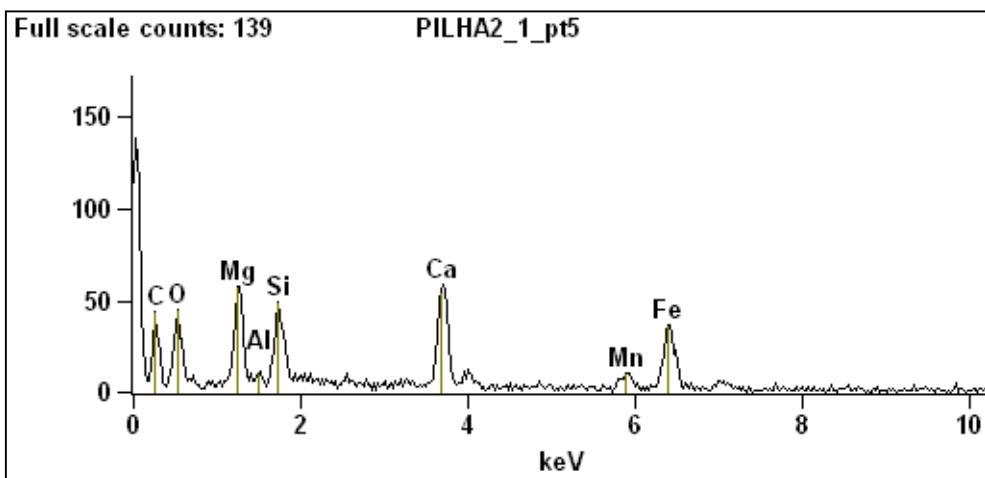


Figura 4.8 – Espectro obtido por microanálises de raios-X - Ponto 5

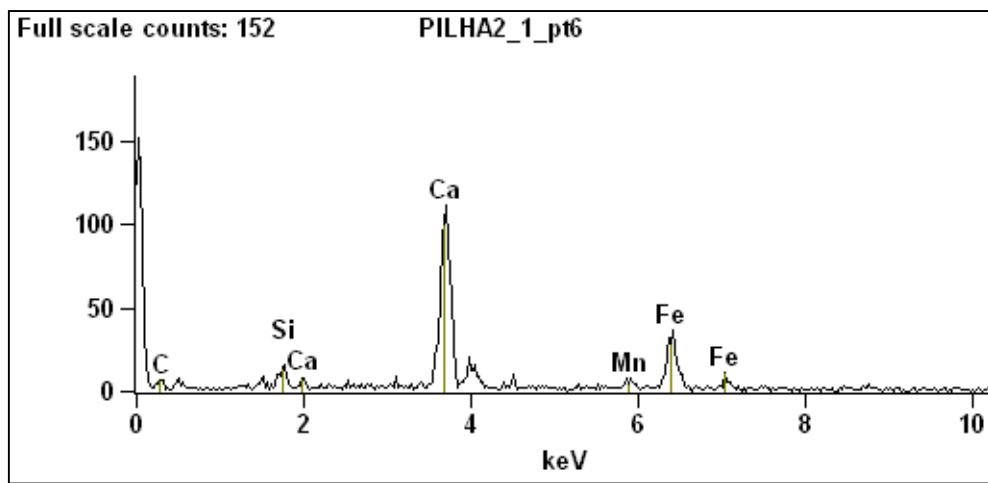


Figura 4.9 – Espectro obtido por microanálises de raios-X - Ponto 6

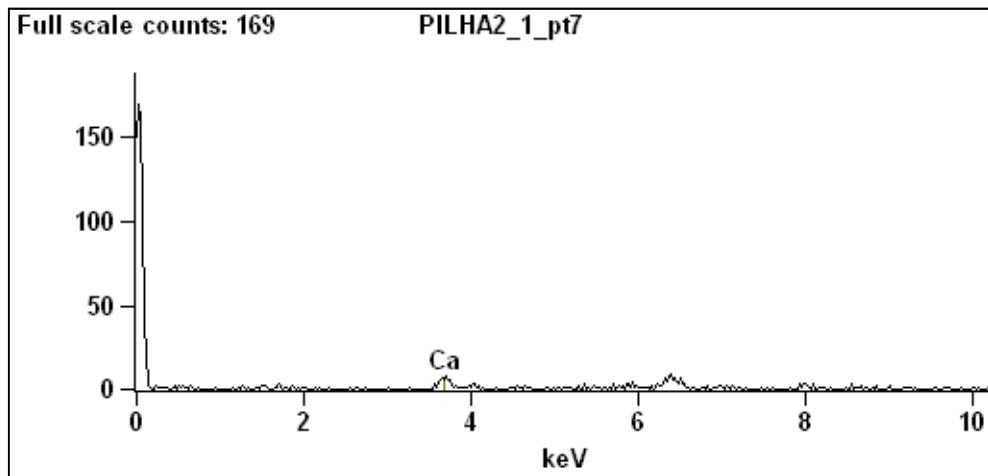


Figura 4.10 – Espectro obtido por microanálises de raios-X - Ponto 7

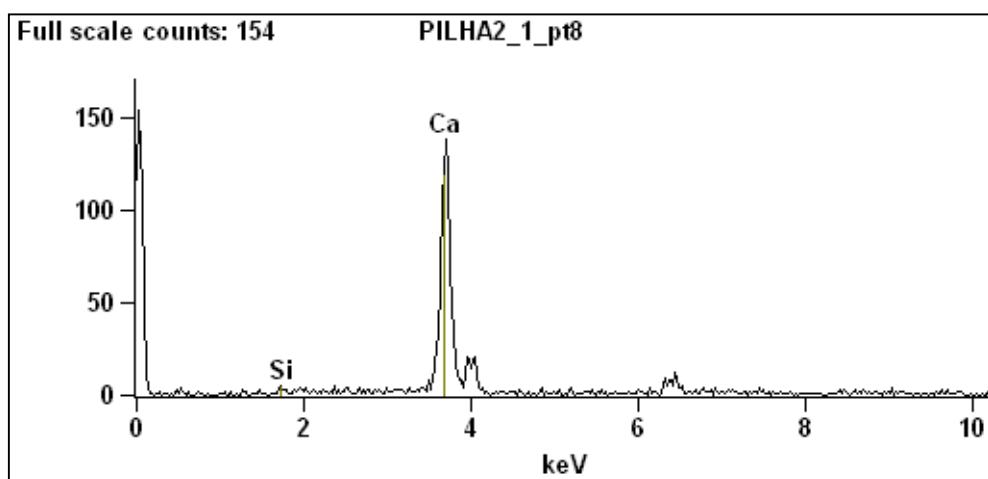


Figura 4.11 – Espectro obtido por microanálises de raios-X - Ponto 8

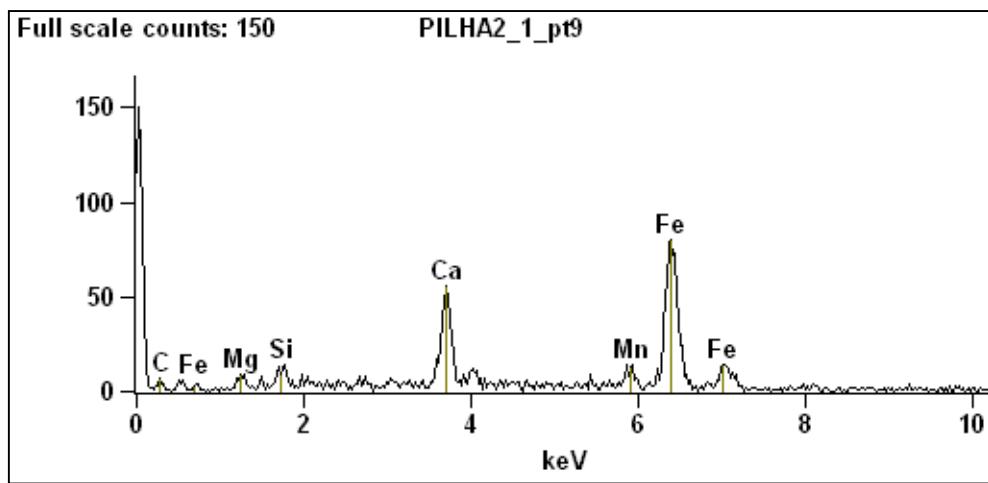


Figura 4.12 – Espectro obtido por microanálises de raios-X - Ponto 9

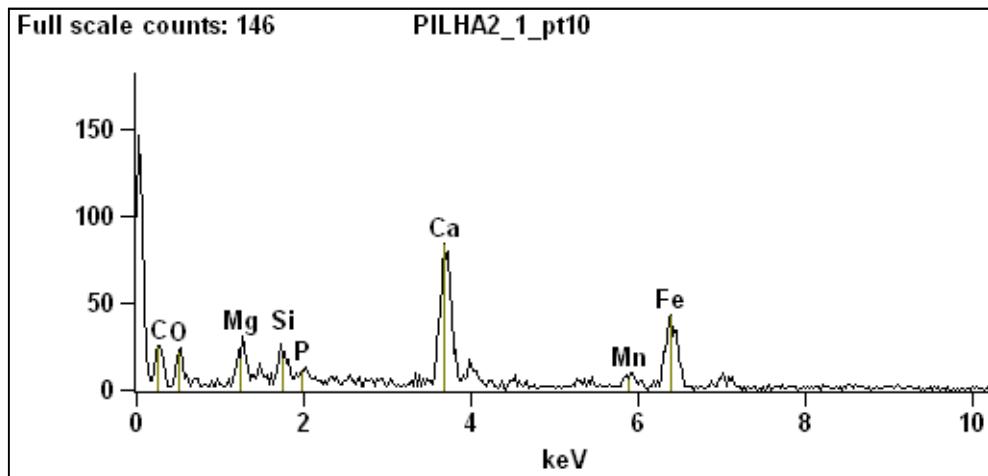


Figura 4.13 – Espectro obtido por microanálises de raios-X - Ponto 10

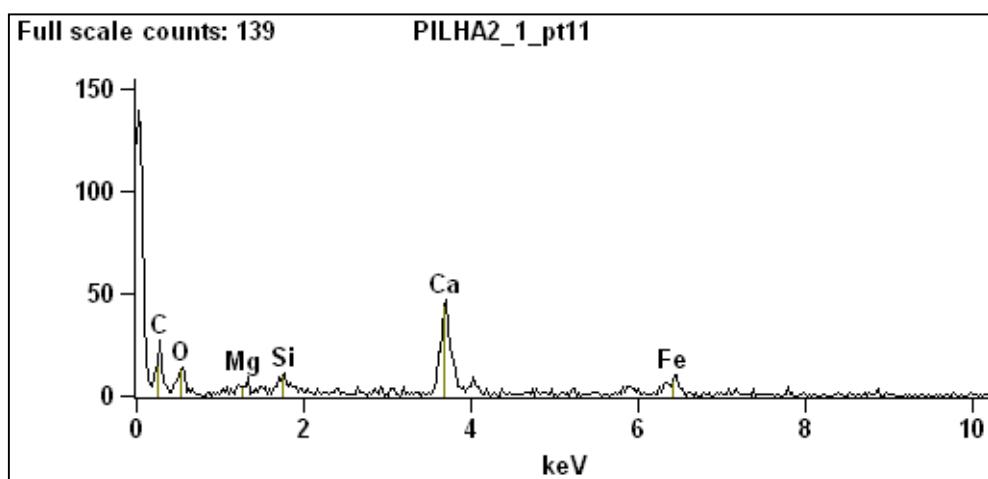


Figura 4.14 – Espectro obtido por microanálises de raios-X - Ponto 11

O microscópio eletrônico possibilita a determinação das porcentagens dos elementos por microanálise de raios-X. O método utilizado foi o da análise semiquantitativa que consiste na medição da superfície de picos que foram identificadas de forma prévia e a elas, atribuído um coeficiente para cálculo das porcentagens. A Tabela 4.15 apresenta a discriminação das espécies químicas bem como seu percentual em massa encontrado para cada analise pontual executada.

Tabela 4.15 – Resumo dos percentuais em massa dos componentes em cada ponto avaliado

Pilha Experimental	Espécies Químicas (% em massa)							
	CO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	MnO	Fe ₂ O ₃
Pt.1	53,18	-	-	5,42	-	34,71	-	6,69
Pt.2	53,48	-	-	1,33	-	21,69	-	23,50
Pt.3	-	-	-	6,71	-	76,32	-	16,97
Pt.4	-	17,45	-	-	-	13,41	12,66	56,49
Pt.5	68,83	8,64	0,95	5,24	-	5,74	2,66	7,94
Pt.6	35,23	-	-	4,41	-	34,33	4,26	21,77
Pt.7	-	-	-	-	-	100,00	-	-
Pt.8	-	-	-	2,21	-	97,79	-	-
Pt.9	23,86	3,61	-	3,28	-	12,78	6,44	50,02
Pt.10	64,30	3,83	-	2,72	0,82	11,05	2,19	15,10
Pt.11	79,63	1,52	-	2,07	-	11,59	-	5,19

Diante dos resultados apresentados nota-se que a quantidade de óxido de cálcio livre presente na escória de aciaria reafirma a necessidade do tratamento de estabilização química, de maneira a reduzir os inconvenientes que este e outros óxidos mesmo que de maneira menos expressiva causam quando aplicada na composição do lastro ferroviário.

4.3.2 Análises Químicas por TG

O ensaio de termogravimetria vem mensurar a mudança de massa de uma substância quando esta é submetida a uma programação controlada de temperatura.

Nos gráficos gerados a ordenada representa o percentual de massa *wt%* e na abscissa a temperatura pela qual a amostra é submetida no decorrer do experimento. As curvas apresentadas são a TGA e a sua derivada DTA que tem a função de aperfeiçoar a resolução para facilitar a comparação com outras medidas.

A curva DTA representa os picos endo ou exotérmicos, a curva TGA expressa as perdas de massa e a DTG vem explicitar as faixas de temperatura de cada reação ou transformação ocorrida durante o período em que a amostra esteve submetida ao ensaio. As Figuras 4.15 e 4.16 apresentam as curvas obtidas no ensaio de termogravimetria para os períodos de cura de 30 e 45 dias respectivamente.

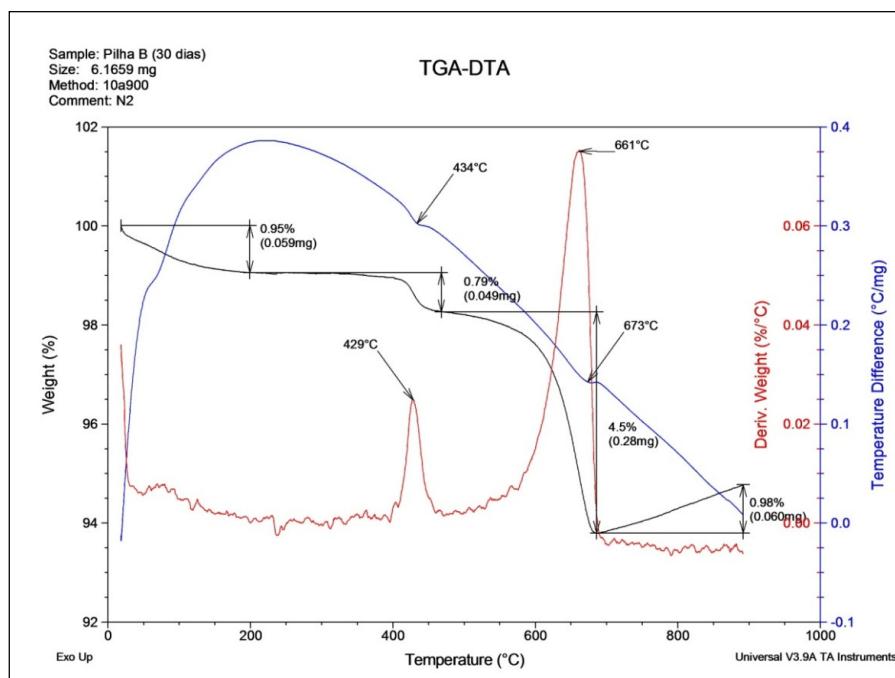


Figura 4.15 – Curvas DTA/TGA/DTG do material aos 30 dias de cura

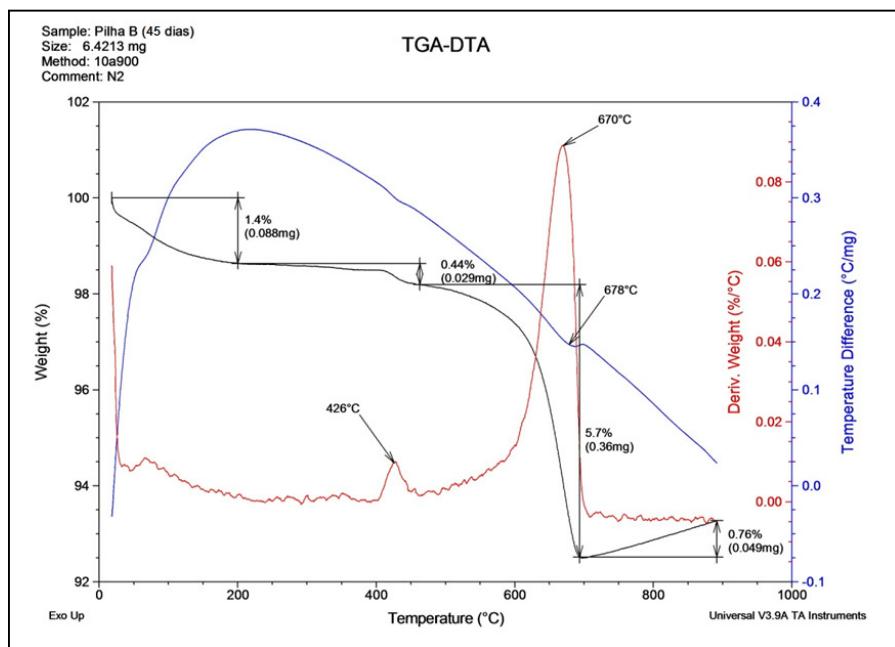


Figura 4.16 – Curvas DTA/TGA/DTG do material aos 45 dias de cura

A Tabela 4.16 apresenta de forma resumida para as amostras coletadas aos 30 e aos 45 dias de cura, as temperaturas de pico ocorridas durante as reações bem como sua classificação quando a liberação ou absorção de calor, os percentuais de perda de massa e faixa de temperatura onde ocorreram tais perdas.

Tabela 4.16 – Resultados das análises químicas por termogravimetria

Amostra coletada aos 30 dias de cura do coproduto			
Pico	Temperatura do Pico (°C)	Perda de Massa (%)	Faixa de Temperatura (°C)
-	-	0,95	19 - 200
1	434 (endo)	0,79	200 - 469
2	673 (endo)	4,50	469 - 687
-	-	0,98	687 - 891
Amostra coletada aos 45 dias de cura do coproduto			
-	-	1,40	18 - 200
1	432 (endo)	0,44	200 - 464
2	678 (endo)	5,70	464 - 694
-	-	0,76	694 - 891

O primeiro pico apresentado pela amostra aos 30 dias de cura, classificado como endotérmico, encontra-se a uma temperatura de 434°C. Essa faixa de temperatura corresponde à perda de hidróxido de cálcio ($\text{Ca(OH}_2\text{)}$), de acordo com os dados referentes às análises térmicas apresentados por Gumieri (2002). A autora apresenta ainda a equação 4.5 para calcular estequiométricamente o percentual de CaO correspondente.

$$\frac{\text{CaO}}{56} = \frac{\Delta\text{H}_2\text{O}}{18} \quad (4.5)$$

Sendo os números 56 e 18 correspondentes aos pesos moleculares dos componentes CaO e H_2O respectivamente. O valor de $\Delta\text{H}_2\text{O}$ é correspondente a perda de massa representada na Tabela 4.16 obtida pela curva TGA, correspondente ao processo de dehidroxilação do $\text{Ca(OH}_2\text{)}$. Desta forma, a equação 4.5 foi calculada para a amostra aos 30 dias de cura conforme a equação 4.6 a seguir:

$$\frac{\text{CaO}}{56} = \frac{0,79}{18} \rightarrow \text{CaO} = 2,46\% \quad (4.6)$$

De forma análoga, para a amostra aos 45 dias de cura foi obtido um percentual de CaO igual a 1,37%. É importante observar que estes valores obtidos são do percentual de CaO_{Livre} calculados em função da dehidroxilação do Ca(OH₂), sendo estas as parcelas hidratadas. A parcela não hidratada é apresentada graficamente na sequencia como conteúdo integrante do subitem 4.3.3.

O menor teor de CaO_{Livre} hidratado apresentado pela amostra aos 45 dias de cura ocorre pelo fato de que quanto menor o teor deste óxido não hidratado na escória menor é o seu decréscimo provocado pelo tratamento.

As curvas DTA/TGA/DTG apresentaram comportamentos semelhantes, no entanto, de acordo com os dados apresentados na Tabela 4.16, a amostra coletada aos 45 dias de cura apresentou maior perda de massa total em relação a amostra aos 30 dias de tratamento, o que indica um maior número de compostos hidratados na constituição do material.

4.3.3 Determinação do teor de cal livre

O ensaio para determinação do teor de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol foi realizado em concordância com os procedimentos da NBR NM 13 (ABNT, 2004). Para correta aferição dos resultados, a cada amostra coletada, foram realizados três ensaios, sempre observando a ocorrência de discrepâncias que, se ocorressem, indicariam a necessidade da realização de novos ensaios de verificação para que pudessem ser eliminados aqueles resultados que apresentassem maiores desvios em relação aos demais.

A Tabela 4.17 apresenta os resultados dos ensaios de laboratório para determinação do teor de cal livre onde podemos acompanhar a evolução dos mesmos no decorrer do período de execução do experimento. A Figura 4.17 ilustra uma curva representativa onde podemos observar a tendência das variações do teor de cal livre nas escórias estudadas em função de intervalos pré-definidos de monitoramento e amostragem.

Tabela 4.17 – Percentuais de cal livre obtidos em função do período de cura do coproduto

Período de Cura do Coproduto (Dias)	Teor de Cal Livre (%)
0	3,5
15	2,93
30	0,37
45	0,07

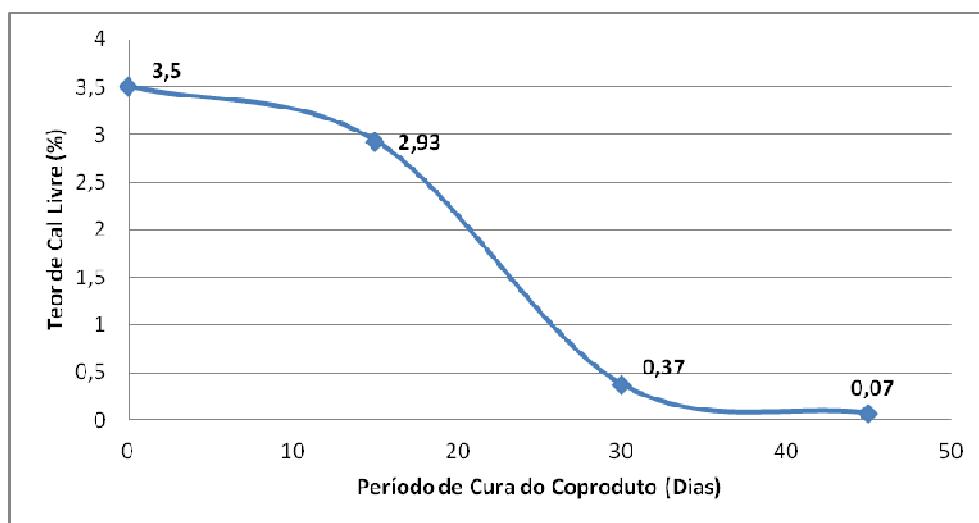


Figura 4.17 – Curva representativa do teor de cal livre em função do período de cura do coproduto

Os resultados obtidos indicam que a escória de aciaria LD apresentou uma quantidade final de 0,07% de cal livre em sua composição, o que significa uma queda de aproximadamente 98% em relação ao teor da amostra recém-vazada. Os valores obtidos indicam um teor de cal livre bem inferior ao limite máximo de 3% proposto pela AREMA e demonstram a eficiência da metodologia proposta na hidratação do óxido de cálcio livre, transformando-o em hidróxido de cálcio.

4.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL

4.4.1 Ensaios de lixiviação e solubilização

Os ensaios que foram executados têm a finalidade caracterizar e classificar ambientalmente a escória de aciaria estudada. Tal procedimento se da pela avaliação da periculosidade do material quando se analisa o impacto que suas propriedades físicas e

químicas podem exercer sobre a saúde pública e o meio ambiente. Desta forma, as avaliações foram realizadas quanto à corrosividade, reatividade e toxicidade.

Os dados para interpretação dos resultados analíticos dos parâmetros analisados nos ensaios de solubilização e lixiviação são apresentados nas Tabelas 4.18 e 4.19 a seguir:

Tabela 4.18 – Classificação de toxicidade por solubilização

Parâmetro	Valor Máximo Permitido (mg/L)	Concentração no Resíduo Solubilizado (mg/L)
Arsênio (mg As/L)	0,01	<0,01
Bário (mg Ba/L)	0,70	0,06
Cádmio (mg Cd/L)	0,01	<0,001
Chumbo (mg Pb/L)	0,01	<0,01
Cianeto (mg CN/L)	0,07	<0,01
Cromo Total (mg Cr/L)	0,05	<0,01
Fluoretos (mg F/L)	1,50	0,14
Mercúrio (mg Hg/L)	0,001	<0,0002
Nitrato (mg N/L)	10,00	0,07
Prata (mg Ag/L)	0,05	<0,01
Selênio (mg Se/L)	0,01	<0,01
Alumínio (mg Al/L)	0,01	<0,05
Cloreto (mg Cl/L)	250,00	8,46
Cobre (mg Cu/L)	2,00	<0,009
Ferro (mg Fe/L)	0,30	<0,1
Manganês (mg Mn/L)	0,10	<0,05
Sódio (mg Na/L)	200,00	<0,8
Sulfato (mg SO ₄ -2/L)	250,00	1,33
Zinco (mg Zn/L)	5,00	<0,1
Surfactantes (mg MBAS/L)	0,50	<0,1
Fenóis Totais (mg C ₆ H ₅ OH/L)	0,01	<0,001

Tabela 4.19 – Classificação de toxicidade por lixiviação

Parâmetro	Valor Máximo Permitido (mg/L)	Concentração no Resíduo Lixiviado (mg/L)
Arsênio	1,0	<0,01
Bário	70,0	0,04
Cádmio	0,5	<0,001
Chumbo	1,0	<0,01
Cromo Total	5,0	<0,01
Fluoretos	150,0	0,66
Mercúrio	0,1	<0,0002
Prata	5,0	<0,01
Selênio	1,0	<0,01

As análises realizadas permitiram a classificação da escoria de aciaria, de acordo com as normas ABNT NBR10004: 2004, 10005: 2004 e 10006:2004, como Classe II B (Não Perigoso – Inerte), em decorrência dos resultados não apresentarem indícios de seus constituintes solubilizados à concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez e dureza. As amostras não apresentaram ainda características corrosivas e reativas, sendo, portanto, o material considerado não Corrosivo e não Reativo.

4.5 ENSAIOS DE CONDUTIVIDADE E RESISTIVIDADE

4.5.1 Avaliação da condutividade elétrica do material

A condutividade elétrica consiste na capacidade de um meio aquoso de conduzir uma corrente elétrica. A condução se processa em decorrência da presença de íons e está condicionada principalmente a concentração total de substâncias ionizadas dissolvidas na água, a temperatura e a concentrações real e relativa de cada íon.

O período de monitoramento teve duração de 90 dias, no qual foram feitos diversos ciclos de carga e descarga com durações variando entre 3 e 10 dias para medição da condutividade elétrica da escória submersa, cujos valores encontram-se representados graficamente na Figura 4.18.

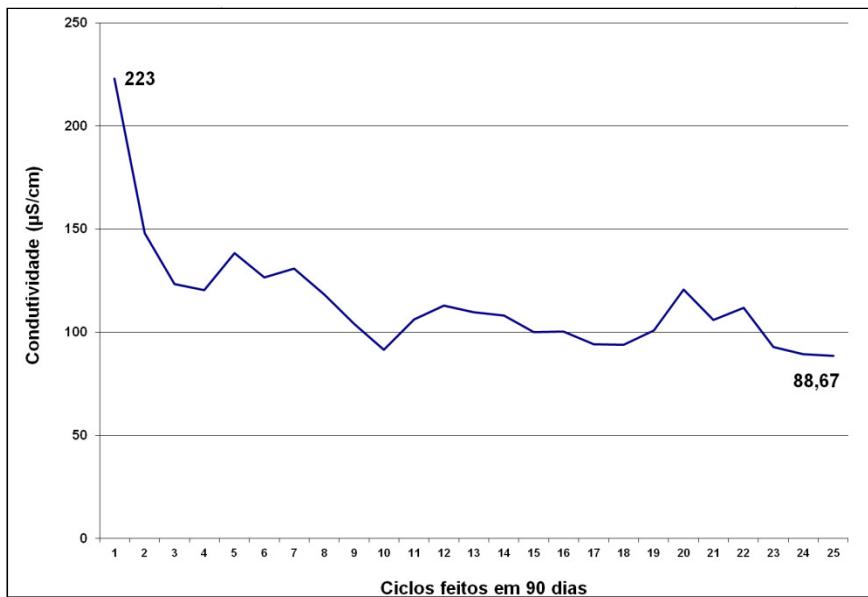


Figura 4.18 – Valores da condutividade em função do tempo de cura do material

Os resultados obtidos demonstram uma queda expressiva no valor da condutividade do material no decorrer do período de monitoramento. Inicialmente a condutividade da escória ensaiada apresentou valor de $223\mu\text{S}/\text{cm}$, já na medição final efetuada, apresentou uma queda em torno de 60%, chegando ao valor de $88,67\mu\text{S}/\text{cm}$, próximo a valores esperados para condutividade da água potável que se situam entre 20 e $70\mu\text{S}/\text{cm}$. Os valores de PH apresentados durante o experimento foram sempre básicos, variando entre 8 e 9 como pode ser observado na representação gráfica presente na Figura 4.19.

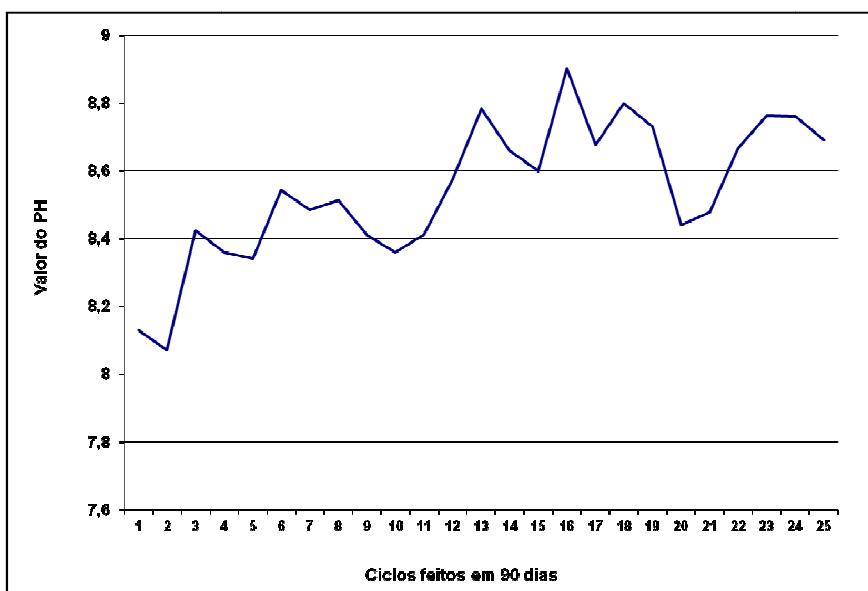


Figura 4.19 – Valores do pH em função do tempo de cura do material

Tais resultados vêm reforçar a importância da hidratação do coproduto para que este tenha bom desempenho quando aplicado a via.

4.5.2 Avaliação da resistividade elétrica do material

Optou-se neste trabalho pela construção de um simulador de resistividade em escala real pelo fato de que por meio dele podem-se reproduzir de maneira fiel condições adversas ocorridas em um segmento de uma via férrea qualquer que possam exercer influência quanto à capacidade resistiva do material que compõe o lastro.

Desta forma, foram feitas medições para avaliação da resistividade, considerando-se duas seções experimentais em escala real, ambas com o lastro composto por escória de aciaria LD submetida ao tratamento de cura para estabilização química e mesmas dimensões, diferindo entre si pelo tipo de dormente adotado, sendo que em uma foi utilizado dormentes de madeira e em outra, dormentes de aço. As medições foram feitas considerando-se variações climáticas constituídas por climas seco e chuvoso.

Assim como no trabalho desenvolvido por Sousa (2007), quando em clima seco, foi considerado dia ensolarado, com temperaturas entre 25 e 30°C, tendo decorridas as últimas 12 horas sem a ocorrência de chuvas. Quanto ao clima chuvoso, optou-se por molhar o material do lastro de ambas as seções artificialmente, por meio de aspersores durante período mínimo de 24h, sendo que as medições foram efetuadas entre 7 e 9 horas da manhã logo após o término da aspersão, com temperaturas entre 20 e 25°C.

Os valores obtidos durante as medições, contemplando todas as condicionantes anteriormente descritas são apresentados na Tabela 4.20.

Tabela 4.20 – Resultados das medições realizadas no simulador de resistividade

Material estudado	Tipo de Montagem	Resistividades Obtidas nos Testes (Ωm)			
		Dormentes de Madeira		Dormentes de aço	
		Clima			
		Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso
Escória de Aciaria LD	Entre Eletrodos	1220,17	1000,22	11423,29	10122,88
	Entre Trilhos	2425,21	1664,86	7752,15	1678,22

A resistividade foi medida entre trilhos e entre eletrodos para uma tensão de teste igual a 500V. Para ambas as seções os eletrodos foram posicionados de forma adjacente aos trilhos a uma profundidade de 35,0 centímetros e separados entre si por uma distância de 1,35 metros.

Com a finalidade de se obter um parâmetro comparativo, de maneira que possa ser atestada a eficiência da metodologia de cura adotada quanto a melhorias relacionadas à resistividade do material, foram considerados os valores obtidos no trabalho desenvolvido por Sousa (2007), no qual foram testadas duas amostras de escória de aciaria LD provenientes da USIMINAS e da CST, denominadas no presente estudo como “escória não tratada” 1 e 2 respectivamente, além de uma amostra de brita de gnaisse proveniente da Pedreira Brasília na região metropolitana de Vitória/ES. As Figuras 4.20 a 4.23 expressam graficamente os resultados deste comparativo.

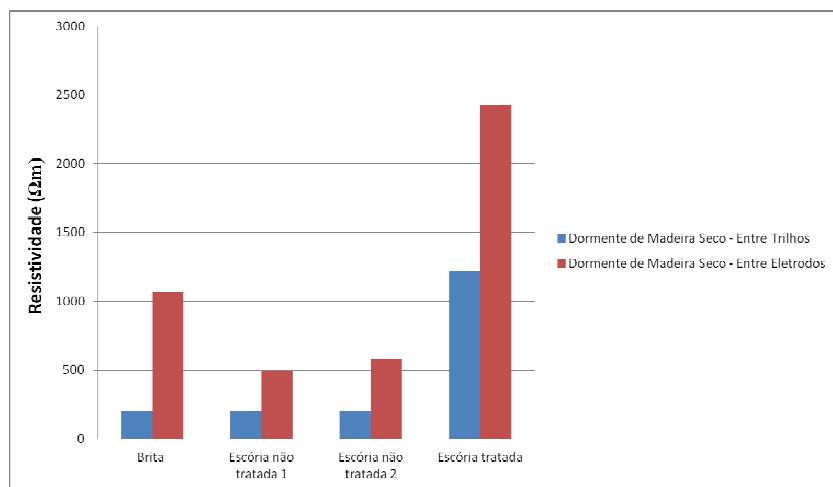


Figura 4.20 – Resistividade para seções com dormentes de madeira - clima seco

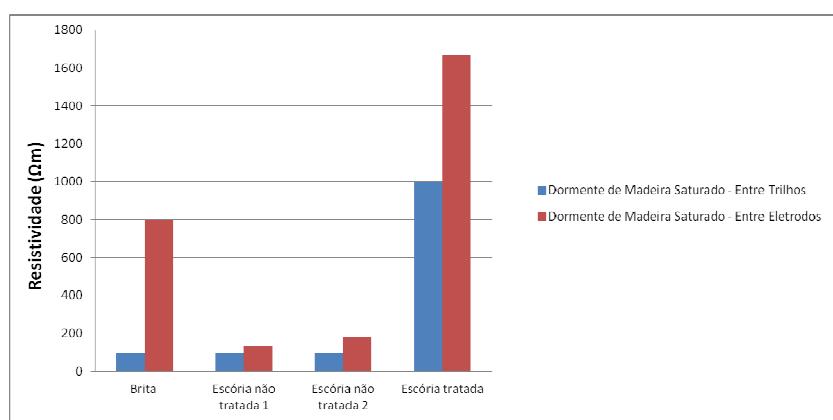


Figura 4.21 – Resistividade para seções com dormentes de madeira - clima chuvoso

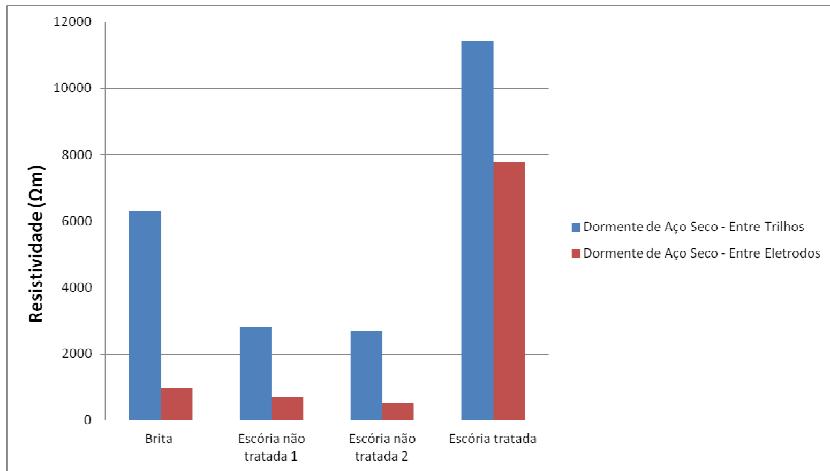


Figura 4.22 – Resistividade para seções com dormentes de aço - clima seco

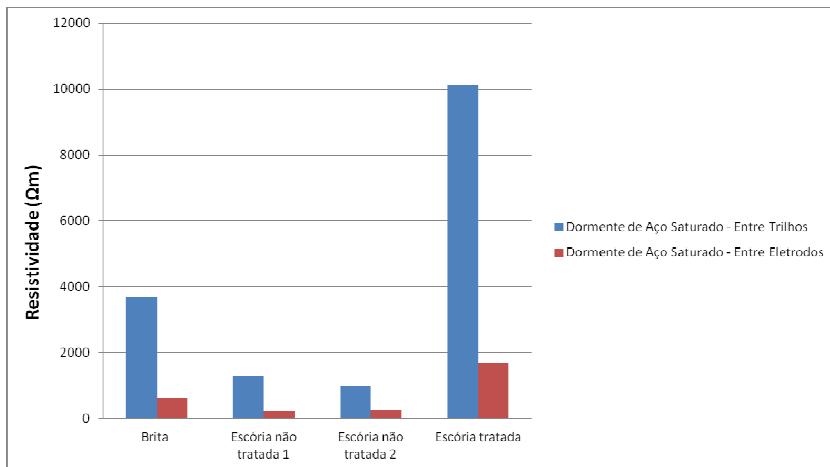


Figura 4.23 – Resistividade para seções com dormentes de aço - clima chuvoso

De acordo com os dados comparativos entre os diversos materiais, pode-se observar que a Metodologia de Referência Técnica quando aplicada seguindo-se os procedimentos cabíveis ao seu correto funcionamento, desempenhou papel fundamental na melhoria dos valores da resistividade da escória.

A escória, quando não submetida ao tratamento, apresentou em vários momentos valores da resistividade abaixo de $300\Omega\text{m}$ que é o limite mínimo proposto pela AREMA. Em relação à brita, quando foram executadas medições na seção dotada de dormentes de madeira, esta apresentou valores de resistividade abaixo do limite normativo tanto para o clima seco quanto para o chuvoso. A escória submetida ao tratamento em conformidade com a metodologia proposta obteve em todas as suas medições valores de resistividade bem superiores ao limite mínimo estabelecido por

norma, o que torna o quesito resistividade mais um fator que reforça a aptidão do coproducto para o emprego como lastro de ferrovias.

4.6 AVALIAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE CURA E DAS CONDICIONANTES AMBIENTAIS DE CAMPO

Como mencionado no subitem 3.3.1.2 do presente estudo, foi realizada a coleta dos dados referentes ao funcionamento do sistema proposto, a qual indicaria se o experimento estaria funcionando em concordância com o esperado no momento de sua concepção, sendo constituídos pela obtenção de informações sobre o molhamento da pilha experimental, de sua temperatura interna e do dióxido de carbono (CO_2) por ela emitido durante a hidratação.

O monitoramento das condições ambientais de campo indicaria a ocorrência de fatores externos ao experimento que poderiam influir de maneira significativa no andamento do mesmo. De maneira a possibilitar avaliação de seu grau de influência nos resultados finais obtidos, foram coletados durante o período de monitoramento a temperatura ambiente, a umidade relativa do ar e a precipitação.

4.6.1 Dados pertinentes ao funcionamento do sistema de cura

A central de armazenamento de dados (Data Logger) foi responsável pelo fornecimento das informações relativas ao molhamento e a temperatura interna das pilhas, que eram decodificados por meio de um computador para possibilitar a correta interpretação dos dados. A temperatura interna era medida também pela inserção de um termômetro na pilha durante as visitas periódicas ao local do experimento como maneira de confrontar os valores fornecidos pela “Data Logger” e verificar sua coerência. Os valores correspondentes à emissão do dióxido de carbono (CO_2) foram fornecidos por um aparelho medidor portátil.

Os sensores de molhamento foliar inseridos tanto na base quanto no centro geométrico da pilha, indicam se a mesma está sendo umectada durante todo o tempo e se a umectação é suficiente para abranger toda ela não deixando áreas secas. Quanto à operacionalidade do sistema, a Data Logger indicou que o mesmo esteve funcionando

durante todo o período do experimento, sem quedas de energia que impedissem o funcionamento do gerador e levassem a sua interrupção. Em relação a abrangência do molhamento, foi constatado que a água aspergida alcançou todos os pontos da pilha, fazendo com que a mesma estivesse umectada em sua totalidade por todo o processo.

De acordo com estudos realizados, maiores temperaturas favorecem a ocorrência das reações de hidratação. Neste sentido, buscando-se obter informações referentes às temperaturas internas da pilha no decorrer do experimento, de maneira a tornar possível a avaliação de sua contribuição frente a cura do coproduto, foram obtidos valores que estão representados graficamente em função do tempo de cura na Figura 4.24.

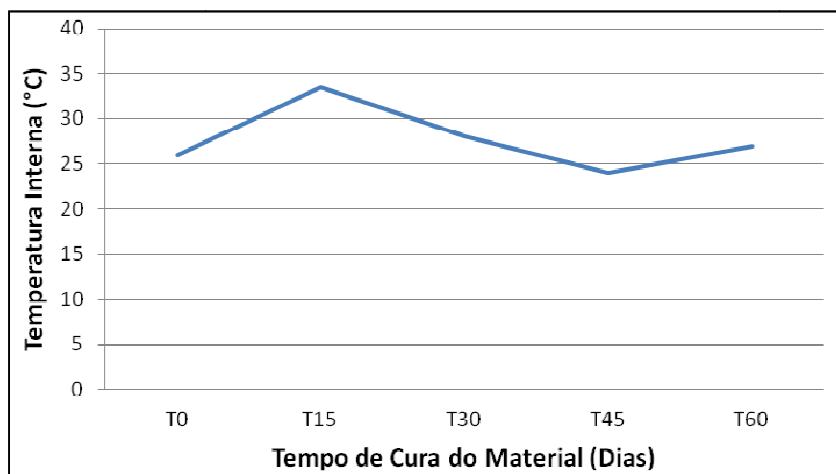


Figura 4.24 – Representação da temperatura interna da pilha no decorrer do tratamento

Para se avaliar o comportamento do teor de CO₂ e sua influência no tratamento, foram realizadas medições cujos valores obtidos encontram-se representados na Figura 4.25.

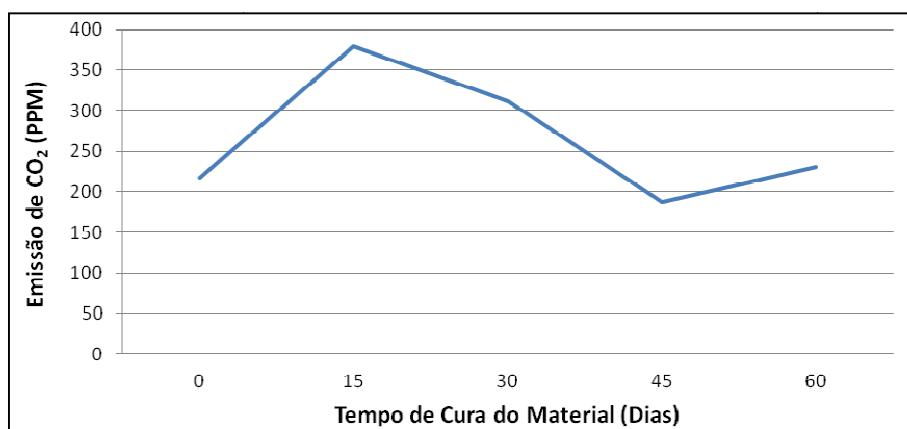


Figura 4.25 – Representação dos valores de emissão de CO₂ no decorrer do tratamento

Segundo Machado (2000), teores de CO₂ mais elevados, agindo na camada superficial da pilha, justificam a presença do hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) e do carbonato de cálcio (CaCO₃) na escória.

4.6.2 Monitoramento das condições ambientais de campo

Como meio de avaliar as condicionantes ambientais, durante as visitas periódicas para obtenção de dados referentes ao monitoramento e realização de amostragem, foram medidas a temperatura ambiente, a umidade relativa do ar e a incidência de chuvas na época do experimento. Os valores relativos a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar, foram obtidos por meio do aparelho medidor de CO₂ que os fornece como dados complementares, os valores de precipitação foram medidos com auxílio de um pluviômetro situado sobre a casa de força, este dispositivo esteve ligado a Data Logger de maneira que ela pudesse armazenar os dados e torna-los passíveis de interpretação computacional.

Os valores relativos ao monitoramento da temperatura ambiente estão dispostos na Figura 4.26, e como pode ser observado, as temperaturas no período de execução do experimento estiveram entre 26 e 31,5°C, não havendo grandes variações. A umidade relativa do ar apresentou valor mínimo de 59,4% e máximo de 85,8% durante o tempo em que o material esteve submetido ao tratamento de cura, de acordo com a representação dos dados na Figura 4.27.

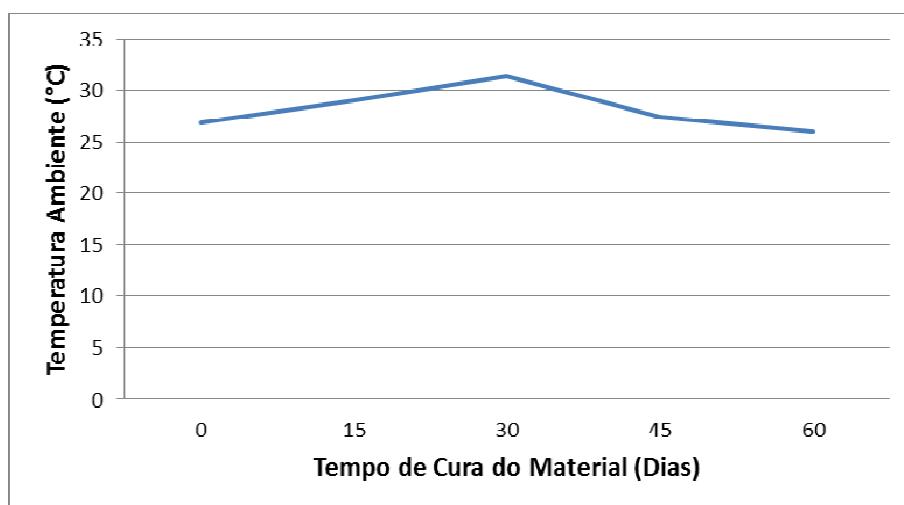


Figura 4.26 – Representação dos valores da temperatura ambiente no decorrer do tratamento

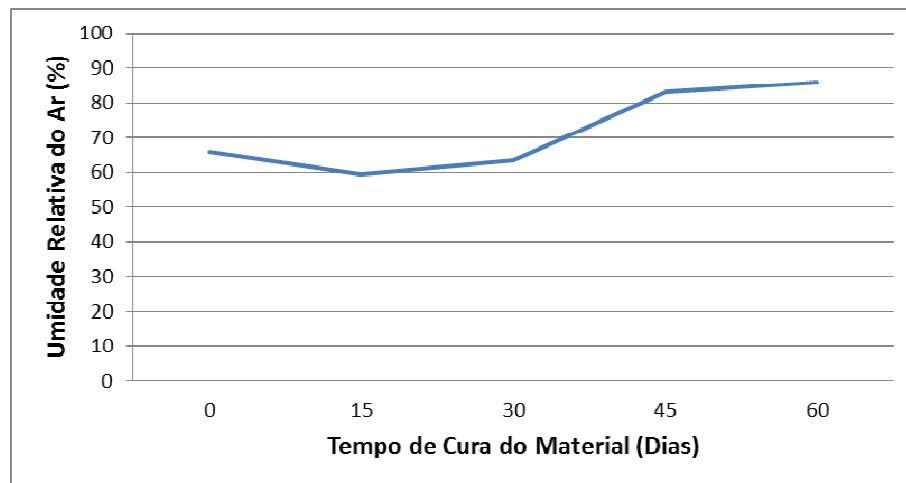


Figura 4.27 – Representação dos valores da umidade relativa do ar no decorrer do tratamento

Como Data Logger apresentou falha na captação dos dados pluviométricos, a Figura 4.28 representa os valores de precipitação obtidos para os meses de abrangência do tratamento fornecidos pelo INMET- Instituto Nacional de Meteorologia.

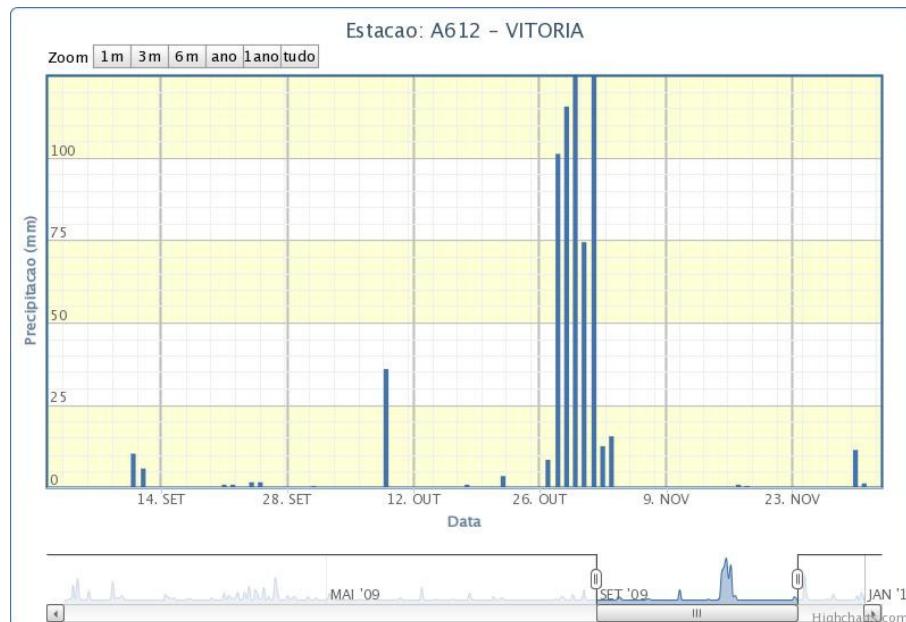


Figura 4.28 – Representação dos valores de precipitação no decorrer do tratamento (INMET, 2012)

Por meio da análise dos dados pode-se perceber claramente que o mês de outubro de 2009 apresentou alto índice pluviométrico, estando segundo Correa *et al* (2010) quatro vezes superior ao que rotineiramente é verificado para a região nesta mesma época.

Capítulo 5

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esta pesquisa contemplou uma extensa campanha laboratorial e monitoramento das condições ambientais de campo em pilhas de escória de aciaria LD dispostas em pátio industrial. Por meio dos ensaios realizados em laboratório e das análises dos resultados, teve o objetivo de reduzir o teor de cal livre presente na composição da escória e com isso mitigar os efeitos gerados pela expansão e quebra dos grãos. Dessa forma, foi implementado uma metodologia de hidratação e carbonatação nas pilhas de escória durante o período de 90 dias.

Neste capítulo são abordados os aspectos referentes às etapas de execução do experimento e o parecer conclusivo decorrente da análise dos resultados finais apresentados.

5.1 CONCLUSÕES REFERENTES À CAMPANHA DE ENSAIOS

LABORATORIAIS E DE CAMPO

A campanha de ensaios laboratoriais e de campo possibilitou por meio de seus resultados, a formação de um parecer conclusivo quanto aos aspectos formadores da caracterização da escória, denominada no presente estudo como coproduto siderúrgico em decorrência da possibilidade de sua utilização, na engenharia e demais áreas nas quais se fizer pertinente, desde que de forma ambientalmente adequada.

Quanto à caracterização física, são apresentados os seguintes aspectos:

- As amostras não se enquadram nas faixas padrão da ABNT em decorrência da presença de finos, provenientes da quebra excessiva dos grãos depois de submetidas ao tratamento de estabilização química por hidratação. Assim como mencionado, os finos gerados podem reduzir de maneira significativa a capacidade drenante do lastro, como forma de mitigar este fato indesejado e enquadrar a escória quimicamente estável nas faixas normativas para lastro ferroviário, torna-se necessário que o coproduto passe novamente pela planta

de beneficiamento de maneira que um novo peneiramento possa promover uma seleção das partículas de acordo com os percentuais retidos indicados para cada peneira, obtendo, desta forma, uma faixa granulométrica compatível com o fim de interesse.

- A absorção de água e a porosidade aparente, parâmetros diretamente relacionados, não atenderam aos limites propostos pela NBR 5564 (ABNT, 2011). Para o enquadramento junto aos limites normativos, há possibilidade da realização de ajustes nos processos de produção e resfriamento da escória. Entretanto, em função da diferença quanto à formação e constituição da escória de aciaria em relação à brita e demais agregados, foram elaborados estudos específicos para definição de uma faixa de valores relativos a estes parâmetros, que possibilitasse seu enquadramento sem que houvesse perda de suas propriedades de resistência, essenciais a sua aplicabilidade como lastro ferroviário. Desta maneira, foram definidos como limites máximos, 4% para absorção de água e 6% para porosidade, atendidos pelos resultados apresentados no subitem 4.1.5 do presente estudo. Os novos limites propostos, com valores oscilando em intervalos maiores que os previstos em norma, têm sua validade confirmada frente às melhorias ocorridas nas propriedades relativas aos demais ensaios.
- Com relação aos demais ensaios de caracterização física do material, pode-se observar uma melhoria nos parâmetros e enquadramento dos mesmos nos limites normativos. Houveram melhorias quanto ao desgaste do material por atrito entre partículas medido pelo ensaio de Abrasão Lós Angeles; em sua capacidade de resistência a impactos avaliada pelo ensaio de determinação do Índice de Tenacidade “Tréton”; o ensaio para se determinar a forma do material indicou, por meio da relação entre suas dimensões, a predominância da forma cúbica; a quantidade de fragmentos macios e friáveis manteve-se dentro do percentual aceitável; e a perda de massa por desagregação quantificada pelo ensaio de resistência a intempérie também apresentou-se de forma satisfatória quanto ao enquadramento na faixa de valores relativa que viabilizam sua aplicação.

Tais resultados demonstram uma significativa evolução dos parâmetros às características físicas do material, atestando, desta forma, a eficiência do tratamento de estabilização química do coproduto ao ser avaliado quanto a sua aplicabilidade como lastro ferroviário.

A avaliação do material quanto às características pertinentes a resistência mecânica, possibilitou, por meio do ensaio de carga pontual, a observação do comportamento frente ao carregamento aplicado em diferentes planos susceptíveis à ruptura. Os resultados evidenciaram um ganho de resistência a compressão uniaxial do coproduto depois de estabilizado quimicamente estando estes valores superiores aos limites mínimos previstos em norma. Os índices de anisotropia indicaram um material com resistência uniforme em todas as direções, não apresentando plano preferencial de ruptura.

Os resultados dos ensaios realizados para avaliação quanto a caracterização química e mineralógica do coproduto, possibilitou por meio de sua análise criteriosa a formação de um parecer final onde são feitas as seguintes considerações:

- A Microscopia Eletrônica de Varredura, que quantifica o percentual em massa das principais espécies químicas presentes na constituição do material, e as análises por Termogravimetria, que quantificam a mudança de massa de uma substância quando esta é submetida a uma programação controlada de temperatura, demonstraram por meio de um comparativo entre amostras coletadas em etapas distintas do experimento, que no decorrer do tratamento, houve um significativo aumento no percentual de óxidos hidratados e consequente queda no teor de cal livre presente na composição da escória.
- Os resultados dos ensaios MEV e das análises térmicas foram confirmados pelo ensaio de determinação do teor de cal livre que indicou, depois de decorridos 45 dias de cura, um percentual de cal livre muito inferior à escória recém-vazada, estando em conformidade com o recomendado por normas internacionais. Este comportamento vem confirmar o esperado durante a concepção da metodologia adotada, reforçando sua eficácia quanto a estabilização química do coproduto.

As avaliações da toxicidade por lixiviação e solubilização permitiram caracterizar ambientalmente o coproduto tratado, fornecendo como classificação do coproduto estabilizado quimicamente o enquadramento na Classe II B, sendo, portanto, um material não perigoso e inerte, não apresentando indícios de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores a aos padrões de potabilidade da água, além de ser não corrosivo e não reativo. Estas características indicam que o material não apresentará riscos ao ser humano e ao meio ambiente quanto aplicado.

Os ensaios de condutividade elétrica apresentaram resultados compatíveis com os valores esperados para condutividade da água potável após medições feitas para ciclos realizados durante o período de 90 dias. A resistividade da escoria estabilizada, medidas para todas as condicionantes propostas, obteve para todos estes casos, valores superiores a 300 ohms, encontrando-se em conformidade com o estabelecido pela AREMA. É importante ressaltar que os valores da resistividade apresentaram-se superiores às amostras da brita de gnaisse ensaiada no trabalho desenvolvido por Sousa (2007), que é o material convencionalmente utilizado como lastro ferroviário.

Ainda considerando a brita de gnaisse ensaiada por Sousa (2007) como referencial, ao observar os limites normativos e o enquadramento de ambos os materiais nesta faixa de valores, é de fácil percepção a superioridade do coproduto frente ao material britado. A exceção, conforme já mencionado, fica por parte da absorção de água e porosidade aparente, que possuem limites diferenciados dos indicados pelas normas convencionalmente utilizadas, pelo fato da escória possuir constituição diferente em relação aos demais agregados.

A análise comparativa dos resultados possibilita afirmar que, quando devidamente tratada, a escória de aciaria possui todas as características necessárias para se desempenhar de maneira satisfatória a função de lastro ferroviário, sem perdas em relação à brita de gnaisse destinada rotineiramente a este fim.

5.2 CONCLUSÕES REFERENTES AO FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE CURA E AS CONDICIONANTES AMBIENTAIS DE CAMPO

O funcionamento do sistema de cura, de maneira adequada ao que foi idealizado durante a concepção da metodologia de referência técnica é essencial, pois tem influência direta na uniformidade do tratamento do material disposto na pilha e em quão extenso será período necessário para se obter um coproducto estabilizado quimicamente e apto a ser aplicado ao fim proposto.

O monitoramento da umectação da escória que compõe a pilha experimental, executado pelos sensores de molhamento foliar, indicou presença de água em toda ela, não havendo a existência de áreas secas. Tal fato é de suma importância, pois indica que as reações de hidratação ocorreram por todo material de maneira semelhante de forma que, ao fim do experimento, obtemos uniformidade quanto às suas características independente do ponto de amostragem adotado.

A central de armazenamento de dados indicou um funcionamento sem interrupções por parte da aspersão mecanizada durante todo o período de realização do experimento, o que indica a não ocorrência de falhas no abastecimento da caixa d'água que alimenta a sistema e nem mesmo quedas de energia que impossibilitasse seu funcionamento. A ausência de interrupções durante o processo traz confiabilidade aos dados que indicam um período entre 45 e 60 dias de cura para se obter um coproducto quimicamente estável.

O monitoramento da temperatura interna da pilha experimental indicou uma faixa de valores dentre os quais, os mais altos estiveram presentes no período em que houve maior redução do teor de cal livre, indicando que reações de liberação de calor estão ocorrendo com a hidratação.

As concentrações de CO₂ agindo na camada superficial da pilha situaram-se em uma faixa de valores condizentes com regiões onde há presença de intensa atividade industrial. No entanto, uma variação de valores que pudesse evidenciar a ocorrência de reações de carbonatação, não foi observada nos resultados obtidos por meio do monitoramento deste parâmetro.

Os valores resultantes do monitoramento da umidade relativa do ar nas proximidades da pilha experimental estiveram, durante a maior parte do experimento, acima dos 60%. Tal percentual é fortemente influenciado pelo do sistema de aspersão mecanizada em funcionamento constante durante todo o período de cura do material.

Os índices pluviométricos apresentados demonstram que já no período final do tratamento de cura da escória, houve uma incidência de chuvas atípica, com intensidade bem superior ao histórico apresentado para a região. Contudo, este evento não exerceu influência no resultado final do experimento, já que no momento em que ocorreu, o coproduto já se encontrava quimicamente estável, apresentando valores do teor de cal livre que viabilizam sua aplicação.

5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A referida campanha foi conduzida em escala laboratorial, e para a completa implementação do sistema de aspersão, considerando-se a disposição da escória em baias nos pátios industriais, como é prática comum nas grandes siderurgias, são necessárias algumas adaptações e devem ser realizadas as seguintes recomendações quanto às disposições construtivas:

- No que se refere às disposições construtivas para a estabilização química da escória de aciaria LD é preciso ressaltar que não pode haver pontos cegos nas pilhas de material, pois a existência de áreas sem a presença de água resultará em uma menor redução no teor de cal livre presente na composição da escória. Deve-se garantir que a aspersão nas baias seja completa, e para isso o número existente de canhões nos pátios industriais deve ser suficiente para suprir esta demanda. Para este feito sugere-se a contratação de uma empresa especializada para tal execução.
- Outro aspecto importante é a altura máxima que as disposições devem possuir, não devendo ultrapassar 2 metros de altura, pois sendo ultrapassado este limite, haverá um aumento do volume de material a ser estabilizado, e assim, haverá partículas de escórias que não receberão a quantidade de água necessária para a

completa hidratação dos óxidos instáveis propensos a expansão volumétrica e posterior fragmentação.

A partir de um sistema de aspersão eficiente, que não tenha pontos cegos nas disposições de escória e não ocorrendo períodos com falta de água para hidratar os compostos, pode-se afirmar que o tempo necessário para que o processo de estabilização química se complete com êxito é de cerca de 45 dias em pilhas de até 2 metros de altura.

A estabilização química da escória de aciaria LD, obtida pela aplicação experimental da metodologia proposta, consistiu essencialmente na redução do teor cal livre presente em sua constituição. Tal processo trouxe consigo melhorias significativas quanto às propriedades físicas, mecânicas e de resistividade, adequando o coproducto aos limites normativos propostos, que viabilizam sua aplicação como lastro de ferrovias.

5.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No intuito de se aprimorar os estudos referentes à elaboração e aplicação de metodologias de estabilização química, que viabilizem a aplicação do coproducto siderúrgico, sugere-se que sejam considerados em pesquisas futuras os seguintes aspectos:

- Estudo da estabilização química da escória de aciaria LD na fase líquida, por meio da adição de argilo-minerais. Este procedimento possibilitaria a combinação de elementos, que agiriam de forma a manter os óxidos instáveis presentes na escória, em concentrações aceitáveis à sua aplicação;
- Estudo da estabilização química da escória de aciaria LD quando submetida ao contato com vapor d'água, com sua disposição, assim como no presente estudo, em formato de pilhas. É de interesse da avaliação deste método, a verificação de sua eficácia frente a locais expostos às condicionantes ambientais e em locais que impeçam sua influência;

- Estudo do comportamento da escória de aciaria LD em relação a dimensão dos grãos e teor de óxidos instáveis em sua composição, quando submetida ao controle da temperatura de resfriamento, aliado a aplicação de choque-térmico em intervalos pré definidos;
- Realização do ensaio PTM-130/78, como forma de acompanhar a evolução do comportamento expansivo da escória, no decorrer do tratamento de estabilização química;
- Montagem de trechos experimentais instrumentados, para avaliação do comportamento do lastro constituído por coproduto siderúrgico, frente às solicitações impostas pelo tráfego ferroviário.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, G. K. A. **Os Dormentes Ferroviários, seu Tratamento e o Meio Ambiente.** Rio de Janeiro: Artigo. IME, 2005.

AMARAL, A. **Manual de Engenharia Ferroviária.** Porto Alegre: Editora Globo, 1957.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5731:** Determining of Point Load Strength Index of Rocks. 1995.

AREMA. **Manual for Railway Engineering.** Lanham: American Railway Engineering and Maintenance Association – AREMA, 2001. v. I - IV.

AREMA. Communications and Signals. In: AREMA. **Communications & Signals.** Lanham: American Railway Engineering and Maintenance – AREMA, 2003. cap. 7, p. 265-303.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS – ABM: **Estudo perspectivo do setor siderúrgico.** Brasília, ABM – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004:** Resíduos Sólidos: Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005:** Lixiviação de resíduos: Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006:** Solubilização de resíduos: Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5564:** Via férrea – Lastro ferroviário – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6954:** Lastro padrão: Determinação da forma do material: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7418:** Lastro padrão: Determinação da massa específica aparente, da absorção de água e da porosidade aparente do material: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7702:** Lastro padrão: Determinação da resistência do material à intempéries do material: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8697:** Lastro padrão: Determinação do teor de fragmentos macio e friável - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8938: Determinação da resistência ao choque: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 13: Cimento Portland: Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol: Análise química. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: Agregados: Determinação da composição granulométrica: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 51: Agregado graúdo: Ensaio de abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM-ISO 3310-1: Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação - Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES FERROVIÁRIOS – ANTF: Balanço do Transporte Ferroviário de Cargas 1997 – 2011. Disponível em: <http://www.revistaferroviaria.com.br/upload/ANTF_balanco%202011.pdf>. Acesso em: 15 março 2012.

BRINA, H. L. Estradas de Ferro. 1^a Ed. Rio de Janeiro: LCT – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 1983. 258 p.

CAMPOS, V. F. Tecnologia de fabricação do aço líquido. Belo Horizonte: UFMG, 1980. Volume 1.

CASTELO BRANCO, V. T. F. Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado. Rio de Janeiro: Dissertação de mestrado. COPPE, 2004. 135 p.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – CNI: A Indústria do aço no Brasil. In: ENCONTRO DA INDÚSTRIA PARA SUSTENTABILIDADE. 2012. Brasília.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT: Pesquisa CNT de Ferrovias 2011. Brasília: CNT – Confederação Nacional do Transporte, 2011.

CORREA, W. S. C.; SIMÕES, A. S.; MARCHIORO, E. Análise do balanço hídrico e da precipitação do município de Vitória (ES) no cenário climático atual: Parte I. Vitória: UFES, 2010.

DAVID, R. K.; DAVID, E. G.; BONENENTE, L. I. Implantação de dormentes ambientalmente corretos: Responsabilidade social e ambiental. In: 2º Concurso de Monografia – A Cidade nos Trilhos, 2006, Rio de Janeiro. **Monografias.** Rio de Janeiro: CBTU, 2006.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura – Aplicação e preparação de amostras.** Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

FERNANDES, D. P. **Estudo de estabilização química, geo-mecânica e ambiental das escórias de aciaria LD para fins de aplicação como material de lastro ferroviário em vias sinalizadas.** Ouro Preto: Dissertação de Mestrado. UFOP, 2010. 142 p.

FERNANDES, G. **Comportamento de Estruturas de Pavimentos Ferroviários com Utilização de Solos Finos e/ou Resíduos de Mineração de Ferro Associados a Geossintéticos.** Brasília: Tese de doutorado. UnB, 2005. 253 p.

FERNANDES, J. A. S. **Modelação do Comportamento Mecânico de Vias-Férreas.** Lisboa: Dissertação de Mestrado. FCT-UNL, 2011.

FILHO, M. X. **A Importância do Modal Ferroviário no Transporte de Carga no Brasil Utilizando a Intermodalidade.** São Paulo: Monografia. Centro Tecnológico Zona Leste, 2006. 78 p.

FLEURY, P. F. **Ferroviás brasileiras:** dez anos de privatização. Instituto de Logística e Supply Chain, 2007. Disponível em: <http://www.ilos.com.br/site/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=10&Itemid=44&mosmsg=Voc%EA+est%E1+tentando+acessar+apartir+de+um+dom%EDnio+n%E3o+autorizado.+%28www.google.com.br%29>. Acesso em: 15 março 2012.

GEYER, R. M. T. **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto.** Porto Alegre: Tese de Doutorado. UFRGS, 2001.

GONÇALVES, W. M. **Adequação do processo de fabricação de aço LD, utilizando ferro-gusa líquido com baixo teor de silício.** Belo Horizonte: Dissertação de Mestrado. UFMG, 2005.

GRAFFITTI, D. F. **Avaliação do teor de cal livre em escória de aciaria elétrica.** Porto Alegre: Dissertação de Mestrado. UFRGS, 2002.

GUIMARÃES, C. A. B. **Análises das Solicitações Dinâmicas na Via Férrea através da Simulação da Interação entre Veículos e a Via.** Campinas: Tese de Doutorado. UNICAMP, 1999.

GUMIERI, A. G. **Estudo da viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria do processo LD como adição em cimentos.** Porto Alegre: Tese de Doutorado. UFRGS, 2002.

HAY, W.W. Railroad Engineering. 2nd.ed., New York, John Wiley, 1982.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA: **Transporte Ferroviário de Cargas no Brasil:** Gargalos e Perspectivas para o Desenvolvimento Econômico e Regional. Rio de Janeiro: IPEA – Instituto Brasileiro de Pesquisa Econômica Aplicada, 2010.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT: Tratamento Siderúrgico da Escória de Aciaria. Disponível em: < <http://www.campinasinova.com.br/wp-content/uploads/2011/05/Quimica-ESCORIA-DE-ACIARIA.pdf>>. Acesso em: 16 março 2012.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. Dados anuais de precipitação – Estação: A612. Disponível em: < http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_auto_graf>. Acesso em: 12 novembro 2012.

KLINCEVICIUS, M. G. Y. **Estudo de propriedades, de tensões e do comportamento mecânico de lastros ferroviários.** São Paulo: Dissertação de Mestrado. USP, 2011.

MACHADO, A. M. W. **Uma Contribuição à Metodologia de Recebimento, Manutenção e Desempenho do Lastro Ferroviário.** Rio de Janeiro: Monografia. IME, 2006.

MACHADO, A. T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria.** São Paulo: Dissertação de Mestrado. POLI/USP, 2000.135 p.

MASUERO, A. B.; A.C. VILELA e D. DAL MOLIN, 2000, “Emprego de Escórias de Aciaria Elétrica como Adição a Concretos”. Seminário Nacional sobre Reuso/Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais, São Paulo, SP.

NASCIMENTO, J. F. **Estudo da expansibilidade em escória de aciaria para uso em pavimentação rodoviária.** Belo Horizonte: Dissertação de mestrado. UFMG, 2003. 163 p.

NETO, J. P. M. **Apostila de Ferrovias.** Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, 2010.

PENA, D. C. **Avaliação da expansibilidade da escória de aciaria curada a vapor para utilização em peças de concreto para pavimentação.** Vitória: Dissertação de mestrado. UFES, 2004. 152 p.

POLISSENI, A. E. **Estudo da viabilidade técnica da utilização de escória de aciaria elétrica micronizada como material cimentício.** Porto Alegre: Tese de Doutorado. UFRGS, 2005.

PORTE, T. G. **Ferrovias.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo,São Paulo, 2004. Disponível em: <<http://sites.poli.usp.br/d/PTR0540/download/ApostilaNova.pdf>> Acesso e download em: 23 março 2012.

RAYMOND, G.P. & DIYALJEE, V.A. “Railroad Ballast Ranking Classification”. IN: **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, ASCE, 1979, New York.v. 105, № GT 10. p.1135-1155, 1979.

RODRIGUES, G. V.; MARCHETTO, O. **Apostila de análises térmicas.** Santa Catarina. UFSC.

ROHDE, L. **Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos – Estudo laboratorial.** Porto Alegre: Dissertação de Mestrado. UFRGS, 2002.

SELIG, E. T. E WATERS, J. M. **Track geotechnology and substructure management.** 1 ed. London: Thomas Telford Services Ltd, 1994. 750 p.

SELIG, E. T., PARSONS.; B. K. & COLE, B. E. Drainage of Railway Ballast. In: INTERNATIONAL HEAVY HAUL CONFERENCE, 5., 1997, Beijing. Proceedings Beijing: Int. Heavy Haul Association, 1993. p. 200-206.

SILVA, L. F. M. **Fundamentos para um Sistema de Manutenção de Pavimentos Ferroviários Utilizando o Critério de Deformação Resiliente.** Rio de Janeiro: Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, 2002.

SILVA, N. S.; JUSTUS, S. M.; ANDRADE, R. M.; LONGO, E.; CUNHA, F. N.; OLIVEIRA BRITO, H. L.; BALDUINO, F. Aplicação de Escória LD como Pavimento Rodoviário e Lastro Ferroviário. In: Seminário de Redução de Minério de Ferro, XXXI, 2000, Santos. **Anais...** Santos: ABM, 2000. P. 43-53.

SILVA, N. S.; JUSTUS, S. M.; ANDRADE, R. M.; LONGO, E.; CUNHA, F. N.; OLIVEIRA BRITO, H. L.; BALDUINO, F. Aplicação de Escória LD como Pavimento Rodoviário e Lastro Ferroviário. In: Seminário de Redução de Minério de Ferro, XXXI, 2000, Santos. **Anais...** Santos: ABM, 2000. P. 43-53.

SILVA, R. G. O. **Estudo laboratorial do desempenho mecânico de misturas asfálticas com resíduos industriais de minério de ferro.** Ouro Preto: Dissertação de Mestrado. UFOP, 2010. 132p.

SOUSA, G. M. **Estudo experimental de escórias de aciaria para fins de caracterização tecnológica como material de lastro ferroviário em vias sinalizadas.** Ouro Preto: Dissertação de mestrado. UFOP, 2007. 65 p.

SOUSA, G.M.; ALMEIDA, M.M.; FERNANDES, G.; GOMES, R.C. Estudo do comportamento da escória de aciaria a ser utilizada como lastro de ferrovias através de Ensaio de carga pontual. In: Simpósio brasileiro de jovens geotécnicos, 1., 2004, São Carlos. **Anais...** São Carlos: ABMS, 2004. 1 CD-ROM.

SPADA, J. L. G. **Uma Abordagem de Mecânica dos Pavimentos Aplicada ao Entendimento do Mecanismo de Comportamento Tensão-Deformação da Via Férrea.** Rio de Janeiro: Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, 2003.

STOPATTO, S. **Via Permanente Ferroviária: Conceitos e aplicações.** São Paulo: Universidade de São Paulo, 1987. 251 p.

WEAST, R. C. **Handbook of Chemistry and Physics.** 52 nd. Edition. 1971 – 1972.