

## **Dissertação de Mestrado**

**ESTUDO DE ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA,  
GEO-MECÂNICA E AMBIENTAL DAS  
ESCÓRIAS DE ACIARIA LD PARA FINS DE  
APLICAÇÃO COMO MATERIAL DE  
LASTRO FERROVIÁRIO EM VIAS  
SINALIZADAS**

**NUGEO**

**AUTOR: DANIEL PINTO FERNANDES**

**ESCOLA DE MINAS / UFOP**

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Gilberto Fernandes (UFOP)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA DA UFOP**

**OURO PRETO - JULHO DE 2010**



F363e

Fernandes, Daniel Pinto.

Estudo de estabilização química, geo-mecânica e ambiental das escórias de aciaria LD para fins de aplicação como material de lastro ferroviário em vias sinalizadas [manuscrito] / Daniel Pinto Fernandes. – 2010.

xix, 142 f.: il., color.; grafs., tabs., fotos.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Fernandes.

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

Área de concentração: Geotecnia de pavimentos.

1. Resíduo - Teses. 2. Engenharia ferroviária - Teses. 3. Ferrovias Sinalização - Teses. I. Universidade Federal de Ouro Preto. II. Título.

CDU: 625.141

Catalogação: [sisbin@sisbin.ufop.br](mailto:sisbin@sisbin.ufop.br)

*Dedico este trabalho ao meu pai Gilberto e minha mãe Cristina, que sempre me incentivaram e apoiam para que eu pudesse estudar e chegar à conclusão desta pesquisa.*

## **AGRADECIMENTOS**

AGRADEÇO SINCERAMENTE:

- À Deus, em primeiro lugar, pois sempre esteve ao meu lado nos momentos em que mais precisei, permitindo, dessa forma, que eu chegassem com êxito no fim deste trabalho;
- Ao meu orientador, Prof. Gilberto Fernandes, por ter me oferecido a oportunidade de desenvolver este trabalho, ter tido paciência e ter sido companheiro nos contratempos em que passamos durante a elaboração do programa experimental e pela atenção especial no fechamento deste trabalho;
- À minha família, pelo suporte na decisão de continuar meus estudos, em especial à minha mãe Cristina e ao meu pai Gilberto, ao meu irmão Lucas, sem os quais eu não estaria aqui hoje;
- À USIMINAS, pelo convênio assinado que viabilizou a realização da pesquisa, assim como os recursos financeiros para a aquisição da instrumentação e dos equipamentos utilizados nos ensaios de laboratório e de campo. Em especial, aos analistas industriais Rodrigo, Alecsandro e Francisco que ajudaram na realização dos testes de campo e na manutenção da instrumentação de monitoramento;
- 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 valiosa ajuda na execução dos ensaios de laboratório e nos trabalhos de campo, em especial a Livia Senna e Lucas Tavares;
- Aos amigos: Rodolfo, Leonardo, Ralph, Danila, Ronderson, André, João Herculano, Tharcísio, Pedro, Murilo, César.

- Aos técnicos Hebert da Consolação e Miguel Arcanjo, a quem chamo de amigos, pelo grande auxílio na realização dos ensaios laboratoriais, pela ajuda no trabalho de campo e sugestões durante o período da pesquisa.
- Aos professores do NUGEO, pelos ensinamentos e convívio.
- Aos meus colegas do curso de mestrado Jaime, Rafael e Érica pelo companheirismo e incentivo.
- Aos que não se encontram aqui citados, porém que, de alguma forma, contribuíram para que este projeto de pesquisa se concretizasse.

Este trabalho é fruto de um esforço conjunto no qual a colaboração de muitas pessoas foi fundamental para sua realização. Agradeço a todos aqueles que, alguma forma, me auxiliaram na realização deste trabalho.

*Daniel Pinto Fermamdes*

*Junho de 2010*

## **RESUMO**

A reutilização de resíduos constitui uma grande alternativa para a preservação dos recursos naturais e do meio ambiente. Nesse sentido, as escórias de aciaria LD apresentam-se como um dos resíduos de maior geração nas usinas siderúrgicas. Estima-se que para cada tonelada de aço produzida, gera-se cerca de 150 kg de escória de aciaria no processo LD. Geralmente, as escórias de aciaria LD recém produzidas são volumetricamente instáveis, apresentando características expansivas, e por esta razão, a aplicação das mesmas deve ser feita a partir de estudos de estabilização. O objetivo precípuo desta pesquisa é elaborar e implantar uma metodologia de estabilização química da escória de aciaria LD para fins de aplicação como lastro ferroviário em vias sinalizadas. Procura-se dessa maneira caracterizar definitivamente o uso da escória de aciaria em larga escala como lastro de ferrovias. Para atingir esse objetivo foi definida uma metodologia para a cura do material no pátio de beneficiamento de escória da USIMINAS com base na hidratação e na carbonatação em pilhas de 2 metros de altura, umectadas com aspersores e que foram instrumentadas com sensores de molhamento foliar, temperatura, precipitação, umidade relativa do ar e teor de dióxido de carbono. Foi montada ainda uma pilha controle para acompanhar o processo de estabilização chamado “weathering” ou ao tempo, que consiste na metodologia adotada pela siderúrgica. Nesta campanha de campo, foi feito um monitoramento do teor de cal livre e também da expansibilidade presente nas pilhas de escória de aciaria analisadas durante o período de 180 dias. Durante este acompanhamento foram realizadas extensas campanhas de campo para caracterizar quimicamente, geo-mecanicamente, fisicamente, ambientalmente, antes e depois do processo de estabilização. As campanhas laboratoriais foram desenvolvidas nos laboratórios da Universidade Federal de Ouro Preto. Dessa forma, por meio dos resultados obtidos foi possível concluir que a metodologia de estabilização com base na hidratação e carbonatação para a escória de aciaria LD foi bastante eficiente, diminuindo o teor de cal livre a valores bem abaixo ao prescrito por normas internacionais e consequentemente reduzindo também a expansão destrutiva da escória. Os resultados também mostraram que a escória estabilizada obteve classificação ambiental como resíduo IIB, enquanto que a escória não estabilizada foi classificada como resíduo IIA. Assim, conclui-se que a escória estabilizada possui grande potencial para ser aplicado como lastro ferroviário em vias sinalizadas em termos de comportamento mecânico, ambiental e propriedades elétricas.

## **ABSTRACT**

The reuse of residue is a great alternative to preserve the natural resources and the environment. In this context, the LD steel slag represents one of the largest generation of waste in the steel industry. It is estimated that for every tonne of steel produced, about 150 kg of the residue in the LD process are generated. Generally, the LD steel slags are volumetrically unstable, providing expansive characteristics, and for this reason the application of this by-product shall be made after studies of stabilization. The main objective of this research is to develop and deploy a methodology for chemical stabilization of LD steel slag for the use as ballast in signposted railroads. The purpose is to characterize definitively the use of steel slag in large scale as railway ballast. In order to achieve this objective a methodology was defined for the cure of the material based on the hydration and carbonation in stacks two meters high, with wetting sprinklers, that were instrumented with sensors, leaf wetness, temperature, rain precipitation, relative humidity and content of carbon dioxide. It was also mounted a control stack to monitor the stabilization process called "weathering" or time, which is the methodology adopted by the steel industry. In the field campaign, has been realized a monitoring of the content of free lime and also of the expansion presented at the stacks of steel slag analyzed during the period of 180 days of stabilization. During this monitoring has been carried out an extensive field campaign to characterize the steel slag, chemically, geo-mechanically, physically, environmentally, before and after the stabilization process. The laboratory tests were carried out in labs at the Federal University of Ouro Preto. Thus, by the results obtained it was concluded that the methodology of stabilization based on hydration and carbonation for the LD steel slag was quite efficient, reducing the content of free lime to values below those required by international standards and consequently reducing also the destructive expansion of the slag. The results also showed that the stabilized slag obtained environmental classification as residue IIB, while the non-stabilized slag was classified as residue IIA. Thus, we conclude that the stabilized slag has a great potential to be used as ballast in signaled railways in terms of mechanical behavior, environmental and electrical properties.

# ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>5</b>
<b>1.2 OBJETIVOS.....</b>	<b>7</b>
<b>1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA .....</b>	<b>8</b>
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>10</b>
<b>2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>10</b>
<b>2.1 - A PRODUÇÃO DE AÇO E A GERAÇÃO DE ESCÓRIA DE ACIARIA.</b>	<b>10</b>
.....	10
<b>2.2 - O PROCESSO DE ACIARIA LD. ....</b>	<b>14</b>
<b>2.3 - A ESCÓRIA DE ACIARIA LD. ....</b>	<b>17</b>
<b>2.4 - CARACTERÍSTICAS DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA LD. ....</b>	<b>19</b>
<b>2.5 – A EXPANSIBILIDADE DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA LD.....</b>	<b>23</b>
<b>2.5.1 – EXPANSÃO DEVIDO AO ÓXIDO DE CÁLCIO LIVRE. ....</b>	<b>23</b>
<b>2.5.2 – EXPANSÃO DEVIDO AO ÓXIDO DE MAGNÉSIO.....</b>	<b>25</b>
<b>2.5.3 – EXPANSÃO DEVIDO A TRANSFORMAÇÃO ALOTRÓPICA DO SILICATO DICÁLCICO. ....</b>	<b>26</b>
<b>2.5.4 – EXPANSÃO DEVIDO À OXIDAÇÃO DO FERRO METÁLICO. 27</b>	<b>27</b>
<b>2.6 – FATORES QUE CONTROLAM A EXPANSÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA.....</b>	<b>29</b>
<b>2.7 – MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA EXPANSIBILIDADE DAS ESCÓRIAS.....</b>	<b>30</b>
<b>2.8 – TRATAMENTOS UTILIZADOS PARA A ESTABILIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA LD. ....</b>	<b>32</b>
<b>2.8.1 – ALTERAÇÕES NO PROCESSO DE ESCÓRIFICAÇÃO. ....</b>	<b>32</b>
<b>2.8.2 – TRATAMENTO POR ENVELHECIMENTO OU “CURA” DAS ESCÓRIAS.....</b>	<b>33</b>
<b>2.8.3 – TRATAMENTO DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA LD NA FASE LÍQUIDA.....</b>	<b>36</b>
<b>2.9 – UTILIZAÇÃO DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA LD. ....</b>	<b>41</b>
<b>2.9.1 – UTILIZAÇÃO NA AGRICULTURA. ....</b>	<b>42</b>

<b>2.9.2 – UTILIZAÇÃO EM CIMENTOS.....</b>	<b>43</b>
<b>2.9.3 – UTILIZAÇÃO EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS.....</b>	<b>45</b>
<b>2.9.4 – UTILIZAÇÃO EM LASTRO DE FERROVIAS .....</b>	<b>48</b>
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>50</b>
<b>3 – MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>50</b>
<b>3.1 – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>50</b>
<b>3.2 – MATERIAIS ESTUDADOS E METODOLOGIA ADOTADA.....</b>	<b>52</b>
<b>3.3 – METODOLOGIA ADOTADA. ....</b>	<b>57</b>
<b>3.3.1 – COLETA DAS AMOSTRAS.....</b>	<b>57</b>
<b>3.4 – CAMPANHA DE ENSAIOS LABORATORIAIS. ....</b>	<b>58</b>
<b>3.4.1 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ESCÓRIA DE ACIARIA. ....</b>	<b>58</b>
<b>3.4.2 – CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DA ESCÓRIA DE ACIARIA.</b>	<b>63</b>
<b>3.4.3 – CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA DA                   ESCÓRIA DE ACIARIA.....</b>	<b>65</b>
<b>3.4.4 – CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DA ESCÓRIA DE ACIARIA.</b>	<b>74</b>
<b>3.4.5 – AVALIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE E DA EXPANSIBILIDADE                   DA ESCÓRIA DE ACIARIA. ....</b>	<b>76</b>
<b>3.5 – MONITORAMENTO DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS DE CAMPO.</b>	<b>79</b>
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>81</b>
<b>4 – RESULTADOS E ANÁLISES DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO E         MONITORAMENTO DAS DISPOSIÇÕES EXPERIMENTAIS EM PÁTIO         INDUSTRIAL.....</b>	<b>81</b>
<b>4.1 INTRODUÇÃO. ....</b>	<b>81</b>
<b>4.2 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ESCÓRIA DE ACIARIA.....</b>	<b>83</b>
<b>4.2.1 – ENSAIO DE GRANULOMETRIA. ....</b>	<b>84</b>
<b>4.2.2 – ÍNDICE DE CONTAMINAÇÃO.....</b>	<b>88</b>
<b>4.2.3 – ABRASÃO LOS ANGELES. ....</b>	<b>89</b>
<b>4.2.4 – RESISTÊNCIA AO CHOQUE – ÍNDICE DE TENACIDADE                   TRETON. ....</b>	<b>89</b>

4.2.5 – MASSA ESPECÍFICA APARENTE, ABSORÇÃO E POROSIDADE APARENTE .....	90
4.2.6 – FORMATO DO MATERIAL .....	90
4.2.7 – FRAGMENTOS MACIOS E FRIÁVEIS .....	91
4.2.8 – TEOR DE ARGILA EM TORRÕES .....	92
4.2.9 – RESISTÊNCIA ÀS INTEMPPÉRIES .....	92
<b>4.3 – CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS ESCÓRIAS.....</b>	<b>93</b>
4.3.1 – COMPRESSÃO AXIAL .....	93
4.3.2 – CARGA PONTUAL .....	93
<b>4.4 – CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E QUÍMICA DAS ESCÓRIAS.....</b>	<b>95</b>
4.4.1 – ANÁLISES POR DIFRAÇÃO DE RAIO X .....	95
4.4.2 – ANÁLISES QUÍMICAS QUANTITATIVAS .....	97
4.4.3 – ANÁLISES QUÍMICAS POR MVE/EDS.....	98
4.4.4 – TEOR DE CAL LIVRE .....	101
4.4.5 – POROSIDADE, SUPERFÍCIE ESPECÍFICA E DENSIDADE REAL .....	102
<b>4.5 – CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DA ESCÓRIA DE ACIARIA..</b>	<b>105</b>
4.5.1 – TESTE DE LIXIVIAÇÃO E SOLUBILIZAÇÃO .....	105
<b>4.6 – AVALIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE E DA EXPANSIBILIDADE DA ESCÓRIA DE ACIARIA.....</b>	<b>110</b>
4.6.1 – AVALIAÇÃO DO EFEITO DA CURA SOBRE A CONDUTIVIDADE .....	110
4.6.2 – AVALIAÇÃO DE EXPANSIBILIDADE PELO MÉTODO PTM 130/78 ADAPTADO PELO DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE MINAS GERAIS (DMA – 1/DER-MG /92). .....	114
<b>4.7 – MONITORAMENTO DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS DE CAMPO.</b> .....	<b>116</b>
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>122</b>
<b>5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>122</b>
5.1 – CONCLUSÕES REFERENTES À CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, MECÂNICA, QUÍMICA, AMBIENTAL E AVALIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE E DA EXPANSIBILIDADE.....	123

5.2 – CONCLUSÕES REFERENTES AO MONITORAMENTO AMBIENTAL DE CAMPO.....	125
CAPÍTULO 6.....	127
6 – CONCLUSÕES.....	127
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	131

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 2.1 – Representação esquemática da produção do aço.....	10
Figura 2.2 – Distribuição estadual da produção brasileira de aço bruto no ano de 2008.....	12
Figura 2.3 – Principais aplicações de escória de aciaria no ano de 2008.....	13
Figura 2.4 – Seqüência de operação de um conversor a oxigênio.....	16
Figura 2.5 – Detalhe de um conversor a oxigênio.....	16
Figura 2.6 – (a) Basculamento e (b) Resfriamento da escória.....	17
Figura 2.7 – Classificação e separação magnética (SOUZA, 2007).....	18
Figura 2.8 – Classificação e separação magnética.....	19
Figura 2.9 – Análise microscópica de escória de aciaria LD – (MEV por elétrons secundários – ampliação de 200x).....	22
Figura 2.10 – Exemplo de processo de cura a vapor sob pressão atmosférica de escória de aciaria LD.....	35
Figura 2.11 – Autoclave desenvolvida no Japão para tratamento a vapor da escória de aciaria LD.....	36
Figura 2.12 – Foto de uma rodovia executada com escória de aciaria LD (PENA, 2004).....	48
Figura 2.13 – Foto da execução da rodovia com escória de aciaria LD e depois a rodovia pronta (DNIT,1994).....	48
Figura 2.14 – Foto de uma ferrovia executada com escória de aciaria LD (PIMENTA et al, 2003).....	49
Figura 3.1 – Fluxograma geral dos ensaios realizados durante a pesquisa.....	51
Figura 3.2 – Ensaios realizados para estimar tempo de passagem da água na pilha de escória.....	52
Figura 3.3 – Sequência da montagem do sistema de aspersão empregado.....	53
Figura 3.4 – Foto da pilha EH1 montada.....	54
Figura 3.5 – Foto da pilha EH2 montada.....	55

Figura 3.6 – Foto da pilha CONTROLE montada.....	55
Figura 3.7 – Foto com detalhamento dos sensores, pluviômetro.....	56
Figura 3.8 – Foto com detalhamento e locação dos sensores prontos.....	56
Figura 3.9 – Foto com a conformação final das pilhas estudadas.....	57
Figura 3.10 – Peneirador mecânico utilizado nos ensaios.....	58
Figura 3.11 – Equipamento e cargas abrasivas utilizadas no Ensaio de abrasão Los Angeles.....	60
Figura 3.12 – Equipamento Treton para medidas de resistência ao impacto.....	61
Figura 3.13 – Dimensões empregadas para a análise da forma dos fragmentos.....	62
Figura 3.14 – Aparelho para a determinação do teor de material macio e friável.....	63
Figura 3.15 – Aparelho utilizado para romper os corpos de prova selecionados.....	64
Figura 3.16 – Difratômetro de Raios-X empregado nos ensaios.....	65
Figura 3.17 – Espectrômetro de Raios-X empregado nos ensaios.....	67
Figura 3.18 – Pastilhas prontas para os ensaios de fluorescência de raios - X.....	67
Figura 3.19 – Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV/EDS).....	68
Figura 3.20 – Esquema que ilustra a coluna do MEV.....	69
Figura 3.21 – Equipamento e execução do ensaio de teor de cal livre.....	70
Figura 3.22 – Equipamento e execução do ensaio de teor de cal livre.....	72
Figura 3.23 – Equipamento usado no ensaio de lixiviação.....	75
Figura 3.24 – Equipamento usado no ensaio de lixiviação.....	76
Figura 3.25 – Caixa-teste para análise da condutividade nas escórias de aciaria.....	77
Figura 3.26 – Esquema completo da montagem do experimento (SOUZA 2007).....	77
Figura 3.27 – Moldes e estufa para realização do ensaio PTM 130/78.....	79
Figura 3.28 – Sensor de Temperatura e de Molhamento Foliar.....	79
Figura 3.29 – Pluviômetro e medidor de umidade e teor de CO <sub>2</sub> .....	80
Figura 3.30 – Sistema de coleta de dados instalado e célula eletrovoltaica.....	80

Figura 4.1 – Enquadramento das curvas na faixa padrão A da ABNT.....	87
Figura 4.2 – Enquadramento das curvas na faixa padrão B da ABNT.....	87
Figura 4.3 – Padrão de difração de raios-X da amostra EH1.....	96
Figura 4.4 – Padrão de difração de raios-X da amostra EH2.....	96
Figura 4.5 – Padrão de difração de raios-X da amostra Controle.....	97
Figura 4.6 – Morfologia típica encontrada no material EH1 pulverizado.....	98
Figura 4.7 – Morfologia típica encontrada no material EH2 pulverizado.....	99
Figura 4.8 – Morfologia típica encontrada no material da pilha Controle pulverizado.....	100
Figura 4.9 – Acompanhamento da porcentagem teor de cal livre no período de monitoramento.....	101
Figura 4.10 – Isoterma de adsorção – dessorção ( $N_2$ a 77K) da pilha EH1.....	103
Figura 4.11 – Isoterma de adsorção – dessorção ( $N_2$ a 77K) da pilha EH2.....	104
Figura 4.12 – Isoterma de adsorção – dessorção ( $N_2$ a 77K) da pilha Controle.....	104
Figura 4.13 – Monitoramento da condutividade do material da pilha EH1.....	111
Figura 4.14 – Monitoramento do pH do material da pilha EH1.....	111
Figura 4.15 – Monitoramento da condutividade do material da pilha EH2.....	112
Figura 4.16 – Monitoramento do pH do material da pilha EH2.....	112
Figura 4.17 – Monitoramento da condutividade do material da pilha Controle.....	113
Figura 4.18 – Monitoramento do pH do material da pilha Controle.....	113
Figura 4.19 – Monitoramento do ensaio de PTM-130/78 para todas as pilhas estudadas.....	115
Figura 4.20 – Sequencia de fotos mostrando a expansão e a passagem de água pelo material.....	115
Figura 4.21 – Gráfico que ilustra o quanto a pilha EH1 ficou molhada.....	116
Figura 4.22 – Gráfico que ilustra o quanto a pilha EH2 ficou molhada.....	117
Figura 4.23 – Monitoramento da precipitação pluviométrica.....	118

Figura 4.24 – Monitoramento da temperatura na base e no meio da pilha EH1.....	118
Figura 4.25 – Monitoramento da temperatura na base e no meio da pilha EH2.....	119
Figura 4.26 – Monitoramento da temperatura externa das pilha EH1, EH2 e Controle.....	119
Figura 4.27 – Monitoramento do CO <sub>2</sub> nas pilhas EH1, EH2 e Controle.....	120
Figura 4.28 – Monitoramento da umidade relativa nas pilhas EH1, EH2 e Controle.....	121

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 - Produção de aço bruto no Brasil por processo de acaria no ano de 2008 .	11
Tabela 2.2 – Composições químicas da escória de acaria LD.....	20
Tabela 2.3 – Composição mineralógica da escória de acaria LD.....	21
Tabela 2.4 – Produtos originados a partir das reações de oxidação e corrosão do ferro metálico presente na escória de acaria LD.....	28
Tabela 2.5 – Principais fatores que controlam a expansão da escória de acaria LD....	29
Tabela 2.6 – Resumo sobre as metodologias de tratamento (SILVA modificado, 2001) .....	40
Tabela 3.1 – Nomenclatura das pilhas estudadas.....	53
Tabela 3.2 – Estado de contaminação do lastro (Selig et al, 1993).....	59
Tabela 3.3 – Classificação da forma dos fragmentos.....	62
Tabela 4.1 –Quantitativo dos ensaios de laboratório.....	82
Tabela 4.2 –Quantitativo dos ensaios de campo.....	83
Tabela 4.3 – Resultado do ensaio de granulometria na pilha EH1.....	84
Tabela 4.4 – Resultado do ensaio de granulometria na pilha EH2.....	85
Tabela 4.5 – Resultado do ensaio de granulometria na pilha Controle.....	85
Tabela 4.6 – Propriedades geométricas obtidas a partir da granulometria.....	87
Tabela 4.7 – Índice e grau de contaminação dos materiais.....	88
Tabela 4.8 – Resultados dos ensaios de Abrasão Los Angeles.....	89
Tabela 4.9 – Resultados dos ensaios de resistência ao choque Treton.....	89
Tabela 4.10 - Resultados dos ensaios de massa específica, absorção de água e porosidade aparente .....	90
Tabela 4.11 – Determinação da forma dos materiais estudados.....	91
Tabela 4.12 – Determinação do teor de fragmentos macios e friáveis dos materiais estudados .....	92
Tabela 4.13 – Determinação do teor de argila em torrões.....	92

Tabela 4.14 – Determinação da resistência às intempéries.....	93
Tabela 4.15 – Propriedades de resistência dos materiais utilizados como lastro .....	94
Tabela 4.16 – Valores de C para a escória de aciaria LD (FERNANDES, 2005) .....	95
Tabela 4.17 – Espécies químicas e sua porcentagem em massa.....	97
Tabela 4.18 – Resultados da análise quantitativa realizada em cada ponto da Figura 4.6 .....	99
Tabela 4.19 – Resultados da análise quantitativa realizada em cada ponto da Figura 4.7 .....	99
Tabela 4.20 – Resultados da análise quantitativa realizada em cada ponto da Figura 4.8 .....	100
Tabela 4.21 – Resultados do ensaio de teor de cal livre.....	101
Tabela 4.22 – Resultados do ensaio de adsorção de nitrogênio nas amostras das pilhas estudadas.....	102
Tabela 4.23 – Ensaio de lixiviação somente para parâmetros inorgânicos para a pilha EH1.....	105
Tabela 4.24 – Ensaio de lixiviação somente para parâmetros inorgânicos para a pilha EH2 .....	106
Tabela 4.25 – Ensaio de lixiviação somente para parâmetros inorgânicos para a pilha Controle .....	106
Tabela 4.26 – Ensaio de solubilização somente para parâmetros inorgânicos para a pilha EH1.....	107
Tabela 4.27 – Ensaio de solubilização somente para parâmetros inorgânicos para a pilha EH2.....	108
Tabela 4.28 – Ensaio de solubilização somente para parâmetros inorgânicos para a pilha Controle.....	109
Tabela 4.29 – Monitoramento da expansão pelo método DMA – 1/DER-MG /92... ...	114
Tabela 5.1 – Resumo das propriedades encontradas e seu enquadramento nas especificações.....	123

## **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

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

EH1: Escória Hidratada 1

EH2: Escória Hidratada 2

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

SI: Sistema Internacional

UFOP: Universidade Federal de Ouro Preto

USIMINAS: Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais

## **LISTA DE SÍMBOLOS**

A<sub>n</sub>: Abrasão “Los Angeles”

A<sub>s</sub>: Área do plano de ruptura

C: Condutividade

C<sub>2</sub>S: Silicato dicálcico

C<sub>3</sub>S: Silicato tricálcico

Ca(OH)<sub>2</sub>: Hidróxido de cálcio

CaCO<sub>3</sub>: Carbonato de cálcio (calcário)

d: Distância (espaçamento) interplanar.

D<sub>10</sub>: Diâmetro efetivo para o qual passa 10% do material.

D<sub>30</sub>: Diâmetro efetivo para o qual passa 30% do material

D<sub>60</sub>: Diâmetro efetivo para o qual passa 60%

D<sub>e</sub>: Diâmetro equivalente das partículas de escória

FI: Fouling index” ou índice de contaminação do lastro

FeO: óxido de ferro

I<sub>a(50)</sub>: Índice de resistência anisotrópico

I<sub>s</sub>: Índice de carregamento pontual

*l*: comprimento

m' <sub>n</sub>: Massa da amostra lavada na peneira de 1.7mm

m<sub>n</sub>: Massa total seca

MnO: Óxido de magnésio

P<sub>200</sub>: Porcentagens em pesos passantes na peneira #200

P<sub>4</sub>: Porcentagens em pesos passantes na peneira #4

S: Siemens

δ<sub>uc</sub>: Resistência à compressão uniaxial

θ: Ângulo de incidência;

λ: Comprimento da onda

ρ: Resistividade

# CAPÍTULO 1

---

## 1 INTRODUÇÃO

A relevância dos assuntos que estão relacionados à conservação ambiental nos diversos segmentos da atividade econômica e políticas governamentais vem crescendo significativamente a partir das últimas décadas. Este crescimento é estimulado pela consciência ambiental da sociedade e pela legislação ambiental, cada vez mais exigente. Desta maneira, muitas empresas nos vários setores buscam capacitar os seus colaboradores técnicos e investir no estabelecimento de novos equipamentos de forma a minimizar a cultura do desperdício e promover metodologias adequadas para a reciclagem dos resíduos gerados em seus processos produtivos.

Atualmente o interesse por fontes de energias que possuam grande capacidade de geração e também recursos naturais tem atingido níveis cada vez maiores, este fato, aliada à rápida evolução da tecnologia resulta em uma maior facilidade para que se intervenha na natureza, favorecendo uma intensificação da exploração de recursos naturais esgotáveis. As instituições empresariais vêm enfrentando por parte das legislações ambientais, da sociedade e do mercado consumidor, de uma forma geral, pressões formais no sentido de buscar uma sustentabilidade em seu meio produtivo.

Uma das principais causas de degradação ambiental é a geração de resíduos. As formas que procuram mitigar os danos gerados pelos resíduos podem ser divididas em: minimizar sua geração e reutilizá-los ou reciclá-los. Para que essa minimização ocorra torna-se necessário uma reengenharia dos processos produtivos, buscando uma significativa redução dos resíduos (FERNANDES, 2005). Esta reutilização ou reciclagem passa por uma caracterização completa dos resíduos visando o reuso no próprio processo produtivo, almejando uma redução de custos. A diminuição do volume gerado está muitas vezes relacionada aos limites técnico-operacionais difíceis de serem contornados (MASUERO et

al., 2001). A reciclagem, por sua vez, constitui uma alternativa com vasto campo de aplicação e que pode trazer retorno financeiro.

A definição de resíduos pode ser dada como: todos os rejeitos gerados dentro do processo de produção ou consumo de um outro produto, independente do seu valor comercial (JOHN, 1996). Segundo JOHN (1997), sob o ponto de vista ambiental, o principal propósito é buscar a transformação de um resíduo em um subproduto, uma vez que por meio da reciclagem é possível minimizar o consumo energético na produção de novos produtos, além de favorecer a dispersão de compostos contaminantes, o que não ocorre quando da deposição dos resíduos.

Nestes últimos anos, os resíduos industriais têm recebido uma atenção maior para a reciclagem e aplicação em outras áreas. Pode-se atribuir este fato tanto a aspectos econômicos quanto ambientais. Pode-se ainda ressaltar que as receitas adicionais geradas e a redução de custos, uma vez que não há mais necessidade de grandes áreas de armazenamento, além da possibilidade do valor agregado pelo seu uso, são motivos que valorizam a proposta de reutilização. Neste último aspecto, o processo de reciclagem se ajusta dentro do programa ZERI – “Zero Emission Research Initiative”, criado pela Universidade das Nações Unidas e Fundação Zeri, de Genebra. O qual possui como principal vértice a definição de valor agregado. Dentro do programa nenhum resíduo, em qualquer fase, deve ser gerado. No entanto, quando ocorrer, este resíduo precisa ser aplicado por outras empresas na procura pelo desenvolvimento de valor agregado, logo, pode-se dizer que o referido conceito movimenta o mercado e assegura o fluxo de recurso sustentável (MASUERO et al., 2001).

Desse modo, acrescenta-se ainda que as práticas legais para descarte estão cada vez mais restritivas.

A regulamentação 91/156/EEC institui que os países signatários da C.E.E. (Comunidade Econômica Européia) precisam elaborar metodologias que visem a redução da geração de resíduos, reciclar e reutilizá-los como materiais secundários e utilizá-los ou convertê-los sem produzir prejuízos à saúde humana e ao meio ambiente (MASUERO et al., 2001).

As primeiras abordagens normativas relacionadas às questões ambientais eram basicamente direcionadas no campo da regulamentação técnica, ou seja, valores limites eram estabelecidos e deveriam ser respeitados. Com isso, para atender as exigências, as indústrias instalaram equipamentos para controle de poluição, que apesar do alto investimento, foram insuficientes para resolver o problema de degradação do meio ambiente (BRILHANTE, 1998).

Na década de 1990, teve início a elaboração das normas de Sistemas de Gestão Ambiental. A primeira com esta percepção foi a norma britânica BS 5750, seguida em 1993 por vários outros países como na França (AFNOR), Espanha (AENOR), Irlanda (NSAI), Holanda (NNI) e África do Sul e Brasil (SABS). Sendo a mais recente normalização ambiental, aprovada em 1996 e consolidada na família de normas ISO 14000.

No ano de 1992, houve um relevante encontro mundial realizado no Rio de Janeiro, ECO92, que resultou em um documento denominado Agenda 21, onde quatro capítulos são destinados a resíduos sólidos, referindo-se ao manejo ecologicamente e ambientalmente saudável (TEIXEIRA, 2000).

Nesse sentido, está em discussão no Congresso Nacional brasileiro um projeto de lei nº 3029/97 (que institui uma Política Nacional de Resíduos – SISNARES) que indicará os tratamentos mais eficientes e as disposições finais dos resíduos domésticos e hospitalares (TEIXEIRA, 2000).

Outro movimento que começou na década de 1990 foi o chamado Desenvolvimento Sustentável, conceituado em 1987, pelo “Brundtland Commission” da Organização das Nações Unidas, como sendo o desenvolvimento que se encontra em conformidade com as necessidades do presente sem interferir de maneira a incapacitar as possíveis gerações futuras de atender suas próprias necessidades (BOURDEAU, 2000).

Neste momento, o impacto ambiental proporcionado pela indústria da construção civil é bastante elevado. Segundo BOURDEAU (2000), na União Européia, as construções são responsáveis por mais de 40 % do total de energia consumida e por aproximadamente 40% de todo resíduo gerado.

Um desafio em um futuro próximo para os engenheiros civis será desenvolver projetos em consonância com o conceito de desenvolvimento sustentável, que implica no uso de materiais de alto desempenho produzidos a custos baixos e com menor impacto ambiental possível (BILODEAU e MALHOTRA, 2000).

Uma proposta para mitigar o impacto ambiental e buscar o desenvolvimento sustentável é a reutilização de resíduos. A área de pavimentação rodo-ferroviária é um setor promissor para a reciclagem de resíduos por uma série de fatores. Em primeiro lugar, a redução do volume de material que seria estocado em pátios e aterros industriais converteria impactos e investimentos em novas aplicações e rendas adicionais. Em segundo lugar, a utilização do resíduo em pavimentação proporcionaria uma redução de alguns insumos naturais que são extraídos de jazidas ou minerações, que muitas vezes não possuem licenças ambientais e atuam sem preocupação com o meio ambiente. E por último, pode-se citar as melhorias proporcionadas pela adição de alguns resíduos agrícolas e industriais, tanto do ponto de vista de propriedades mecânicas quanto de durabilidade, aos materiais tradicionais de pavimentação. Do ponto de vista financeiro, a viabilidade encontra-se vinculada à quantidade disponível de resíduo; neste ponto ressalta-se a indústria siderúrgica que, a despeito de procurar cada vez mais investir em equipamentos e formação de quadros técnicos capazes de solucionarem os problemas de ordem ambiental, continua gerando uma grande quantidade de resíduos.

Dentre estes resíduos, pode-se salientar as escórias de aciaria geradas na produção do aço, que possuem elevada geração, apresentam um caráter expansivo e são armazenadas em áreas abertas, ou quando usadas não possuem controle de qualidade. Essas características são as responsáveis pelo surgimento de manifestações indesejadas nas aplicações em que foram incorporadas.

Dessa maneira, a busca por novos materiais na área de pavimentação rodo-ferroviária conjuntamente com a necessidade da indústria siderúrgica em empregar a produção de seus resíduos constitui um grande esforço no sentido de alcançar o Desenvolvimento Sustentável.

## **1.1 JUSTIFICATIVA**

A utilização de escórias de aciaria do processo Lins Donawitz, em materiais de construção civil é ainda bastante restrita. A aplicação destes resíduos como agregados para obras rodoviárias e ferroviárias acontece, atualmente, de maneira não-sistêmica, usualmente partindo de iniciativas isoladas de alguns órgãos e setores da construção civil e de algumas indústrias siderúrgicas.

Para a expansão e atualização das ferrovias em âmbito nacional é necessário o desenvolvimento de tecnologias inovadoras para compensar a escassez de recursos, típica de um país em desenvolvimento e com situação econômica estável.

As técnicas de engenharia correntemente utilizadas nos projetos de ferrovias, assim como os métodos aplicados no dimensionamento de pavimentos ferroviários, seguem as chamadas “prescrições gerais” determinadas pelas normalizações específicas criadas em países da Europa ou nos Estados Unidos. As citadas normas privilegiam o emprego de materiais granulares e pétreos para uso nos lastros ferroviários. Tais materiais correntemente utilizados (britas de granito e basalto) possuem alto custo e provocam impactos ambientais associados em todas as fases de obtenção.

Uma das formas que poderia contribuir para diminuir os custos de implantação de sistemas ferroviários e impactos ambientais seria a adoção de materiais alternativos em substituição aos normalmente utilizados. Dentre os materiais alternativos, que poderiam ser utilizados em lastros de pavimentos ferroviários, têm-se as escórias de aciaria que são produzidas em larga escala no parque siderúrgico nacional.

Desde 1979, a escória de aciaria vem sendo utilizada na infra-estrutura de estradas e ferrovias em países como Estados Unidos, Inglaterra, Japão e Canadá.

O Brasil está entre os vinte maiores produtores de aço bruto do mundo, com 3,7% da produção mundial no ano de 2003. O setor siderúrgico brasileiro é formado por 26 usinas comandadas por 8 grupos empresariais que apresentam uma previsão de investimentos no setor de 2005 a 2010 de US\$ 12,5 bilhões, com projeção de alcançar a capacidade instalada de 49,7 milhões de toneladas no final desses cinco anos. Esse novo ciclo de investimentos

está voltado para o aumento da capacidade de produção, a fim de atender ao crescimento da demanda interna que deve ser de mais de um milhão de toneladas por ano no período de 2005 e 2010.

O Estado de Minas Gerais possui um dos maiores parques siderúrgicos do país, respondendo por grande percentual de produção do aço brasileiro, o que causa a geração de grande quantidade de resíduo e torna imprescindível a busca de alternativas para sua utilização (IAB, 2009). Sabe-se que as atividades siderúrgicas são importantes para o país, entretanto, não se pode omitir o impacto que as mesmas exercem sobre o meio ambiente. A preservação do meio ambiente é hoje muito mais do que uma consciência ecológica, apresentando-se como uma realidade que vem sendo integrada ao cotidiano de todos os setores da sociedade.

Nesse contexto, as atividades da industria do aço, cada vez mais, buscam se aliar a soluções tecnológicas que visam minimizar os impactos ambientais por elas gerados.

Portanto, a iniciativa do uso da escória de aciaria como material de lastro em vias férreas necessita de estudos prévios das características físicas e ambientais assim como das avaliações das potenciais consequências ambientais da sua utilização em larga escala. Tais estudos são considerados necessários para qualquer iniciativa de uso de materiais “alternativos” e que ficam expostos ao ambiente por ação das intempéries e por consequências operacionais.

A proposta principal desta pesquisa é a elaboração de metodologias que possam garantir a estabilização química ou como é conhecida no meio produtivo a “cura” da escória de aciaria para dessa maneira se avaliar o teor de cal livre e por consequência a expansibilidade apresentada pelo material e assim poder credenciar o seu uso em larga escala em ferrovias sinalizadas.

Este trabalho está inserido em uma linha de pesquisa dentro dos objetivos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFOP, por meio do NUGEO (Núcleo de Geotecnologia da Escola de Minas) em pesquisar e viabilizar o uso de novos materiais empregados na construção civil e pavimentação rodo-ferroviária.

## **1.2 OBJETIVOS**

Este trabalho possui como principal objetivo o desenvolvimento de uma metodologia de adequação química, mecânica e ambiental da escória de aciaria LD produzida pela USIMINAS S/A para ser aplicada como lastro de ferrovias sinalizadas visando atender as conformidades referentes às normas brasileiras. Busca-se também a elaboração de um procedimento de cura da escória que minimize a sua condutividade elétrica, visando reduzir, em período chuvoso, paralisações do tráfego ferroviário devido à falsa ocupação proveniente do seu uso.

Entre os objetivos considerados específicos deste trabalho, se encontram:

- A revisão bibliográfica sobre origem, principais características e aplicações da escória de aciaria, bem como metodologias eficientes no tratamento de sua expansibilidade;
- Determinação das características química, mineralógica e ambiental em amostras de escória de aciaria;
- Classificar ambientalmente o material de acordo com seu potencial de uso em leitos ferroviários segundo a norma brasileira registrada (ABNT/ NBR 10004);
- Realização de ensaios de etileno-glicol nas escórias de aciaria LD provenientes do processo de tratamento, com vistas a determinação do teor de cal livre presente;
- Adaptar o ensaio de expansão PTM 130 (Pennsylvania Testing Method, USA) adaptado pelo Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais, para determinação do percentual de expansão que o material apresenta em uma amostra de escória de aciaria LD;
- Determinar o tempo de ciclo para metodologia adotada de estabilização química da escória de aciaria LD.

- Buscar uma correlação entre os resultados dos testes de laboratório com os resultados das caracterizações química, mineralógica e ambiental das escórias em estudo;
- Análise e síntese geral dos estudos realizados no referido trabalho de pesquisa.

### **1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA**

Esta dissertação de mestrado se encontra estruturada em sete capítulos, descritos da seguinte forma:

O primeiro capítulo apresenta uma introdução ao assunto estudado, enfatizando a viabilidade da aplicação de resíduos na pavimentação rodo-ferroviária, sob os aspectos ambientais e químicos. Também são apresentados os objetivos da pesquisa, a justificativa do tema proposto e a estrutura da pesquisa.

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica abordando as escórias de aciaria LD, o processo de geração, o volume gerado e as principais características destas escórias. São abordados os constituintes das escórias que contribuem para o fenômeno da expansibilidade, os métodos de avaliação da expansão, e os tipos de tratamento que vêm sendo realizados com vistas à estabilização destes resíduos. Também é apresentado um levantamento das diversas formas de aplicação das escórias de aciaria LD.

Os capítulos 3, 4 e 5 apresentam a parte experimental desta pesquisa, ressaltando os materiais utilizados na pesquisa, a metodologia adotada no trabalho de campo, os resultados obtidos laboratorialmente e em campo.

Os materiais utilizados na pesquisa e a metodologia adotada são abordados no capítulo 3. Neste capítulo são apresentados os métodos de caracterização física, química, ambiental, mineralógica das escórias. São enfocados os métodos empregados nesta pesquisa para avaliação da expansibilidade das escórias e os métodos de estabilização por meio de hidratação intermitente no material disposto em forma de um cone.

No quarto capítulo da dissertação são apresentados os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais realizados durante a fase experimental desta pesquisa, referenciados na revisão bibliográfica e na metodologia adotada e também os resultados alcançados na campanha de ensaios de campo realizados no pátio de estocagem de escória da USIMINAS em Ipatinga/MG. A caracterização das escórias estudadas e os resultados dos ensaios de expansão são abordados de maneira detalhada neste capítulo.

No quinto e sexto capítulos são feitas as análises e considerações finais sobre o trabalho, as respectivas conclusões sobre o tema e também relacionadas algumas sugestões para futuros estudos com relação ao assunto proposto nesta pesquisa. Finalizando encontram-se as referências bibliográficas utilizadas no trabalho.

## CAPÍTULO 2

---

---

### 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

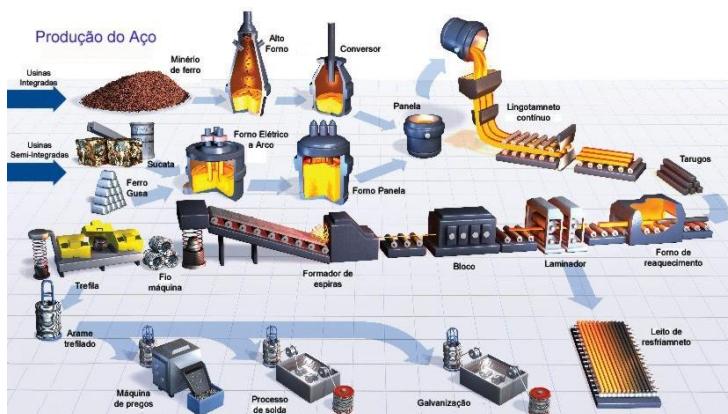
#### 2.1 - A PRODUÇÃO DE AÇO E A GERAÇÃO DE ESCÓRIA DE ACIARIA

A indústria siderúrgica possui destaque pela grande produção de materiais a base de ferro. Vinculada a esta condição, obtém-se uma alta geração de resíduos. Dessa forma, o volume de resíduos produzidos por uma usina siderúrgica integrada a coque se encontra em torno de 700 kg/t de aço líquido (PEREIRA, 1994). Analisando a produção mundial, estima-se a geração anual de resíduos em torno de 551 milhões de toneladas.

No processo siderúrgico, as escórias são os resíduos de maior geração (CHEHEBE et al. 1986). Estima-se que sua geração situa-se entre 70 a 170 kg/t (PEREIRA, 1994).

A geração das referidas escórias pode se processar na fusão redutora dos minérios para obtenção do ferro-gusa, como também na etapa subsequente, na produção do aço, resultando nas escórias chamadas de alto-forno e de aciaria, respectivamente.

A partir da utilização de diferentes tecnologias para a produção de aço, escórias de aciaria de diferentes características são geradas, de maneira que, para compreender o comportamento destas, é preciso o entendimento dos processos de fabricação do aço. A Figura 2.1 ilustra como ocorre a produção do aço.



**Figura 2.1 – Representação esquemática da produção do aço.**

Os principais métodos de produção do aço são: por meio da fusão e refino da sucata em fornos elétricos a arco; e por meio do refino do gusa líquido em conversores a oxigênio (SANO et al., 1997). A primeira tecnologia se baseia na produção a partir de uma carga sólida, enquanto que a segunda a partir de uma carga líquida, antecedida de um carregamento de sucata. Os respectivos processos de fabricação são designados pelo tipo de equipamento utilizado, ou seja, forno elétrico a arco (FEA) e conversor LD que significa o nome de regiões da Austria (Linz e Donawitz).

Os fornos elétricos a arco (FEA) estão sendo aplicados para fabricação, essencialmente, de produtos longos, como por exemplo, vergalhões para a construção civil, barras e perfis para a indústria mecânica. Os conversores a oxigênio (LD ou BOF) vêm sendo tipicamente empregados para produção de elevadas quantidades de aço, destaca-se a produção de produtos planos, como por exemplo, chapas para a indústria automobilística.

Do mesmo modo que os fornos, as escórias de aciaria são classificadas em escória de forno elétrico, gerada a partir da transformação de sucata metálica em aço num forno elétrico a arco e escória de conversor, formada quando da transformação do ferro-gusa (líquido) em aço.

O montante de resíduos produzidos no setor siderúrgico é volúvel e dependente do tipo de processo utilizado nas usinas, como também das matérias-primas empregadas.

Em vários países, o volume de escórias é avaliada tendo em vista a quantidade de gusa e aço produzidos. Os índices de geração de escórias de aciaria exibem uma maior variação também devido ao tipo de aço produzido.

HILTUNEN (2000), ressalta que mundialmente a fabricação de aço gera mais de 300 milhões de toneladas de sub-produtos e resíduos, onde as escórias respondem por mais de 80% deste total. VIKLUND-WHITE e YE (1999) citam que apenas as escórias de aciaria geradas no processo LD correspondem a aproximadamente 90 milhões de toneladas anualmente.

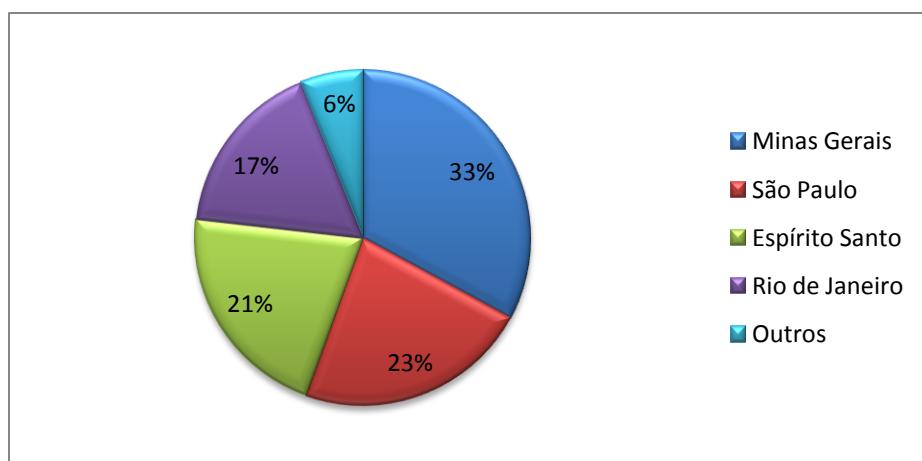
De acordo com os dados do Instituto Aço Brasil (2009), a produção de aço bruto no Brasil, durante o ano de 2008, foi de 33 milhões de toneladas, correspondendo a um percentual de

2,48% da produção mundial, e 50,66% da produção da América Latina (ocupando a primeira posição da América Latina). A Tabela 2.1 apresenta a produção brasileira de aço bruto por processo de aciaria no ano de 2008.

**Tabela 2.1 - Produção de aço bruto no Brasil por processo de aciaria no ano de 2008.**

Processo de Aciaria	Aço Produzido (x 10 <sup>3</sup> t)	Participação
Oxigênio (LD/BOF)	25226,98	76,4
Elétrico (EAF)	7773,02	23,6
Total	33.000	100

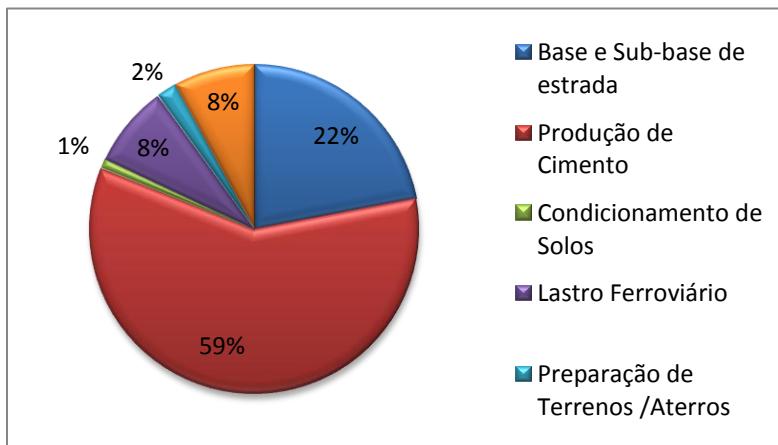
Com relação à produção interna de aço bruto no Brasil, somente a região Sudeste contribuiu com 94,2% da produção brasileira no ano de 2008. Para o mesmo ano, o estado de Minas Gerais contribuiu com 33% da produção brasileira, totalizando 6,078 milhões de toneladas e ocupando a primeira posição relativa ao país. A Figura 2.2 apresenta a distribuição estadual da produção brasileira de aço bruto no ano de 2008.



**Figura 2.2 – Distribuição estadual da produção brasileira de aço bruto no ano de 2008.**

Conforme informações do Instituto Aço Brasil (2009) destaca-se que 76,4% do total de escória produzida teve a sua geração por meio do processo LD. Dessa maneira tem-se que

aproximadamente, 59% das escórias LD são empregadas na produção de cimento e 22% possuem aplicação como bases e sub-bases rodoviárias e apenas 8% são destinadas a lastros ferroviários. A Figura 2.3 mostra as diversas aplicações que a escória de aciaria LD possui.



**Figura 2.3 – Principais aplicações de escória de aciaria no ano de 2008.**

No Brasil, cada tonelada de aço gera cerca de 400 a 500 kg de escórias em usinas integradas. Dessa forma, aproximadamente, 300 a 350 kg são oriundos da etapa de redução nos altos-fornos e 100 a 150 kg correspondem às escórias de aciaria LD (CRUZ et al. 1999).

As escórias de alto-forno, atualmente, são consideradas como subprodutos e obtém um índice de reaproveitamento da ordem de 100% em alguns países, entretanto o índice de aproveitamento das escórias de aciaria do processo LD atinge entre 75 e 85% (HILTUNEN, 2000). O referido autor observa também um aumento no volume de granulação das escórias de alto-forno e a minimização da aplicação de escórias de aciaria LD em obras rodoviárias. HILTUNEN (2000), observa que para as escórias de aciaria, obtidas de diferentes processos, houve uma diminuição do uso como fertilizantes e do reaproveitamento nas próprias siderúrgicas.

Por conseguinte, a indicação de reaproveitamento dos agregados siderúrgicos como materiais de pavimentação na área de ferrovia, constitui uma solução técnica, rentável e também de sustentabilidade, pois o benefício ambiental será demonstrado por meio da utilização de materiais alternativos que proporcionarão uma redução no impacto referente à

extração de produtos britados em pedreiras que não possuem licenças ambientais de operação.

## 2.2 - O PROCESSO DE ACIARIA LD

A escória de aciaria oriunda do processo LD (Linz Donawitz) ou BOF (Basic Oxygen Furnace) constitui um subproduto da fabricação do aço em conversores a oxigênio, onde o ferro-liga é convertido em aço. O processo de refino do aço em conversores a oxigênio tem como propósito diminuir 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).

O processo de conversor a oxigênio foi projetado em 1856 por Henry Bessemer. Contudo, os obstáculos para a obtenção de oxigênio puro em grandes quantidades inviabilizaram a sua prática naquela época. Por volta do ano 1938, Durrer e Schwarz começaram as primeiras experiências de sopro de oxigênio em conversores na superfície de metais fundidos. Na década de 40, na Suíça, Durrer e Hellbrugge aplicaram o sopro do oxigênio por meio de lanças refrigeradas. Dessa maneira um conversor piloto foi então desenvolvido em 1947 e as corridas que obtiveram êxito se processaram no ano de 1948 (MUNDIN, 1985).

Sequenciando os referidos projetos experimentais desenvolveram-se conversores em escala limitada de produção. Porém em novembro de 1952 entrou em funcionamento uma usina com suporte para produzir 250 mil toneladas/ano, com conversores de 35 toneladas, estabelecida em Linz, na Áustria, determinando o nascimento do processo LD. Em seguida, foi instalada a usina de Donawitz, entrando em operação no ano de 1953. Dessa maneira várias usinas foram implantadas em países das Américas, Ásia e Europa após a referida data.

MUNDIN (1985) relata que o processo LD - Linz-Durrer, atualmente designado como Linz-Donawitz, foi introduzido no Brasil e implantado no estado de Minas Gerais por meio da Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira, cuja aciaria LD da usina da cidade de João Monlevade entrou em operação em 1957. No ano de 1963 entraram em operação a usina da

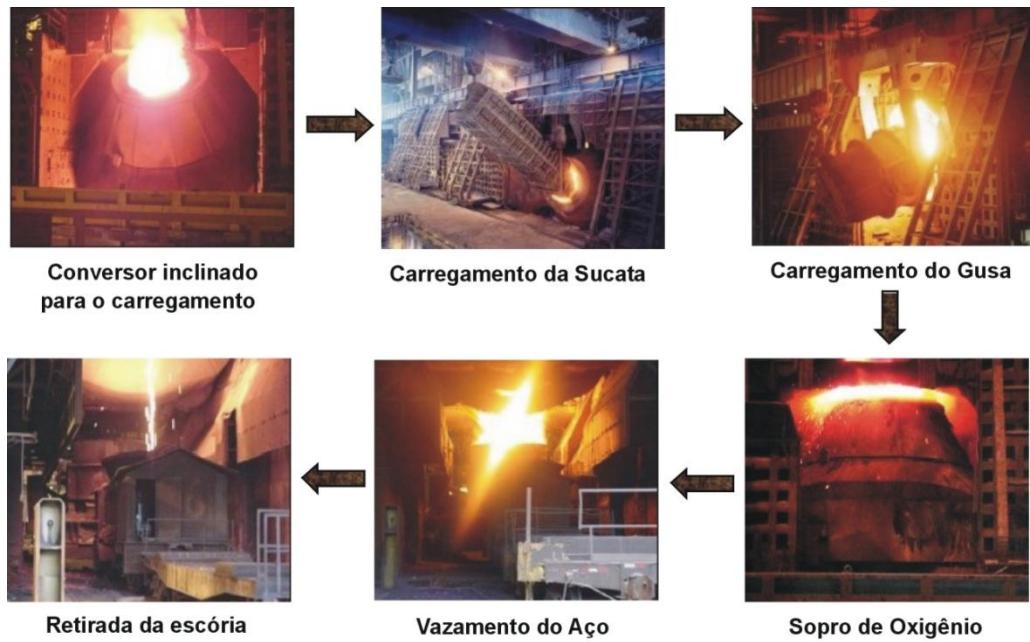
Companhia Siderúrgica Mannesmann, localizada em Belo Horizonte, e a usina Intendente Câmara, da USIMINAS, na cidade de Ipatinga.

Nos dias de hoje, majoritariamente a produção de aço no Brasil e no mundo é feita por meio do processo LD. MOORE e MARSHALL (1991) relatam que, neste processo não é preciso introduzir uma fonte de calor externa, pois a energia necessária é alcançada por meio da oxidação de diversos elementos, entre outros o carbono e silício.

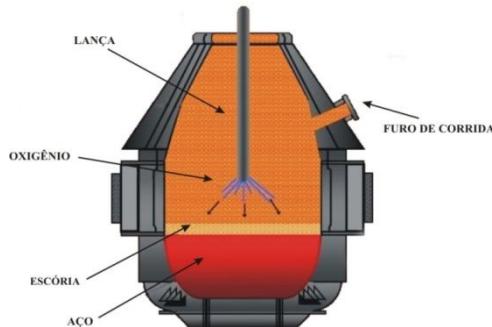
O processo LD para produção de aço tem início com a basculamento do conversor e carregamento com sucata sólida, posteriormente leva-se à posição vertical para a entrada da carga. Em sequência, é inclinado novamente para a entrada do gusa líquido. Após o carregamento, o conversor volta para a posição vertical e a lança é introduzida até a altura requerida, injetando-se o oxigênio a alta velocidade. Quando a fusão termina, faz-se o carregamento com a cal, por meio de um silo.

Em sequência ao sopro de oxigênio, que possui uma duração média de 20 minutos, o conversor é basculado para a posição horizontal, com o propósito de se realizar a coleta de amostras para análise. Com o término do processo, a escória se mantém sobrenadante ao aço, devido às diferenças de densidade entre estes dois materiais. Assim, o aço é vazado em uma panela, por meio do bico do conversor, e após esta operação, a escória é vazada em um carro-torpedo e levada até o pátio de deposição, local onde será lentamente umectada em um processo de resfriamento. A Figura 2.4 apresenta a seqüência operacional do processo de produção do aço em conversor LD e a Figura 2.5 ilustra em detalhe um conversor a oxigênio.

MUNDIN (1985) relata que as matérias-primas necessárias para a geração de aço pelo processo LD são o gusa líquido, gusa sólido, sucata de aço e de ferro fundido, minério de ferro, cal ou calcário, fundentes e oxigênio. MOORE e MARSHALL (1991) descrevem ainda que o gusa líquido representa a maior parte da carga metálica, correspondendo a mais de 80% desta carga, e ainda torna-se responsável pela entrada de calor no processo. Do mesmo modo que a sucata, que possui alto teor de ferro, é empregada como material refrigerante na carga do conversor LD, mantendo a temperatura do metal no final do sopro.



**Figura 2.4 – Seqüência de operação de um conversor a oxigênio.**



**Figura 2.5 – Detalhe de um conversor a oxigênio.**

MOORE e MARSHALL (1991) descrevem ainda que nos conversores LD as temperaturas de reação são bastante elevadas, o gusa líquido proveniente do alto-forno na temperatura de aproximadamente 1400°C é convertido a aço por volta dos 1650°C. Dessa maneira, o teor de carbono presente minimiza-se de 4,6% para 0,05%. O processo LD ainda oferece determinadas vantagens, como por exemplo, o tempo necessário para a transformação do gusa em aço é muito menor, proporcionando uma taxa de geração que pode chegar a 600 toneladas por hora. A intermitência entre os ciclos de produção podem ser menores do que 30 minutos. Este processo também proporciona uma economia de combustível, do mesmo modo que possibilita a fabricação de vários tipos de aços.

No referido processo, o minério de ferro possui como função apressar a dissolução da cal, quando adicionado no início do sopro e/ou agente refrigerante, quando adicionado no fim do sopro. Acrescenta-se a cal ao processo de fabricação do aço com o propósito de buscar o retardamento e a neutralização dos óxidos ácidos gerados nas reações de oxidação que podem investir contra o revestimento do forno pela escória. MUNDIN (1985) também relata que a cal é utilizada para a adequação do índice de basicidade ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ ), essencial para que haja uma eficiente dessulfuração e desfosforação do gusa líquido. É preciso que a dissolução da cal seja rápida, de maneira a conservar a trajetória de composição da escória em regiões de alta basicidade.

Conforme MUNDIN (1985), a cal dolomítica também é aplicada para a substituição de parte da cal calcítica (ou cárnea), buscando a minimização do desgaste dos refratários, entretanto, possui ação benéfica sobre a dissolução da cal. Frequentemente, utiliza-se de uma adição deste tipo de cal para obtenção de um teor de  $\text{MgO}$  na escória de fim de sopro na faixa de 6 a 10%.

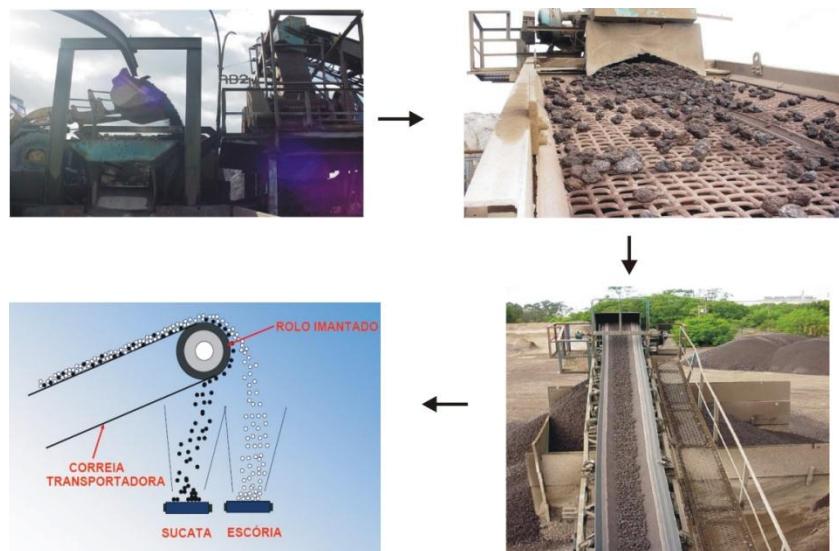
### 2.3 - A ESCÓRIA DE ACIARIA LD

A escória de aciaria, após transportada em carros-torpedo, é basculada em um pátio de deposição, ainda no estado líquido (Figura 2.6.a), para que possa ocorrer o resfriamento lento ao ar ou sob sprays de água, solidificando-se em forma cristalina. Sequenciando esta fase, o material resfriado é transportado para uma planta de beneficiamento (Figura 2.6.b), onde é realizada uma separação magnética.



**Figura 2.6 – (a) Basculamento e (b) Resfriamento da escória.**

Depois do resfriamento, a escória é levada para a planta de britagem, por um sistema de correias, e depois a uma peneira vibratória para fins de classificação granulométrica e de separação magnética (Figura 2.7).



**Figura 2.7 – Classificação e separação magnética (SOUZA, 2007).**

Esta separação magnética possibilita a fabricação de dois tipos de escória com três faixas granulométricas diferentes: escória in natura de 0 - 19mm e de 19 – 32mm e com granulometria superior a 32mm.

A fração metálica encontrada é fragmentada e separada por eletroímãs, peneirada e reciclada no próprio processo de produção do aço, como sucata. PIRET (1978) ressalta que o percentual da fração metálica recuperada nas usinas siderúrgicas da Europa atinge 15%, valores próximos aos que são obtidos no Brasil.

O material não-metálico geralmente chamado de agregado siderúrgico é separado granulometricamente e estocado em pilhas no pátio de deposição (Figura 2.8), onde permanece usualmente, por um determinado tempo, denominado “cura”, antes de ser transportado para o destino final. O referido período é importante para permitir a hidratação dos óxidos expansivos presentes nas escórias. Normalmente, este agregado é utilizado em lastros ferroviários e pavimentação rodoviária, como sub-base, base ou como composição para o revestimento.



**Figura 2.8 – Classificação e separação magnética.**

## 2.4 - CARACTERÍSTICAS DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA LD

No processo de fabricação do aço em um conversor a oxigênio, a cal virgem e o oxigênio são utilizados para a eliminação dos elementos indesejáveis no aço, como o Carbono, Silício e Fósforo, dessa maneira, espera-se que a escória de aciaria tenha, em sua composição química, produtos resultantes da interação destes elementos escorificantes com os compostos que precisam ser retirados do ferro gusa e, eventualmente, também da sucata metálica, uma das matérias-prima na fabricação do aço. Assim, os produtos resultantes são os silicatos de cálcio e ferritas combinadas com óxidos de ferro fundido, alumínio, manganês, cálcio e magnésio (WITTENBORN, 1998; MACHADO, 2000; ROBINSON, 2000; PENA, 2004).

Esta composição e os teores destes componentes químicos presentes na escória de aciaria são bastante variáveis em função das diferentes características peculiares a cada processo de geração de diferentes tipos de aço em cada siderúrgica, justificando a heterogeneidade do material. Desse modo, a composição química da escória de aciaria é função da matéria-prima utilizada, da tecnologia de produção do aço, do próprio aço produzido, e até mesmo do revestimento do alto forno. (IHOBÉ, s.d.; AMARAL, 1999; MOTZ, GEISELER, 2001; SBRIGHI, BATTAGIN, 2002; PENA 2004).

Para a escória de aciaria do tipo LD (também chamada BOF), proveniente do processo de refino do aço por meio de convertedor a oxigênio, a composição química tem predominância de elementos como o CaO, o MgO, o FeO e o SiO<sub>2</sub>.

Ainda que a composição química da escória de aciaria LD seja reconhecidamente variável, a Tabela 2.2 foi elaborada com alguns dados de diferentes pesquisadores e regiões.

**Tabela 2.2 – Composições químicas da escória de aciaria LD.**

	Autor	CaO	CaO Livre	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	Fe Total
1	GEORGE & SORRENTINO, 1980	47	-	13	1	6	5	2	<0,1	25
2	MURPHY et al .1997	35	-	18	3,6	11,5	6,5	-	-	-
3	LITTLE & SETEPLA, 1999	36 - 46	-	11 - 15	0,8- 4	5- 12	-	-	-	14 - 22
4	GEISELER, 1999	48 - 54	-	11 - 18	1 - 4	1 - 4	1 - 4	-	-	14 - 19
5	MOTZ & GEISELER, 1998	45 - 55	-	12 - 18	< 3	< 3	< 5	< 2	-	18
6	MOTZ & GEISELER, 2001	42 - 50	-	12 - 15	< 3	5 - 8	< 5	< 2	-	15 - 20
7	IGUCHI et al . 2001	52	-	9	1,3	5	3,3	0,7	-	19,2
8	FILEV, 2002	44,3	-	13,8	1,5	6,4	5,3	-	0,07	17,5
9	GUMIERE, 2000	49,3	7,5	11,6	2,8	4,4	4,5	1,30	0,29	23
10	SOUZA, 2007	43,8	4,55	8,03	2,36	1,68	4,95	1,43	0,09	36,86

As diferenças observadas na composição química das escórias de aciaria LD são causadas pelo tipo de fundente usado, que pode ser a cal virgem ou a dolomita. Este fator incide diretamente na quantidade de óxido de magnésio presente na escória de aciaria,

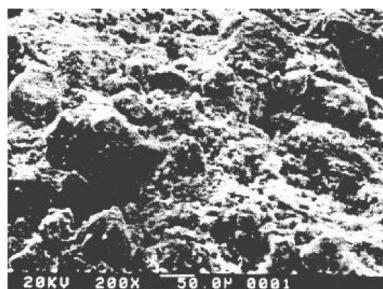
diferenciando-as em escórias de aciaria de baixo ou alto teor de MgO, segundo teores menores ou maiores que 5% (ALEXANDRE et al. s.d.; MOTZ, GEISELER, 2001; PENA 2004). Os itens 5 e 6 da Tabela 2.2 mostram um caso de composições químicas de escórias de aciaria de baixo e alto teores de MgO, respectivamente.

Do ponto de vista mineralógico a escória de aciaria LD possui na sua composição a predominância de: alita (silicato tricálcico - C<sub>3</sub>S); belita (ou larnita) (silicato dicálcico - C<sub>2</sub>S); belita ( $\beta$ ) (beta silicato dicálcico -  $\beta$ C<sub>2</sub>S); wustita (FeO); hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); periclásio (MgO); cal (CaO) e ferrita dicálcica (ALEXANDRE et al. s.d; MURPHY et al. 1997; GUMIERI et al. 2000; SHI, QIAN, 2000). Entre outras espécies químicas relacionadas na Tabela 2.3.

**Tabela 2.3 – Composição mineralógica da escória de aciaria LD.**

Fase Mineral	Fórmula	Ponto de Fusão
Silicato dicálcico - Larnita (b- C <sub>2</sub> S)	b - 2CaO.SiO <sub>2</sub>	2130
Silicato tricálcico (C <sub>3</sub> S)	3 CaO.SiO <sub>2</sub>	1900
Silicato de magnésio	b - 2MgO.SiO <sub>2</sub>	-
Ferrita dicálcica	2 CaO.Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1430
Mervinita	Ca <sub>3</sub> Mg(SiO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	-
Brown millerita	4CaO.Al <sub>2</sub> O.Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1410
Óxidos de alumínio e magnésio	MgO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-
Wüstita (óxido de ferro)	FeO	-
Periclásio (óxido de magnésio)	MgO	2800
Óxido de cálcio	CaO	2570

COOMARASAMY e WALZAK (1995) caracterizaram escórias LD fabricadas em Ontario, Canadá. A textura destes resíduos, obtida por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), está ilustrada na Figura 2.8. Os referidos autores concluíram que as superfícies das escórias eram constituídas essencialmente pelos elementos Ca e O, com concentrações variáveis de Si, Fe, Al, Mg e Mn, constatados por análise de EDX. Por meio da Figura 2.9 pode-se salientar que a escória apresenta uma textura rugosa. Esta textura rugosa também foi observada nas análises de GUTT (1972).



**Figura 2.9 – Análise microscópica de escória de aciaria LD – (MEV por elétrons secundários – ampliação de 200x)**

Usualmente, as escórias de aciaria LD exibem uma coloração cinza, sob aspecto visual. No que concerne às propriedades físicas, HAGA et al. (1981), HOLLIDAY (1997), KHAN e AL-ABDUL WAHHAB (1998) e MOTZ e GEISELER (2001) ressaltam que estas escórias tem uma massa específica maior em relação aos agregados de rochas naturais. Esta elevada massa específica está correlacionada ao alto teor de ferro contido nas escórias.

As pesquisas de LÓPEZ et al. (1989), HOLLIDAY (1997), MOTZ e GEISELER (2001), apontam que as escórias de aciaria possuem resistência mecânica bastante elevada à abrasão e ao choque. Como consequência da grande dureza, e também possuem boas propriedades anti-derrapantes, tornando-as adequadas ao uso em pavimentação.

Entretanto, vários autores como CRAWFORD e BURN (1969), EMERY (1978), ANDO (1978), PIRET (1978), HAGA et al. (1981), NOMURA e ENOKIDO (1981), MONTGOMERY e WANG (1991), COOMARASAMY e WALZAK (1995), PERA (1996), GOLDRING e JUCKES (1997), MOTZ e GEISELER (2001), entre outros, ressaltam as características expansivas destas escórias, causadas principalmente em função

da hidratação dos óxidos de cálcio livre e magnésio reativo em presença de umidade. Estes óxidos, contidos nestes resíduos, apresentam grande aumento de volume e posterior fragmentação, tornando difícil o uso destas escórias como materiais para pavimentação rodo-ferroviária.

## **2.5 – A EXPANSIBILIDADE DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA LD**

A utilização da escória de aciaria LD como agregado ou material para lastro ferroviário fica prejudicada em razão da possibilidade de expansão volumétrica. Estas reações expansivas ocorrem envolvendo certos compostos presentes na escória de aciaria, gerando tensões internas que originam trincas e até resultam na fragmentação do material, numa expansão destrutiva. Dentre estes compostos volumetricamente instáveis, o CaO e o MgO são os mais relevantes e maiores responsáveis pela desintegração e enfraquecimento por diferença de volume molar nas suas reações (ALEXANDRE et al. s.d; GEISELER e SCHLOSSER, 1988; MOTZ e GEISELER, 1998; GUMIERI et al. 2000; MACHADO, 2000; SAHAY et al. 2000; ÂNGULO et al. 2001).

O óxido de cálcio total se encontra em teores que variam de 39% a 50% nas escórias de aciaria, por isso se torna o maior responsável por sua expansibilidade, especialmente, a baixas idades. A procedência dos óxidos de cálcio e de magnésio nas escórias de aciaria está no final do processo do refino do aço, quando parte da cal e do óxido de magnésio presentes nas escórias se precipita, ao ultrapassar os limites de solubilidade das escórias fundidas. Isto se deve à elevada quantidade de cal que é adicionada nesta fase do processo para proteger o refratário (MAAS, 1984; TOSTICARELLI et al., 1985; MACHADO, 2000; FILEV, 2002; SBRIGHI e BATTAGIN, 2002).

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

### **2.5.1 – EXPANSÃO DEVIDO AO ÓXIDO DE CÁLCIO LIVRE**

O óxido de cálcio livre (CaO) presente nas escórias de aciaria LD ao se hidratar forma o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), cujo cristal tem maior volume. O processo de hidratação deste óxido ocorre de acordo com a equação (2.1)



As escórias de aciaria LD conservam uma parte da cal virgem utilizada para retirar e neutralizar os elementos fósforo, enxofre e silício no processo de refino de ferro-gusa para a fabricação de aço. O CaO apresenta-se nas formas livre ou combinada de silicatos ou ainda em solução sólida. A reação essencial a ser examinada nas escórias de aciaria LD é a de hidratação da cal livre, formando o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), tornando maior o volume molar em 99% e a superfície do cristal em 54% (WEAST, 1971; SBRIGHI e BATTAGIN, 2002). A cal livre é o composto que desenvolve a expansão mais significativa no material, e alcança teores de até 7% do total de CaO encontrado nas escórias de aciaria LD (GEISELER e SCHLÖSSER, 1988; MACHADO, 2000; SAHAY et al., 2000). Esta variação de volume, em alguns casos, leva à pulverização do material devido às tensões criadas pelas diferenças de volume molar (CINCOTTO, 1977; WEAST, 1971).

A cal livre pode se apresentar da forma residual ou precipitada, sendo que a cal livre residual se divide em esponjosa ( $6\mu\text{m}$  a  $50\mu\text{m}$ ) e granular ( $3\mu\text{m}$  a  $10\mu\text{m}$ ). No entanto, a cal livre precipitada se divide na cal agregada ao  $\text{C}_2\text{F}$  ( $< 4\mu\text{m}$ ) e na cal livre precipitada nos cristais de  $\text{C}_3\text{S}$  ( $< 4\mu\text{m}$ ). Ocorre, também, o CaO proveniente de fragmentos não dissolvidos que se hidratam facilmente (GEISELER e SCHLÖSSER, 1988; MACHADO, 2000; SAHAY et al., 2000). O processo de hidratação pode ocorrer para todos estes tipos de CaO, entretanto a hidratação mais expressiva é a da cal livre esponjosa, que é formada por grãos de tamanho até  $50\mu\text{m}$  (ALEXANDRE et al., s.d ; GEISELER e SCHLÖSSER, 1988). Esta expansão devido ao óxido de cálcio é influenciada por fatores como o teor e o tipo de CaO presente, a umidade, a temperatura e o tamanho dos grãos (GEYER, 2001).

A reatividade da cal livre também está vinculada a temperatura na qual ela é fabricada. No momento em que a cal é submetida a temperaturas menores que  $1000^\circ\text{C}$ , esta reage instantaneamente com a água, porém, se a cal for submetida a temperaturas maiores que  $1000^\circ\text{C}$ , esta leva um tempo maior para hidratar-se, pois formam-se cristais densos e compactos, que possuem menor superfície específica para reagir com a água (AMARAL, 1999).

Considera-se que o elevado teor de cal livre é o principal responsável pelo problema da expansão das escórias de aciaria, existem diversos estudos que visam limitar o seu teor como critério de classificação e aplicação das escórias. Estes estudos demonstram que, em teores menores que 7 %, a cal livre pode não ser prejudicial à durabilidade de pavimentos que aplicam a escória de aciaria LD. Entretanto, outras fontes não adotam esse critério, preferindo utilizar como limite de tolerância um teor de cal livre entre 4 e 5% (CONJEAUD, GEORGE e SORRENTINO, 1981; apud MONTGOMERY e WANG, 1991). Dessa maneira, o que se observa, é que as escórias de aciaria LD apresentam uma elevada instabilidade dimensional gerada, principalmente, por elevados teores de cal livre - acima de 5%.

A metodologia desenvolvida para indicar eficientemente o teor de CaO contido nas escórias de aciaria LD é o do etilenoglicol. No entanto tal método não diferencia a cal hidratada da cal livre, limitando sua utilização (GEISELER e MOTZ, 1998; MOTZ).

### **2.5.2 – EXPANSÃO DEVIDO AO ÓXIDO DE MAGNÉSIO**

A utilização de dolomita no processo de refino do aço é necessária para minimizar o desgaste do revestimento refratário do forno. Contudo esta adição promove a presença de MgO na escória de aciaria LD que, em contato com a umidade, hidrata-se lentamente conforme a equação (2.2).



Este óxido existe em três fases distintas: quimicamente combinado (monticelita, CaO.MgO.SiO<sub>2</sub>, e merwinita, 3CaO.MgO.SiO<sub>2</sub>); não-combinado ou livre ou reativo ou periclásio (MgO); e também em solução sólida, assim o teor total pode chegar a 10% nas escórias de aciaria LD (SHOUSUN, 1980).

De maneira usual, o óxido de magnésio presente na escória de aciaria LD se apresenta sob forma de soluções sólidas, compostas de óxido de ferro (FeO) e óxido de manganês (MnO) e denominadas magnésio-wustita, quando o MgO se mostra na forma livre (periclásio) é mais propício à expansão. O periclásio se origina quando ocorrem teores maiores que 3% de óxido de magnésio total na escória de aciaria LD, o que ocorre na maior parte das

siderúrgicas (GEISELER e SCHLÖSSER, 1988; MONTGOMERY e WANG, 1991). Esta reação expansiva de hidratação do MgO na forma de periclásio origina a brucita, ou hidróxido de magnésio ( $Mg(OH)_2$ ), um composto que tem variação de volume de cerca de 119,5% em relação ao MgO (WEAST, 1971; MACHADO, 2000; SBRIGHI e BATTAGIN, 2002).

O referido elemento apresenta uma grande instabilidade volumétrica, ao longo do período, mais extensa que a instabilidade causada pelo hidróxido de cálcio livre, uma vez que a hidratação do periclásio se processa de maneira mais lenta, devido ao fato de encontrar-se na forma cristalina. Dessa maneira, a água leva muito tempo para atuar e reagir sobre o cristal (semanas, meses ou anos, conforme o grau de cristalização) (WEAST, 1971).

Esta expansão correspondente ao MgO, da mesma maneira que ocorre com o CaO, sofre influência de diversos fatores como o teor e tipo da espécie na escória, a umidade, a temperatura, o teor de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e o tamanho dos grãos.

O grau de instabilidade volumétrica produzida varia de acordo com o tamanho dos cristais, que, se forem pequenos, hidratam-se mais rapidamente e não chegam a causar pressões internas. Por sua vez o tamanho destes cristais depende da velocidade de resfriamento do material. No caso de resfriamento lento, que é o caso mais comum, formam-se grandes cristais que se hidratam lentamente, causando grande expansão (AMARAL, 1999). Já a expansão em autoclave ocorre proporcionalmente com o aumento do tamanho das partículas de MgO. Dessa forma, quanto maior a partícula original do óxido, maior será o volume do hidróxido formado, gerando maior expansão (GEYER, 2001).

### **2.5.3 – EXPANSÃO DEVIDO A TRANSFORMAÇÃO ALOTRÓPICA DO SILICATO DICÁLCICO**

Um outro motivo que contribui para a expansão da escória de aciaria LD é a transformação alotrópica do silicato dicálcico ou ortosilicato de cálcio ( $2CaO \cdot SiO_2$  ou  $C_2S$ ), neste caso, acontecem modificações de volume significativas, sendo uma alteração que favorece o agravamento dos efeitos gerais da expansibilidade causada pelo CaO e pelo MgO (MACHADO, 2000).

O mineral mais encontrado na escória de aciaria LD solidificada é o C<sub>2</sub>S. Este composto se apresenta de quatro formas distintas, denominadas α, α', β e γ, exibindo uma mudança volumétrica associada às alterações de fase, derivadas do α - C<sub>2</sub>S (TOSTICARELLI et al. 1985; SBRIGHI; BATTAGIN, 2002).

No momento em que ocorre a transformação do α-C<sub>2</sub>S para o α'-C<sub>2</sub>S, acontece uma redução de volume da ordem de 8%, com o sistema cristalino modificando-se da forma trigonal para ortorrômbica. Quando a transformação é de α'-C<sub>2</sub>S para β-C<sub>2</sub>S, há um crescimento de volume de 1%, e o sistema cristalino altera-se para monoclínico. Na última transformação, do β-C<sub>2</sub>S em γ-C<sub>2</sub>S, ocorre um aumento de volume de 10,4%, com o sistema cristalino tornando-se ortorrômbico, reduzindo progressivamente a simetria molecular. Todavia, dependendo das condições de temperatura, pode haver a transformação direta da fase α' para a fase γ (MACHADO, 2000; SAHAY et al. 2000).

Dessa forma, constata-se que a transformação para a forma γ-C<sub>2</sub>S é a mais prejudicial para a estabilidade volumétrica da escória de aciaria LD, pois gera maior aumento de volume (MACHADO, 2000).

#### **2.5.4 – EXPANSÃO DEVIDO À OXIDAÇÃO DO FERRO METÁLICO**

O fenômeno da expansão das escórias de aciaria LD também pode estar relacionada com a oxidação e corrosão do alto teor de ferro metálico que fica retido no sopro ou no vazamento do aço líquido, ou seja, pequenas partículas metálicas são incorporadas durante o sopro de oxigênio ou mesmo durante o vazamento e permanecem presentes na composição da escória de aciaria LD, mesmo após todo o processo de separação magnética que ocorre nos pátios de beneficiamento das siderúrgicas.

Este metal, após os processos de corrosão e oxidação, inicialmente pode se apresentar sob a forma dos íons Fe<sup>+2</sup>, Fe<sup>+3</sup> (LEE e LEE, 1995). As reações essenciais de corrosão ou oxidação e a formação básica desses produtos de oxidação podem ser visualizadas nas equações da Tabela 2.4.

**Tabela 2.4 – Produtos originados a partir das reações de oxidação e corrosão do ferro metálico presente na escória de aciaria LD.**

Formação	Produto Formado
Reações de Oxidação	
$\text{Fe}^0 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{FeO}$	Wüstita
$2\text{Fe}^0 + 3/2\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$	Hematita
$3\text{Fe}^0 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$	Magnetita
Reações de corrosão	
$\text{Fe}^{2+} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$	Hidróxido ferroso
$4 \text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4 \text{Fe}(\text{OH})_3$	Hidróxido férrico

Os estados de oxidação e corrosão mais comumente encontrados são +2 (ferroso) e +3 (férrico). Entretanto, ocorrem compostos com números de oxidação fracionário, como o  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , que podem ser avaliados como combinação de dois estados de oxidação, como óxido de ferro II- ferro III ou  $[\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3]$ . No estado de oxidação +2, o ferro está com o íon  $\text{Fe}^{++}$ , sendo oxidado ao estado +3 pelo oxigênio atmosférico.

O desenvolvimento do processo de corrosão e oxidação do ferro metálico proporciona algumas transformações volumétricas na escória de aciaria LD pelas diferenças de volume molar dos produtos de oxidação e corrosão. Esta variação de volume molar pode originar uma expansão de 77 % a 329 % em relação à forma metálica ( $\text{Fe}^0$ ). O teor de ferro total na escória representa cerca de 15 % a 20 % da sua composição média (NÜRNBERG, 1981). Desse valor, 70 % nas escórias geradas em conversores LD (SHOUSUN, 1980) e 20 % a 35 % no processo EAF (LEE e LEE, 1995) se apresentam, essencialmente, na forma bivalente ( $\text{FeO}$ ). Esta concentração elevada de ferro propicia a formação da solução sólida com o Mg

ou com o Mn. No momento em que a razão MgO/(FeO + MnO) se torna menor que um, ocorre a predominância do Fe ou do Mn, o que produz um aumento nas dimensões e no espaçamento basal do cristal. Quando esta proporção atinge um valor maior que um, a fase RO, de periclásio ou do tipo periclásio ferroso, é volumetricamente instável. Contudo, quando a proporção é menor que um, forma-se também a wüstita, Mg-wüstita ou Mg-Mn-wüstita, que possui um comportamento estável, o que não ocorre de maneira majoritária nas escórias de aciaria LD.

## 2.6 – FATORES QUE CONTROLAM A EXPANSÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA

Observa-se na Tabela 2.5 os principais parâmetros que influenciam a expansão ou a estabilização da escória.

**Tabela 2.5 – Principais fatores que controlam a expansão da escória de aciaria LD.**

Espécies Químicas	Fatores que influenciam na expansão	Mecanismo
CaO e MgO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teor da espécie no estado livre</li> <li>• Umidade</li> <li>• Temperatura</li> <li>• Teor de CO<sub>2</sub></li> <li>• Tamanho dos grãos da escória</li> </ul>	Hidratação
Fe <sup>0</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teor de FeO</li> <li>• Umidade</li> <li>• Tempo de exposição ao ar</li> <li>• Teor de oxigênio no resfriamento</li> <li>• Tamanho dos grãos da escória</li> </ul>	Oxidação
C <sub>2</sub> S	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidade de resfriamento</li> <li>• Impurezas iônicas</li> <li>• Temperatura de resfriamento</li> <li>• Basicidade das escórias</li> </ul>	Transformação Alotrópica

## **2.7 - MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA EXPANSIBILIDADE DAS ESCÓRIAS**

Os métodos de maior relevância na quantificação da expansibilidade das escórias de aciaria LD, estão citados a seguir:

- norma japonesa JIS A 5015 - Escória siderúrgica para construção de estradas - Método de ensaio de dilatação em água (JAPAN INSTITUTE STANDARD, 1992);
- método de ensaio desenvolvido pelo Departamento de Transportes da Pensilvânia - PTM-130, e adaptado pelo DER/MG - Avaliação do potencial de expansão do agregado siderúrgico de escória de aciaria (DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES DA PENSILVANIA, 1982);
- método acelerado da norma européia BS EN 1744-1, descreve o ensaio de aceleração da hidratação dos óxidos expansivos por vapor (EUROPEAN STANDARD, 1998).

Pode-se empregar outras metodologias utilizadas para avaliar a expansibilidade em cimentos e agregados em escórias de aciaria LD:

- norma americana ASTM D 4792 (1995) - referente à avaliação da expansão de agregados;
- norma americana ASTM C 151 (1993) - referente à expansão de cimentos em autoclave;
- norma brasileira NBR 11582 (1991) - expansibilidade “Le Chatelier”, referente à expansibilidade do cimento;
- método acelerado NBRI (Sul-Africano) e normatizado como ASTM C 1260 (2001), referente à reação ácalis-agregados.

Além destas metodologias, JUCKES (1991), GEYER (2001), MASUERO (2001) e MANCIO (2001) descrevem outros métodos de ensaios utilizados para analisar a expansão das escórias, descritos a seguir:

- método belga, semelhante ao método PTM-130, no entanto, conduzido à temperatura de 80°C;
- método de avaliação da desagregação de barras de argamassas por ciclagem (molhagem e secagem);
- método JEGEL - análise petrográfica de agregados de escória após ensaiadas em autoclave;
- métodos de blocos Marshall – avalia a expansão de blocos de mistura asfáltica confeccionados com escórias.

No que se refere à análise e quantificação dos agentes expansivos das escórias, existe um consenso na literatura científica que a técnica de extração por meio de etilenoglicol é a mais utilizada e reconhecida como a mais eficiente para avaliação e quantificação do CaO<sub>livre</sub>. A norma brasileira ABNT NBR NM 13 (2004) que trata do teor de CaO<sub>livre</sub> em cimentos por meio de etilenoglicol. A norma européia EN 1744-1(1998) determina o teor de CaO<sub>livre</sub> em escórias pelos métodos de complexometria, conductometria e por acidimetria, sendo estes dois últimos alternativos.

Entretanto, estas metodologias não dissociam o Ca(OH)<sub>2</sub> do CaO<sub>livre</sub> total, avaliando a soma destas duas formas. A quantificação do Ca(OH)<sub>2</sub> pode ser feita por difração de raios-X quantitativa (QDRX), análise térmica diferencial (DTA) ou por termogravimetria (TG/DTG) (BIFFEN, 1956; EL-JAZAIRI e ILLSTON, 1977; MIDGLEY,1979; FORDHAM e SMALLEY, 1985; BHATTY, 1991).

A referida avaliação por DRX somente será possível se o Ca(OH)<sub>2</sub> apresentar-se na forma cristalina (MIDGLEY,1979). A análise por termogravimetria (TG) é mais precisa que a termodiferencial (DTA) por causa da influência do tamanho dos grãos da amostra na DTA, em função da diferença de temperatura existente entre a amostra e o termopar na DTA e à dificuldade de quantificação da área sob a curva da DTA (BIFFEN, 1956; JUCKES, 1991). Desta maneira, o método mais recomendado por diversos autores para quantificação do Ca(OH)<sub>2</sub> e do CaCO<sub>3</sub> é através de análises termogravimétricas TG e DTG (BIFFEN, 1956; JUCKES, 1991; DWECK et al., 2000).

As metodologias que buscam a determinação do MgO<sub>livre</sub> não são reportados na literatura. ARJUNAN e KUMAR (1994) propõem um método de determinação de MgO<sub>livre</sub> em clínquer por nitrato de amônio, no entanto, não se encontra na literatura científica corrente uma referência deste método. MOTZ e GEISELER (2001) ressaltam que não existe um método confiável para a determinação do MgO<sub>livre</sub>.

Nesse sentido, pode-se dizer que para escórias recém produzidas que não sofreram intemperismo e que apresentem baixos teores de MgO, o método de determinação do CaO<sub>livre</sub> pelo etilenoglicol pode ser empregado como critério para avaliação da instabilidade volumétrica (MOTZ e GEISELER, 2001).

## **2.8 – TRATAMENTOS UTILIZADOS PARA A ESTABILIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA LD**

As escórias de aciaria LD que serão utilizadas de alguma maneira no setor produtivo, devem receber um tipo de tratamento que proporcione a estabilização dos óxidos expansivos por meio de um período de estabilização química ou cura, nestas escórias na forma sólida, ou também por meio de tratamento de escórias líquidas, modificando-se o processo de resfriamento aplicado nas escórias ou ainda adicionando-se agentes redutores e estabilizantes, visando a estabilização e a melhoria das propriedades das escórias estudadas (FERNANDES, 2007).

### **2.8.1 – ALTERAÇÕES NO PROCESSO DE ESCÓRIFICAÇÃO**

Como mencionado em itens anteriores, no processo de fabricação do aço, a cal virgem e o oxigênio são utilizados para a eliminação de impurezas contidas no ferro gusa e na sucata metálica. A dolomita também é adicionada para a proteção do revestimento refratário do forno. Dessa forma, as propriedades da escória de aciaria LD dependem das características destes materiais que, quando adicionados ao ferro, formam o aço e a escória de aciaria LD (FEDOTOV et al. 1997; MACHADO, 2000; SBRIGHI e BATTAGIN, 2002).

Analizando este fato, surgiu a proposta de uma eventual mudança nas características dos materiais fundentes para alterações controladas na escória de aciaria resultante. O agente formador da escória de aciaria deve, contudo, continuar a cumprir sua função sem prejuízos

no aço fabricado, formando a escória de aciaria adequadamente. Uma possibilidade é a redução da granulometria da cal ou da dolomita adicionada no convertedor para maior dissolução e a completa reação, minimizando os efeitos do CaO e MgO deletérios na escória de aciaria (TOSTICARELLI et al. 1985; GEYER, 2001).

Em uma outra possibilidade, um material sintético foi proposto, constituído de CaO, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, em proporções específicas, e adicionado ao ferro líquido no convertedor, no início do refino. O objetivo é inibir a instabilidade dimensional, devido à cal livre, melhorando também propriedades hidráulicas (GEORGE e SORRENTINO, 1980).

Com esta proposta é esperada uma redução do teor de CaO<sub>livre</sub> de valores de 5% a 15%, para 1% a 3%, nesse sentido ocorreria também uma redução na expansão a baixas idades, devido a redução do teor de CaO<sub>livre</sub> (FERNANDES, 2007). No entanto, não há alteração no teor de MgO, responsável pela expansão a idades mais avançadas.

### **2.8.2 – TRATAMENTO POR ENVELHECIMENTO OU “CURA” DAS ESCÓRIAS**

De maneira geral, após o resfriamento lento das escórias de aciaria LD, estes materiais são transportados por vagões ferroviários para uma planta de beneficiamento, onde ocorre a britagem e a separação magnética. As frações metálicas (sucatas) são reaproveitadas nas siderúrgicas e as escórias (frações não-metálicas) são separadas granulometricamente. Depois do processo de separação, a escória já britada em diversas granulometrias, é estocada separadamente em pilhas expostas ao ar livre, nesta etapa, é interessante que passem por um processo de ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA ou “cura”, por meio de intemperismo, por um período de tempo que permita a hidratação e estabilização dos óxidos expansivos (DAIDO STEEL, 1993; IBS, 1995).

No Brasil, o antigo DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagem e atual DNIT – Departamento de Infra-Estrutura de Transporte, indica que o tempo de exposição na atmosfera e a intempéries destes resíduos deve ser de no mínimo 6 meses. Em seguida, os referidos lotes devem ser amostrados e as escórias devem ser analisadas com relação às características expansivas, considerando os respectivos campos de aplicação destes

materiais. Em caso de algum lote não estiver em conformidade com o critério de expansibilidade para a aplicação prevista, este deverá voltar para o pátio de estocagem e continuar o processo de tratamento até que tenha decorrido um período adicional de mais alguns meses, em seguida deverá ser re-amostrado e re-ensaiado. De acordo com o DNIT, estes lotes de estocagem devem ter uma forma tronco-cônica, com a menor altura e maior área possíveis, buscando a melhor condição para a hidratação e menor segregação do material (BRASIL,1988).

Em conformidade com a literatura consultada o período de cura pode variar de 3 a 12 meses, sendo 6 meses o período mais citado pela maioria dos autores (ALEXANDRE e RAGUIN, 1984; BRASIL,1988; JIS A 5015, 1992; DAIDO STEEL, 1993; KNELLER, 1994; IBS, 1995; FARRAND e EMERY, 1995). No entanto, o essencial é que no período de cura ocorra a hidratação dos óxidos expansivos, assegurando a estabilização das escórias de aciaria LD de acordo com seu destino e aplicação. O referido período está correlacionado aos teores de óxidos não-reagidos, às características físicas e químicas de cada tipo de escória, bem como às características geométricas das pilhas de estocagem e das condições ambientais de cada local onde o tratamento ocorre.

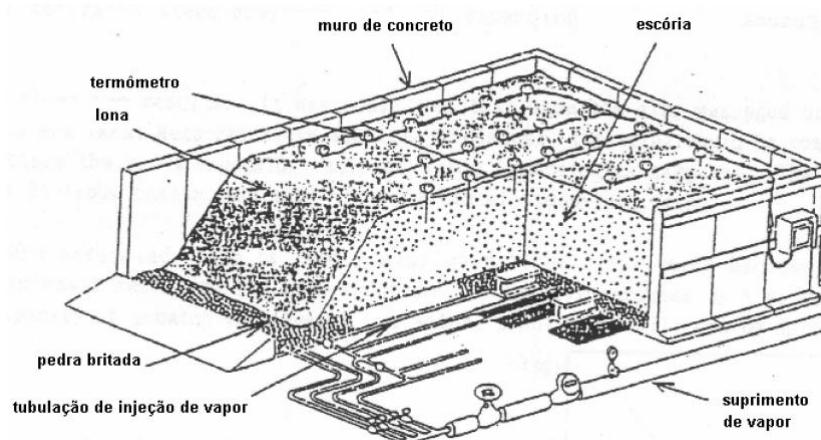
No Japão, as escórias de aciaria LD precisam ser curadas ao ar livre pelo período mínimo de 6 meses e a expansão obtida segundo a norma JIS A 5015 (1992) não deve exceder a 1,5%, quando a escória é utilizada como agregado em pavimentos. GUTT e NIXON (1972) e KOBE STEEL (1977) observaram a desintegração de escórias que continham CaO<sub>livre</sub>, expostas ao ambiente natural durante 6 meses.

Este último autor correlaciona a desintegração de escórias LD com o tamanho dos grãos e o teor de CaO<sub>livre</sub> presente nas escórias. Os resultados da pesquisa indicaram maior desintegração para amostras com maior tamanho de grãos e maiores teores de CaO<sub>livre</sub>. Para teores inferiores a 3% quase não se detectou desintegração.

THOMAS (1978) também ressalta a importância do tratamento das escórias de aciaria. Em amostras de escórias LD o teor de 7,1% de CaO<sub>livre</sub> não hidratado reduziu-se para 4,1% após cura ao ar durante 9 meses, sendo a diferença transformada em Ca(OH)<sub>2</sub>. Segundo este autor, a hidratação do CaO<sub>livre</sub> é mais eficiente nos primeiros meses de tratamento.

FARRAND e EMERY (1995) indicam que a simples operação de separar as escórias de aciaria de eventuais materiais contaminantes, tais como pedaços de refratários ou de cal, nos pátios de estocagem das siderúrgicas, reduz consideravelmente a expansão das escórias.

Na Alemanha e no Japão, algumas indústrias siderúrgicas empregam o tratamento a vapor para acelerar as reações de hidratação das escórias de aciaria. O vapor pode minimizar rapidamente a expansão em uma escória nova e também estabilizar a expansão residual em escórias envelhecidas. Para esse tipo de tratamento, chamado “open yard” tem-se a Figura 2.10, que ilustra melhor o processo empregado para cura a vapor de escória de aciaria LD. O tempo de estabilização pode ser reduzido de meses para apenas alguns dias, ou até mesmo horas (IBS, 1995; GEISELER, 1999; MOTZ e GEISELER, 2001).



**Figura 2.10 – Exemplo de processo de cura a vapor sob pressão atmosférica de escória de aaciaria LD.**

YUJI (1986) analisou os efeitos de escórias de aaciaria LD tratadas sob diferentes pressões de vapor e tempos aplicados, a fim de facilitar a rápida e completa hidratação do CaO<sub>livre</sub>. Para baixas taxas de pressão e tempo, YUJI (1986) verificou a presença de partículas irregulares e de forma arredondada de Ca(OH)<sub>2</sub>. Com o aumento destas taxas, ocorre o aumento do tamanho do cristal de Ca(OH)<sub>2</sub>, adquirindo gradativamente a forma hexagonal regular. A condição ótima para o tratamento a vapor das escórias analisadas por YUJI (1986) compreendia em utilizar uma pressão de 1 a 3 atm de vapor saturado, por um período de 1 a 3 horas. A Figura 2.11, apresenta uma autoclave desenvolvida no Japão para o tratamento a vapor de escória.



**Figura 2.11 – Autoclave desenvolvida no Japão para tratamento a vapor da escória de aciaria LD.**

INOUE e SUITO (1995) e MOTZ e GEISELER (2001) também citam referência à umectação periódica das pilhas de escórias por meio de um sistema de aspersão, e ao método de vapor como maneira de acelerar a hidratação dos óxidos CaO e MgO. No método a vapor a taxa de crescimento da expansão por causa das reações expansivas aumenta para as primeiras horas de hidratação e após certo tempo tende a se estabilizar. Para escórias LD com teores de MgO menores que 5%, apenas 24 horas de vapor são necessárias para estabilizar a expansão, ao passo que, para escórias LD com teores de MgO acima de 5% e para escórias de aciaria elétrica, é preciso 168 horas para que se atinja a estabilização. Entretanto, para MOTZ e GEISELER (2001), o tipo de tratamento empregado varia de acordo com as especificações referentes à instabilidade volumétrica das escórias, as quais são diferentes, dependendo do tipo de aplicação do material.

### **2.8.3 – TRATAMENTO DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA LD NA FASE LÍQUIDA**

As propriedades das escórias siderúrgicas modificam-se conforme o processo de resfriamento a que são submetidas. Essencialmente, são empregados três processos de resfriamento das escórias: resfriamento lento ao ar, resfriamento por pelotização e resfriamento brusco com água ou granulada (BRASIL, 1988; IBS, 1995).

No processo de resfriamento lento ao ar a escória líquida é vertida no pátio de resfriamento, no qual naturalmente se solidifica na forma cristalina. No momento em que a sua temperatura atinge aproximadamente 600°C pode-se intensificar o resfriamento final

mediante jatos de baixa vazão de água. Após solidificada, a escória é fragmentada e levada para a planta de beneficiamento, onde ocorre a britagem e a separação magnética.

As escórias de aciaria LD resfriadas ao ar usualmente apresentam coloração cinza escura, têm maior densidade, resistência mecânica e maior coeficiente de atrito em relação às escórias de alto-forno. Dessa forma, apresentam normalmente uma boa resistência ao desgaste e ao polimento, tornando-as adequadas ao uso como agregados em rodovias e ferrovias. Geralmente, é utilizado o resfriamento lento ao ar nas escórias de aciaria.

O processo de pelotização consiste no resfriamento rápido da escória pela aplicação de uma quantidade controlada de água ou vapor. A escória líquida chega por um cilindro dentado giratório, sendo então refrigerada por jatos de água. De maneira geral, a escória possui conformação esférica, apresentando estrutura alveolar no seu interior, devido à incorporação de gases durante o resfriamento, tornando sua densidade menor em relação à escória resfriada lentamente ao ar. A escória resfriada por este processo é conhecida como escória expandida.

No processo de resfriamento brusco, a escória líquida é fragmentada por jatos de água com alta vazão e pressão. O choque entre a escória e a água provoca o resfriamento brusco. Nestas condições, a escória normalmente se solidifica na forma vítreia, apresentando estrutura amorfa. As escórias resfriadas por este processo são conhecidas como escórias granuladas. Geralmente possuem baixa densidade e boas propriedades hidráulicas quando hidratadas. O objetivo desse tratamento é desorganizar a microestrutura do material, tornando-a amorfa, permitindo assim uma maior atividade hidráulica e consequente redução da expansibilidade (MURPHY et al, 1997; MASUERO et al, 2000).

No resfriamento brusco, causado pela granulação, não há tempo suficiente para que os óxidos se cristalizem, havendo a formação de uma estrutura vítreia, o que inibe o problema da expansão. Isto não acontece no resfriamento lento, quando ocorre a cristalização dos óxidos, o que resulta em problemas quanto à expansibilidade.

TAKASHIMA et al. (1981) expuseram no Japão uma metodologia de resfriamento instantâneo de escórias LD. Neste processo as escórias líquidas são vertidas em caixas, ao

invés de pátios, onde em seguida aplica-se um resfriamento primário por meio de jatos de água. Estas caixas são, então, inclinadas e as escórias, na temperatura de aproximadamente 500°C, são descarregadas em um britador.

Logo após essa britagem, ocorre um resfriamento secundário com jatos de água. Depois desta fase, as escórias são descarregadas em valas imersas de água, onde passam por um terceiro resfriamento até atingirem 65°C. Por fim, são transportadas ao pátio de separação magnética.

TAKASHIMA et al. (1981) ressaltam que esta metodologia apresenta algumas vantagens em relação ao processo convencional de resfriamento lento, como por exemplo, a rapidez com que pode ser executado, menor área de estocagem das escórias na etapa de resfriamento, minimização da geração de pós poluentes, maior facilidade de britagem e recuperação da fração metálica por causa da fragmentação das escórias no resfriamento primário, maior segurança devido ao controle da vazão dos jatos de resfriamento e devido à baixa espessura da camada de escória resfriada na caixa, impedindo assim, a concentração de vapores e o risco de explosão. No entanto, estes autores não descrevem as características das escórias granuladas por este processo.

Um outro tratamento que pode ser empregado é a adição de sílica e oxigênio à escória de aciaria, exigindo-se uma fonte de calor para que a escória permaneça líquida e a sílica reaja dissolvendo-se. O preceito deste método está na neutralização do CaO<sub>livre</sub> por meio de sua combinação com a sílica, como observado na equação 2.3, o que minimiza a relação CaO/SiO<sub>2</sub>. A fonte de calor exigida pode vir da reação exotérmica de oxidação do FeO, que transforma-se em Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Eq. 2.4), um outro composto que pode combinar-se com o CaO, como observado na equação 2.5 (FEDOTOV et al. 1997; GEISELER et al. 1999; MOTZ e GEISELER, 1998; KUEHN et al. 2000; MOTZ e GEISELER, 2001).



Logo em seguida ao basculamento da escória de aciaria no pote, este é transferido para um pátio onde ocorre este processamento. Primeiramente o oxigênio é soprado, depois é acrescentada a fonte de sílica mantendo-se o sopro, para que ajude na mistura entre a fonte de sílica e a escória, quando a viscosidade da escória diminui (KUEHN et al. 2000).

Neste processo a escória é submetida a transformações microestruturais. Em sua forma original, sem o tratamento, a escória possui uma estrutura que apresenta cristais longos e escuros de  $C_3S$  envolvidos numa matriz brilhosa de ferritas ( $C_2F$ ) e wustitas ( $FeO_x$ ), quando da observação de seção polida ao microscópio eletrônico. O  $CaO_{livre}$  pode ser observado na superfície áspera e irregular dos cristais. No caso da escória de aciaria submetida ao tratamento de adição de sílica e oxigênio, pode-se observar uma estrutura mais uniforme, onde o  $C_3S$  que restou apresenta-se numa forma mais homogênea, já reagido com a sílica adicionada no tratamento, e a maioria dos cristais de  $C_3S$  foi convertida em  $C_2S$ . Nestas condições, o  $CaO_{livre}$  é completamente dissolvido, evidenciando o benefício principal do tratamento realizado (KUEHN et al. 2000).

MOTZ e GEISELER (2001) testaram a utilização de areia seca como fonte de sílica para o reprocessamento da escória de aciaria LD, obtendo, posteriormente, teores inferiores a 1% de cal livre e não observaram uma expansão já tardia da escória de aciaria. Entretanto SHOUSUN (1980) utilizou a escória granulada de alto forno ou cinzas volantes como outras possibilidades de fontes de sílica para a realização deste tratamento.

KUEHN et al. (2000) ressalta que este processo de tratamento foi desenvolvido pelo Thyssen Krupp Stahl AG e pela FehS, na Alemanha e está sendo utilizado atualmente, produzindo, aproximadamente, 12.000 t de escória de aciaria LD tratada por mês, sem influência negativa na qualidade do aço produzido ou na produtividade. Além disto, a escória de aciaria LD resultante obteve teores inferiores a 2% de  $CaO_{livre}$ , com excelente desempenho quanto à expansibilidade na utilização em pavimentação.

A Tabela 2.6 apresenta um resumo com diversas informações relevantes a respeito das diferentes metodologias de tratamento que devem ser empregados para a minimização da expansibilidade da escória de aciaria LD.

**Tabela 2.6 – Resumo sobre as metodologias de tratamento (SILVA modificado, 2001).**

Tratamento	Descrição	Momento de Atuação	Pontos Fortes	Pontos Fracos	Eficiência Relativa
Aumento da dissolução dos fundentes	Redução da granulometria da cal/dolomita	Antes da geração	Baixo custo	ND	ND
Alteração do agente escorificante	Utilização de um material sintético como fundente	Antes da geração	Aumenta a atividade hidráulica da escória	Não altera o teor de MgO Livre	Baixa
Adição de sílica e oxigênio	Adição de sílica e oxigênio à escória líquida com uma fonte de calor	Após a geração com a escória no estado líquido	Redução dos teores de CaO e MgO livres para abaixo de 1%	Alto custo	Média
Granulação com água	Resfriamento brusco com água	Após a geração com a escória no estado líquido	Aumenta a atividade hidráulica da escória	Alteração da granulometria; É preciso secagem; Problemas ambientais; Friabilidade	Alta
Granulação a seco	Resfriamento brusco a seco	Após a geração com a escória no estado líquido	Aumenta a atividade hidráulica da escória; Mais simples que a granulação com água	Alteração da granulometria; Friabilidade da escória	Alta
Cura ao tempo (weathering)	Exposição ao tempo – ocasionalmente com molhagem	Após a geração com a escória no estado sólido	Baixo custo e simplicidade	Demorado; Falta de definição metodológica; heterogeneidade	Variável
Cura a vapor sob pressão atmosférica (open yard)	Injeção de vapor à escória sem pressão	Após a geração com a escória no estado sólido	Redução considerável dos teores de Cao e MgO livres	Alto custo, principalmente se não há rede de vapor disponível	Alta
Cura a vapor sob pressão (SKAP)	Injeção de vapor à escória em autoclave	Após a geração com a escória no estado sólido	Redução considerável dos teores de Cao e MgO livres	Alto custo	Muito alta

ND = Não divulgado.

## **2.9 – UTILIZAÇÃO DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA LD**

A utilização de escórias de aciaria está totalmente condicionada às características físicas, mecânicas, químicas, ambientais e mineralógicas que estes materiais apresentam. Além disso, exibem como fator limitante ao uso o problema da expansibilidade. Entretanto, o reaproveitamento destes resíduos precisa estar balizado por pesquisas e regulamentações que venham a monitorar e minimizar este fenômeno, buscando dessa maneira a adequação e a aplicação dos mesmos de acordo com suas características e propriedades.

Ao todo diversas pesquisas foram desenvolvidas nas décadas de 70, 80 e 90 com o objetivo principal de analisar o emprego das escórias de aciaria LD em estradas e pavimentação. A maior parte das escórias de aciaria é aplicada na forma de agregados, na estabilização de solos, em lastros de ferrovias, contenções executadas com gabiões e enrocamentos, construção de bases, sub-bases e revestimento asfáltico de rodoviárias, bem como materiais para aterros e obras hidráulicas. Vários autores, entre eles, GUTT (1972), KOBE STEEL (1977), EMERY (1978), PIRET (1978), ANDO (1978), NOMURA e ENOKIDO (1981), HAGA et al. (1981) e HOLLIDAY (1997), avaliaram o emprego das escórias de aciaria nestes tipos de obras.

Em alguns países como a Inglaterra, Alemanha, França, Japão, Rússia e Estados Unidos já existem normalizações a respeito do uso de escórias siderúrgicas (BRASIL, 1988). Países como o Japão, Canadá, Austrália e alguns países da Europa já exibem consideráveis índices de aproveitamento das escórias de aciaria em obras de engenharia, principalmente na área de pavimentação (MOTZ e GEISELER, 2001). No Brasil, os índices são relativamente baixos em obras de engenharia, considerando-se que mais da metade do volume total de escórias de aciaria geradas são utilizadas para a fabricação de cimento (IAB, 2009).

HILTUNEN (2000) ressalta que ultimamente, o índice de reaproveitamento de escórias de aciaria nas próprias siderúrgicas tem diminuído, assim como o uso em pavimentação, como agregado para lastro ferroviário e como fertilizante também tem sido reduzido. Por outro lado, o número de trabalhos e pesquisas enfocando o uso de escórias de aciaria na construção civil tem crescido cada vez mais. Estes estudos visam principalmente o uso das escórias em concretos, seja na forma de agregados, adições, clínquer ou como matéria-

prima na fabricação de cimentos. Alguns trabalhos, tais como os apresentados por MONTGOMERY e WANG (1991), MURPHY et al. (1995), entre outros autores, avaliaram o uso das escórias de aciaria nesta área.

No Brasil, muitos estudos têm sido desenvolvidos pelas universidades, em parceria com algumas siderúrgicas nacionais, visando o uso de escórias de aciaria LD no setor da construção civil, em pavimentação e como agregado para lastro ferroviário. Os resultados são expostos nos trabalhos de LOUZADA (1991), GEYER (2001), MACHADO (2000), MASUERO (2001), MANCIO (2001), FERNANDES (2005), MARÇAL (2007) entre vários outros.

O tratamento empregado na estabilização e na melhoria das propriedades das escórias deve ser escolhido em função do tipo de aplicação, viabilizando, assim, sua utilização de forma mais apropriada.

### **2.9.1 – UTILIZAÇÃO NA AGRICULTURA**

As escórias de aciaria básicas e ricas em  $P_2O_5$ , possuem boas propriedades para o uso em fertilizantes à base de fosfatos ou aditivo no cultivo de plantas ou algas. Contudo, a presença de álcalis e de Chumbo (Pb) tem reduzido a sua aplicação devido a problemas com toxicidade.

A composição química das escórias utilizadas como fertilizante muitas vezes precisam ser ajustadas para atender os requisitos de fabricação de fertilizantes tipo Ca-Mg, cujo principal requisito é a quantidade de CaO (DZIARMAGOWSKI et al., 1992). Na composição química da escória de aciaria, usualmente existem elementos essenciais para o cultivo de algas, tais como o P, Si, Fe e Mn.

Na França, ALEXANDRE e RAGUIN (1984) citam a comercialização de escórias de aciaria para uso como fertilizantes e corretivo de solos para agricultura. Estes autores recomendam o teor mínimo de 12% para  $P_2O_5$  quando as escórias básicas são usadas para estas finalidades. No geral, as escórias LD apresentam teores de  $P_2O_5$  inferiores a 12%.

HIRANO (1984) ressalta que escórias de aciaria ricas em CaO e MgO são utilizadas no Japão como corretivos de solos ácidos. O ferro, o fósforo e uma variedade de minerais contidos nas escórias possuem efeitos favoráveis na agricultura. Durante o ano de 1981, na extinta União Soviética, 0,4 milhões de toneladas de fertilizantes foram comercializados com escórias de aciaria (GROMOV, 1984).

Já na Finlândia, cerca de 4% da produção de escórias LD foram utilizadas na fabricação de fertilizantes durante o ano de 1998 (HILTUNEN, 2000).

PIRET (1978) cita que na Alemanha, no ano de 1974, foram utilizadas 300 mil toneladas de escórias LD empregadas como corretivo de solos para agricultura. Os fertilizantes podem ser fabricados a partir de misturas de escórias LD moídas e fosfatos quimicamente tratados e solúveis no solo. YAN et al. (2000) ressaltam que a hidratação das principais fases presentes nas escórias de aciaria LD possui papel relevante para o processo de neutralização dos solos ácidos.

NAKAMURA et al. (1998) obtiveram resultados favoráveis com o uso de escórias de aciaria como nutrientes em culturas de algas marinhas.

### **2.9.2 – UTILIZAÇÃO EM CIMENTOS**

Uma alternativa viável para o emprego das escórias de aciaria LD é a aplicação como matéria-prima para o cimento Portland. As escórias de aciaria apresentam potencial para serem empregadas como materiais cimentantes, diminuindo, desta forma, o consumo de energia na obtenção do clínquer utilizado na fabricação dos cimentos.

Pesquisas nas décadas de 70 e 80, realizadas por GUTT e NIXON (1972) e DAUBE (1982), indicaram que o cimento com adição de escórias LD resfriadas lentamente ao ar apresentavam resistência à compressão inferior à dos cimentos Portland. Como exemplo, DAUBE (1982) cita que a substituição de 15% de cimento por escória reduziu a resistência à compressão em 18%, para argamassas com idade de 7 dias. Para estes autores a menor resistência está relacionada aos menores teores de  $C_3S$  nas escórias e também ao fato dos silicatos presentes nas escórias apresentarem-se não-hidráulicos.

CONJEAUD et al. (1981) relatam que as escórias LD, de maneira geral, exibem pequena atividade hidráulica, devido à lenta hidratação do  $\beta\text{C}_2\text{S}$  e também pelo fato do  $\text{C}_2\text{F}$  ser considerado inerte nestes resíduos. CONJEAUD et al. (1981) sugerem a incorporação de 6% a 15% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nas escórias LD, contribuindo para a transformação do  $\text{C}_2\text{F}$  em  $\text{C}_4\text{AF}$  e proporcionando, desta forma, maior hidraulicidade às mesmas. Os referidos autores consideram que a atividade hidráulica das escórias cresce com o aumento da relação  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Os autores ressaltam que as escórias tratadas com alumínio podem apresentar maior reatividade nas primeiras idades em relação às escórias de alto-forno.

Na Austrália, MONTGOMERY e WANG (1991) ressaltam a utilização combinada da escória LD com a escória de alto-forno e clínquer, na fabricação de cimento composto. MONTGOMERY e WANG (1991) descrevem que o  $\text{CaO}_{\text{livre}}$  nas escórias LD pode ser absorvido pelas escórias de alto-forno, reduzindo, desta forma, a instabilidade das mesmas. O excesso de CaO da escória LD pode interagir com as propriedades hidráulicas da escória de alto-forno, agindo como um ativador.

Para a produção de cimento composto, MONTGOMERY e WANG (1991) relatam que a proporção de escória de aciaria LD deve ser entre 10 e 55% em relação à massa total dos materiais (escória de alto-forno, clínquer e gesso) que constituem o cimento. A resistência do cimento composto é similar à do cimento comum, quando a quantidade de escória LD utilizada for no máximo 35% e a quantidade de clínquer for superior a 55% da massa total dos materiais empregados. Estes autores também observaram que a resistência deste cimento decresce aproximadamente 5% para cada 10% de redução na quantidade de clínquer, quando este último é utilizado em proporções abaixo de 55%.

ANDO (1978) e DONGXUE et al. (1997) observaram que as propriedades hidráulicas crescem com o aumento da finura das escórias. Segundo LEA (1970), o crescimento das propriedades cimentícias de um cimento por meio do aumento da finura ocorre pelo aumento da superfície específica deste, cobrindo melhor os grãos dos agregados inertes e aumentando o contato entre os grãos, e também pelo aumento da taxa de hidratação do cimento com a água.

Na China, DONGXUE et al. (1997) e SHI e QIAN (2000) relatam que cimentos já são fabricados comercialmente com escórias de aciaria LD de resfriamento lento. SHI e QIAN (2000) citam que aproximadamente 40% do volume total de escórias de aciaria LD na China são usados na produção de cimento.

### **2.9.3 – UTILIZAÇÃO EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**

Uma das principais aplicações das escórias de aciaria LD têm sido na forma de agregados em estradas e pavimentação. Entre as vantagens que estes materiais demonstram com relação aos agregados convencionais, tornando-os competitivos ao uso em rodovias, pode-se citar: o menor custo, uma vez que não requerem custos para desmontes; maior resistência ao derrapamento, ao desgaste e à abrasão; maior coeficiente de atrito; maior densidade, reduzindo desta forma a espessura das camadas de pavimentos; forma cúbica dos grãos; textura rugosa, conferindo melhor adesividade às misturas asfálticas (GUTT, 1972; GUTT e NIXON, 1972; THOMAS, 1978; PIRET, 1978; HAGA et al., 1981; ALEXANDRE e RAGUIN, 1984; BRASIL, 1988, LOPEZ et al., 1989; HOLLIDAY, 1997).

Na Bélgica, PIRET (1978) observou misturas de escórias LD com escórias de alto-forno e cinzas volantes, empregadas em camadas de pavimentos. As proporções utilizadas foram 75% de escórias LD e 25% de escórias de alto-forno ou cinzas, em massa, adicionadas aos aglomerantes cal ou cimento. As misturas de escórias de aciaria LD e cinzas demonstraram CBR da ordem de 100%, quando adicionadas à cal ou cimento. As misturas de escórias LD com escórias de alto-forno apresentaram CBR em torno de 90%.

No Canadá, as escórias de aciaria LD foram utilizadas em Ontario, como agregados em misturas asfálticas. As escórias ensaiadas apresentaram excelentes qualidades quando avaliadas em diversos testes, o que estimulou a aplicação em pavimentos (EMERY, 1978). Entretanto, em 1991, o Ministério dos Transportes de Ontario impediu o uso destes resíduos em obras de pavimentação devido às fissuras de caráter expansivo evidenciadas em diversos trechos das obras executadas na região, e passou a exigir das empresas siderúrgicas e do setor construtivo especificações e estudos que monitorassem o problema (FARRAND e EMERY, 1995; COOMARASAMY e WALZAK, 1995).

O Instituto Alemão para Garantia de Qualidade e Marcação especifica as qualidades necessárias às escórias de aciaria LD quando empregadas em estradas, rodovias e construções hidráulicas. Os teores de CaO<sub>livre</sub> e os percentuais de expansão volumétrica são especificados de acordo com o tipo de obra (RAL, 1993).

KRASS (1978) cita diversas obras, executadas na Alemanha em 1976, em que cerca de 400 mil toneladas de escórias de aciaria LD foram empregadas em reforço de cursos de água em canais, bermas (taludes), enrocamentos ( contenções), construção de estradas vicinais e áreas de estacionamento. MASS (1984) relata ainda a execução de diversos pavimentos experimentais construídos com as escórias LD na Alemanha, durante as décadas de 70 e 80. Os resultados dos testes foram favoráveis, levando-se em consideração a instabilidade volumétrica das escórias.

No Japão, HIRANO (1984) e IBS (1995) relatam que as pesquisas nesta área tiveram início a partir de 1979, quando foi instituído o “Slag Utilization Planning Committee” dentro da “Japan Iron e Steel Federation” e a “Nippon Slag Association”, com o propósito de estudar tecnicamente o emprego destes resíduos em estradas japonesas. Os referidos autores também mencionam o uso de escórias LD com escórias de alto-forno, utilizadas em outras obras de engenharia como por exemplo: aterros, portos e pavimentos. De acordo com a norma japonesa JIS A 5015, as escórias de dimensão máxima característica até 20mm devem ser submetidas a uma cura normal por meio de hidratação ou exposta ao intemperismo, por um período superior a 3 meses, e materiais acima desta granulometria, a cura deve ser superior a 6 meses, quando as escórias são utilizadas em rodovias.

NOMURA e ENOKIDO (1981) demonstraram que as características físicas de sub-bases executadas com escórias de aciarias LD japonesas eram similares às construídas com escórias de alto-forno e agregados convencionais.

De acordo com BONNOT e DUSSART (1978), experiências realizadas na década de 70 na França, visando o emprego das escórias em concretos betuminosos e camadas superficiais asfálticas mostraram bons resultados, o que incentivou o estudo do tratamento por envelhecimento das escórias. A regularização e classificação das escórias LD na França ocorreu na década de 70, por meio do “Institut de Recherches de la Sidérurgie Française –

IRSID". BONNOT e DUSSART (1978) e ALEXANDRE e RAGUIN (1984) relatam que o envelhecimento destas escórias em pátio precisa ser no mínimo de 6 a 8 meses, assegurando, desta maneira, a estabilidade dimensional destes resíduos quando aplicados nas estradas francesas.

No Brasil, um critério para a aplicação da escória de aciaria LD em pavimentação e como sub-base de pavimentos é a estabilidade volumétrica "in situ". Nesse sentido, as normas rodoviárias DNIT – PRO 263/94 e EM 262/94 orientam que a expansão do agregado de escória de aciaria LD não deve ser superior a 3 % - para o uso em pavimentos rodoviários. A norma rodoviária EB - 2103, tomada como referência para a norma do DNIT, é mais rigorosa e específica, para a utilização em sub-base de pavimentos, que o agregado não deve ter uma expansão superior a 1 %, e para o uso em base de pavimentos, este valor deve ser inferior a 0,5 %. Entretanto, a presença de cal (CaO) e magnésia (MgO) livres na escória recém produzida levam a uma expansão superior ao especificado por essas normas. Assim, ressalta-se a importância da estabilização desses óxidos para uma aplicação segura destes materiais.

Dessa maneira, com o processo de tratamento concluído, pode-se constatar que é viável, do ponto de vista técnico, a utilização da escória de aciaria LD como agregado para pavimentação. Nesse sentido, por exemplo, têm-se procurado aplicar medidas alternativas para se evitar o problema da expansibilidade por hidratação do CaO e MgO, como o envelhecimento do material por meio de reações de hidratação aceleradas, ou mesmo a redução da granulometria para aumentar a superfície de contato e assim facilitar essas reações.

Logo, determina-se a realização de testes para a análise das suas propriedades, visando o seu emprego como agregado, entre os quais podemos citar: a análise petrográfica, para a determinação da possível presença de impurezas nocivas ao desempenho final do material; hidratação em autoclave, para avaliação rápida do potencial de expansibilidade; expansão volumétrica, para avaliação da expansibilidade em condições de hidratação por submersão em água; imersão em mistura asfáltica, para verificação da estabilidade da mistura asfáltica quente, na qual a escória de aciaria é utilizada como agregado.

A despeito das restrições existentes, a utilização da escória de aciaria LD como agregado asfáltico, em substituição aos agregados naturais tradicionalmente empregados vem crescendo acentuadamente. Nas Figuras 2.12 e 2.13 apresentam-se rodovias executadas com escória.



**Figura 2.12 – Foto de uma rodovia executada com escória de aciaria LD (PENA, 2004).**



**Figura 2.13 – Foto da execução da rodovia com escória de aciaria LD e depois a rodovia pronta (DNIT,1994).**

#### **2.9.4 – UTILIZAÇÃO EM LASTRO DE FERROVIAS**

O lastro é de grande importância para a execução de uma ferrovia. Dentre outras propriedades, ele é responsável por distribuir as cargas sobre a plataforma. A estabilidade e a durabilidade da via dependem dele, visto que, o lastro também é responsável em suprimir irregularidades da plataforma; garantir a elasticidade da via; manter firme a posição dos dormentes; facilitar a restauração e manutenção da geometria da via; melhorar a permeabilidade e ventilação e evitar a formação de lama.

Como resultado de diversas pesquisas, a escória de aciaria LD de 1 ¼" a 3" (32mm a 75mm) foi disponibilizada no mercado ferroviário para a aplicação em lastro, visto que a escória apresenta características que a tornam atrativa para essa utilização.

Algumas vantagens sobre os materiais pétreos são: proteção o meio ambiente, evitando a exploração de pedreiras; maior resistência à abrasão, tornando o lastro mais durável; estrutura vesicular permitindo perfeita drenagem da água quando utilizado em lastros ferroviários; maior peso próprio, resultando em economia de material no dimensionamento dos lastros, assegurando grande estabilidade; logística (facilidade do transporte do produto pela ligação siderúrgica-ferrovia). A Figura 2.14 apresenta uma ferrovia com lastro composto por escória de aciaria LD.



**Figura 2.14 – Foto de uma ferrovia executada com escória de aciaria LD (PIMENTA et al. 2003).**

## CAPÍTULO 3

---

---

### 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 – INTRODUÇÃO

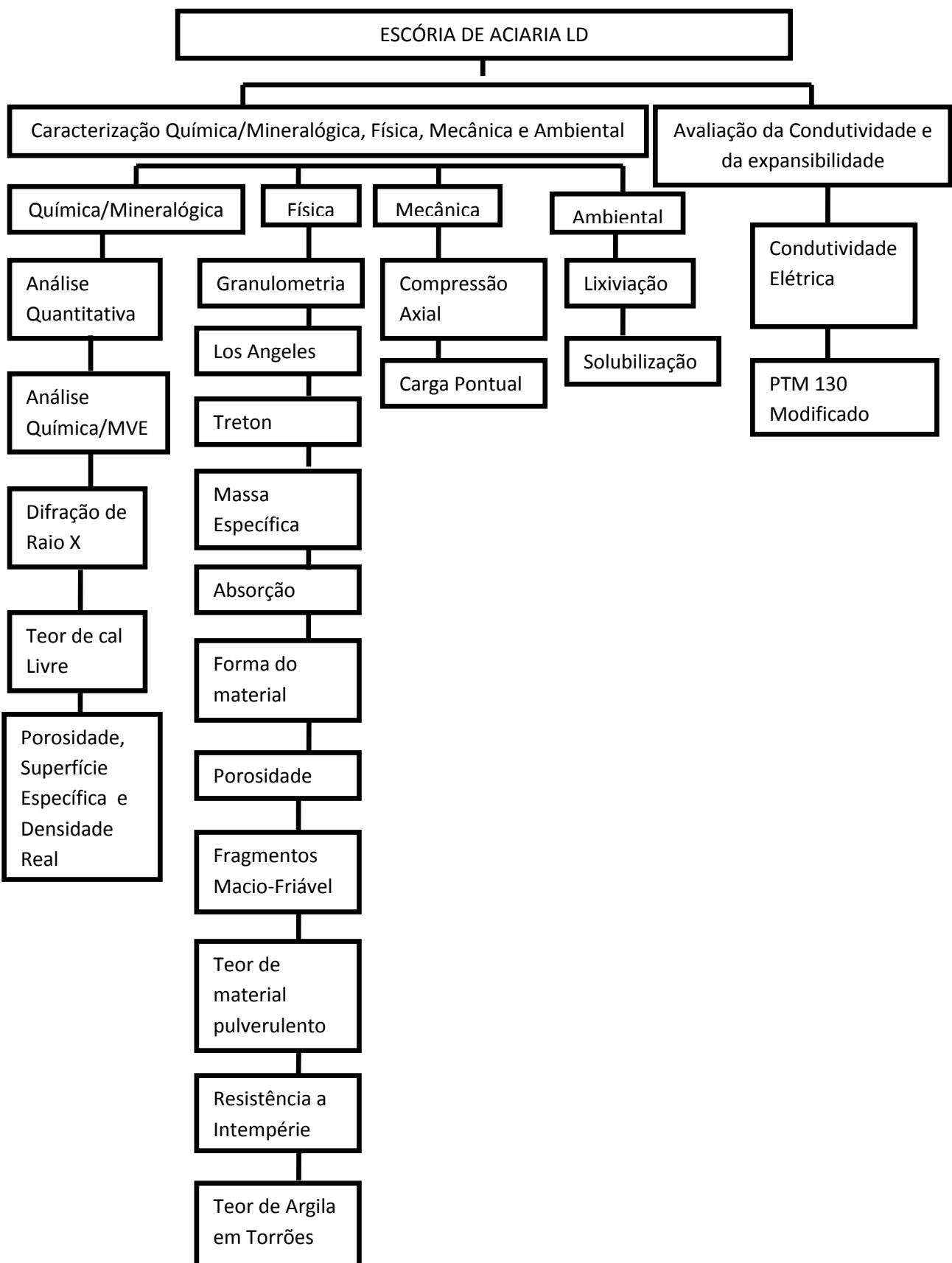
Nesta etapa do trabalho, será apresentado o programa experimental adotado, com vistas a analisar a viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria LD, tratadas por uma metodologia baseada em uma hidratação temporizada, com a intenção de adequar as suas propriedades químicas para material de lastro ferroviário. Para tanto, foram utilizadas escórias provenientes da USIMINAS – Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais, sediada em Ipatinga/MG, na usina Intendente Câmara, que passaram por um processo de tratamento ou cura.

Nesse sentido, a primeira etapa do trabalho consistiu em uma intensa revisão da literatura existente sobre a escória de aciaria LD, a característica expansiva do material, métodos para avaliação da expansão volumétrica, a estabilização volumétrica, as aplicações da escória de aciaria, em especial o uso como agregado para pavimentação rodo-ferroviária. Nesta etapa é também revisada a literatura existente sobre a avaliação dos impactos ambientais conseqüentes da utilização de resíduos industriais.

Na segunda etapa da pesquisa, foram realizadas a caracterização física, química, mineralógica, ambiental e mecânica da escória de aciaria LD tratada durante 90 (noventa) dias, bem como a avaliação da sua condutividade elétrica. As amostras que foram ensaiadas, foram coletadas no pátio onde foi implantada a metodologia de tratamento.

Para uma melhor compreensão das atividades realizadas, dos ensaios laboratoriais executados e do trabalho de campo feito, a Figura 3.1 apresenta um fluxograma mais detalhado.

Os materiais que foram objeto de estudo desta pesquisa e toda a metodologia adotada se encontram descritos no próximo item deste capítulo. Todos os ensaios foram executados nos laboratórios da UFOP.



**Figura 3.1 – Fluxograma geral dos ensaios realizados durante a pesquisa.**

### **3.2 – MATERIAIS ESTUDADOS E METODOLOGIA ADOTADA**

Para o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, a escória de aciaria LD, objeto de estudo, foi submetida a um tratamento de estabilização química ou “cura” que consistia na hidratação do material por meio de aspersores conectados a uma bomba hidráulica. Para se definir a metodologia de estabilização química da escória foram realizados uma série de estudos e ensaios laboratoriais que buscavam estimar o tempo de passagem da água pela pilha de escória; e o tempo que a água aspergida levava para atravessar e hidratar os óxidos instáveis presentes na partícula de escória. Inicialmente procurou-se estudar como se processava a reação entre as espécies químicas com a escória em pó. Para se conhecer os processos de hidratação foram realizados diversos ensaios com a escória de aciaria passando na peneira #200 com diferentes quantidades de água.

Após esta sequência de ensaios, estudos e análises foi possível verificar que a água possui uma velocidade de cerca de 0,095m/s e que leva 21 segundos para passar pela pilha de 2 metros de altura. Em relação ao tempo que a água aspergida precisa para atravessar a partícula de escória, ficou definido por meio dos ensaios laboratoriais que a água tinha uma velocidade de 0,0017m/s, mas que o tempo necessário para hidratar os óxidos instáveis é variável, em razão do diâmetro da partícula e do teor de cal livre presente, e ainda por se tratar de uma reação que se processa de maneira lenta e gradual. A Figura 3.2 apresenta os ensaios realizados no Laboratório de Ferrovias e Asfalto da Universidade Federal de Ouro Preto.



**Figura 3.2 – Ensaios realizados para estimar tempo de passagem da água na pilha de escória.**

Dessa forma, definiu-se o sistema de aspersão a ser aplicado e que proporcionou uma umectação da pilha com uma duração de sete minutos de molhagem para 30 minutos parado. A Figura 3.3 ilustra mais claramente o sistema de aspersão instalado.



**Figura 3.3 – Sequência da montagem do sistema de aspersão empregado.**

O material em estudo foi disposto na forma geométrica de cones. Assim, foram montadas 3 pilhas de escória de aciaria LD “in natura” ou recém produzida. A Tabela 3.1 apresenta a nomenclatura dada para as pilhas estudadas.

**Tabela 3.1 – Nomenclatura das pilhas estudadas.**

Material	Nomenclatura da Pilha
EH1	Escória Hidratada 1, material submetido a hidratação.
EH2	Escória Hidratada 2, material submetido a hidratação e carbonatação.
Controle	Escória submetida à intempéries.

Todas as pilhas montadas para o experimento tiveram o modelo geométrico recomendado pela referência técnica. As disposições tiveram forma geométrica de cone com altura 2,00m; raio 3,00m; diâmetro de 6,00m; ângulo de espraiamento de 33,66°; geratriz de 3,60m. A área lateral teve 34,00m<sup>2</sup> e área total de 62,30m<sup>2</sup> totalizando um volume de 18,84m<sup>3</sup> e utilizando uma densidade real dos grãos da escoria de 3,39g/cm<sup>3</sup> a massa da disposição foi de 63,8676t. A Figura 3.4 apresenta uma foto com a montagem da pilha 1, denominada EH1.



**Figura 3.4 – Foto da pilha EH1 montada.**

A Figura 3.5 ilustra de maneira mais detalhada a montagem da pilha 2 que recebeu a denominação de EH2.



**Figura 3.5 – Foto da pilha EH2 montada.**

A Figura 3.6 ilustra de maneira mais clara a montagem da pilha CONTROLE.



**Figura 3.6 – Foto da pilha CONTROLE montada.**

O local, onde foi desenvolvido o programa experimental da pesquisa é o pátio 3 da referida usina siderúrgica produtora da escória estudada. O prazo no qual a escória foi submetida ao tratamento descrito foi de 6 (seis) meses. As coletas de amostras foram realizadas a cada 15 dias nas três pilhas e o controle do processo de expansibilidade foi feito por meio de ensaio de PTM-130 modificado e pelo ensaio de teor de cal livre. O monitoramento das condições ambientais da área de pesquisa e das pilhas estudadas foi feita por meio de sensores de molhamento foliar, temperatura, teor de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e pluviômetro, instalados na base e no meio da camada das pilhas e conectados a uma célula eletrovoltaica. As Figuras 3.7 e 3.8 apresentam fotos com os sensores de temperatura e de molhamento foliar e o pluviômetro utilizado.



**Figura 3.7 – Foto com detalhamento dos sensores, pluviômetro.**



**Figura 3.8 – Foto com detalhamento e locação dos sensores prontos.**

Dessa maneira, na conformação final das pilhas foram colocadas paredes quebra-vento e também um sistema de abrigo para os sensores e para a datalogger. A Figura 3.9 apresenta o local da pesquisa com todos os equipamentos instalados.



**Figura 3.9 – Foto com a conformação final das pilhas estudadas.**

### **3.3 – METODOLOGIA ADOTADA**

Toda a metodologia empregada nas atividades e nos ensaios referentes ao programa experimental se encontra detalhada nos tópicos a seguir:

#### **3.3.1 – COLETA DAS AMOSTRAS**

As amostras de escória de aciaria LD tratadas durante o período de seis meses, foram coletadas, em conformidade com a NBR 11541 – Amostragem de material para lastro para via férrea - (1991), nas pilhas de hidratação, localizadas no pátio 3 da usina siderúrgica, e acondicionadas em sacos identificados. Em seguida, as amostras foram transportadas para o Laboratório de Ferrovias da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.

### **3.4 – CAMPANHA DE ENSAIOS LABORATORIAIS**

#### **3.4.1 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ESCÓRIA DE ACIARIA**

Os ensaios apresentados neste item foram realizados nos laboratórios do Departamento de Engenharia Civil da UFOP, principalmente no Laboratório de Ferrovias e Asfalto.

##### **3.4.1.1 – ENSAIO DE GRANULOMETRIA**

O ensaio de granulometria é o processo utilizado para a determinação da percentagem em peso que cada faixa especificada de tamanho de partículas representa na massa total ensaiada. Por meio dos resultados obtidos desse ensaio é possível a construção da curva de distribuição granulométrica, tão importante para a classificação do material, bem como a estimativa de parâmetros para filtros, bases estabilizadas, permeabilidade, capilaridade etc. A determinação da granulometria de um determinado material pode ser feita apenas por peneiramento ou por peneiramento e sedimentação, se necessário. A granulometria dos materiais foi avaliada de acordo com a norma NBR NM248 – Agregados - Determinação da composição granulométrica (ABNT, 2003).

Para a execução dos ensaios, empregou-se um peneirador mecânico convencional, com a série normal de peneiras padronizadas pela metodologia da referida norma. Dessa maneira, foram obtidos pesos retidos e acumulados e, respectivamente, as porcentagens

retidas e passantes em cada peneira. A Figura 3.10 apresenta o peneirador mecânico utilizado para os ensaios.



**Figura 3.10 – Peneirador mecânico utilizado nos ensaios.**

Para o ensaio de determinação da composição granulométrica são importantes os conceitos de dimensão máxima característica que é a grandeza associada à distribuição granulométrica do agregado, correspondente à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta uma porcenteagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa, e o conceito de módulo de finura que é a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado nas peneiras da série normal, dividida por 100.

### **3.4.1.2 – ÍNDICE DE CONTAMINAÇÃO**

No intuito de analisar a 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 percentagens em pesos passantes, respectivamente, nas peneiras 4 e 200. A Tabela 3.2 apresenta as correlações deste índice com a contaminação do lastro (Selig et al., 1993).

**Tabela 3.2 – 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 fundamentos, foram avaliados os respectivos índices de contaminação da escória de aciaria LD tratada, para lastro ferroviário que foram ensaiadas nesta pesquisa.

### **3.4.1.3 – ENSAIO DE ABRASÃO LOS ANGELES**

No ensaio de Abrasão Los Angeles é quantificado o desgaste sofrido pelo material estudado quando inserido no equipamento padrão (Figura 3.11), juntamente com uma carga abrasiva e submetido a um número determinado de rotações. Neste trabalho o ensaio foi executado na faixa em que o material se enquadrou a partir do ensaio de granulometria da NBR NM 51 (ABNT, 2001), com uma carga abrasiva de 12 esferas de aço, que possuem 48 mm de diâmetro e massa compreendida entre 390 a 445 gramas, as quais possuem massa total aproximada de 6 kg. A quantidade de carga abrasiva é função do tipo de material a ser ensaiado. O índice de Abrasão Los Angeles,  $A_n$  é calculada da seguinte maneira (Equação 3.1):

$$A_n = \frac{m_n - m'_n}{m_n} \times 100 \quad (3.1)$$

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 3.11 – Equipamento e cargas abrasivas utilizadas no Ensaio de abrasão Los Angeles.**

#### **3.4.1.4 - RESISTÊNCIA AO CHOQUE-ÍNDICE DE TENACIDADE TRETON**

A resistência ao choque representa um índice muito empregado para a caracterização de materiais aplicados como lastro para via férrea, pois esse tipo de esforço é bastante habitual para esse tipo de via durante a passagem das composições. Desta maneira, o resultado do ensaio pode antecipar o comportamento do material quando aplicado como material de lastro.

O ensaio foi executado em conformidade 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 equipamento padrão para o ensaio Treton (Figura 3.12).



**Figura 3.12 – Equipamento Treton para medidas de resistência ao impacto.**

O índice de tenacidade treton é calculado da seguinte forma (Equação 3.2):

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

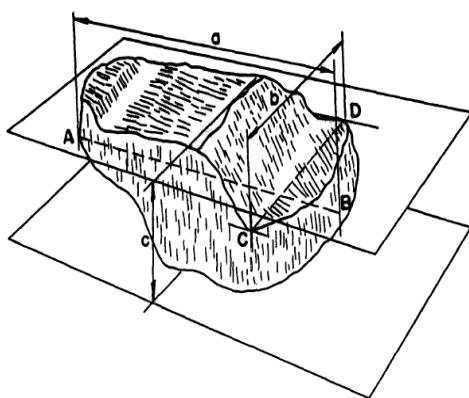
sendo  $m_n$  a massa total seca das partículas colocada no equipamento padrão e  $m'_n$ , a massa da amostra lavada na peneira de 1,7mm e seca após o ensaio.

### **3.4.1.5 - MASSA ESPECÍFICA APARENTE, ABSORÇÃO E POROSIDADE APARENTE**

Os ensaios de massa específica aparente, absorção e porosidade aparente podem revelar bastante sobre as propriedades que o material dispõe em relação à sua utilização como material de lastro. Estas propriedades são definidas em conformidade com a norma NBR 7418/1987 – Determinação da massa específica aparente, da absorção de água e da porosidade aparente do material, editada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas.

### **3.4.1.6 – FORMATO DO MATERIAL**

A forma apropriada do material de lastro é importante para o funcionamento correto do mesmo, assim sendo, formas laminares e alongadas das partículas não são pretendidas, dando-se preferência a formatos cúbicos. A análise do formato dos materiais em estudo ocorreu de acordo com os procedimentos e a classificação prescrita na norma NBR 6954/1989 – Lastro padrão - Determinação da Forma do Material, a partir de 25 fragmentos obtidos ao acaso em cada um dos lotes de material estudado. As dimensões dos fragmentos foram avaliadas com base na terminologia indicada na Figura 3.13, com os critérios de classificação prescritos na Tabela 3.3 .



**Figura 3.13 – Dimensões empregadas para a análise da forma dos fragmentos.**

**Tabela 3.3 – 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

Fator de Forma ( RAYMOND e DIYALJEE, 1979 )		
Medida das relações $\Sigma A$ e $\Sigma C$		Forma
1	$\Sigma A / \Sigma C \leq 2$	Cúbica
2	$\Sigma A / \Sigma C > 2$	Alongada / Lamelar

### **3.4.1.7 – FRAGMENTOS MACIOS E FRIÁVEIS**

O material para ser utilizado como lastro precisa ser composto em quase toda sua totalidade por partículas consideradas sãs, livres de fragmentos macios ou friáveis. Assim sendo, o teor de fragmentos macios e friáveis constitui um condicionante para o emprego de um dado material. Nesta pesquisa, a determinação desses teores foi feita em conformidade com a norma NBR 8697/1984 – Lastro padrão - Determinação do teor de material macio e friável, a partir de uma vareta de bronze especificamente desenvolvida por meio da norma (Figura 3.14). O cálculo do teor de fragmentos macios e friáveis é semelhante ao Índice de Tenacidade Treton e o Abrasão Los Angeles.



**Figura 3.14 – Aparelho para a determinação do teor de material macio e friável.**

### **3.4.1.8 – TEOR DE ARGILA EM TORRÕES**

O teor de argila em torrões e outros materiais considerados friáveis são elementos inapropriados para a composição dos agregados para lastro e, dessa maneira, a análise desse teor é relevante para assegurar a não contaminação do lastro. O referido ensaio foi conduzido de acordo com a NBR 7218/1987 – Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis.

### **3.4.1.9 – RESISTÊNCIA A INTEMPÉRIE**

A análise da resistência a intempéries do material de lastro para ferrovias é essencial para se determinar o comportamento do material em campo. Os procedimentos deste ensaio estão detalhados na norma NBR 7702/1983 – Lastro ferroviário - Determinação da resistência do material à intempérie. O ensaio consiste em submeter o material a 40 ciclos com imersão em solução de sulfato de sódio pelo período de no mínimo 9 horas seguido com o material em estufa com temperatura de 100°C pelo mesmo período de no mínimo 9 horas. Esta norma procura avaliar a porcentagem em massa de resíduos coletados em relação à massa total do corpo-de-prova e verificar as possíveis alterações em relação ao mesmo, particularmente quanto à desenvolvimento de trincas e/ou à inexistência de homogeneidade entre as amostras que são analisadas em cada ensaio.

## **3.4.2 – CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DA ESCÓRIA DE ACIARIA**

### **3.4.2.1 – COMPRESSÃO AXIAL**

A resistência à compressão axial é um dos indicadores mais relevantes para a verificação da qualidade do material para lastro de via férrea. Nesta pesquisa, a resistência foi avaliada de forma indireta, por meio do ensaio de carga pontual de acordo com a norma ASTM D5731-95 (ASTM, 1995). A falta de fragmentos de escória de aciaria cúbicos com pelo menos 7 centímetros de aresta foi a causa para a realização do ensaio de forma indireta.

### **3.4.2.2 – CARGA PONTUAL**

O ensaio de carga pontual é executado em amostras escolhidas com forma aproximadamente prismática, em conformidade com a norma ASTM D5731-95 (ASTM, 1995). O carregamento pontual é empregado na posição correspondente à

metade do comprimento e à metade da largura de cada corpo-de-prova. Nos ensaios executados, a carga foi aplicada com orientações variadas nos 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. Para todas as amostras analisadas os diâmetros das escórias alternaram entre 30 e 80 mm (ASTM D5731-95). A Figura 3.15, ilustra o equipamento utilizado para romper as amostras de escória selecionadas.



**Figura 3.15 – Aparelho utilizado para romper os corpos de prova selecionados.**

O ensaio é julgado válido quando o plano de ruptura coincide com a seção transversal de cada corpo-de-prova. Para cada ensaio avaliou-se o índice de carregamento pontual  $I_s$ , a partir da carga de ruptura  $P$ , estimado levando-se em consideração a seguinte relação:

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

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

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

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

### **3.4.3 – CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA DA ESCÓRIA DE ACIARIA**

#### **3.4.3.1– DIFRAÇÃO DE RAIOS – X**

O ensaio de difração de raios-x possui como propósito a identificação da composição cristalina de um determinado material estudado. As células cristalinas são constituídas por planos definidos, diretamente associados com o raio atômico de cada um dos átomos e seus tipos de ligação. Os picos exibidos no difratograma são as distâncias interplanares característica dos minerais presentes. A deficiência desta técnica acontece para materiais isomorfos (com mesma estrutura atômica) e para minerais com distâncias atômicas similares ou bastante heterogêneas.

Nas análises realizadas, empregou-se um difratômetro da marca Shimadsu, (Figura 3.16), do Laboratório de Difratometria de Raios-X do ICEB/UFOP, com tubo de ferro e intervalo de varredura de 5 a 70° e radiação de 20 kV e 5  $\mu$ A.



**Figura 3.16 – Difratômetro de Raios-X empregado nos ensaios.**

A velocidade aplicada no ensaio foi de 2 graus/minutos com duração de 40 minutos. A análise dos resultados é verificada por meio de sistema computacional específico (MDI Jade 9), que analisa o pico da incidência de elétrons e compara 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 apresentada na equação 3.4:

$$n\lambda = 2d \operatorname{sen} \theta \quad (3.5)$$

sendo:  $\lambda$  – comprimento da onda do tubo do aparelho;  $\theta$  – ângulo de incidência e  $d$  – distância (espaçamento) interplanar.

Os dados resultantes deste processo ótico são obtidos em um detector sob a forma de um sinal elétrico amplificado, que ficam armazenados na forma digital ou analógica, correspondentes aos difratogramas. Os difratogramas exibem picos característicos que são os resultados do processo de difração de raios-X em planos cristalográficos dos materiais analisados, co-relacionados à posição, intensidade e forma da estrutura cristalina, determinando, dessa maneira, a composição mineralógica dos materiais pesquisados.

### 3.4.3.2 – ANÁLISE QUÍMICA QUANTITATIVA

O espectrômetro de fluorescência de raios-X é um aparelho com a capacidade de quantificar os elementos obtidos em uma amostra por meio da exposição de raios-X na superfície do material e a consequente avaliação dos raios fluorescentes emitidos. Como se trata de uma técnica não-destrutiva é usualmente utilizada para a pesquisa e controle de qualidade de uma ampla gama de materiais.

Nos ensaios, foi empregado um espetrômetro de Raios-X, modelo EDS – 700 Hs da marca Shimadsu (Figura 3.17), do Laboratório de Fluorescência de Raios-X da Fundação Gorceix (Ouro Preto/MG).



**Figura 3.17 – Espectrômetro de Raios-X empregado nos ensaios.**

Para a execução do ensaio, as amostras sofreram uma preparação realizada da seguinte forma: aquecimento de 100 a 120 °C em forno; pesagem de 20g da amostra, adição de 0,6g de ácido estuário - C<sub>18</sub>H<sub>36</sub>O<sub>2</sub> (que atua como ‘cola’ para fixar a amostra); pulverização, por aproximadamente 4 minutos, com a finalidade de misturar o material da amostra com o ácido estuário; prensagem da mistura na forma de pastilha. A Figura 3.18, apresenta as pastilhas prontas para os ensaios.



**Figura 3.18 – Pastilhas prontas para os ensaios de fluorescência de raios - X.**

O estudo quantitativo por fluorescência de raios-X constitui uma metodologia fundamentada na mensuração da intensidade (número de raios-X detectados por unidade de tempo) dos raios-X característicos emitidos pelos elementos que fazem parte do material. Dessa maneira, os raios-X emitidos a partir de uma fonte radioativa estimulam as partes constituintes que, por sua vez, lançam linhas espectrais com energias características do elemento e cujas intensidades estão co-relacionadas com a concentração do elemento na amostra.

De maneira resumida, a análise por fluorescência de raios-X está baseada em três etapas: excitação dos elementos que constituem a amostra, dispersão dos raios-X característicos emitidos pela amostra e detecção desses raios-X emitidos.

### **3.4.3.3 – ANÁLISE QUÍMICA POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA**

A microscopia eletrônica de varredura constitui um método que permite a obtenção de informações estruturais e químicas de amostras diversas. Um feixe fino de elétrons de alta energia incide na superfície da amostra onde, ocorrendo uma interação, parte do feixe é refletida e coletada por um detector que converte este sinal em imagem de BSE (ou ERE) - imagem de elétrons retroespelhados - ou nesta interação a amostra emite elétrons produzindo a chamada imagem de ES (elétrons secundários). Ocorre também a

emissão de raios-X que fornece a composição química dos elementos de um ponto ou região da superfície, possibilitando a identificação de praticamente qualquer elemento presente.

Na microscopia eletrônica de varredura os sinais de maior interesse para a formação da imagem são os elétrons secundários e os retroespalhados. A medida que o feixe de elétrons primários vai varrendo a amostra estes sinais vão sofrendo modificações de acordo com as variações da superfície. Os elétrons secundários fornecem imagem de topografia da superfície da amostra e são os responsáveis pela obtenção das imagens de alta resolução, já os retroespalhados fornecem imagem característica de variação de composição.

A imagem examinada no Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV é o efeito ou consequência da passagem de contraste que acontece quando um feixe de elétrons primário varre a superfície da amostra em análise ponto a ponto. Esta caracterização qualitativa da morfologia de partículas das amostras dos materiais em estudo foi realizada empregando-se um microscópio eletrônico de varredura do tipo JEOL JSM – 5510, do Laboratório de Microscopia Eletrônica do DEGEO/UFOP (Figura 3.19).

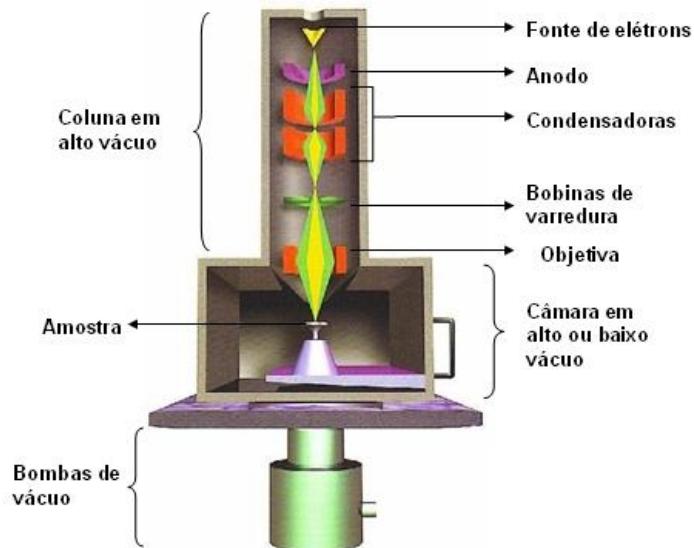


**Figura 3.19 – Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV/EDS).**

O conceito empregado para o funcionamento do equipamento é baseado em uma coluna de alto vácuo, os elétrons gerados a partir de um filamento de tungstênio, por efeito termiônico, são acelerados por uma diferença de potencial entre catodo e anodo entre 0,5 kV a 30 kV. O feixe gerado passa por lentes condensadoras que reduzem o seu diâmetro e por uma lente objetiva que o focaliza sobre a amostra. Logo acima da lente objetiva existem dois estágios de bobinas eletromagnéticas responsáveis pela varredura do feixe sobre a amostra.

O feixe interage com a região de incidência da amostra até uma profundidade que pode variar de 1  $\mu\text{m}$  a 6  $\mu\text{m}$ , dependendo da natureza da amostra. Esta região é conhecida por volume de interação, o qual gera os sinais que são detectados e utilizados para a formação da imagem e para microanálise.

Para formação da imagem, o fluxo de informação do microscópio para o computador consiste na localização dos pontos de varredura no plano x,y com o conjunto de intensidades correspondentes, originadas pelo detector de elétrons retroespelhados ou pelo detector de elétrons secundários, que estão localizados dentro da câmara de vácuo. Quando a amostra é varrida, a tela do display é varrida simultaneamente com correspondência de posições, utilizando as intensidades dos detectores para cada ponto, como esquematizado na Figura 3.20.



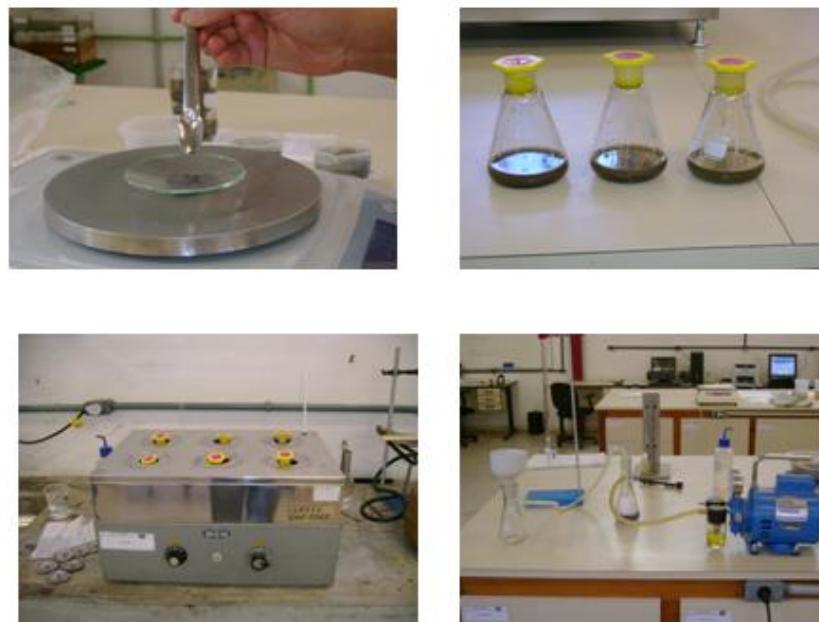
**Figura 3.20 – Esquema que ilustra a coluna do MEV.**

Para que o ensaio ocorra é preciso que as amostras sejam condutoras em presença de carbono e, portanto, são submetidas a um processo chamado de metalização. Dessa maneira, as amostras são preparadas sob a condição de monocamadas em peças cilíndricas metálicas, revestidas de grafite por uma fita de dupla face e, imediatamente, colocadas em um evaporador de vácuo por um período de cerca de 1 hora. Logo após, faz-se a vaporização dos eletrodos de grafite por cerca de 10 (dez) minutos. Depois deste processo, a amostra passa a ser condutora e a pastilha é colocada na câmara do microscópio, fazendo-se um vácuo de cerca de 3 (três) minutos. As amostras são, então, submetidas a processos de bombardeamento de elétrons e feitas fotomicrografias. Nesta pesquisa, os aumentos empregados foram de 50x, 200x, 250x nas amostras, sendo

adotados diversos acessórios, como por exemplo, os espectrômetros de raios-x, detector de elétrons retroespalhados, detector de elétrons absorvidos e detector de elétrons emitidos.

#### **3.4.3.4 – TEOR DE CAL LIVRE**

Com o objetivo de se avaliar o teor de cal livre presente nas amostras estudadas, empregou-se como o método de ensaio prescrito pela NBR NM 13 – Cimento Portland - Determinação de óxido de cálcio livre pelo etilenoglicol (ABNT, 2004). A referida norma indica a avaliação do óxido de cálcio livre por dissolução em etilenoglicol e posterior titulação em solução padronizada de ácido clorídrico ( $\text{HCl}$ ), adotando-se uma combinação de substâncias como indicador de pH. Para o objetivo proposto na pesquisa os resultados destas análises são satisfatórios. A Figura 3.21 ilustra o equipamento empregado no ensaio de teor de cal livre.



**Figura 3.21 – Equipamento e execução do ensaio de teor de cal livre.**

#### **3.4.3.5 – POROSIDADE, SUPERFÍCIE ESPECÍFICA E DENSIDADE REAL**

O fenômeno da adsorção constitui-se no acúmulo de moléculas gasosas na interface gás-sólido no momento em que uma superfície sólida limpa encontra-se em contato com uma fase gasosa ou vapor (gás abaixo de sua temperatura crítica, portanto, condensável), isso acontece como resultado das forças de Van der Waals movimentadas entre as moléculas de gás e a superfície sólida. Geralmente, chama-se de adsorvente o

sólido e o gás ou vapor utilizado, de adsorvato. O fenômeno oposto à adsorção é conhecido como dessorção (RABOCKAI, 1979).

De maneira geral, o fenômeno da adsorção é descrito por equações empíricas do tipo:

$$n_a/m_s = f(E, P, T) \quad (3.6)$$

sendo:

$n_a$  - quantidade adsorvida,

$m_s$  - massa de sólidos,

E - potencial de interação entre adsorvente e adsorvato,

T - temperatura absoluta,

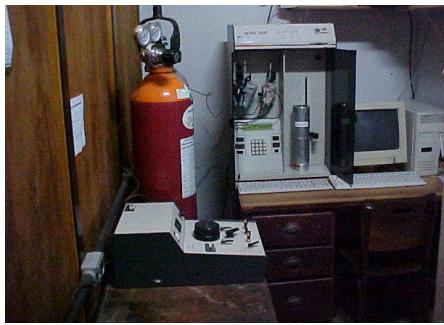
P - pressão de equilíbrio do gás.

Como a quantidade adsorvida por unidade de massa de adsorvente é medida à temperatura constante, a equação anterior pode ser simplificada. Estando o gás abaixo de sua temperatura crítica, é possível referir-se à pressão relativa  $P/P_0$ , sendo  $P_0$  a pressão de saturação do gás à temperatura T. Nessas condições, pode-se escrever:

$$n_a/m_s = f(E, P)_T \quad (3.7)$$

A curva decorrente da plotagem de  $n_a / m_s$  versus  $P$  é chamada de isotermia de adsorção, estabelecendo assim, a quantidade adsorvida por unidade de adsorvente com a pressão relativa, a temperatura constante (RABOCKAI, 1979). No entanto, pelo fato de o potencial de interação E alterar com as propriedades do vapor e do sólido e ocorrerem variações durante o processo de adsorção, todas as isotermas possuem diferenças (RABOCKAI, 1979).

As propriedades físicas do sólido influenciam bastante o fenômeno da adsorção, principalmente a estrutura dos poros. O gás que foi empregado nos ensaios foi o nitrogênio. O equipamento utilizado para a determinação da densidade real dos grãos foi um Multipienômetro a gás hélio (Figura 3.22) da marca Quantachrome, presente no Laboratório de Metalurgia da UFOP.



**Figura 3.22 – Equipamento utilizado no ensaio de densidade real.**

Segundo PENA (2004), o procedimento operacional baseia-se em desgasificar uma massa conhecida da amostra, submetendo-a ao vácuo sob uma dada temperatura, buscasse, dessa maneira, reduzir os possíveis contaminantes presentes. Em seguida, fixa-se os valores de pressão relativa durante o ensaio, enquanto a amostra foi conservada à temperatura de ebulação do nitrogênio líquido (77 K ou -196 °C), e depois submetida a um pequeno fluxo de N<sub>2</sub> gasoso. No momento em que foi atingida a pressão relativa pré-definida, o volume de nitrogênio adsorvido na superfície foi, então, medido e registrado. Foram utilizados valores progressivos de pressão relativa no intervalo de 0,05 até 0,98.

A partir da isoterma de adsorção, foi estabelecida a superfície específica (m<sup>2</sup>/g), aplicando o método baseado na teoria de Brunauer, Emmett e Teller, conhecida como B.E.T., que desenvolveram o tratamento de Langmuir (monocamada adsorvida) para o caso de adsorção em múltiplas camadas. Este método requer a determinação da quantidade de gás necessária para formar uma monocamada completa na superfície do sólido, utilizando a seguinte equação de B.E.T., segundo Lowell e Shields (1984), que é expressa como uma reta na faixa de valores de P/P<sub>0</sub> entre 0,05 e 0,35:

$$\frac{1}{W[(\frac{P_0}{P})-1]} = \frac{1}{W_m c} + \frac{(c-1)}{W_m c} \times (P/P_0) \quad (3.8)$$

sendo:

W<sub>m</sub> – massa de moléculas em uma monocamada completa;

W – massa de moléculas adsorvidas;

P/P<sub>0</sub> – pressão relativa;

C – constante B.E.T., relacionada com a energia de adsorção na primeira camada e, portanto, indicativo da intensidade das interações adsorvente/adsorvato; este valor é da ordem entre 50 e 300, quando se usa nitrogênio a 77 K.

O ensaio de porosidade é expresso por  $\text{cm}^3/\text{kg}$ , sendo caracterizado pela adsorção de nitrogênio à temperatura de ebulação de 77 K. A técnica utilizada para descrever a porosidade consistiu na determinação do volume total e na distribuição do tamanho de poros. Dessa maneira, foram obtidas como resultados do ensaio realizado no aparelho NOVA 1000, tabelas e gráficos com dados sobre área superficial específica, volume total de poros, tamanho médio dos poros, distribuição e tamanhos de poros, volume de microporos, isotermas de adsorção e dessorção, que permitem a obtenção de diversas informações sobre a forma geométrica dos poros.

A densidade real das amostras foi determinada no multipienômetro a gás hélio, citado previamente. Trata-se de um instrumento especificamente designado para medir o volume real de material sólido ou em pó, empregando o princípio de Archimedes de deslocamento de um fluido (FERNANDES, 2005). Para este ensaio se emprega um fluido capaz de penetrar em poros muitos pequenos, por esta razão se utiliza o gás hélio, que em virtude de sua dimensão atômica, garante penetração em poros da ordem de 1 Å ( $10^{-10} \text{ m}$ ).

O Multipienômetro determina a densidade real por meio da diferença de pressão quando uma quantidade conhecida de gás hélio sob pressão flui de um volume conhecido e calibrado de referência ( $V_r$ ) para o de outra amostra (de volume  $V_c$  conhecido e calibrado), contendo o material em pó (de volume  $V_p$ ). Nesse momento, ocorre então, uma queda de pressão de  $P_1$  (antes) para  $P_2$  (após passagem do volume  $V_r$  no circuito) e, a partir da relação entre estas pressões, determina-se o volume do material em pó ( $V_p$ ) pela equação:

$$V_p = V_c - V_r \cdot \left[ \left( \frac{P_1}{P_2} \right) - 1 \right] \quad (3.9)$$

Conhecendo-se a massa do material ( $M_p$ ), medida em balança analítica de precisão, determina-se a densidade real ( $d$ ) pela equação:

$$d = \frac{M_p}{V_p} \quad (3.10)$$

### **3.4.4 – CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DA ESCÓRIA DE ACIARIA**

#### **3.4.4.1 – LEGISLAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO**

Os órgãos ambientais têm dedicado um cuidado especial relativo ao manuseio e utilização de resíduos sólidos industriais enfatizando que estes precisam ser tratados obedecendo-se as disposições legais pertinentes de forma a se impedir possíveis riscos de problemas e eventuais punições previstas na Lei de Crimes Ambientais – Lei nº.9.605, de 12 de fevereiro de 1998. É preciso observar também as resoluções que o Conselho Nacional de Meio Ambiente publica regularmente tratando sobre o tema.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) editou algumas normas técnicas para a definição e classificação de resíduos sólidos industriais (ABNT NBR 10004, 2004; ABNT NBR 10005, 2004 e ABNT NBR 10006, 2004). Estas normas caracterizam tais resíduos, no estado sólido e semi-sólido, como resultado de atividades industriais como, por exemplo, a siderurgia na produção do aço.

Todas as decisões técnicas e econômicas tomadas em todas as fases do gerenciamento dos resíduos sólidos industriais precisam estar baseadas na classificação ambiental dos mesmos e considerar o seu potencial de contaminação ao meio ambiente, tanto a curto, médio e longo prazo. De acordo com a NBR 10004, os resíduos podem ser classificados da seguinte maneira: Resíduos Classe I – Perigosos; Resíduos Classe II – Não Perigosos; Resíduos Classe IIA – Não Inertes e Resíduos Classe IIB – Inertes.

Os resíduos caracterizados como Classe I ou Perigosos são aqueles que, em função de suas propriedades de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, podem oferecer riscos à saúde pública, contribuindo para um aumento de mortalidade ou incidência de doenças e/ou apresentar efeitos danosos ao meio ambiente quando manuseados ou dispostos de maneira inadequada.

Os resíduos classificados como Classe IIA ou Não Inertes são aqueles que, não se enquadram na Classe I ou na Classe IIB. Os referidos materiais podem apresentar propriedades tais como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.

Por fim, os Resíduos Classe IIB ou Inertes são aqueles 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.

#### **3.4.4.2 – TESTE DE LIXIVIAÇÃO**

Os testes de lixiviação, em conformidade com a NBR 10005 – Lixiviação de resíduos (ABNT, 2004), caracterizam ou definem os resíduos como perigosos quando, apresentarem valores de poluentes no extrato lixiviado em concentração superior aos padrões constantes na listagem nº 07 anexa à norma.

O ensaio baseia-se na pesagem de 100 g de amostra, triturada abaixo da peneira de 9,5 mm, que então é 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 medido anteriormente). Logo após, o frasco é mantido sob agitação durante 18 horas à temperatura de 25º C, com rotação de 30 vezes por minuto em agitador rotatório. Depois desse período, realiza-se a filtração do produto e o extrato lixiviado é analisado. O teste de lixiviação foi realizado parte no Laboratório de Ferrovias e Asfalto da Universidade Federal de Ouro Preto e parte na SGS Geosol Laboratórios Ltda. A Figura 3.23 apresenta o equipamento utilizado no ensaio de lixiviação para caracterização ambiental.



**Figura 3.23 – Equipamento usado no ensaio de lixiviação.**

#### **3.4.4.3 – TESTE DE SOLUBILIZAÇÃO**

O teste de solubilização realizado em conformidade com a norma NBR 10006 – Solubilização de resíduos (ABNT, 2004), avalia a solubilidade dos compostos presentes nas amostras estudadas na pesquisa. O ensaio consiste em se tomar 250 g de amostra, triturada abaixo da peneira de 9,5mm e 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. Logo após esse período, a amostra é filtrada e o material filtrado analisado. O ensaio foi realizado parte no Laboratório de Ferrovias e Asfalto da Universidade Federal de Ouro Preto e parte na SGS Geosol Laboratórios Ltda. A Figura 3.24 apresenta os frascos utilizados no ensaio de solubilização.



**Figura 3.24 – Equipamento usado no ensaio de lixiviação.**

Na NBR 10004/2004 para classificação de resíduos, este ensaio é adotado 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).

### **3.4.5 – AVALIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE E DA EXPANSIBILIDADE DA ESCÓRIA DE ACIARIA**

#### **3.4.5.1 – AVALIAÇÃO DO EFEITO DA CURA SOBRE A CONDUTIVIDADE**

Para a aplicação da escória de aciaria LD como lastro ferroviário, uma das maiores dificuldades encontradas é o seu potencial expansivo. Esta expansão pode atingir valores de até 10%, ocasionando uma fragmentação do material na ferrovia quando se utiliza escórias não tratadas (SOUZA, 2007). Como principal consequência dessa fragmentação ocorre a quebra das partículas com consequente geração de pó e condução de eletricidade, comprometendo a operacionalidade da via.

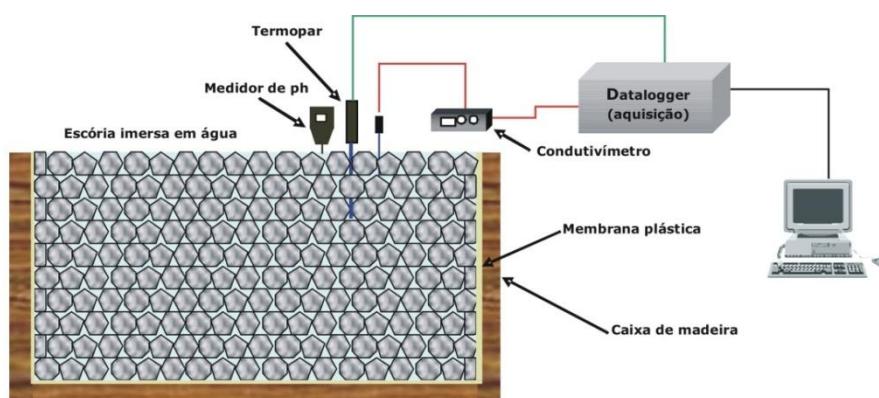
Com o propósito de avaliar se o fenômeno da expansão possui grande influência sobre a condutividade elétrica das escórias em estudo, mesmo após o tratamento aplicado a elas foi montada uma caixa-teste (espécie de tanque) simulando uma secção transversal

ferroviária. A caixa feita de madeira, revestida por uma membrana plástica, possuí 2,2m de comprimento, 1,2m de largura e 0,5m de altura, sendo preenchida com escória e água até o nível acima da escória (Figura 3.25).



**Figura 3.25 – Caixa-teste para análise da condutividade nas escórias de aciaria.**

O condutivímetro é o aparelho utilizado para a medição da condutividade elétrica do meio no qual o material se encontra. O ensaio buscou simular uma situação real possível de ocorrer em muitos trechos ferroviários, em que a drenagem do lastro e da via são deficientes sob uma chuva intensa e prolongada, colaborando, dessa maneira, para a saturação do lastro. Na realização do ensaio, também foram medidos o pH e a temperatura durante o teste (Figura 3.26).



**Figura 3.26 – Esquema completo da montagem do experimento (SOUZA, 2007).**

A campanha de coleta de dados de condutividade e pH foi realizada continuamente depois do tratamento aplicado na escória. Como o objetivo da montagem era de se investigar o efeito do tratamento aplicado sobre a condutividade da escória de aciaria utilizada como lastro, o tempo de realização do ensaio foi fixado em 90 dias, baseada

em estudos prévios de SOUZA (2007). A descarga da água contida nas caixas foi feita a cada 6 dias e o enchimento feito após 24 horas de cada descarga.

### **3.4.5.2 – AVALIAÇÃO DE EXPANSIBILIDADE PELO MÉTODO PTM 130/78 ADAPTADO PELO DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE MINAS GERAIS (DMA – 1/DER-MG /92)**

O ensaio de expansão PTM 130/78 foi idealizado a partir de estudos conduzidos por EMERY (1984) na MacMaster University (Ontario/Canadá). Em seguida, com uma mudança na temperatura utilizada e no período do ensaio, criou-se a norma ASTM 4792/00. Logo depois, o Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais desenvolveu uma adaptação no método original do PTM 130/78 originando o ensaio DMA – 1/ DER – MG /92.

O referido ensaio, resume-se na imersão de corpos de prova cilíndricos compactados na energia Proctor normal em um banho térmico com água a  $71 \pm 3^{\circ}\text{C}$  por um período de 7 dias sendo realizadas leituras diárias da variação volumétrica em função do aumento de altura do corpo de prova. Posteriormente, os corpos-de-prova são retirados do banho térmico e levados para uma estufa elétrica à mesma temperatura de  $71 \pm 3^{\circ}\text{C}$ . O método de ensaio orienta que o corpo-de-prova precisa ser mantido na condição de “saturação” (não submersa) por mais sete dias, fazendo-se as leituras diárias da expansão por igual período. Para este ensaio, em particular, é necessária uma modificação na montagem dos corpos de prova, pois a escória estabilizada se encontra na faixa granulométrica para lastro ferroviário e, portanto precisa ser compactada na energia Proctor normal, com pó de escória de aciaria LD estabilizada quimicamente para se obter um cilindro estável, sem movimentos laterais das partículas. Nesse estudo, foi utilizada uma combinação em massa de 70% de material na faixa granulométrica para lastro e 30% em pó para preencher o cilindro e torná-lo estável para o ensaio.

A percentagem de expansão volumétrica total é aquela obtida após os 14 dias. O limite estabelecido pelo DNIT-PRO 262/94 para cada ensaio é de 3% para expansão acumulada após os 14 dias de ensaio. RAPOSO (2005) complementa tais especificações e sugere que o lote de escória de aciaria somente deve ser aceito quando a expansão de todos os corpos-de-prova ensaiados para cada amostra for inferior ao limite de 3% pelo

método PTM-130/78. A Figura 3.27 apresenta os moldes e uma estufa que são utilizados para a realização dos ensaios.

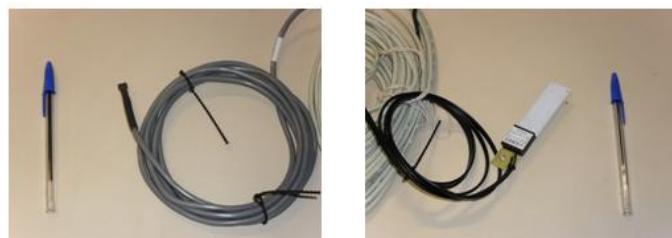


**Figura 3.27 – Moldes e estufa para realização do ensaio PTM 130/78 .**

### **3.5 – MONITORAMENTO DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS DE CAMPO**

O monitoramento das condições ambientais encontradas durante o processo de tratamento da escória de aciaria LD no pátio da siderúrgica foi realizado por meio de diversos sensores instalados na base e no meio da camada de escória de aciaria LD conectados a um sistema de coleta de dados. Este sistema de coleta registrou durante os seis meses de monitoramento dados que posteriormente foram tratados em programa computacional específico para que fossem analisados. O tratamento dos dados buscou filtrar e refinar as variáveis estudadas no processo de estabilização química da escória de aciaria LD.

Os sensores instalados acompanharam as seguintes grandezas: temperatura na superfície e no interior das pilhas, molhamento foliar que avaliou se a pilha estava molhada ou não e o pluviômetro que media a precipitação diária. As medições ocorriam em um intervalo de 1 em 1 hora durante 24 horas no período de 180 dias. Nas Figuras 3.28 e 3.29 apresentam-se os sensores e o pluviômetro empregados no monitoramento de campo.

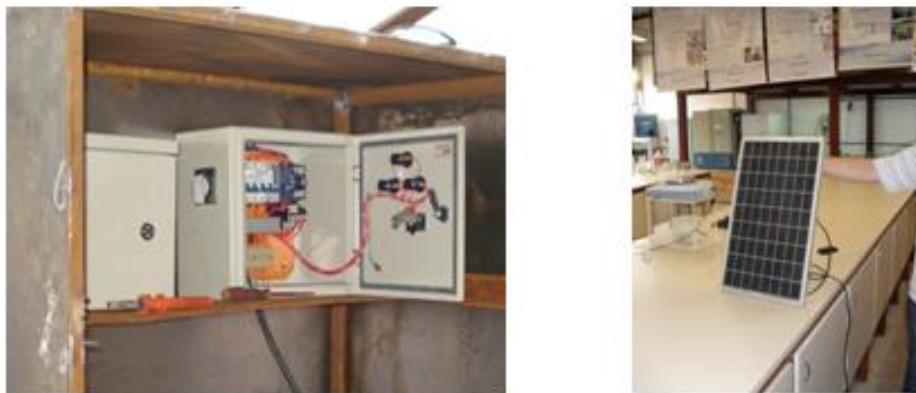


**Figura 3.28 – Sensor de Temperatura e de Molhamento Foliar.**



**Figura 3.29 – Pluviômetro e medidor de umidade e teor de CO<sub>2</sub>.**

Dessa maneira, foram gerados dados diários referentes a essas grandezas, estes registros foram coletados, tratados, analisados e comparados com os dados laboratoriais. A Figura 3. 30 ilustra o sistema de coleta e o sistema de alimentação elétrica instalados.



**Figura 3.30 – Sistema de coleta de dados instalado e célula eletrovoltaica.**

Além dos registros coletados pela datalogger instalada, foram medidos a cada quinze dias a temperatura externa das pilhas por meio de um termômetro de haste, a umidade relativa do ar, o teor de CO<sub>2</sub> e a temperatura ambiente, estes três últimos por meio de medidor de dióxido de carbono.

O sistema de aspersão e coleta de dados ficou operante durante os meses de março a agosto de 2009.

## **CAPÍTULO 4**

---

---

### **4 – RESULTADOS E ANÁLISES DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO E MONITORAMENTO DAS DISPOSIÇÕES EXPERIMENTAIS EM PÁTIO INDUSTRIAL**

#### **4.1 - INTRODUÇÃO**

Neste capítulo, são apresentados os resultados dos trabalhos realizados a partir de campanhas de ensaios e monitoramentos feitos em amostras de escórias de aciaria recém-produzidas e com tratamento de estabilização química, assim como o monitoramento dos fatores ambientais e o comportamento das amostras submetidas a processos químicos de hidratação e carbonatação.

Este trabalho de pesquisa buscou conhecer as respostas das escórias de aciaria após serem colocadas em tratamento químico de umectação, e para tanto foi realizada uma grande campanha experimental composta por ensaios laboratoriais executados no Laboratório de Ferrovias e Asfalto da Universidade Federal de Ouro Preto, por ensaios realizados no Centro de Pesquisa da USIMINAS dentro da Usina Intendente Câmara e também por um acompanhamento de campo no pátio 3 localizado na área industrial em Ipatinga/MG.

Os ensaios de laboratório foram divididos em duas etapas bem distintas: a primeira abordando e caracterizando as escórias recém-produzidas e a segunda etapa compreendeu a caracterização após a adição de água com medições de tempo, obedecendo ao gradiente de velocidade de passagem da água pelo interior da partícula, assim como a absorção de CO<sub>2</sub>.

Conforme descrito no Capítulo 3, a disposição adotada foi em formato de pilhas e as amostras coletadas nas mesmas foram identificadas como: EH1 – originada da disposição em pilha submetida a processo de hidratação; EH2 – originada da disposição em pilha submetida a processo de hidratação e carbonatação, por meio de cobertura em polietileno; Controle – originada da disposição em pilha, simplesmente depositadas nas condições ambientes considerada como padrão USIMINAS.

Na referida campanha laboratorial, foram efetuados ensaios de caracterização física, mecânica, química, ambiental e de expansibilidade, nas amostras pesquisadas. A Tabela 4.1 abaixo apresenta os quantitativos dos ensaios laboratoriais.

**Tabela 4.1 –Quantitativo dos ensaios de laboratório.**

Ensaios	Escória – Co-produto Siderúrgico		
	Pilha EH1	Pilha EH2	Pilha Controle
Granulometria	3	3	3
Abrasão Los Angeles	3	3	3
Índice de Tenacidade Treton	3	3	3
Massa Específica	3	3	3
Porosidade	3	3	3
Absorção	3	3	3
Índice de Forma	3	3	3
Macio e Friável	3	3	3
Teor de Argila	3	3	3
Resistência a Intempéries	3	3	3
Carga Pontual	3	3	3
Raio X	2	2	2
MVE/ EDS	7	8	8
Teor de cal Livre	25	25	25
Lixiviação	2	2	2
Solubilização	2	2	2
Condutividade	90	90	90
Expansibilidade PTM-130	6	6	6
Medição de pH	90	90	90

Neste capítulo, são discutidos também os ensaios de campo realizados durante o período de monitoramento das disposições experimentais. Nesta campanha, foram monitorados as seguintes grandezas: temperatura na superfície e no interior das pilhas, o molhamento foliar avaliou se a pilha estava molhada ou não e o pluviômetro media a precipitação diária. Foi realizado também o acompanhamento da temperatura interna das pilhas, a umidade relativa do ar, o teor de CO<sub>2</sub> e a temperatura ambiente. Dessa maneira, foram analisados os dados obtidos durante o tempo de controle e acompanhamento, com o objetivo de compreender os mecanismos de degradação e geração de finos da escória ao ser submetida a processo de umectação e carbonatação. A Tabela 4.2 apresenta os quantitativos dos ensaios realizados em durante os trabalhos de campo que se estendeu de março a agosto de 2009.

**Tabela 4.2 –Quantitativo dos ensaios de campo.**

Ensaios	Escória – Co-produto Siderúrgico		
	Pilha EH1	Pilha EH2	Pilha Controle
Temperatura na Superfície	9	9	9
Temperatura no meio da pilha	180	180	180
Temperatura na base da pilha	180	180	180
Molhamento Foliar	180	180	180
Precipitação	180	180	180
Umidade	9	9	9
Teor de CO <sub>2</sub>	9	9	9

Em princípio, é interessante destacar que a região de Ipatinga/MG apresenta estações bem definidas de chuvas e secas. A estação seca ocorre entre os meses de abril e setembro e a estação chuvosa acontece entre outubro e março, com temperaturas médias de 26°C.

#### **4.2 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ESCÓRIA DE ACIARIA**

Para os ensaios de caracterização física, são apresentados os resultados dos seguintes ensaios: análise granulométrica, índice de contaminação, abrasão ‘Los Angeles’, índice

de tenacidade Treton, da massa específica aparente, da porosidade aparente e da absorção, formato do material, teor de fragmentos macios e friáveis, teor de argila em torrões e resistência às intempéries. Esses referidos ensaios constituem a norma padrão para lastro ferroviário da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

#### **4.2.1 – ENSAIO DE GRANULOMETRIA**

A distribuição granulométrica das escórias estudadas foi realizada em conformidade com as especificações da ABNT. Para que os materiais sejam empregados como lastro ferroviário devem exibir uma granulometria superior a 12,7 mm, à exceção de uma pequena tolerância de 5% da massa total, segundo a NBR 5564 (EB-655/91). Nas Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 apresentam-se os ensaios de granulometria para as pilhas EH1, EH2 e Controle, respectivamente.

**Tabela 4.3 – Resultado do ensaio de granulometria na pilha EH1.**

Peneiras		Material Retido (g)	Percentagem em Peso		
Número	(mm)		% Retido	% Acumulada	% Passante
2 1/2"	63,5	1470	1,6	1,6	98,4
2"	50	8908	9,6	11,2	88,8
1 1/2"	38	37728	40,8	52,0	48,0
1"	25	27572	29,8	81,8	18,2
3/4"	19	5610	6,1	87,8	12,2
1/2"	12,5	3317	3,6	91,4	8,6
3/8"	9,5	1204	1,3	92,7	7,3
1/4"	6,3	966	1,0	93,8	6,2
4	4,8	449	0,49	94,3	5,7
8	2,4	853	0,92	95,2	4,8
10	2	0	0,00	95,2	4,8
16	1,2	0	0,00	95,2	4,8
30	0,6	0	0,00	95,2	4,8
50	0,3	0	0,00	95,2	4,8
100	0,15	0	0,00	95,2	4,8
200	0,074	0	0,00	95,2	4,8
Prato		4466	4,83		
Total		92543	100,0		

Dimensão Máxima Característica(mm)	63,5
Percentagem de material pulverulentos	8,6
Módulo de Finura	8,03

**Tabela 4.4 – Resultado do ensaio de granulometria na pilha EH2.**

Peneiras		Material Retido (g)	Percentagem em Peso		
Número	(mm)		% Retido	% Acumulada	% Passante
2 1/2"	63,5	3391	1,9	1,9	98,1
2"	50	21228	12,2	14,1	85,9
1 1/2"	38	60784	34,8	48,9	51,1
1"	25	48823	28,0	76,9	23,1
3/4"	19	12490	7,2	84,0	16,0
1/2"	12,5	7592	4,3	88,4	11,6
3/8"	9,5	3549	2,0	90,4	9,6
1/4"	6,3	2417	1,4	91,8	8,2
4	4,8	1296	0,74	92,5	7,5
8	2,4	1870	1,07	93,6	6,4
10	2	0	0,00	93,6	6,4
16	1,2	0	0,00	93,6	6,4
30	0,6	0	0,00	93,6	6,4
50	0,3	0	0,00	93,6	6,4
100	0,15	0	0,00	93,6	6,4
200	0,074	0	0,00	93,6	6,4
Prato		11141	6,38		
Total		174581	100,0		

Dimensão Máxima Característica(mm)	63,5
Material pulverulento	11,6
Módulo de Finura	7,84

**Tabela 4.5 – Resultado do ensaio de granulometria na pilha Controle.**

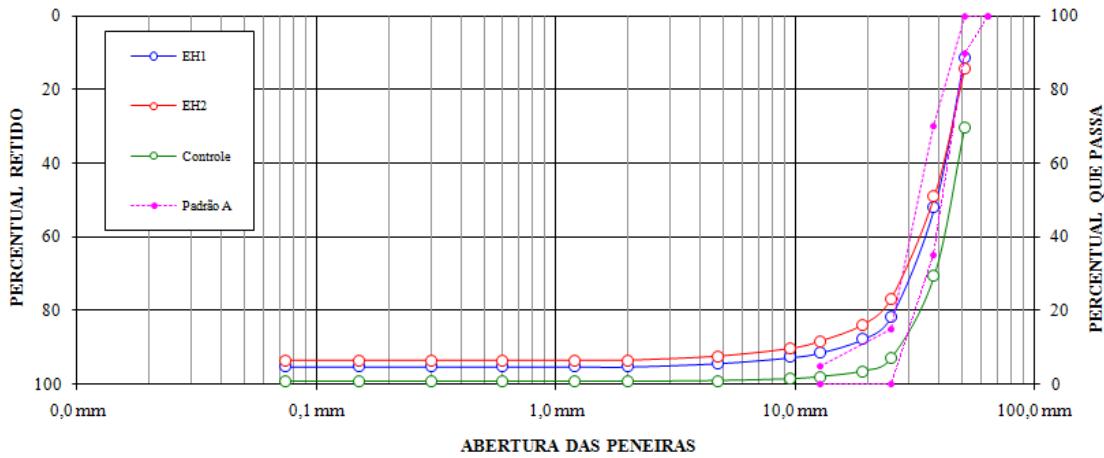
Peneiras		Material Retido (g)	Percentagem em Peso		
Número	(mm)		% Retido	% Acumulada	% Passante
2 1/2"	63,5	6405	7,1	7,1	92,9
2"	50	21105	23,3	30,3	69,7
1 1/2"	38	36443	40,2	70,5	29,5
1"	25	20540	22,6	93,1	6,9
3/4"	19	3074	3,4	96,5	3,5
1/2"	12,5	1327	1,5	98,0	2,0
3/8"	9,5	588	0,6	98,6	1,4
1/4"	6,3	310	0,3	99,0	1,0
4	4,8	155	0,17	99,1	0,9
8	2,4	142	0,16	99,3	0,7

10	2	0	0,00	99,3	0,7
16	1,2	0	0,00	99,3	0,7
30	0,6	0	0,00	99,3	0,7
50	0,3	0	0,00	99,3	0,7
100	0,15	0	0,00	99,3	0,7
200	0,074	0	0,00	99,3	0,7
Prato		645	0,71		
Total		90734	100,0		

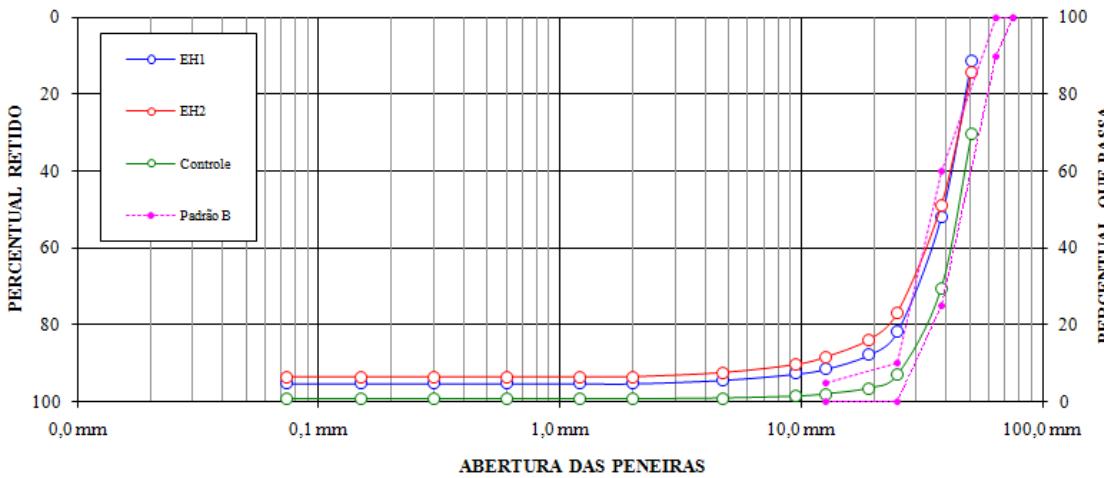
Dimensão Máxima Característica(mm)	63,5
Material pulverulento	2,0
Módulo de Finura	8,61

A partir das análises das Tabelas 4.3, 4.4, e 4.5 que representam os ensaios de granulometria observa-se a comprovação da eficiência da metodologia adotada. Em todas as frações de quantidades retidas nas aberturas das peneiras verifica-se uma redução considerável na percentagem acumulada em peso se compararmos as percentagens retidas da pilha Controle e das pilhas EH1 e EH2 e também se evidencia uma redução nos tamanho dos grãos retidos nas peneiras. Esta fragmentação das partículas comprova o efeito provocado pelo fenômeno da hidratação e da carbonatação aplicada nas pilhas estudadas. Outro dado interessante é que pela aplicação da estabilização química houve um aumento na quantidade de material pulverulento nas pilhas EH1 e EH2, este acréscimo mostra que ocorreu uma geração de finos. Há também uma pequena redução no módulo de finura.

De acordo com os resultados dos ensaios de granulometria, pode-se verificar que os materiais das pilhas EH1, EH2 e Controle ficaram em conformidade com as especificações da norma para lastro padrão na faixa padrão A da ABNT e apresentam uma curva granulométrica com pequena desconformidade ao prescrita pela norma da faixa padrão B da ABNT (Figuras 4.1 e 4.2). O material das pilhas EH1 e EH2 apresentam grande contaminação por partículas pulverulentas, não se enquadrando no limite especificado para Lastro Padrão da ABNT. O material da pilha Controle não apresentou essa contaminação e portanto se enquadrou no referido padrão.



**Figura 4.1 – Enquadramento das curvas na faixa padrão A da ABNT.**



**Figura 4.2 – Enquadramento das curvas na faixa padrão B da ABNT.**

Com relação à presença de material fino, pode-se afirmar que prejudica a boa funcionalidade do lastro por minimizar as propriedades de drenagem, causando uma rigidez mais acentuada devido à ocupação dos vazios.

Depois 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  $C_c = (D_{30})^2/D_{60} \cdot D_{10}$ , dimensão máxima característica – DMC e módulo de finura.

**Tabela 4.6 – Propriedades geométricas obtidas a partir da granulometria.**

Material	Parâmetro Cu	Parâmetro Cc	DMC (mm)	Módulo de finura
EH1	2,75	1,37	63,5	8,03
EH2	3,23	1,33	63,5	7,84
Controle	1,71	1,01	63,5	8,61

A partir dos resultados alcançados na Tabela 4.1, os materiais EH1 e EH2 são bem graduados e uniformes. Já o material da pilha controle apresentou-se com graduação aberta, no entanto uniforme. O conjunto de materiais pesquisados exibiu DMC de 63,5mm que constitui o número da peneira da série normal na qual a porcentagem acumulada é inferior ou igual a 5 %. Este valor de DMC para as escórias pesquisadas foi maior que o encontrado por SOUZA (2007), porém igual ao encontrado por FERNANDES (2005). O módulo de finura, que representa à soma das porcentagens acumuladas em todas as peneiras da série normal dividida por 100, obteve valores que variaram entre 7,84 e 8,61. Ressalta-se que quanto maior o valor de módulo de finura, mais grosso o material de lastro ferroviário.

#### **4.2.2 –ÍNDICE DE CONTAMINAÇÃO**

A partir do ensaio de granulometria, determina-se o índice de contaminação e o grau de contaminação para os materiais pesquisados. A Tabela 4.7 mostra os resultados alcançados.

**Tabela 4.7 – Índice e grau de contaminação dos materiais.**

Material	Índice de contaminação (FI)	Grau de contaminação
EH1	10,5	Moderadamente Contaminado
EH2	13,9	Moderadamente Contaminado
Controle	1,6	Moderadamente Limpo

Os materiais EH1 e EH2 foram classificados como moderadamente contaminados e a pilha controle como moderadamente limpo.

O índice de contaminação está evidentemente associado ao ciclo de vida útil do lastro ferroviário, ao passo que, quanto mais contaminado o lastro estiver menor será sua capacidade de exercer suas funções estruturais. O ponto mais decisivo é quando ocorre a perda da capacidade de drenagem.

No entanto, para o caso dessa pesquisa a contaminação encontrada é devido ao tratamento empregado nas pilhas EH1 e EH2, que produz uma quantidade maior de finos durante o período de aspersão. Para resolver esse inconveniente pode-se submeter o material a um novo processo de peneiramento na planta de britagem para retirar o fino e refazer o ensaio de granulometria.

#### **4.2.3 – ABRASÃO LOS ANGELES**

Os resultados dos ensaios de abrasão Los Angeles demonstram que todos os materiais estudados estão aptos neste quesito, para serem empregados como lastro ferroviário. A abrasividade é outro ensaio que está diretamente associado à vida útil do lastro. A Tabela 4.8 apresenta os resultados.

**Tabela 4.8 – Resultados dos ensaios de Abrasão Los Angeles.**

Material	Graduação da amostra	Número de esferas	Abrasão Los Angeles (%)
EH1	E	12	13,14
EH2	E	12	13,77
Controle	E	12	15,46

O limite máximo para a abrasão Los Angeles preconizado pela AREMA (2002), para as escórias de aciaria LD, é de 30%. Desta forma, pode-se observar que o tratamento nas pilhas EH1 e EH2 levaram o material a obter uma abrasividade menor que a pilha Controle, e por consequência uma vida útil mais longa.

#### **4.2.4 – RESISTÊNCIA AO CHOQUE – ÍNDICE DE TENACIDADE TRETON**

Os resultados dos ensaios de resistência ao choque para os materiais pesquisados demonstraram que todos os materiais apresentaram resistência ao choque em conformidade com os limites estabelecidos por norma que é de 20%, sendo que os materiais EH1 e EH2 apresentaram resistências muito similares também em função do tratamento empregado, o material da pilha Controle exibiu uma resistência muito boa, porém menor que a apresentada pelos outros materiais. Do mesmo jeito que o ensaio de Abrasão Los Angeles, a conformidade deste índice aos limites de norma concede ao lastro ferroviário uma vida útil maior, com menores ônus de manutenção. A Tabela 4.9 apresenta os resultados do ensaio.

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

Material	Nº de fragmentos	Número de golpes	Resistência ao choque (%)
EH1	20	10	7,14
EH2	20	10	7,74
Controle	20	10	12,04

#### **4.2.5 – MASSA ESPECÍFICA APARENTE, ABSORÇÃO E POROSIDADE APARENTE**

Os resultados alcançados nos ensaios de massa específica aparente, as escórias estudadas mostraram que todas se encontram em conformidade com o preconizado pela norma de lastro padrão ( $24 \text{ kN/m}^3$ ), ressaltando ainda que todos os materiais exibiram valores bem acima dos recomendados na citada norma.

No que se refere à absorção de água, os materiais EH1 e EH2 e pilha controle ficaram em desconformidade com o limite de 1% estabelecido pela norma de lastro padrão. Com relação à porosidade aparente, todos os materiais não se enquadram no valor de 1% recomendado pela norma de lastro padrão da ABNT, ficando a pilha EH1 bem afastada deste limite.

O tratamento dos materiais EH1 e EH2, neste caso, não resultaram em uma melhoria do desempenho nos ensaios de massa específica, absorção e porosidade. Os valores mais acentuados são creditados à natureza do material que tem sua origem diferente da brita que é um agregado convencionalmente empregado, mas de ocorrência natural.

Portanto, os valores que são apresentados na Tabela 4.10 e que estão em desconformidade não refletem necessariamente uma desvantagem em relação ao material convencional, pois não interferem na resistência do material estudado, mas refletem um ganho de massa.

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

Material	Massa específica aparente ( $\text{kN/m}^3$ )	Absorção de água (%)	Porosidade aparente (%)
EH1	34,4	1,66	4,2
EH2	33,42	1,29	3,2
Controle	34,3	1,06	2,7

#### **4.2.6 – FORMATO DO MATERIAL**

A configuração geométrica dos fragmentos do material é representado pelo formato que uma determinada amostra demonstra. 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
EH1	0,69	0,66	1,43	Cúbica	Cúbica
EH2	0,68	0,74	1,96	Cúbica	Cúbica
Controle	0,76	0,76	1,72	Cúbica	Cúbica

Em conformidade com a classificação determinada pela norma de lastro padrão, todos os materiais pesquisados exibiram forma cúbica. Na classificação proposta por Raymond e Diyaljee (1979), todos os materiais repetiram a forma cúbica apresentada anteriormente.

O fato de a forma cúbica prevalecer em todas as amostras pesquisadas constitui um ponto vantajoso à aplicabilidade destes resíduos siderúrgicos como materiais de lastro ferroviário. Isso acontece em função dos fragmentos com formas cúbicas, diferentemente daqueles com formas lamelares, facilitarem um maior intertravamento entre os fragmentos, proporcionando uma maior rigidez à camada de lastro.

#### **4.2.7 – FRAGMENTOS MACIOS E FRIÁVEIS**

Os resultados do teor de fragmentos macios e friáveis estão exibidos na Tabela 4.12. Por meio do ensaio obtém-se a porcentagem da massa total da amostra que não é considerada ‘sã’. O resultado alcançado para a pilha EH2 está em conformidade com o prescrito. No entanto, o material EH1 e Controle estão em desconformidade com o valor 5% recomendado pela NBR 5564 (EB-655/91).

O resultado da pilha EH1 ficou bem próximo do desejado, mas já demonstrou uma melhora em relação ao material da pilha Controle. Os fragmentos da pilha EH2 chegaram abaixo do limite estabelecido por norma em função do tratamento aplicado com base na carbonatação e hidratação.

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

Material	Massa de Fragmentos analisados (g)	Teor de fragmento macio e friável (%)
EH1	18834	5,10
EH2	16121	4,77
Controle	18704	5,70

#### **4.2.8 – TEOR DE ARGILA EM TORRÕES**

Nos materiais presentes nas pilhas EH1, EH2 e Controle não foram encontrados teores significativos de argila em torrões que fossem considerados em desconformidade com o estabelecido pela norma, que prescreve um teor máximo de 0,5%. A conservação deste teor em níveis abaixo do permitido pela norma para lastro padrão NBR 5564 (EB-655/91), é muito relevante para a qualificação destes materiais como lastro padrão. Os resultados alcançados são apresentados na Tabela 4.13.

**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 (%)
EH1	12050	12036	0,12
EH2	11569	11549	0,17
Controle	14263	14245	0,12

#### **4.2.9 – RESISTÊNCIA ÀS INTEMpéRIES**

O ensaio de resistência às intempéries procura demonstrar os possíveis danos causados pelas intempéries durante anos de exposição dos materiais no local da ferrovia. A Tabela 4.14 apresenta os resultados alcançados, após ciclos de imersão em solução de sulfato de sódio e secagem em estufa.

**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 (%)
EH1	693,60	688,47	0,74
EH2	679,77	670,86	1,31
Controle	732,08	718,68	1,83

Todos os materiais demonstraram uma excelente resistência às intempéries, produzindo uma pequena quantidade de resíduos na solução de sulfato. Dessa forma, os resultados se encontram em conformidade com o estabelecido pela norma de lastro padrão que é de 5%.

O tratamento aplicado nos materiais das pilhas EH1 e EH2 promoveram uma melhoria do desempenho no ensaio de resistência às intempéries, pois minimizaram a quantidade de cal livre que estaria disponível para reagir com a solução de sulfato promovendo uma fragmentação com geração de finos.

O material da pilha Controle apresentou um desempenho semelhante ao demonstrado pelos materiais tratados, porém, obteve o valor mais alto dentro do grupo, com presença de finos no fundo do recipiente utilizado para desenvolver o ensaio.

### **4.3 – CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS ESCÓRIAS**

#### **4.3.1 – COMPRESSÃO AXIAL**

Assim como foi relatado no item 3.4.2.1, a execução do ensaio de compressão axial não foi possível, pela falta de corpos-de-prova dos materiais estudados com dimensões compatíveis para o ensaio. Dessa forma, a resistência a compressão axial foi estimada de maneira indireta por meio do ensaio de carga pontual

#### **4.3.2 – CARGA PONTUAL**

Os resultados dos ensaios de carga pontual nos materiais das pilhas EH1, EH2 e Controle se encontram apresentados na Tabela 4.15. Nesse sentido para a avaliação do índice  $Is(50)$ , as cargas de ruptura são representadas 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 4.15 – Propriedades de resistência dos materiais utilizados como lastro.**

Identificação	Índice de carregamento $I_{S50}$ (MPa)		Resistência à compressão uniaxial $\delta_{uc}$ (MPa)		Índice de anisotropia $I_{a(50)}$
	Plano $\perp$	Plano $//$	Plano $\perp$	Plano $//$	
EH1	11, 795	5,03	288,97	123,24	2,34
EH2	7, 485	7, 648	183,38	187,38	0, 97
Controle	8, 049	7, 511	197,20	184,01	1,07

Dessa forma, avaliando-se os ensaios pode-se afirmar que os resultados foram bastante positivos, pois apresentaram bons índices de carregamento pontual para o fator  $I_s(50)$  paralelo e também para o fator  $I_s(50)$  perpendicular.

Esse resultado mostra que o tratamento aplicado nos materiais foi muito satisfatório no caso da pilha EH1 que apresentou índices de carregamento de até 11, 795 MPa enquanto que o material da pilha Controle exibiu valores em torno de 8,04 MPa.

A partir da obtenção dos fatores  $I_s(50)\perp$  e  $I_s(50)//$ , determinou-se também o respectivo índice de resistência anisotrópico  $I_{a(50)} = \frac{I_{s(50)\perp}}{I_{s(50)//}}$ , para todos os materiais estudados, os valores estão apresentados na Tabela 4.15.

Dessa maneira, conclui-se que o material EH1 possui elevada resistência à compressão, com índice de anisotropia maior que 1,0 (um) o que nos mostra que a resistência do agregado é muito maior no plano perpendicular de aplicação da força. Para o material EH2 com índice de anisotropia próximo a 1,0 (um) tem-se que a resistência do agregado é uniforme sob qualquer plano de aplicação da força. Para o material da pilha Controle com índice de anisotropia pouco maior que 1,0 (um) tem-se que a resistência do agregado é praticamente uniforme sob qualquer plano de aplicação da força.

GOODMAN (1989) relata que o índice de carregamento pontual constitui um parâmetro que representa a característica de resistência considerando a geometria das partículas e a

porosidade. No entanto, deve-se incluir o teor de cal livre presente nos corpos-de-prova nessa avaliação, pois quanto maior for esse teor, maior será a probabilidade de em contato com a água, o corpo-de-prova expandir e se fragmentar.

Para estimar a resistência à compressão uniaxial  $\delta_{uc}$  foi empregada uma relação empírica  $\delta_{uc}=C \cdot I_s(63,5)$ , apresentando C como um coeficiente experimental que é variável de acordo com o diâmetro dos corpos-de-prova e das características do material. Os valores do coeficiente experimental C aplicados neste trabalho foram determinados por FERNANDES (2005) especificamente para escórias de aciaria LD. Na Tabela 4.16 apresentam-se os valores encontrados pelo referido autor.

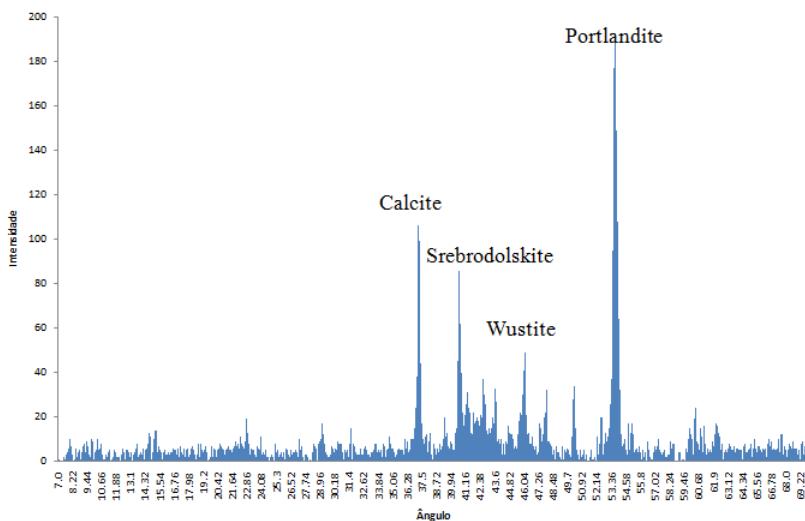
**Tabela 4.16 – Valores de C para a escória de aciaria LD (FERNANDES, 2005).**

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

## **4.4 – CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E QUÍMICA DAS ESCÓRIAS**

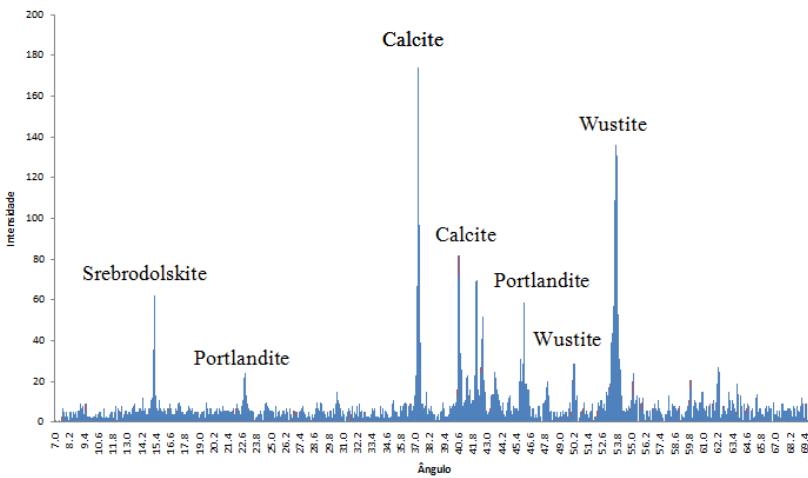
### **4.4.1 – ANÁLISES POR DIFRAÇÃO DE RAIO X**

Os resultados obtidos para o ensaio de difração de raio-X, para os materiais EH1, EH2 e Controle encontram-se apresentados nas Figuras 4.3 a 4.5 e representam a ocorrência das fases mineralógicas dos padrões difratométricos. Na amostra EH1, os principais constituintes mineralógicos foram: Portlandite –  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ; Calcite –  $\text{CaCO}_3$  ; Srebrodolskite –  $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$  ; Wustite –  $\text{FeO}$  .



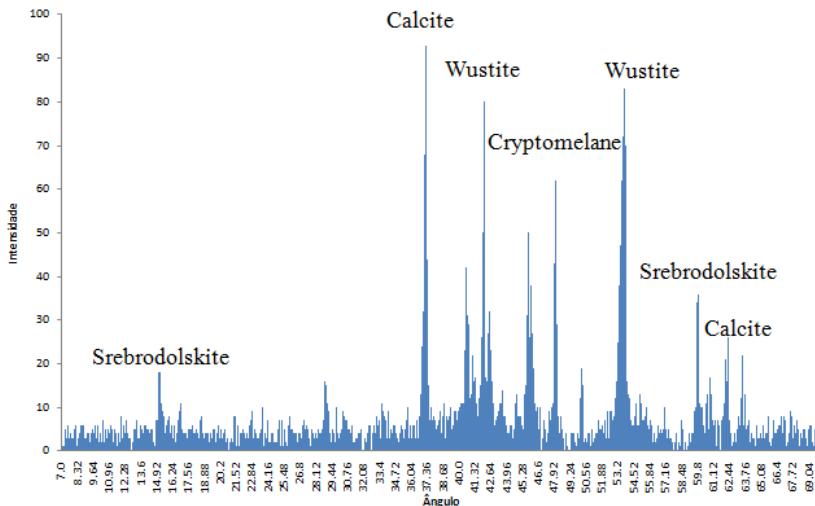
**Figura 4.3 – Padrão de difração de raios-X da amostra EH1.**

Para o caso da pilha EH2, foram identificados os seguintes compostos minerais: Calcite –  $\text{CaCO}_3$  ; Wustite –  $\text{FeO}$  ; Srebrodolskite –  $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$  ; Portlandite –  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  .



**Figura 4.4 – Padrão de difração de raios-X da amostra EH2.**

Para o caso da pilha Controle, foram evidenciados os seguintes compostos: Calcite –  $\text{CaCO}_3$  ; Wustite –  $\text{FeO}$  ; Srebrodolskite –  $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$  e a Cryptomelane –  $\text{K}_2\text{Mn}_8\text{O}_{16}$ . Conforme pode ser visualizado na Figura 4.4.



**Figura 4.5 – Padrão de difração de raios-X da amostra Controle.**

Analizando-se as fases mineralógicas encontradas nos resultados dos ensaios, pode-se afirmar que por meio do tratamento empregado as amostras EH1 e EH2 apresentaram compostos hidratados como por exemplo a calcita, a srebrodolskite e a portlandite. No entanto, a amostra Controle apresentou a calcita e a srebrodolskite como composto hidratado. Para fases mineralógicas não hidratadas foram identificados a wustite em todas as amostras analisadas e a cryptomelane na amostra da pilha Controle.

#### 4.4.2 – ANÁLISES QUÍMICAS QUANTITATIVAS

Os resultados das análises químicas quantitativas realizadas nas três amostras de escória estudadas estão exibidos na Tabela 4.17.

**Tabela 4.17 – Espécies químicas e sua porcentagem em massa.**

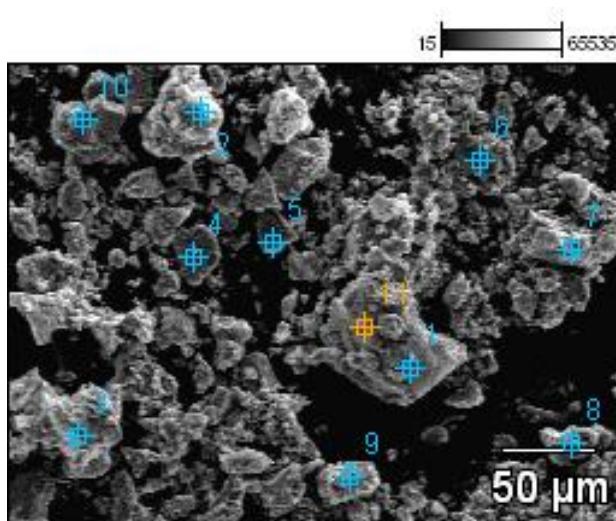
Material	Espécies químicas (% em massa)								
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	FeTotal	S	K <sub>2</sub> O
EH1	28,68	8,32	9,44	5,46	1,33	5,44	40,01	-	1,32
EH2	26,32	7,95	7,73	6,24	1,89	6,74	41,95	0,56	0,62
Controle	34,37	1,49	2,72	6,02	4,14	-	51,26	-	-

Analizando a tabela pode-se verificar uma redução na porcentagem em massa para algumas das espécies analisadas, principalmente para o CaO e o MgO, que são os

maiores responsáveis pela expansibilidade. Os valores encontrados para todos os materiais se encontram dentro das faixas dos limites obtidos por outros pesquisadores para o processo BOF (PENA 2004). A norma americana para ferrovias (AREMA) preconiza que o lastro de escória de aciaria para ser empregado precisa apresentar uma percentagem de óxido de cálcio (CaO) inferior a 45% e também um somatório de óxidos de alumínio e de ferro menor que 30%. No caso desta pesquisa os valores obtidos para óxido de cálcio se encontram em conformidade com o prescrito, pois foram de 28,68% para EH1, 26,32% para EH2 e 34,37% para a pilha Controle, no entanto para o somatório de óxidos de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{FeO}$ ) os valores encontram-se em desconformidade com o prescrito, pois foram de 40,01% para EH1, 41,95% para EH2 e de 51,26% para a pilha Controle.

#### 4.4.3 – ANÁLISES QUÍMICAS POR MVE/EDS

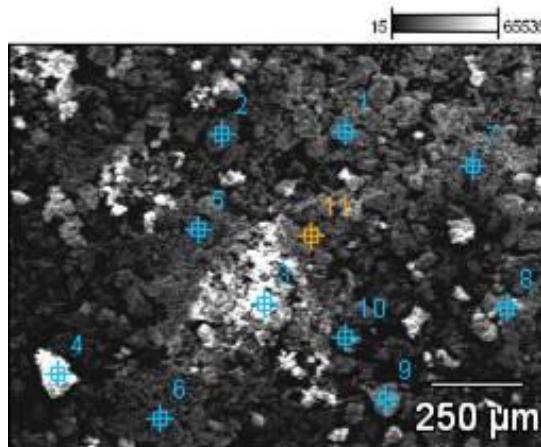
A microscopia eletrônica de varredura para a análise e a caracterização das diferentes fases minerais existentes em amostras é empregada em caráter pontual. As análises químicas foram realizadas no material pulverizado. As Figuras 4.6, 4.7 e 4.8 apresentam a distribuição morfológica obtida nas análises do pó das amostras da pilha EH1, EH2 e Controle, respectivamente. As Tabelas 4.18, 4.19 e 4.20 reúnem as espécies químicas que foram encontradas e suas respectivas porcentagens para cada análise pontual efetuada.



**Figura 4.6 – Morfologia típica encontrada no material EH1 pulverizado.**

**Tabela 4.18 – Resultados da análise quantitativa realizada em cada ponto da Figura 4.6.**

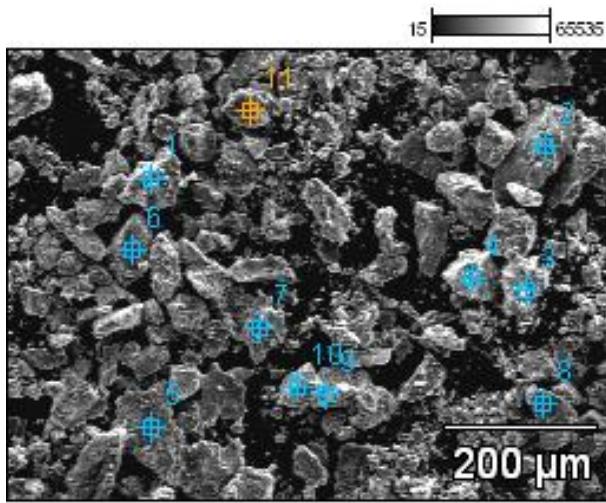
EH1	Espécies químicas (% em massa)										
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cu <sub>2</sub> O	ZnO
Pt.1	-	-	-	-	62,20	35,65	-	-	-	2,15	-
Pt.2	-	-	-	-	-	49,74	-	-	50,26	-	-
Pt.3	-	8,65	-	-	-	57,80	0,43	-	33,12	-	-
Pt.4	-	-	-	12,93	-	83,03	-	-	-	-	4,04
Pt.5	0,87	-	2,09	6,18	69,12	17,12	-	1,19	3,43	-	-
Pt.6	-	-	-	-	48,76	37,56	-	5,87	7,81	-	-
Pt.7	-	-	2,78	-	59,95	14,62	-	-	22,65	-	-



**Figura 4.7 – Morfologia típica encontrada no material EH2 pulverizado.**

**Tabela 4.19 – Resultados da análise quantitativa realizada em cada ponto da Figura 4.7.**

EH2	Espécies químicas (% em massa)										
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cu <sub>2</sub> O	ZnO
Pt.1	-	-	-	5,42	36,37	34,71	-	-	23,50	-	-
Pt.2	-	17,45	0,95	1,33	53,48	21,69	-	5,10	-	-	-
Pt.3	-	-	-	6,71	-	34,14	-	2,66	56,49	-	-
Pt.4	-	8,64	-	-	31,0	34,33	-	4,26	21,77	-	-
Pt.5	-	3,61	-	5,24	-	12,78	9,74	-	50,02	5,14	13,47
Pt.6	0,82	19,28	3,89	2,21	23,86	11,05	4,74	-	34,15	-	-
Pt.7	-	3,83	-	2,72	64,30	-	-	6,44	15,10	3,23	4,38
Pt.8	-	1,52	0,93	3,28	-	32,43	-	2,19	59,65	-	-



**Figura 4.8 – Morfologia típica encontrada no material da pilha Controle pulverizado.**

**Tabela 4.20 – Resultados da análise quantitativa realizada em cada ponto da Figura 4.8.**

Controle	Espécies químicas (% em massa)										
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cu <sub>2</sub> O	ZnO
Pt.1	-	13,64	-	8,52	-	77,84	-	-	-	-	-
Pt.2	-	2,21	50,29	2,69	-	32,10	-	-	12,71	-	-
Pt.3	0,74	2,86	-	37,84	-	24,81	-	6,89	23,14	1,65	2,07
Pt.4	-	21,78	2,72	2,61	61,66	-	-	-	11,23	-	-
Pt.5	-	45,49	5,66	-	44,30	-	-	-	4,55	-	-
Pt.6	-	36,78	1,05	11,11	-	38,87	-	-	12,19	-	-
Pt.7	1,95	-	-	-	64,71	-	0.98	-	32,36	-	-
Pt.8	-	4,38	-	0,84	-	94,78	-	-	-	-	-

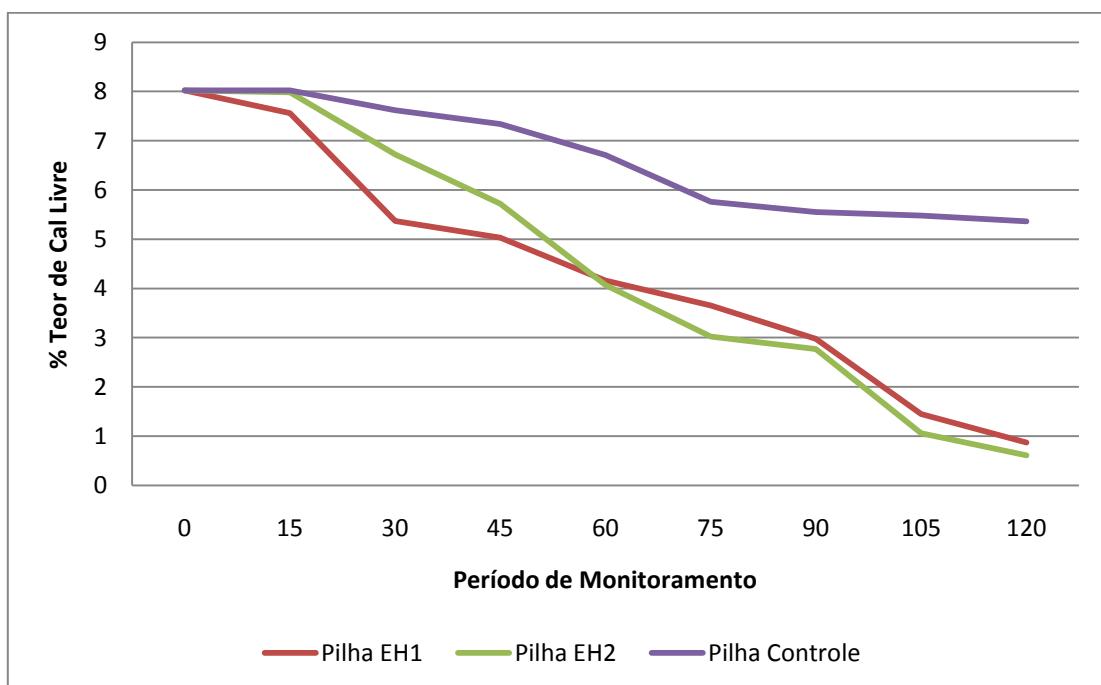
Os resultados da análise quantitativa por microscopia de varredura eletrônica executada nos materiais EH1 e EH2 e Controle pulverizados foram bem análogos aos resultados obtidos na análise quantitativa realizada por fluorescência de raios-X, reafirmando os compostos encontrados anteriormente e demonstrando que o tratamento aplicado obteve uma boa eficiência na redução dos elementos responsáveis pela expansão e fragmentação da escória de aciaria LD.

#### 4.4.4 – TEOR DE CAL LIVRE

Os resultados obtidos para o ensaio de teor de cal livre encontram-se apresentados na Tabela 4.21 e na Figura 4.9. Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Ferrovias e Asfalto da Universidade Federal de Ouro Preto.

**Tabela 4.21 – Resultados do ensaio de teor de cal livre.**

Dias de Monitoramento	Teor de Cal Livre		
	Pilha EH1	Pilha EH2	Pilha Controle
0	8,02	8,02	8,02
15	7,56	7,98	8,02
30	5,37	6,72	7,62
45	5,03	5,72	7,34
60	4,16	4,07	6,71
75	3,65	3,02	5,76
90	2,98	2,77	5,55
105	1,45	1,06	5,48
120	0,87	0,61	5,36



**Figura 4.9 – Acompanhamento da porcentagem teor de cal livre no período de monitoramento.**

As informações apresentadas na tabela e no gráfico demonstram como a hidratação e a carbonatação aplicada nas pilhas EH1 e EH2 promoveram uma redução significante no teor de cal livre presente nas amostras analisadas, sendo que as amostras tratadas ficaram em conformidade com o limite de 3% fixado pela AREMA. Essa redução é resultado da reação da água com a cal no caso da pilha EH1 transformando o óxido de cálcio livre em hidróxido de cálcio. No caso da pilha EH2 houve uma reação de hidratação e de carbonatação, por meio do dióxido de oxigênio que ficou retido ao redor da pilha com a lona colocada.

#### **4.4.5 – POROSIDADE, SUPERFÍCIE ESPECÍFICA E DENSIDADE REAL**

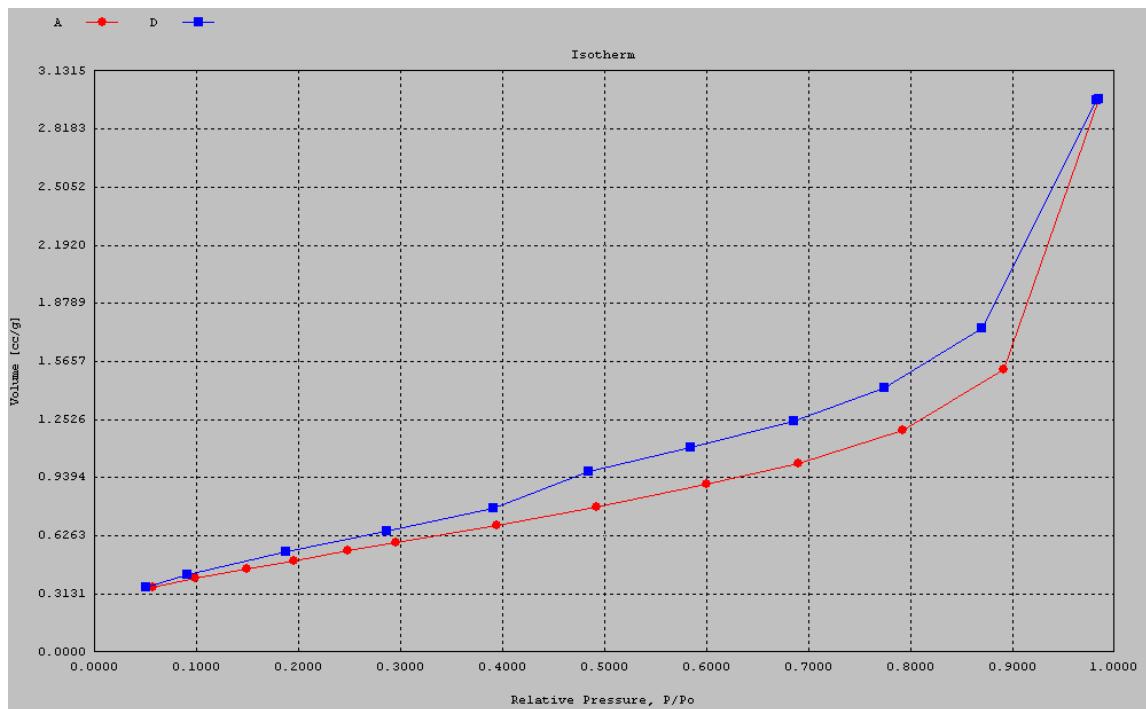
As amostras das pilhas estudadas foram submetidas a ensaios de adsorção de nitrogênio à temperatura de 77K (-196°C), segundo a técnica B.E.T., para se caracterizar os parâmetros intrínsecos de porosidade e superfície específica dos materiais utilizados: superfície específica, volume total de poros (porosidade), diâmetro médio de poros, diâmetro máximo de poros e volume total de microporos (microporosidade). Adicionalmente, foram obtidas as correspondentes isotermas de adsorção e os valores de densidade real (FERNANDES et al., 2004). Os resultados estão apresentados na Tabela 4.22.

**Tabela 4.22 – Resultados do ensaio de adsorção de nitrogênio nas amostras das pilhas estudadas.**

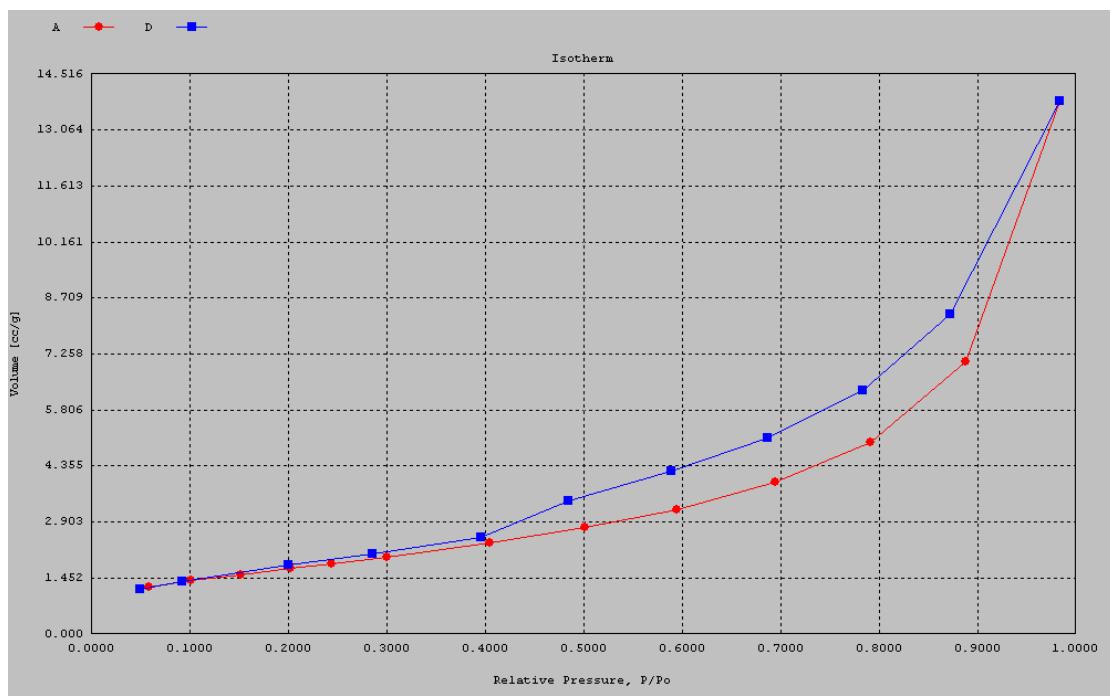
Parâmetro	Pilha EH1	Pilha EH2	Pilha Controle
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	3,14	3,16	3,19
Superfície Específica BET (m <sup>2</sup> /g)	3,44	6,33	3,92
Volume de Microporos (cm <sup>3</sup> /kg)	0,0016	0,0030	0,0018
Área de Microporos (m <sup>2</sup> /g)	4,63	8,38	5,12
Tamanho Médio dos Microporos (nm)	5,06	6,00	5,82
Volume Total de Poros (cm <sup>3</sup> /kg)	0,01159	0,02125	0,01335
Diâmetro Máximo dos Poros (A)	1458,1	1320,1	1303,4
Diâmetro Médio dos Poros (A)	134,6	134,3	136,1
Coef. de Correlação	0,999860	0,999925	0,999893

Nos parâmetros fundamentais estabelecidos no ensaio de adsorção de nitrogênio utilizando a técnica B.E.T., o resultado final do ensaio é a superfície específica e possui o seu valor válido se a equação B.E.T estabelecer uma relação linear para pressões relativas P/P<sub>0</sub> até 0,35. O valor da superfície específica na técnica B.E.T. é estabelecida em função do número de moléculas de gás nitrogênio aderidas às partículas do arcabouço sólido da escória originando uma película contínua, cuja área total (ST) é dividida pela massa da amostra analisada.

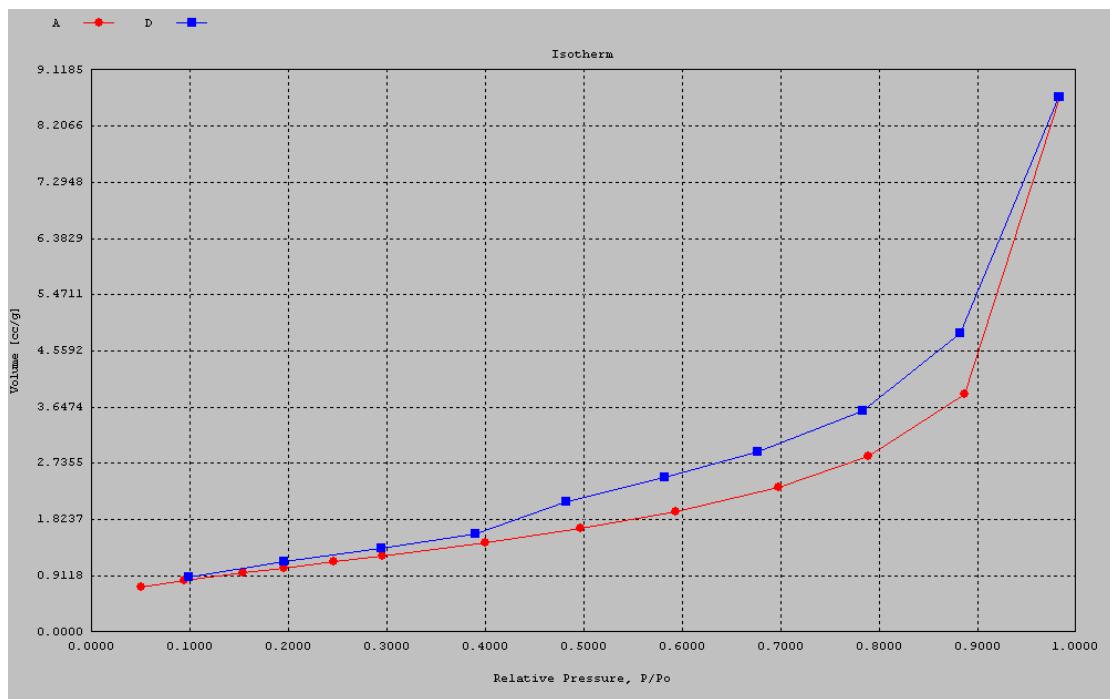
As Figuras 4.10 a 4.12 apresentam as isotermas de adsorção – dessorção das amostras das pilhas EH1; EH2 e Controle. A isoterma de adsorção e dessorção representa as variações dos volumes de nitrogênio adsorvidos em função das pressões exercidas, tanto na fase de adsorção quanto na dessorção. A forma da isoterma é correlacionada diretamente com o tamanho médio de poros e a interação adsorvente – adsorvato. A forma da histerese, entre as fases de adsorção e dessorção, é correlacionada com a forma geométrica dos poros.



**Figura 4.10 – Isoterma de adsorção – dessorção ( $N_2$  a 77K) da pilha EH1.**



**Figura 4.11 – Isoterma de adsorção – dessorção ( $N_2$  a 77K) da pilha EH2.**



**Figura 4.12 – Isoterma de adsorção – dessorção ( $N_2$  a 77K) da pilha Controle.**

As isotermas das amostras obtiveram um comportamento com tendência a ser concordantes a partir de um valor de pressão relativa  $P/P_o$  da ordem de 0,40 e a se fecharem para pressões próximas à pressão de saturação. De forma generalizada as isotermas dos materiais pesquisados podem ser classificadas como sendo do tipo IV

(classificação IUPAC – International Union of Pure and Applied Chemistry), revelando a existência conjunta de microporos, mesoporos e macroporos no arcabouço estrutural das partículas de escória estudadas nas pilhas EH1, EH2 e Controle.

Este comportamento é comum para amostras de escórias de aciaria LD com ampla faixas de granulometria e formas dos poros, onde a histerese exibida está relacionada ao preenchimento e esvaziamento dos poros por condensação capilar. A forma da histerese, mais larga ou estreita, porém inclinada, é classificada como sendo do tipo H3, indicativa da presença de microporos mais largos e principalmente de mesoporos e macroporos na forma de fendas ou placas paralelas ou espaços entre placas paralelas.

## **4.5 – CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DA ESCÓRIA DE ACIARIA**

### **4.5.1 – TESTE DE LIXIVIAÇÃO E SOLUBILIZAÇÃO**

Os resultados do ensaio de lixiviação para parâmetros inorgânicos das pilhas EH1, EH2 e Controle encontram-se apresentados nas Tabelas 4.23, 4.24 e 4.25, respectivamente.

Os resultados do ensaio de solubilização para parâmetros inorgânicos das pilhas EH1, EH2 e Controle estão indicados nas Tabelas 4.26, 4.27 e 4.28, respectivamente.

**Tabela 4.23 – Ensaio de lixiviação somente para parâmetros inorgânicos para a pilha EH1.**

Parâmetro	Valor Máximo Permitido (mg/L)	Concentração no Resíduo Lixiviado (mg/L)
Arsênio	1,0	<0,01
Bário	70,0	0,04
Cádmio	0,5	<0,001
Chumbo	1,0	<0,01
Cromo Total	5,0	<0,01
Fluoretos	150,0	1,23
Mercúrio	0,1	<0,0002
Prata	5,0	<0,01
Selênio	1,0	<0,01

**Tabela 4.24 – Ensaio de lixiviação somente para parâmetros inorgânicos para a pilha EH2.**

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

**Tabela 4.25 – Ensaio de lixiviação somente para parâmetros inorgânicos para a pilha Controle.**

Parâmetro	Valor Máximo Permitido (mg/L)	Concentração no Resíduo Lixiviado (mg/L)
Arsênio	1,0	<0,01
Bário	70,0	0,02
Cádmio	0,5	<0,001
Chumbo	1,0	<0,01
Cromo Total	5,0	<0,01
Fluoretos	150,0	0,36
Mercúrio	0,1	<0,0002
Prata	5,0	<0,01
Selênio	1,0	<0,01

**Tabela 4.26 – Ensaio de solubilização somente para parâmetros inorgânicos para a pilha EH1.**

Parâmetro	Valor Máximo Permitido (mg/L)	Concentração no Resíduo Solubilizado Amostra (mg/L)
Arsênio (mg As/L)	0,01	<0,01
Bário (mg Ba/L)	0,70	0,05
Cádmio (mg Cd/L)	0,01	<0,001
Chumbo (mg Pb/L)	0,01	<0,01
Cianeto (mg CN/L)	0,07	<0,01
Cromo Total (mg Cr/L)	0,05	<0,01
Fluoretos (mg F/L)	1,50	0,14
Mercúrio (mg Hg/L)	0,001	<0,0002
Nitrato (mg N/L)	10,00	0,06
Prata (mg Ag/L)	0,05	<0,01
Selênio (mg Se/L)	0,01	<0,01
Alumínio (mg Al/L)	0,01	<0,05
Cloreto (mg Cl/L)	250,00	9,4
Cobre (mg Cu/L)	2,00	<0,009
Ferro (mg Fe/L)	0,30	<0,1
Manganês (mg Mn/L)	0,10	<0,05
Sódio (mg Na/L)	200,00	<0,8
Sulfato (mg SO <sub>4</sub> -2/L)	250,00	1,45
Zinco (mg Zn/L)	5,00	<0,1
Surfactantes (mg MBAS/L)	0,50	0,1
Fenóis Totais (mg C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH/L)	0,01	<0,001

**Tabela 4.27 – Ensaio de solubilização somente para parâmetros inorgânicos para a pilha EH2.**

Parâmetro	Valor Máximo Permitido (mg/L)	Concentração no Resíduo Solubilizado Amostra (mg/L)
Arsênio (mg As/L)	0,01	<0,01
Bário (mg Ba/L)	0,70	0,06
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
Fluoretos (mg F/L)	1,50	0,14
Mercúrio (mg Hg/L)	0,001	<0,0002
Nitrato (mg N/L)	10,00	0,07
Prata (mg Ag/L)	0,05	<0,01
Selênio (mg Se/L)	0,01	<0,01
Alumínio (mg Al/L)	0,02	<0,05
Cloreto (mg Cl/L)	250,00	8,46
Cobre (mg Cu/L)	2,00	<0,009
Ferro (mg Fe/L)	0,30	<0,1
Manganês (mg Mn/L)	0,10	<0,05
Sódio (mg Na/L)	200,00	<0,8
Sulfato (mg SO <sub>4</sub> -2/L)	250,00	1,33
Zinco (mg Zn/L)	5,00	<0,1
Surfactantes (mg MBAS/L)	0,50	<0,1
Fenóis Totais (mg C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH/L)	0,01	<0,001

**Tabela 4.28 – Ensaio de solubilização somente para parâmetros inorgânicos para a pilha Controle.**

Parâmetro	Valor Máximo Permitido (mg/L)	Concentração no Resíduo Solubilizado Amostra (mg/L)
Arsênio (mg As/L)	0,01	<0,01
Bário (mg Ba/L)	0,70	0,06
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
Fluoretos (mg F/L)	1,50	0,32
Mercúrio (mg Hg/L)	0,001	<0,0002
Nitrato (mg N/L)	10,00	<0,05
Prata (mg Ag/L)	0,05	<0,01
Selênio (mg Se/L)	0,01	<0,01
<b>Alumínio (mg Al/L)</b>	<b>0,2</b>	<b>0,67</b>
Cloreto (mg Cl/L)	250,00	9,87
Cobre (mg Cu/L)	2,00	<0,009
Ferro (mg Fe/L)	0,30	<0,1
Manganês (mg Mn/L)	0,10	<0,05
Sódio (mg Na/L)	200,00	<0,8
Sulfato (mg SO <sub>4</sub> -2/L)	250,00	2,58
Zinco (mg Zn/L)	5,00	<0,1
Surfactantes (mg MBAS/L)	0,50	<0,1
Fenóis Totais (mg C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH/L)	0,01	<0,001

Em conformidade com as prescrições das normas NBR 10004/2004, 10005/2004 e 10006/2004, pode-se ressaltar que o material analisado da pilha EH1 é classificado como Classe IIB (Não Perigoso – Inerte) por não possuir nenhum dos seus constituintes solubilizados à concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água. E ainda pode-se considerar que a amostra não é corrosiva e também não é reativa por não apresentar as características que indicam tal propriedade.

A amostra analisada da pilha EH2 também foi classificada como Classe IIB (Não Perigoso – Inerte), pois não apresenta nenhum dos seus constituintes solubilizados acima das concentrações dos padrões de potabilidade de água, sendo também não corrosiva e não reativa.

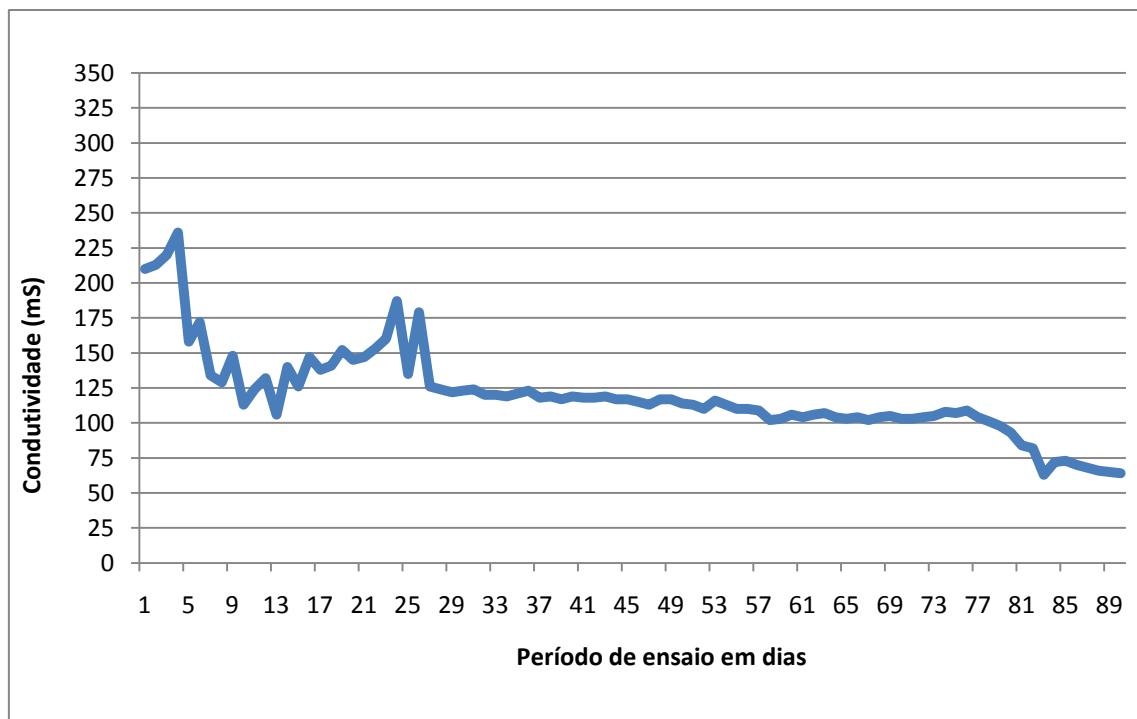
O material avaliado da pilha Controle foi classificado como Classe IIA (Não Perigoso – Não Inerte), por apresentar o parâmetro alumínio na amostra solubilizada em concentração superior ao fixado para os padrões de potabilidade de água. No entanto não apresentou características corrosivas e nem reativas.

## **4.6 – AVALIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE E DA EXPANSIBILIDADE DA ESCÓRIA DE ACIARIA**

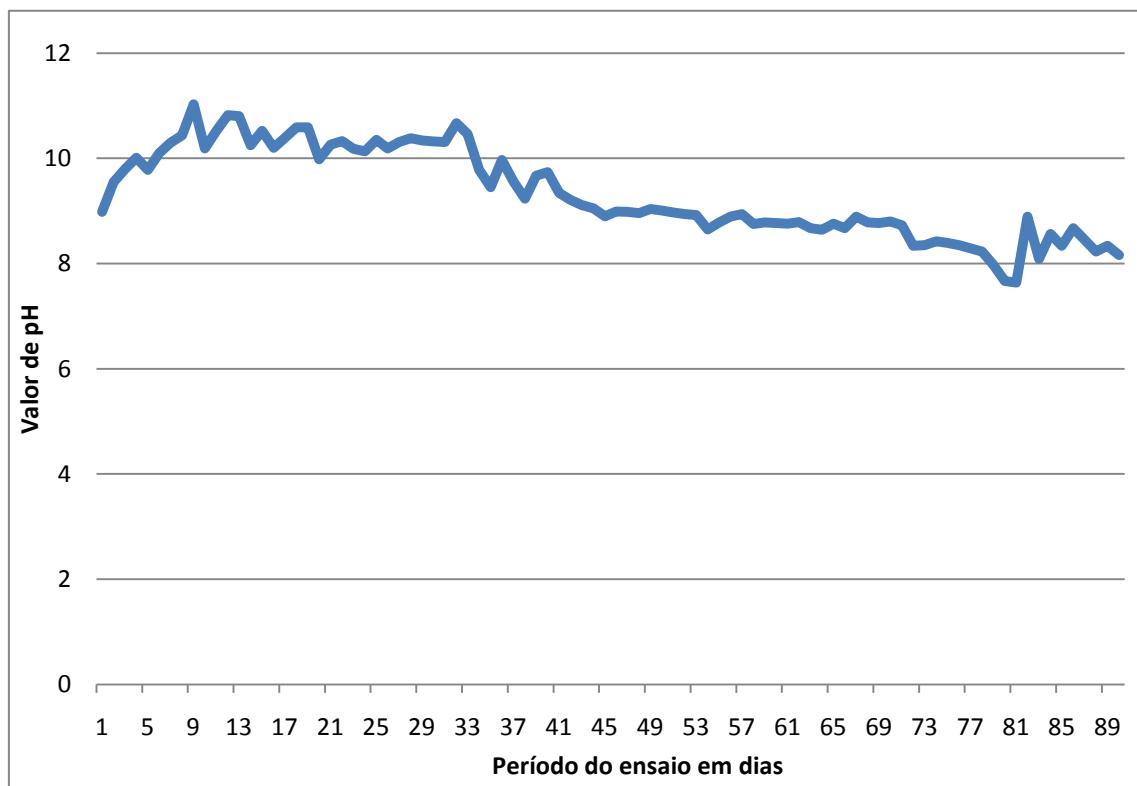
### **4.6.1 - AVALIAÇÃO DO EFEITO DA CURA SOBRE A CONDUTIVIDADE**

A condutividade aponta para o nível de solubilidade de sais ou outros compostos em ambiente aquático. Dessa maneira, avaliando-se este parâmetro em água doce, pode-se co-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, os valores de condutividade variam da ordem de 20 a 70  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (FATMA, 2007).

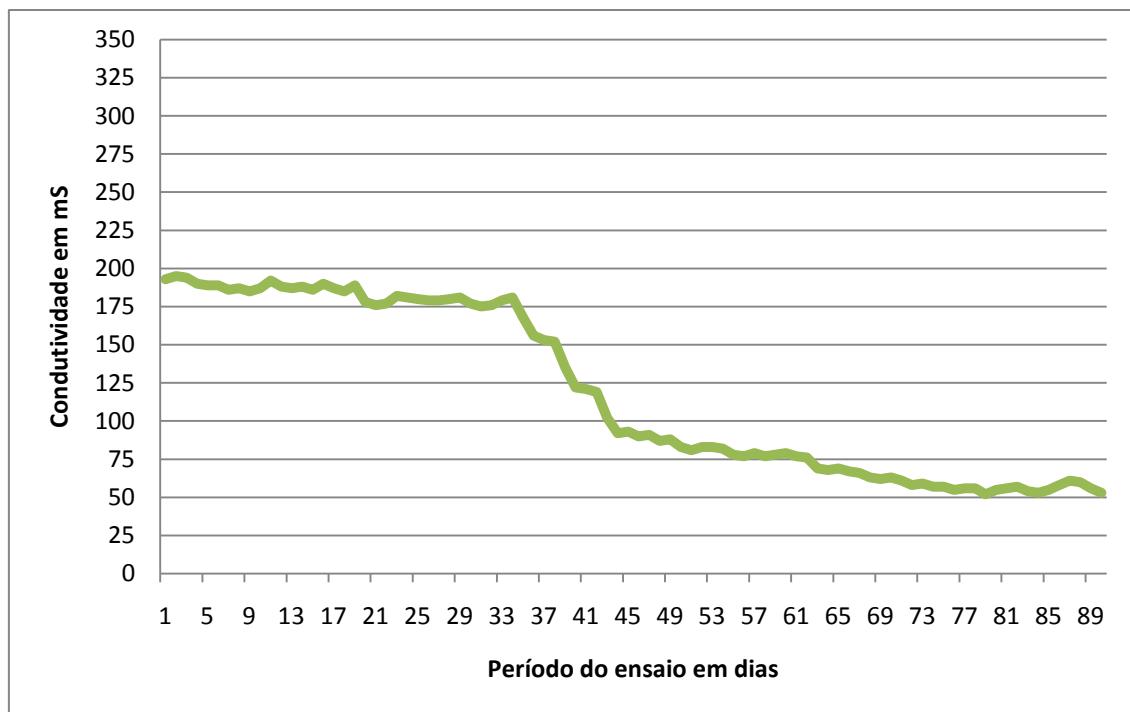
Sendo assim, os resultados obtidos por meio do monitoramento da condutividade no período de três meses das escórias das pilhas EH1, EH2 e Controle estão apresentados nas Figuras 4.13 à 4.18 estes dados são referentes ao segundo dia após o enchimento dos tanques utilizados, num total de 14 ciclos de carga e descarga. Os ciclos de ensaios tiveram uma duração de 3 a 10 dias, sendo que o pH, a temperatura interna e externa dos tanques também foram monitorados.



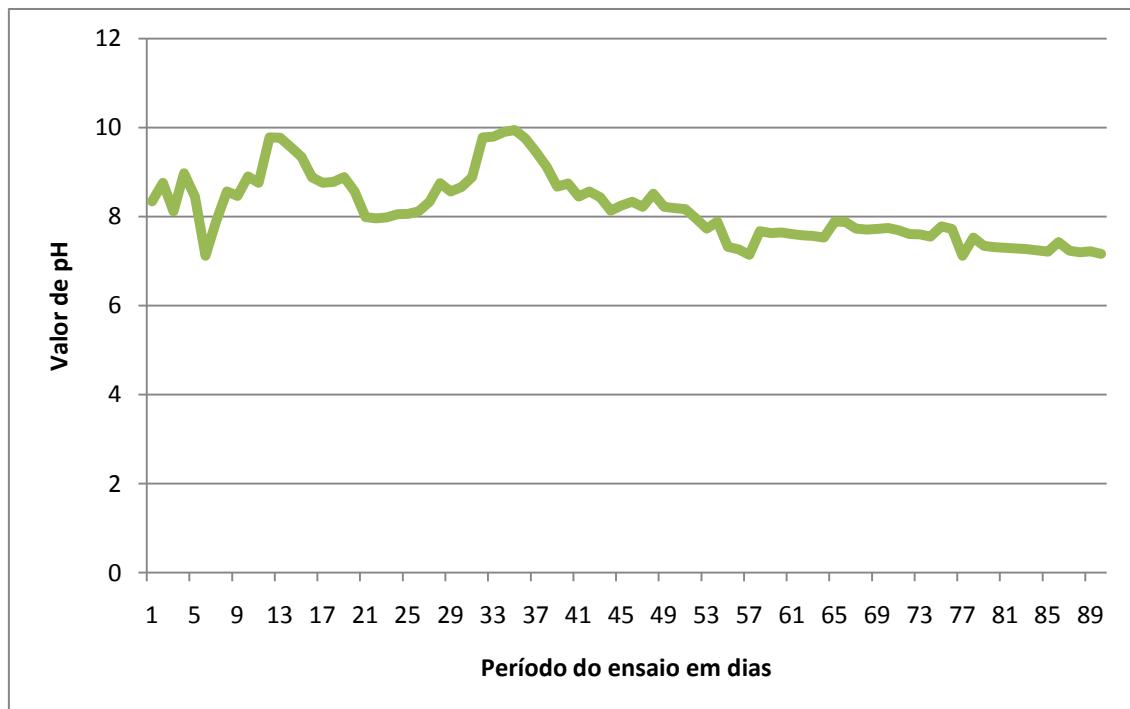
**Figura 4.13 – Monitoramento da condutividade do material da pilha EH1.**



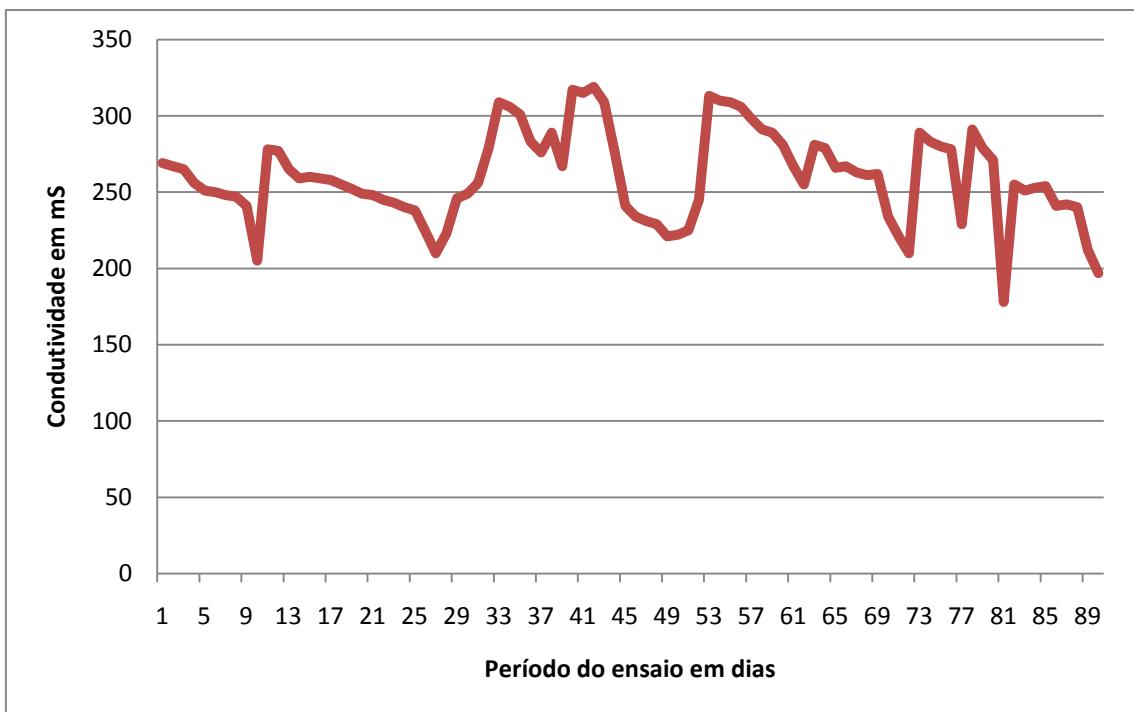
**Figura 4.14 – Monitoramento do pH do material da pilha EH1.**



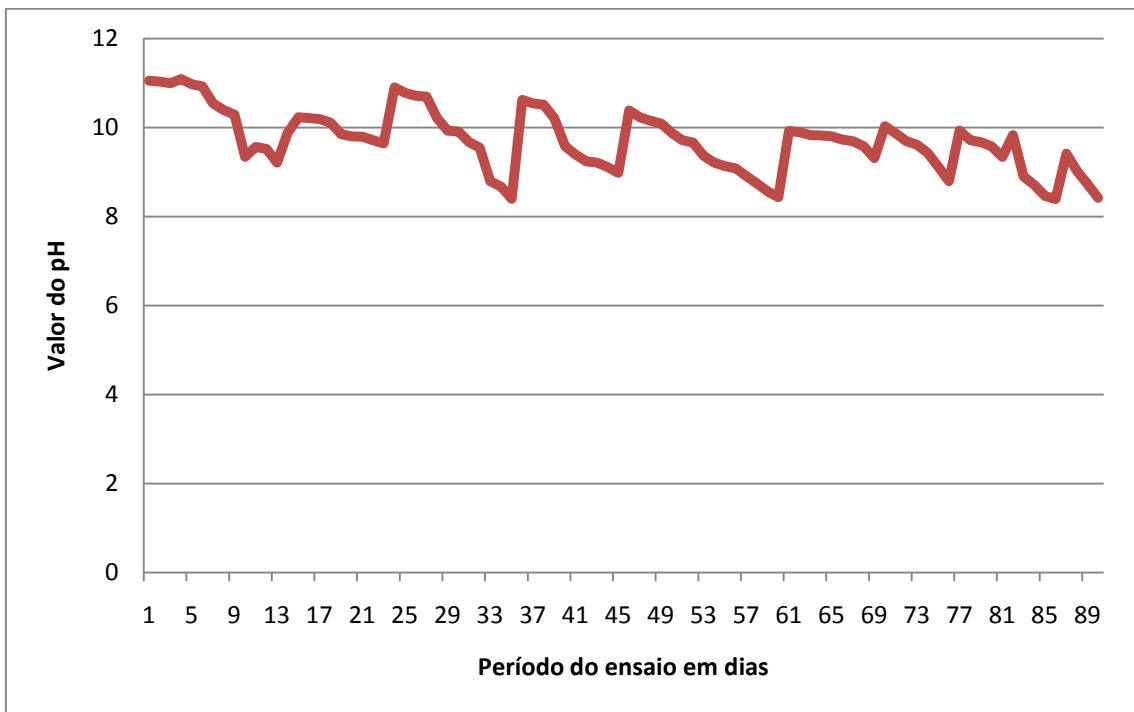
**Figura 4.15 – Monitoramento da condutividade do material da pilha EH2.**



**Figura 4.16 – Monitoramento do pH do material da pilha EH2.**



**Figura 4.17 – Monitoramento da condutividade do material da pilha Controle.**



**Figura 4.18 – Monitoramento do pH do material da pilha Controle.**

O material da pilha Controle apresentou uma condutividade maior que a das pilhas EH1 e EH2, durante todo o período do monitoramento, com valores de pH que variaram entre 8 e 11; os valores encontrados para esta pilha se justificam em função da natureza do material que não foi submetido a nenhum tipo de tratamento, recebendo apenas a precipitação da região como forma de reduzir os teores de cal livre e óxido de magnésio.

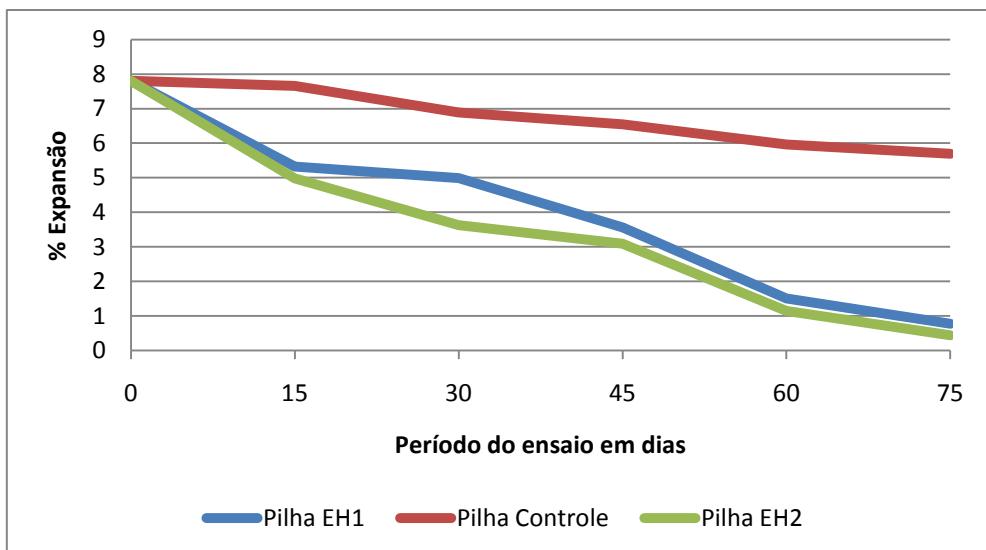
As pilhas EH1 e EH2, por sua vez, apresentaram um comportamento descendente com os valores diminuindo à medida que o ensaio se desenvolvia. Os valores de pH alteraram entre 7 e 10 para a pilha EH2 e entre 7 e 11 para a pilha EH1. A hidratação e carbonatação empregadas no tratamento das pilhas EH1 e EH2 foram relevantes para minimizar os valores de condutividade e de pH, para valores menores que o da água potável.

#### **4.6.2 – AVALIAÇÃO DE EXPANSIBILIDADE PELO MÉTODO PTM 130/78 ADAPTADO PELO DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE MINAS GERAIS (DMA – 1/DER-MG /92)**

Como relatado, os ensaios em conformidade com o método DMA – 1/DER-MG /92 empregam corpos-de-prova cilíndricos compactados, submetidos à temperatura de  $71 \pm 3^{\circ}\text{C}$  durante um período total de quatorze dias. Os resultados dos ensaios estão apresentados na Tabela 4.29. Os ensaios foram executados a cada 15 dias conforme coleta realizada nas pilhas EH1, EH2 e Controle e plotados no gráfico da Figura 4.19 com o período total do monitoramento para PTM-130/78.

**Tabela 4.29 – Monitoramento da expansão pelo método DMA – 1/DER-MG /92.**

Dias de Monitoramento	Expansão PTM-130		
	Pilha EH1	Pilha EH2	Pilha Controle
0	7,81	7,81	7,81
15	5,32	4,98	7,66
30	4,99	3,63	6,89
45	3,56	3,09	6,55
60	1,51	1,15	5,96
75	0,78	0,44	5,69



**Figura 4.19 – Monitoramento do ensaio de PTM-130/78 para todas as pilhas estudadas.**

Os resultados do ensaio de PTM-130 demonstraram que as pilhas EH1 e EH2 começaram com uma expansão alta no final dos quatorze dias de medidas. No entanto, conforme o tratamento com hidratação e carbonatação nas pilhas se desenvolvia o comportamento expansivo do material ia se reduzindo; e a partir dos 45 dias de tratamento ficou abaixo do preconizado por norma, que é de 3%. Dessa maneira, verifica-se que as reações esperadas por hidratação e carbonatação ocorreram e modificaram o caráter expansivo que o material apresentava sem tratamento. A Figura 4.20, apresenta uma seqüência de fotos para ilustrar a expansão provocada pelo tratamento e a passagem da água pela partícula de escória de aciaria.



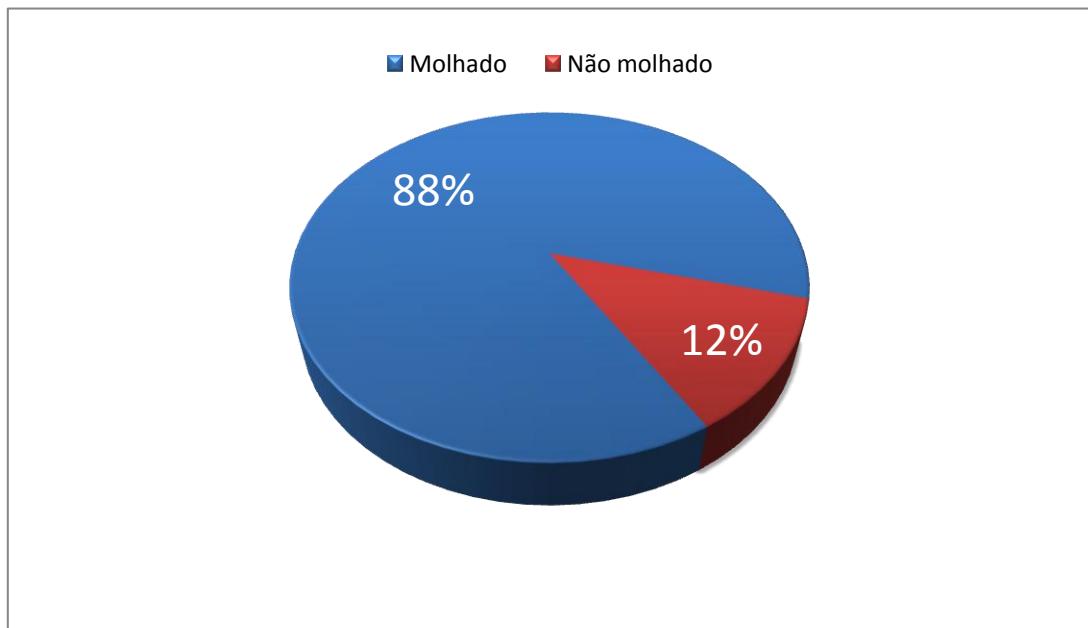
**Figura 4.20 – Sequência de fotos mostrando a expansão e a passagem de água pelo material.**

O material da pilha Controle, como não recebeu tratamento específico, ficando submetido apenas às intempéries atmosféricas locais, como por exemplo à precipitação, não apresentou uma mudança significativa no seu comportamento expansivo. Dessa forma, terminou o período de monitoramento com 5,69% de expansão, valor acima do estabelecido por norma.

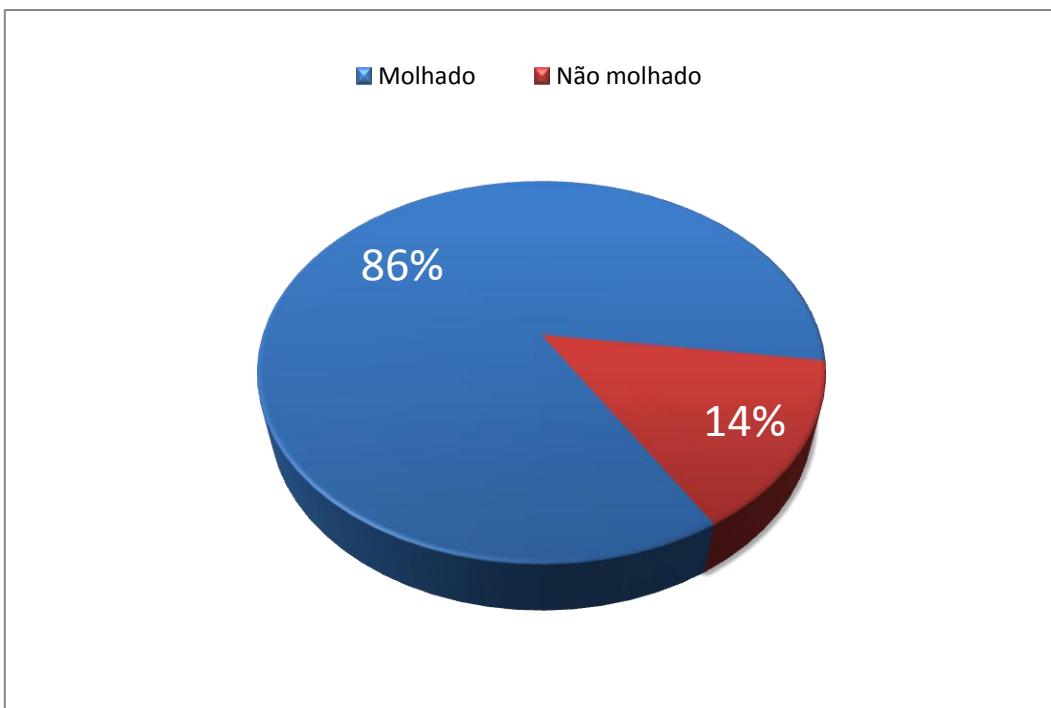
#### **4.7 – MONITORAMENTO DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS DE CAMPO**

A presença de cal livre e óxido de magnésio em grandes concentrações geram problemas de expansão que limitam a utilização deste material como lastro ferroviário. Nesse sentido, este trabalho teve como objetivo submeter à escória de aciaria LD a um processo de tratamento baseado na literatura e acompanhar por meio de um sistema de coleta de dados e monitoramento de campo o desenvolvimento da cura do material.

O sistema de coleta de dados implantado nas pilhas EH1 e EH2 no pátio de beneficiamento da escória de aciaria LD eram compostos por sensores de molhamento foliar, temperatura e precipitação. Os gráficos que ilustram o quanto as pilhas ficaram molhadas durante o período de tratamento estão apresentados nas Figuras 4.21 e 4.22.



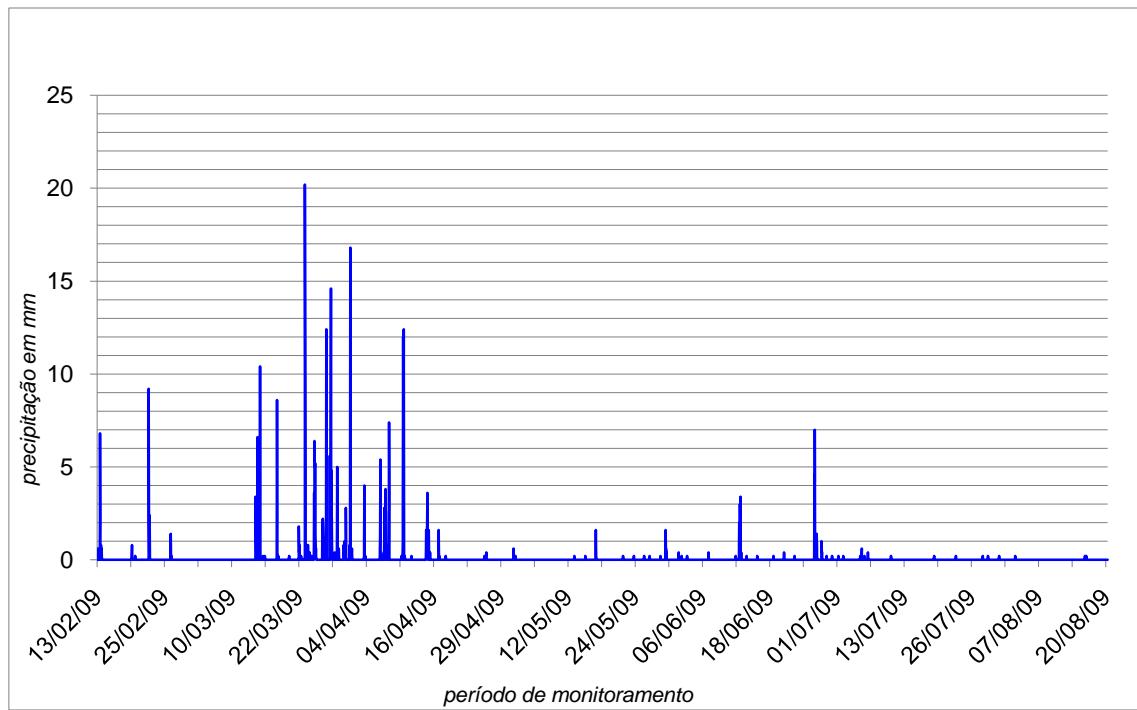
**Figura 4.21 – Gráfico que ilustra o quanto a pilha EH1 ficou molhada.**



**Figura 4.22 – Gráfico que ilustra o quanto a pilha EH2 ficou molhada.**

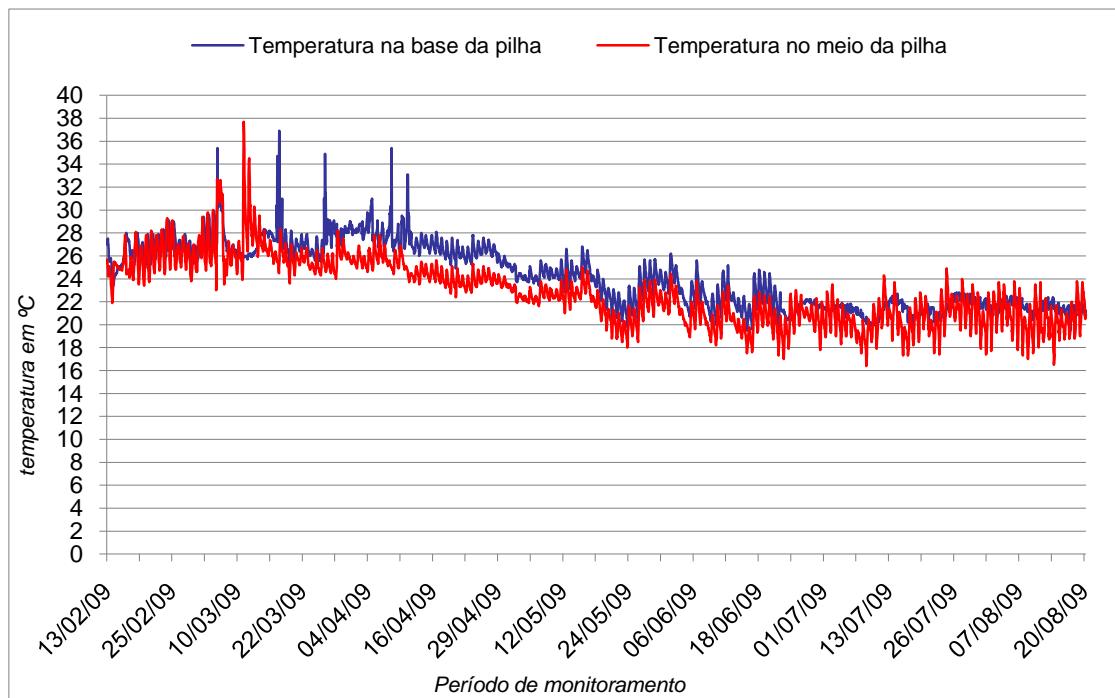
Com a Figura 4.21, verifica-se que em 88% do período de tratamento da pilha EH1, ela esteve totalmente hidratada por meio do sistema de aspersão e que em 12% do mesmo período, ela não esteve totalmente hidratada. Já com a figura 4.22, nota-se que em 86% do período de tratamento da pilha EH2, ela esteve totalmente hidratada por meio do sistema de aspersão e que em 14% do mesmo período, ela não esteve totalmente hidratada. Este período em que as pilhas não estavam completamente umectadas refere-se a problemas de energia no pátio de beneficiamento de escória e que afetavam o sistema desarmando a bomba hidráulica que aspergia água nas pilhas. O sistema de coleta de dados continuava operando em função da célula eletrovoltaica instalada e permitia identificar os momentos em que as pilhas não estavam completamente hidratadas.

O acompanhamento da precipitação ocorrida no pátio de beneficiamento está apresentado na Figura 4.23. Este gráfico foi obtido por meio de um pluviômetro instalado junto ao sistema de aspersão. O pluviômetro utilizado era composto por um sensor de precipitação tipo báscula construído em plástico ABS, possibilitando o monitoramento automático e contínuo do volume pluviométrico disponibilizando dados de máxima, mínima e média intensidade de chuvas no período.

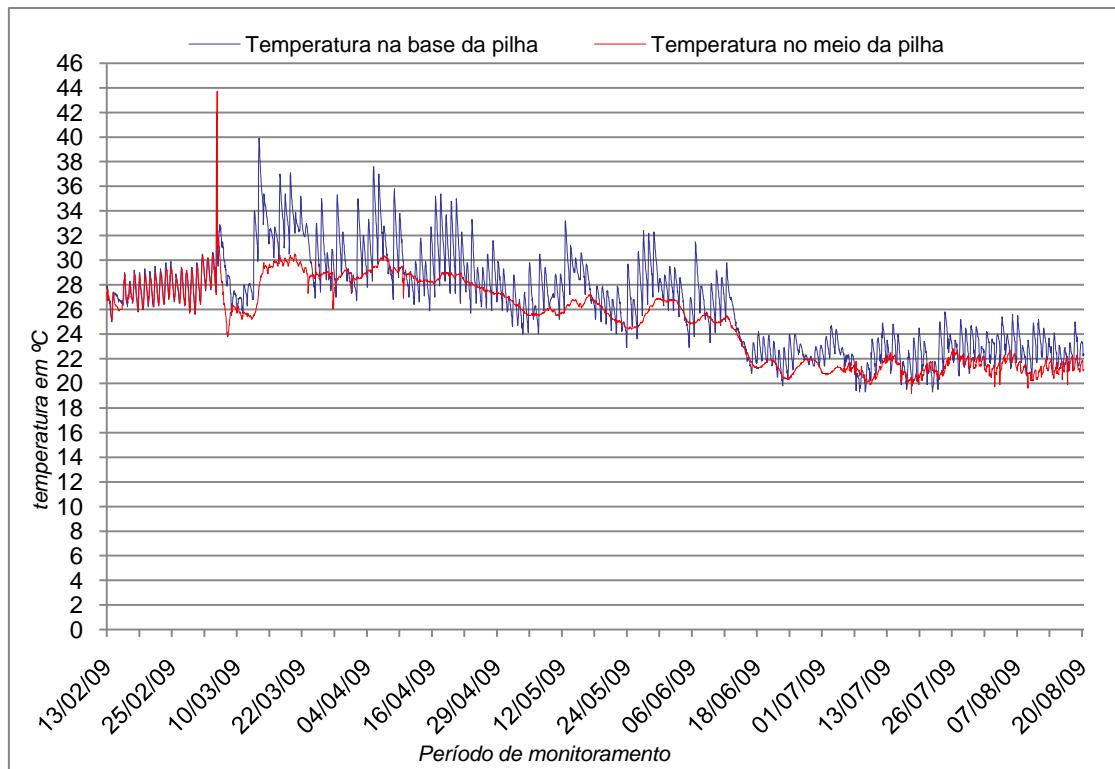


**Figura 4.23 – Monitoramento da precipitação pluviométrica.**

A temperatura das pilhas EH1 e EH2 foram acompanhadas durante todo o período de cura do material no pátio de beneficiamento. As Figuras 4.24 e 4.25 apresentam os gráficos para as pilhas EH1 e EH2 respectivamente.

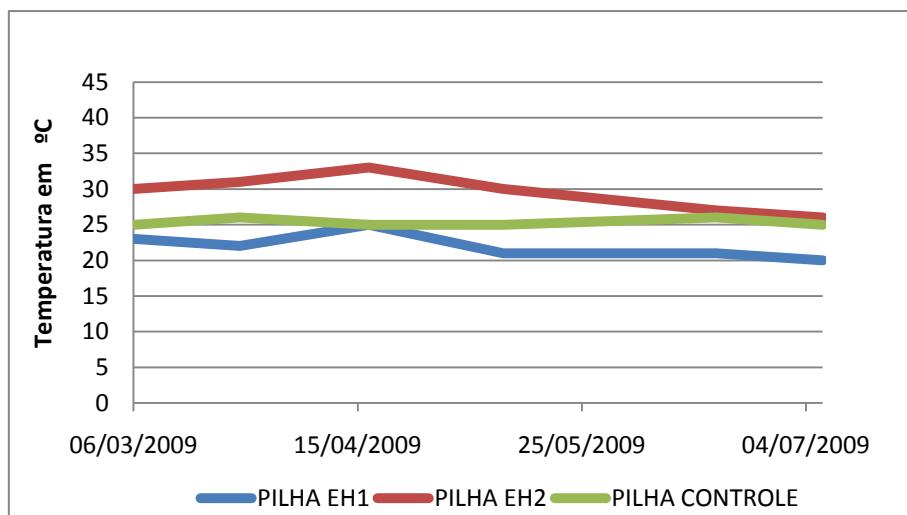


**Figura 4.24 – Monitoramento da temperatura na base e no meio da pilha EH1.**



**Figura 4.25 – Monitoramento da temperatura na base e no meio da pilha EH2.**

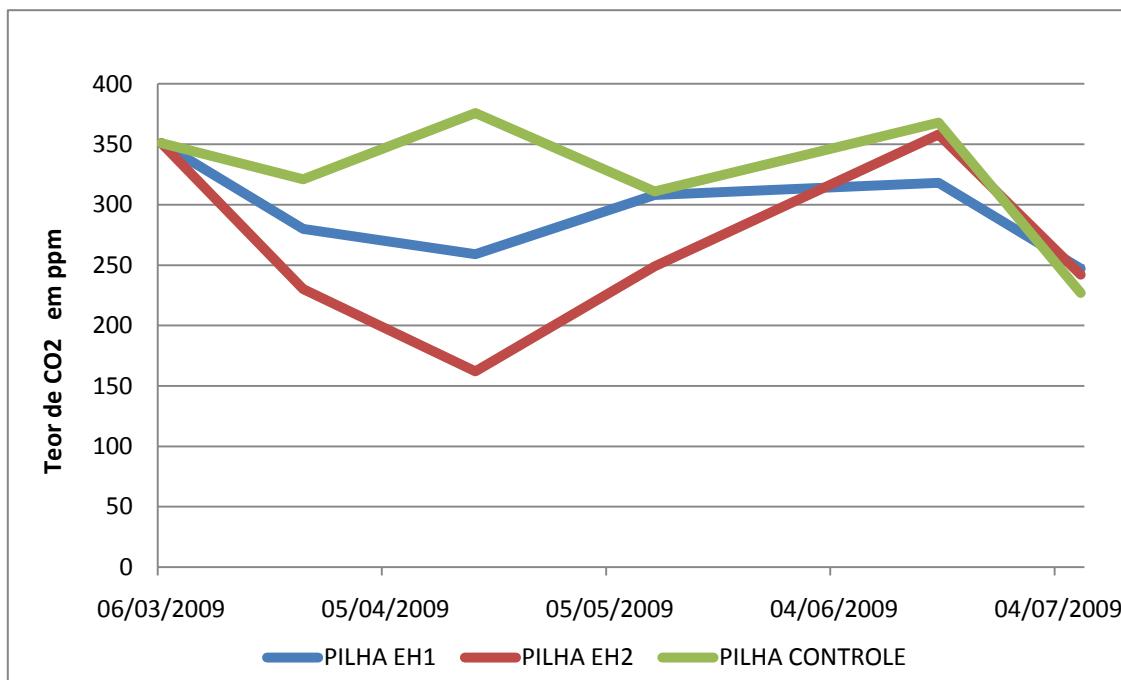
O monitoramento das condições ambientais no pátio de beneficiamento de escória de aciaria LD foi realizado por meio de campanhas de campo periódicas para coleta de material das pilhas EH1, EH2 e Controle. Nestas campanhas, eram realizadas medições de campo referentes à temperatura externa das pilhas, ao teor de CO<sub>2</sub> na área das pilhas e umidade relativa do ar. A Figura 4.26 apresenta a temperatura externa medida nas pilhas EH1, EH2 e Controle.



**Figura 4.26 – Monitoramento da temperatura externa das pilha EH1, EH2 e Controle.**

Por meio do gráfico, pode-se ressaltar que a temperatura na pilha EH2 foi a mais alta entre as pilhas, ficando entre 25 e 35°C. A pilha Controle teve a temperatura variando entre 25 e 30 °C. Já a pilha EH1 foi a que teve a menor temperatura entre as pilhas estudadas, alternando entre 20 e 25 °C. A temperatura constitui um parâmetro importante para análises na pesquisa, pois afeta a cinética das reações de hidratação e carbonatação necessárias para a estabilização do material e consequente redução da expansão.

A Figura 4.27 apresenta o teor de CO<sub>2</sub> que foi registrado em cada campanha de campo no pátio de beneficiamento de escória. Este valor foi medido por meio do medidor de CO<sub>2</sub>, posicionado no topo das pilhas EH1, EH2 e Controle.

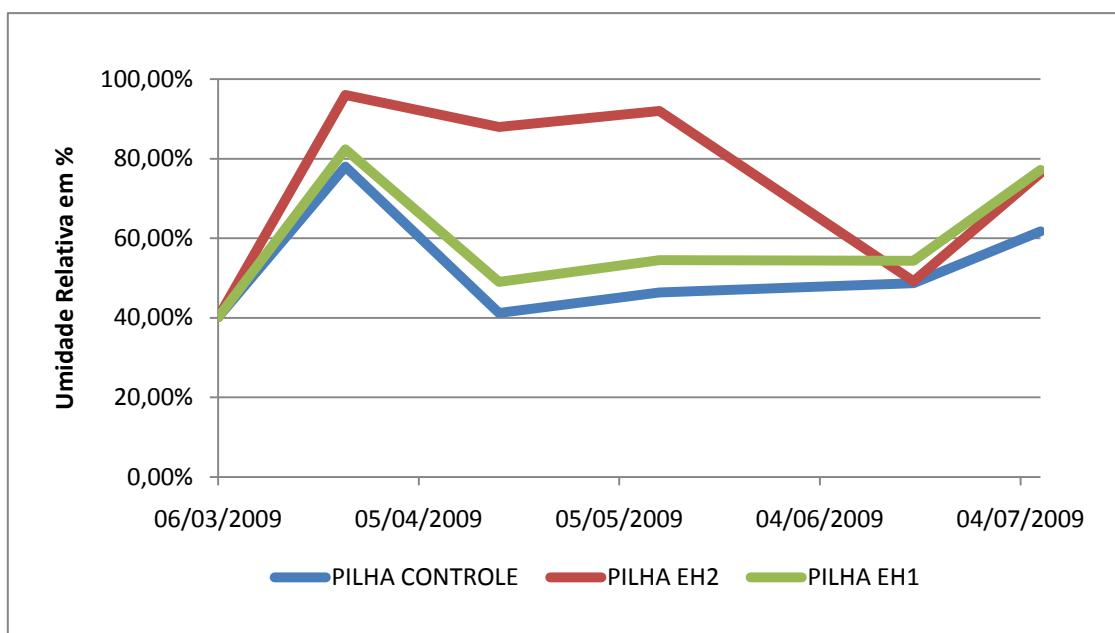


**Figura 4.27 – Monitoramento do CO<sub>2</sub> nas pilhas EH1, EH2 e Controle.**

Observa-se pelo gráfico que houve uma sensível queda no teor de CO<sub>2</sub> presente na pilha EH2, este fato pode ser relacionado com a ocorrência da reação de carbonatação que transforma o óxido de cálcio livre em carbonato de cálcio na reação com o CO<sub>2</sub> e contribui para diminuir a expansão do material. Na pilha EH1 houve no começo do monitoramento uma queda no teor de CO<sub>2</sub>, porém à medida que a campanha de ensaios foi se desenvolvendo o valor retornou para níveis mais altos. Para a pilha Controle não foram registrados valores que apontassem para uma possível reação de carbonatação na escória. Dessa maneira, constata-se também que os teores de CO<sub>2</sub> para as duas pilhas

variaram entre 250 e 400 ppm, valores atualmente encontrados em regiões com grande atividade industrial.

A Figura 4.28 apresenta os dados sobre umidade relativa do ar coletados nas campanhas de campo realizadas durante o monitoramento das pilhas EH1, EH2 e Controle. A umidade relativa do ar também foi registrada por meio do medidor de CO<sub>2</sub>.



**Figura 4.28 – Monitoramento da umidade relativa nas pilhas EH1, EH2 e Controle.**

Por meio do gráfico de umidade relativa das pilhas, pode-se verificar que o sistema de aspersão nas pilhas EH1 e EH2 foi bastante eficiente, mantendo o valor de umidade freqüentemente acima de 50% na pilha EH1 e acima de 80% na pilha EH2, a pilha Controle esteve regularmente próximo aos 40% de umidade relativa, com picos de 60% de umidade relativa. Na região da pesquisa a umidade relativa do ar se encontra em torno de 30% em dias ensolarados.

## CAPÍTULO 5

---

---

### 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A reutilização e a reciclagem de co-produtos siderúrgicos para outras finalidades dentro da engenharia oferecem diversas vantagens sob o ponto de vista da sustentabilidade, considerando-se como fatores positivos para o meio ambiente, a redução de áreas degradadas pela disposição dos mesmos e a preservação dos recursos naturais. No caso específico da escória de aciaria LD, o seu reaproveitamento diminui o volume de material que é destinado para o aterro industrial, minimiza os danos ambientais e reduz a quantidade de brita que é lavrada em pedreiras, e gera ainda recursos financeiros para a siderúrgica, pois se trata de um produto mais barato para a construção ou manutenção da ferrovia. Este fato estimula a aplicação dos escassos recursos financeiros típicos de países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil, em áreas como a pesquisa em agregados.

As vantagens econômicas do emprego de escórias como agregados para ferrovias são resultantes das possibilidades de implantação de camada mais graúda de lastro e sublastro e mais fina para a mesma resistência à carga/compressão e durabilidade, em relação à aplicação de materiais convencionais, como areia e brita. Evidentemente, o custo do transporte até a obra é um fator determinante na escolha do agregado pelo projetista.

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões referentes ao estudo da viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria LD tratada com processo de hidratação e carbonatação como lastro ferroviário, com base nos resultados evidenciados no Capítulo 4 desta dissertação.

As conclusões referentes à primeira parte do estudo abrangem a caracterização física, mecânica, química, ambiental, além da avaliação da condutividade e da expansibilidade das escórias tratadas.

As conclusões referentes à segunda parte do estudo abrangem o monitoramento ambiental de campo realizado no pátio de beneficiamento de escória.

## **5.1 – CONCLUSÕES REFERENTES À CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, MECÂNICA, QUÍMICA, AMBIENTAL E AVALIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE E DA EXPANSIBILIDADE**

Analizando os resultados alcançados nos ensaios de caracterização física das amostras de escória de aciaria estudadas, verifica-se claramente uma diferença de qualidade entre os materiais das pilhas EH1 e EH2 em relação ao material da pilha Controle adotado no estudo como referência de tratamento aplicado pelas siderúrgicas. Os materiais EH1, EH2 e Controle enquadram-se em quase todos os requisitos para lastro padrão, com certas deficiências em algumas especificações determinadas por normas. A Tabela 5.1 apresenta o resumo das propriedades encontradas e o seu enquadramento nas especificações.

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

Propriedade	NBR 5564 (Lastro Padrão)	Manual AREMA, 2002	Controle	EH1	EH2
		Escória			
Massa específica aparente mínima (KN/m <sup>3</sup> )	24	29	34,3	34,4	33,42
Absorção de água máxima (%)	1%	2%	1,06	1,66	1,29
Porosidade aparente máxima (%)	1%	-	2,7	4,2	3,2
Los Angeles máxima (%)	40	30	15,46	13,14	13,77
Treton máximo (%)	20%	-	7,14	7,74	12,04
Formato da partícula.	cúbica	cúbica	cúbica	cúbica	cúbica
Resistência às intempéries (%)	-	5	1,83	0,74	1,31
Partículas lamelares (%)	10	5	0	0	0
Torrões de argila (%)	0,5	0,5	0,12	0,12	0,17
Frag. macios e friáveis (%)	5	5	5,7	5,1	4,77

Verifica-se que o tratamento empregado na escória produz um material com granulometria em desconformidade com a faixa recomendada para lastro padrão. Este fato pode ser revertido com a passagem da escória nas peneiras do britador, eliminando assim as frações indesejáveis. Constata-se também que, em termos de resistência mecânica, os três materiais estudados atendem às funções de lastro.

Os resultados da difração de raio X mostraram que nos materiais EH1 e EH2 existem compostos hidratados que não gerariam expansão, enquanto que no material da pilha Controle existem fases mineralógicas não hidratadas propensas a expansão. Para as análises químicas quantitativas mostrou-se que os valores obtidos estão em conformidade com as faixas dos limites alcançados em estudos de outros pesquisadores. Houve ainda uma redução na porcentagem em massa para várias espécies químicas estudadas, inclusive o CaO e o MgO. A microscopia de varredura eletrônica confirmou em seus resultados a redução dos óxidos que geram expansão e também de outros óxidos que são danosos ao meio ambiente em grandes concentrações. O ensaio de teor de cal livre demonstrou que com a hidratação e carbonatação os valores de cal livre assumem um comportamento decrescente.

As escórias estudadas nas pilhas EH1 e EH2 foram classificadas ambientalmente como resíduos do tipo Classe IIB (resíduo não perigoso – inerte), o que significa que seu uso é permitido como material de lastro, sem maiores cuidados. No entanto, o material da pilha Controle foi classificado ambientalmente como resíduo Classe IIA (resíduo não perigoso – não inerte), significando que a sua aplicação é autorizada para lastro ferroviário, porém com os devidos cuidados para que nem o solo nem rios e aquíferos sejam contaminados pela utilização.

Para os ensaios de condutividade, os materiais EH1 e EH2 apresentaram resultados que no final do período de análise estavam em conformidade com o prescrito por norma que é de  $70\mu\text{S}/\text{m}$ . O material da pilha Controle não se enquadrou na prescrição da norma em momento algum do monitoramento, porém apresentava um comportamento decrescente para cada ciclo que era registrado.

No ensaio de expansão PTM-130, os dados registrados mostraram que os materiais das pilhas EH1 e EH2 apresentaram um comportamento decrescente no valor de expansão, atingindo no final do monitoramento valor muito abaixo dos 3% estabelecidos por

norma. O material da pilha Controle também apresentou registros decrescentes para o ensaio, no entanto, este fato se deve a precipitação ocorrida no período de monitoramento e que contribuiu para uma possível reação de hidratação, mesmo assim, a intensidade na redução dos valores de expansão foi muito maior para os materiais EH1 e EH2.

## **5.2 – CONCLUSÕES REFERENTES AO MONITORAMENTO AMBIENTAL DE CAMPO**

A partir do monitoramento de campo realizado durante 180 dias no pátio de beneficiamento de escória de aciaria LD, foi possível verificar que o sistema de aspersão implementado obteve uma boa eficiência na hidratação das pilhas estudadas, pois em aproximadamente 90% do tempo de operação, os materiais estiveram molhados.

Os registros de precipitação coletados durante o período de monitoramento demonstraram que na estação do verão houve a maior quantidade de chuvas com volumes variando de 2 a 21mm. Após a estação do verão, ocorreram chuvas isoladas com volumes pouco significativos. Com o maior evento de chuva chegando a 7mm no inverno. Os dados de precipitação são relevantes para comparar os valores de expansão e o teor de cal dos materiais estudados obtido por meio da aspersão mecanizada implementada nas pilhas EH1 e EH2 e por precipitação na pilha Controle.

Os sensores de temperatura instalados nas pilhas mostraram que os materiais EH1, EH2 estiveram durante todo o período de monitoramento com altas temperaturas, evidenciando uma contribuição positiva para a cinética das reações de hidratação e carbonatação que ocorreram nas pilhas pesquisadas.

A concentração de CO<sub>2</sub> medida nas três pilhas pesquisadas mostrou que na pilha EH2 a concentração registrada foi bem menor que a verificada nas outras pilhas. Dessa forma, relaciona-se essa diminuição na concentração de CO<sub>2</sub> com a reação de carbonatação que favorece a cura da escória de aciaria. Nas outras pilhas estudadas, não foi verificado valores que apontassem para uma possível reação de carbonatação.

O monitoramento da umidade relativa do ar realizado em todas as pilhas evidenciou que o material EH2 esteve na maioria do tempo com umidade próxima a 90%, o que

evidencia a cobertura implantada na pilha, o material EH1 esteve com a umidade relativa do ar freqüentemente acima dos 50% e o material da pilha Controle esteve com a umidade relativa acima de 40%. Este valor de umidade é reflexo da aspersão de água nas pilhas EH1 e EH2.

## CAPÍTULO 6

---

---

### 6 – CONCLUSÕES

O estudo realizado buscou implementar uma metodologia de tratamento em escória de aciaria LD para adequar as características físicas, mecânicas, químicas ambientais visando aplicar o co-produto como lastro ferroviário em vias sinalizadas, e assim acabar com as ocorrências de paralisação do tráfego ferroviário devido às perdas de eletricidade, especialmente em períodos chuvosos. Nesse sentido, foi executado um amplo programa de campo com a montagem de pilhas experimentais instrumentadas para acompanhamento das variáveis que influenciam o processo de tratamento. E ainda a realização de uma extensa campanha de ensaios laboratoriais envolvendo a caracterização física, mecânica, química, ambiental, condutividade elétrica e a expansibilidade. Por meio das análises desses ensaios e do programa de campo, foram obtidas as seguintes conclusões:

- A metodologia de tratamento químico baseada na hidratação temporizada e na carbonatação alcançou pleno êxito com comprovação por meio de ensaios mecânicos realizados e também pela grande geração de finos com altos índices de quebra das partículas em todas as faixas das peneiras no ensaio de granulometria, atestando a eficiência do tratamento químico e evidenciando uma melhoria no desempenho mecânico da escória.
- Os materiais das pilhas de escórias de aciaria EH1 e EH2, estudadas após estabilização química por meio de hidratação e carbonatação, não se enquadram em todos os índices prescritos na norma lastro padrão NBR 5564 (EB -655/91), as principais deficiências foram no ensaio de granulometria, pela geração de finos que a estabilização produz, no ensaio de porosidade aparente e no ensaio de fragmentos macios e friáveis. Nesse sentido, para resolver a deficiência no ensaio de granulometria, se faz necessário submeter a escória já estabilizada a nova passagem pela planta de beneficiamento, onde nas peneiras vibratórias, se executaria uma nova classificação granulométrica do material. Para o caso do ensaio de porosidade aparente e fragmentos macios e friáveis, a

deficiência apresentada pode ser corrigida com ajustes no processo de industrialização e no resfriamento da escória. Dessa forma, ressalta-se que a escória possui relevante competência do ponto de vista físico para ser aplicada como lastro ferroviário, pois as deficiências apresentadas podem ser corrigidas no processo de fabricação.

- As amostras das pilhas EH1 e EH2 demonstraram uma grande competência mecânica para a função de lastro, os resultados obtidos mostram que a estabilização melhorou o desempenho nos principais índices avaliados.
- No que se refere à caracterização química dos materiais das pilhas EH1 e EH2, pode-se concluir que o tratamento a partir da hidratação e carbonatação contribuíram para uma sensível redução dos teores de óxido de cal livre e de óxido de magnésio presentes na composição química da escória. Este fato é comprovado pelos ensaios de difração de raio X, análise quantitativa e microscopia de varredura eletrônica que apresentaram compostos hidratados nas amostras das pilhas EH1 e EH2. Outro importante parâmetro que atestou a estabilização da escória foram os ensaios de teor de cal livre e o ensaio PTM-130 que apresentaram resultados em conformidade com os limites estabelecidos por norma.
- A estabilização química desenvolvida nos materiais das pilhas EH1 e EH2 contribuiu para uma mudança na classificação ambiental da escória de aciaria LD que antes era IIA e tornou-se IIB
- A avaliação da condutividade elétrica realizada nas escórias estabilizadas exibiu valores em conformidade com o prescrito por norma após o período de monitoramento de 90 dias. Portanto, a estabilização química promoveu resultados significativos em termos de condutividade elétrica do material.
- No que se refere ao monitoramento da campanha de campo realizada conclui-se pelos sensores instalados que as pilhas experimentais estiveram freqüentemente molhadas contribuindo para a reação de hidratação. A lona colocada vedando o material da pilha EH2 favoreceu a reação de carbonatação no material, resultando numa queda na concentração de CO<sub>2</sub> comprovada por meio do aparelho medidor. Outro registro importante é a quantidade de

precipitação que ocorreu no período da campanha de campo, dessa forma, verifica-se que aconteceram chuvas mais intensas na estação do verão e algumas chuvas isoladas na estação do inverno. Estas chuvas permitiram ao material da pilha Controle uma pequena diminuição no teor de cal livre presente na sua composição e uma redução na expansibilidade registrada no ensaio PTM-130. No entanto, ficou evidente que a estabilização química implantada no pátio de beneficiamento promoveu uma cura mais eficiente e mais rápida para o óxido de cal livre e para o óxido de magnésio presente na composição dos materiais das pilhas EH1 e EH2.

- As altas temperaturas registradas por meio dos sensores e da datalogger permitiram concluir que a cinética da reação de hidratação e carbonatação foram favorecidas e ocorreram de forma mais intensa.
- Por meio dos ensaios de teor de cal livre e de PTM-130 foi possível verificar que o material da pilha EH2 obteve o melhor desempenho de estabilização entre as pilhas pesquisadas no trabalho, pois apresentou no período de monitoramento o menor valor de expansão no ensaio PTM-130 e também o menor teor de cal livre. Em segundo lugar, ficou a pilha EH1 que também obteve uma estabilização bastante eficiente. Em terceiro lugar ficou a pilha Controle que não apresentou uma estabilização eficiente dos óxidos instáveis presentes na composição do material, este fato ficou evidenciado pelo alto teor de cal livre e também pela expansão em desconformidade com os 3% estabelecidos por norma. Além disso, o material da pilha Controle apresentou nos ensaios de difração de raio X e microscopia de varredura eletrônica alguns compostos não hidratados. Dessa maneira, ressalta-se que a presença da lona na pilha EH2 foi determinante para uma temperatura mais alta e uma umidade relativa do ar freqüentemente maior a 90%, o que proporcionou os resultados positivos para expansão e teor de cal livre.

Como sugestões para pesquisas futuras e para o prosseguimento dos estudos desenvolvidos nesta dissertação propõem-se:

- A realização de ensaios de resistividade em escala real de uso, de acordo com as metodologias propostas por normas específicas com monitoramento das variáveis que compõem o sistema de sinalização;
- A execução de ensaios de condutividade, de acordo com as metodologias apresentadas neste trabalho, para outros tipos de escórias de aciaria, geradas em outras siderúrgicas.
- Buscar a inserção de ensaios novos na caracterização de escória de aciaria para uso como lastro ferroviário, como por exemplo, o ensaio de esmagamento, com a padronização de índices de qualidade para os referidos ensaios.
- O estudo de estabilização química com aplicação de vapor d' água em disposições em formato de pilhas em ambientes abertos, e também em ambientes fechados que inibem variações da condições ambientais.
- Estudo de adição de argilo-minerais na fase líquida da escória de aciaria LD, com vistas a formação de novos compostos que busquem a minimização das concentrações dos óxidos responsáveis pela expansão destrutiva da escória.
- O estudo técnico, com o objetivo de alterar a classificação ambiental de IIA para IIB, ainda na fase líquida da escória.
- Estudo do controle da temperatura de resfriamento da escória com a adoção do procedimento de choque-térmico para mensurar a sua influência no tamanho dos grãos e a consequente redução dos óxidos instáveis CaO e MgO.

## 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.
- ALEXANDRE, J.; BEISSE, R.; GEISELER, J.; KUHN, M.; MOTZ, H.; JUKES, L. M.; KOLLER, W.; PIRET, J. Utilization of BOF slag in Europe meets high standards. s.d.
- ALEXANDRE, J.; RAGUIN, J. Beneficiation of blast furnace slag and converter slag in the french iron and steel industry. In: COMMITTEE ON ENVIRONMENTAL AFFAIR. **Utilisation of blast furnace and BOF slag**. Brussels, Belgium: International Iron and Steel Institute, 1984. section A2, p.1-21.
- AMARAL, L. A. "**Hormigones com escorias de horno eléctrico como aridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental**". Tese de doutorado. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya, 230 p., 1999.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. **ASTM C 151 – Standard test method for autoclave expansion of Portland cement**. Philadelphia, 1993.
- 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.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4792 - Standard test method for potential expansion of aggregates from hydration reactions**. Philadelphia, 1995.
- ANDO, R. Points de vue japonais sur l'utilisation des scories LD. **Revue de Métallurgie**, Paris, p.297-301, mai., 1978.
- ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JONH, V.M. Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. In: IV Seminário desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil. CT206 - IBRACON. São Paulo – SP, 2001.
- ARAUJO, 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.

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

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**: Amostragens 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 intempéries do material: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1983.

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

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

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 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.

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

BHATTY, J.I. A review of the application of thermal analysis to cement – admixture systems. **Thermochimica Acta**, Amsterdam, v. 189, p. 313-350, 1991.

BIFFEN, F.M. Determination of free lime and carbonate in calcium silicate hydrates by thermobalance. **Analytical Chemistry**, v. 28, n. 7, p. 1133-36, jul. 1956.

BILODEAU, A.; MALHOTRA, M. High-volume fly ash system: concrete solution for sustainable development. **ACI Materials Journal**, p. 41-48. Jan.-Feb. 2000.

BOURDEAU (2000) The Agenda 21 on Sustainable Construction. In: **CONSTRUCTION & ENVIROMENT**. CIB. Nov, 2000. São Paulo. Cd.

BONNOT, J.; DUSSART, J. Utilisation des scories LD. **Revue de Métallurgie**, Paris, p. 311-313, mai., 1978.

**BRASIL.** Ministério dos Transportes. **Escórias siderúrgicas – material de múltiplas aplicações.** Brasília: DNER – Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1988. 50p.

**BRASIL EM QUESTÃO.** Disponível em: <[www.brasil.gov.br/noticias/em\\_questao/questao/eq497](http://www.brasil.gov.br/noticias/em_questao/questao/eq497)> Acesso em: 29 outubro 2009.

BRILHANTE, O. Diagnóstico do SGA e da adesão à certificação ambiental com base na ISSO 14001, das primeiras indústrias potencialmente poluidoras da Baía da Guanabara (Rio de Janeiro). In: II SIMPÓSIO INTERNATIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL. Porto Alegre, out. 1998. p. 10-14.

**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](http://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.

CHEHEBE, J. R. et al. Geração e destinação de escórias pela indústria siderúrgica brasileira. Escola Técnica Federal do Espírito Santo. 1986.

**CINCOTTO, M. A. Estudo da composição química da cal hidratada produzida no estado de São Paulo.** São Paulo, 1977, 45p. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

**CINCOTTO, M.A.; BATTAGIN, A. F.; AGOPYAN, V. Caracterização da escoria granulada de alto-forno e seu emprego como aglomerante e agregado.** São Paulo. IPT, 1992. 33p. (Boletim 65).

CONJEAUD, M.; GEORGE, M.C.; SORRENTINO, F.P. A new steel slag for cement manufacture: mineralogy and hydraulicity. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, N.Y., v. 11, n. 5, p. 85-102, 1981.

COOMARASAMY, T.; WALZAK, T. Effects of moisture on surface chemistry of steel slags and steel slag-asphalt paving mixes. **Transportation Research Board**. n. 1492. Washington. p. 85-95. 1995.

CRAWFORD, C.B.; BURN, K.N. Building damage from expansive steel slag backfill. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**. New York, n. SM6, p.1325-1334., nov. 1969.

CRUZ, E.B.; BENEDUCE NETO, F.; TOSETTI, J.P.V.; FERREIRA NETO, J.B. Pyrometallurgical treatment of BOF slags for the production of construction materials and refining fluxes. In: JAPAN-BRAZIL SYMPOSIUM ON DUST PROCESSING-ENERGY-ENVIRONMENT IN METALLURGICAL INDUSTRIES, 1ST, 5 oct., São Paulo, Brazil – 4 nov., Sendai, Japan, 1999. **Proceedings...** São Paulo, 1999. P. 97-115.

DAIDO STEEL Aproveitamento da escória de Forno elétrico. Material apresentado no 39 simpósio do grupo de Forno elétrico.. Comite de Pesquisa Cooperada da Japan and Steel Association. Maio, 1993. 13 pag.

DAUBE, J. Etude de la valorisation de scories d'aciérie LD. **Silicates Industriels**, Paris, p.55-58, n. 2, 1982.

DMA-1/DER-MG/92 PTM 130/78, Método PTM 130/78 adaptado pelo Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais, Minas Gerais, 1992

DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES DA PENNSYLVANIA. Método PTM 130 - método de ensaio para avaliação do potencial de expansão de escória de aciaria. Pensilvânia, USA. Laboratório de Materiais, Testes e Pesquisas, 1982. Não paginado. (método adaptado pelo DER/MG).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT. EM 262/94 – Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários – Rio de Janeiro, 4 p., 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT. PRO 263/94 – Emprego de escórias de aciaria em pavimentos rodoviários – Rio de Janeiro, 3 p., 1994

DNIT - Departamento Nacional de Infra-Estrutura Terrestre. Disponível em:<[www.dnit.gov.br/noticias/investimentoferroviario](http://www.dnit.gov.br/noticias/investimentoferroviario)> Acesso em: 24 março 2009.

DONGXUE, L.; XINHUA, F.; XUEQUAN, W.; MINGSHU, T. Durability study of steel slag cement. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, N.Y., v. 27, n. 7, p. 983-87, 1997.

DWECK, J.; BUCHLER, P.M.; COELHO, A.C.V.; CARTLEDGE F.K. Hydration of a Portland cement blended with calcium carbonate. **Thermochimica Acta**, v. 346, p. 105-113, 2000.

DZIARMAGOWSKI, M.; KARBOWNICZEK, M.; PYZALSKI, M.; OKÓN, J. Reduction of converter slag in electric arc furnace. **Ironmaking and Steelmaking**, v.19, n.1, p.45-49, 1992.

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

EL-JAZAIRI, B.; ILLSTON, J.M. A simultaneous semi-isothermal method of thermogravimetry and derivative thermogravimetry, and its application to cement pastes. **Cement and Concrete Research**, Pergamon Press, N.Y., v. 7, n.3, p. 247-258, 1977.

EMERY, J.J. Utilisation des scories d'aciérie dans la construction des autoroutes canadiennes. **Revue de Métallurgie**, Paris, p. 303-310, mai., 1978.

EUROPEAN STANDARD. BS EN 1744-1 – **Tests for chemical properties of aggregates** – part 1- chemical analysis. Brussels, 1998.

FARRAND, B.; EMERY, J. Recent improvements in quality of slag aggregate. **Transportation Research Record**, Washington, n. 1486, p. 137-41, jul. 1995.

FATMA – Fundação do Meio Ambiente: Programa Nacional de Meio Ambiente. Disponível em: <[www.fatma.sc.gov.br/projetos/conveio\\_pnmaII.htm](http://www.fatma.sc.gov.br/projetos/conveio_pnmaII.htm)>. Acesso em: 22 fevereiro 2009.

FEDOTOV, V. M.; DOLINSKI, V. A.; GLUSHAKOV, Y. M. Reprocessing of steelmaking slags, In: Steel in translation, v. 27, nº 4, p. 12-16. 1997

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.

FILEV, Rodrigo. Escória de aciaria, Ficha técnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, disponível em [http://www.reciclagem.pcc.usp.br/escoria\\_de\\_aciaria.htm](http://www.reciclagem.pcc.usp.br/escoria_de_aciaria.htm) Acessado em abril de 2009.

FORDHAM, C.J.; SMALLEY, I.J. A simple thermogravimetric study of hydrated cement. **Cement and Concrete Research**, Pergamon Press, N.Y., v. 15, n.1, p. 141-44, 1985.

GEIPOT - Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes. 2001. Disponível em: <[www.geipot.gov.br/indicadores\\_internet/indicadores\\_do\\_setor\\_transporte.htm](http://www.geipot.gov.br/indicadores_internet/indicadores_do_setor_transporte.htm)> Acesso em: 25 setembro 2009.

GEISELER, J. Slag - approved materials for a better future. Iron and Steel Slags - Properties and utilization - Reports, Marseilles, p. 9 - 23, 1999.

GEISELER, J.; DRISSEN P.; KUEHN, M.; SCHREY, H. Liquid slag treatment guarantees high product quality of steel slags. Iron and Steel Slags - Properties and utilization - Reports, p 177-188, 1999.

GEISELER, J e MOTZ, H. – The steel slags - characteristics, properties and quality assurance, Iron and Steel Slags - Properties and utilization - Reports p. 149 – 168, 1998.

GEISELER, J.; SCHLOSSER, R. Investigations concerning struture and properties of steel slags. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOLTEN SLAGS AND FLUXES, 3., jun. 27-29, 1988, Glasgow, Scotland. Proceedings...Glasgow: The Institute of Metals, 1989. p.40-42.

GEISELER, J.; SCHLOSSER, R. Investigations concerning structure and properties of steel slags. Proceedings.. In: 3rd INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOLTEN SLAG AND FLUXES. Glasgow. 1998. p. 40-42.

GEORGE, C. M.;SORRENTINO, F. P. Valorization of basic oxygen steel slags, 7º International Congress on the Chemistry of Cement - ICCC, v. III, p 140-144, Paris, 1980

GEORGE, C.M.; SORRENTINO, F.P. New concrete based on oxygen steel slag containing alumina. Silicates Industriels, n.3, p.77-83, 1982.

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 BRAILEIRO DO CONCRETO – IBRACON, 45., 2003, Rio de Janeiro. **Anais...**Rio de Janeiro, 2003.

GOLDRING, D.C.; JUCKES, L.M. Petrology and stability of steel slags. **Ironmaking and Steelmaking**, London, v. 24, n. 6, p. 447-456, 1997.

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

GROMOV, B.V. Utilización de escorias metalúrgicas en la Union Soviética. **PNUMA Industria y Medio Ambiente**, [S.I.s.n.], p. 13-18, abr./may./jun., 1984.

GUMIERE, A. G. **Estudo da Viabilidade Técnica da Utilização de Escórias de Aciaria do Processo LD em Materiais de Construção Civil**. Proposta de Tese.

Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2000. 101 p.

GUTT, W. Aggregates from waste materials. **Chemistry and Industry**, p. 439-447, 3 jun. 1972.

GUTT, W.; NIXON, P.J. Steel-making slag as a skid resistant roadstone. **Chemistry and Industry**, London, n. 17, p. 503-504, jun. 1972.

HAGA, N.; OHKAWA, Y.; KONNO, M.; KAWAMOTO, T. Utilization of blast furnace and steel slags in road construction. **Nippon Steel Technical Report**, Tokio, n. 17, p. 73-89, june, 1981.

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. Spoor.net 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.

HILTUNEN, A. The influence of chemical and physical properties on the utilization of slags. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOLTEN SLAGS, FLUXES AND SALTS, 6., June 2000, Stockholm, Sweden – Helsinki, Finland. **Proceedings...cd.**

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

HOLLIDAY, K.A. Steel slag: the high performance industrial aggregate. **Steel World**, v. 2, n. 1, p. 11-14, 1997.

INOUE, R.; SUITO, H. Hydration of crystallized lime in BOF slags. **ISIJ International**, v. 35, n 3, p. 272-279. 1995.

INSTITUTO AÇO BRASIL – IAB: Estatísticas. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/index.asp>. Acesso em: 13 março de 2009

INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA – IBS: Material obtido no curso sobre gestão de resíduos, realizado no Japão em outubro de 1995. (AOTS – JISF/IBS). In: FÓRUM DE MEIO AMBIENTE – IBS. 1995. Rio de Janeiro.

INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA – IBS : Estatísticas. Disponível em: <[www.ibs.org.br/estatisticas.asp](http://www.ibs.org.br/estatisticas.asp)>. Acesso em: 05 março 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA – IBS . **ANUÁRIO ESTATÍSTICO - BRASIL STEEL DATABOOK**. Rio de Janeiro: IBS - Instituto Brasileiro de Siderurgia, 2002.

IGUCHI, Y.; NARUSHIMA T.; IZUMI C. Calorimetric study on hydration of CaO-based oxides. In.: Journal of alloys and compounds. Sendai. 2001. n° 321, p. 276 – 281.

IHOBE S.A. Libro Blanco de minimización de residuos y emisiones de escorias de acería. Sociedad Pública de Gestión Ambiental, Departamento de Ordenación Del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco, 131 p., 1999.

JAPAN INSTITUTE STANDARD – JIS A 5015. **Escória siderúrgica para construção de estradas**. 1992, 48p. (tradução em português).

JOHN, V.M. **Cimentos de escória ativada com silicato de sódio**. 1995. 112 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo.

JOHN, V.M. Pesquisa e desenvolvimento de mercado para resíduos. In: WORKSHOP SOBRE RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 25-26 nov., 1996, São Paulo. Anais... São Paulo: EPUSP/ANTAC, 1997. p.21-30.

JUCKES, L. M. Test Methods for the assessment of the volumetric stability of steel slags. **British Steel Technical**. 12 pag. 1991.

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.

KHAN, M. I.; AL-ABDUL WAHHAB, H.I. Improving slurry seal performance in Eastern Saudi Arabia using steel slag. **Construction and Building Materials**, v. 12, p. 195-201, 1998.

KNELLER, W.A.; GUPTA, J.; BORKOWSKI, M.L.; DOLLIMORE, D. Determination of original free lime content of weathered iron and steel slags by thermogravimetric analysis. **Transportation Research Record**, Washington, n. 1434, p. 17-22, jul. 1994.

KOBE STEEL. **Utilization of LD slag for construction material considering on free lime**. Report of Research Society of the Iron Steel Institute of Japan, Steelmaking Division, n. 68, 1977. 14 p.

KRASS, K. Possibilités et problèmes de valorisation des scories d'aciérie en République Fédérale d'Allemagne. **Revue de Métallurgie**, Paris, p. 315-320, mai., 1978.

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

LEA, F.M. **The chemistry of cement and concrete**. London: Edward Arnold Ltd., 1970. 727 p. (3<sup>a</sup> ed.).

LEE, F.T.; LEE, C.H. Study on the reduction behavior of FeO in EAF slag. **Steel Times International**. p 20-25, Jan. 1995.

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. Co-productos de la industria siderúrgica – I Parte. Composición, tratamiento y aplicaciones. IN: **Revista de Metalurgia**. v.25, n.4, P.247-54, 1989.

LOUZADA, D. M. **Contribuição ao estudo do emprego das escórias siderúrgicas na fabricação de blocos pré-moldados**. 85 p. Rio de Janeiro. 1991. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal Fluminense. Centro Tecnológico. Pós-Graduação em Engenharia Civil.

MAAS. Steelmaking slags. IISI - Utilization of BOF and BF slag, 1984.

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.

MANCIO, M. **Caracterização e avaliação das escórias de aciaria elétrica**. Porto Alegre, 2001. Dissertação a ser defendida (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MASS, H.G. Steelmaking Slags. In: COMMITTEE ON ENVIRONMENTAL AFFAIR. **Utilisation of blast furnace and BOF slag**. Brussels, Belgium: International Iron and Steel Institute , 1984. Section A2, p. 22-31.

MASUERO A. B. Estabilização das escórias de aciaria elétrica com vistas a sua utilização como substituição ao cimento. 2001. 264p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MASUERO, A. B., DAL MOLIN, D. C. C., VILELA, A. C. Emprego de escórias de aciaria elétrica como adição a concretos. In: **RESÍDUOS INDUSTRIAS. SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE REUSO/RECICLAGEM**. Cd. São Paulo – SP. 10 p. cd. 2000a.

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

MIDGLEY, H.G. The determination of calcium hydroxide in set Portland cements. **Cement and Concrete Research**, Pergamon Press, N.Y., v. 9, n.1, p. 77-83, 1979.

MONTGOMERY, D.G.; WANG, G. Preliminary laboratory study of steel slag for blended cement manufacture. **Materials Forum**, n. 15, p. 374-382, 1991a.

MONTGOMERY, D.G.; WANG, G. Instant-chilled steel slag aggregate in concrete – strength related properties. **Cement and Concrete Research**, Pergamon Press, N.Y., v. 21, n. 6, p. 1083-91, 1991b.

MOORE C.; MARSHALL R.I. **Steelmaking**. London: The Institute of Metals, 1991. 172 p.

MOTZ, H.; GEISELER, J. The steel slags - characteristics, properties and quality assurance, **Iron and Steel Slags - Properties and utilization** - Reports p. 149 - 168, 1998.

MOTZ, H.; GEISELER, J. Products of steel slag an opportunity to save natural resources, In: **Waste Management**, 21, Duisburg, Alemanha, p. 285-293, 2001.

MUNDIN, M.J. Tecnologia de fabricação do aço líquido – aciaria LD. 3<sup>a</sup> ed. Belo Horizonte: UFMG, 1985. v. 2, 255p.

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.

MURPHY J. N.; MEADOWCROFT T. R.; BARR P. V. Enhancement of the cementitious properties of steelmaking slag, In: Canadian Metallurgical Quarterly, v. 36, p. 315-331, 1997.

NAKAMURA, Y.; TANIGUCHI, A.; OKADA, S.; TOKUDA, M. Positive growth of phytoplankton under conditions enriched with steel-making slag solution. **ISIJ International**, Tokio, v.38, n.4, p. 390-98, 1998.

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

NOMURA, T.; ENOKIDO, T. Study on utilization of BOF slag as road base material. **Nippon Steel Technical Report**, Tokio, n. 17, p. 22-32, jun., 1981.

NÜRNBERG, K. **Slag Atlas**. Composition and structure of iron and steelmaking slags, Germany. Committee for Fundamental Metallurgy. s. ed. 1981.

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.

PERA, J. State of the art report – use of waste materials in construction in Western Europe. In: **WORKSHOP SOBRE RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL**, 25-26 nov., 1996, São Paulo. **Anais...** São Paulo: EPUSP/ANTAC, 1997. p. 1-20.

PEREIRA, E.A.C. Aspectos técnicos de gestão de resíduos nas siderúrgicas integradas a coque. In: **25º SEMINÁRIO DE REDUÇÃO, MATÉRIAS-PRIMAS E RESÍDUOS NA SIDERURGIA**. Volta Redonda, RJ. Anais.. p. 187-199. 1994.

PIMENTA, A.; LIMA E.O. O lastro ferroviário – alternativa econômica e ambiental. In.: **Seminário escória de aciaria: a excelência na utilização do material de múltiplas aplicações**. Vitória. 2003.

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

PIRET, J. Valorisation de la scorie LD – aspects généraux de problème ET réalisations dans le domaine de la construction routière. **Revue Métallurgie**, Paris, p.321-327, mai. 1978.

RABOCKAI, T. (1979). Física-Química de superfícies. Secretaria Geral da OEA, Washington, D.C., 128p.

RAL - INSTITUTO ALEMÃO PARA GARANTIA DA QUALIDADE E MARCAÇÃO A. R. **Escória de Aciaria – Garantia de Qualidade RAL – GZ513**. Sankt Augustin, Alemanha, mai.,1993, 44p.

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.

ROBINSON, H. L. Low energy, sustainable, materials incorporating blast furnace and basic oxygen steel slag for highway construction and maintenance in the UK. In: 2<sup>nd</sup> European slag conference - Euroslag. Dusseldorf, 2000.

SAHAY, J. S.; NAGPAL, O. P.; PRASAD, S. Waste management of steel slag, In.: **Steel times international**. p.38-40, 2000.

SANO, N.; LU, W.; RIBOUD, P. **Advanced Physical Chemistry for Process Metallurgy**. Academic Press. 1997. 429 p.

SBRIGHI, C. N. e BATTAGIN, I. L. S. **Precauções e limitações do uso de escórias como agregados na construção civil**, CPTI, São Paulo, 40 p., 2002.

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

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

SHI, C.; QIAN, J. High performance cementing materials from industrial slags – a review. **Resources Conservation & Recycling**. v. 29, p. 195-207, 2000.

SHOUSUN, L. Effect of MgO in steel slag on soundness of cement. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 7., 1980, **Proceedings...** Published 1980. VII, p.25-30.

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.

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

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

TAKASHIMA, T.; NAGASHIMA, S.; HORI, S.; KIMURA, H. TAKAHASHI, M. Development of instantaneous slag chill (ISC) process. **Nippon Steel Technical Report**, Tokio, p. 66-72, jun., 1981.

TEIXEIRA, E. N. Resíduos sólidos: minimização e reaproveitamento energético. In: RESÍDUOS INDUSTRIAS. SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE REUSO/RECICLAGEM. Cd. São Paulo – SP. 10 p. cd.

TRAINWEB: Origin of the Track Circuit. Disponível em: <[www.trainweb.org/signals/waysidetrack.htm](http://www.trainweb.org/signals/waysidetrack.htm)>. Acesso em: 15 abril 2009.

THOMAS, G.H. Expériences britanniques d'utilisation des scories LD comme revêtements routiers. **Revue de Métallurgie**, Paris, p. 329-334, mai., 1978.

THOMAS G. H. Progress in the utilization of steel slags in the UK. In: 2nd European slag conference - Euroslag. Dusseldorf, 2000.

TOSTICARELLI, J.; ANGELONE, S.; ANDREONI, R. Escoria de aceria. Estado actual de estudios sobre su utilização. Memoria técnica de las primeras jornadas técnicas de escorias siderúrgicas. Buenos Aires, 1985.

VIKLUND-WHITE, C., YE, G. Utllization and treatment of steelmaking slags. In: GLOBAL SYMPOSIUM ON RECYCLIN WASTE TREATMENT AND CLEAN TECHNOLOGY. REWAS, 1999, Ed. By I. Gaballatt, J. Hager, R. Solozabal. San Sebastián, SPAIN. p.337-345. Sept. 1999.

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

WITTENBORN e GREEN, J. L.; GREEN, J.J. Steelmaking slag: a safe and valuable product. The Steel Slag Coalition, Washington, 1998.

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

YAN, J.; MORENO, L.; NERETNIEKS, I. The long-term acid neutralizing capacity of steel slag. **Waste Management**, v. 20, p. 217-23, 2000.

YUJI, W. The effect of hydration products in steam treated steel slag (°C.S) on the hydration of steel slag-portland blended cement. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 8., 1986, Rio de Janeiro. **Proceedings...** v.4, theme 3, p. 36- 40.