

Dissertação de Mestrado

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE ESCÓRIAS DE
ACIARIA PARA FINS DE CARACTERIZAÇÃO
TECNOLÓGICA COMO MATERIAL DE
LASTRO FERROVIÁRIO EM VIAS
SINALIZADAS**

NUGEO

AUTOR: GUSTAVO MARÇAL DE SOUSA

**ORIENTADORES: Prof. Dr. Gilberto Fernandes (UFOP)
Prof. Dr. Romero César Gomes (UFOP)**

ESCOLA DE MINAS / UFOP

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA DA UFOP

OURO PRETO JULHO DE 2007

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.

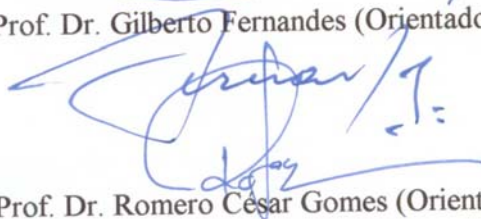
ESTUDO EXPERIMENTAL DE ESCÓRIAS DE ACIARIA PARA FINS DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA COMO MATERIAL DE LASTRO FERROVIÁRIO EM VIAS SINALIZADAS

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 03 de julho de 2007, pela Banca Examinadora composta pelos membros:



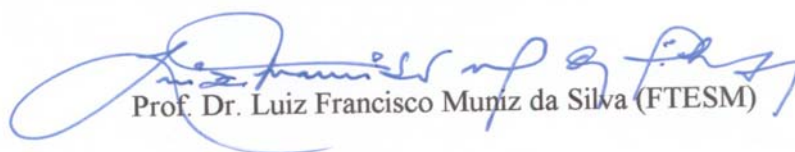
Prof. Dr. Gilberto Fernandes (Orientador / UFOP)



Prof. Dr. Romero César Gomes (Orientador / UFOP)



Prof. Dr. Adilson do Lago Leite (UFOP)



Prof. Dr. Luiz Francisco Muniz da Silva (FTESM)

Dedico este trabalho à minha mãe Terezinha e ao meu avô Jabey, que sempre fizeram de tudo para eu poder estudar e chegar ao fim de mais esta longa jornada.

AGRADECIMENTOS

AGRADEÇO SINCERAMENTE:

- A Deus, que sempre estive do meu lado me confortando e me dando luz nos momentos em que eu mais precisei, permitindo, assim, que eu chegasse com êxito no fim deste trabalho;
- À minha família, que me apoiou na decisão de continuar meus estudos, em especial à minha mãe Terezinha e ao meu avô Jabey, sem os quais eu não estaria aqui hoje;
- Ao meu orientador, Prof. Gilberto Fernandes, a quem ousou chamar de amigo, por ter me dado a chance de desenvolver este trabalho, ter tido paciência e ter sido companheiro nos contratemplos em que passamos durante a elaboração do programa experimental e pela atenção especial no fechamento deste trabalho;
- Ao meu orientador, Prof. Romero César Gomes, que sempre esteve disponível para discussões ao longo de todo o trabalho e dando uma atenção especial ao fechamento do mesmo e, em particular, por ter sido o grande responsável pelo meu interesse por pesquisa, sendo o primeiro a me dar uma chance em um projeto de pesquisa;
- À Companhia Vale do Rio Doce, pelo convênio assinado que viabilizou a realização do monitoramento de campo, assim como os recursos financeiros para a aquisição da instrumentação e dos equipamentos utilizados nos ensaios de laboratório e de campo;
- Aos funcionários da via permanente e eletroeletrônica da estação ferroviária Mário Carvalho/EFVM, localizada em Timóteo-MG, pelo apoio na realização dos testes de campo e colocação e manutenção da instrumentação de monitoramento, em especial a Aristeu Couvre e Paulo Lery, sem os quais a realização dos trabalhos seria ainda mais difícil;

- À UFOP, pelo financiamento da bolsa de mestrado e por ter fornecido o transporte para a realização dos serviços de campo;
- À Fundação Gorceix, por ter cedido seus laboratórios de eletrônica e análises químicas para dar suporte à elaboração deste trabalho;
- Aos bolsistas do Laboratório de Ferrovias e Asfalto da UFOP, pela preciosa ajuda na execução dos ensaios de laboratório e nos trabalhos de campo;
- Aos colegas do curso de mestrado, pelo companheirismo e incentivo, em especial ao amigo Rafael Magno que me ajudou significativamente nos trabalhos de campo;
- À minha namorada Daniela, pela paciência nos momentos que deixei de estar com ela para me dedicar ao desenvolvimento deste trabalho de pesquisa;
- Aos que não estão citados aqui, mas que, de alguma forma, contribuíram para que este projeto de pesquisa se realizasse, pois num trabalho tão grande como este todo o tipo de ajuda recebida foi sempre muito importante.

Gustavo Marçal de Sousa

06/06/2007

RESUMO

As escórias de aciaria são um dos subprodutos de maior volume gerados nas usinas siderúrgicas, tendo grande potencial de aplicação como matéria-prima na construção civil. Entretanto, a sua introdução como material de lastro em vias férreas foi feita de forma aleatória, sem um estudo prévio das suas características geomecânicas e avaliação das potenciais conseqüências de sua utilização no dia a dia das vias em questão. Desta forma surgiram diversos inconvenientes na sua utilização, como quebra excessiva dos grãos, o que diminui a vida útil do lastro e aumenta os gastos com manutenção. Outro problema é diminuição do desempenho operacional uma vez que seu uso pode provocar a paralisação do tráfego ferroviário devido à condução de eletricidade pela escória de aciaria principalmente no período chuvoso, o que gera falsa ocupação no circuito de bloqueio de linha levando o Centro de Tráfego Centralizado (CTC) a interromper o tráfego e acionar a manutenção de linha. Por outro lado, não se pode descartar o potencial de utilização desse resíduo, pois a utilização da escória como lastro diminui a demanda de jazidas dos materiais naturais utilizados corriqueiramente, cada vez mais difíceis de se encontrar. Podemos enumerar ainda outra contribuição dada ao meio ambiente com a redução do passivo ambiental perante a sua utilização, pois de outra forma, mesmo de maneira controlada o material seria disposto no ambiente. Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo básico a avaliação da qualidade do processo de industrialização da escória, bem como a sua competência em termos de resistência e outras propriedades físicas. Visa-se credenciar definitivamente o uso da escória de aciaria em larga escala como lastro de ferrovias, bem como investigar as propriedades de resistividade e condutividade elétrica do material, introduzindo melhoria no desempenho operacional através da redução da paralisação do tráfego ferroviário motivado pela falsa ocupação. O programa experimental envolvido consta basicamente na caracterização química, mineralógica, física, mecânica e ambiental, além da determinação da resistividade elétrica dos principais materiais utilizados como lastro de ferrovia pela EFVM por meio de ensaios realizados em campo e em laboratório. Finalmente, foi feita uma análise conjugada destes resultados permitindo apontar problemas e possíveis soluções no uso da escória de aciaria como material para composição de lastro.

ABSTRACT

The steel furnace slags are one of byproducts of major volume in steel metallurgy and can be applied like raw material in civil building. However, its introduction like ballast stuff in railways was done in aleatoric way, without a previous study about geotechnical characteristics and without an evaluation about possible consequences that its use can bring. After that a several problems appear, like excessive grains broke, what decrease the ballast useful time and increase expenses with conservation. Other problem is the operational performance reduction because the steel furnace slag use like ballast can provoke stop traffic highway caused by its conduct electricity, mainly in rainy time. This situation provokes a false occupied system of blockade and the Center of Centralized Traffic (CTC) paralyze the traffic and set in motion the reserve line. On other hand this residue potential cannot be despise because the slags decrease the employment of natural materials further rare. We can enumerate one more contribution to environment with reduction of environmental passive that would be placed in nature. In this context, the mainly objective this research is evaluate the quality industrialization process of slags and know what is the slags competence as for resistance and other physics proprieties. It would do credit to use more steel furnace slag how railway ballast and it permit investigate the resistivity and electrical conductivity, improving operational performance through decrease of traffic stop by false occupation. The experimental program involved has basically chemical, mineralogical, physical, mechanical and environmental characterization beyond electrical resistivity determination of mainly materials utilized like ballast by EFVM in rehearsal laboratorial and field. Finally was done a conjugate analysis about this results what permits appoint problems and solutions possible to use steel furnace slag like ballast component.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	PARTICIPAÇÃO DAS FERROVIAS NA MATRIZ DE TRANSPORTE DE CARGAS DO BRASIL	1
1.2	ORIGEM DO CIRCUITO DE SINALIZAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE PROBLEMAS	3
1.3	JUSTIFICATIVA	6
1.4	METAS E OBJETIVOS.....	7
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1	INTRODUÇÃO	10
2.2	OPERAÇÃO DO CIRCUITO DE SINALIZAÇÃO DE VIA	10
2.3	COMPONENTES DA VIA FERROVIÁRIA	14
2.4	ESFORÇOS ATUANTES NO LASTRO.....	17
2.5	EFEITOS DA CONTAMINAÇÃO DO LASTRO	20
2.6	ESCÓRIAS DE ACIARIA	25
2.6.1	Origem e geração das escórias de aciaria	26
2.6.2	Origem e geração da escória de aciaria LD	27
2.6.3	Industrialização da escória de aciaria	30
2.6.4	Estudos recentes sobre o emprego da escória de aciaria em obras rodoviárias e ferroviárias	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1	– INTRODUÇÃO	36
3.2	– MATERIAIS ESTUDADOS.....	37
3.3	– CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA DA ESCÓRIA DE ACIARIA	38
3.3.1	– Difração de raios – X	39
3.3.2	– Análise química quantitativa	41
3.3.3	– Análise química por microscopia eletrônica de varredura (MVE/EDS)	43
3.3.4	– Teor de cal livre	45

3.4 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ESCÓRIA DE ACIARIA	45
3.4.1 – Ensaios de granulometria.....	45
3.4.2 – Índice de contaminação	46
3.4.3 – Abrasão Los Angeles.....	46
3.4.5 – Massa específica aparente, absorção e porosidade aparente.....	48
3.4.6 – Formato do material.....	48
3.4.7 – Fragmentos macios e friáveis	49
3.4.8 – Teor de argila em torrões.....	50
3.4.9 – Resistência à intempéries.....	50
3.5 – CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DA ESCÓRIA DE ACIARIA	51
3.5.1 – Compressão axial.....	51
3.5.2 – Carga pontual.....	52
3.6 – CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DA ESCÓRIA DE ACIARIA	53
3.6.1 – Legislação e classificação.....	53
3.6.2 – Testes de lixiviação.....	54
3.6.3 – Solubilização.....	55
3.7 – MONITORAMENTO DA FUGA DA CORRENTE DO CIRCUITO DE SINALIZAÇÃO PARA O LASTRO.....	55
3.8 – SIMULADOR DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO LASTRO	57
3.9 – INVESTIGAÇÃO DO EFEITO DA CURA SOBRE A CONDUTIVIDADE DA ESCÓRIA DE ACIARIA UTILIZADA COMO LASTRO	61
4 – ANÁLISES DOS RESULTADOS: ENSAIOS DE LABORATÓRIO E MONTAGENS EXPERIMENTAIS	63
4.1 – CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E QUÍMICA DAS ESCÓRIAS	63
4.1.1 – Análises por difração de raio-X.....	63
4.1.2 – Análises químicas quantitativas.....	65
4.1.3 – Análises químicas por MVE/EDS	66
4.2 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA BRITA E DAS ESCÓRIAS.....	69
4.2.1 – Análises granulométricas.....	69
4.2.2 – Índice de contaminação	71

4.2.4 – Resistência ao choque - Índice de tenacidade Treton	72
4.2.5 – Massa específica aparente, absorção e porosidade aparente.....	73
4.2.6 – Forma do material.....	74
4.2.7 – Fragmentos macios e friáveis	74
4.2.8 – Teor de argila em torrões	75
4.2.9 – Resistência às intempéries	75
4.3 – CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS ESCÓRIAS.....	77
4.3.1 – Compressão axial.....	77
4.3.2 – Carga pontual.....	78
4.4 – CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DAS ESCÓRIAS.....	82
4.4.1 – Lixiviação e solubilização	82
4.5 – MONITORAMENTO DA FUGA DA CORRENTE DO CIRCUITO DE SINALIZAÇÃO PARA O LASTRO.....	85
4.6 – SIMULADOR DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO LASTRO	85
4.7 – INVESTIGAÇÃO DO EFEITO DA CURA SOBRE A CONDUTIVIDADE DA ESCÓRIA DE ACIARIA UTILIZADA COMO LASTRO	95
5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	98
5.1 – Da caracterização das escórias estudadas	101
5.2 – Da influência das escórias na sinalização da EFVM	104
6 – CONCLUSÕES	107
ANEXO A – MONITORAMENTO DE CAMPO	117
ANEXO B – SIMULADOR DE RESISTIVIDADE	119
ANEXO C – ENSAIO DE CONDUTIVIDADE.....	124

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Matriz de transporte de cargas do Brasil.....	1
Figura 1.2 – "Circuito aberto de sinalização": as rodas e os eixos de um trem completam o circuito de linha que fecha o relé.....	4
Figura 1.3 – Moderno "Circuito de sinalização fechado": as rodas e os eixos de um trem interrompem o circuito de linha que abre o relé.....	5
Figura 2.1 – Circuito convencional básico de sinalização (AREMA, 2003).....	11
Figura 2.2 – Contatos do circuito luminoso de sinalização (AREMA, 2003).....	12
Figura 2.3 – Distribuição das constantes de um elemento do circuito de via.....	13
Figura 2.4 – Perfil típico de uma via ferroviária - Vista lateral (Selig e Waters, 1994).	14
Figura 2.5 – Perfil típico de uma via ferroviária - Vista transversal (Selig e Waters, 1994).....	15
Figura 2.6 – Cargas de roda (carregamento estática e dinâmico): (a) simulador de tráfego; (b) ferrovia entre Nova Iorque e Washington (Selig e Waters, 1994).	18
Figura 2.7 – Transferência de tensões nos contatos trilho – roda (Selig e Waters, 1994).	19
Figura 2.8 – Ação da socaria no lastro (Selig e Waters, 1994).....	20
Figura 2.9 – Potencial de contaminação em materiais de via ferroviária (Selig e Waters, 1994).....	21
Figura 2.10 – Efeito do grau de contaminação em recalques no lastro (Han e Selig, 1997).....	21
Figura 2.11 – Efeito do teor de água nos recalques de lastros contaminados (Han e Selig, 1997).....	22
Figura 2.12 – Conversor a oxigênio.....	28
Figura 2.13 – Seqüência de operação de um conversor a oxigênio.....	29
Figura 2.14 – Fluxograma típico de uma aciaria – Companhia Siderúrgica de Tubarão S.A.	30
Figura 2.15 – (a) Basculamento e (b) Resfriamento da escória.....	30
Figura 2.16 – Classificação e separação magnética.....	31
Figura 2.17 – Aplicações da escória de aciaria (IBS, 2004).....	31

Figura 3.1 - Fluxograma geral dos ensaios e testes de campo realizados neste trabalho.	37
Figura 3.2 – Curvas granulométricas das amostras ME1 E ME2 após pulverização.	39
Figura 3.3 - Difratômetro de raios-x utilizado nos ensaios.....	40
Figura 3.4 – Espectrômetro de Raios-X utilizado nos ensaios.	41
Figura 3.5 – Procedimentos de preparação das amostras nos ensaios de fluorescência de raios - X.	42
Figura 3.6 – Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV/EDS).	43
Figura 3.7 – Princípios de funcionamento do MEV.	44
Figura 3.8 – Equipamento e cargas abrasivas utilizadas no Ensaio de abrasão Los Angeles.	47
Figura 3.9 – Aparelho ‘Treton’ para medidas de resistência ao impacto.	48
Figura 3.10 – Dimensões utilizadas para análise da forma dos fragmentos.	49
Figura 3.11 – Aparelho para a determinação do teor de material macio e friável.....	50
Figura 3.12 – Corpos-de-prova do material ME1 para ensaios de compressão axial.....	51
Figura 3.13 – Sistema de aplicação e execução de ensaio de carga pontual.	52
Figura 3.14 – Sistema de aquisição de dados de campo.	56
Figura 3.15 – Sistema de aquisição de dados em campo.....	56
Figura 3.16 – Localização das seções de teste.....	58
Figura 3.17 – Arranjo e geometria das seções de teste.....	58
Figura 3.18 – Construção das seções do simulador.....	59
Figura 3.19 – Simulador concluído com as diferentes seções de teste.	59
Figura 3.20 – Megôhmetro utilizado durante os testes.....	60
Figura 3.21 - Esquema de teste montado para o dormente de madeira.	60
Figura 3.22 – Esquema de teste montado para o dormente de aço.....	60
Figura 3.23 – Caixa-teste para avaliação dos efeitos da cura nas escórias de aciaria. ...	61
Figura 3.24 – Esquema completo da montagem do experimento.....	62
Figura 4.1 – Padrão de difração de raios-X da amostra ME1.....	64
Figura 4.2 – Padrão de difração de raios-X da amostra ME2.....	64
Figura 4.3 – Morfologia típica encontrada no material ME1 pulverizado.	66
Figura 4.4 – Morfologia típica encontrada no material ME2 pulverizado.	67
Figura 4.5 – Morfologia típica encontrada no material ME1 em fragmento.....	67

Figura 4.6 – Morfologia típica encontrada no material ME2 em fragmento.....	68
Figura 4.7 – Enquadramento das curvas na faixa padrão A da ABNT.....	69
Figura 4.8 – Enquadramento das curvas na faixa padrão B da ABNT.....	70
Figura 4.9 – Partícula ME1 utilizada no ensaio (fissurada e posterior ruptura, sendo o material esbranquiçado o sal da solução utilizada no ensaio).	76
Figura 4.10 – Amostras rígida e porosa de um mesmo lote de escória.	78
Figura 4.11 – Relação entre índices de carregamento pontual e resistências à compressão uniaxial material MB.	80
Figura 4.12 – Relação entre índices de carregamento pontual e resistências à compressão uniaxial material ME1.....	81
Figura 4.13 - Relação entre índices de carregamento pontual e resistências à compressão uniaxial material ME2.	81
Figura 4.14 – Resultados do monitoramento durante uma chuva.....	86
Figura 4.15 – Resultados do monitoramento após uma chuva.	86
Figura 4.16 – Comparação entre as quedas de tensão em situações climáticas diferentes.	87
Figura 4.17 – Oscilação da tensão do circuito de sinalização durante uma chuva no dia 18/04/2007.	88
Figura 4.18 – Resultados do monitoramento durante a chuva do dia 18/04/2007.....	88
Figura 4.19 – Resultados do monitoramento após a chuva do dia 18/04/2007.	89
Figura 4.20 – Valores médios da diferença de potencial entre os vários elementos da via e sob condições climáticas diferentes.	89
Figura 4.21 – Resultados da Tabela 4.22 plotados separadamente para cada material estudado.	91
Figura 4.22 – Evolução da resistividade medida entre eletrodos.	94
Figura 4.23 – Evolução da resistividade medida entre trilhos.....	94
Figura 4.24 – Evolução da condutividade dos materiais com o tempo de cura submersa.	95
Figura 4.25 – Fotos (após 70 dias) da escória ME1 após o processo de cura nos tanques, indicando os efeitos da expansão e fragmentação dos materiais.	96

Figura 4.26 – Fragmentos da escória ME2 completamente impregnados por uma película de CaCO_3 precipitado (o material não possuía este aspecto no início do processo de cura).	96
Figura 5.1 – Excesso de finos em lote de escória para utilização na EFVM.....	98
Figura 5.2 – Excesso de finos presentes na escória utilizada na construção do simulador.	99
Figura 5.3 – Escórias fragmentadas pela expansão dos óxido de magnésio (cor alaranjada) no pátio de estocagem da Sobremetal em Ipatinga.	99
Figura 5.4 – Fragmento de escória fracionado por efeitos de expansão.....	100
Figura 5.5 – Falhas na drenagem (região do Pátio 5 da EFVM): sublastro e lastro saturados.	100
Figura 5.6 – Presença de água no interior de um corpo-de-prova guardado à sombra por 60 dias (presença da umidade indicada pela coloração escura da amostra à esquerda).	103
Figura 5.7 – Resistividade medida nos tanques ao longo do período de cura.	105
Figura 5.8 – Película de hidróxido de cálcio formada na superfície dos fragmentos da escória, definindo um caminho preferencial para o fluxo elétrico.	105
Figura B.1 – Teste de resistividade completo realizado no dia 20/12/06.....	122
Figura B.2 – Variação da resistência em função da tensão.	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Condutividade hidráulica para o lastro (Selig et al., 1993).....	23
Tabela 2.2 – Propriedades físicas do lastro padrão (NBR 5564).....	24
Tabela 2.3 – Distribuição granulométrica do lastro padrão (NBR 5564).....	24
Tabela 2.4 – Tolerâncias no lastro padrão (NBR 5564)..	25
Tabela 2.5 – Produção brasileira de aço bruto por processo de refino (IBS, 2002; C. Branco, 2004).....	26
Tabela 2.6 – Composição química do gusa (Araújo, 1997).....	28
Tabela 2.7 – Propriedades obtidas por Sousa <i>et al.</i> (2004) para uma dada escória de aciaria.....	34
Tabela 3.1 – Estado de contaminação do lastro (Selig <i>et al.</i> , 1993).....	46
Tabela 3.2 – Classificação da forma dos fragmentos.	49
Tabela 4.1 – Espécies químicas e sua porcentagem em massa.....	65
Tabela 4.2 – Resultados da análise semi-quantitativa realizada em cada ponto da Figura 4.3.	66
Tabela 4.3 – Resultados da análise semi-quantitativa realizada em cada ponto da Figura 4.4.	67
Tabela 4.4 – Resultados da análise semi-quantitativa realizada em cada ponto da Figura 4.5.....	67
Tabela 4.5 – Resultados da análise semi-quantitativa realizada em cada ponto da Figura 4.6.	68
Tabela 4.6 – Propriedades geométricas obtidas a partir da granulometria.	70
Tabela 4.7 – Índice e grau de contaminação dos materiais.	71
Tabela 4.8 – Resultados dos ensaios de Abrasão Los Angeles.	72
Tabela 4.9 – Resultados dos ensaios de resistência ao choque Treton.	72
Tabela 4.10 – Resultados dos ensaios de massa específica, absorção de água e porosidade aparente.	73
Tabela 4.11 – Determinação da forma dos materiais estudados.....	74
Tabela 4.12 – Determinação do teor de fragmentos macios e friáveis dos materiais estudados.....	75

Tabela 4.13 – Determinação do teor de argila em torrões.	75
Tabela 4.14 – Determinação da resistência às intempéries	76
Tabela 4.15 – Ensaio de compressão axial realizado no material ME1.	77
Tabela 4.16 – Propriedades de resistência dos materiais utilizados como lastro.	79
Tabela 4.17 – Valores de C para material rochoso (ASTM D5731-95) e para a escória de aciaria (Fernandes, 2005).	80
Tabela 4.18 – Ensaio de lixiviação somente para parâmetros inorgânicos para escória ME1.	82
Tabela 4.19 – Ensaio de lixiviação somente para parâmetros inorgânicos para escória ME2.	83
Tabela 4.20 – Ensaio de solubilização somente para parâmetros inorgânicos para escória ME1	83
Tabela 4.21 – Ensaio de solubilização somente para parâmetros inorgânicos para escória ME2.	84
Tabela 4.22 – Resultados de um teste realizado no simulador construído em Timóteo-MG.	90
Tabela 4.23 – Índices de absorção e polarização encontrados durante os testes.	93
Tabela 5.1 – Resumo das propriedades encontradas e seu enquadramento nas especificações.	101
Tabela 6.1 – Valores recomendados para as propriedades-índices do lastro de escória de aciaria.	109
Tabela 6.2 – Parâmetros recomendados para a fase de cura das escórias de aciaria. ...	109
Tabela A.1 – Exemplo dos dados coletados.	117
Tabela A.2 – Exemplo dos dados coletados.	118
Tabela A.3 – Exemplo dos dados coletados	119
Tabela A.4 – Exemplo dos dados coletados	120
Tabela A.5 – Exemplo dos dados coletados	121
Tabela C.1 – Resultado completo do ensaio de condutividade.	124

LISTA DE ABREVIATURAS E NOMENCLATURA

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas
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
CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente
CSN: Companhia Siderúrgica Nacional
CST: Companhia Siderúrgica de Tubarão
CTC: Centro de Tráfego Centralizado
CVRD: Companhia Vale do Rio Doce
DAI: Índice de Absorção Dielétrica
DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT: Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes
EAF: Electric Arc Furnace ,
EB: Especificação Brasileira
EFVM: Estrada de Ferro Vitória-Minas
IBS: Instituto Brasileiro de Siderurgia
JIS: Japan Industrial Standard
LD: Linz-Donawitz
ME: Método de Ensaio
MEV: Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR: Norma Brasileira Registrada
OH: Open Hearth
pH: Potencial Hidrogeniônico
PI: Índice de Polarização
SB: Seção de Bloqueio
SI: Sistema Internacional
UFOP: Universidade Federal de Ouro Preto
USIMINAS: Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais

LISTA DE SÍMBOLOS

Ω : ohms

A_n : Abrasão “Los Angeles”

A_s : Área do plano de ruptura

C : Condutividade

C_2S : Silicato dicálcico

C_3S : Silicato tricálcico

$Ca(OH)_2$: Hidróxido de cálcio

$CaCO_3$: Carbonato de cálcio (calcário)

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

FI: Fouling index” ou índice de contaminação do lastro

FeO: óxido de ferro

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

I_s : Índice de carregamento pontual

l : comprimento

m'_n : Massa da amostra lavada na peneira de 1.7mm

m_n : Massa total seca

MnO: Óxido de magnésio

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

P_4 : Porcentagens em pesos passantes na peneira #4

R : resistência de um condutor

S: Siemens

δ_{uc} : Resistência à compressão uniaxial

θ : Ângulo de incidência;

λ : Comprimento da onda

ρ : Resistividade

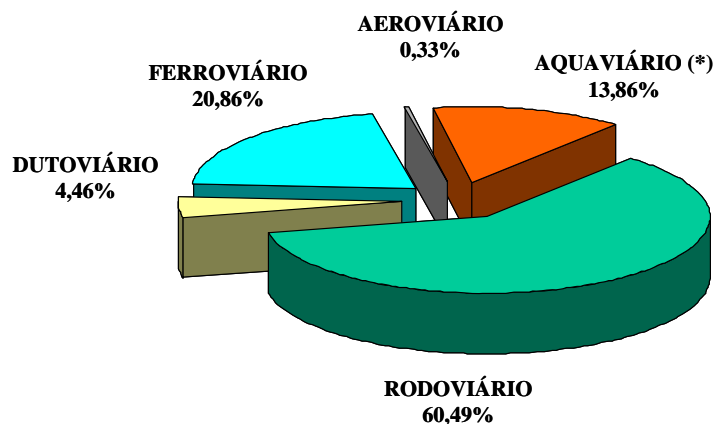
CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

1.1 PARTICIPAÇÃO DAS FERROVIAS NA MATRIZ DE TRANSPORTE DE CARGAS DO BRASIL

Segundo dados do DNIT (2007), a malha ferroviária brasileira voltada para o serviço público de transporte de carga tem 28.500 km de extensão e participa com cerca de 25% na distribuição da matriz de transporte do Brasil. Sua operação é realizada por intermédio de concessões à iniciativa privada.

A matriz de transporte de cargas do Brasil é apresentada na Figura 1.1 (GEIPOT, 2001) e fornece subsídios para a compreensão das dificuldades inerentes à superação do desafio de implantação de uma matriz eficiente para o transporte de cargas no Brasil que se assemelhe às de países desenvolvidos, onde a maior parte do transporte de cargas é feita por meio de ferrovias (AECB, 1991).



FONTE: AET - 2001 / GEIPOT .

(*) Inclui navegação interior, de cabotagem e de longo curso.

Figura 1.1 – Matriz de transporte de cargas do Brasil.

A privatização de serviços de transporte no Brasil proporcionou, com inegável êxito, um impacto substancial no setor ao longo dos últimos anos. No caso do transporte ferroviário, as realizações de destaque incluem o desmanche das onerosas organizações que operavam e administravam o sistema e os ganhos significativos de produtividade obtidos pelas concessionárias privadas.

Tal impacto pode ser quantificado com base em dados do próprio DNIT (DNIT, 2007) que afirma que, entre 2003 e 2005, o volume de investimentos promovidos pelas concessionárias de ferrovias brasileiras cresceu 215%, atingindo R\$ 3,37 bilhões no ano de 2006. Esse indicador é reflexo do processo de revitalização e crescimento do setor nos últimos três anos com aumento da produtividade, segurança do transporte de carga e criação de postos de trabalho.

O setor ferroviário é um dos que mais cresce no país, com um aumento brutal da produtividade, determinando o surgimento de uma nova geração de ferroviários com a criação de empregos e a mudança gradual na matriz de transporte de carga no Brasil. Em cinco anos a participação das ferrovias subiu de 20,83% para 25%, o que mostra uma trajetória de crescimento sustentável do setor (Brasil em questão, 2007).

Ainda assim, o grande desafio do momento é a adoção de medidas que possam minimizar as distorções observadas nas ferrovias e compensá-las de forma adequada com a matriz de rodovias. A malha ferroviária precisa ser direcionada para promover a integração, interação entre modais de transporte e complementação do setor de transporte de cargas. A existente, em sua maior parte, está necessitando de manutenção urgente, pois apresenta graves problemas de conservação, adequação, atualização técnica e ainda existem várias regiões distantes e muito carentes de ligação ferroviária.

Por outro lado, expansão e atualização necessitam de tecnologia inovadora para fazer face à escassez de recursos financeiros enfrentados até pouco tempo. Um exemplo contemplaria avanços tecnológicos que incorporem novos procedimentos para manutenção e implantação, a partir da utilização de materiais alternativos e/ou reciclados, cujas viabilidades econômica e ambiental são potencialmente interessantes.

1.2 ORIGEM DO CIRCUITO DE SINALIZAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE PROBLEMAS

Nos primórdios das operações ferroviárias no país, raramente mais de um trem circulava pela via e, dessa forma, o trânsito ocorria sempre em um determinado sentido, não sendo assim necessárias operações de tráfego. Com o aumento do tráfego, tornou-se imperativa a operação de trens em ambas as direções das linhas.

Para permitir que trens mais rápidos e com privilégios de passagem e também o cruzamento entre trens vindos de sentidos contrários, foi necessário a criação de um conjunto de regras para disciplinar a circulação, que recebeu a denominação de licenciamento. A autorização dada ao maquinista, direta ou indiretamente, denominou-se licença. Desta forma vemos que licenciamento e sinalização são sinônimos na operação ferroviária (Brina, 1988).

O primeiro processo de licenciamento utilizado foi o licenciamento a intervalo de tempo, que não é mais usado, por não oferecer suficiente segurança, mesmo em linhas com pequeno tráfego. Posteriormente, surgiu o licenciamento a intervalos de espaço, em que a segurança da circulação é garantida pela existência de uma distância mínima entre dois trens; este tipo de licenciamento pode ser feito por ordem escrita, *staff* elétrico ou por sinal (sinalização propriamente dita). Da necessidade dessa distância mínima surgiram os primeiros sistemas de bloqueio, hoje chamados comumente de seções de bloqueio (SB).

Impôs-se, portanto, a implantação de métodos para assegurar a eficiência das operações, a fim de evitar desastres e minimizar os efeitos de confusão e demora. A metodologia atualmente empregada para o licenciamento dos trens, incorporando estes conceitos de modernidade, segurança e economia, implica em um sistema de bloqueio automático ou circuito de sinalização de via. Este sistema baseia-se no bloqueio de trechos, através de sinais luminosos, e é automático porque o próprio trem fecha o circuito da via, acarretando o fechamento de um sinal, que, então, não poderá ser ultrapassado (Brina, 1988).

O moderno “circuito de sinalização fechado” foi e ainda hoje é a mais importante invenção que contribuiu para a segurança nas viagens ferroviárias. Este circuito foi inventado e patenteado por William Robinson em meados de 1870.

O circuito de sinalização que antecede a invenção do circuito de sinalização fechado (Figura 1.2) sofreu problemas de confiabilidade no que diz respeito à sua designação. Este circuito provocava um rápido fechamento do relé quando a seção de bloqueio era ocupada pelas rodas do trem, de maneira que os eixos do trem completavam o circuito. Muitos tipos diferentes de falhas de componentes tendem a causar o mau funcionamento deste circuito. Um trilho trincado, uma falha de alimentação do circuito ou um mau funcionamento do relé podem promover uma falsa indicação na sinalização. As falhas neste circuito poderiam indicar que uma seção está livre, enquanto na verdade ela pode estar ocupada por um trem (TRAINWEB, 2006).

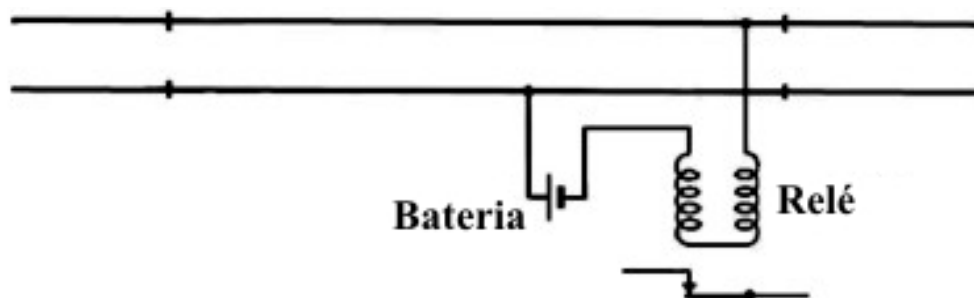


Figura 1.2 – "Circuito aberto de sinalização": as rodas e os eixos de um trem completam o circuito de linha que fecha o relé.

No moderno circuito de sinalização fechado (Figura 1.3), um sistema de alimentação está localizado em uma das extremidades da seção de bloqueio e um relé é posicionado na outra extremidade da seção de bloqueio. Um trem entrando nos limites do circuito provoca o desvio da corrente do circuito, induzindo a abertura do relé e indicando que a seção de bloqueio está ocupada (o resistor protege a bateria limitando o potencial da bateria quando os trilhos estão interligados pelos eixos e rodas). Adicionalmente, a falha de algum componente, assim como a alimentação, fios, defeito nos trilhos ou relé promove uma indicação de que a seção de bloqueio está ocupada, prevenindo assim que um trem entre na seção de bloqueio até que o problema seja corrigido. Este simples

rearranjo de componentes garantiu e viabilizou realmente um dispositivo eficaz de segurança (AREMA, 2003; TRAINWEB, 2006).

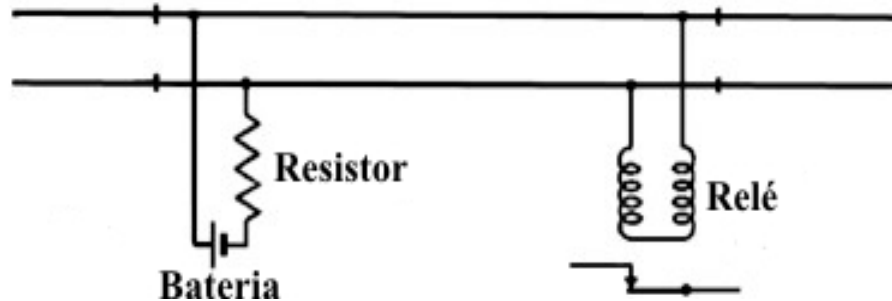


Figura 1.3 – Moderno "Circuito de sinalização fechado": as rodas e os eixos de um trem interrompem o circuito de linha que abre o relé.

Apesar de toda segurança trazida pelos circuitos modernos de sinalização, devido ao fato de que as falhas nos seus principais componentes geram um sinal de linha ocupada nas seções de bloqueio, as paralisações das operações geradas por estas interpretações provocam vários transtornos e até mesmo o caos em vias férreas muito movimentadas, como é o caso da Estrada de Ferro Vitória Minas – EFVM.

Ao longo dos mais de 100 anos de utilização dos circuitos de sinalização ferroviária, constatou-se um outro fator capaz de influenciar o funcionamento do circuito de sinalização, além da falência dos seus componentes diretos. Este outro fator é representado pela perda de grande parte da corrente circulante nos trilhos principalmente devido à baixa resistividade apresentada pelo material de lastro, associado geralmente a condições de chuva e drenagem na via.

Esta perda de corrente para o lastro, salvo algumas exceções, ocorre de forma gradual. A soma de todas essas perdas ao longo do trilho faz com que a corrente que sai de uma extremidade para a outra da seção sinalizada seja incapaz de energizar o relé e induzir, desta forma, a sua abertura; gera-se, portanto, um sinal de ocupado na seção de bloqueio (AREMA, *American Railway Engineering and Maintenance of Way Association*, 2003). Em geral, os materiais naturais comumente utilizados como material de lastro, tais como o basalto e o gnaíse, possuem uma resistividade suficiente para evitar perdas significativas, sendo assim considerados bons materiais para tais finalidades.

Entretanto, diante da escassez de recursos naturais e da necessidade de proteção ambiental, tornou-se necessário o uso de materiais alternativos como material de lastro na superestrutura ferroviária. Um destes materiais é a escória de aciaria, que é um subproduto da produção do aço, também utilizado em várias outras aplicações, como na construção de quebra-mares e em projetos de infra e superestrutura rodoviária. Em termos de resistência mecânica, a escória de aciaria tem apresentado boas propriedades se comparado a agregados naturais (Sousa *et al.*, 2004). A Companhia Vale do Rio Doce – CVRD, desde meados da década de 80, tem comprado as frações mais grossas de escória de aciaria (material entre 32mm e 75mm) para execução de lastro de suas ferrovias, incluindo a EFVM.

Com a modernização da EFVM, foram implantados sistemas de sinalização com os princípios citados anteriormente. Desde o início do seu uso, as escórias de aciaria utilizadas como lastro ferroviário pela EFVM mostraram-se ser de baixa resistividade, interferindo diretamente no sistema de sinalização, principalmente durante os períodos de chuva. Mesmo assim ela continua sendo usada, uma vez que, financeiramente, seu uso é bastante viável devido ao fato de que as siderúrgicas têm grande interesse de que esse resíduo seja reutilizado, pois, segundo a legislação mais recente (NBR 10004), esse tipo de resíduo deve levar em conta sua classificação na hora de sua disposição, o que pode gerar elevados ônus operacionais.

1.3 JUSTIFICATIVA

A introdução da escória de aciaria como material de lastro em vias férreas foi feita inicialmente de forma aleatória, sem um estudo prévio das suas características geomecânicas e avaliação das potenciais conseqüências de sua utilização no dia a dia das vias em questão. Desta forma, surgiram diversos inconvenientes na sua utilização, como quebra excessiva dos grãos e desgaste nos equipamentos de manutenção, o que diminui a vida útil do lastro e aumenta os gastos com manutenção. Outro problema é fuga da corrente do circuito de sinalização de via para o lastro, que provoca paralisação

do tráfego ferroviário devido à esta condução de eletricidade pela escória de aciaria, principalmente em períodos chuvosos.

Por outro lado, não se pode descartar o potencial de utilização desse resíduo, uma vez que, conhecida suas propriedades sob diversas condições ambientais, a escória de aciaria poderá ser uma alternativa viável tecnicamente como material para lastro com a mesma competência dos materiais comumente utilizados, tais como as britas de basalto, granito e de outras formações litológicas.

Adicionalmente, a utilização da escória como lastro diminui a demanda de jazidas dos materiais naturais utilizados corriqueiramente, cada vez mais difíceis de ocorrência em áreas diretas do domínio de tais empreendimentos, além dos aspectos ambientalmente favoráveis já mencionados.

Assim, a presente pesquisa, focada no estudo das propriedades características das escórias de aciaria utilizadas como lastro de ferrovias, particularmente em termos de sua interferência nos sistemas de sinalização das vias, torna-se um tema atual, relevante e essencial em obras de infra-estrutura ferroviária.

1.4 METAS E OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal estabelecer procedimentos para a melhoria de desempenho operacional de vias férreas, com a redução da paralisação do tráfego ferroviário devido à condução de eletricidade através de escórias de aciaria utilizadas como lastro, para a eliminação das restrições de velocidade devido à manutenção de linha decorrente do uso da escória e a elaboração de especificações técnicas com a finalidade de reduzir o desgaste mecânico nos equipamentos de manutenção de via permanente, de grande e pequeno porte. As metas desta pesquisa para se alcançar os objetivos propostos podem ser sistematizadas da seguinte forma:

- avaliar a competência mecânica da escória de aciaria, como material de lastro;

- realizar instrumentação de campo a fim de se identificar a influência da escória de aciaria na sinalização ferroviária;
- montagem de seções-testes para mensuração da resistividade elétrica de diferentes materiais utilizados como lastro ferroviário;
- investigar, por meio de montagem experimental em laboratório, o efeito da “cura” (carbonatação) do material sobre as propriedades de resistência elétrica da escória de aciaria.

Entre os objetivos específicos desta pesquisa, incluem-se os seguintes:

- 1) revisão bibliográfica sobre o sistema de sinalização ferroviária, comportamento do lastro e sobre a origem e principais propriedades da escória de aciaria, que constitui o principal objeto de estudo deste trabalho;
- 2) seleção dos tipos de escória comumente usadas como lastro na Estrada de Ferro Vitória Minas – EFVM e verificar seu enquadramento na norma lastro padrão NBR 5564 (EB-655/91);
- 3) realização os ensaios recomendados na NBR 5564 (EB-655/91) para as amostras selecionadas;
- 4) determinação das características química, mineralógica e ambiental em amostras de escórias de origens diferentes;
- 5) implementação de análises dos registros da instrumentação de campo visando identificar todos os fatores que influenciam na sinalização ferroviária;
- 6) realização dos testes para a medida da resistividade elétrica das amostras de escória;

- 7) correlação entre os resultados dos testes de resistividade com os valores recomendados por normas;
- 8) Confeção de uma caixa teste em laboratório para avaliar o efeito da ‘cura’ (carbonatação) da escória sobre as propriedades de resistividade elétrica;
- 9) Correlação entre os resultados dos testes de laboratório com os resultados das caracterizações química, mineralógica e ambiental das escórias estudadas;
- 10) Análise e síntese geral de todos os estudos desenvolvidos no presente trabalho de pesquisa.

CAPÍTULO 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são abordados os principais temas considerados relevantes para o desenvolvimento deste trabalho: a seção 2.2 apresenta uma abordagem prévia sobre o funcionamento de um sistema de sinalização ferroviária; a seção 2.3 introduz uma revisão geral sobre o comportamento do lastro, incluindo-se condições de carregamento e comportamento de lastros contaminados; na seção 2.4, a geração da escória de aciaria é discutida, bem como seu processo de industrialização. Finalmente, na seção 2.5, são apresentados alguns trabalhos utilizando a escória de aciaria como objeto de estudo.

Os tópicos abordados neste capítulo de revisão são de extrema importância para a elaboração dos métodos de investigação da perda da corrente elétrica do circuito de sinalização para o lastro, bem como para a escolha dos ensaios de caracterização mecânica que melhor representem os esforços efetivamente transferidos ao lastro.

2.2 OPERAÇÃO DO CIRCUITO DE SINALIZAÇÃO DE VIA

Uma fonte de energia é conectada em uma das extremidades do circuito de via, perto das juntas de isolamento, com energia positiva aplicada ao trilho sul “S” e energia negativa aplicada ao trilho norte “N”. O relé é, então, conectado na outra extremidade do circuito de via, sendo uma de suas ligações na grade “S” e a outra na grade “N”. Com a fonte de energia e o relé conectados, a corrente percorre um trecho completo, como indicado pelas setas na Figura 2.1 (AREMA, 2003).

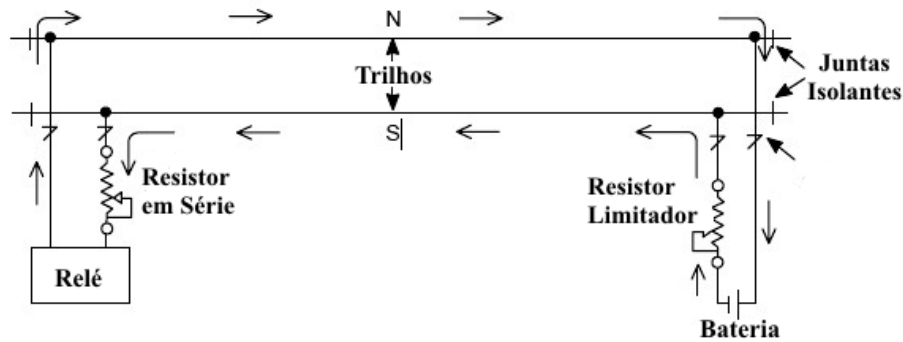


Figura 2.1 – Circuito convencional básico de sinalização (AREMA, 2003).

O circuito de sinalização é projetado como um circuito em série mas, por causa da perda de corrente elétrica para o lastro, numerosos outros caminhos sob elevadas resistências são mobilizados de um trilho para o outro. Quando um percurso alternativo de fluxo elétrico é mobilizado entre os trilhos através do lastro, o circuito de sinalização passa a operar em paralelo. A corrente dissipada pelo lastro e pela bobina do relé, somadas, representam a corrente total drenada da fonte de energia em condições normais (Hill *et al.*, 1989).

Quando um trem entra em uma seção sinalizada, as rodas e os eixos provocam um desvio (curto) no circuito de sinalização. Isso cria um caminho de baixa resistência em relação ao caminho atual de um trilho para o outro e em paralelo com a resistência exercida pelo lastro e pela bobina do relé (Calvert, 1999). Quando a corrente máxima da fonte de energia é alcançada devido ao fluxo induzido pela bobina do relé, à resistência do lastro e também devido à baixa resistência oferecida pela desvio do trem, o relé desarma. A maioria do fluxo de corrente segue pelo caminho de menor resistência. Isso reduz a corrente no relé suficientemente para causar o seu fechamento, abrindo assim o contato, como indicado na Figura 2.2, na qual as setas indicam o caminho seguido pela corrente após o desvio (AREMA, 2003).

Nesta concepção, o contato dianteiro do relé é inserido em um circuito de controle para operação de um sinal verde, enquanto a parte de trás do contato está associada à operação de um sinal vermelho. Quando um trem entra nesta seção de via, o relé deixa de ser energizado e o contato muda para parte de trás, mobilizando o sinal vermelho. Quando o último par de rodas em movimento deixar a seção sinalizada, a corrente fluirá

novamente no circuito de sinalização, passando pela bobina do relé e induzindo o fechamento do contato dianteiro, acionando o sinal verde (AREMA, 2003).

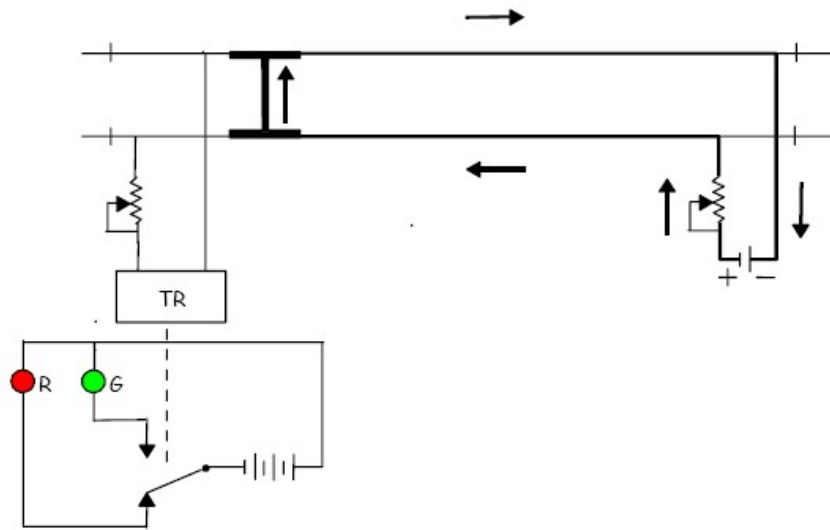


Figura 2.2 – Contatos do circuito luminoso de sinalização (AREMA, 2003).

Assim, a avaliação do efeito de resistência do lastro é muito importante para uma adequada análise da operação do circuito de sinalização em uma ferrovia. Quando as ligações são bem ajustadas, a britagem do material de lastro é eficiente e a seção está completamente seca, a resistência ao fluxo entre trilhos é muito alta. Essa condição é conhecida como resistência máxima do lastro e é ideal para o bom funcionamento do circuito de sinalização.

Quando o lastro está molhado ou contém substâncias como sais ou minerais que conduzem eletricidade, a corrente pode fluir diretamente entre trilhos, em função de uma condição de baixa resistência do lastro. Com essa situação de baixa resistência, a perda de corrente para o lastro pode ser muito alta (Hill *et al.*, 1989). Nestas condições, o relé pode ficar desenergizado pela transferência de grande parte da corrente para o lastro e permanecer desenergizado, mesmo depois da passagem do trem pela seção do circuito de sinalização.

Pelos efeitos de curto-circuito induzido pela passagem do trem, um resistor é colocado em série com a fonte alimentadora, impedindo seu esgotamento. Um resistor variável é, assim, usado para fixar a quantidade desejada de descarga durante o período em que o

circuito de sinalização está ocupado. Este resistor é chamado de “resistor limitador”. Se o ‘resistor limitador’ é ajustado especificadamente, uma corrente mais alta fluirá pela bobina do relé em um dia seco devido a resistênciã máximiã do lastro. Se esta corrente for excessivamente elevada, o relé dificilmente será desarmado, permanecendo em operação contínua. Essa condição é superada com o uso de um resistor variável, inserido em sériã com a bobina do relé no final do circuito de sinalização, ajustando-se, desta forma, à quantidade de corrente que flui através da bobina do relé.

O sistema duplo de trilhos em paralelo, conformado pelos vários dormentes e também ao lastro e ao solo, constitui um circuito elétrico bastante complexo (Figura 2.3), com cada trilho apresentando sua própria impedância (quociente entre a amplitude de uma tensão alternada e a amplitude da corrente que ela provoca em um circuito).

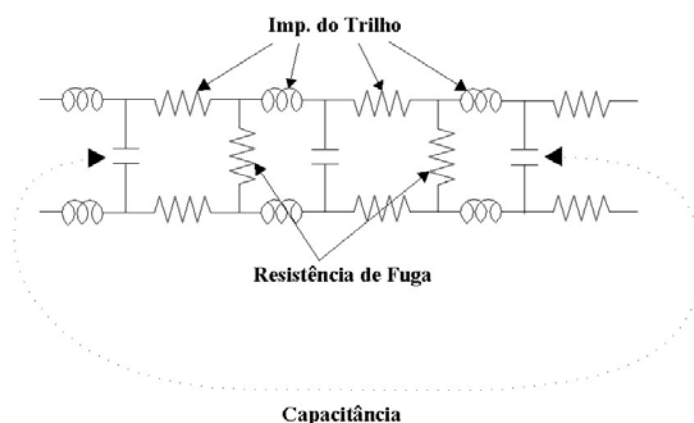


Figura 2.3 – Distribuição das constantes de um elemento do circuito de via.

O elemento em sériã é denominado de ‘impedância’ do trilho, enquanto os elementos em paralelo expressam a resistênciã à fuga da corrente do lastro ou ‘condutância’ (propriedade de um sistema de conduzir eletricidade) e a ‘capacitância estática’ do trilho (propriedade que alguns sistemas têm de armazenar energia elétrica sob a forma de um campo eletrostático: capacidade dielétrica); todos estes elementos são denominados ‘constantes do circuito de sinalização’.

Geralmente estas constantes têm seus valores expressos por km de via. A capacitância estática é geralmente desprezada para frequências comerciais de 50 ou 60 Hz, mas deve ser levada em conta para altas frequências (Hill *et al.*, 1989).

A corrente no trilho do circuito de sinalização energiza o relé após as perdas nos dormentes, no lastro e também no solo, sejam elas por efeitos de resistência ou de condutância. A resistência à fuga varia devido à estrutura da via permanente (que é afetada pela qualidade e estrutura dos trilhos, pelos materiais utilizados como lastro, ou ainda, pela característica elétrica dos dormentes) e também devido às condições climáticas (a resistência elétrica dos materiais usados na via permanente depende essencialmente das condições climáticas). Assim, em períodos chuvosos, a resistência tende a reduzir substancialmente ao passo que, em períodos de frio intenso ou de seca, a mesma tende a aumentar.

2.3 COMPONENTES DA VIA FERROVIÁRIA

Os componentes das vias ferroviárias podem ser divididos em dois grupos principais: a superestrutura e a infra-estrutura. De acordo com Selig e Waters (1994), a superestrutura refere-se à parte de topo da via que contém os trilhos, o sistema de fixação e os dormentes, enquanto a infra-estrutura refere-se à parte inferior da via, compreendendo o lastro, o sublastro e o subleito (Figura 2.4).

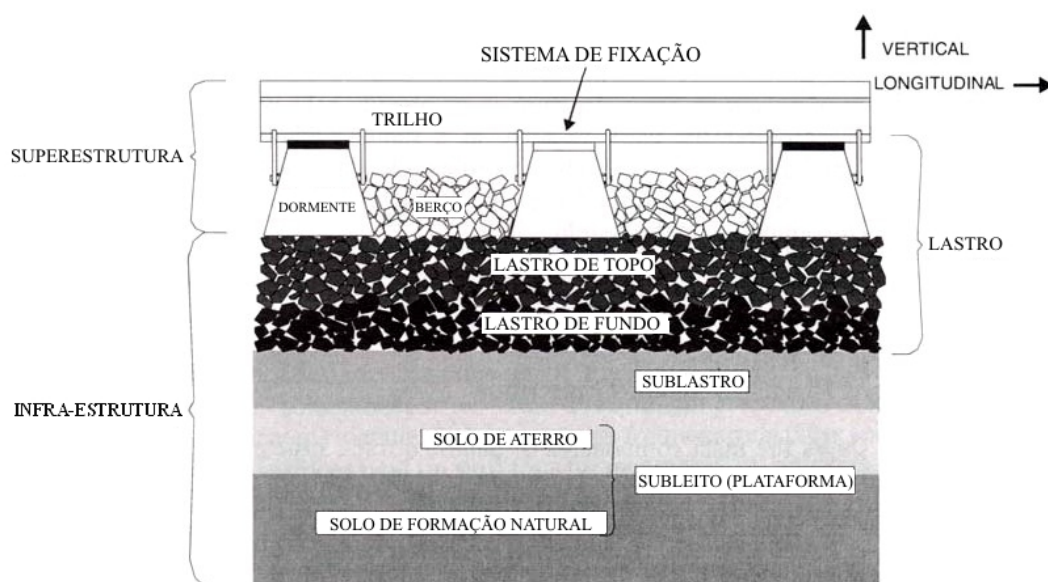


Figura 2.4 – Perfil típico de uma via ferroviária - Vista lateral (Selig e Waters, 1994).

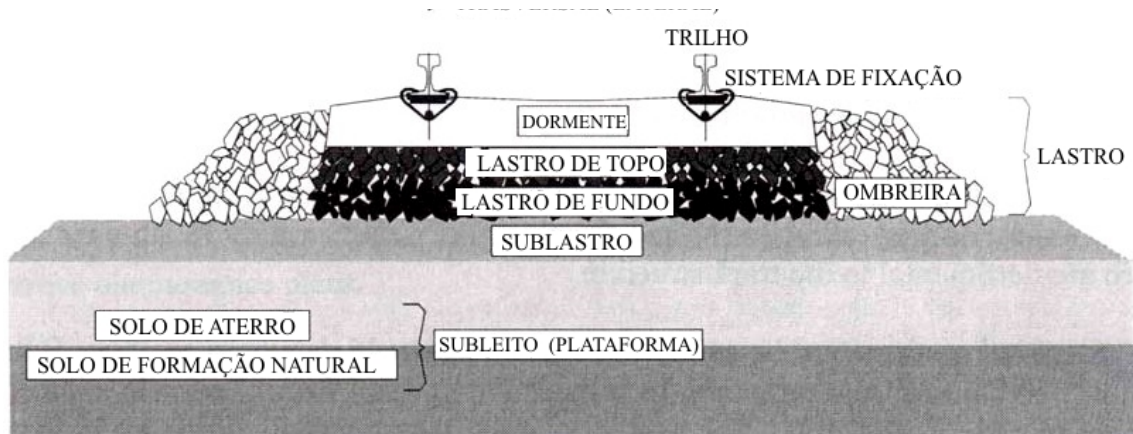


Figura 2.5 – Perfil típico de uma via ferroviária - Vista transversal (Selig e Waters, 1994).

Os trilhos são os membros de aço longitudinais que entram em contato com as rodas do trem. A função dos trilhos é a de guiar o trem e transferir as cargas concentradas das rodas aos dormentes. Assim, os trilhos têm que ter rigidez suficiente para distribuir as cargas das rodas para os dormentes e limitar as deflexões entre os apoios. Defeitos nos trilhos e descontinuidades, como as juntas, podem causar grandes cargas de impacto, as quais têm efeitos prejudiciais nos componentes inferiores da via.

O sistema de fixação mantém os trilhos fixos aos dormentes e resistem aos movimentos vertical, lateral, longitudinal e de torção dos trilhos. Dormentes de madeira requerem placas de aço em seu sistema de fixação para distribuir a força dos trilhos sobre a superfície de madeira. Dormentes de concreto requerem palmilhas elásticas no seu sistema de fixação para dar elasticidade e mobilidade à superestrutura.

As funções principais dos dormentes são as de distribuir as cargas das rodas transferidas pelos trilhos e pelo sistema de fixação para o lastro e conter os deslocamentos dos trilhos por meio da ancoragem da superestrutura no lastro.

O lastro é o material granular britado colocado como camada de topo da infra-estrutura, nos berços entre os dormentes e nas ombreiras após as extremidades dos dormentes. Em princípio, os lastros devem ser constituídos por materiais pesados e duráveis, dotados de grãos angulares, não contaminados e livres de pó. Em função da disponibilidade e de

considerações econômicas, uma gama extensiva de materiais tem sido empregada como lastro, tais como granitos, basaltos, rochas calcárias, escórias e outras litologias.

Uma das principais funções do lastro é a de manter a posição da via resistindo às forças verticais, laterais e longitudinais aplicadas aos dormentes. O lastro também provê resiliência e absorção de energia pela via que, em troca, reduz as tensões nos materiais subjacentes para níveis aceitáveis. São requeridas para o lastro faixas granulométricas que proporcionem o armazenamento de materiais contaminantes e que facilitem a drenagem da água da via. O lastro também precisa ter mobilidade para rearranjar-se durante a manutenção niveladora e as operações de alinhamento.

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

O sublastro é a camada que separa o lastro e o subleito. Sua função é a de reduzir as tensões transmitidas para o subleito, oferecendo uma opção alternativa mais econômica do que a de se aumentar diretamente a espessura da camada de lastro. Porém, a função mais importante do sublastro é a de prevenir a penetração de partículas entre as camadas de lastro e subleito. Assim, são amplamente caracterizados como materiais de sublastro as misturas de areia-pedregulho que atendem às exigências de filtro tanto para o lastro como para o subleito.

O subleito é a fundação para a estrutura da via férrea, podendo ser representado pelo terreno natural ou por solo de aterro. A função principal do subleito é prover uma fundação estável para a estrutura da via, evitando o colapso da estrutura por perda de capacidade de carga ou por recalques excessivos.

2.4 ESFORÇOS ATUANTES NO LASTRO

O lastro está submetido a dois tipos principais de esforços: as forças verticais induzidas pelo trem em movimento e as forças de esmagamento da socaria proveniente das operações de manutenção. A força vertical é uma combinação de uma carga estática e uma componente dinâmica, sobrepostas no carregamento estático. A carga estática é o peso estacionário do trem na superestrutura, enquanto que a componente dinâmica, também conhecida como o incremento dinâmico, depende da velocidade do trem e das condições da via permanente (Lim, 2004). As elevadas forças da socaria durante as obras de manutenção podem causar danos substanciais ao lastro (Selig e Waters, 1994). Além destas duas forças principais, o lastro também sofre o efeito de forças laterais e longitudinais que são muito mais difíceis de previsão do que as forças verticais.

A carga estática pode ser quantificada pelo peso do veículo dividido pelo número de rodas. A carga estática proveniente de um trem varia freqüentemente de cerca de 53kN para trens de passageiros até 174kN para trens de carga em ferrovias norte americanas. O incremento dinâmico depende das dimensões do trem, bem como das condições da via permanente, como defeitos nos trilhos e irregularidades na via.

As Figuras 2.6a e 2.6b mostram os carregamentos de roda estático e dinâmico, plotados como curvas de distribuição de freqüência acumulada, para um simulador de tráfego e para um trecho de uma ferrovia americana (Selig e Waters, 1994). A distribuição da carga de roda estática foi obtida dividindo-se o peso individual total do veículo pelo número correspondente de rodas. A distribuição de carga de roda dinâmica foi medida por sensores de tensão fixados aos trilhos. Os eixos verticais das duas figuras representam a porcentagem do número total de cargas de roda acima dos 20.000. Nota-se claramente que o incremento dinâmico é mais notável para altas cargas verticais de roda e também é mais significativo para a ferrovia localizada entre Nova Iorque e Washington, em função de se tratar de um monitoramento de uma ferrovia real e pelo fato do carregamento dinâmico neste caso ter ocorrido sob elevadas velocidades de tráfego.

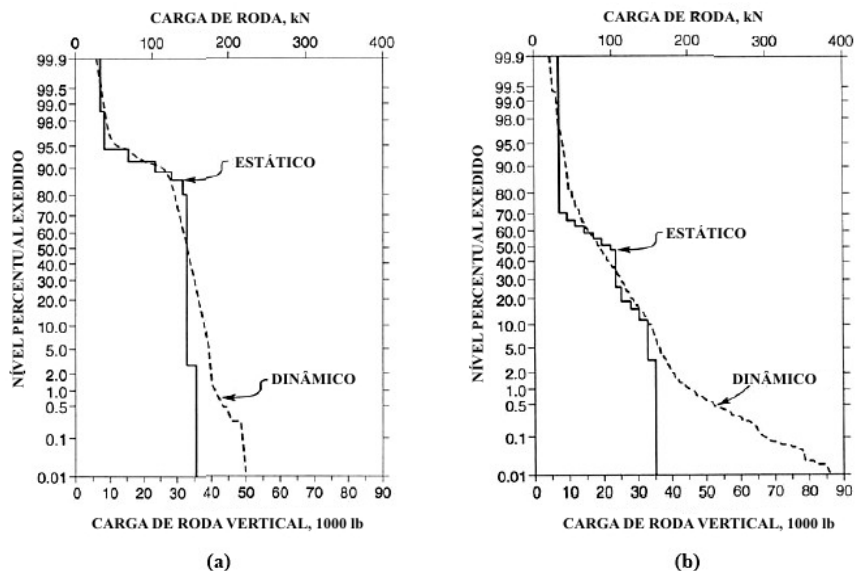


Figura 2.6 – Cargas de roda (carregamento estática e dinâmico): (a) simulador de tráfego; (b) ferrovia entre Nova Iorque e Washington (Selig e Waters, 1994).

A força de roda vertical é, então, distribuída pelos vários elementos e camadas da via. O número de dormentes envolvidos é altamente dependente do seu espaçamento e do momento de inércia dos trilhos. Os autores citados implementaram um estudo paramétrico usando o programa computacional GEOTRACK, que é um modelo 3-D de multi-camadas para determinar a resposta elástica da estrutura da via permanente.

Os resultados mostraram que, para um espaçamento entre dormentes entre 250mm e 910mm, a carga aplicada a um dormente em baixo da roda sofre um acréscimo da ordem de 4 vezes. Eles também descobriram que para um aumento do momento de inércia dos trilhos de 1610cm^4 para 6240cm^4 , a carga aplicada a um dormente em baixo de uma roda é reduzida de apenas 40%. A força vertical para baixo dos pontos de contato trilho-roda tende a levantar o trilho e os dormentes nas proximidades dos pontos de contato (Figura 2.7), sendo dependente das cargas de roda e do peso próprio da superestrutura. Com o avanço das rodas, os dormentes erguidos são abatidos outra vez, causando uma carga de impacto que aumenta com a velocidade do trem. Este processo causa um efeito de ‘bombeamento’ no lastro, uma vez que os recalques induzidos pelas elevadas forças transferidas ao lastro induzem a ascensão de materiais contaminantes oriundos das camadas subjacentes, principalmente em presença de água.

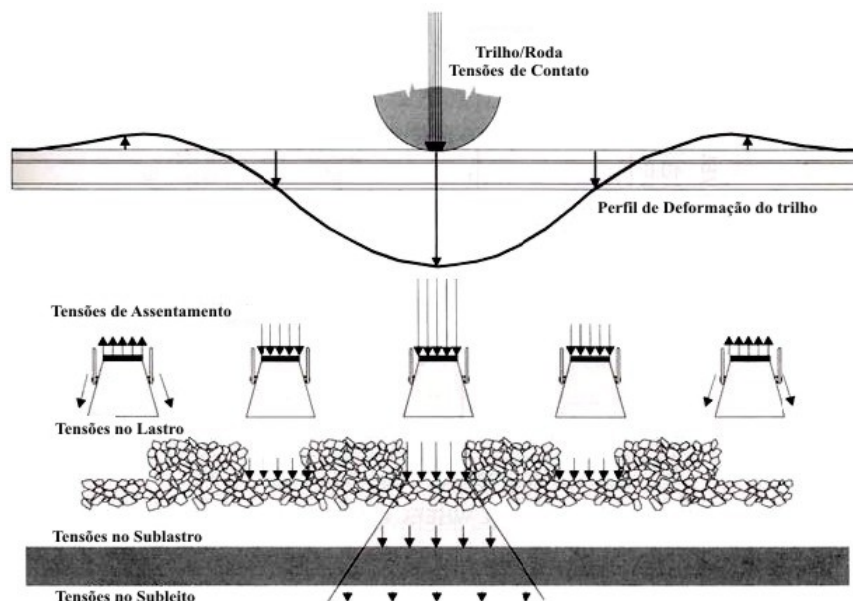


Figura 2.7 – Transferência de tensões nos contatos trilho – roda (Selig e Waters, 1994).

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

A manutenção por meio de socaria é o modo mais eficiente de se restabelecer a geometria da via permanente, especialmente onde se requer grandes correções. O processo de socaria envolve o levantamento dos dormentes até o nível desejado, inserindo-se, então, as hastes da socadora no lastro com o dormente erguido entre cada par de hastes. As pontas das hastes da socadora empurram o lastro para efeitos de preenchimento das zonas da infra-estrutura ferroviária situadas imediatamente abaixo dos dormentes erguidos (Figuras 2.8a e 2.8b).

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

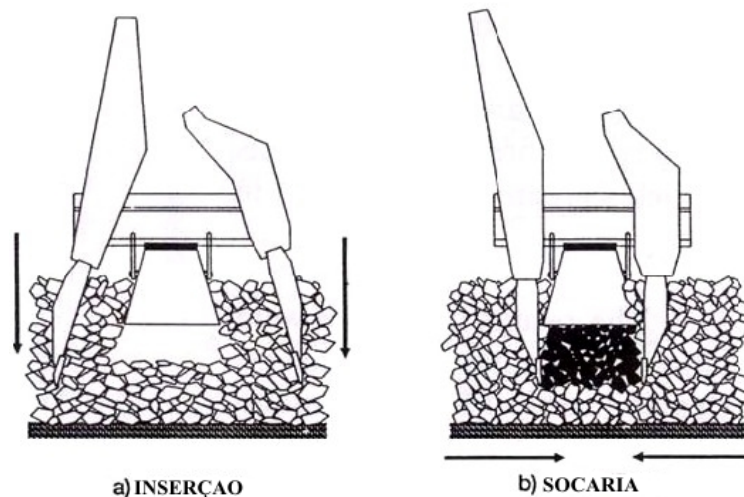


Figura 2.8 – Ação da socaria no lastro (Selig e Waters, 1994).

A força lateral é a força que age paralelamente ao eixo longitudinal dos dormentes. As fontes principais deste tipo de força são as cargas de roda lateral e a força da reação de fixação dos trilhos. A força de roda lateral surge da reação do trem às divergências de geometria dos movimentos do próprio sistema de locomoção principalmente a velocidades mais elevadas e pelas forças centrífugas em trechos curvilíneos da via. Estes tipos de forças são muito complexos e muito difíceis de previsão.

A reação de fixação dos trilhos resulta dos efeitos de compressão longitudinal acentuada do trilho provocada pelo aumento de sua temperatura. A força longitudinal é a força que age paralela aos trilhos. As fontes desta força são a força de tração da locomotiva, incluindo a força de aceleração do trem, frenagem das locomotivas, expansão térmica e contração dos trilhos e a ação da deformação do próprio trilho.

2.5 EFEITOS DA CONTAMINAÇÃO DO LASTRO

Selig e Waters (1994) sistematizaram as contaminações potenciais dos materiais de construção para uma ferrovia norte americana (Figura 2.9), sendo a principal causa o resultado da quebra das partículas de material que ocorrem no lastro. Outros materiais contaminantes ocorrem por efeitos de infiltração do sublastro, subleito, materiais da superfície e nos dormente utilizados.

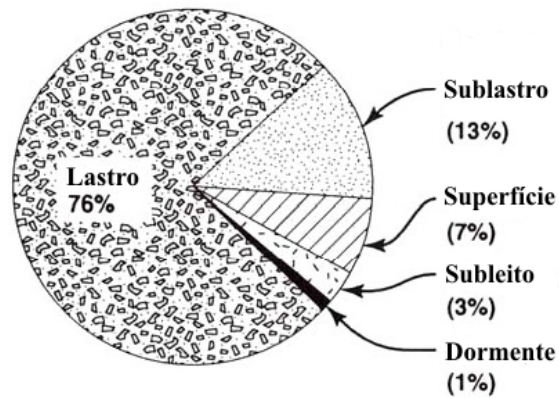


Figura 2.9 – Potencial de contaminação em materiais de via ferroviária (Selig e Waters, 1994).

Os materiais contaminantes podem causar efeitos adversos ao lastro contaminado. O efeito depende do tipo de material contaminante, do grau de contaminação e da quantidade de água presente. Han e Selig (1997) realizaram ensaios em uma caixa teste para investigar o efeito de diferentes materiais contaminantes nos recalques sofridos pelo lastro (Figura 2.10).

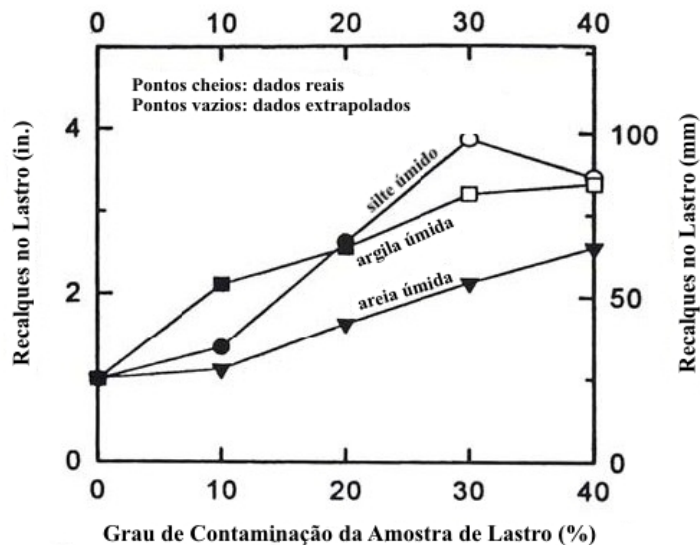


Figura 2.10 – Efeito do grau de contaminação em recalques no lastro (Han e Selig, 1997).

Constata-se que os recalques no lastro tendem a aumentar com o aumento do grau de contaminação para todos os materiais, sendo observados maiores recalques para o caso do material contaminante ser uma argila úmida, para um grau de contaminação menor que 20%, sendo, entretanto, o efeito mais pronunciado para contaminação com silte úmido, para graus de contaminação superiores a 20%.

A Figura 2.11 mostra alguns resultados adicionais do trabalho de Han e Selig (1997) em termos dos efeitos do teor de água sobre os recalques sofridos pelo lastro para diferentes graus de contaminação e materiais contaminantes. As partículas de argila seca mostraram-se menos susceptíveis aos recalques para todos os graus de contaminação, por causa da sua elevada resistência e rigidez. Quando se acrescentou água à argila, os recalques tenderam a aumentar substancialmente com o aumento dos graus de contaminação.

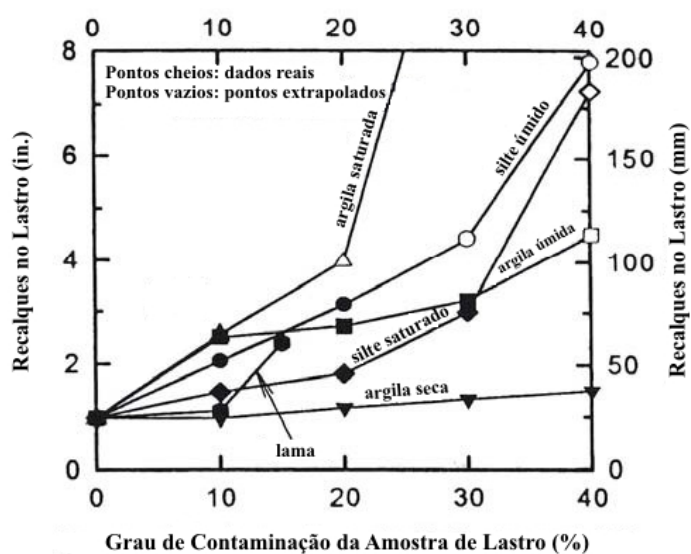


Figura 2.11 – Efeito do teor de água nos recalques de lastros contaminados (Han e Selig, 1997).

Os autores constataram ainda que os recalques do lastro tendiam a ser mais próximos para materiais contaminantes e teores de água diferentes, no caso de graus de contaminação inferiores a 20%. Eles interpretaram estes resultados considerando que, para graus de contaminação inferiores a 20%, as partículas de lastro conformavam ainda o esqueleto estrutural e, assim, respondiam efetivamente pelas características de resistência do lastro, independentemente da natureza do material contaminante.

Como uma das funções principais do lastro é prover grandes vazios para drenagem, os efeitos da inclusão de materiais contaminantes resultam no preenchimento destes espaços, com uma conseqüente perda da permeabilidade do lastro. Outros problemas seriam a geração de poropressões e os efeitos de lubrificação entre as partículas do lastro pela ação dos materiais contaminantes (Lim, 2004).

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

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

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

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

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

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

Selig *et al.* (1993) notaram também que, com o aumento do grau de contaminação, as condutividades hidráulicas das amostras tenderam a ser altamente dependentes do processo de preenchimento sequencial dos poros do lastro. Nestes termos, a permeabilidade do lastro é afetada, em grande escala, tanto pela natureza do material contaminante, como pela forma de distribuição do mesmo ao longo do lastro e também pelo grau de consolidação “in situ” do contaminante em torno dos fragmentos do lastro.

Os materiais para lastro no Brasil são selecionados de acordo com a especificação vigente NBR 5564 (ABNT, 1991), contendo basicamente prescrições em termos de granulometria, propriedades de resistência e forma do material de lastro, associadas ao caráter de observância obrigatória ou não da especificação (Tabelas 2.2, 2.3 e 2.4).

Tabela 2.2 – Propriedades físicas do lastro padrão (NBR 5564).

Propriedade Física	Especificação	Obrigatoriedade
a) Massa específica aparente mínima	2,4g/cm ³	Obrigatório
b) Absorção de água máxima	1%	Obrigatório
c) Porosidade aparente máxima	1%	Obrigatório
d) Resistência ao desgaste - abrasão Los Angeles máxima.	40%	Obrigatório
e) Resistência ao choque-índice de tenacidade Treton máximo.	20%	Obrigatório
f) Formato da partícula	cúbica	Obrigatório
g) Resistência à intempérie	-	Facultativo

Tabela 2.3 – Distribuição granulométrica do lastro padrão (NBR 5564).

Granulometria – Obrigatório			
Lado da malha da peneira (mm) (EB-22)		Porcentagem em massa acumulada %	
		Padrão A	Padrão B
1	76,2	-	0 - 0
2	63,5	0 - 0	0 - 10
3	50,8	0 - 10	-
4	38,0	30 - 65	40 - 75
5	25,4	85 - 100	-
6	19,0	-	90 - 100
7	12,0	95 - 100	95 - 100

Tabela 2.4 – Tolerâncias no lastro padrão (NBR 5564)..

Tolerâncias	Especificação	Obrigatoriedade
a) Partículas lamelares	10%;	Obrigatório
b) Material pulverulento	1%;	Obrigatório
c) Torrões de argila	0,5%;	Obrigatório
d) Fragmentos macios e friáveis	5%.	Facultativo

A NBR 5564 (EB-655/91) não leva em consideração os materiais alternativos utilizados como materiais de lastro como, por exemplo, as escórias de aciaria e tampouco é abordada a questão da resistividade do material. Por outro lado, a AREA (*American Railway Engineering Association*) estabelece um método de ensaio para determinação da resistividade elétrica, tendo em vista as possíveis interferências com o sistema de sinalização de algumas ferrovias. Para tanto, é estabelecido um valor mínimo de resistividade elétrica de $300\Omega\text{m}$ (AREA, 1991).

Em termos de lastros com escórias de aciaria, a AREMA (2001) recomenda que a escória utilizada tenha uma percentagem de óxido de cálcio (CaO) menor do que 45% e que o somatório dos percentuais de óxidos de alumínio (Al_2O_3) e de ferro (Fe_2O_3 e FeO) seja inferior a 30%.

2.6 ESCÓRIAS DE ACIARIA

As escórias são resíduos da fusão de metais ou da redução de minérios, resultantes após a combustão ou tratamento industrial de uma substância. Existem dois tipos de escórias siderúrgicas produzidas em larga escala: a escória de alto-forno, resultante da fusão redutora dos minérios para obtenção do ferro gusa (obtido diretamente do alto forno, em geral com elevado teor de carbono e várias impurezas), e a escória de aciaria, que resulta da produção do aço obtida em conversores a oxigênio e fornos elétricos, durante a conversão do ferro gusa líquido e sucata em aço.

2.6.1 Origem e geração das escórias de aciaria

Os processos de fabricação do aço são designados pelo tipo de forno utilizado (Bessemer, Siemens-Martin, Elétrico, etc.) e pela natureza da escória gerada, que pode ser ácida ou básica (Araújo, 1997).

No Brasil são utilizados para a produção e refino do aço os seguintes processos: OH (*Open Heart*) que utiliza o forno Siemens-Martin, elétrico ou EAF (*Electric Arc Furnace*) que utiliza o forno de arco elétrico e o LD (Linz-Donawitz) ou BOF (*Blast Oxygen Furnace*) que utiliza o conversor a oxigênio, responsáveis por cerca de 1,9%, 20,2% e 77,9% da produção de aço no país, respectivamente (Machado, 2000; IBS, 2002; Castelo Branco, 2004). A Tabela 2.5 mostra a produção do aço bruto no Brasil por processo de refino.

Tabela 2.5 – Produção brasileira de aço bruto por processo de refino (IBS, 2002; C. Branco, 2004).

Processo	10 ⁵ toneladas	Forno de refino
OH	0,5	Siemens-Martins
Elétrico (EAF)	5,4	arco elétrico
Oxigênio (LD/BOF)	20,8	Conversor a oxigênio

No processo Siemens-Martin (OH), hoje praticamente em desuso, adiciona-se a sucata metálica juntamente com o calcário e o minério de ferro, e injeta-se oxigênio para provocar a fusão e a agitação do banho metálico. Na fase de refino, adiciona-se cal principalmente para a remoção do fósforo (Machado, 2000). A produtividade desse processo é baixa, cerca de 300 toneladas de aço em um período de 5 a 14 horas. Comparativamente, no processo BOF, a mesma quantidade de aço é obtida em apenas 30 a 45 minutos.

O processo EAF é baseado na transformação de energia elétrica em energia térmica. Uma corrente elétrica alternada, após passar por transformadores para redução das voltagens, é conduzida a eletrodos de grafita ou de carbono amorfo por meio de

terminais e cabos flexíveis de cobre. As matérias-primas são colocadas em cestões em quantidades pré-determinadas (dependendo das características do aço que se deseja obter) e, posteriormente, são colocadas em uma abóbada (espécie de tampa do forno) fechada. O forno é então ligado e os materiais (carga metálica e cal escarificante) são fundidos (Castelo Branco, 2004).

No processo LD (Linz Donawitz) ou BOF (*Basic Oxygen Furnace*) não há necessidade de fonte de calor externa. Com o conversor inclinado, a sucata é carregada por uma calha ou por um vagão basculador, seguindo-se o gusa líquido. Colocando-se o conversor na posição vertical, introduz-se a lança de oxigênio até uma distância pré-determinada (Araújo, 1997). O aço é fabricado através das seguintes operações: carregamento do conversor, sopragem, observação do banho (temperatura e composição química), ressopragem e formação do aço líquido e da escória. A última parte do processo é o lingotamento contínuo onde o aço líquido é transformado em barras.

Nos processos BOF e EAF, a geração de escória de aciaria varia de 100 a 170kg de escória por tonelada de aço produzido, dependendo de características do processo de geração, das matérias-primas utilizadas e das diferentes especificações dos aços produzidos em cada siderúrgica. Para a escória de aciaria LD, são gerados, aproximadamente 110kg de escória de aciaria por tonelada de aço (Araújo, 1997; Little e Setepla, 1999; Kuehn *et al.*, 2000; Geyer, 2001; Gobbo *et al.*, 2003).

2.6.2 Origem e geração da escória de aciaria LD

A escória de aciaria proveniente do processo LD (Linz Donawitz) ou BOF (*Basic Oxygen Furnace*) é subproduto da fabricação do aço em conversores a oxigênio (Figura 2.12), onde o ferro-liga é transformado em aço. O processo de refino do aço em conversores a oxigênio tem por objetivo reduzir os teores de carbono do ferro gusa de 4% para 1% e também de outros elementos como o silício, o enxofre ou o fósforo (Machado, 2000).

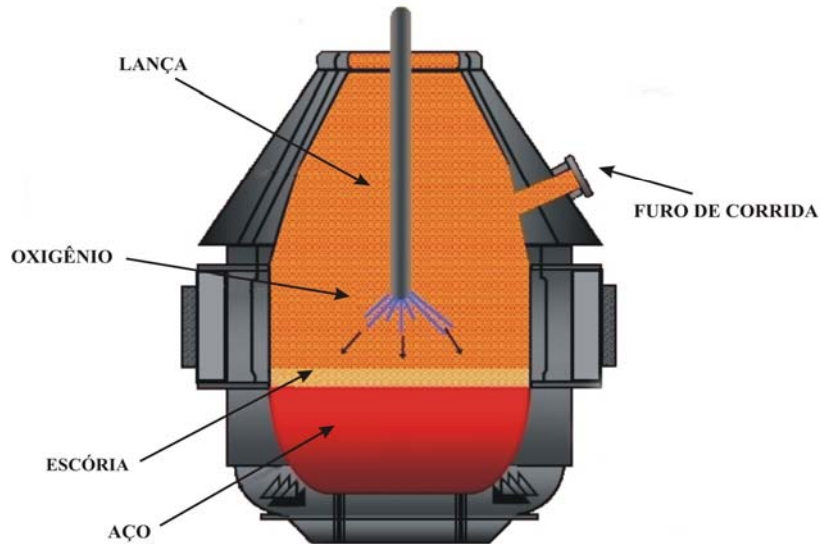


Figura 2.12 – Conversor a oxigênio.

As temperaturas de trabalho, nos conversores a oxigênio, são bem mais elevadas que nos processos pneumáticos, por exemplo. Na zona de impacto do jato de oxigênio, a reação com o metal líquido é violenta e imediata, com temperaturas locais da ordem de 2.500 - 3.000°C. As diferenças de temperatura, concentração e peso específico resultam em uma enérgica movimentação do banho. Como a eficiência térmica do processo é excelente, pois não há o peso morto do nitrogênio no gás soprado, pode-se usar qualquer tipo de gusa, com teores limites pré-fixados (Tabela 2.6).

Tabela 2.6 – Composição química do gusa (Araújo, 1997).

Composição Química	
Elemento	%
C	3,6 - 4,2
Si	0,6 - 1,5
Mn	0,8 - 2,20
P	0,08 - 0,15
S	max. 0,040

Com teores mais elevados de silício, pode-se adicionar maior quantidade de sucata, devido ao maior potencial em calorías; porém, a duração do revestimento é diminuída pela escória ácida formada nos primeiros minutos da corrida.

À medida que se processa o sopro, forma-se uma emulsão escória-metal e outros componentes são oxidados; o monóxido de carbono causa uma vigorosa agitação, acelerando as reações de refino. Completado o sopro, a lança de oxigênio é retirada e o conversor basculado para a horizontal., procedendo-se ao vazamento do aço. No final do vazamento do aço, retém-se a escória no conversor por meio de um material refratário, com densidade maior que a da escória e menor que a do aço líquido e procede-se à retirada da escória (Figura 2.13).

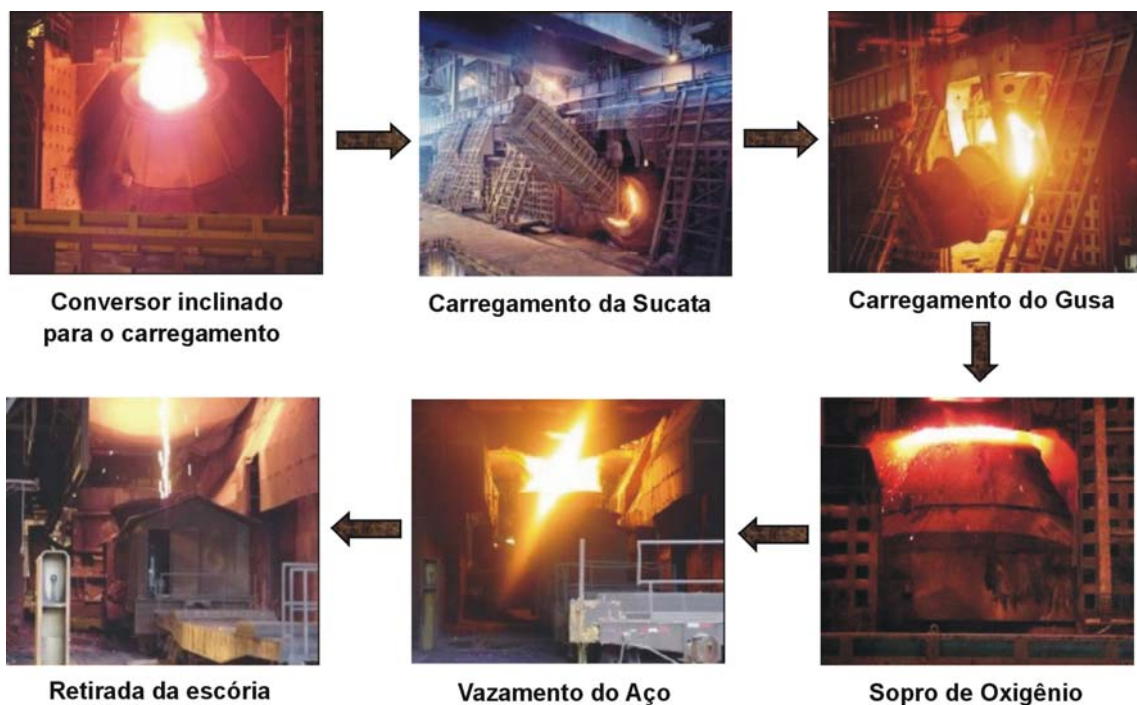


Figura 2.13 – Seqüência de operação de um conversor a oxigênio.

A Figura 2.14 apresenta um exemplo de fluxograma geral de uma aciaria a oxigênio, destacando-se todas as etapas envolvidas no processo, tais como a sintetização, redução, conversores, refinamento e lingotamento e os resíduos gerados.

Tais processos de transformação industrial têm naturezas diversas, devido à diversidade de fatores que podem influenciar nas operações e nos conseqüentes produtos do processo de produção do aço. Dentre estes fatores, destacam-se as características do escorificante e do tipo de sucata utilizados no processo.

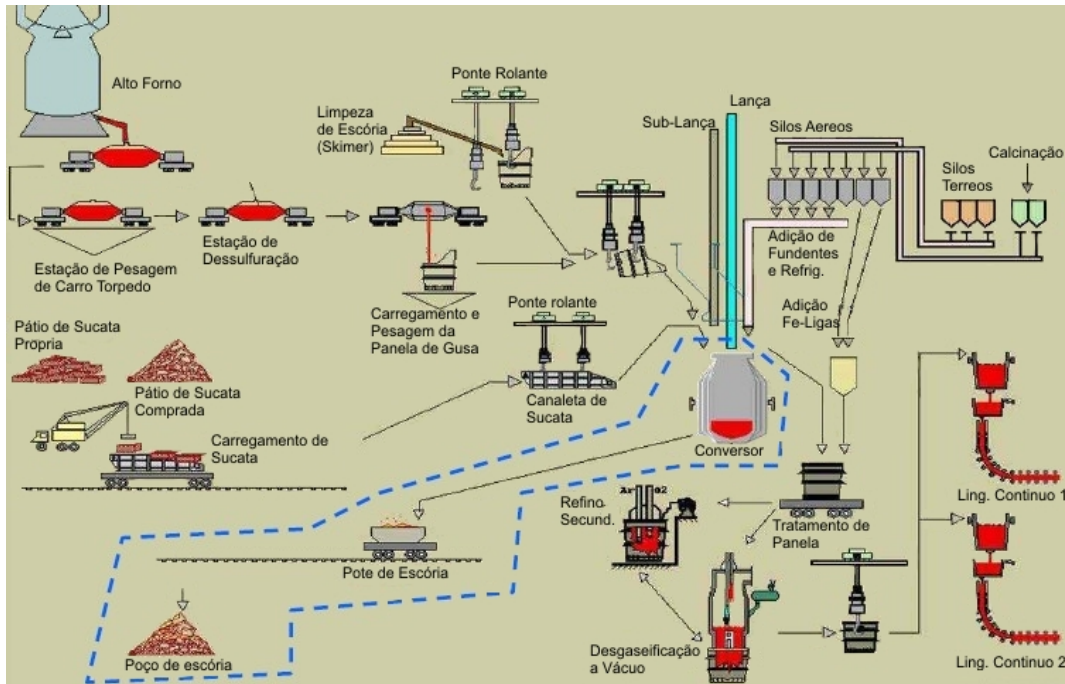


Figura 2.14 – Fluxograma típico de uma aciaria – Companhia Siderúrgica de Tubarão S.A.

2.6.3 Industrialização da escória de aciaria

Após basculamento, a escória é submetida a resfriamento súbito por meio da utilização de jatos de água (Figura 2.15), sendo direcionada para valas ou leitos de 12 a 15 metros de largura e de 4 a 5 metros de altura. Estes procedimentos permitem a formação de fragmentos grandes e regulares de escória.



Figura 2.15 – (a) Basculamento e (b) Resfriamento da escória.

Após resfriamento, a escória é transportada à planta de britagem e classificação e, por sistema de correias, a uma peneira vibratória para fins de classificação e de separação magnética (Figura 2.16).

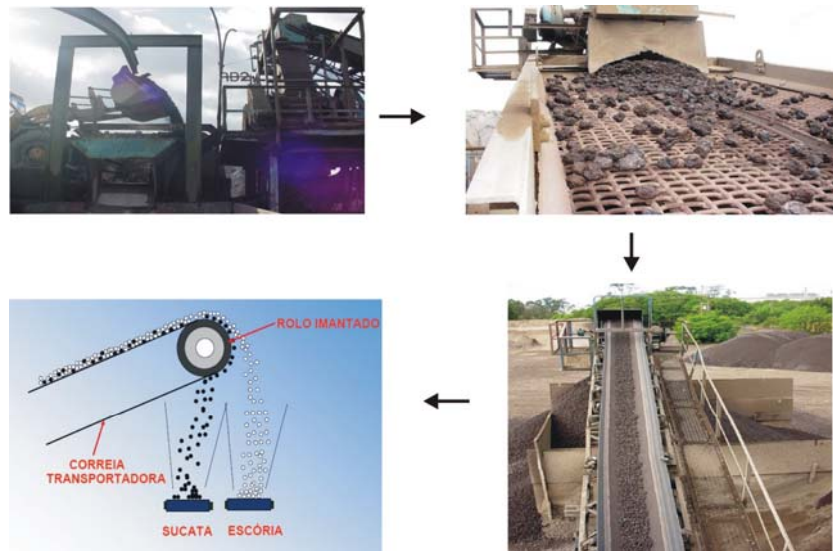


Figura 2.16 – Classificação e separação magnética.

A separação magnética permite estabelecer dois tipos de escória com três faixas granulométricas distintas: escória *in natura* de 0 - 19mm e de 19 – 32mm e a escória para lastro ferroviário, com granulometria superior a 32mm. As escórias *in natura* em geral passam por um processo de cura (período de estocagem) a fim de diminuir o efeito da expansão, antes de serem empregadas em obras de pavimentação em diversos tipos de vias (Silva *et al.*, 2000; Nascimento, 2003; Pena, 2004). A escória de aciaria também pode ser empregada para fins diversos (Figura 2.17).

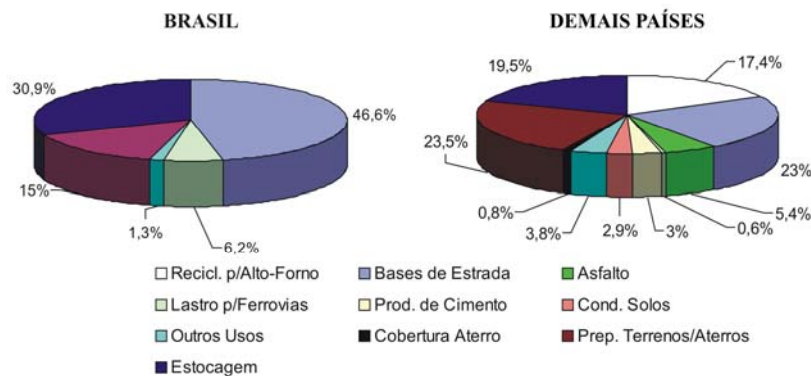
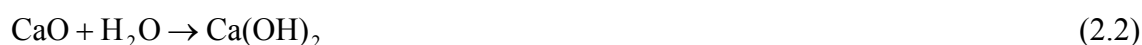


Figura 2.17 – Aplicações da escória de aciaria (IBS, 2004).

A hidratação dos óxidos CaO e MgO livres constitui a principal fonte responsável pela expansão da escória a curto e a longo prazo, respectivamente (Kandhal e Hoffman, 1998). Silva *et al.* (2003) concluíram que a cinética da reação de hidratação do MgO é muito lenta. O grau de instabilidade destes compostos depende do tamanho dos cristais: cristais pequenos tendem a se hidratar rapidamente, enquanto cristais maiores, que são formados por um processo de resfriamento lento, demoram mais tempo para se hidratar. As reações envolvidas nestes processos são as seguintes:



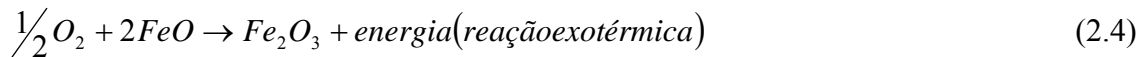
A cal livre, quando hidratada, forma o Ca(OH)_2 , de acordo com a reação indicada na Equação 2.2. O MgO, quando reage com a água, forma o hidróxido de magnésio ou brucita Mg(OH)_2 (Equação 2.3). Além das reações de hidratação, a reação de carbonatação (Equação 2.4) também é responsável pela expansão do material. Além disto, a expansão da escória deve-se, em menor escala, à corrosão do ferro metálico (Fe^0) (Castelo Branco, 2004).

2.6.4 Estudos recentes sobre o emprego da escória de aciaria em obras rodoviárias e ferroviárias

Machado (2000) realizou um estudo comparativo dos métodos existentes de avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria, com base nas transformações químicas e mineralógicas do material. Seu trabalho é dividido basicamente em três partes, sendo a primeira uma caracterização do resíduo, a fim de se identificar as suas características físicas, químicas e microestruturais; na segunda, foi feita uma avaliação dos métodos atualmente utilizados na determinação da expansibilidade das escórias de aciaria; e na terceira, foram identificadas as transformações que ocorreram na microestrutura do material, após as reações de hidratação.

O autor verificou que o método descrito como método das barras prismáticas, dentre os métodos avaliados, apresentou-se como o mais conveniente em termos da avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria.

Silva *et al.* (2000) desenvolveram métodos e técnicas laboratoriais para certificação de qualidade da escória de aciaria LD, para fins de substituição da brita em obras de pavimentação rodoviária e lastro ferroviário. Os autores desenvolveram um método para a estimativa da resistividade elétrica da escória de aciaria, a fim de avaliar sua influência na sinalização ferroviária. A montagem pioneira consistiu no emprego de um megôhmetro e eletrodos de cobre, tornando possível avaliar a influência dos tipos de dormentes, material de lastro e condições climáticas sobre a resistividade elétrica. Os autores verificaram ainda que a cinética da reação de hidratação do MgO era muito lenta, exigindo um longo tempo de envelhecimento para assegurar a completa estabilização da escória. Como saída para esta questão, propuseram a injeção de areia (SiO_2) no pote de escória, soprada com oxigênio, com o objetivo de minimizar a presença do CaO livre, através das seguintes reações:



Nascimento (2003) procurou avaliar o comportamento da escória de aciaria quanto ao aspecto da expansibilidade volumétrica. Segundo o autor, a escória de aciaria é um excelente material de construção, principalmente quando utilizado como material granular para camadas de pavimento rodoviário, tendendo, porém, a ser altamente expansiva quando não estabilizada.

Isto se dá porque alguns dos principais componentes das escórias de aciaria, os óxidos de cálcio e magnésio, o silicato dicálcico e o ferro metálico sofrem transformações químicas, principalmente em presença de umidade, que induzem a expansibilidade da escória compactada. Este fenômeno tem dificultado a utilização da escória de aciaria

nas obras rodoviárias. No trabalho citado, procurou-se comprovar a eficácia do tratamento da escória de aciaria com hidratação diária e identificar o tempo de tratamento que pudesse ser efetivo para a redução da expansibilidade volumétrica da escória até níveis adequados para uso em pavimentação.

O estudo mostrou que a maioria das escórias de aciaria pode ter sua expansibilidade reduzida para valores menores que o limite definido pela norma vigente (3,0%), ao longo de um período de aproximadamente 18 dias. O tempo de tratamento que proporciona segurança de cura da escória (expansibilidade < 2,0%) ocorreu com 44 dias, considerando que as condições de ensaio em laboratório sejam efetivamente reproduzidas no campo.

Sousa *et al.* (2004) redigiram estudos sobre o comportamento da escória de aciaria utilizada como lastro ferroviário através de ensaios de carga pontual. Segundo os autores, a escória de aciaria mostrou-se bastante competente em termos de resistência para exercer a função de lastro de ferrovia, mas as características mecânicas de suas partículas não são uniformes, encontrando-se contaminada por escória “porosa”. Além disso, a britagem tende a produzir partículas muito grandes, de maneira que um maior controle no processo de industrialização é necessário para aumentar sua qualidade.

Estudou-se também o índice de carregamento pontual que, apesar de pouco citado na literatura técnica, constitui um parâmetro representativo de características de resistência que leva em conta a geometria das partículas, possibilitando, no caso daquele estudo, uma melhor representatividade das ações realmente sofridas pelas partículas de lastro. Os resultados obtidos (Tabela 2.7) constituem parâmetros que servem para avaliar as propriedades de resistência das partículas da escória em estudo, bem como estabelecer referências para comparação com resultados obtidos para outras escórias.

Tabela 2.7 – Propriedades obtidas por Sousa *et al.* (2004) para uma dada escória de aciaria.

Massa específica aparente	Abrasão “Los Angeles	I ₈₅₀	
		//	I-
35,75 kN/m ³	10,34%	7,86	8,33

Castelo Branco (2004) realizou a caracterização de misturas asfálticas com utilização de escória de aciaria como agregado. A escória de aciaria elétrica, proveniente da Gerdau Cearense S.A., foi caracterizada química e fisicamente através dos ensaios exigidos pela norma DNER – EM 262/94 e por outros considerados relevantes pela autora. A expansibilidade da escória foi avaliada através do método PTM 130/78. As misturas asfálticas utilizadas foram as do tipo CBUQ com o uso de CAP 50/60, DOPE, escória de aciaria e areia de campo. Estas misturas foram caracterizadas mecanicamente através dos ensaios de resistência à tração estática por compressão diametral, módulo de resiliência, fadiga por compressão diametral à tensão controlada e resistência à tração retida por umidade induzida.

Os resultados foram comparados com os obtidos para uma mistura dosada com brita de origem granítica, areia de campo, pó de pedra, filer mineral e o mesmo CAP, porém sem DOPE. Ainda segundo a autora, a escória de aciaria apresentou possibilidade de uso em revestimentos asfálticos. O aperfeiçoamento da metodologia mostrou-se necessário face à dificuldade encontrada devido à heterogeneidade dos agregados de escória de aciaria. O efeito do DOPE para as misturas avaliadas mostrou-se irrelevante. O condicionamento prévio dos corpos-de-prova acarretou aumento nos resultados dos ensaios de resistência à tração estática e dos módulos de resiliência.

Fernandes (2005) realizou uma caracterização e determinação geotécnica dos principais parâmetros de resistência mecânica ao longo do tempo de uma escória de aciaria. Para isso, foram coletadas amostras de escória em um ramal ferroviário na fase de construção e, posteriormente, com a via já em operação. A partir dos ensaios de granulometria feitos em várias etapas, determinou-se o potencial de quebra B_g da escória da aciaria e fez-se um estudo de comparação com outros materiais de uso corrente como material de lastro, em termos de resistências. Adicionalmente, foram realizados ensaios de abrasão ‘Los Angeles’ da escória em várias etapas, comparando-se os resultados com os de outros materiais convencionalmente utilizados. Os resultados obtidos mostraram que a escória tem resistência necessária para ser utilizada como material de lastro, mas estudos mais específicos são necessários para estabelecer, de forma criteriosa, as devidas especificidades de sua aplicação prática.

CAPÍTULO 3

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 – INTRODUÇÃO

Neste capítulo, será apresentada a metodologia adotada para a caracterização física, química, mineralógica, ambiental e mecânica da escória de aciaria, bem como a avaliação da sua resistividade elétrica. Para tal, foram utilizadas amostras de escória de aciaria fornecidas pela Companhia Vale do Rio Doce, provenientes de duas siderúrgicas nacionais, e uma amostra de brita, também fornecida pela CVRD. As amostras foram separadas, caracterizadas e submetidas a ensaios de resistividade elétrica através de um método que simula uma ferrovia em escala real para, desta forma, aferir os valores de resistividade recomendados nos manuais da AREMA - *American Railway Engineering and Maintenance of Way Association/EUA*.

Avaliou-se também o efeito da “cura” na condutividade elétrica das escórias através de uma metodologia totalmente experimental e não padronizada. Adicionalmente, procedeu-se a um trabalho de monitoramento em campo, por meio de um ramal ferroviário sinalizado, a fim de se identificar e quantificar o mecanismo de fuga da corrente elétrica do circuito de sinalização para o material de lastro. Tentativas de correlação foram implementadas entre os resultados dos valores de resistividades e condutividades elétricas de cada material com o teor de cada uma das espécies químicas identificadas nas amostras de escória.

Os materiais e as metodologias utilizadas para a caracterização das escórias, avaliação da resistividade e nos trabalhos de monitoramento em campo estão sintetizados no fluxograma apresentado na Figura 3.1.

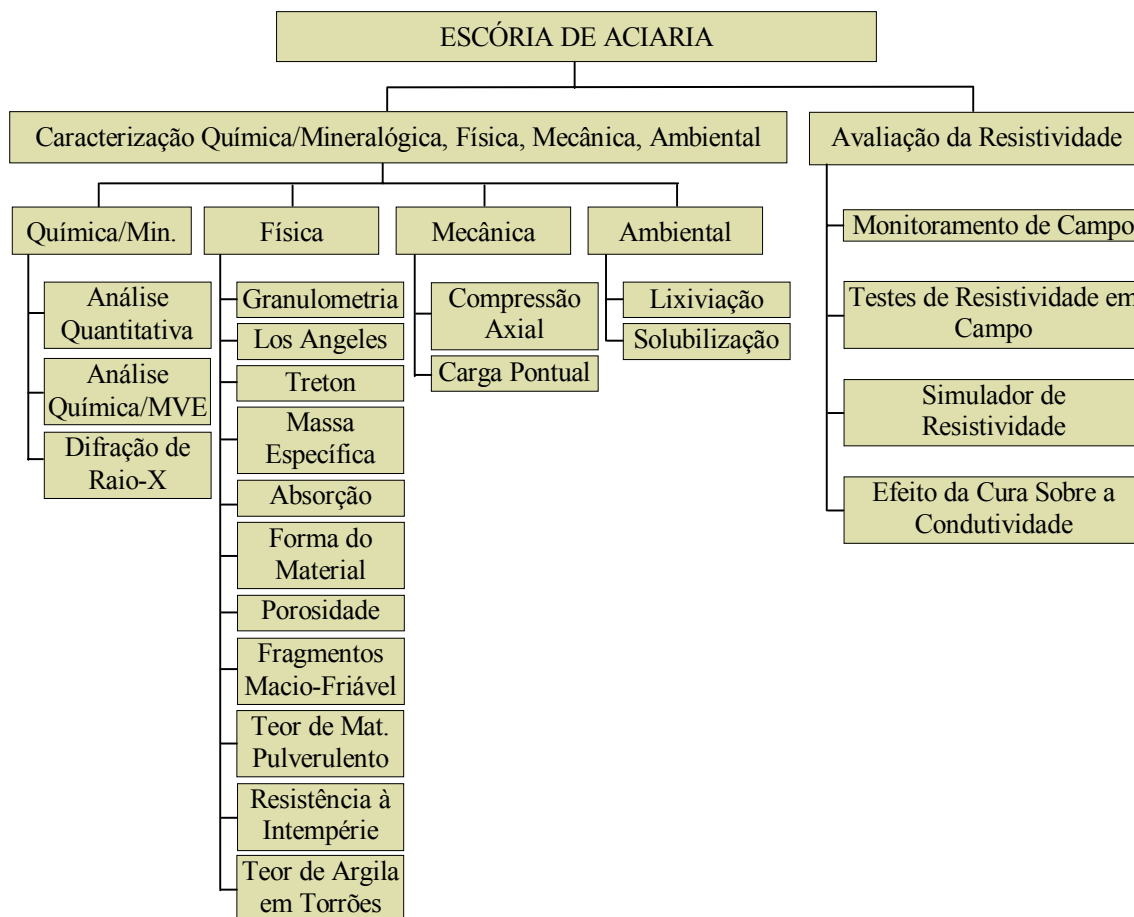


Figura 3.1 - Fluxograma geral dos ensaios e testes de campo realizados neste trabalho.

3.2 – MATERIAIS ESTUDADOS

No presente estudo, foram utilizadas duas amostras de escória de aciaria provenientes do processo LD e uma amostra de brita de gnaiss para fins de comparação. Ambos os materiais são freqüentemente utilizados como material de lastro pela EFVM/CVRD e foram adquiridos pela empresa diretamente de seus fornecedores.

A amostragem do material foi feita nos vagões durante o recebimento do material, utilizando os procedimentos indicados na NBR 11541 – Amostragem de Material para Lastro Para Via Férrea (ABNT, 1991). Para cada material em estudo foi coletada uma amostra com cerca de 1.500kg para a execução dos ensaios de laboratório.

A escória proveniente da USIMINAS, após um longo período de resfriamento e cristalização, passou por um processo de separação granulométrica antes de seguir para o pátio de estocagem, no qual ficou submetida à ação das intempéries por um período de 6 meses. O período de estocagem é muito importante para os efeitos dos processos de hidratação sobre a escória de aciaria, uma vez que induzem a expansão dos óxidos de cálcio e de magnésio presentes no material, com conseqüente quebra nas partículas. Após estocagem, o material foi novamente classificado granulometricamente antes de ser repassado à EFVM/CVRD. A amostra da escória da USIMINAS, designada por ME1, foi retirada pela CVRD/EFVM da planta da Sobremetal em Ipatinga/MG, no dia 11 de agosto de 2006.

O material proveniente da CST também passou por um processo semelhante de resfriamento e cristalização, ficando estocado por um período entre 9 a 12 meses em uma pilha no pátio de estocagem. Somente após este período inicial, o material foi classificado granulometricamente e levado para o pátio de embarque, para repasse à EFVM/CVRD. A amostra provinda da CST, denominada ME2, foi descarregada na estação ferroviária Mário Carvalho em Timóteo/MG, no dia 06 de setembro de 2006.

A brita utilizada neste trabalho é proveniente da Pedreira Brasitália, na região metropolitana de Vitória/ES. O material foi entregue à EFVM/CVRD britado e com classificação granulométrica prévia. A amostra proveniente da pedreira capixaba recebeu a denominação de MB e foi descarregada na estação ferroviária Mário Carvalho em Timóteo/MG, no dia 03 de julho de 2006.

3.3 – CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA DA ESCÓRIA DE ACIARIA

Todas as amostras de materiais foram submetidas inicialmente a ensaios de difração de raio – X, análises químicas quantitativas e por microscopia MVE. Na preparação das amostras para a realização destes ensaios, uma quantidade aproximada de 15 kg da amostragem original de cada material foi separada e submetida a processos de redução

granulométrica por britagem e moagem nas dependências do Laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas/UFOP. Em seguida, as amostras foram quarteadas e pulverizadas para preparo final.

As correspondentes curvas granulométricas das amostras ME1 e ME2 após pulverização estão indicadas na Figura 3.2, que foram obtidas por meio de análises granulométricas a laser, com e sem ultra-som, realizada no Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília – UnB. Neste caso, o ultra-som simula o efeito do uso de um defloculante nas amostras.

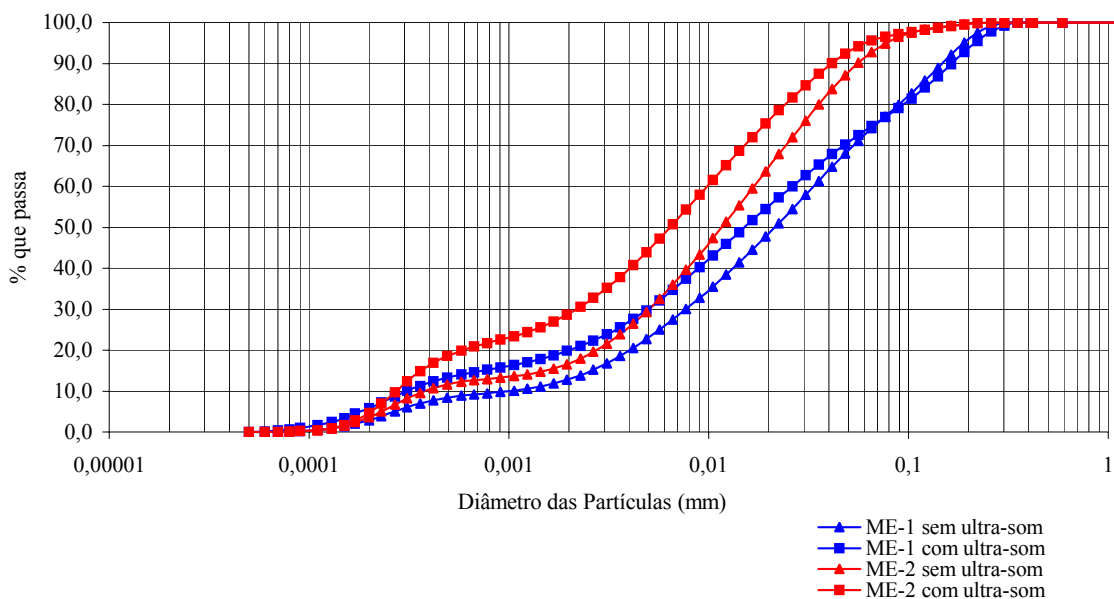


Figura 3.2 – Curvas granulométricas das amostras ME1 E ME2 após pulverização.

3.3.1 – Difração de raios – X

A técnica de difração de raios-x tem por finalidade a identificação da composição cristalina de um determinado material. As células cristalinas são constituídas por planos definidos, diretamente relacionados com o raio atômico de cada um dos átomos e seus tipos de ligação. Os picos que aparecem no difratograma são as distâncias interplanares característica dos minerais presentes. A limitação desta técnica ocorre para materiais

isomorfos (com mesma estrutura atômica) e para minerais com distâncias atômicas parecidas ou bastante heterogêneas.

Nas análises efetuadas, utilizou-se um difratômetro da marca Rigaku, modelo D/MAX-B (Figura 3.3), do Laboratório de Difractometria de Raios-X do DEGEO/UFOP, com tubo de cobre e intervalo de varredura de 2 a 70° e radiação de 40 kV e 15 µA.



Figura 3.3 - Difratorômetro de raios-x utilizado nos ensaios.

A velocidade adotada no ensaio foi de 1,2 graus/minutos com duração de 70 minutos. A análise dos resultados é processada por meio de *software* específico (Jade 3.1), que compara o pico da incidência de elétrons com um banco de dados disponíveis para caracterização dos minerais constituintes.

Uma radiação monocromática de raios-X foi imposta às amostras, sob diversos ângulos de incidência. A dispersão dos diferentes comprimentos de onda obedece à lei de Bragg que é representada pela Equação 3.1:

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (3.1)$$

sendo: λ – comprimento da onda do tubo do aparelho; θ – ângulo de incidência e d – distância (espaçamento) interplanar.

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

3.3.2 – Análise química quantitativa

O espectrômetro de fluorescência de raios-X é um instrumento que permite a determinação quantitativa dos elementos presentes em uma determinada amostra por meio da aplicação de raios-X na superfície da amostra e a posterior análise dos raios fluorescentes emitidos. Sendo uma técnica não-destrutiva, é comumente utilizada para pesquisa e controle de qualidade de uma ampla gama de materiais.

Nas análises, foi utilizado um espectrômetro de Raios-X, modelo EDS – 700 Hs da marca Shimadzu (Figura 3.4), disponível no Laboratório de Fluorescência de Raios-X da Fundação Gorceix (Ouro Preto/MG).



Figura 3.4 – Espectrômetro de Raios-X utilizado nos ensaios.

Para a realização do ensaio, as amostras passaram por uma preparação realizada na seguinte ordem (Figura 3.5): aquecimento de 100 a 120 °C em forno; pesagem de 20g da amostra, adição de 0,6g de ácido estuário - $C_{18}H_{36}O_2$ (atuação de ‘cola’ de forma a fixar a amostra); pulverização, por aproximadamente 4 minutos, para misturar o material da amostra com o ácido estuário; prensagem da mistura na forma de pastilha.



Figura 3.5 – Procedimentos de preparação das amostras nos ensaios de fluorescência de raios - X.

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

Quando um elemento de uma amostra é excitado, este tende a ejetar os elétrons do interior dos níveis dos átomos. Como consequência disso, os elétrons dos níveis mais afastados realizam um salto quântico para preencher a vacância. Cada transição eletrônica constitui uma perda de energia para o elétron, e esta energia é emitida na

forma de um fóton de raio-X, energia característica e bem definida para cada elemento. Assim, de modo resumido, a análise por fluorescência de raios-X consiste de três fases: excitação dos elementos que constituem a amostra, dispersão dos raios-X característicos emitidos pela amostra e detecção desses raios-X emitidos.

3.3.3 – Análise química por microscopia eletrônica de varredura (MVE/EDS)

A microscopia eletrônica de varredura é uma técnica que permite a observação e a caracterização de diferentes tipos de minerais, a partir da emissão e interação de feixes de elétrons sobre uma amostra, sendo possível caracterizá-los do ponto de vista de sua morfologia, sua organização e sua composição química.

A imagem observada no Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV é o resultado da variação de contraste que ocorre quando um feixe de elétrons primário varre a superfície da amostra em análise ponto a ponto. A caracterização qualitativa da morfologia de partículas das amostras dos materiais em estudo foi realizada utilizando-se um microscópio eletrônico de varredura do tipo JEOL JSM – 5510, do Laboratório de Microscopia Eletrônica do DEGEO/UFOP (Figura 3.6).



Figura 3.6 – Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV/EDS).

O princípio de funcionamento do MEV consiste na emissão de feixes de elétrons por um filamento capilar de tungstênio (eletrodo negativo), mediante a aplicação de uma diferença de potencial que pode variar de 0,5 a 30 kV. Essa variação de voltagem permite a variação da aceleração dos elétrons e também provoca o aquecimento do filamento. A parte positiva em relação ao filamento do microscópio (eletrodo positivo) atrai fortemente os elétrons gerados, resultando em uma aceleração em direção ao eletrodo positivo. A correção do percurso dos feixes (Figura 3.7) é realizada pelas lentes condensadoras que alinham os feixes em direção à abertura da objetiva, que ajusta o foco antes que os elétrons atinjam a amostra analisada.

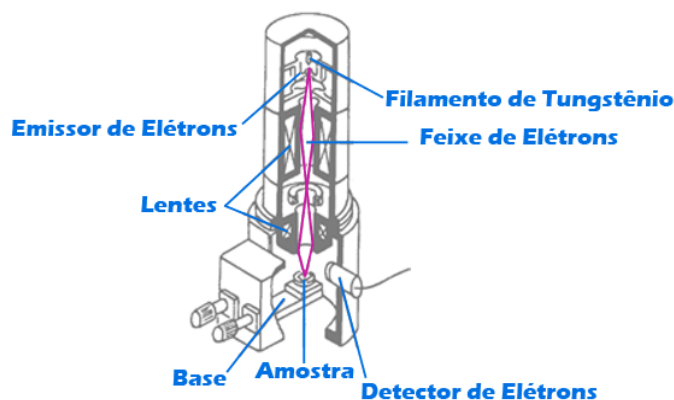


Figura 3.7 – Princípios de funcionamento do MEV.

Para a realização do ensaio as amostras precisam ser condutoras em presença de carbono e, para isso, passam por um processo chamado de metalização. Assim, as amostras são dispostas sob a forma de monocamadas em peças cilíndricas metálicas (pastilhas), revestidas de grafite por uma fita de dupla face e, em seguida, depositadas em um evaporador de vácuo por um período de cerca de 1 hora. Em seguida, faz-se a vaporização dos eletrodos de grafite por cerca de 10 minutos. Após este processo, a amostra passa a ser condutora e a pastilha é introduzida na câmara do microscópio, fazendo-se um vácuo de 3 minutos. As amostras são, então, submetidas a processos de bombardeamento de elétrons e feitas fotomicrografias. Neste estudo, os aumentos adotados foram de 50x, 100x, 150x e 270x nas amostras, sendo utilizados diferentes acessórios, tais como os espectrômetros de raios-x, detector de elétrons retroespalhados, detector de elétrons absorvidos e detector de elétrons transmitidos.

3.3.4 – Teor de cal livre

Para a determinação do teor de cal livre, utilizou-se como referência o método de ensaio prescrito pela NBR NM 13 – Cimento Portland - Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol (ABNT, 2004). Esta norma especifica a determinação do óxido de cálcio livre por dissolução em etilenoglicol e subsequente titulação em solução padronizada de ácido clorídrico (HCl), utilizando-se uma mistura como indicador de pH. Este método não diferencia óxido (CaO) de hidróxido [Ca(OH)₂] e não determina o cálcio que está quimicamente combinado em solução sólida com o FeO e o MnO ou na forma de silicatos. Entretanto, no escopo das análises pretendidas neste trabalho, os resultados deste teste são mais que satisfatórios.

3.4 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ESCÓRIA DE ACIARIA

Todos os ensaios apresentados neste item foram realizados nos laboratórios do Departamento de Engenharia Civil da UFOP. O ensaio de granulometria foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção; os ensaios de abrasão “Los Angeles”, massa específica aparente, absorção, porosidade aparente e resistência às intempéries foram realizados no Laboratório de Geotecnia; os ensaios resistência ao choque “Tretton”, formato do material, fragmentos macios e friáveis e teor de argila em torrões foram realizados no Laboratório de Ferrovias e Asfalto.

3.4.1 – Ensaio de Granulometria

A distribuição granulométrica constitui um indicativo indireto muito importante para a aferição de outras características do lastro, tais como resistência à quebra, resiliência, acumulação de deformação plástica e resistência ao cisalhamento. A granulometria dos materiais foi avaliada de acordo com a norma NBR NM248 – Agregados - Determinação da composição granulométrica (ABNT, 2003).

Nos ensaios, utilizou-se um peneirador mecânico convencional, com a série de peneiras padronizadas pela metodologia das normas, sendo obtidas os pesos retidos e acumulados e, conseqüentemente, as porcentagens retidas e passantes em cada peneira.

3.4.2 – Índice de contaminação

Para a avaliação da contaminação granulométrica existente nos materiais de lastro, Selig e Waters (1994) definiram o chamado “fouling index” ou índice de contaminação do lastro (FI), expresso por: $FI = P4 + P200$, sendo P4 e P200 as porcentagens em pesos passantes, respectivamente, nas peneiras 4 e 200. A Tabela 3.1 apresenta as correlações deste índice com a contaminação do lastro (Selig *et al.*, 1993).

Tabela 3.1 – Estado de contaminação do lastro (Selig *et al.*, 1993).

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

Com base nestes princípios, foram estimados os índices de contaminação do lastro para o caso das escórias de aciaria ensaiadas neste trabalho.

3.4.3 – Abrasão Los Angeles

O ensaio de ‘Abrasão Los Angeles’ permite quantificar o desgaste sofrido pelo material quando inserido no equipamento padrão (Figura 3.8), juntamente com uma carga abrasiva e quando submetida a um número determinado de revoluções. Neste trabalho o ensaio foi executado na faixa F da NBR 6465 (ABNT, 1984), com uma carga abrasiva

de 12 esferas de aço, as quais possuem massa total aproximada de 6kg. O índice de ‘abrasão Los Angeles’ A_n é calculada da seguinte maneira (Equação 3.2):

$$A_n = \frac{m_n - m'_n}{m_n} \times 100 \quad (3.2)$$

sendo m_n a massa total seca colocada no tambor do equipamento padrão e m'_n , a massa da amostra lavada na peneira de 1,7mm e seca após o ensaio.

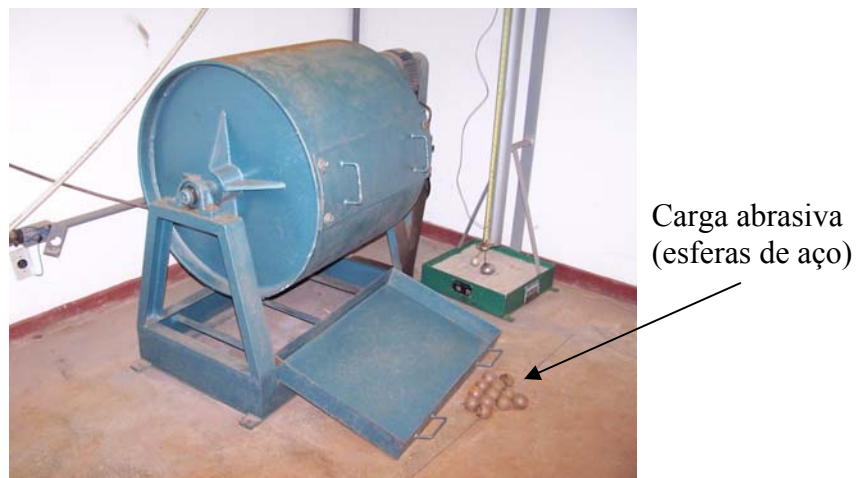


Figura 3.8 – Equipamento e cargas abrasivas utilizadas no Ensaio de abrasão Los Angeles.

3.4.4 – Resistência ao choque-índice de tenacidade ‘Treton’

A resistência ao choque é um índice muito utilizado para a caracterização de materiais utilizados como lastro para via férrea, pois esse tipo de esforço é muito comum nesse tipo de via durante a passagem das composições. Desta forma, o resultado do ensaio pode prever o comportamento do material quando aplicado como material de lastro.

O ensaio foi realizado de acordo com a norma NBR 8938 – Determinação da Resistência ao Choque (ABNT, 1985), a partir de 20 fragmentos de material com dimensões entre 16 e 19 mm, escolhidos ao acaso e submetidos a 10 (dez) choques no ‘aparelho Treton’ (Figura 3.9).



Figura 3.9 – Aparelho ‘Treton’ para medidas de resistência ao impacto.

3.4.5 – Massa específica aparente, absorção e porosidade aparente

As propriedades de massa específica aparente, absorção e porosidade aparente podem dizer muito sobre a qualidade do material em relação à sua utilização como material de lastro. Para as amostras analisadas, estas propriedades foram determinadas de acordo com a norma NBR 7418 – Determinação da massa específica aparente, da absorção de água e da porosidade aparente do material (ABNT, 1987).

3.4.6 – Formato do Material

A forma adequada do material de lastro é essencial para o bom funcionamento do mesmo; assim, formas laminares e alongadas dos grãos não são desejadas, dando-se preferência a formatos cúbicos. A determinação do formato dos materiais em estudo seguiu os procedimentos e a classificação prescrita na norma NBR 6954 – Lastro padrão - Determinação da Forma do Material (ABNT, 1989), a partir de 25 fragmentos obtidos por acaso em cada um dos lotes de material estudado. As dimensões dos fragmentos foram analisadas com base na terminologia indicada na Figura 3.10, com os critérios de classificação prescritos na Tabela 3.2 .

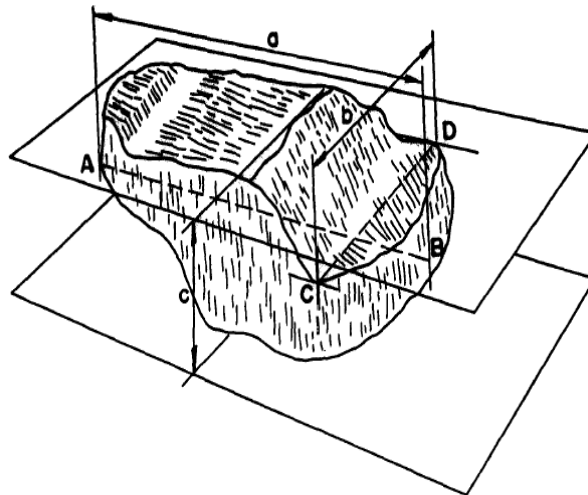


Figura 3.10 – Dimensões utilizadas para análise da forma dos fragmentos.

Tabela 3.2 – Classificação da forma dos fragmentos.

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 Dyaljee, 1979		
1	$\Sigma A / \Sigma C \leq 2$	Cúbica
2	$\Sigma A / \Sigma C > 2$	Alongada ou lamelar

3.4.7 – Fragmentos macios e friáveis

O material para lastro deve ser composto em quase toda sua totalidade por partículas consideradas sãs, livres de fragmentos macios ou facilmente friáveis, sendo dessa forma o teor de materiais macios e friáveis um condicionante para a aceitação de um dado material. Neste trabalho a determinação desses teores foi feita de acordo com a norma

NBR 8697 – Lastro padrão - Determinação do teor de material macio e friável (ABNT, 1984), com base em equipamento especificamente desenvolvido para a realização deste ensaio (Figura 3.11).



Figura 3.11 – Aparelho para a determinação do teor de material macio e friável.

3.4.8 – Teor de argila em torrões

Argila em torrões e outros materiais friáveis são elementos inadequados na composição dos agregados para lastro e, assim, a determinação desse teor é importante para garantir a não contaminação do lastro. O teor de argila em torrões e materiais friáveis presentes nas amostras foi determinado de acordo com a NBR 7218 – Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis (ABNT, 1987).

3.4.9 – Resistência à intempéries

A determinação da resistência a intempéries do material de lastro para via férrea é fundamental para se avaliar o comportamento do material em campo. Os procedimentos deste ensaio estão descritos na norma NBR 7702 – Lastro ferroviário - Determinação da

resistência do material à intempérie (ABNT, 1983). Esta norma recomenda avaliar a porcentagem em massa de resíduos coletados em relação à massa total do corpo-de-prova e observar modificações em relação ao mesmo, especialmente quanto à evolução de trincas e/ou à falta de homogeneidade entre os quatro fragmentos que são avaliados em cada ensaio.

3.5 – CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DA ESCÓRIA DE ACIARIA

3.5.1 – Compressão axial

A resistência à compressão axial é um dos indicadores mais importantes para a aferição da qualidade do material para lastro de via férrea. Neste trabalho, essa resistência foi avaliada de maneira direta, por meio do ensaio descrito pela norma NBR 6953 – Lastro Padrão – Determinação da resistência à compressão axial (ABNT, 1989) e também de forma indireta, por meio do ensaio de carga pontual de acordo com a norma ASTM D5731-95 (ASTM, 1995). Nos ensaios, uma dificuldade muito grande se impôs em relação à obtenção de fragmentos de escória e de brita para moldagem nas dimensões recomendadas pela NBR – 6953 (cubos com 7cm de aresta), o que foi possível apenas no caso do material ME1 (Figura 3.12).



Figura 3.12 – Corpos-de-prova do material ME1 para ensaios de compressão axial.

3.5.2 – Carga pontual

O ensaio de carga pontual (Figura 3.13) é realizado em amostras selecionadas com forma aproximadamente prismática, de acordo com a norma ASTM D5731-95 (ASTM, 1995). O carregamento pontual é aplicado na posição correspondente à metade do comprimento e à metade da largura de cada corpo-de-prova. Nos ensaios realizados, o carregamento foi aplicado com orientações distintas dos corpos-de-prova; metade deles posicionados em direção paralela ao sistema de aplicação das cargas e a outra metade posicionada normalmente em relação ao mesmo. Em todos os casos os diâmetros das escórias variaram entre 30 e 80 mm (ASTM D5731-95).



Figura 3.13 – Sistema de aplicação e execução de ensaio de carga pontual.

O ensaio é considerado válido quando o plano de ruptura coincide com a seção transversal de cada corpo-de-prova. Para cada ensaio determinou-se o índice de carregamento pontual I_s , a partir da carga de ruptura P , estimado com base na seguinte relação:

$$I_s = \frac{P}{De^2} \quad (3.3)$$

sendo De o diâmetro equivalente das partículas de escórias, definido pela ASTM D5731-95 como dado por:

$$De = \sqrt{\frac{4A_s}{\pi}} \quad (3.4)$$

sendo A_s a área do plano de ruptura, definida, de forma aproximada, de acordo com a norma ASTM D5731-95.

3.6 – CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DA ESCÓRIA DE ACIARIA

3.6.1 – Legislação e classificação

Os cuidados ambientais relativos à manipulação e utilização de resíduos sólidos industriais devem ser tratados observando-se as disposições legais pertinentes (Decreto nº. 96044/1988 e Resoluções CONAMA 006/1988, 002/1991, 008/1991, 005/1993, 009/1993, 019/1994, 024/1994 e 037/1994), de forma a se evitar riscos de problemas e de eventuais punições previstas na Lei de Crimes Ambientais – Lei nº.9.605, de 12 de fevereiro de 1998.

As normas técnicas nacionais para a definição e para a classificação de resíduos sólidos industriais (ABNT NBR 10004, 2004; ABNT NBR 10005, 2004 e ABNT NBR 10006, 2004) caracterizam tais resíduos, em estado sólido e semi-sólido, como resultantes de atividades industriais como, por exemplo, a siderurgia na produção do aço, incluindo-se também os lodos provenientes das instalações de tratamento de águas residuárias.

As decisões técnicas e econômicas tomadas em todas as fases da gestão dos resíduos sólidos industriais (manuseio, acondicionamento, armazenagem, coleta, transporte e disposição final) devem estar fundamentadas na classificação dos mesmos e levar em consideração o seu potencial de contaminação no meio ambiente, tanto a curto, médio e longo prazo. Segundo a NBR 10004, os resíduos podem ser classificados nas seguintes classes: Resíduos Classe I – Perigosos; Resíduos Classe II – Não Perigosos: Resíduos Classe IIA – Não Inertes e Resíduos Classe IIB – Inertes.

São classificados como Resíduos Classe I ou Perigosos os resíduos sólidos ou mistura de resíduos que, em função de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, podem apresentar riscos à saúde pública, provocando ou contribuindo para um aumento de mortalidade ou incidência de doenças e/ou apresentar efeitos adversos ao meio ambiente quando manuseados ou dispostos de forma inadequada.

São classificados como Resíduos Classe IIA ou Não Inertes os resíduos sólidos ou mistura de resíduos sólidos que não se enquadram na Classe I ou na Classe IIB. Estes resíduos podem ter propriedades tais como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.

Finalmente, são classificados como Resíduos Classe IIB ou Inertes os resíduos sólidos ou mistura de resíduos sólidos que, submetidos a testes de solubilização (norma NBR 10006), não apresentem nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões definidos na listagem nº 08 anexa à norma.

3.6.2 – Testes de lixiviação

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

Os ensaios foram realizados pela SGS Geosol Laboratórios Ltda. O ensaio consiste na pesagem de 100 g de amostra, que é, então, transferida a um frasco de lixiviação, para mistura com a solução de extração nº 1 ou nº 2 (ácido acético glacial ou solução de ácido acético e hidróxido de sódio, dependendo do pH do resíduo). Na seqüência, o frasco é mantido sob agitação durante 18 horas à temperatura de 25° C, com rotação de 30 vezes por minuto em agitador rotatório. Após esse período, procede-se à filtração do produto e o extrato lixiviado é analisado (Fernandes e Prado Filho, 2007).

3.6.3 – Solubilização

Para a avaliação da solubilidade dos compostos presentes, utilizou-se a metodologia especificada pelo Teste de Solubilização, executado conforme prevê a norma NBR 10006 – Solubilização de resíduos (ABNT, 2004) e outras recomendações citadas no trabalho de Fernandes e Prado Filho (2007). Este ensaio foi realizado também pela SGS Geosol Laboratórios Ltda especialmente para esse projeto de pesquisa. O ensaio consiste em se tomar 250 g de amostra, misturá-la com 1000 ml de água destilada, sem correção do pH. A mistura permanece em repouso, sendo agitada manualmente de tempos em tempos, durante um período 7 dias. Após este período, a amostra é filtrada e o material filtrado analisado.

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

3.7 – MONITORAMENTO DA FUGA DA CORRENTE DO CIRCUITO DE SINALIZAÇÃO PARA O LASTRO

A investigação da fuga da corrente do sistema de sinalização em campo, para o lastro de escória de aciaria, foi feita por meio de um sistema de coleta de dados (Figura 3.14) composto por sensores para medidas das seguintes grandezas: tensões nos trilhos, dormentes e placa de cobre; molhamento foliar; umidades da camada de sublastro; temperaturas da camada de sublastro e índices de precipitação.

Esta instrumentação foi montada nas cases ET 067 e ET 068, sendo capaz de identificar as condições de clima e temperatura em que ocorreu a perda da corrente elétrica para o lastro, bem como o valor da diferença de potencial entre diversos elementos da superestrutura (trilhos, dormentes e lastro). Os instrumentos permitiram ainda a determinação do valor da umidade e da temperatura da camada de sublastro.

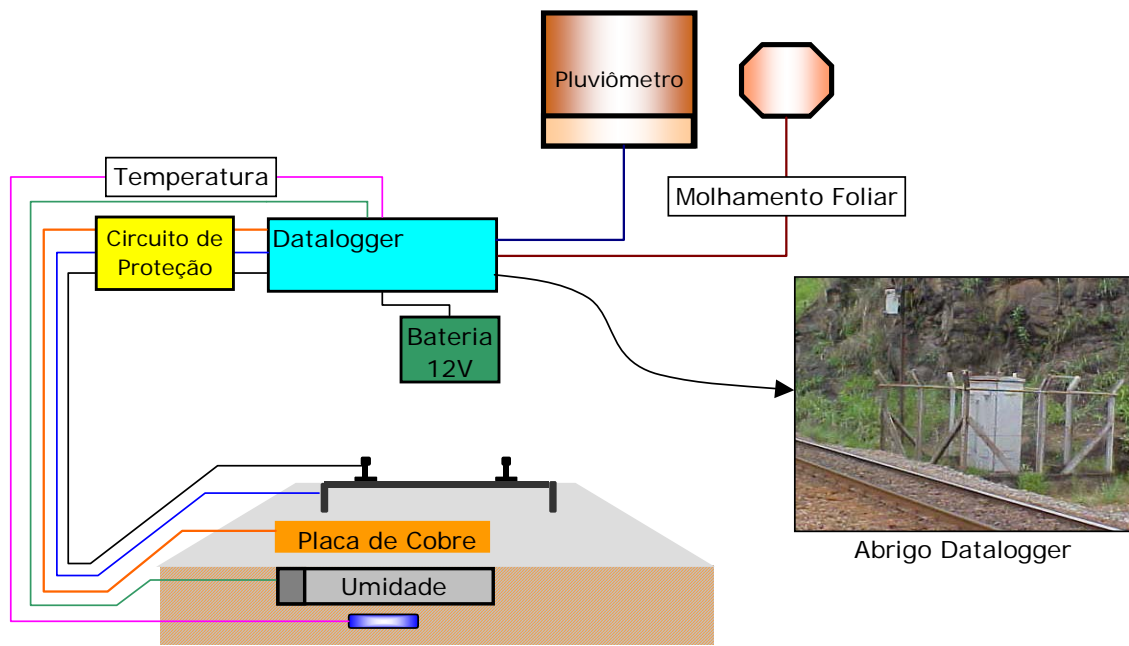


Figura 3.14 – Sistema de aquisição de dados de campo.

O sistema de monitoramento era automatizado de tal forma que o sensor de molhamento foliar acionava o funcionamento dos outros sensores ao menor sinal de precipitação chuvosa e interrompia a aquisição dos dados ao final da mesma. Neste contexto, foram gerados registros mensais que foram tratados, analisados e comparados com os dados dos testes de laboratório. A Figura 3.15 apresenta o sistema instalado e em operação durante uma coleta de dados.



Figura 3.15 – Sistema de aquisição de dados em campo.

O sistema montado acima, coletará dados durante os meses de janeiro a junho de 2007.

3.8 – SIMULADOR DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO LASTRO

A resistência de um condutor R é proporcional ao seu comprimento l , inversamente proporcional à sua seção S e proporcional a um fator ρ , chamado resistividade que depende da natureza do material e da temperatura do próprio condutor, tal que:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (3.5)$$

A unidade de resistência no sistema SI é expressa em ohms (Ω). A condutância é o inverso da resistência e sua unidade no sistema SI é Siemens (S), equivalente a (Ω^{-1}). Explicitando-se ρ , que representa a resistividade elétrica (cujo inverso expressa a chamada condutividade ou condutância específica do material), resulta que:

$$\rho = \frac{R \times S}{l} \quad (3.6)$$

Para determinar a resistividade elétrica das amostras de escória de aciaria LD estudadas e compará-las com a resistividade da brita, bem como para identificar a influência do tipo de elemento utilizado na confecção da via férrea na resistividade do material, foi construído um simulador de resistividade em escala real. O equipamento foi implantado na estação ferroviária Mário Carvalho (Figura 3.16), localizada no município de Timóteo/MG mediante parceria implementada entre a UFOP e a EFVM/CVRD, sendo baseado no simulador desenvolvido na CSN/UFSCar (Silva *et al.*, 2000).

O simulador é constituído por seis seções de teste, cada uma possuindo 2,0m de comprimento e seção transversal idêntica à adotada 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. A Figura 3.17 apresenta a geometria e o arranjo geral das seis seções – testes construídas para os trabalhos de simulação em campo.

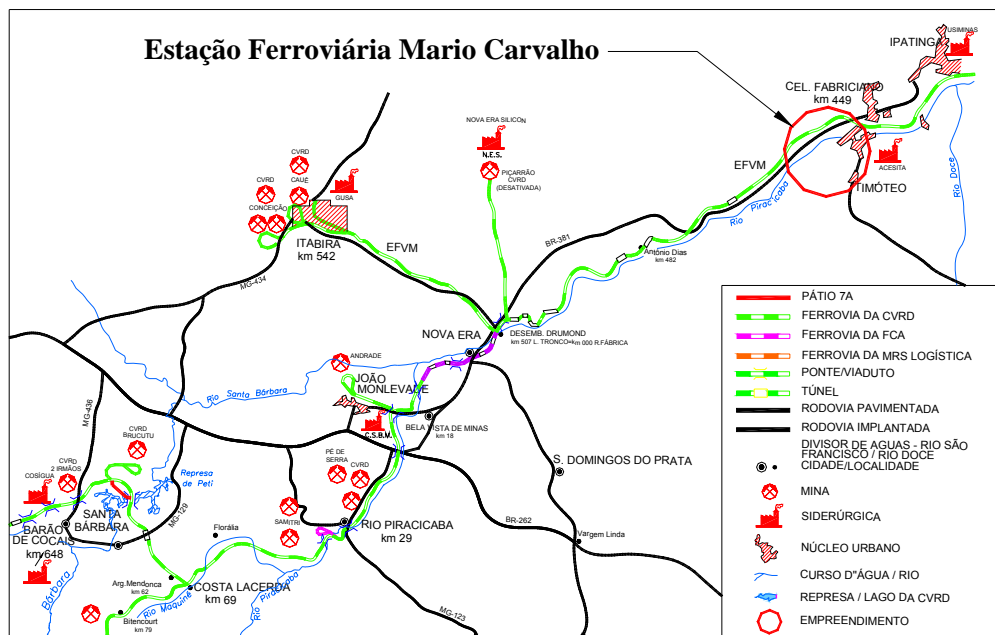


Figura 3.16 – Localização das seções de teste.

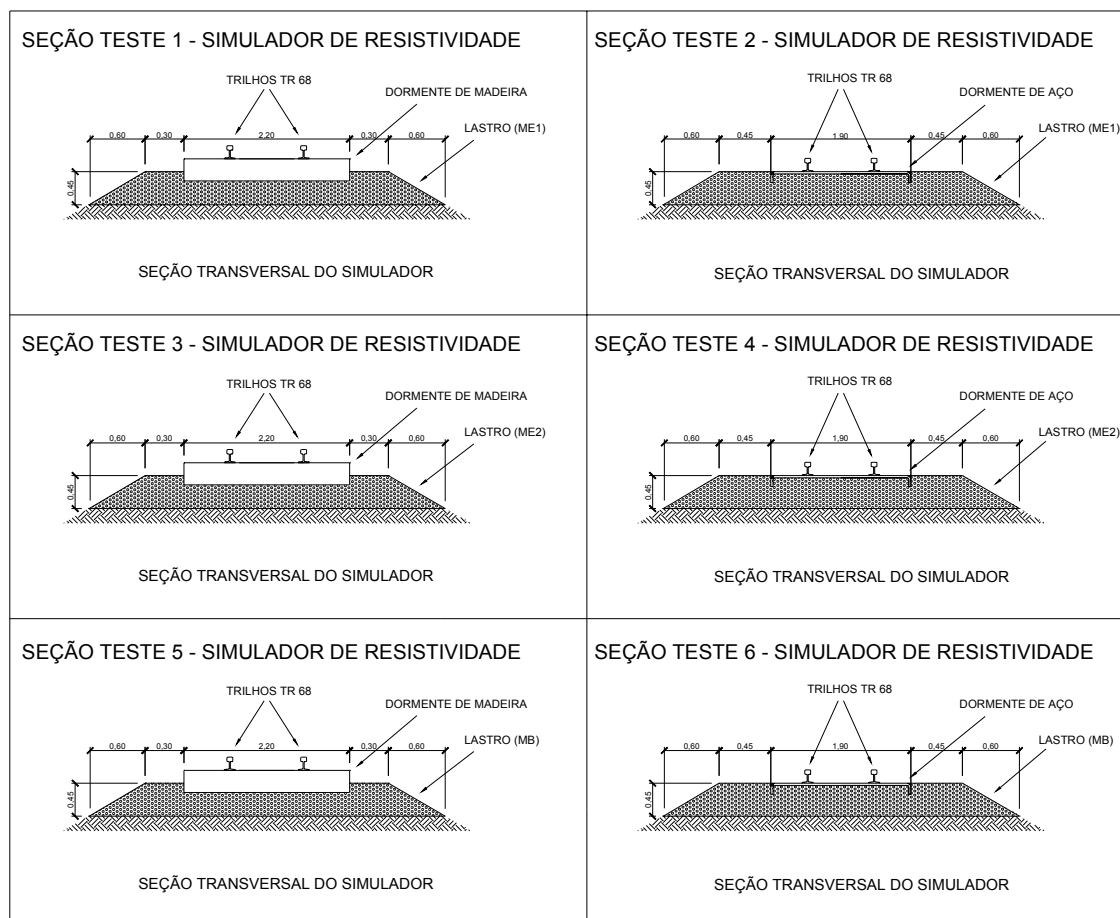


Figura 3.17 – Arranjo e geometria das seções de teste.

As Figuras 3.18 e 3.19 apresentam algumas etapas da construção do simulador de resistividade e o mesmo concluído, respectivamente.



Figura 3.18 – Construção das seções do simulador.



Figura 3.19 – Simulador concluído com as diferentes seções de teste.

A resistividade elétrica é determinada utilizando um aparelho chamado megôhmetro (Figura 3.20), que é capaz gerar várias tensões de teste. A tensão de teste escolhida foi a de 500 V, escolhida após uma bateria de testes preliminares e em concordância com as proposições de Silva *et al.* (2000).

A resistividade elétrica foi medida de duas formas distintas: (i) medida entre trilhos e entre eletrodos para o caso de dormentes de madeira (Figura 3.21); (ii) medida entre trilhos e entre eletrodos para o caso de dormentes de aço (Figura 3.22). Sendo em ambos os casos os eletrodos adjacentes aos trilhos e espaçados entre si de 135cm.



Figura 3.20 – Megôhmetro utilizado durante os testes.

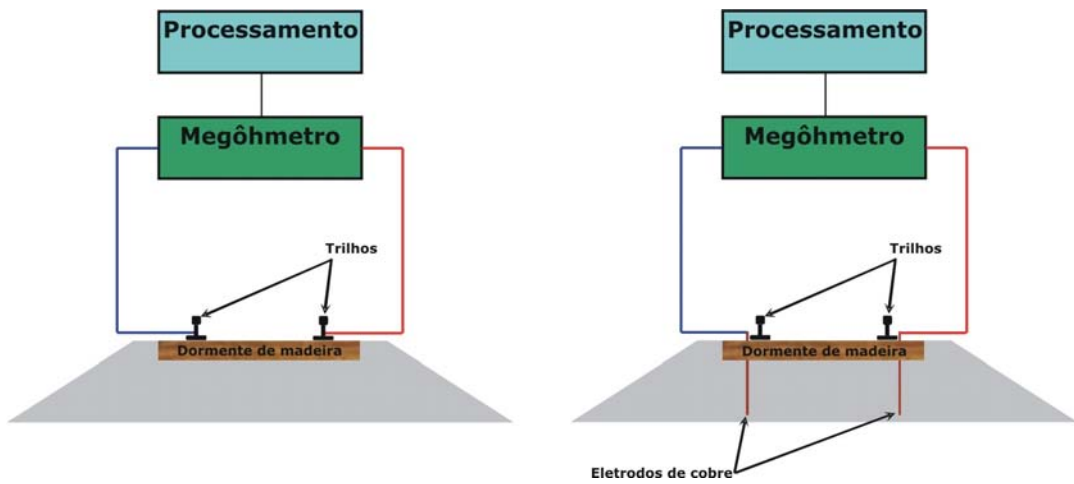


Figura 3.21 - Esquema de teste montado para o dormente de madeira.

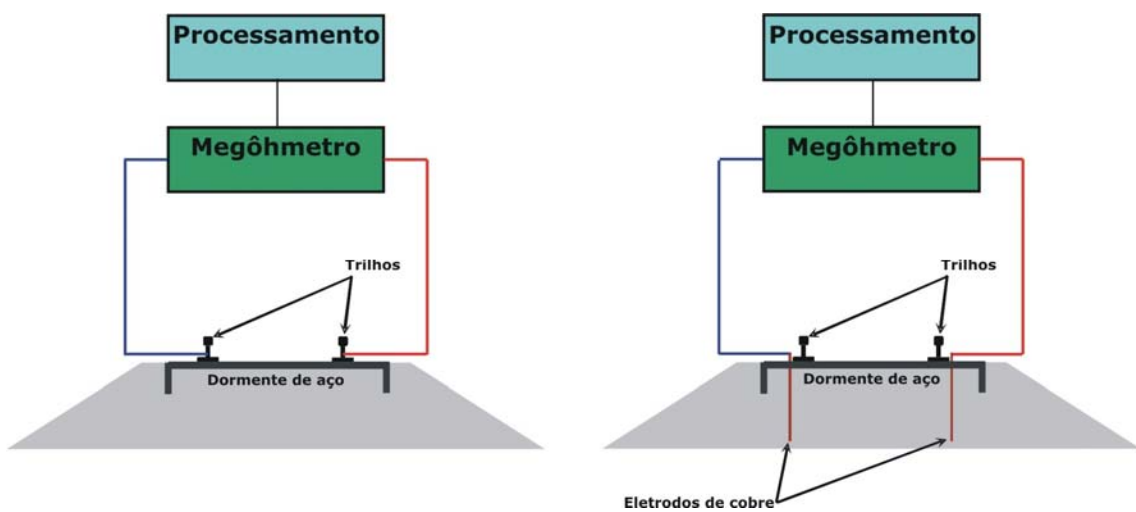


Figura 3.22 – Esquema de teste montado para o dormente de aço.

3.9 – INVESTIGAÇÃO DO EFEITO DA CURA SOBRE A CONDUTIVIDADE DA ESCÓRIA DE ACIARIA UTILIZADA COMO LASTRO

Um dos maiores entraves quanto a utilização da escória de aciaria na construção rodoviária é o seu potencial expansivo. Esta expansão pode chegar até a 10%, ocasionando erupções na pista, da ordem de até 10 cm de profundidade quando se utiliza escórias não tratadas (Silva e Mendonça, 2001). Em obras ferroviárias o efeito da expansão não é tão sensível quanto em obras rodoviárias; entretanto, a expansão provoca a quebra das partículas, comprometendo a operacionalidade da via.

Para caracterizar se o fenômeno da expansão tem influência relevante sobre a condutividade elétrica das escórias em estudo, foi montada uma caixa-teste (espécie de tanque) simulando uma secção transversal ferroviária. A caixa de madeira, revestida por uma membrana plástica, possuía 2,2m de comprimento, 1,2m de largura e 0,5m de altura, sendo preenchida com escória e água até o nível acima da escoria (Figura 3.23).



Figura 3.23 – Caixa-teste para avaliação dos efeitos da cura nas escórias de aciaria.

A condutividade elétrica do meio, no qual o material encontra-se imerso em água, é medida com um aparelho chamado condutivímetro. A condição de ensaio buscou simular uma situação real possível de acontecer em muitos trechos da EFVM, em que a drenagem do lastro e da via são precárias sob uma chuva intensa e prolongada, induzindo, assim, a saturação do lastro. Na montagem, também foram medidos o pH e a temperatura durante o teste (Figura 3.24).

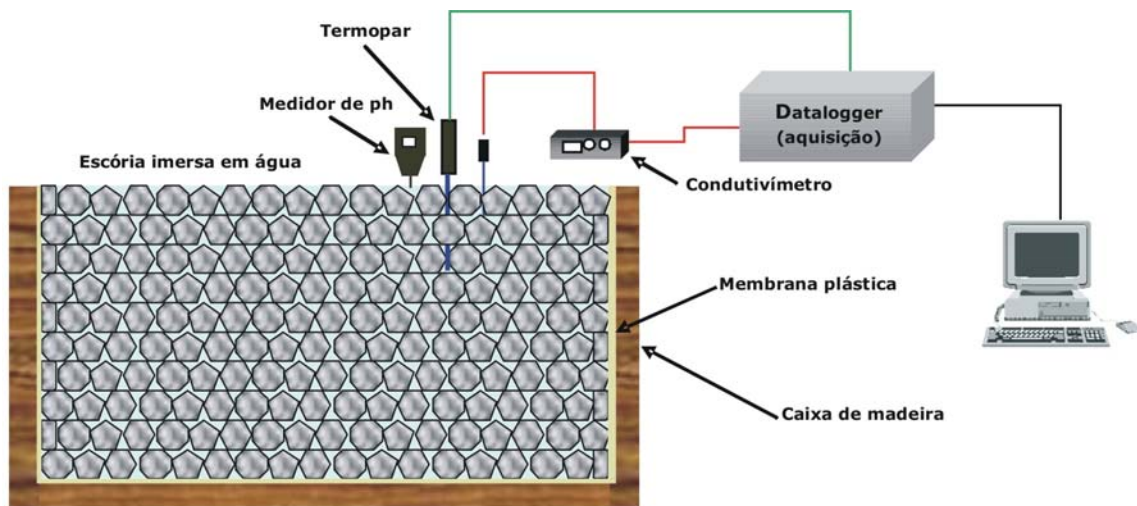


Figura 3.24 – Esquema completo da montagem do experimento.

Os dados de condutividade e temperatura foram coletados continuamente durante todo o experimento. Como o objetivo da montagem era o de se investigar o efeito da cura sobre a condutividade da escória de aciaria utilizada como lastro, o tempo de investigação foi fixado em 90 dias, baseada em estudos prévios de Nascimento (2003) que constatou que, após 45 dias de tratamento com água, a expansão volumétrica da escória tendia a estabilizar. A descarga da água contida nas caixas foi feita a cada 6 dias e o enchimento feito após 24 horas de cada descarga.

CAPÍTULO 4

4 – ANÁLISES DOS RESULTADOS: ENSAIOS DE LABORATÓRIO E MONTAGENS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos a partir dos estudos realizados com duas amostras de escória de aciaria provenientes do processo LD (amostra da escória da USIMINAS, designada por ME1 e amostra da escória da CST, denominada ME2) e com uma amostra de brita de gnaiss (proveniente da Pedreira Brasitália, na região metropolitana de Vitória/ES, denominada MB) para fins de comparação.

As análises comportaram abordagens experimentais em laboratório e em campo. Em laboratório, foram realizados ensaios de caracterização física, química, mecânica e ambiental das escórias estudadas. Em campo, montagens experimentais foram utilizadas para a investigação das propriedades de resistência, resistividade e condutividade elétrica dos materiais estudados, com ênfase nos resultados do monitoramento das fugas de corrente do circuito de sinalização ferroviária.

4.1 – CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E QUÍMICA DAS ESCÓRIAS

4.1.1 – Análises por difração de raio-X

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam os padrões de difratometria de raios-X obtidos para os materiais ME1 e ME2, respectivamente, mostrando a magnitude de ocorrência das fases mineralógicas dos materiais. Os principais constituintes mineralógicos presentes na amostra do material ME1 foram: carbonatehydroxylapatite – $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_3(\text{CO}_3)_3(\text{OH})_2$ (carbono, fósforo e hidróxido); $\text{Li}_{1.5}\text{MnFe}_2\text{O}_4$ (lítio, manganês, ferro e óxido); $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ (cálcio, ferro e óxido); cristobalite – SiO_2 (mesmo composto do quartzo, porém tem estrutura diferente); gibbsita – $\text{Al}(\text{OH})_3$; óxido de cálcio – CaO .

No caso da amostra ME2, foram evidenciados os seguintes constituintes minerais: carbonatehydroxylapatite – $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_3(\text{CO}_3)_3(\text{OH})_2$ (carbono, fósforo e hidróxido); $\text{Li}_{1.5}\text{MnFe}_2\text{O}_4$ (lítio, manganês, ferro e óxido); $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ (cálcio, ferro e óxido); quartzo – SiO_2 ; anortita – $(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Al}, \text{Si})_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (cálcio, alumínio e silicato) e sódio; óxido de cálcio – CaO ; óxido de Ferro – FeO .

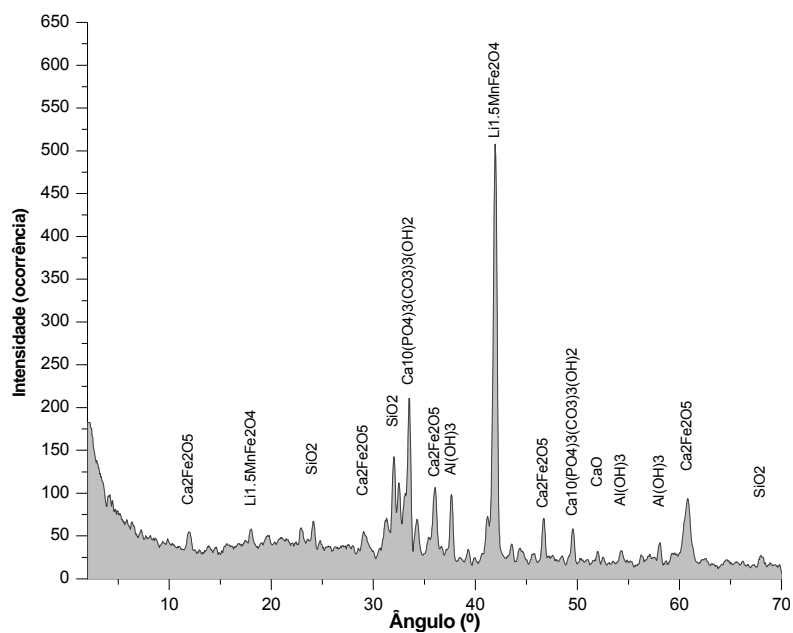


Figura 4.1 – Padrão de difração de raios-X da amostra ME1.

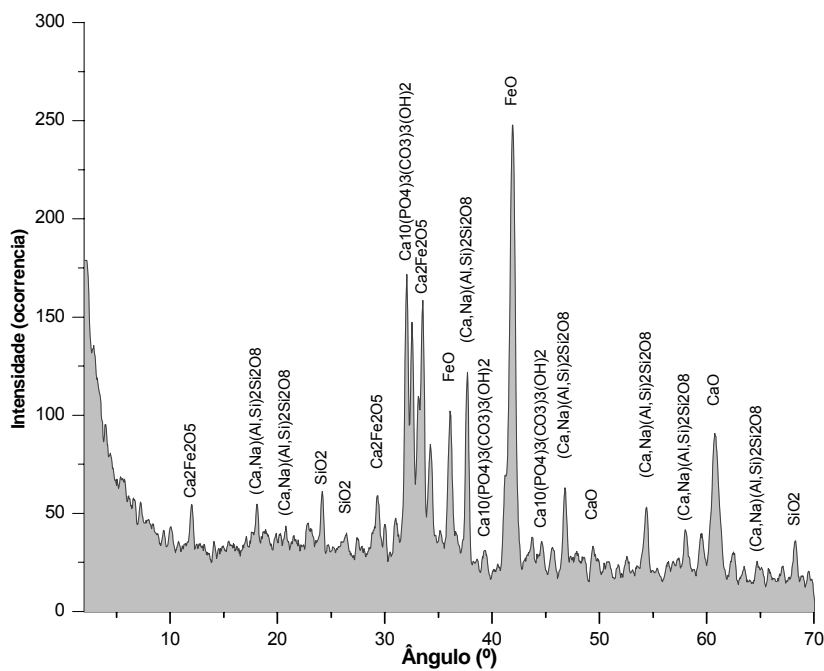


Figura 4.2 – Padrão de difração de raios-X da amostra ME2.

Com relação às espécies químicas presentes nas amostras analisadas, pode-se afirmar que ambos os materiais possuem características mineralógicas semelhantes e que as fases mineralógicas encontradas para os dois materiais são, em grande maioria, as mesmas encontradas para a escória estudada por Machado (2000). Observou-se ainda que ambos os materiais possuem produtos não hidratados como óxidos de Ferro (FeO) e cálcio (CaO), cuja hidratação pode trazer instabilidades ao material utilizado como lastro.

4.1.2 – Análises químicas quantitativas

Os resultados das análises químicas quantitativas das duas amostras de escória estudadas estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Espécies químicas e sua porcentagem em massa.

Material	Espécies químicas (% em massa)									
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	MgO	P ₂ O ₅	Fe _{Total}	S	Outros	CaO _{Livre}
ME1	43,80	8,03	2,36	4,95	1,68	1,43	36,86	0,09	1,09	4,55
ME2	51,40	8,39	1,58	5,08	1,73	1,60	30,20	0,03	0,27	6,01

Os valores obtidos para ambos os materiais estão dentro dos limites encontrados por outros pesquisadores para o processo BOF (Pena, 2004), que é o processo que originou as amostras estudadas. As porcentagens de óxido de cálcio (CaO) encontradas foram de 43,80% e 51,40% para os materiais ME1 e ME2, respectivamente, e o somatório de óxidos de alumínio (Al₂O₃) e de ferro (FeO) +(Fe₂O₃) foram de 39,22% para o material ME1 e 31,78% para o material ME2. Estes teores confrontam-se com os índices recomendados pela AREMA (2001), de que o lastro de escória de aciaria para ser utilizado deve ter uma porcentagem de óxido de cálcio (CaO) menor do que 45% e um somatório de óxidos de alumínio (Al₂O₃) e de ferro (Fe₂O₃ e FeO) inferior a 30%.

Adicionalmente, ressalta-se que um elevado teor de CaO favorece sua precipitação durante o refino do aço e a ocorrência dessa espécie no estado livre, com teores médios de 7% (Lopez, 1989; Machado, 2000). Neste trabalho os teores encontrados foram de 4,55% para o material ME1 e 6,01 % para ME2.

4.1.3 – Análises químicas por MVE/EDS

Utilizou-se a microscopia eletrônica de varredura para a observação e a caracterização das diferentes fases minerais existentes, desta vez com caráter pontual. As análises químicas semi-quantitativas foram realizadas de duas formas diferentes para ambos os materiais estudados, sendo uma das análises efetuada no material pulverizado e a outra na superfície de fragmentos dos materiais. As Figuras 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 ilustram a distribuição morfológica obtida nas análises do pó e dos fragmentos dos materiais ME1 e ME2, respectivamente. As Tabelas 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5 sistematizam as espécies químicas encontradas e suas respectivas porcentagens para cada análise pontual efetuada (assinalados nas Figuras 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6, respectivamente).

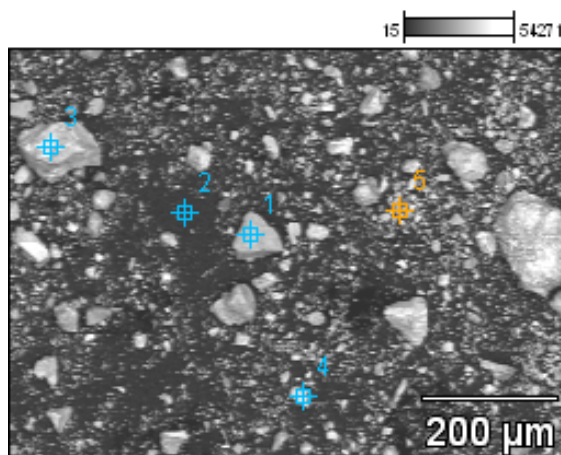


Figura 4.3 – Morfologia típica encontrada no material ME1 pulverizado.

Tabela 4.2 – Resultados da análise semi-quantitativa realizada em cada ponto da Figura 4.3.

ME1	Espécies químicas (% em massa)										
	F	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	Cu ₂ O	ZnO
Pt.1	-	4.00	25.53	9.61	-	56.75	0.60	0.63	0.77	1.08	1.02
Pt.2	-	-	34.01	-	-	12.20	-	-	-	53.79	-
Pt.3	-	20.87	2.16	1.92	-	7.83	-	9.08	57.57	0.57	-
Pt.4	-	1.27	1.58	10.34	1.73	68.60	-	1.70	12.33	1.38	1.08
Pt.5	1.26	10.06	3.13	5.91	-	14.97	-	9.06	47.94	3.67	3.99

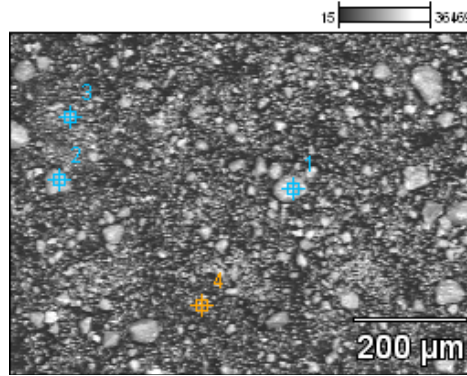


Figura 4.4 – Morfologia típica encontrada no material ME2 pulverizado.

Tabela 4.3 – Resultados da análise semi-quantitativa realizada em cada ponto da Figura 4.4.

ME2	Espécies químicas (% em massa)									
	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	Cr ₂ O ₃	MnO	Fe ₂ O ₃	Cu ₂ O	ZnO
Pt.1	4.91	-	10.79	-	46.4	0.32	4.99	29.01	1.31	0.99
Pt.2	4.47	3.48	8.06	-	53.1	-	3.83	23.30	1.79	1.87
Pt.3	4.78	3.46	12.62	1.92	29.1	-	6.13	38.68	1.72	1.58
Pt.4	-	10.99	14.46	-	25.5	-	-	10.39	21.73	16.9

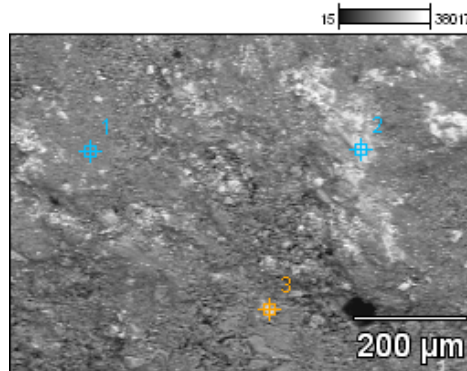


Figura 4.5 – Morfologia típica encontrada no material ME1 em fragmento.

Tabela 4.4 – Resultados da análise semi-quantitativa realizada em cada ponto da Figura 4.5.

ME1_Fragmento	Espécies químicas (% em massa)			
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃
Pt.1	1.05	3.32	95.63	-
Pt.2	0.34	-	90.04	9.62
Pt.3	-	-	100.00	-

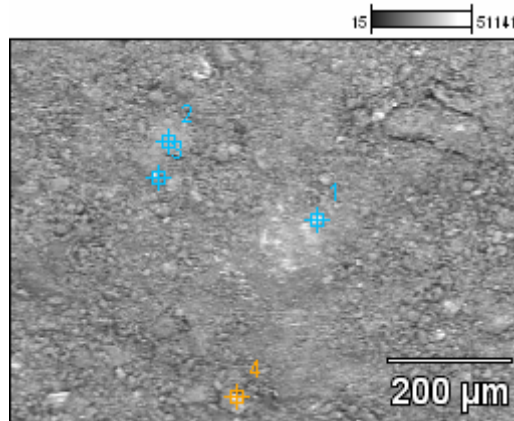


Figura 4.6 – Morfologia típica encontrada no material ME2 em fragmento.

Tabela 4.5 – Resultados da análise semi-quantitativa realizada em cada ponto da Figura 4.6.

ME2_Fragmento	Espécies químicas (% em massa)							
	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	V ₂ O ₅	MnO	Fe ₂ O ₃
Pt.1	2.01	0.97	19.87	2.69	63.58	0.47	2.57	7.84
Pt.2	1.94	1.30	9.20	-	79.76	-	2.16	5.64
Pt.3	-	-	1.22		89.59	-	1.74	7.45
Pt.4	-	-	1.47		89.17	-	3.37	5.99

Os resultados da análise semi-quantitativa realizada no pó dos materiais ME1 e ME2 foram bem semelhantes aos resultados encontrados na análise quantitativa realizada por fluorescência de raios-X, confirmando os compostos encontrados anteriormente e mostrando, mais uma vez, os elevados teores de óxidos de ferro e de cálcio. Com relação à análise dos fragmentos, observou-se que a superfície do material ME1 é composta basicamente apenas pelos óxidos Al₂O₃, SiO₂, CaO, Fe₂O₃ sendo que, em todos os pontos analisados, o teor de óxido de cálcio foi maior que 95%.

Com relação ao fragmento do material ME2, além dos óxidos encontrados no fragmento do material ME1, evidenciou-se também a ocorrência dos óxidos MgO, P₂O₅, V₂O₅ e MnO, sendo o composto mais representativo nos pontos analisados o óxido de cálcio, apresentando sempre teores acima de 60%. Os elementos Fe, Ca e Mg foram também detectados nas análises realizada por Pena (2004) para uma escória de aciaria LD.

4.2 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA BRITA E DAS ESCÓRIAS

Como ensaios de caracterização física, são apresentados os resultados obtidos nas etapas de análise granulométrica, determinação da abrasão ‘Los Angeles’, do índice de tenacidade treton, da massa específica aparente, da porosidade aparente e da absorção, forma do material, teor de fragmentos macios e friáveis e resistência às intempéries.

4.2.1 – Análises granulométricas

A distribuição granulométrica da brita e das escórias estudadas (Figuras 4.7 e 4.8) foi estabelecida de acordo com as especificações da ABNT. Os materiais para que sejam utilizados como materiais de lastro ferroviário devem apresentar uma granulometria superior a 12,7 mm, salvo uma pequena tolerância de 5% da massa total, segundo a NBR 5564 (EB-655/91).

Os materiais MB e MB1 ficaram dentro da faixa especificada pela referida norma, ao passo que o material MB2 ficou bem fora da faixa pré-estabelecida, apresentando uma porcentagem de 14% do material passante na peneira de 12,7 mm.

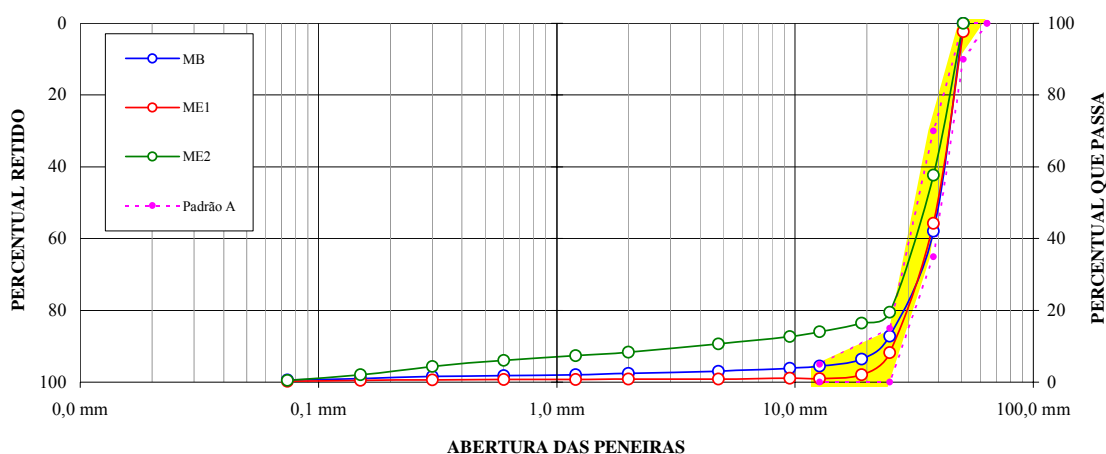


Figura 4.7 – Enquadramento das curvas na faixa padrão A da ABNT.

A quantidade excessiva de material de granulometria fina é prejudicial à boa funcionalidade do lastro, diminuindo suas propriedades de drenagem, podendo dar a ele

uma maior rigidez devido à ocupação dos vazios. Nesse caso, o processo de cimentação pode ser facilitado se houver a presença de água e compostos químicos solubilizados.

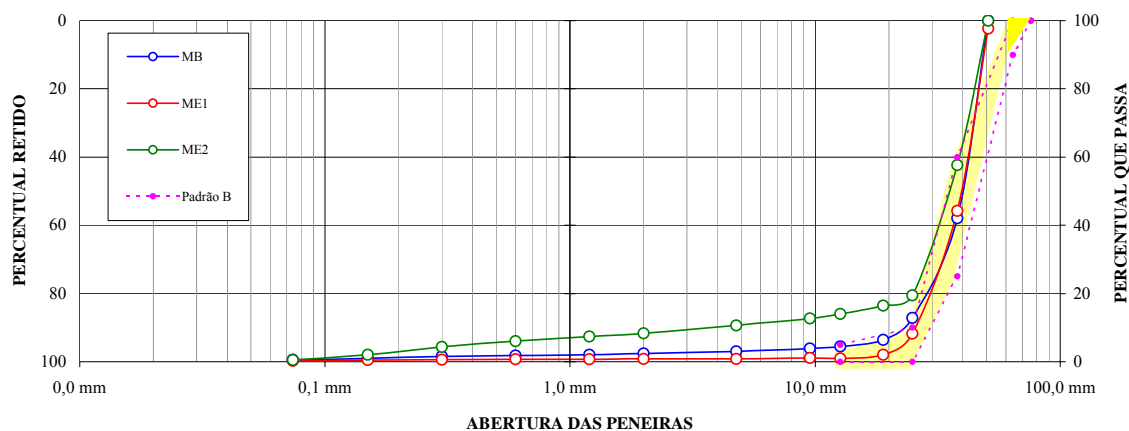


Figura 4.8 – Enquadramento das curvas na faixa padrão B da ABNT.

A partir do ensaio de granulometria, foram obtidos os parâmetros característicos (Tabela 4.6), como o coeficiente de não uniformidade $C_u = D_{60}/D_{10}$, coeficiente de curvatura $C_c = (D_{30})^2/D_{60}.D_{10}$, dimensão máxima característica – DMC e módulo de finura.

Tabela 4.6 – Propriedades geométricas obtidas a partir da granulometria.

Material	Parâmetro C_u	Parâmetro C_c	DMC (mm)	Módulo de finura
MB	1,73	1,42	50	8,35
ME1	1,52	1,08	50	8,49
ME2	12,67	6,88	50	7,74

De acordo com os parâmetros obtidos na Tabela 4.6, os materiais MB e ME1 mostraram-se bem graduados e muito uniformes. O material ME2 mostra-se mal graduado e de uniformidade média. Todos os materiais estudados apresentam um DMC de 50 mm, que é o número da peneira da série normal na qual a porcentagem acumulada é inferior ou igual a 5%. O DMC de 50mm das escórias estudadas foi menor do que o valor de 64mm encontrado tanto no trabalho de Sousa *et al.* (2004) quanto no de Fernandes (2005). Os valores dos módulos de finura variaram entre 7,74 e 8,49, correspondendo à soma das porcentagens acumuladas em todas as peneiras da série normal dividida por 100 e lembrando que, quanto maior o módulo de finura, mais grosso o material de lastro.

4.2.2 – Índice de contaminação

Com base no ensaio de granulometria, definiu-se o índice de contaminação e o grau de contaminação para os materiais estudados (Tabela 4.7). Os materiais MB e ME1 foram classificados como moderadamente limpos e o material ME2 como moderadamente contaminado.

Tabela 4.7 – Índice e grau de contaminação dos materiais.

Material	Índice de contaminação (FI)	Grau de contaminação
MB	3,60	moderadamente limpo
ME1	1,20	moderadamente limpo
ME2	11,20	moderadamente contaminado

O índice de contaminação está diretamente ligado ao ciclo de vida útil do lastro, pois, quanto mais contaminado o lastro, menor será sua capacidade de exercer suas funções estruturais. A perda da capacidade de drenagem é o ponto mais crítico. Em se tratando de lastro de escória de aciaria, um outro problema é a capacidade de cimentação das partículas mais finas da escória na presença de água e de outros materiais contaminantes provenientes do sublastro e derrame dos vagões. Essas observações são relevantes, uma vez que o material ME2 é lançado na via já moderadamente contaminado.

Outro dado relativo ao ensaio de granulometria é o teor de material pulverulento. Trata-se do somatório das partículas minerais com dimensões inferiores a 0,075mm, inclusive os materiais solúveis em água, presentes nos materiais de lastro. A determinação deste teor é feita de acordo com NBR 7219 – Agregados – Determinação do teor de materiais pulverulentos (ABNT, 1987), atualmente cancelada pela ABNT.

4.2.3 – Abrasão Los Angeles

Os resultados dos ensaios de abrasão Los Angeles (Tabela 4.8) mostram que ambos os materiais estão aptos neste quesito, para serem utilizados na confecção de lastro ferroviário. A abrasividade está diretamente ligada à vida útil do lastro ferroviário.

Tabela 4.8 – Resultados dos ensaios de Abrasão Los Angeles.

Material	Graduação da amostra	Número de esferas	Abrasão Los Angeles (%)
MB	F	12	21,10
ME1	F	12	11,20
ME2	F	12	11,80

Os limites máximos para a abrasão Los Angeles recomendados pela AREMA (2002), para os materiais brita e escória de aciaria, são, respectivamente, 25 e 30%, mas resultados muito baixos para abrasão, como os encontrados para as escórias ME1 e ME2, podem representar materiais altamente abrasivos a outros materiais. Desta forma, podem indicar elevados desgastes mecânicos dos equipamentos utilizados nas operações de manutenção da via e acrescer também os custos com manutenção.

4.2.4 – Resistência ao choque - Índice de tenacidade Treton

A Tabela 4.9 apresenta os resultados dos ensaios de resistência ao choque para os materiais estudados. Todos os materiais apresentaram resistência ao choque dentro dos limites estabelecidos por norma, sendo que o material ME1 apresentou uma resistência maior do que os materiais MB e ME2, cujos índices de resistência ao choque se apresentaram muito próximos. Da mesma forma que o ensaio de Abrasão Los Angeles, o enquadramento deste índice aos limites de norma confere ao lastro ferroviário uma elevada vida útil, com menores ônus de manutenção.

Tabela 4.9 – Resultados dos ensaios de resistência ao choque Treton.

Material	Nº de fragmentos	Número de golpes	Resistência ao choque (%)
MB	20	10	16,00
ME1	20	10	10,20
ME2	20	10	16,10

4.2.5 – Massa específica aparente, absorção e porosidade aparente

A Tabela 4.10 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de massa específica aparente, absorção de água e porosidade aparente das escórias e da brita estudadas. Em se tratando de massa específica aparente, todos os materiais apresentaram valores superiores aos recomendados pela norma de lastro padrão (24 kN/m^3), sendo que os materiais ME1 e ME2 apresentaram valores bem acima dos recomendados na citada norma.

Com relação à absorção de água, os materiais MB e ME1 ficaram dentro do limite de 1% estabelecido pela norma de lastro padrão, enquanto que o material ME2 apresentou uma absorção de quase 100% acima do recomendado. Analisando-se em termos da porosidade aparente, apenas o material MB enquadrou-se no valor de 1% recomendado pela norma de lastro padrão, ficando as duas escórias estudadas bem afastadas deste limite.

Tabela 4.10 - Resultados dos ensaios de massa específica, absorção de água e porosidade aparente.

Material	Massa específica aparente (kN/m^3)	Absorção de água (%)	Porosidade aparente (%)
MB	26,00	0,23	0,36
ME1	35,80	0,99	2,66
ME2	33,90	1,96	4,55

A massa específica dos materiais de lastro representa um fator importante no que se diz respeito à resistência que se pode oferecer aos movimentos transversais e longitudinais da grade (trilhos e dormentes), quando não se tem tráfego.

A absorção e a porosidade aparente dos materiais podem, por outro lado, pode nos dar uma idéia de como esses materiais irão se comportar em campo, o que nos ajudaria prever problemas futuros, auxiliando ainda a estabelecer eventuais intervenções.

4.2.6 – Forma do Material

O formato de um material representa o contorno e a configuração geométrica dos fragmentos do material. A Tabela 4.11 apresenta a classificação da forma dos materiais estudados segundo a NBR 6954 e pela metodologia de Raymond e Diyaljee, 1979.

Tabela 4.11 – Determinação da forma dos materiais estudados.

Material	Relação B/A	Relação C/B	Relação $\Sigma A / \Sigma C$	Classificação NBR 6954	Classificação Raymond e Diyaljee, 1979
MB	0,75	0,51	2,75	Cúbica	Alongada ou lamelar
ME1	0,81	0,75	1,70	Cúbica	Cúbica
ME2	0,78	0,76	1,73	Cúbica	Cúbica

De acordo com a classificação proposta pela norma de lastro padrão, ambos os materiais estudados apresentaram forma cúbica. Na classificação proposta por Raymond e Diyaljee (1979), o material MB apresentou forma alongada ou lamelar, diferentemente da classificação anterior. Os materiais ME1 e ME2 repetiram a forma cúbica apresentada anteriormente.

A predominância da forma cúbica nas duas amostras de escória estudadas são, sem dúvida, um ponto favorável à aplicabilidade destes resíduos siderúrgicos como material de lastro ferroviário. Isto ocorre porque fragmentos com formas cúbicas, diferentemente daqueles com formas lamelares, tendem a facilitar um maior intertravamento entre os fragmentos, dando maior rigidez à camada de lastro e, conseqüentemente, à via.

4.2.7 – Fragmentos macios e friáveis

A análise do teor de fragmentos macios e friáveis está apresentada na Tabela 4.12. Este ensaio permite obter a porcentagem da massa total do corpo de prova que não é

considerada 'sã', os resultados obtidos estão todos acima do valor de 5% recomendado pela NBR 5564 (EB-655/91).

Tabela 4.12 – Determinação do teor de fragmentos macios e friáveis dos materiais estudados.

Material	Número de fragmentos analisados	Teor de fragmento macio e friável (%)
MB	71	18,30
ME1	80	20,20
ME2	70	7,40

4.2.8 – Teor de argila em torrões

Não foram encontrados teores significativos de argila em torrões em nenhum dos materiais analisados, como pode ser visto na Tabela 4.13. A manutenção deste teor em níveis abaixo de 0,5%, segundo a norma para lastro padrão NBR 5564 (EB-655/91), é essencial para a qualificação destes materiais como lastro padrão.

Tabela 4.13 – Determinação do teor de argila em torrões.

Material	Massa inicial total para análise (g)	Massa total removida (g)	Teor de argila em torrões (%)
MB	59159,54	283,97	0,38
ME1	65603,34	150,89	0,23
ME2	53460,00	240,57	0,35

4.2.9 – Resistência às intempéries

Os resultados dos ensaios de resistência às intempéries, após 40 ciclos de imersão em solução de sulfato de sódio e secagem em estufa, estão mostrados na tabela 4.14. Este ensaio simula os possíveis danos provocados pelas intempéries após anos de deposição dos materiais ao ambiente local.

Tabela 4.14 – Determinação da resistência às intempéries

Material	Massa inicial total do corpo-de-prova (g)	Massa final total do corpo-de-prova (g)	Resíduos gerados (%)
MB	672,69	667,16	0,80
ME1	655,86	648,85	1,07
ME2	737,7	656,18	11,10

O material MB apresentou uma boa resistência às intempéries, gerando poucos resíduos na solução de sulfato. Observou-se ainda uma homogeneidade na aparência final de todos os fragmentos do corpo-de-prova do material. O material ME1 também apresentou uma relação entre os pesos final e inicial bem pequena (1,07%). Entretanto, constatou-se uma presença apreciável de resíduos depositados no fundo do frasco com solução de sulfato no qual o corpo-de-prova do material ME1 foi imerso. Além disso, dois dos quatro fragmentos do ensaio apresentaram trincas evidentes e os fragmentos, mesmo após lavagem e secagem, apresentavam-se impregnados pelo sulfato.

A fim de investigar o ocorrido nos fragmentos do material ME1, estes foram rompidos em uma prensa de carga pontual. Após ruptura, notou-se que mesmo os poros mais internos do material estavam preenchidos pelo sal da solução (Figura 4.9), indicando, assim, uma intensa atividade química entre a solução de sulfato de sódio e a escória.



Figura 4.9 – Partícula ME1 utilizada no ensaio (fissurada e posterior ruptura, sendo o material esbranquiçado o sal da solução utilizada no ensaio).

Com relação ao material ME2, que apresentou uma geração de resíduos de 11,10%, o maior teor entre os materiais estudados, não houve ocorrência de trincas nem impregnação e preenchimento dos poros do material pelo sal da solução. Apesar do alto teor de resíduos gerados, os fragmentos do corpo-de-prova mostraram-se homogêneos após o ensaio.

4.3 – CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS ESCÓRIAS

4.3.1 – Compressão axial

Como mencionado no item 3.3.3.1, não foi possível realizar o ensaio de compressão axial em todos os materiais estudados, sendo o mesmo realizado apenas para o material ME1, devido a falta de corpos-de-prova dos materiais MB e ME2, com as dimensões exigidas para a realização do ensaio. Em geral, neste ensaio, o resultado é expresso na forma da média da ruptura dos vários corpos-de-prova que se deseja ensaiar. Entretanto, como houve uma discrepância entre os valores da resistência à compressão axial para os diferentes corpos-de-prova do mesmo material, a Tabela 4.15 apresenta, além da média dos resultados, os valores obtidos para cada corpo-de-prova individualizado.

Tabela 4.15 – Ensaio de compressão axial realizado no material ME1.

Nº CP	Forma	Aresta (cm)	Carga Rup.(kgf)	Resistência (MPa)
1	Cúbica	7	16.600	33,38
2	Cúbica	7	16.900	34,49
3	Cúbica	7	77.000	(157,14)
4	Cúbica	7	36.200	73,88
5	Cúbica	7	32.000	65,31
6	Cúbica	7	22.600	46,12
7	Cúbica	7	23.400	47,76
8	Cúbica	7	39.800	81,22
Média				67,47

As grandes diferenças entre as cargas de ruptura, para materiais de um mesmo lote e com as mesmas dimensões, é explicada pela variação da rigidez dos corpos-de-prova (Figura 4.10). Para um caso em particular (CP3), o ensaio foi paralisado por limitações do equipamento, ante de se atingir a condição de ruptura da amostra ensaiada.



Figura 4.10 – Amostras rígida e porosa de um mesmo lote de escória.

Apesar de alguns corpos-de-prova apresentarem resistência à compressão axial muito maior do valor exigido pelo corpo técnico da EFVM/CVRD (80MPa), a média dos resultados ficou abaixo deste valor (67,47MPa), com alguns resultados inferiores a 40MPa. Estes baixos valores são inadequados para a utilização destes materiais como lastro ferroviário, uma vez que concessionárias de linhas férreas como a VALEC – Engenharia, Construções e Ferrovias S.A, chegam a exigir 100MPa dos seus fornecedores (VALEC, 2002).

4.3.2 – Carga pontual

Os resultados dos ensaios de carga pontual na escória estão representados na Tabela 4.16. Para a determinação do índice $I_{s(50)}$, as cargas de ruptura são plotadas com os respectivos diâmetros equivalentes, admitindo-se o diâmetro $D_e = 50\text{mm}$ como sendo a dimensão de referência para os corpos-de-prova ensaiados, tanto para o plano paralelo como para o plano perpendicular ao plano de ruptura.

Tabela 4.16 – Propriedades de resistência dos materiais utilizados como lastro.

Identificação	Índice de carregamento I_{S50} (Mpa)		Resistência à compressão uniaxial δ_{uc} (Mpa)		Índice de anisotropia $I_{a(50)}$
	Plano \perp	Plano //	Plano \perp	Plano //	
	MB	5,50	5,21	126,50	
ME1	7,37	6,65	146,5	132,20	1,11
ME2	10,97	9,33	218,10	185,50	1,18

Os resultados dos ensaios de carga pontual na escória de aciaria mostraram-se compatíveis com os de materiais rochosos, apresentando bons resultados para os índices de carregamento pontual, tanto para o fator $I_{s(50)}$ paralelo como para o fator $I_{s(50)}$ perpendicular, quando comparados aos índices de rochas naturais como o basalto ($I_{s(50)} = 9,5$) (Maia *et al.*, 2004) e também ao próprio material MB ($I_{s(50)} = 5,35$).

De posse dos fatores $I_{s(50)\perp}$ e $I_{s(50)//}$, definiu-se também o respectivo índice de resistência anisotrópico $I_{a(50)} = \frac{I_{s(50)\perp}}{I_{s(50)//}}$, cujos valores estão dados na Tabela 4.16.

Com base no valor do índice de anisotropia, conclui-se que as escórias de aciaria estudadas não apresentam um plano preferencial de ruptura, sendo a sua resistência praticamente uniforme em todas as direções. Segundo Goodman (1989), o índice de carregamento pontual é um parâmetro representativo das características de resistência que leva em conta a geometria das partículas e a porosidade.

A resistência à compressão uniaxial δ_{uc} foi estimada por meio da relação empírica $\delta_{uc} = C \cdot I_{s(50)}$, sendo C um coeficiente experimental que depende do diâmetro dos corpos-de-prova e das características do material. Os valores do coeficiente experimental C utilizados neste trabalho foram estimados por Fernandes (2005) especificamente para escórias de aciaria LD. Estes valores são comparados aos valores padronizados da norma ASTM D5731-95 na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 – Valores de C para material rochoso (ASTM D5731-95) e para a escória de aciaria (Fernandes, 2005).

Diâmetro CP (mm)	Valores de C (ASTM)	Valores de C Fernandes (2005)
20	17,5	15,82
30	19	17,17
40	21	18,53
50	23	19,88
54	24	20,42
60	24,5	21,24

A partir da correlação empírica $\delta_{uc} = C \cdot I_s(50)$, validada com os valores do coeficiente experimental C, obtidos para a escória de aciaria em função do diâmetro, plotou-se a relação entre índices de carregamento pontual e resistências à compressão uniaxial para diferentes diâmetros, para a brita MB utilizada como referência (norma ASTM) e para as escórias ME (valores de Fernandes, 2005), respectivamente (Figuras 4.11 a 4.13).

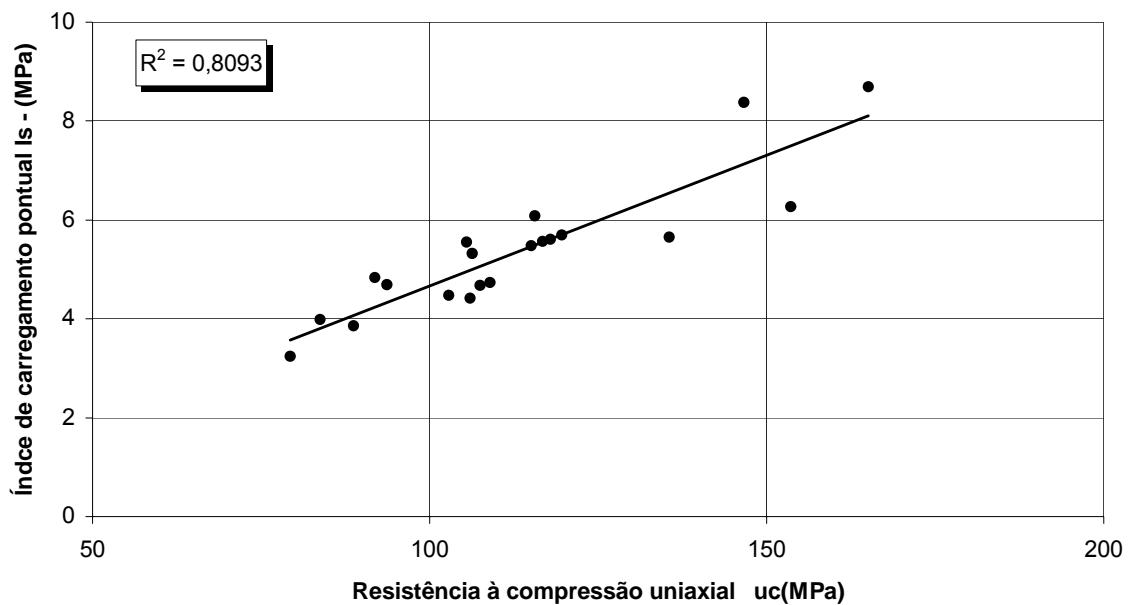


Figura 4.11 – Relação entre índices de carregamento pontual e resistências à compressão uniaxial material MB.

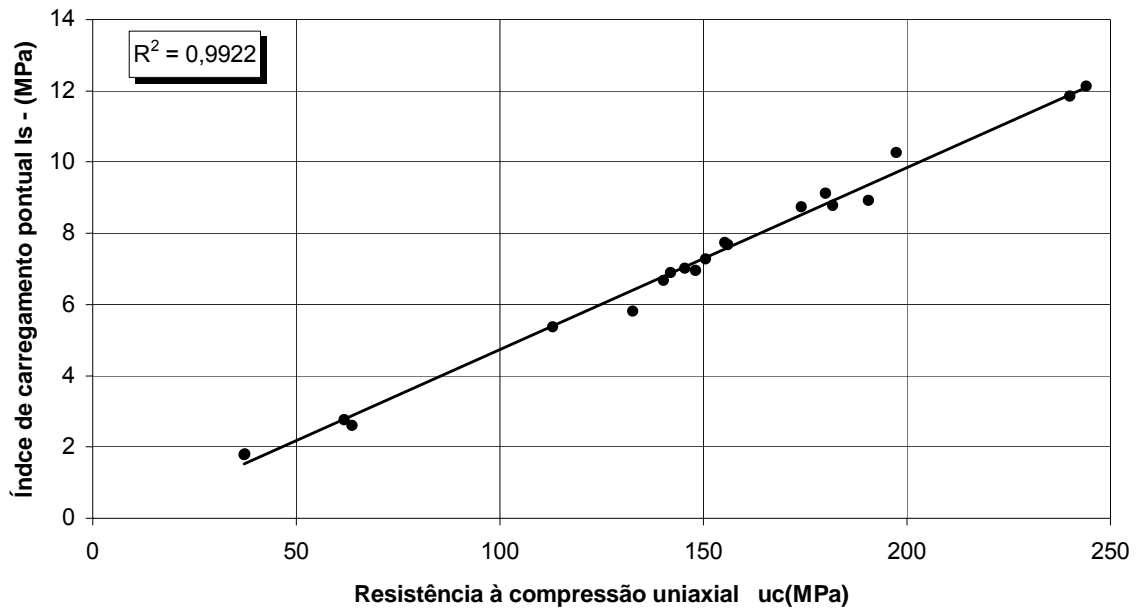


Figura 4.12 – Relação entre índices de carregamento pontual e resistências à compressão uniaxial material ME1.

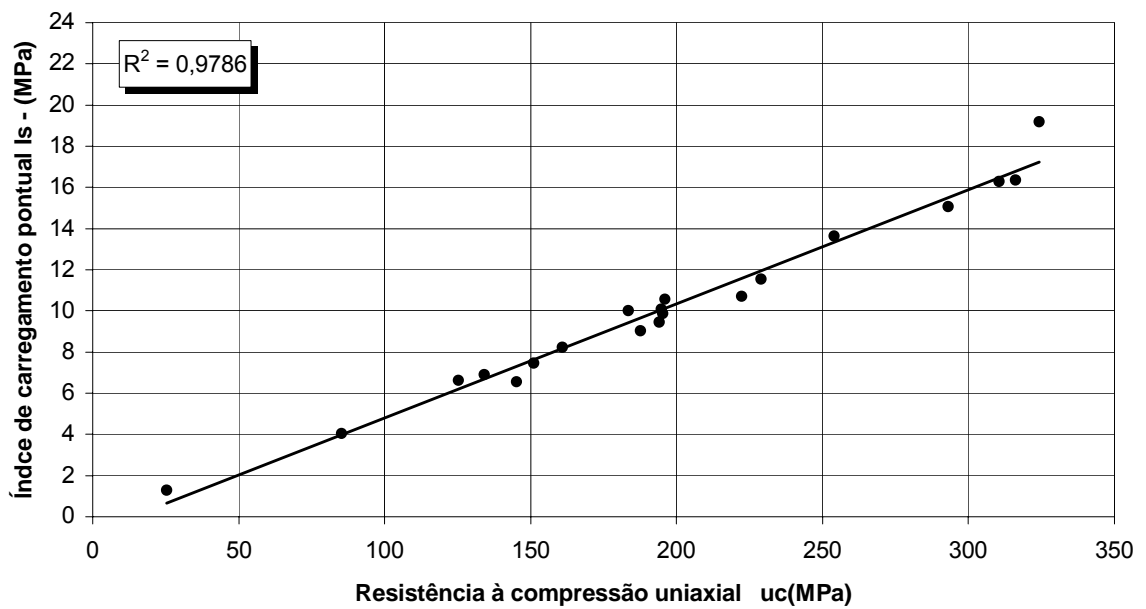


Figura 4.13 - Relação entre índices de carregamento pontual e resistências à compressão uniaxial material ME2.

4.4 – CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DAS ESCÓRIAS

4.4.1 – Lixiviação e solubilização

Os resultados dos ensaios de lixiviação para parâmetros inorgânicos (separação de certas substâncias inorgânicas contidas nos resíduos industriais por meio de lavagem ou percolação) estão indicados nas Tabelas 4.18 e 4.19, para os materiais ME1 e ME2, respectivamente.

Os resultados dos ensaios de solubilização também para parâmetros inorgânicos (realização de análise química em amostra representativa do resíduo, depois de dissolvido em água deionizada ou destilada e filtrado) são indicados nas Tabelas 4.20 e 4.21, para os materiais ME1 e ME2, respectivamente.

Tabela 4.18 – Ensaio de lixiviação somente para parâmetros inorgânicos para escória ME1.

Parâmetro	Limite Máximo Permitido (mg/L)	Concentração no Resíduo Lixiviado (mg/L)
Arsênio	1,0	< 0,01
Bário	70,0	< 0,005
Cádmio	0,5	< 0,001
Chumbo	1,0	< 0,01
Cromo Total	5,0	< 0,01
Fluoretos	150,0	3,7
Mercúrio	0,1	< 0,0002
Prata	5,0	< 0,01
Selênio	1,0	< 0,01

Tabela 4.19 – Ensaio de lixiviação somente para parâmetros inorgânicos para escória ME2.

Parâmetro	Limite Máximo Permitido (mg/L)	Concentração no Resíduo Lixiviado (mg/L)
Arsênio	1,0	< 0,01
Bário	70,0	< 0,005
Cádmio	0,5	< 0,001
Chumbo	1,0	< 0,01
Cromo Total	5,0	< 0,01
Fluoretos	150,0	2,7
Mercúrio	0,1	< 0,0002
Prata	5,0	< 0,01
Selênio	1,0	< 0,01

Tabela 4.20 – Ensaio de solubilização somente para parâmetros inorgânicos para escória ME1

Parâmetro	Limite máx,	Concentração ME1
Arsênio (mg As/L)	0,01	< 0,01
Bário (mg Ba/L)	0,7	0,060
Cádmio (mg Cd/L)	0,005	< 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
Fenóis Totais (mg C ₂ H ₅ OH/L)	0,01	0,001
Fluoretos (mg F/L)	1,5	1,0
Mercúrio (mg Hg/L)	0,001	< 0,0002
Nitrato (mg N/L)	10,0	< 0,05
Prata (mg Ag/L)	0,05	< 0,01
Selênio (mg Se/L)	0,01	< 0,01
Alumínio (mg Al/L)	0,2	0,61
Cloreto (mg Cl/L)	250	< 2,0
Cobre (mg Cu/L)	2,0	< 0,01

Ferro (mg Fe/L)	0,3	< 0,05
Manganês (mg Mn/L)	0,1	0,02
Sódio (mg Na/L)	200	11,8
Surfactantes (mg MBAS/L)	0,5	< 0,10
Sulfato (mg SO4-2/L)	250	1,62
Zinco (mg Zn/L)	5,0	< 0,01

Tabela 4.21 – Ensaio de solubilização somente para parâmetros inorgânicos para escória ME2.

Parâmetro	Limite máx,	Concentração ME2
Arsênio (mg As/L)	0,01	< 0,01
Bário (mg Ba/L)	0,7	0,010
Cádmio (mg Cd/L)	0,005	< 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
Fenóis Totais (mg C2H5OH/L)	0,01	0,001
Fluoretos (mg F/L)	1,5	1,2
Mercúrio (mg Hg/L)	0,001	< 0,0002
Nitrato (mg N/L)	10,0	< 0,05
Prata (mg Ag/L)	0,05	< 0,01
Selênio (mg Se/L)	0,01	< 0,01
Alumínio (mg Al/L)	0,2	0,74
Cloreto (mg Cl/L)	250	< 2,0
Cobre (mg Cu/L)	2,0	0,02
Ferro (mg Fe/L)	0,3	< 0,05
Manganês (mg Mn/L)	0,1	0,02
Sódio (mg Na/L)	200	8,81
Surfactantes (mg MBAS/L)	0,5	< 0,10
Sulfato (mg SO4-2/L)	250	< 1,00
Zinco (mg Zn/L)	5,0	< 0,01

De acordo com as normas NBR 10004, 10005 e 10006, o resíduo originário da amostra ME1 é classificado como Classe II A (Não Perigoso – Não Inerte), por apresentar teor de alumínio na amostra solubilizada acima do limite máximo permitido. O resíduo também não apresenta características corrosivas, segundo o item 4.2.1.2 da NBR 10004 e nem é reativo, segundo as prescrições da NBR 10004.

O Material ME2 foi classificado, da mesma forma que o material ME1, como Classe II A (Não Perigoso – Não Inerte), por apresentar teor de alumínio na amostra solubilizada acima do limite máximo permitido, sendo também não corrosivo, nem reativo.

4.5 – MONITORAMENTO DA FUGA DA CORRENTE DO CIRCUITO DE SINALIZAÇÃO PARA O LASTRO

A fuga da corrente do circuito de sinalização da EFVM para o lastro provoca uma queda significativa da tensão entre os trilhos. Quando esta queda leva a valores inferiores a 0,9V na recepção do circuito, pode ocorrer o fechamento do relé e, conseqüentemente, a seção pode ficar falsamente ocupada. No ano de 2004, quando se começou a elaborar este projeto de pesquisa, o local da EFVM onde mais havia registro de falsa ocupação, devido ao uso da escória de aciaria como lastro, era a seção de bloqueio SB 67/68, em frente à estação ferroviária Mário Carvalho em Timóteo – MG, sendo recomendado, então, pela EFVM/CVRD, que os estudos fossem desenvolvidos neste local.

O monitoramento efetivo da SB 67/68 teve início apenas em janeiro de 2007 e se estendeu por um período de 6 meses, os primeiros resultados deste monitoramento já são conhecidos e servem de base para uma série de constatações.

A Figura 4.14 apresenta as tensões entre os trilhos na transmissão e na recepção do circuito de sinalização da EFVM medidos entre os dias 18/01/2007 e 26/02/2007, logo após o início de uma chuva de média duração (2 horas) e de intensidade igual a 4mm. A temperatura do sublastro, neste intervalo de tempo, ficou entre 28 e 29°C e a sua umidade, entre 31 e 32%.

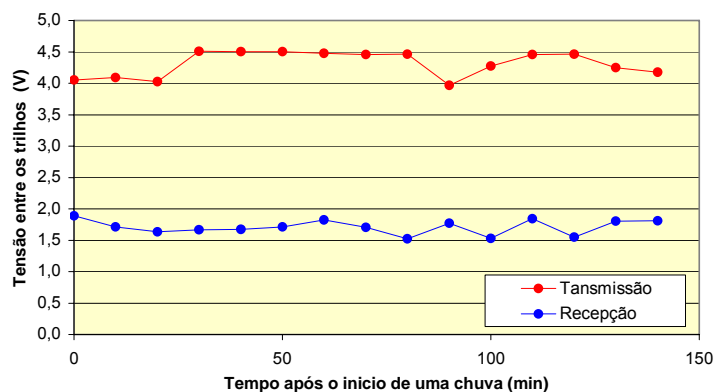


Figura 4.14 – Resultados do monitoramento durante uma chuva.

Durante esse evento, nota-se uma pequena oscilação, principalmente no que diz respeito à transmissão do circuito. A diferença entre transmissão e recepção foi bem acentuada, como podemos ver na Figura 3.14, ficando na média de 2,73V. Essa perda é considerada significativa, uma vez que testes pontuais de campo, em seções constituídas por brita natural, apontam uma perda de mais ou menos 1V ao longo dos 1800m de extensão das seções sinalizadas.

A Figura 4.15 mostra um exemplo do monitoramento realizado logo após o término de uma chuva, também com duração de 2 horas e intensidade igual a 6mm. Durante esse período, a temperatura do sublastro ficou em torno de 27,5 e 28,5° e a umidade da mesma camada variou entre 30 e 31%.

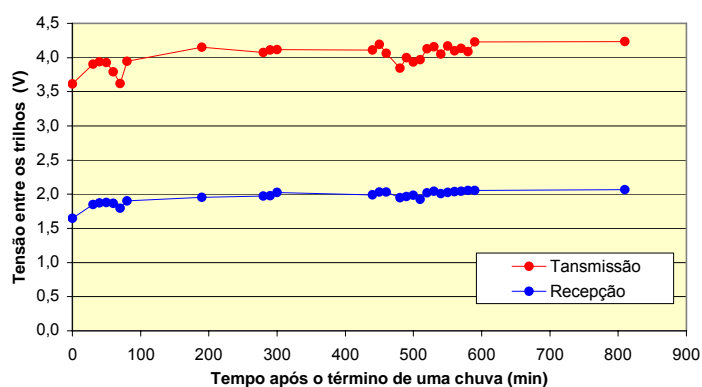


Figura 4.15 – Resultados do monitoramento após uma chuva.

Nota-se que não há grandes oscilações entre a transmissão e a recepção após um período de chuva, sendo ainda as amplitudes de oscilações menores que durante uma chuva. A

diferença entre entrada e saída mantém-se praticamente constante, em torno de 2V ainda, assim, tão significativa como no caso anterior.

A variação das perdas entre a transmissão e a recepção, para um mesmo espaço de tempo, foram plotadas na Figura 4.16, podendo-se notar que tais perdas foram consideravelmente maiores (média de 0,5V) no período chuvoso, mostrando, assim, que o material é muito susceptível à presença de água.

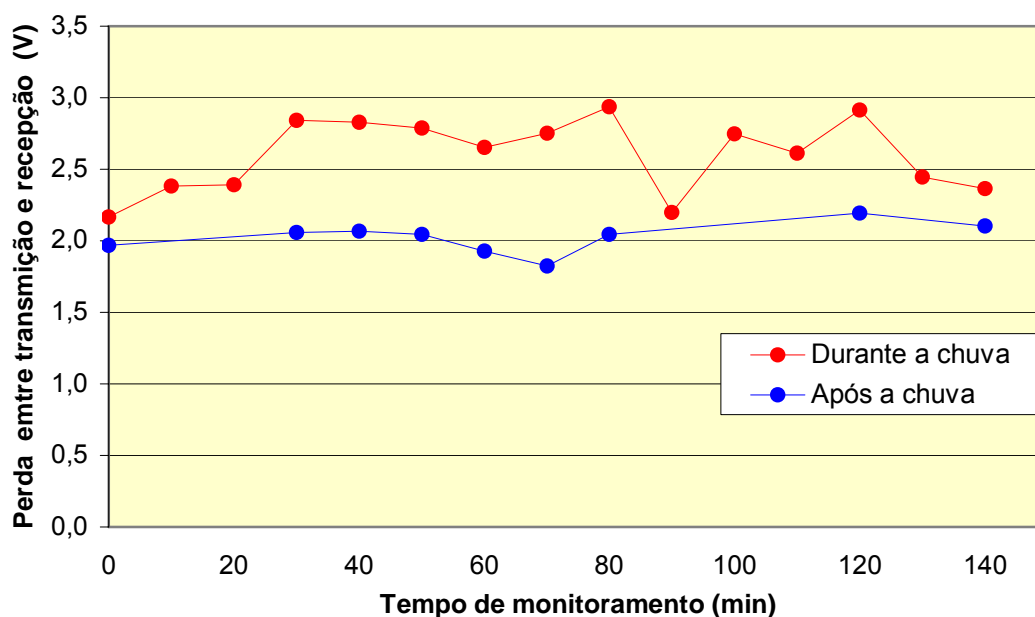


Figura 4.16 – Comparação entre as quedas de tensão em situações climáticas diferentes.

Sabe-se que os problemas da falsa ocupação são mais comuns em escórias recém adquiridas e lançadas na linha e que o problema, quando ocorrido, é minimizado com o passar do tempo, pois a escória é submetida a um processo de carbonatação, que a deixa mais estável. Entretanto, um ponto que chamou a atenção foi a baixa tensão na recepção do circuito monitorado, durante uma chuva de intensidade igual a 7mm e com uma hora de duração, registrada no dia 18/04/2007 no qual a tensão na recepção ficou abaixo 0,9V por aproximadamente uma hora, caracterizando assim uma falsa ocupação no circuito de sinalização. A Figura 4.17 mostra a oscilação da tensão na recepção em um instante imediatamente antes do início desta chuva, ao seu decorrer e posteriormente após o seu fim.

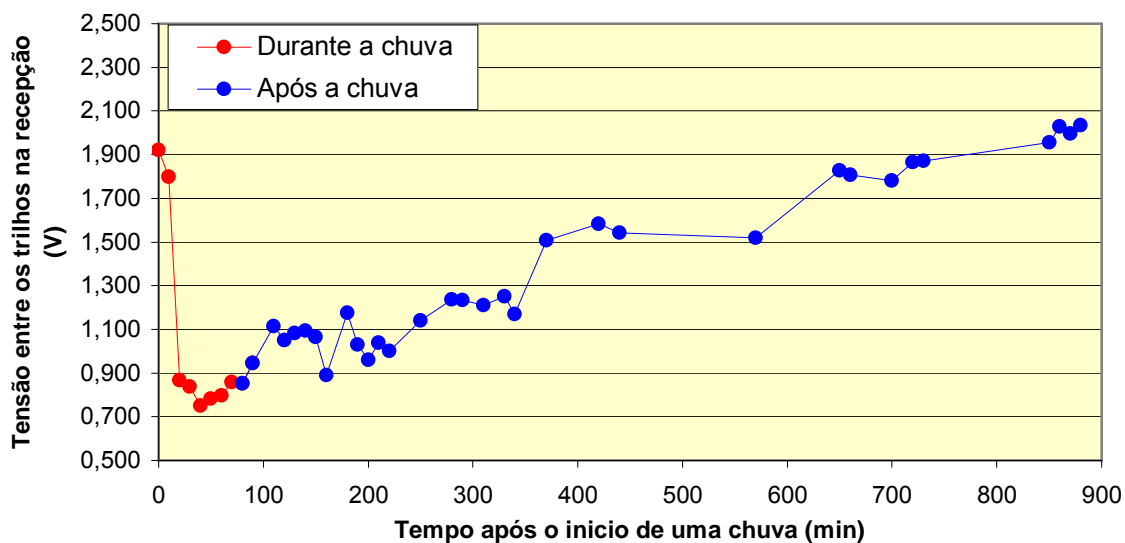


Figura 4.17 – Oscilação da tensão do circuito de sinalização durante uma chuva no dia 18/04/2007.

Ainda pra esta mesma chuva do dia 18/04/2007, foram plotadas as tensões entre os trilhos na transmissão e na recepção do circuito de sinalização após o início da chuva (Figura 4.18).

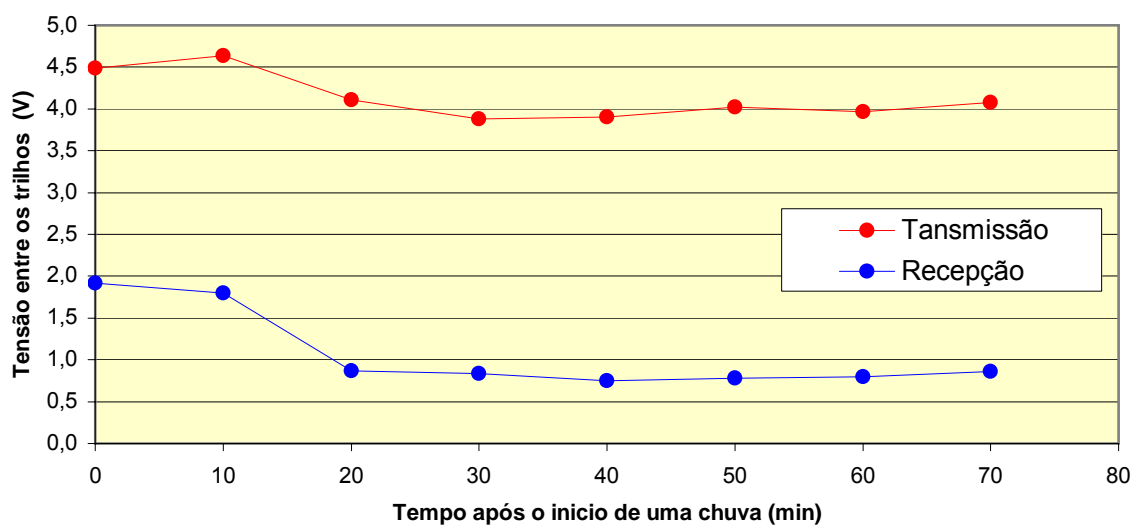


Figura 4.18 – Resultados do monitoramento durante a chuva do dia 18/04/2007.

Neste caso, aos 20 min de chuva intensa a tensão na recepção caiu bruscamente pra valores abaixo de 0,9V. A Figura 4.19 mostra o comportamento do circuito logo após o término da chuva em questão.

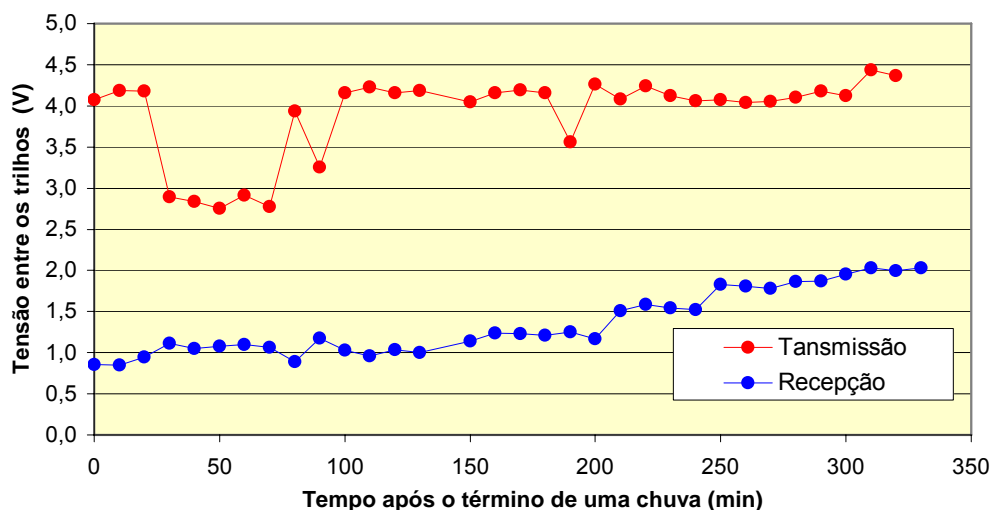


Figura 4.19 – Resultados do monitoramento após a chuva do dia 18/04/2007.

A figura acima mostra claramente que após a chuva a tensão na recepção aumenta e que as perdas diminuem, mostrando mais uma vez susceptibilidade do material à água mesmo bastante tempo após o material ser lançado na via (três anos).

Outro aspecto de grande relevância nestas análises é a diferença de potencial encontrada entre os trilhos e a haste de cobre que se encontra enterrada no lastro (Figura 4.20), o que mostra claramente que existe uma migração da corrente dos trilhos para o lastro e para os dormentes, evidenciando, desta forma, uma baixa resistividade elétrica da escória de aciaria utilizada na construção da SB 67/68.

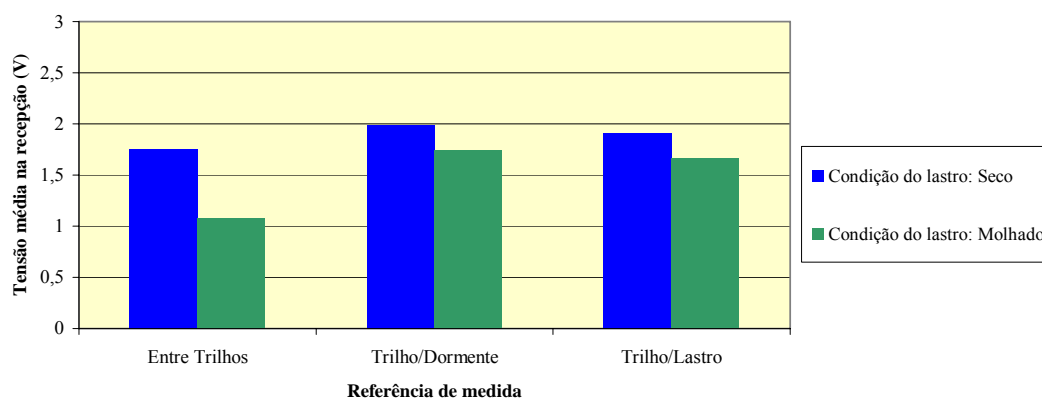


Figura 4.20 – Valores médios da diferença de potencial entre os vários elementos da via e sob condições climáticas diferentes.

Todos os dados discutidos neste item são apresentados de forma mais detalhada no Anexo A deste trabalho.

4.6 – SIMULADOR DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO LASTRO

Para a avaliação da resistividade do material, decidiu-se construir um simulador de resistividade, similar ao descrito no trabalho de Silva *et al.* (2000). A opção por essa metodologia, entre outras existentes na literatura, ocorreu pelo fato de que esta simulação reproduz as dimensões reais de um trecho ferroviário, introduzindo elementos reais (dormentes e trilhos) na mensuração da resistividade.

Como exposto no item 3.5, foram feitas simulações com variantes do material de lastro, tipo de dormente e condições climáticas (lastro seco ou molhado). Na condição de clima seco, admitiu-se um dia ensolarado, com temperaturas variando entre 25 a 30°C, sem a ocorrência de chuva nas últimas 12 horas. Na condição de clima chuvoso, as seções de teste do simulador foram molhadas artificialmente com aspersores, por um tempo mínimo de 24 horas, sendo os testes realizados sempre entre 7 e 9 horas da manhã, com temperaturas em torno de 20 a 25°C e sempre imediatamente após a fase de aspersão. Os resultados obtidos em um dos testes, para uma tensão de 500V, estão apresentados na tabela 4.22 e os mesmos resultados estão plotados, de forma gráfica, na Figura 4.21, a fim de facilitar a comparação entre os resultados.

Tabela 4.22 – Resultados de um teste realizado no simulador construído em Timóteo-MG.

Material em Estudo	Tipo de montagem	Resistividade Obtida nos Testes (Ωm)			
		Dormentes de Madeira		Dormentes de Aço	
		Clima			
		Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso
MB	Entre eletrodos	1066,67	800,00	977,78	622,22
	Entre Trilhos	200,00	100,00	6300,00	3700,00
ME1	Entre eletrodos	488,89	133,33	666,67	222,22
	Entre Trilhos	200,00	100,00	2800,00	1300,00
ME2	Entre eletrodos	577,78	177,78	533,33	266,67
	Entre Trilhos	200,00	100,00	2700,00	1000,00

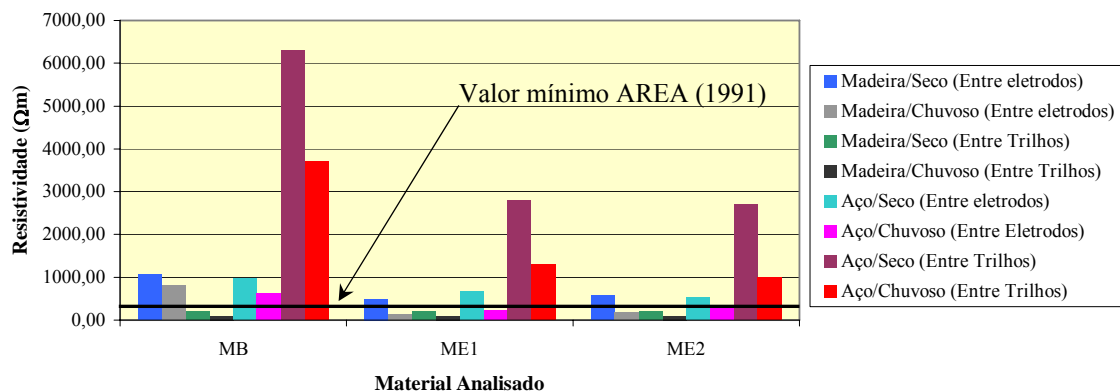


Figura 4.21 – Resultados da Tabela 4.22 plotados separadamente para cada material estudado.

As resistividades medidas na Tabela 4.22 foram obtidas por duas metodologias diferentes para cada material: (i) medida entre os trilhos e (ii) medida entre eletrodos adjacentes aos trilhos, separados por uma distância de 1,35cm. No teste realizado entre eletrodos, com o clima seco, todos os materiais estudados apresentaram resistividade acima dos 300Ωm (como recomendado pela AREA, 1991), independente do tipo de dormente.

Para dormentes de madeira e lastro seco, o material MB apresentou uma resistividade entre eletrodos da ordem de duas vezes os valores obtidos para as escórias (218% e 180%, para os materiais ME1 e ME2, respectivamente). No caso de lastros molhados, estes valores de resistividade foram reduzidos, sendo de 800Ωm para a brita e inferiores ao valor de referência de 300Ωm para os materiais ME1 e ME2ra (133,33 e 177,78Ωm respectivamente). A redução em relação à condição de lastro seco foi de 33% para o material MB, 72% para ME1 e 70% para ME2.

Para dormentes de aço e lastro seco, todos os materiais apresentaram valores de resistividades acima dos 300Ωm. Entretanto, para os lastros molhados, as escórias ME1 e ME2 apresentaram valores de resistividade abaixo do valor limite (222,22 e 266,67Ωm, respectivamente), sendo estes valores da ordem de 280% e 230% menores do que o valor apresentado pelo material MB (622,22 Ωm). A redução, em relação à condição de lastro seco, foi de 25% para o material MB, 66% para ME1 e 50% para ME2.

Nos testes de resistividade realizados entre trilhos, para dormentes de madeira, todos os valores de resistividade medidos, independentemente da condição climática avaliada, foram inferiores aos $300\Omega\text{m}$ recomendados pela AREA. Curiosamente, os valores medidos entre trilhos em todas as seções foram iguais a $200\Omega\text{m}$ para lastro seco e a $100\Omega\text{m}$ para lastro molhado. Isso sugere que o dormente de madeira oferece um caminho preferencial para a passagem da corrente elétrica, independente da natureza do material de lastro e do teor de umidade presente.

Vários fatores ou associação de fatores poderiam explicar os valores encontrados no teste em questão: (i) distintamente dos dormentes de aço, o dormente de madeira não fica completamente isolado dos trilhos; além disso, a madeira, embora seja considerada como material isolante, pode tornar-se condutora em função de uma elevada absorção de umidade, que pode chegar até 12%; adicionalmente, o sistema metálico de fixação, ao perfurar consideravelmente o dormente, pode induzir localmente o fluxo elétrico; (ii) os dormentes de madeira passam por um tratamento químico prévio, a base de produtos ácidos que ficam impregnados na madeira; assim, estes aditivos ácidos poderiam aumentar ainda mais os efeitos da umidade de absorção na capacidade dos dormentes de transmitirem a corrente elétrica entre trilhos.

Para os testes de resistividade realizados entre os trilhos, para dormentes de aço, os resultados obtidos foram sistematicamente superiores a $300\Omega\text{m}$, independente da condição climática avaliada. O material MB apresentou, para lastro seco, uma resistividade 225% maior que o material ME1 e 230% maior que o material ME2. Para testes em lastro molhado, os valores de resistividade do material MB foram 280% maior que o material ME1 e 370% maior que o material ME2. A redução em relação à condição de lastro seco foi de 42% para o material MB, 63% para ME1 e 53% para ME2. A planilha com os resultados detalhados destes ensaios é dada no Anexo B.

A fim de se verificar o efeito da duração da aplicação da carga elétrica nos ensaios realizados no simulador para medidas de resistividades em lastro, estimou-se, para cada ensaio, dois parâmetros (Tabela 4.23): Índice de Absorção Dielétrica (DAI), que é a razão entre o valor da resistência de isolamento medido aos 60 segundos e o valor medido

aos 30 segundos (Equação 4.1) e o Índice de Polarização (PI), que é a razão entre o valor da resistência de isolamento medido aos 10 minutos e o valor medido no primeiro minuto (Equação 4.2), ambos quantificados automaticamente pelo megômetro:

$$DAI = \frac{R_{60segundos}}{R_{30segundos}} \quad (4.1)$$

$$PI = \frac{R_{10minutos}}{R_{1minuto}} \quad (4.2)$$

Tabela 4.23 – Índices de absorção e polarização encontrados durante os testes.

Material em Estudo	Tipo de montagem	Dormente de Madeira				Dormente de Aço			
		Clima							
		Seco		Chuvoso		Seco		Chuvoso	
		DAI	PI	DAI	PI	DAI	PI	DAI	PI
MB	Entre eletrodos	1,02	1,05	1,02	1,02	0,99	1,00	1,03	1,05
	Entre Trilhos	0,98	1,01	0,96	1,07	1,00	1,02	1,02	1,08
ME1	Entre eletrodos	0,99	1,11	1,03	1,06	1,18	0,96	1,10	1,03
	Entre Trilhos	1,07	1,09	0,97	1,08	1,01	1,09	1,02	1,18
ME2	Entre eletrodos	1,01	1,01	1,03	1,03	1,01	1,09	1,04	1,11
	Entre Trilhos	1,00	1,04	1,07	1,08	1,02	1,21	1,05	1,17

Constata-se variações pouco significativas nos valores de resistência em decorrência da variação do tempo de ensaio, obtendo-se, em geral, variações maiores para as condições de lastros molhados.

Outra variação avaliada foi a mudança de tensão nos resultados dos testes. Neste caso, em testes com duração de até 10min, não houve mudanças significativas nos valores das resistividades medidas para as tensões de teste de 100, 250, 500 e 1000V. Esse fato reforçou a escolha da tensão de 500V como tensão padrão para todos os testes realizados, sendo esta a tensão média do aparelho aplicador de cargas.

Outro teste feito no simulador consistiu na medida da evolução da resistividade dos materiais, após uma chuva intensa e duradoura, por um período de 24 horas. O resultado

deste teste foi plotado separadamente em dois gráficos, em função do tipo de medição realizada (Figuras 4.22 e 4.23).

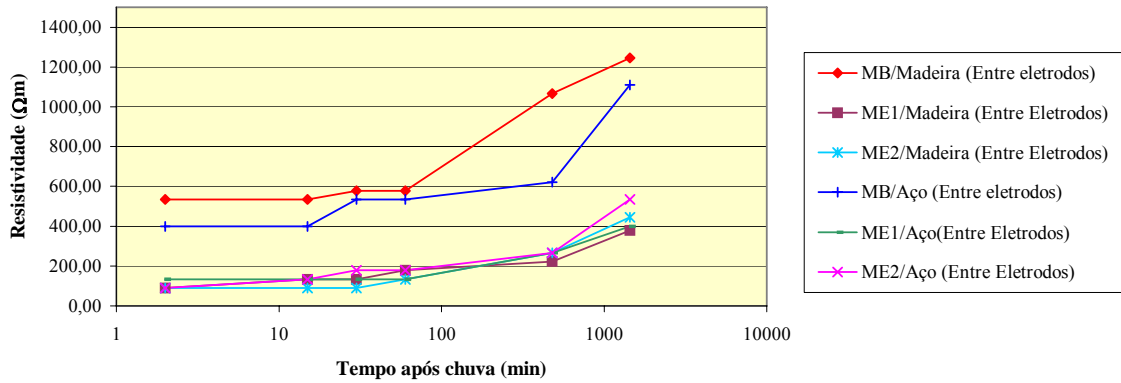


Figura 4.22 – Evolução da resistividade medida entre eletrodos.

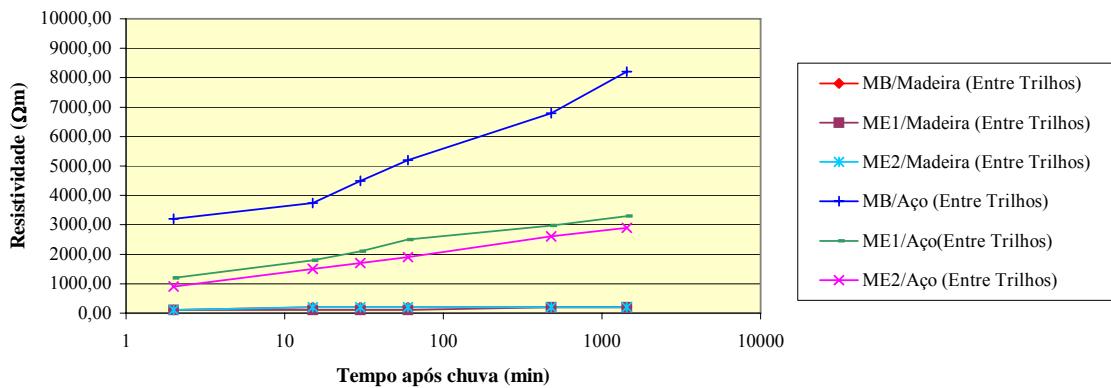


Figura 4.23 – Evolução da resistividade medida entre trilhos.

Verifica-se que, nos testes realizados entre eletrodos, o ganho de resistividade ocorre significativamente após a primeira hora da interrupção do processo de aspersão das seções experimentais, ao passo que, nos testes entre trilhos, o ganho de resistividade é muito grande durante esta hora inicial.

Assim, mostra-se claramente a correlação da resistividade apresentada pelos materiais com as condições climáticas locais e conclui-se que, no teste realizado entre trilhos, o fluxo da corrente tende a ocorrer preferencialmente na parte mais superficial da camada de lastro, que é a primeira a secar. No caso dos eletrodos, cravados em profundidade ao longo de toda a extensão da camada de lastro, a umidade mantém-se por mais tempo e, conseqüentemente, o ganho na resistividade é mais demorado ao longo do tempo.

4.7 – INVESTIGAÇÃO DO EFEITO DA CURA SOBRE A CONDUTIVIDADE DA ESCÓRIA DE ACIARIA UTILIZADA COMO LASTRO

A condutividade indica o nível de solubilidade (solubilização) de sais ou outros compostos em ambiente aquático. Esta grandeza fornece informações sobre as condições do sistema em termos da disponibilidade de nutrientes e mesmo de fontes contaminantes. Em água doce, pode-se relacionar o valor da condutividade com as concentrações dos principais íons determinantes da salinidade, como cálcio, magnésio, sódio, potássio, carbonatos, sulfatos e cloreto. Para água potável, valores da ordem de 20 a 70 $\mu\text{S}/\text{cm}$, devem ser esperados (FATMA, 2007).

Os resultados do monitoramento da condutividade medida durante a cura por três meses das escórias ME1 e ME2, estão mostrados na Figura 4.24, sendo referentes aos dados acumulados correspondentes ao terceiro dia após o enchimento dos tanques de cura, num total de 14 ciclos de carga e descarga. Cada ciclo ensaiado comportou uma duração de 3 a 10 dias, sendo também monitorados o pH e a temperatura interna e externa nos tanques. Os resultados completos dos testes executados estão apresentados no Anexo C deste trabalho.

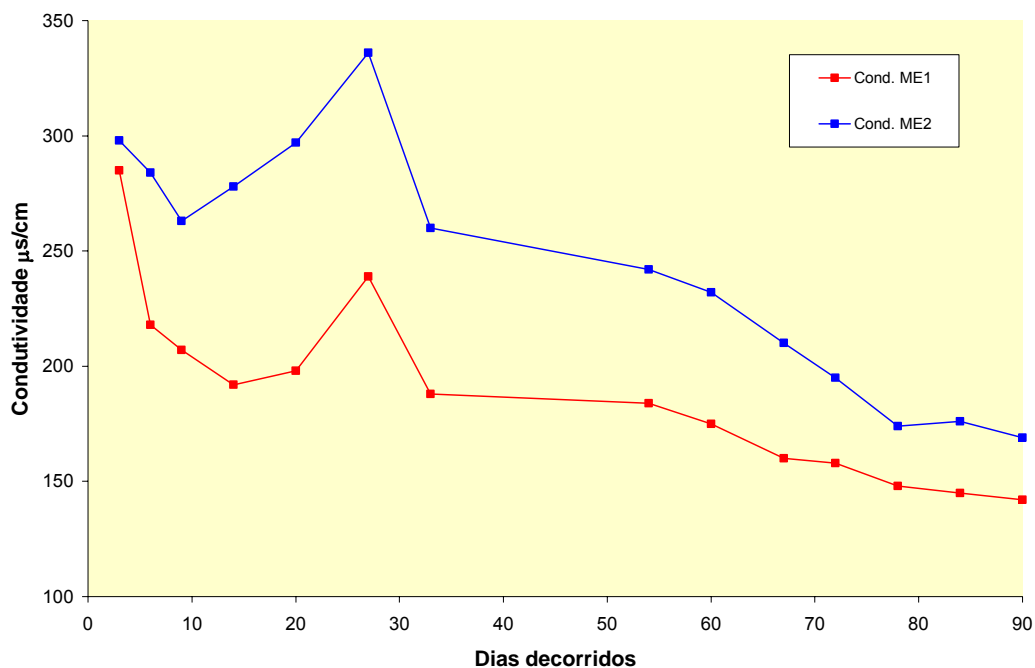


Figura 4.24 – Evolução da condutividade dos materiais com o tempo de cura submersa.

O material ME2 mostrou uma condutividade maior do que a do material ME1 ao longo do período das análises, com o pH sempre básico e com valores entre 8 e 12; por outro lado, as temperaturas internas (submersas) e externa (ar) variaram entre 17 a 25°C. Observou-se ainda que ambas as escórias, teoricamente produtos estabilizados, sofreram uma intensa atividade química durante o período da cura em laboratório. O material ME1 sofreu um significativo processo de expansão (Figura 4.25), com uma moderada liberação de cal hidratada $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e formação de carbonato de cálcio CaCO_3 .



Figura 4.25 – Fotos (após 70 dias) da escória ME1 após o processo de cura nos tanques, indicando os efeitos da expansão e fragmentação dos materiais.

O material ME2 também sofreu quebras em suas partículas devido à expansão, com um menor índice de fragmentação e, particularmente, a formação de grande quantidade de cal hidratada e transformada em CaCO_3 durante a cura (Figura 4.26).



Figura 4.26 – Fragmentos da escória ME2 completamente impregnados por uma película de CaCO_3 precipitado (o material não possuía este aspecto no início do processo de cura).

A formação do precipitado de CaCO_3 foi tão intensa a ponto de cobrir as paredes do tanque e os fragmentos da escória, na forma de uma película de pó, facilmente removido pelo contato com os dedos.

A expansão e, principalmente, a formação de cal hidratada e sua transformação em carbonato de cálcio, vêm confirmar a presença de óxidos de cálcio (CaO) ou cal virgem livre nos materiais estudados (4,55% para ME1 e 6,01% para ME2). Esses óxidos foram produzidos pelo aquecimento (alta temperatura) do carbonato de cálcio (CaCO_3) – calcário - durante o processo de formação do aço.

Em contato com a água, o CaO forma o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 ou cal hidratada que, em contato com o CO_2 atmosférico, por meio da reação de carbonatação volta novamente à sua forma estável CaCO_3 . A cal hidratada não apresenta liberação de calor, porém, possui rápida solubilidade na água, proporcionando, assim, um aumento também rápido do pH. A presença do Ca(OH)_2 , por sua vez, também proporciona um aumento da condutividade do meio.

CAPÍTULO 5

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante um período de mais de dois anos, o autor deste trabalho percorreu diversos trechos da EFVM, visitou siderúrgicas e outras entidades que desenvolvem estudos e pesquisas sobre a utilização de resíduos siderúrgicos como lastro em ferrovias. Durante as visitas de campo na EFVM, foram coletadas várias informações sobre os potenciais problemas associados ao uso da escória de aciaria como lastro, com engenheiros, técnicos de diversas áreas e funcionários que lidam diariamente com esta realidade prática da engenharia ferroviária.

Um dos principais problemas identificados em campo e constatado nos ensaios de laboratório consistiu na excessiva geração de finos nestes materiais. Em geral, as escórias de aciaria utilizadas pela EFVM possuem uma quantidade considerável de material fora da faixa recomendada para lastro padrão (Figuras 5.1 e 5.2).



Figura 5.1 – Excesso de finos em lote de escória para utilização na EFVM.



Figura 5.2 – Excesso de finos presentes na escória utilizada na construção do simulador.

Durante a visita às siderúrgicas, notou-se que as escórias estocadas nos pátios tendem a apresentar uma grande instabilidade estrutural; os óxidos de magnésio e cálcio livres, presentes na escória de aciaria, tendem a sofrer um processo de expansão, o que provoca, conseqüentemente, uma intensa desagregação das partículas (Figuras 5.3 e 5.4). Assim, impõe-se a necessidade de se adotar procedimentos de cura para se obter uma efetiva estabilização das escórias, antes de sua disponibilidade como material de construção em vias férreas, como lastro.



Figura 5.3 – Escórias fragmentadas pela expansão dos óxido de magnésio (cor alaranjada) no pátio de estocagem da Sobremetal em Ipatinga.



Figura 5.4 – Fragmento de escória fracionado por efeitos de expansão.

A fuga da corrente do circuito de sinalização para o lastro de escória, principalmente durante o período chuvoso, é uma queixa constante da equipe técnica de campo da EFVM/CVRD. Essas queixas, de caráter subjetivo, subsidiaram a presente pesquisa, no sentido de quantificar as variações da resistividade de escórias siderúrgicas com as condições climáticas e a correlação destes resultados com os de materiais britados convencionalmente empregados no campo. Outro fato observado é que as condições de drenagem em alguns pontos da EFVM favorecem uma condição de lastro úmido e mesmo saturado, mesmo após 5 dias de uma chuva (Figura 5.5), o que evidencia algumas falhas no sistema de drenagem da via.



Figura 5.5 – Falhas na drenagem (região do Pátio 5 da EFVM): sublastro e lastro saturados.

5.1 – DA CARACTERIZAÇÃO DAS ESCÓRIAS ESTUDADAS

Comparando-se os resultados obtidos nos ensaios de caracterização das escórias de aciaria estudadas, em relação à brita de gnaiss MB adotada como material de referência, percebe-se claramente a diferença de qualidade nessas duas categorias de materiais para lastro. Enquanto a brita MB e a escória ME1 enquadraram-se perfeitamente em quase todos os requisitos para lastro padrão, a escória ME2, por sua vez, infringiu uma série de especificações (indicadas em vermelho) prescritas pelas normas vigentes (Tabela 5.1).

Tabela 5.1 – Resumo das propriedades encontradas e seu enquadramento nas especificações.

Propriedade	NBR 5564 (Lastro Padrão)	Manual AREMA, 2002		MB	ME1	ME2
		Brita	Escória			
Massa específica aparente mínima (g/cm ³)	2,4	2,6	2,9	2,6	3,58	3,39
Absorção de água máxima (%)	1%	1%	2%	0,23	0,99	1,96
Porosidade aparente máxima (%)	1%	-	-	0,36	2,66	4,55
Los Angeles máxima (%)	40	25	30	21,10	11,20	11,80
Treton máximo (%)	20%	-	-	16,00	10,20	16,10
Formato da partícula.	cúbica	cúbica	cúbica	cúbica	cúbica	cúbica
Resistência às intempéries (%)	-	5	5	0,80	1,07	11,10
Partículas lamelares (%)	10	5	5	12%	0	0
Material pulverulento (%)	1	1	1	0,6	0,3	0,5
Torrões de argila (%)	0,5	0,5	0,5	0,38	0,23	0,35
Frag. macios e friáveis (%)	5	5	5	18,30	20,20	7,40

Constata-se basicamente que a falta de controle na industrialização da escória gera um material com granulometria fora da faixa recomendada para lastro padrão. Devido ao processo de produção do aço, as escórias de aciaria possuem, em sua composição química, altos teores de óxidos de cálcio e ferro, cujos valores mostram-se acima dos aceitáveis e, portanto, inadequados para lastro. No caso do excesso de ferro presente nas escórias (36,86% para ME1 e 30,20% para ME2), o efeito é notado na baixa abrasão Los Angeles destes materiais (11,2% para ME1 e 11,8% para ME2), muito inferiores aos limites recomendados (Tabela 5.1).

Tais proporções de ferro resultam, em termos práticos, um desgaste excessivo e a perda da vida útil das ferramentas e máquinas utilizadas para a manutenção do lastro. O elevado teor de óxido de cálcio (43,80% para ME1 e 54,40% para ME2) favorece a formação de CaO livre que, junto com o óxido de MgO, também livre, são os principais responsáveis pela expansão das escórias de aciaria quando hidratados (Machado, 2000). Essa expansão provoca a já citada quebra espontânea dos grãos.

Pode-se afirmar que, em termos de resistência mecânica, as escórias de aciaria atendem às funções de lastro. Contudo, há uma larga diferença de resistência nas partículas mais densas e nas partículas consideradas porosas. Os resultados da microscopia eletrônica de varredura mostraram que a composição química dos dois tipos de partículas é essencialmente a mesma, sendo a perda de resistência das partículas porosas ditada pela porosidade do material, em ambas as escórias estudadas. As plantas de beneficiamento visitadas não conseguem separar as escórias densas das escórias porosas, muito menos se sabe a proporção entre estes dois tipos de partículas nos lotes de escória vendidos à EFVM/CVRD.

Constatou-se ainda, durante a ruptura de alguns corpos-de-prova do material ME1, a presença de água no interior de fragmentos isolados, mesmo mantidos acondicionados em ambiente à sombra por pelo menos 60 dias (Figura 5.6). Estas observações evidenciam a elevada capacidade de retenção de água por parte das escórias siderúrgicas analisadas.



Figura 5.6 – Presença de água no interior de um corpo-de-prova guardado à sombra por 60 dias (presença da umidade indicada pela coloração escura da amostra à esquerda).

As escórias estudadas foram classificadas ambientalmente como resíduos do tipo Classe II (resíduo não perigoso – não inerte), o que significa que seu uso é permitido como material de construção, mas cuidados devem ser tomados no sentido de uma checagem de uma potencial presença de contaminantes no solo antes e depois do uso da escória.

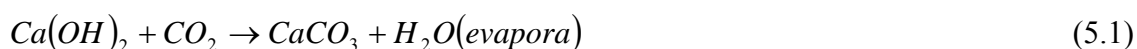
Após uma análise conjunta de todos os resultados dos ensaios de caracterização realizados nos materiais estudados, conclui-se que a composição química é o fator determinante das propriedades físicas e mecânicas das escórias de aciaria, sendo necessário fixar limites, principalmente para os óxidos de cálcio, magnésio e ferro, para resguardar a aplicabilidade dos mesmos como material de lastro.

Outro ponto chave é que, em se tratando de escórias de aciaria, fixar limites máximos ou mínimos para suas propriedades físicas e mecânicas não garantem o bom desempenho do material. Propõe-se, então, que sejam definidas faixas de referência para as escórias de aciaria, a fim de que o material enquadrado nessas faixas tenha o melhor desempenho possível como lastro, viabilizando, desta forma, o pleno emprego das escórias de aciaria como materiais alternativos de construção de superestrutura de pavimentos ferroviários.

5.2 – DA INFLUÊNCIA DAS ESCÓRIAS NA SINALIZAÇÃO DA EFVM

O monitoramento de campo mostrou que a escória tende a conduzir eletricidade, funcionando como se fosse um semicondutor. A baixa resistividade foi confirmada através dos resultados obtidos no simulador, que mostraram que as escórias de aciaria têm resistividade em torno de três vezes menor que a das rochas naturais utilizadas como lastro e que esta resistividade é condicionada pela presença ou não de água. Ficou claro também o efeito da cura na condutividade: a hidratação do CaO induz um aumento da condutividade e, conseqüentemente, uma redução da resistividade.

Ao longo do tempo, o Ca(OH)_2 formado reage com o CO_2 atmosférico e, por meio da reação de carbonatação, produz CaCO_3 (Equação 5.1), forma estável que, ao se consolidar, fixa-se aos fragmentos da escória, resultando uma diminuição da condutividade. A reação química não se dá diretamente com a água e, sim, com o gás carbônico presente na atmosfera, mas sempre em presença de água.



A formação da película de carbonato de cálcio (CaCO_3) na escória ocorre inicialmente na superfície dos fragmentos, com a impregnação desenvolvendo em função da porosidade da escória, tanto para a penetração do CO_2 como para a saída da H_2O . A longo prazo, a reação de carbonatação também é responsável pela expansão do material.

Após 90 dias de cura, constatou-se uma redução na condutividade medida em laboratório de 50,17% para o material ME1 e de 43,28% para o material ME2, o que indica um ganho de resistividade do material após o período de cura (Figura 5.7).

A resistividade medida, mostrada na Figura 5.7, não representa a resistividade das escórias de aciaria estudadas mas, sim, a resistividade do meio aquoso em que elas se encontram submersas. Assim, verifica-se claramente a diminuição da resistividade da água contida nos tanques de cura devido principalmente à dissociação das moléculas de Ca(OH)_2 livres, presentes nas escórias estudadas.

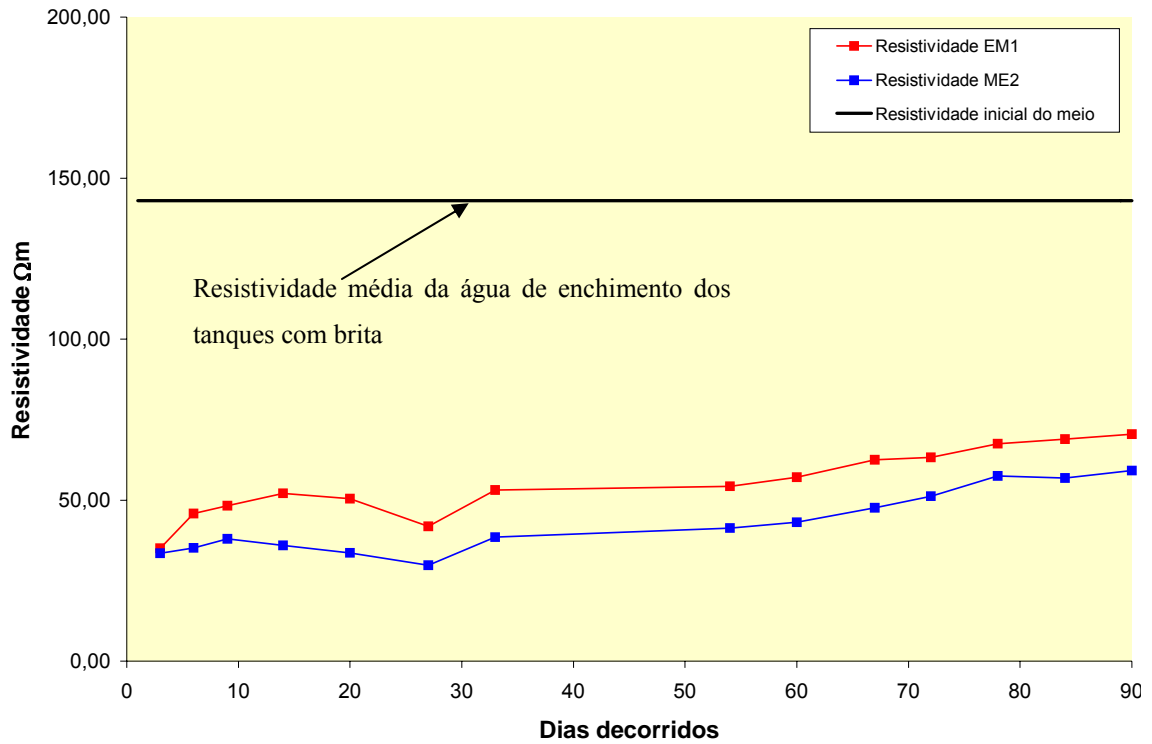


Figura 5.7 – Resistividade medida nos tanques ao longo do período de cura.

Por outro lado, pode-se afirmar que o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) contido na superfície dos grãos de escória, em contato com a água, é o principal responsável pela fuga da corrente elétrica do circuito de sinalização ferroviária para o lastro, conforme o modelo proposto na Figura 5.8.

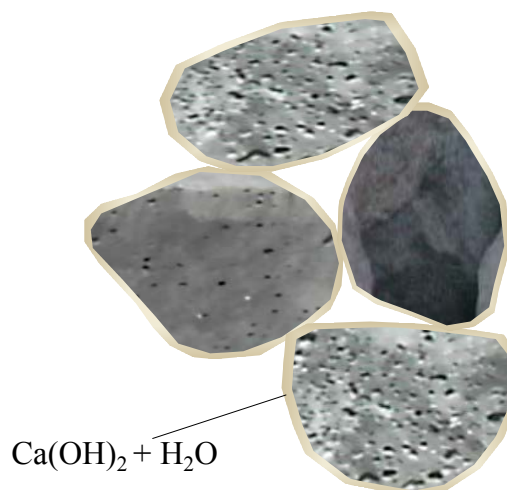


Figura 5.8 – Película de hidróxido de cálcio formada na superfície dos fragmentos da escória, definindo um caminho preferencial para o fluxo elétrico.

A interferência no circuito de sinalização pode ser então reduzida a níveis aceitáveis, desde que as escórias de aciaria empregadas como lastro passem por um período adequado de cura em pilhas de tamanho reduzido e com aspersão de água constante, de acordo com uma metodologia distinta da cura industrial atualmente empregada, com deposição inadequada na forma de aterro e por um período de cura inferior a um ano.

CAPÍTULO 6

6 – CONCLUSÕES

A pesquisa implementada visou analisar e coibir os efeitos da redução da paralisação do tráfego ferroviário devido às perdas de eletricidade através de escórias de aciaria utilizadas como lastro, particularmente em períodos chuvosos. Adicionalmente, propõe-se um conjunto de especificações com a finalidade de reduzir o desgaste mecânico com as escórias dos equipamentos de manutenção da via permanente. Na busca destas melhorias chegou-se às seguintes conclusões:

- as escórias de aciaria ME1 e ME2, usadas como lastro pela Estrada de Ferro Vitória Minas – EFVM, não se enquadraram em todos os requisitos da norma lastro padrão NBR 5564 (EB-655/91), sendo que o material ME1 tende a se enquadrar em um maior número de especificações; neste sentido, impõe-se a necessidade de ajustes destes materiais no processo de industrialização (no caso da escória ME2, tais ajustes devem incluir inclusive índices granulométricos);
- as escórias de aciaria ME1 e ME2 mostraram ter competência mecânica para exercer a função de lastro, apesar da discrepância de resistência entre fragmentos densos e porosos presentes nos materiais estudados;
- a caracterização química dos materiais ME1 e ME2 mostrou teores muito elevados de óxidos de cálcio (CaO) e Ferro (FeO), extrapolando os valores recomendados nos manuais da AREMA (2002);
- a instrumentação de campo, utilizada no monitoramento do circuito de sinalização da EFVM, mostrou que os problemas de condutividade elétrica das escórias tendem a ser reduzidos ao longo do tempo, particularmente em função da repetibilidade de períodos chuvosos;

- as escórias de aciaria ME1 e ME2 apresentam resistividades elétricas muito menores que as da brita de gnaiss MB, utilizada comumente como lastro; nas simulações realizadas, estes valores chegaram a ser até três vezes menores;
- no teste de resistividade realizado entre eletrodos, com o clima chuvoso, as escórias ME1 e ME2 apresentaram valores de resistividade elétrica inferiores aos 300Ωm recomendados pelos manuais da AREMA;
- o teste de cura mostrou que as escórias ME1 e ME2, vendidas como material de lastro para a EFVM, não estavam completamente estabilizadas; ambos os materiais apresentaram expansão e liberação de cal hidratada durante a cura, com conseqüente redução da condutividade elétrica ao longo do tempo;
- o hidróxido de cálcio livre é o principal responsável pela baixa resistividade elétrica das escórias, no primeiro ano de sua aplicação no campo, sendo que o alto teor de óxido de cálcio das amostras favorece a geração deste material;
- o alto teor de ferro encontrado nos materiais ME1 e ME2 proporciona uma elevada resistência à abrasão e ao choque, o que também aumenta o desgaste mecânico e diminui a vida útil dos equipamentos de manutenção.

Como recomendações para a redução do desgaste mecânico nos equipamentos de manutenção da via permanente, com base nos resultados dos ensaios de caracterização física, química e mecânica das escórias, propõe-se a fixação de alguns limites para os teores de ferro e alumínio presentes, bem como a adoção de faixas de valores de trabalho para alguns índices de referência e não apenas a determinação de valores limites admissíveis (Tabela 6.1).

Com relação à redução da paralisação do tráfego, o problema pode ser evitado desde que a escória utilizada esteja devidamente curada. Para garantir esta premissa, propõe-se a adoção de cuidados específicos e o estabelecimento dos valores limites indicados na Tabela 6.2.

Tabela 6.1 – Valores recomendados para as propriedades-índices do lastro de escória de aciaria.

Granulometria.	Em vez de teor de material pulverulento < 1% , adotar Índice de Contaminação (FI) < 1
Massa específica aparente (g/cm ³)	Entre 2,8 e 3,6
Absorção de água máxima (%)	2
Porosidade aparente máxima (%)	3
Los Angeles (%)	Entre 15 e 30
Treton (%)	Entre 10 e 20
Formato da partícula	Cúbica (sem sugestão)
Resistência máxima às intempéries (%)	5
Partículas lamelares (%)	5
Torrões de argila (%)	0,5 (sem sugestão)
Frag. macios e friáveis máxima (%)	10
Ferro total máximo (%)	25
Al ₂ O ₃ máximo (%)	5
CaO máximo (%)	45

Tabela 6.2 – Parâmetros recomendados para a fase de cura das escórias de aciaria.

Altura máxima das pilhas de cura	2,5 metros
Duração mínima do ciclo	18 meses
Teor de óxidos de cálcio livre após o ciclo	<4%

Uma alternativa viável para a redução do período de cura consiste na montagem de aspersores molhando o material diariamente. Nesse caso, diversos autores concordam que 45 a 90 dias seria um intervalo de tempo satisfatório para uma efetiva diminuição dos teores de óxido de cálcio livre presentes nas escórias, para valores aceitáveis e pertinentes às suas funções de lastros ferroviários.

Enfatiza-se, finalmente, que os índices propostos estão restritos aos resultados obtidos na presente pesquisa, envolvendo duas escórias de aciaria de empresas fornecedoras da EFVM - CVRD, devendo os mesmos serem aferidos ou alterados a partir de um maior banco de dados sobre diferentes escórias siderúrgicas.

Como sugestões para trabalhos futuros e para a continuidade dos estudos desenvolvidos nesta dissertação, propõe-se:

- realizar ensaios de resistividade e condutividade, de acordo com as metodologias apresentadas, para outros tipos de escórias de aciaria;
- realizar ensaios de caracterização em amostras de escórias submetidas aos parâmetros de cura propostos na Tabela 6.2;
- introduzir novos ensaios na caracterização das escórias a serem utilizadas como lastro como, por exemplo, o ensaio de carga pontual e de esmagamento, com padronização também destes índices;
- elaborar procedimentos para realizar testes de resistência elétrica em fragmentos isolados, a fim de se minimizar o tempo de investigação sobre as propriedades das escórias quanto a resistividade;
- instrumentar uma seção sinalizada, com a escória recém-lançada, em uma via real;
- investigar a influência dos dormentes de madeira e seu eventual isolamento elétrico dos trilhos nos resultados de resistividade obtidos pelo simulador.
- investigar o efeito da cura por aspersão nas escórias utilizadas como lastro, a fim de se definirem períodos para um completo ciclo de cura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AECB. O Papel da Ferrovia na Política Nacional de Transportes. 1º Encontro Nacional Ferroviário. ENFER. **Associação de Engenheiros da Central do Brasil**, Brasília, DF, 60p, 1991.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1260**: Potencial de reatividade a álcalis em agregados: Método das barras de argamassa: Procedimento. 2001.

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

ARAÚJO, L. A. **Manual de Siderurgia**. 1 ed. São Paulo: Editora Arte & Ciência, 1997. v.1. 470 p.

AREA. **Manual for Railway Engineering**. Lanham: American Railway Engineering Association – AREA, 1991. v. I - II.

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 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 10007**: Amostragem de resíduos: Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11541**: Amostras de material para lastro para via férrea: Procedimento. Rio de Janeiro, 1991

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5564**: Via férrea Lastro Padrão: Especificação. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: Informação e documentação: Referências: Elaboração: Apresentação. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6465**: - Agregados - Determinação da Abrasão Los Angeles - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6953**: Lastro padrão: Determinação da resistência à compressão axial: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1989.

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 7218**: Agregados: Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7219**: Agregados: Determinação do teor de material pulverulento: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987.

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 intempérie 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 9938**: Determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987.

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.

BRASIL EM QUESTÃO. Disponível em: <www.brasil.gov.br/noticias/em_questao/questao/eq497> Acesso em: 29 março 2007.

BRINA, H.L. **Estradas de Ferro 2**. 1 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 1988. v.2. 215 p.

CALVERT, J. B. Electronic publishing at APS: **How A Track Circuit Really Works**. Denver. University of Denver. 1999. Disponível em: <www.du.edu/jcalvert/railway.htm> Acesso em: 15 fevereiro 2006.

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.

DNER ME 262: 1994 - Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários - Especificação de material

DNIT - Departamento Nacional de Infra-Estrutura Terrestre. Disponível em: <www.dnit.gov.br/noticias/investimentoferroviario> Acesso em: 24 março 2007.

EATON, A. D. Clesceri, L. S. e Greenberg, A. E. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, 20 ed. USA: WEF, 1998.

FATMA – Fundação do Meio Ambiente: Programa Nacional de Meio Ambiente. Disponível em: <www.fatma.sc.gov.br/projetos/conveio_pnmaII.htm>. Acesso em: 22 fevereiro 2007.

FERNANDES, D.P.; PRADO FILHO, J.F. **Caracterização da escória de aciaria como base para indicação de uso em lastros de ferrovias**. Ouro Preto: Relatório de pesquisa. UFOP/FAPEMIG, 2007.60 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.

GEIPOT - Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes. 2001. Disponível em: <www.geipot.gov.br/indicadores_internet/indicadores_do_setor_transporte.htm> Acesso em: 25 março 2007.

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.

GOBBO, C. C. A. S.; GEYER, R. T.; ALBUQUERQUE, A. C.; ANDRADE, M. A. S.; ANDRADE, W. P. Utilização da escória de aciaria como adição ao concreto compactado com rolo. In.: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO – IBRACON, 45., 2003, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2003.

GOODMAN, R.E. **Introduction to Rock Mechanics**. 2ed. New York: John Wiley & Sons, 1989. 534 p.

HAN, X & SELIG.; T. Effects of fouling on ballast settlement. In: INTERNATIONAL HEAVY HAUL CONFERENCE, 6., 1997, St Louis. **Anal...** St Louis: Int. Heavy Haul Association, 1997. p. 257-268. Spornet Vol. 1.

HILL, R. J.; CARPENTER, D. C.; TASAR, T. Railway Track Admittance, Earth-Leakage Effects and Track Circuit Operation. **School of Electrical Engineering, University of Bath**, Claverton Down, Bath BA2 7AY, 1989. p. 55-62.

IBS - Instituto Brasileiro de Siderurgia: Estatísticas. Disponível em: <www.ibs.org.br/estatisticas.asp>. Acesso em: 05 dezembro 2003.

IBS. **ANUÁRIO ESTATÍSTICO - BRASIL STEEL DATABOOK**. Rio de Janeiro: IBS - Instituto Brasileiro de Siderurgia, 2002.

KANDHAL, P.S. e G.L HOFFMAN. Evaluation of steel slag fine aggregate in hot-mix asphalt mixtures. **Transportation Research Record**, Washington, D.C, n. 1583, p. 28-36, 1998.

KUEHN, M.; DRSSSEN, P.; SCHREY, H. Treatment of liquid steel slag. In: EUROPEAN SLAG CONFERENCE – EUROSLAG, 2., 2000, Dusseldorf. 2000. **Annals...** Dusseldorf: EUROSLAG, 2000.

LIM, W. L. **Mechanics of Railway Ballast Behaviour**. United Kingdom: Tese de doutorado. University of Nottingham, 2004. 195 p.

LITTLE, A.D.; SETEPLA. Estudo sobre aplicações de escórias siderúrgicas. **Relatório elaborado para o IBS**, Rio de Janeiro, 1999.

LÓPEZ, F.A.; FORMOSO A.; MEDINA F. Escórias LD. Coprodutos de la industria siderúrgica – I Parte. Composición, tratamiento y aplicaciones. IN: Revista de Metalurgia. v.25, n.4, P.247-54, 1989.

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.

MAGALDI, M. **Noções de Eletrotécnica**. 5 ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan S.A, 1981. 320 p.

MAIA, P.C.A.; NUNES, A.L.L.S.; ANTUNES, F.S. Alterabilidade de Rocha Basáltica - Caracterização Mecânica. IN: **Solos e Rochas, Revista Latino - Americana de Geotecnia**. ABMS/ABGE, v.26, n.3, p.205-215, 2004.

MEDINA, J. **Mecânica dos Pavimentos**. 1 ed. Rio de Janeiro: Editora UFRJ 1997. 380p.

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

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

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.

PINTO, S. e PREUSSLER, E. **Pavimentação rodoviária – conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. 2 ed. Rio de Janeiro: Editora Copiarte, 2002. 260 p.

RAYMOND, G.P. & DIYALJEE, V.A. “Railroad Ballast Ranking Classification”. IN: **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, ASCE, 1979, New York.v. 105, N° GT 10. p.1135-1155, 1979.

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, E.A. e R.L. MENDONÇA. Utilização da escória de aciaria em todas as camadas do pavimento. **Revista Engenharia Ciência e Tecnologia**, Vitória, v. 4, n. 2, p. 7-20, 2001.

SILVA, E.A., R.L. MENDONÇA, C.H.M. DOBELE, M. SIQUEIRA e J.B. SOARES. Uma experiência inédita: uso da escória de aciaria LD em todas as camadas do pavimento. In: Reunião Anual de Pavimentação, 34., 2003, Campinas. **Anal...** Campinas: ABPV, 2003. p. 238-244.

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. **Anal...**Santos: ABM, 2000. P. 43-53.

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. **Anal...** São Carlos: ABMS, 2004. 1 CD-ROM.

TRAINWEB: Origin of the Track Circuit. Disponível em: <www.trainweb.org/signals/waysidetrack.htm>. Acesso em: 15 fevereiro 2006.

WRIGHT, S. E. Damage caused to ballast by mechanical maintenance techniques. **British Rail Research Technical Memorandum**, United Kingdom, TM TD 15, May 1983.

ANEXO A – MONITORAMENTO DE CAMPO

As Tabelas A.1. a A.5 mostram os dados obtidos já tratados do monitoramento durante alguns períodos, são apresentados os dados da transmissão e recepção do circuito de sinalização, temperatura e umidade do sublastro, precipitação no local monitorado e se está ou não chovendo (molhamento foliar). Na coluna de molhamento foliar o valor 0 (zero) indica que houve precipitação, valores acima de zero indicam o fim de uma precipitação.

Tabela A.1 – Exemplo dos dados coletados.

Data/Hora	Transmissão (V)	Recepção (V)	Perda (V)	Dormente (V)	Haste terra (V)	Temperatura °C	Umidade %	Molhamento foliar Zero = chuva	Precipitação mm
16/2/2007 19:50	4,640	2,010	2,630	1,882	1,768	27,1	31,52	391	0
17/2/2007 03:30	3,985	1,893	2,092	2,896	2,896	27,61	32,07	0	0
17/2/2007 04:20	4,093	1,710	2,383	1,546	1,422	27,61	32,07	0	2
17/2/2007 04:30	4,023	1,631	2,392	1,541	1,595	27,61	32,06	0	2
17/2/2007 04:50	4,509	1,665	2,844	2,896	2,896	27,61	32,07	0	0
17/2/2007 05:00	4,501	1,673	2,829	2,896	2,896	27,61	32,11	0	0
17/2/2007 05:10	4,501	1,711	2,790	2,896	2,896	27,59	32,15	0	0
17/2/2007 05:20	4,478	1,827	2,651	2,896	2,786	27,59	32,19	0	0
17/2/2007 05:30	4,455	1,703	2,752	2,896	2,896	27,59	32,16	0	0
17/2/2007 05:40	4,463	1,526	2,937	2,896	2,896	27,59	32,13	0	0
17/2/2007 06:00	3,969	1,770	2,200	1,461	1,561	27,59	32,1	0	0
17/2/2007 06:10	3,291	1,531	1,760	2,840	2,758	27,59	32,07	0	0
17/2/2007 06:30	4,455	1,842	2,613	2,896	2,896	27,57	32,04	0	0
17/2/2007 06:40	1,688	2,896	-1,208	2,896	2,896	27,57	32,01	0	.2
17/2/2007 07:00	4,247	1,802	2,444	1,832	1,099	27,55	31,98	0	0
17/2/2007 07:20	4,177	1,811	2,367	1,769	1,170	27,55	31,95	0	0
17/2/2007 07:30	4,116	1,797	2,318	2,140	1,480	27,55	31,92	0	0
17/2/2007 07:40	3,613	1,646	1,967	1,662	1,609	27,55	31,89	18	0
17/2/2007 08:00	3,903	1,846	2,057	1,387	1,330	27,53	31,86	405	0
17/2/2007 08:10	3,939	1,871	2,068	1,660	1,036	27,53	31,55	401	0
17/2/2007 08:20	3,924	1,880	2,044	1,179	1,351	27,51	31,52	386	0
17/2/2007 08:30	3,790	1,864	1,926	1,242	1,213	27,51	31,52	245	0
17/2/2007 08:40	3,620	1,797	1,824	2,896	2,896	27,49	31,52	402	0
17/2/2007 08:50	3,946	1,899	2,046	1,421	1,298	27,51	31,52	395	0
17/2/2007 10:40	4,151	1,957	2,193	2,396	1,752	27,43	31,52	386	0
17/2/2007 12:10	4,073	1,971	2,102	2,203	1,611	27,39	31,52	392	0
17/2/2007 12:20	4,108	1,978	2,130	1,923	1,893	27,39	31,52	391	0
17/2/2007 12:30	4,115	2,026	2,090	2,111	1,817	27,37	31,48	244	0
17/2/2007 14:50	4,108	1,993	2,116	2,896	2,896	27,39	31,48	322	0
17/2/2007 15:00	4,193	2,031	2,162	2,703	2,539	27,41	31,48	392	0
17/2/2007 15:10	4,066	2,030	2,036	2,323	2,691	27,41	31,48	394	0
17/2/2007 15:30	3,847	1,947	1,900	2,896	2,896	27,43	31,48	173	0
17/2/2007 15:40	3,995	1,966	2,029	2,896	2,896	27,45	31,45	397	0
17/2/2007 15:50	3,932	1,981	1,950	2,896	2,896	27,45	31,44	399	0
17/2/2007 16:00	3,967	1,923	2,044	2,896	2,896	27,46	31,44	402	0
17/2/2007 17:00	4,130	2,018	2,111	2,308	1,922	27,56	31,44	396	0
17/2/2007 17:10	4,158	2,045	2,113	1,430	2,537	27,59	31,42	393	0
17/2/2007 17:20	4,052	2,010	2,042	1,962	2,476	27,61	31,4	392	0
17/2/2007 17:30	4,172	2,026	2,146	1,945	2,821	27,61	31,38	244	0
17/2/2007 17:40	4,101	2,040	2,061	2,492	2,896	27,65	31,38	394	0
17/2/2007 17:50	4,137	2,043	2,094	2,044	2,896	27,67	31,38	392	0
17/2/2007 18:00	4,087	2,053	2,034	2,391	2,896	27,68	31,35	394	0
17/2/2007 18:10	4,228	2,056	2,172	2,242	2,896	27,7	31,34	321	0
17/2/2007 21:00	4,236	2,067	2,169	2,018	2,805	28,13	31,34	304	0
18/2/2007 00:00	4,130	2,080	2,049	1,860	1,933	28,46	31,34	306	0
18/2/2007 11:20	3,988	2,094	1,894	2,896	2,896	28,44	31,34	379	0
18/2/2007 11:30	4,285	2,072	2,213	2,387	2,896	28,44	31,34	164	0
18/2/2007 11:40	4,179	2,076	2,103	2,215	2,655	28,42	31,32	377	0
18/2/2007 12:00	4,264	2,037	2,227	2,408	2,896	28,42	31,28	381	0
18/2/2007 12:10	4,250	2,100	2,150	2,896	2,896	28,4	31,27	306	0

Tabela A.2 – Exemplo dos dados coletados.

Data/Hora	Transmissão (V)	Recepção (V)	Perda (V)	Dormente (V)	Haste terra (V)	Temperatura °C	Umidade %	Molhamento foliar Zero = chuva	Precipitação mm
18/2/2007 12:20	4,101	2,083	2,018	2,565	2,896	28,4	31,27	308	0
18/2/2007 12:30	4,257	2,082	2,175	2,518	1,896	28,4	31,27	239	0
18/2/2007 12:40	4,151	2,085	2,065	2,516	2,834	28,38	31,27	311	0
18/2/2007 16:20	4,200	2,034	2,166	2,896	2,896	28,4	31,27	388	0
18/2/2007 16:30	4,130	2,082	2,048	2,896	2,896	28,42	31,25	242	0
18/2/2007 16:40	4,299	2,067	2,232	2,896	2,896	28,42	31,25	388	0
18/2/2007 16:50	4,165	2,037	2,128	2,896	2,896	28,43	31,24	314	0
18/2/2007 17:00	4,108	2,090	2,019	2,896	2,896	28,44	31,23	389	0
18/2/2007 17:30	4,501	2,087	2,414	2,896	2,896	28,45	31,22	0	2
18/2/2007 17:40	4,131	1,951	2,180	2,896	2,896	28,47	31,22	0	2
18/2/2007 17:50	4,648	2,046	2,601	2,752	2,417	28,5	31,23	0	0
18/2/2007 18:10	4,154	1,952	2,203	2,896	2,896	28,51	31,32	0	2
18/2/2007 18:20	4,478	2,032	2,446	2,765	2,659	28,53	31,37	0	2
18/2/2007 18:30	2,197	2,896	-0,699	2,896	2,542	28,55	31,42	0	2
18/2/2007 18:40	2,366	2,896	-0,529	2,896	2,471	28,57	31,48	0	0
18/2/2007 18:50	2,428	2,896	-0,468	2,896	1,871	28,59	31,63	0	4
18/2/2007 19:00	1,295	2,896	-1,601	2,896	2,896	28,59	31,65	0	4
18/2/2007 19:20	4,339	1,809	2,531	2,353	1,783	28,63	31,93	0	0
18/2/2007 20:10	4,270	1,875	2,395	2,556	2,068	28,72	32,05	0	0
18/2/2007 20:30	4,378	1,858	2,520	2,646	2,715	28,76	32,15	0	0
18/2/2007 20:40	4,424	1,913	2,511	2,518	2,378	28,78	32,15	0	0
18/2/2007 21:10	4,231	1,867	2,364	2,623	2,657	28,83	32,15	0	0
18/2/2007 21:20	4,370	1,957	2,414	2,758	1,679	28,83	32,15	0	0
18/2/2007 21:30	4,578	1,978	2,600	2,896	2,437	28,85	32,11	0	0
18/2/2007 21:40	4,355	1,872	2,482	2,896	2,896	28,87	32,07	0	0
18/2/2007 21:50	4,424	1,967	2,457	2,877	2,073	28,87	32,03	0	0
18/2/2007 22:40	4,671	1,989	2,682	2,896	2,050	28,92	31,99	0	0
18/2/2007 22:50	4,509	2,004	2,505	2,896	2,896	28,94	31,99	0	0
18/2/2007 23:00	2,189	2,896	-0,707	2,896	2,896	28,94	31,99	0	0
18/2/2007 23:10	2,150	2,896	-0,745	2,896	2,896	28,94	31,99	0	0
18/2/2007 23:20	2,204	2,896	-0,691	2,896	2,896	28,94	31,88	0	2
18/2/2007 23:30	0,154	2,896	-2,741	2,896	2,896	28,94	31,77	0	0
18/2/2007 23:40	2,112	2,896	-0,784	2,896	2,896	28,96	31,76	246	0
18/2/2007 23:50	0,031	1,599	-1,569	2,896	2,896	28,96	31,76	281	0
19/2/2007 00:00	2,150	2,896	-0,745	2,896	2,896	28,96	31,77	0	0
19/2/2007 00:10	1,973	2,896	-0,922	2,896	2,896	28,96	31,78	439	0
19/2/2007 00:20	1,726	2,896	-1,169	2,896	2,896	28,96	31,79	0	2
19/2/2007 00:30	3,661	1,738	1,923	2,896	2,896	28,96	31,56	0	0
19/2/2007 00:40	4,270	1,913	2,357	2,164	1,419	28,96	31,56	395	0
19/2/2007 00:50	3,792	1,785	2,007	2,896	2,896	28,96	31,56	336	0
19/2/2007 01:00	4,463	1,891	2,572	2,311	1,766	28,94	31,56	0	0
19/2/2007 01:10	1,780	0,021	1,759	1,632	1,637	28,96	31,56	854	0
19/2/2007 01:20	2,104	2,896	-0,791	2,896	2,896	28,94	31,56	323	0
19/2/2007 01:30	4,470	1,917	2,553	2,418	1,778	28,94	31,56	278	0
19/2/2007 01:40	4,424	1,923	2,501	2,444	1,527	28,94	31,56	441	0
19/2/2007 01:50	4,501	1,921	2,580	2,375	1,940	28,94	31,56	413	0
19/2/2007 02:00	4,447	1,960	2,487	2,632	1,735	28,94	31,56	431	0
19/2/2007 02:10	4,524	1,961	2,563	2,241	1,324	28,92	31,57	414	0
19/2/2007 02:20	1,634	0,033	1,601	2,896	2,896	28,92	31,56	651	0
19/2/2007 02:30	4,540	1,976	2,564	2,804	1,576	28,92	31,56	106	0
19/2/2007 02:40	4,655	1,974	2,682	2,881	2,165	28,91	31,56	417	0
19/2/2007 02:50	4,532	1,954	2,578	2,551	1,683	28,89	31,56	391	0
19/2/2007 03:00	4,016	1,889	2,127	2,896	2,896	28,89	31,55	415	0
19/2/2007 03:10	3,515	1,558	1,957	2,896	2,896	28,89	31,56	545	.6
19/2/2007 03:20	3,376	1,515	1,861	2,896	2,896	28,87	31,56	485	1.4
19/2/2007 03:30	3,538	0,023	3,515	0,801	0,845	28,87	31,56	124	.6
19/2/2007 03:40	3,946	0,023	3,924	0,804	0,945	28,85	31,56	481	2
19/2/2007 03:50	0,462	0,024	0,438	1,085	1,160	28,85	31,56	208	0
19/2/2007 04:00	2,829	0,021	2,807	1,063	1,047	28,85	31,56	296	0
19/2/2007 04:10	2,844	0,023	2,821	1,028	1,046	28,83	31,55	0	0
19/2/2007 04:20	2,621	0,025	2,596	1,237	1,278	28,83	31,54	0	0
19/2/2007 04:40	4,008	1,660	2,348	2,301	1,407	28,8	31,53	138	0
19/2/2007 05:00	3,430	1,505	1,925	2,896	2,896	28,78	31,52	523	0
19/2/2007 05:10	3,453	1,551	1,902	2,896	2,896	28,78	31,51	169	0
19/2/2007 05:30	4,247	1,788	2,459	2,475	1,877	28,76	31,51	190	0
19/2/2007 05:40	4,247	1,785	2,461	2,432	1,674	28,74	31,51	0	0
19/2/2007 05:50	4,108	1,674	2,434	1,976	1,610	28,73	31,51	0	0
19/2/2007 06:00	4,008	1,691	2,317	2,061	1,425	28,73	31,51	87	0
19/2/2007 06:10	3,553	1,802	1,751	1,910	1,447	28,71	31,51	290	0
19/2/2007 06:20	3,615	1,653	1,962	2,896	2,896	28,71	31,51	529	0
19/2/2007 06:30	4,378	1,733	2,645	2,287	1,590	28,69	31,51	295	0
19/2/2007 12:20	4,201	1,807	2,394	2,612	2,896	28,28	31,52	406	0

Tabela A.3 – Exemplo dos dados coletados

Data/Hora	Transmissão (V)	Recepção (V)	Perda (V)	Dormiente (V)	Haste terra (V)	Temperatura °C	Umidade %	Molhamento foliar Zero = chuva	Precipitação mm
19/2/2007 13:40	4,185	1,854	2,331	2,099	2,503	28,22	31,58	0	2
19/2/2007 13:50	4,278	2,104	2,174	2,896	2,896	28,22	31,52	0	0
19/2/2007 14:00	4,316	1,850	2,466	2,896	2,896	28,2	31,46	0	0
19/2/2007 14:20	4,547	1,981	2,567	2,085	2,896	28,2	31,4	388	0
19/2/2007 14:30	4,555	2,003	2,553	2,466	2,896	28,2	31,34	169	0
19/2/2007 16:50	2,204	1,780	0,425	2,896	2,896	28,2	31,28	406	0
19/2/2007 17:00	4,139	1,869	2,270	2,896	2,896	28,2	31,52	401	0
19/2/2007 21:30	4,655	2,017	2,639	2,225	2,707	28,32	31,76	260	0
23/2/2007 07:30	4,501	2,162	2,340	1,420	1,764	29,27	31,25	52	0
23/2/2007 07:40	4,624	2,177	2,447	1,201	2,143	29,26	31,25	375	0
23/2/2007 08:00	4,524	2,069	2,455	1,827	2,604	29,24	31,25	388	0
23/2/2007 08:10	4,663	2,174	2,489	1,955	2,556	29,24	31,26	369	0
23/2/2007 18:20	1,503	1,139	0,364	2,760	2,896	28,99	31,28	0	0
23/2/2007 18:30	1,935	1,469	0,466	2,224	2,896	29,01	31,52	87	.6
23/2/2007 18:40	1,503	1,445	0,058	2,292	2,896	29,03	31,76	0	4
23/2/2007 18:50	1,773	1,308	0,465	2,811	2,896	29,05	32,01	0	.4
23/2/2007 19:00	1,696	1,525	0,170	2,387	2,896	29,05	32,05	0	2
23/2/2007 19:10	1,434	1,048	0,386	2,868	2,896	29,07	32,06	0	0
23/2/2007 19:20	1,549	1,376	0,173	2,511	2,896	29,1	32,06	0	2
23/2/2007 19:30	1,942	1,562	0,380	2,064	2,896	29,12	32,08	0	2
23/2/2007 19:40	2,227	1,350	0,878	2,646	2,896	29,14	32,08	0	.4
23/2/2007 19:50	2,251	1,326	0,925	2,889	2,718	29,16	32,08	0	.6
23/2/2007 20:00	2,374	1,142	1,232	2,896	2,896	29,18	32,08	0	4
23/2/2007 20:20	3,561	1,486	2,075	2,896	2,896	29,22	32,08	0	0
23/2/2007 20:30	3,430	1,468	1,962	2,896	2,896	29,23	32,09	67	0
23/2/2007 20:40	3,599	1,462	2,137	2,896	2,896	29,25	32,07	0	0
23/2/2007 20:50	3,592	1,492	2,100	2,896	2,896	29,29	32,07	203	0
23/2/2007 21:00	3,676	1,526	2,151	2,896	2,896	29,31	32,07	0	0
23/2/2007 21:10	3,700	1,543	2,157	2,896	2,896	29,31	32,07	0	0
23/2/2007 21:20	3,777	1,836	1,941	2,039	2,131	29,34	32,05	0	0
23/2/2007 22:20	3,692	1,587	2,105	2,896	2,896	29,44	32,10	0	0
23/2/2007 22:40	3,638	1,657	1,981	2,896	2,896	29,45	32,11	0	0
23/2/2007 23:00	3,168	1,703	1,464	2,058	1,486	29,47	32,15	491	0
23/2/2007 23:10	4,170	0,640	3,530	2,896	2,896	29,47	32,19	471	0
23/2/2007 23:40	3,761	1,542	2,219	2,343	1,496	29,49	32,23	40	0
24/2/2007 00:00	3,638	1,647	1,991	2,896	2,896	29,49	32,24	44	0
24/2/2007 00:20	3,561	1,415	2,146	2,324	1,464	29,49	32,24	242	0
24/2/2007 00:30	3,445	1,385	2,060	1,949	1,454	29,49	32,24	13	0
24/2/2007 01:10	4,008	1,722	2,286	2,106	1,249	29,49	32,24	0	0
24/2/2007 01:30	4,493	1,981	2,513	2,309	1,000	29,47	32,24	0	0
24/2/2007 02:00	4,355	1,858	2,497	2,528	1,520	29,46	32,24	0	0
24/2/2007 02:30	4,493	1,927	2,567	2,312	1,375	29,44	32,24	0	0
24/2/2007 02:40	4,332	1,922	2,410	2,452	1,501	29,42	32,24	0	0
24/2/2007 03:20	3,977	1,776	2,201	2,896	2,896	29,38	32,24	0	0
24/2/2007 03:40	4,370	1,896	2,474	1,999	1,061	29,36	32,33	0	0
24/2/2007 03:50	3,838	1,786	2,052	2,896	2,896	29,35	32,34	0	0
24/2/2007 04:00	3,931	1,803	2,128	2,896	2,896	29,35	32,35	0	0
24/2/2007 04:10	3,892	1,776	2,116	2,896	2,896	29,33	32,4	0	0
24/2/2007 04:20	4,308	1,918	2,390	2,232	1,187	29,31	32,4	241	0
24/2/2007 04:40	4,470	1,933	2,538	1,840	1,312	29,29	32,4	368	0
24/2/2007 04:50	3,985	1,853	2,132	2,896	2,896	29,27	32,32	226	0
24/2/2007 08:10	4,100	1,826	2,275	2,896	2,896	29,02	32,27	420	0
24/2/2007 21:10	4,270	1,885	2,385	2,896	2,896	28,99	32,22	386	0
24/2/2007 22:00	4,401	2,004	2,397	2,896	2,896	29,07	32,17	382	0
24/2/2007 22:10	4,463	1,979	2,483	2,896	2,896	29,07	32,12	372	0
24/2/2007 22:40	4,208	1,997	2,211	2,896	2,896	29,11	32,1	358	0
24/2/2007 23:00	4,347	1,960	2,387	2,896	2,896	29,12	31,83	420	0
24/2/2007 23:10	4,424	2,003	2,421	2,896	2,896	29,12	31,83	383	0
24/2/2007 23:40	4,355	1,996	2,359	2,896	2,896	29,16	31,83	356	0
24/2/2007 23:50	4,362	1,995	2,367	2,896	2,896	29,16	31,83	0	0
25/2/2007 00:00	4,231	2,001	2,230	2,896	2,896	29,16	31,85	0	0
25/2/2007 00:10	4,231	1,988	2,243	2,896	2,896	29,16	31,85	0	0
25/2/2007 02:50	4,486	1,998	2,488	2,292	1,616	29,17	31,89	0	0
25/2/2007 03:00	4,093	1,891	2,202	2,896	2,896	29,17	31,89	0	0
25/2/2007 03:10	4,154	1,918	2,236	2,896	2,896	29,17	31,89	0	0
25/2/2007 03:30	4,177	1,929	2,248	2,896	2,896	29,17	31,89	0	0
25/2/2007 03:50	4,224	1,951	2,273	2,896	2,896	29,15	31,89	0	0
25/2/2007 04:10	4,216	1,869	2,347	2,896	2,896	29,13	31,89	0	0
25/2/2007 04:20	4,239	1,902	2,337	2,896	2,896	29,13	31,89	0	0
25/2/2007 04:30	4,509	2,045	2,464	2,082	1,470	29,13	31,92	0	0
25/2/2007 04:40	4,578	2,079	2,499	2,673	1,189	29,11	31,92	0	0
25/2/2007 04:50	4,486	2,078	2,408	2,406	1,339	29,11	31,92	0	0

Tabela A.4 – Exemplo dos dados coletados



Data/Hora	Transmissão (V)	Recepção (V)	Diferença (V)	Dormiente (V)	haste terra (V)	Temperatura °C	Umidade %	Molhamento foliar Zero = Chuva	Precipitação (mm)
39183,00006	0,030829856	0,01272792	0,0181	2,092329	2,7407459	28.82	Quebrado	507	0
39183,00698	3,514603545	1,43259834	2,08201	2,3369879	2,5964961	28.84	Quebrado	502	0
39183,02086	3,48377369	1,46088261	2,02289	2,2634488	2,4989154	28.82	Quebrado	312	0
39183,04863	3,607093112	1,52452222	2,08257	2,7916576	2,7499383	28.84	Quebrado	506	0
39183,0556	0,292883629	0,15909903	0,13378	1,1907678	1,7027131	28.86	Quebrado	506	0
39183,06253	3,607093112	1,59311158	2,01398	2,7527667	2,7188256	28.84	Quebrado	330	0
39183,09031	3,676460287	1,58109076	2,09537	2,7895363	2,7704444	28.86	Quebrado	495	0
39183,09727	3,776657318	1,6263456	2,15031	2,8199418	2,6763992	28.84	Quebrado	493	0
39183,10421	3,753534927	1,63553798	2,118	2,8956023	2,8956023	28.86	Quebrado	309	0
39183,11117	3,645630432	1,59169736	2,05393	2,8956023	2,8956023	28.84	Quebrado	494	0
39183,13896	3,807487174	1,69493495	2,11255	2,8956023	2,7435743	28.84	Quebrado	490	0
39183,14587	3,822902102	1,68786389	2,13504	2,8956023	2,7676159	28.84	Quebrado	306	0
39183,15282	3,776657318	1,69705627	2,0796	2,8956023	2,7817581	28.82	Quebrado	490	0
39183,19449	4,362424576	1,87029744	2,49213	1,7543319	1,8434274	28.78	Quebrado	491	0
39183,20147	4,246812617	1,84272027	2,40409	2,3914351	2,4140626	28.78	Quebrado	493	0
39183,2084	4,239105153	1,86039794	2,37871	1,8137289	2,4140626	28.78	Quebrado	510	0
39183,2153	4,15432305	1,86110505	2,29322	1,8992888	2,2634488	28.78	Quebrado	573	0
39183,22227	3,853731957	1,35623081	2,4975	2,8956023	2,8956023	28.77	Quebrado	702	0
39183,3542	3,884561813	1,71331973	2,17124	2,7195327	2,7852936	28.62	Quebrado	306	0
39183,36814	3,884561813	1,71331973	2,17124	2,8956023	2,8956023	28.6	Quebrado	487	0
39183,37505	3,969343916	1,75716035	2,21218	2,8956023	2,8828743	28.58	Quebrado	489	0
39183,38197	3,892269277	1,74301822	2,14925	2,7089261	2,5173001	28.58	Quebrado	490	0
39183,39587	4,038711091	1,78120198	2,25751	2,8956023	2,7039763	28.56	Quebrado	309	0
39183,40282	4,0155887	1,76705985	2,24853	2,8956023	2,8956023	28.54	Quebrado	494	0
39183,40981	4,115785731	1,74796796	2,36782	2,8956023	2,7725657	28.53	Quebrado	495	0
39183,41674	4,084955875	1,79675833	2,2882	2,8956023	2,8956023	28.52	Quebrado	497	0
39183,42365	4,069540947	1,78898016	2,28056	2,8956023	2,8956023	28.52	Quebrado	499	0
39183,43061	4,069540947	1,7826162	2,28692	2,8956023	2,8956023	28.51	Quebrado	500	0
39183,4445	4,208275298	1,29541962	2,91286	2,1397051	1,6376593	28.49	Quebrado	503	0
39183,45147	4,146615586	1,31946125	2,82715	2,8765104	2,8956023	28.47	Quebrado	503	0
39183,51395	4,000173772	1,052882	2,94729	1,9374726	1,7338258	28.39	Quebrado	508	0
39183,52088	3,892269277	1,12005714	2,77221	2,6170022	2,8956023	28.37	Quebrado	317	0
39183,52784	4,031003628	1,16248355	2,86852	2,2047589	1,854034	28.37	Quebrado	414	0
39183,5348	3,946221524	1,23531555	2,71091	2,8956023	2,8956023	28.35	Quebrado	415	0
39183,5417	4,077248411	1,20490996	2,87234	2,8956023	2,8956023	28.35	Quebrado	416	0
39183,54863	1,379636041	0,13364318	1,24599	1,7140268	2,5675047	28.35	Quebrado	514	0
39183,55561	4,023296164	1,21693077	2,80637	2,8956023	2,8956023	28.33	Quebrado	514	0
39183,5695	4,131200658	1,25228611	2,87891	2,503158	2,1036427	28.31	Quebrado	517	0
39183,57646	4,185152906	1,28127749	2,90388	2,165161	1,781202	28.31	Quebrado	421	0
39183,58339	4,177445442	1,2932983	2,88415	2,2330432	1,9516147	28.31	Quebrado	519	0
39183,5903	4,15432305	1,3138044	2,84052	2,178596	1,8299923	28.31	Quebrado	423	0
39183,59727	4,254520081	1,30673333	2,94779	2,2471854	1,8964604	28.31	Quebrado	521	0
39183,6042	4,215982761	1,30531912	2,91066	2,3143605	2,0004051	28.31	Quebrado	326	0
39183,61116	4,15432305	1,29471252	2,85961	2,8956023	2,8956023	28.31	Quebrado	425	0
39183,61815	4,185152906	1,29117698	2,89398	2,8956023	2,8956023	28.31	Quebrado	524	0
39183,62505	4,239105153	1,37108005	2,86803	2,8956023	2,8956023	28.31	Quebrado	426	0
39183,63894	4,223690225	1,33218918	2,8915	2,8956023	2,8956023	28.31	Quebrado	426	0
39183,64587	4,15432305	1,29471252	2,85961	2,8956023	2,8956023	28.31	Quebrado	328	0
39183,8334	4,393254432	1,94312943	2,45012	2,7937789	2,8956023	28.59	Quebrado	503	0
39183,84031	4,439499215	1,87948982	2,56001	2,5639692	2,8956023	28.59	Quebrado	507	0
39183,84729	4,501158926	1,91413806	2,58702	2,5844753	2,8956023	28.61	Quebrado	504	0
39183,86117	4,108078267	1,82362839	2,28445	2,8956023	2,8956023	28.65	Quebrado	508	0
39183,87507	4,393254432	1,93464415	2,45861	2,0166685	2,8956023	28.67	Quebrado	501	0
39183,88198	4,416376823	1,9608071	2,45557	2,0322249	2,8956023	28.67	Quebrado	510	0
39183,89588	1,942280907	2,89560227	-0,9533	2,8956023	2,8956023	28.71	Quebrado	324	0
39183,90285	1,934573443	2,89560227	-0,961	2,8956023	2,8956023	28.73	Quebrado	512	0
39183,91674	4,061833483	1,85969083	2,20214	2,8956023	2,8956023	28.75	Quebrado	522	0
39183,92363	4,19286037	1,84413449	2,34873	2,8956023	2,8956023	28.76	Quebrado	514	0
39184,25006	4,308472328	1,95727157	2,3512	1,9593929	2,7322606	28.77	Quebrado	886	0
39184,25698	4,254520081	1,93040151	2,32412	1,8943391	2,4515392	28.75	Quebrado	547	0
39185,97919	2,427851133	2,89560227	-0,4678	2,8800459	2,8956023	29.31	Quebrado	97	1
39185,98617	4,732382844	1,75008928	2,98229	2,1609183	2,1814244	29.31	Quebrado	0	0
39185,99315	4,516573854	1,79039437	2,72618	2,3270884	2,2549635	29.33	Quebrado	0	0
39186,00005	4,655308205	1,79180858	2,8635	2,3504229	2,2966828	29.33	Quebrado	0	0
39186,00698	4,539696246	1,77413091	2,76557	2,3087036	2,3928493	29.33	Quebrado	0	.2
39186,02087	4,431791751	2,1998092	2,23198	1,9445436	1,9834345	29.35	Quebrado	0	0
39186,02782	2,158089896	2,89560227	-0,7375	2,8956023	2,8956023	29.37	Quebrado	0	0
39186,04171	4,524281318	2,09445029	2,42983	1,8632264	1,6800857	29.37	Quebrado	0	0
39186,04863	4,585941029	2,09091475	2,49503	1,5669486	1,3215826	29.37	Quebrado	0	0
39186,05561	4,632185813	0,00494975	4,62724	0,7000357	0,9680292	29.39	Quebrado	0	0
39186,06253	4,431791751	2,14394776	2,28784	2,5102291	2,5469986	29.39	Quebrado	0	0
39186,0695	4,562818638	2,00111219	2,56171	1,6878639	1,8483771	29.39	Quebrado	0	0

Tabela A.5 – Exemplo dos dados coletados

Data/Hora	Transmissão (V)	Recepção (V)	Diferença (V)	Dormiente (V)	haste terra (V)	Temperatura °C	Umidade %	Molhamento foliar Zero = Chuva	Precipitação (mm)
39188,23617	4,347009648	1,66594358	2,68107	1,5846263	1,5224009	29,06	Quebrado	0	0
39188,24314	4,277642473	1,69352074	2,58412	1,8420132	1,8893893	29,04	Quebrado	0	0
39188,25006	4,462621607	1,73311872	2,7295	1,8999959	1,8978746	29,04	Quebrado	0	0
39188,25698	4,470329071	1,75928167	2,71105	1,8045365	1,4665395	29,02	Quebrado	0	0
39188,26395	4,300764865	1,78898016	2,51178	1,6185674	1,5520994	29	Quebrado	0	0
39188,27087	4,539696246	1,76493853	2,77476	1,84767	1,7140268	29	Quebrado	0	0
39188,27782	4,354717112	1,76564563	2,58907	1,7373614	1,6532157	28,99	Quebrado	0	0
39188,2848	4,377839504	1,77413091	2,60371	1,7628172	1,5139156	28,97	Quebrado	0	0
39188,29865	4,262227545	1,75998878	2,50224	1,8710045	1,9558574	28,95	Quebrado	0	0
39188,30561	4,339302184	1,76918117	2,57012	2,0103046	1,8130218	28,93	Quebrado	0	0
39188,31949	3,869146885	1,80595072	2,0632	2,8956023	2,8956023	28,91	Quebrado	0	0
39188,32647	4,239105153	1,86464058	2,37446	2,2288006	2,231629	28,89	Quebrado	417	0
39188,33339	4,37013204	1,86039794	2,50973	2,3914351	2,3249671	28,89	Quebrado	0	0
39188,34728	3,79977971	1,82150707	1,97827	2,4798235	2,6933697	28,86	Quebrado	0	0
39188,3542	4,347009648	1,6892781	2,65773	1,8731259	1,582505	28,84	Quebrado	0	0
39188,36117	4,254520081	1,68008571	2,57443	1,9975767	1,8603979	28,84	Quebrado	35	0
39188,92365	4,485743998	1,9494934	2,53625	1,7048344	2,2528422	28,72	Quebrado	492	0
39188,93063	4,485743998	1,91979491	2,56595	2,8956023	2,8956023	28,74	Quebrado	720	0
39193,99314	3,09069303	1,11935003	1,97134	2,6452865	2,8107495	28,54	Quebrado	0	0
39194,00006	3,360454267	1,19996021	2,16049	2,6269017	2,8956023	28,56	Quebrado	0	0
39194,00699	3,183182597	1,18723229	1,99595	2,6382154	2,8100423	28,56	Quebrado	0	0
39194,01394	3,221719916	1,24521504	1,9765	2,5484128	2,6728636	28,56	Quebrado	0	0
39194,02088	3,22942738	1,22753737	2,00189	2,5137646	2,7343819	28,56	Quebrado	0	0
39194,02785	3,915391669	0,81600123	3,09939	1,470075	1,3187541	28,58	Quebrado	0	0
39194,03479	3,861439421	0,84782103	3,01362	1,3944146	1,3859293	28,58	Quebrado	0	0
39194,04172	1,996233154	0,20435386	1,79188	1,7423111	2,1149564	28,56	Quebrado	0	0
39194,09728	2,782394473	0,74104791	2,04135	2,7117545	2,8956023	28,56	Quebrado	251	0
39194,1042	3,252549772	0,75024029	2,50231	1,1964247	1,4453263	28,56	Quebrado	1	0
39194,11117	3,206304989	0,67104434	2,53526	1,3675445	1,3512811	28,56	Quebrado	379	0
39194,12506	4,084955875	1,09672262	2,98823	1,4912882	1,251579	28,54	Quebrado	286	.4
39194,13198	3,938514061	1,08116627	2,85735	1,529472	1,3583521	28,54	Quebrado	0	.2
39194,13894	3,992466308	1,05429621	2,93817	1,5577562	1,476439	28,54	Quebrado	775	0
39194,14588	4,061833483	1,06278149	2,99905	1,5718984	1,5195725	28,53	Quebrado	194	0
39194,15981	3,198597525	0,98994949	2,20865	2,4989154	2,6410438	28,54	Quebrado	695	.2
39194,16672	3,830609566	0,95247283	2,87814	1,5457354	1,6100821	28,53	Quebrado	656	.4
39194,17365	3,815194638	0,90509668	2,91011	1,5146227	1,5195725	28,53	Quebrado	264	.2
39194,18063	3,745827463	0,89095454	2,85487	1,3293607	1,1617764	28,51	Quebrado	660	.2
39194,18753	3,784364782	0,84852814	2,93584	1,3498668	1,2968338	28,51	Quebrado	90	.2
39194,1945	3,830609566	0,82519361	3,00542	1,3095618	1,1681404	28,51	Quebrado	154	.4
39194,22228	3,869146885	1,10237947	2,76677	1,2996623	1,218345	28,47	Quebrado	0	.2
39194,2292	3,699582679	1,08823734	2,61135	1,3703729	1,3208755	28,47	Quebrado	0	.4
39194,23618	3,792072246	1,09106576	2,70101	1,417042	1,3937075	28,47	Quebrado	0	.2
39194,25007	2,959666143	1,0118698	1,9478	2,0301036	2,2995113	28,45	Quebrado	0	0
39194,25698	3,044448246	0,83580022	2,20865	1,5485639	1,6588725	28,43	Quebrado	0	0
39194,26395	3,360454267	0,16404877	3,19641	1,0620744	1,3993643	28,44	Quebrado	0	0
39194,27087	2,728442226	0,85772053	1,87072	1,9395939	2,1100066	28,44	Quebrado	0	0
39194,27782	3,22942738	0,58477731	2,64465	1,2395582	1,4262344	28,42	Quebrado	0	0
39194,2848	3,861439421	0,82519361	3,03625	1,6277598	1,6921065	28,42	Quebrado	0	.4
39194,29174	2,589707875	0,85913474	1,73057	1,5697771	1,8172644	28,42	Quebrado	0	.4
39194,29865	3,175475133	0,51548084	2,65999	1,2105668	1,4000714	28,4	Quebrado	0	0
39194,30561	3,190890061	0,49709607	2,69379	1,2841059	1,423406	28,38	Quebrado	0	.2
39194,31951	3,09069303	0,99914188	2,09155	2,3164818	2,5724545	28,36	Quebrado	0	0
39194,32647	3,753534927	0,83650732	2,91703	1,682207	1,5549278	28,36	Quebrado	0	.2
39194,33339	3,684167751	0,76579664	2,91837	1,7189766	1,6390735	28,36	Quebrado	0	0
39194,34729	3,09069303	1,46158972	1,6291	2,2804194	2,4685098	28,34	Quebrado	0	0
39194,3542	3,784364782	1,07904495	2,70532	1,629174	1,5181583	28,34	Quebrado	0	0
39194,36116	3,738119999	1,04368961	2,69443	1,556342	1,4828029	28,32	Quebrado	573	0
39194,36813	3,738119999	1,04793225	2,69019	1,6496801	1,562706	28,31	Quebrado	0	0
39194,40282	3,784364782	1,18581807	2,59855	1,9813132	1,8328208	28,27	Quebrado	104	0
39194,42365	3,630215504	0,96378654	2,66643	2,0180828	2,7570093	28,25	Quebrado	99	0
39194,43061	3,861439421	1,53230039	2,32914	1,9233304	2,310825	28,23	Quebrado	183	0
39194,59031	2,836346721	0,33870415	2,49764	0,8789337	1,185111	28,06	Quebrado	682	0
39194,59728	2,589707875	0,11030866	2,4794	1,5216938	2,0880863	28,06	Quebrado	496	0
39194,63896	2,851761649	0,84074996	2,01101	2,8842886	2,8956023	28,03	Quebrado	497	0
39194,64588	2,797809401	0,89731851	1,90049	2,8581256	2,8956023	28,03	Quebrado	310	0
39194,65284	2,651367587	0,80398041	1,84739	2,8956023	2,8956023	28,03	Quebrado	497	0
39194,65979	2,582000412	0,52750166	2,0545	1,5634131	2,4748737	28,01	Quebrado	497	0
39194,66674	2,936543752	0,53881537	2,39773	1,6680649	2,8333769	28,01	Quebrado	496	0
39196,31949	0,53181501	1,36118055	-0,8294	2,8956023	2,8956023	27,61	Quebrado	584	0
39196,32647	0,030829856	0,72478445	-0,694	2,8956023	2,8956023	27,59	Quebrado	559	0
39196,33338	0,03853732	0,74175501	-0,7032	2,5703331	2,7803439	27,59	Quebrado	436	0
39196,34031	4,131200658	1,90353145	2,22767	2,8956023	2,8956023	27,59	Quebrado	508	0

ANEXO B – SIMULADOR DE RESISTIVIDADE

Encontra-se nas Figuras B.1 e B.2 as planilhas com os resultados detalhados do ensaio de resistividade cujos resultados foram comentados anteriormente.

 UFOP Universidade Federal de Ouro Preto	MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO Universidade Federal de Ouro Preto DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL	
Simulador de Resistividade		
INTERESS: UFOP/CVRD	DATA: 20/12/06	
REGISTRO:	VISTO:	
AMOSTRA:	OPERADOR: Gustavo	

Dormente:	Madeira	Temperatura °C	35
Clima:	Seco		

Material	Montagem	Comp. (m)	Seção (m ²)	Tensão (V)	R (Ω)	Resistividade (Ωm)
MB	Entre eletrodos	1,35	0,06	500	24000	1066,67
ME1	Entre eletrodos	1,35	0,06	500	11000	488,89
ME2	Entre eletrodos	1,35	0,06	500	13000	577,78
MB	Entre trilhos	1,00	0,1	500	2000	200,00
ME1	Entre trilhos	1,00	0,1	500	2000	200,00
ME2	Entre trilhos	1,00	0,1	500	2000	200,00

Dormente:	Madeira	Temperatura °C	24
Clima:	Chuvoso		

Material	Montagem	Comp. (m)	Seção (m ²)	Tensão (V)	R (Ω)	Resistividade (Ωm)
MB	Entre eletrodos	1,35	0,06	500	18000	800,00
ME1	Entre eletrodos	1,35	0,06	500	3000	133,33
ME2	Entre eletrodos	1,35	0,06	500	4000	177,78
MB	Entre trilhos	1,00	0,1	500	1000	100,00
ME1	Entre trilhos	1,00	0,1	500	1000	100,00
ME2	Entre trilhos	1,00	0,1	500	1000	100,00

Dormente:	Aço	Temperatura °C	35
Clima:	Seco		

Material	Montagem	Comp. (m)	Seção (m ²)	Tensão (V)	R (Ω)	Resistividade (Ωm)
MB	Entre eletrodos	1,35	0,06	500	22000	977,78
ME1	Entre eletrodos	1,35	0,06	500	15000	666,67
ME2	Entre eletrodos	1,35	0,06	500	12000	533,33
MB	Entre trilhos	1,00	0,1	500	63000	6300,00
ME1	Entre trilhos	1,00	0,1	500	28000	2800,00
ME2	Entre trilhos	1,00	0,1	500	27000	2700,00

Dormente:	Aço	Temperatura °C	24
Clima:	Chuvoso		

Material	Montagem	Comp. (m)	Seção (m ²)	Tensão (V)	R (Ω)	Resistividade (Ωm)
MB	Entre eletrodos	1,35	0,06	500	14000	622,22
ME1	Entre eletrodos	1,35	0,06	500	5000	222,22
ME2	Entre eletrodos	1,35	0,06	500	6000	266,67
MB	Entre trilhos	1,00	0,1	500	37000	3700,00
ME1	Entre trilhos	1,00	0,1	500	13000	1300,00
ME2	Entre trilhos	1,00	0,1	500	10000	1000,00

Figura B.1 – Teste de resistividade completo realizado no dia 20/12/06.



Simulador de Resistividade

INTERESS: UFOP/CVRD	DATA: 27/10/06
REGISTRO:	VISTO:
AMOSTRA:	OPERADOR: Gustavo

Dormente:	Madeira
Clima:	Seco

Temperatura °C	32
----------------	----

Resistência em função da tensão (Ω)						
Material	Montagem	Comp. (m)	100 (V)	250(V)	500(V)	1000(V)
MB	Entre eletrodos	1,33	33000	33000	34000	34000
ME1	Entre eletrodos	1,33	4000	4000	4000	3000
ME2	Entre eletrodos	1,33	8000	8000	7000	7000
MB	Entre trilhos	1,00	2000	2000	2000	2000
ME1	Entre trilhos	1,00	2000	2000	2000	2000
ME2	Entre trilhos	1,00	2000	2000	2000	1000

Dormente:	Madeira
Clima:	Chuvoso

Temperatura °C	23
----------------	----

Resistência em função da tensão (Ω)						
Material	Montagem	Comp. (m)	100 (V)	250(V)	500(V)	1000(V)
MB	Entre eletrodos	1,33	1300	13000	12000	12000
ME1	Entre eletrodos	1,33	2000	2000	2000	2000
ME2	Entre eletrodos	1,33	2000	2000	2000	2000
MB	Entre trilhos	1,00	2000	2000	2000	2000
ME1	Entre trilhos	1,00	2000	2000	2000	2000
ME2	Entre trilhos	1,00	2000	2000	1000	1000

Dormente:	Aço
Clima:	Seco

Temperatura °C	32
----------------	----

Resistência em função da tensão (Ω)						
Material	Montagem	Comp. (m)	100 (V)	250(V)	500(V)	1000(V)
MB	Entre eletrodos	1,33	29000	29000	28000	28000
ME1	Entre eletrodos	1,33	7000	7000	7000	6000
ME2	Entre eletrodos	1,33	10000	10000	9000	9000
MB	Entre trilhos	1,00	306000	298000	289000	284000
ME1	Entre trilhos	1,00	851000	851000	852000	852000
ME2	Entre trilhos	1,00	298000	296000	295000	291000

Dormente:	Aço
Clima:	Chuvoso

Temperatura °C	23
----------------	----

Resistência em função da tensão (Ω)						
Material	Montagem	Comp. (m)	100 (V)	250(V)	500(V)	1000(V)
MB	Entre eletrodos	1,33	208000	206000	11000	208000
ME1	Entre eletrodos	1,33	3000	3000	3000	3000
ME2	Entre eletrodos	1,33	4000	3000	3000	3000
MB	Entre trilhos	1,00	95000	95000	93000	93000
ME1	Entre trilhos	1,00	13000	13000	12000	12000
ME2	Entre trilhos	1,00	11000	10000	9000	9000

Figura B.2 – Variação da resistência em função da tensão.

ANEXO C – ENSAIO DE CONDUTIVIDADE

A Tabela C.1 mostra o teste completo de condutividade com todas as variáveis investigadas ao longo dos 90 dias de cura para os materiais ME1 e ME2.

Tabela C.1 – Resultado completo do ensaio de condutividade.

Data	Horário	ME1				ME2				Descarga
		Temp int °C	Temp ext °C	Condutividade μ S	pH	Temp int °C	Temp ext °C	Condutividade μ S	pH	
21/11/2006	9:00	20	21	234	9,92	20	21	184	10,37	1°
22/11/2006	9:00	20	20	256	10,12	20	20	246	10,59	
23/11/2006	8:30	20	19	285	10,25	20	19	298	10,73	
24/11/2006	15:00	31	29	108	9,42	31	29	84,5	9,82	2°
25/11/2006	9:30	20	20	183	10,13	20	20	185	10,32	
26/11/2006	9:30	21	20	218	10,3	21	20	284	10,85	
27/11/2006	9:30	22	20	109	8,63	22	20	87	7,94	3°
28/11/2006	9:30	20	20	175	9,84	20	20	200	10,15	
29/11/2006	10:00	20	20	207	10,02	20	20	263	10,45	
30/11/2006	8:20	20	20	274	10,11	20	20	286	10,52	4°
1/12/2006	10:00	20	18	278	10,26	20	18	321	10,62	
2/12/2006	10:00	19	18	142	7,4	19	18	88	8,50	
3/12/2006	10:00	20	19	155	9,88	20	19	218	10,29	5°
4/12/2006	9:30	20	18	192	10,14	20	18	278	10,61	
5/12/2006	10:00	22	22	218	10,25	22	22	318	10,67	
6/12/2006	10:30	19	23	246	10,37	19	23	338	10,71	6°
7/12/2006	9:30	20	20	266	10,39	20	20	356	10,75	
8/12/2006	10:30	19	18	135	10,11	19	18	184	10,42	
9/12/2006	10:00	20	18	174	10,2	20	18	257	10,6	7°
10/12/2006	10:30	19	18	198	10,45	19	18	297	10,8	
11/12/2006	9:40	19	18	219	10,63	19	18	322	10,86	
12/12/2006	9:00	18	17	260	10,63	18	17	345	10,95	8°
13/12/2006	8:30	18	17	275	10,64	18	17	346	10,94	
14/12/2006	13:00	21	21	154	10,32	21	21	202	10,54	
15/12/2006	10:40	20	20	207	10,48	20	20	290	10,72	9°
16/12/2006	9:40	18	19	239	10,58	18	19	336	10,82	
17/12/2006	11:00	20	21	265	10,64	20	21	354	10,88	
18/12/2006	10:00	19	20	295	10,78	19	20	395	11,03	10°
19/12/2006	10:00	19	19	318	10,73	19	19	396	10,93	
20/12/2006	8:30	20	22	136	10,23	20	22	165	10,48	
21/12/2006	9:00	21	22	174	10,36	21	22	235	10,64	11°
22/12/2006	10:30	22	25	188	10,48	22	25	260	10,75	
2/1/2007	10:30	18	17	268	10,73	18	17	280	10,86	
3/1/2007	9:30	17	17	141	10,35	17	17	153	10,49	12°
4/1/2007	8:30	17	17	165	10,58	17	17	216	10,85	
5/1/2007	9:30	21	20	178	10,64	21	20	230	10,73	
6/1/2007	12:30	20	24	215	10,6	20	24	261	10,75	13°
7/1/2007	11:30	22	21	223	10,71	22	21	268	10,86	
8/1/2007	12:30	25	25	226	10,01	25	25	275	10,9	
10/1/2007	08:00	19	19	125	10,2	19	19	155	10,35	14°
11/1/2007	13:00	27	27	172	10,37	27	27	200	10,49	
12/1/2007	09:00	20	21	184	10,6	20	21	242	10,84	
13/1/2007	11:40	22	20	240	10,73	22	20	267	10,88	15°
15/1/2007	12:40	23	22	245	10,68	23	22	298	10,76	
16/1/2007	09:30	25	20	90	9,47	25	20	80	10,76	
17/1/2007	17:20	29	29	122	9,96	29	29	153	10,76	16°
18/1/2007	10:00	23	26	175	10,36	23	26	232	10,76	
19/1/2007	13:00	27	28	180	10,42	27	28	238	10,76	
22/1/2007	07:15	20	19	260	10,96	20	19	293	10,9	17°
23/1/2007	19:00	22	18	80	10,31	22	18	87	10,42	
24/1/2007	08:45	19	18	118	10,33	19	18	148	10,43	
25/1/2007	11:30	21	23	160	10,58	21	23	210	10,73	18°
26/1/2007	15:20	27	24	211	10,46	27	24	242	10,58	
27/1/2007	10:30	21	22	209	10,7	21	22	245	10,83	
28/1/2007	20:30	22	23	97	9,38	22	23	75	8,87	19°
29/1/2007	11:30	20	19	108	10,41	20	19	135	10,44	
30/1/2007	08:30	19	18	158	10,63	19	18	195	10,73	
3/2/2007	10:00	22	23	94	8,52	22	17	81	7,61	20°
4/2/2007	09:30	19	18	127	9,85	19	18	130	10,22	
5/2/2007	09:00	20	17	148	10,29	19	17	174	10,55	
7/2/2007	08:00	19	18	161	10,53	19	18	218	10,79	21°
8/2/2007	09:00	18	18	173	10,65	19	18	247	10,89	
9/2/2007	10:00	21	18	96	7,45	21	19	93	7,6	
10/2/2007	10:30	20	22	99	10,01	20	22	132	10,25	22°
11/2/2007	12:40	22	26	145	10,23	22	26	176	10,36	
15/2/2007	19:00	17	17	98	9,12	19	17	79	9,08	
16/2/2007	12:00	23	24	132	10,29	23	24	148	10,58	23°
17/2/2007	14:00	22	25	142	10,12	22	25	169	10,36	

Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)