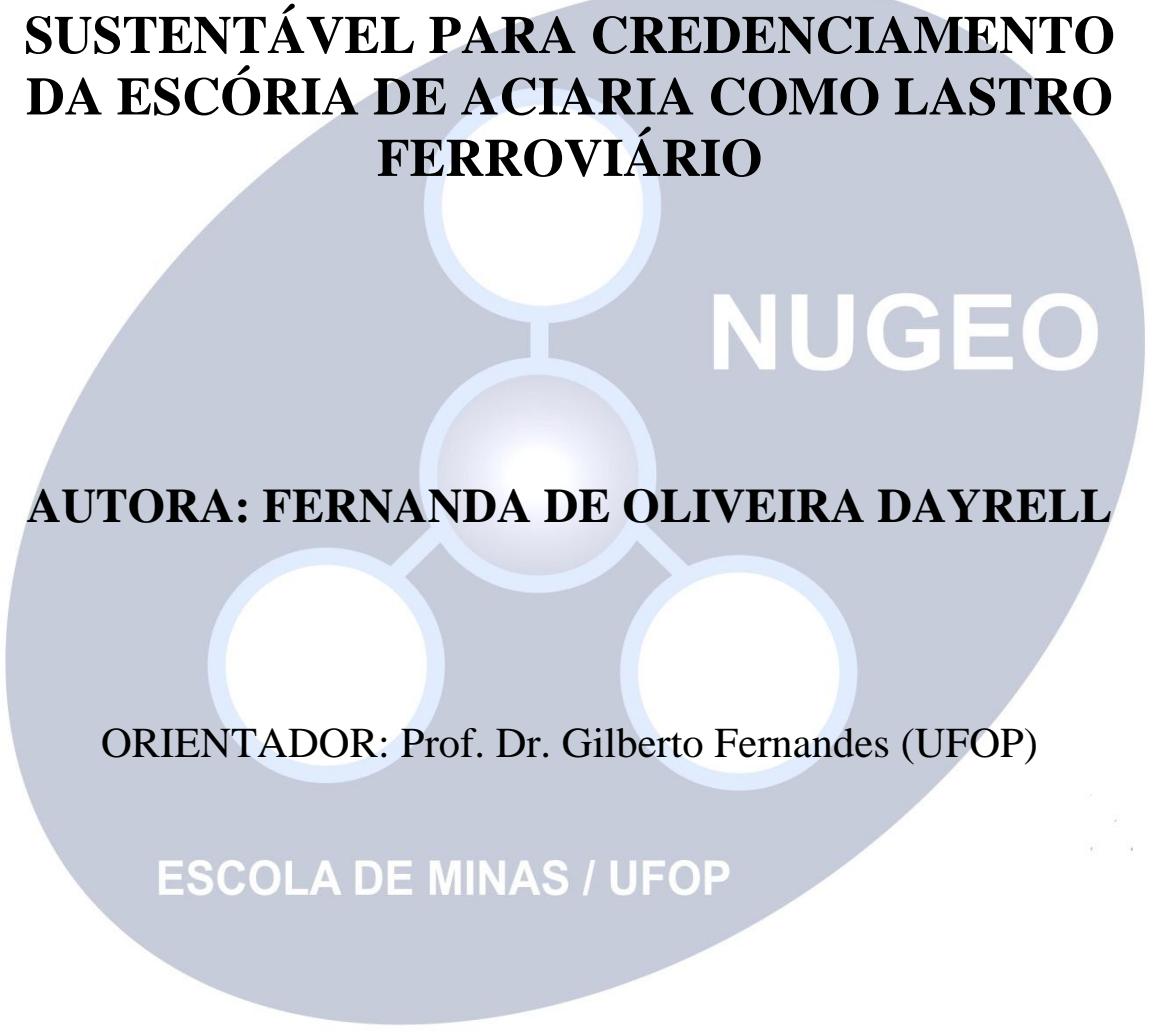


Dissertação de Mestrado

**METODOLOGIA GEOTÉCNICA
SUSTENTÁVEL PARA CREDENCIAMENTO
DA ESCÓRIA DE ACIARIA COMO LASTRO
FERROVIÁRIO**



NUGEO

AUTORA: FERNANDA DE OLIVEIRA DAYRELL

ORIENTADOR: Prof. Dr. Gilberto Fernandes (UFOP)

ESCOLA DE MINAS / UFOP

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA DA UFOP

OURO PRETO, DEZEMBRO DE 2013.

METODOLOGIA GEOTÉCNICA SUSTENTÁVEL PARA CREDENCIAMENTO DA ESCÓRIA DE ACIARIA COMO LASTRO FERROVIÁRIO

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

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 09 de dezembro de 2013, pela Banca Examinadora composta pelos membros:


Prof. Dr. Gilberto Fernandes (Orientador / UFOP)


Prof. Dr. José Francisco do Prado Filho (UFOP)


Prof. Dr. Luis Fernando Martins Ribeiro (UNB)

D275m Dayrell, Fernanda de Oliveira.
Metodologia geotécnica sustentável para credenciamento da escória de aciaria como lastro ferroviário [manuscrito] / Fernanda de Oliveira Dayrell – 2013.
xxiv, 177f.: il., color.; grafs.; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Fernandes.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. NUGEO.
Área de concentração: Geotecnia de pavimentos.

I. Escória - Teses. 2. Ferrovias - Teses. 3. Engenharia geotécnica - Teses.
I. Fernandes, Gilberto. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 624.12:625.141

Catalogação: sisbin@sisbin.ufop.br

"Há um tempo em que é preciso abandonar as roupas usadas, que já tem a forma do nosso corpo, e esquecer os nossos caminhos, que nos levam sempre aos mesmos lugares. É o tempo da travessia: e, se não ousarmos fazê-la, teremos ficado, para sempre, à margem de nós mesmos."

(Fernando Pessoa)

*À minha mãe,
pelo exemplo de luta, coragem
e dedicação.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

A Deus, que sempre esteve do meu lado me confortando e me dando luz nos momentos em que mais precisei, permitindo que eu chegassem com êxito no fim deste trabalho;

Aos meus pais, Nair e Jairo, pelo apoio incondicional, pelos ensinamentos da vida, e por sempre acreditarem em mim;

Ao meu irmão Igor pelo carinho e companheirismo;

A todos os meus amigos e familiares pelo incentivo e afeição;

Ao professor Dr. Gilberto Fernandes pela orientação durante o desenvolvimento do trabalho, além da paciência e das oportunidades ao longo desse tempo;

Aos professores do NUGEO pelos ensinamentos;

Aos professores Romero César Gomes (UFOP), Fernando Abece (UFOP), José Roberto (IFES) e Cássio Lacerda (IFMG) pelas dicas e sugestões que foram essenciais para desenvolver minhas habilidades;

Aos amigos Ralph, Sílvia e Ronderson pelo apoio, auxílios constantes e conselhos;

Aos técnicos e bolsistas do Laboratório de Ferrovias e Asfalto da UFOP pela preciosa ajuda na execução dos ensaios laboratoriais;

Aos técnicos administrativos do NUGEO pela atenção dispensada.

À CAPES pelo apoio financeiro.

À USIMINAS pelo convênio que viabilizou a realização do trabalho com a doação das amostras, assim como recursos financeiros e liberação para uso da instrumentação e dos equipamentos utilizados nos ensaios, em especial ao pesquisador Wilton Araújo.

Aos colegas do NUGEO e BVP Engenharia pelo conhecimento compartilhado e momentos de descontração.

Aos que não estão aqui citados, mas que, de alguma forma, contribuíram para que este projeto de pesquisa se realizasse, pois num trabalho dessa magnitude, todo o tipo de ajuda recebida foi imprescindível.

- Muito obrigada!

Fernanda de Oliveira Dayrell
09/12/2013

RESUMO

A escória de aciaria LD (Linz-Donawitz) é gerada no processo de fabricação do aço nas siderurgias. Para ser introduzida como material de lastro em vias férreas deve-se adequar suas propriedades, tais como expansão volumétrica e classificação ambiental, evitando riscos de colmatação do lastro e contaminação do meio. Dessa forma, essa pesquisa visa à elaboração de uma metodologia de tratamento e estabilização química que possibilite o uso ambientalmente seguro e mais resistente da escória de aciaria LD como lastro de ferrovia, minimizando possíveis interferências nos ciclos do meio ambiente e na plataforma, além de reduzir o passivo ambiental da sua geração pela siderurgia. Este estudo foi desenvolvido no Laboratório de Ferrovias e Asfalto da Universidade Federal de Ouro Preto, consistindo em caracterizações e monitoramento de materiais e misturas. Abordou a viabilidade técnica do uso e aproveitamento de argilominerais para ajustar a composição química da escória de aciaria LD visando melhorar suas propriedades para o uso proposto. Para isso, foi realizada a caracterização química dos materiais para obter misturas com relação de basicidade (CaO/SiO_2) de 1,0, por equilíbrio de massa de escória de aciaria e o argilomineral correspondente. Além também da metodologia por igualdade de massa para comparação dos resultados. Foram preparadas amostras em diferentes proporções, misturadas, fundidas e resfriadas em atmosfera livre. Os novos produtos foram analisados por caracterizações química, física, mineralógica, morfológica e ambiental, sendo ensaiados em conformidade com as normas técnicas vigentes. Os resultados indicam entre os argilominerais e as proporções das misturas, os que mostraram melhor desempenho quanto à estabilização química e a redução da expansão volumétrica causada pela CaO, notando-se a influência dos argilominerais na caracterização da escória, o que a credencia seguramente como material de lastro de ferrovia.

PALAVRAS-CHAVE: escória, caracterização, lastro ferroviário, argilominerais.

ABSTRACT

The LD (Linz-Donawitz) steel slag is generated at the producing process of steel on the siderurgies. To be introduced as ballast material on railroads it must have its properties appropriated, such as volume expansion and environmental classification, thus avoiding void filling risks at the coverage and environment contamination. Therefore, this research aims to elaborate a methodology for treatment and chemical stabilization that allow a safe environmental use and more resistant of the LD steel slag as ballast on railroads, reducing possible interferences on the environment cicle and on plataform, in addition to reducing the environment passive of its generation on siderurgy. This study was developed at the Railroads and Asphalt Laboratory at the Federal University of Ouro Preto, having characterization and monitoring of materials and mixtures. It was researched the technical viability of the use and employment of clayminerals to adjust the chemical composition of the LD steel slag, aiming to improve its properties for the proposed use. For this, it was done the chemical characterization of the materials in order to obtain mixtures related to basicity ($\text{CaO}/\text{Si O}_2$) of 1,0, for balance of steel slag mass and the correspondent claymineral. Besides the methodology by equality of mass for results comparation. Samples were prepared in different proportions, mixed, melted and cooled in free atmosphere. The new products were analysed on their chemical, physical, mineralogical, morphological and environmental characterization, being tested in conformity with the current technical standards. The results indicate among the clayminerals and the mixtures proportions, the ones that showed better performance concerning chemical stabilization and the reduction of volume expansion caused by CaO , noting the claymineral influence at the steel slag characterization, which safely puts it as a railroad ballast material.

KEYWORDS: steel slag, characterization, ballast, clayminerals.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Gráfico do crescimento da produção de aço.	8
Figura 2.2: Gráfico dos grupos da produção de aço.	8
Figura 2.3: Detalhe do conversor a oxigênio.	11
Figura 2.4: Percentual de aplicações das escórias.	13
Figura 2.5: Transferência dos esforços atuantes no sistema ferroviário.	14
Figura 3.1: Aspecto úmido e seco da Lama 1.....	32
Figura 3.2: Aspecto úmido e seco da Lama 2.....	33
Figura 3.3: Fluxograma dos ensaios para caracterização da escória.	35
Figura 3.4: Fluxograma dos ensaios da fusão das misturas.	36
Figura 3.5: Difratômetro de Raios-X.....	38
Figura 3.6: Ensaio de digestão ácida - Savillex.	39
Figura 3.7: Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV/EDS).....	40
Figura 3.8: Cromatógrafo Iônico.	42
Figura 3.9: Equipamentos e execução do ensaio de teor de cal livre.	43
Figura 3.10:Equipamento Termogravimétrico.	44
Figura 3.11: Tipos de isotermas de adsorção segundo a classificação da IUPAC.	45
Figura 3.12: Tipos de histereses em isotermas de adsorção segundo a classificação da IUPAC.	46
Figura 3.13: Equipamentos Surface Area & Pore Size Analyzer e Multipycnometer.	47
Figura 3.14: Peneirador mecânico.	48
Figura 3.15: Particle Size Analyzer CILAS 1064.....	49
Figura 3.16: Equipamento e cargas abrasivas usados no ensaio de abrasão	50
Figura 3.17: Equipamento Treton para medidas de resistência ao impacto.	51

Figura 3.18: Dimensões empregadas para a análise da forma dos fragmentos.	52
Figura 3.19: Aparelhagem com vareta de bronze para o ensaio de fragmentos macios e friáveis.	53
Figura 3.20: Aparelho utilizado para romper os corpos de prova selecionados.	56
Figura 3.21: Agitador rotativo usado no ensaio de lixiviação.	57
Figura 3.22: Equipamento usado no ensaio de solubilização.	58
Figura 3.23: Esquema completo da montagem do experimento.....	59
Figura 3.24: Caixa-teste para análise da condutividade nas escórias de aciaria.	59
Figura 3.25: Misturador cilíndrico rotativo por esteira.....	67
Figura 3.26: Forno de fusão atmosférico e mecanismo de introdução do cadinho em seu interior.....	69
Figura 3.27: Forno de indução utilizado no processo de obtenção das misturas.	70
Figura 3.28: Retirada da mistura fundida do forno.....	70
Figura 3.29: Amostras das misturas em resfriamento.....	70
Figura 3.30: Aspectos das amostras após fusão.....	71
Figura 4.1: Curvas de adsorção e dessorção para escória.	76
Figura 4.2: Padrão de difração de raios-X da amostra de escória.....	78
Figura 4.3: Morfologia típica encontrada na escória.	78
Figura 4.4: Curva de perda de massa do ensaio TG/DTG da escória de aciaria LD.	80
Figura 4.5: Enquadramento da curva granulométrica da escória nas faixas padrão A e B da ABNT.....	83
Figura 4.6: Gráfico do enquadramento granulométrico da escória.	84
Figura 4.7: Gráfico de Condutividade.	95
Figura 4.8: Monitoramento do ensaio de PTM-130/78 para escória de aciaria.....	96

Figura 4.9: Gráfico do enquadramento granulométrico da areia.....	97
Figura 4.10: Gráfico do enquadramento granulométrico da argila.....	98
Figura 4.11: Gráfico do enquadramento granulométrico da bentonita.....	98
Figura 4.12: Gráfico do enquadramento granulométrico da Lama 1 - ETED.....	99
Figura 4.13: Gráfico do enquadramento granulométrico da Lama 2 - ETAV.....	99
Figura 4.14: Curvas de adsorção e dessorção para areia.....	102
Figura 4.15: Curvas de adsorção e dessorção para argila.....	103
Figura 4.16: Curvas de adsorção e dessorção para bentonita.....	103
Figura 4.17: Curvas de adsorção e dessorção para Lama 1 - ETED.....	104
Figura 4.18: Curvas de adsorção e dessorção para Lama 2 - ETAV.....	104
Figura 4.19: Correlação entre a porosidade e densidade dos materiais.....	106
Figura 4.20: Curva de perda de massa do ensaio TG/DTG da areia.....	108
Figura 4.21: Curva de perda de massa do ensaio TG/DTG da argila.....	109
Figura 4.22: Curva de perda de massa do ensaio TG/DTG da bentonita.....	109
Figura 4.23: Curva de perda de massa do ensaio TG/DTG da lama 1 - ETED.....	110
Figura 4.24: Curva de perda de massa do ensaio TG/DTG da lama 2 - ETAV.....	110
Figura 4.25: Difratograma da amostra de areia.....	112
Figura 4.26: Difratograma da amostra de argila.....	112
Figura 4.27: Difratograma da amostra de bentonita.....	113
Figura 4.28: Difratograma da amostra de lama 1 - ETED.....	113
Figura 4.29: Difratograma da amostra de lama 2 - ETAV.....	114
Figura 4.30: Morfologia típica encontrada na amostra de areia.....	116
Figura 4.31: Morfologia típica encontrada na amostra de argila.....	117
Figura 4.32: Morfologia típica encontrada na amostra de bentonita.....	118

Figura 4.33: Morfologia típica encontrada na amostra de Lama 1.....	119
Figura 4.34: Morfologia típica encontrada na amostra de Lama 2.....	120
Figura 4.35: Diagrama de fases da temperatura de fusão para a mistura MIM 1.....	124
Figura 4.36: Diagrama de fases da temperatura de fusão para a mistura MEM 2.....	124
Figura 4.37: Diagrama de fases da temperatura de fusão para a mistura MIM 3.....	125
Figura 4.38: Diagrama de fases da temperatura de fusão para a mistura MEM 4.....	125
Figura 4.39: Diagrama de fases da temperatura de fusão para a mistura MIM 5.....	126
Figura 4.40: Diagrama de fases da temperatura de fusão para a mistura MEM 6.....	126
Figura 4.41: Diagrama de fases da temperatura de fusão para a mistura MIM 7.....	127
Figura 4.42: Diagrama de fases da temperatura de fusão para a mistura MEM 8.....	127
Figura 4.43: Diagrama de fases da temperatura de fusão para a mistura MIM 9.....	128
Figura 4.44: Diagrama de fases da temperatura de fusão para a mistura MEM 10.....	128
Figura 4.45: Gráfico do enquadramento granulométrico da amostra MIM1.....	130
Figura 4.46: Gráfico do enquadramento granulométrico da amostra MEM2.....	131
Figura 4.47: Gráfico do enquadramento granulométrico da amostra MIM3.....	131
Figura 4.48: Gráfico do enquadramento granulométrico da amostra MEM4.....	132
Figura 4.49: Gráfico do enquadramento granulométrico da amostra MIM5.....	132
Figura 4.50: Gráfico do enquadramento granulométrico da amostra MEM6.....	133
Figura 4.51: Gráfico do enquadramento granulométrico da amostra MIM7.....	133
Figura 4.52: Gráfico do enquadramento granulométrico da amostra MEM8.....	134
Figura 4.53: Gráfico do enquadramento granulométrico da amostra MIM9.....	134
Figura 4.54: Gráfico do enquadramento granulométrico da amostra MEM10.....	135
Figura 4.55: Curvas de adsorção e dessorção para MIM1.....	139
Figura 4.56: Gráfico do Teor de Cal livre determinado em todas as amostras.....	141

Figura 4.57: Curvas TG/DTG das misturas.....	142
Figura 4.58: Difratograma da amostra MIM1.....	143
Figura 4.59: Difratograma da amostra MEM2.....	143
Figura 4.60: Difratograma da amostra MIM3.....	144
Figura 4.61: Difratograma da amostra MEM4.....	144
Figura 4.62: Difratograma da amostra MIM5.....	145
Figura 4.63: Difratograma da amostra MEM6.....	145
Figura 4.64: Difratograma da amostra MIM7.....	146
Figura 4.65: Difratograma da amostra MEM8.....	146
Figura 4.66: Difratograma da amostra MIM9.....	147
Figura 4.67: Difratograma da amostra MEM10.....	147
Figura 4.68: Morfologia típica encontrada na amostra MIM 1.....	150
Figura 4.69: Morfologia típica encontrada na amostra MEM 2.....	151
Figura 4.70: Morfologia típica encontrada na amostra MIM 3.....	152
Figura 4.71: Morfologia típica encontrada na amostra MEM 4.....	153
Figura 4.72: Morfologia típica encontrada na amostra MIM 5.....	154
Figura 4.73: Morfologia típica encontrada na amostra MEM 6.....	155
Figura 4.74: Morfologia típica encontrada na amostra MIM 7.....	156
Figura 4.75: Morfologia típica encontrada na amostra MEM 8.....	157
Figura 4.76: Morfologia típica encontrada na amostra MIM 9.....	158
Figura 4.77: Morfologia típica encontrada na amostra MEM 10.....	159

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1: Linha de Pesquisa.	2
Tabela 2.1: Produção mundial de aço bruto (106t).....	7
Tabela 2.2: Composições químicas de escórias de aciaria	11
Tabela 2.3: Propriedades físicas do lastro padrão.....	15
Tabela 2.4: Distribuição granulométrica do lastro padrão.....	16
Tabela 2.5: Parâmetros que influenciam na expansão da escória de aciaria.	19
Tabela 3.1: Estado de contaminação do lastro.....	49
Tabela 3.2: Classificação da forma dos fragmentos.	53
Tabela 3.3: Composição química dos materiais.	63
Tabela 3.4: Quantidade das amostras utilizadas nas misturas em função da igualdade de massa e equilíbrio, pelo índice de basicidade.	65
Tabela 3.5: Composições químicas das misturas e dados de entrada do THERMO-CALC.	66
Tabela 3.6: Determinação das quantidades de mistura antes e pós fusão.....	72
Tabela 4.1: Quantitativo dos ensaios de laboratório.....	74
Tabela 4.2: Composição química da escória de aciaria LD.....	75
Tabela 4.3: Resultados do ensaio de adsorção de nitrogênio na escória.	76
Tabela 4.4: Análise quantitativa em cada ponto da Figura 4.3.....	79
Tabela 4.5: Resultado da análise de capacidade de trocas iônicas.	80
Tabela 4.6: Resultados das análises químicas por termogravimetria.	81
Tabela 4.7: Resultado do ensaio de granulometria.	82
Tabela 4.8: Propriedades geométricas obtidas a partir da granulometria.	83
Tabela 4.9: Propriedades geométricas obtidas a partir da granulometria.	85
Tabela 4.10: Índice e grau de contaminação da escória.	85

Tabela 4.11: Resultados do ensaio de Abrasão Los Angeles.	86
Tabela 4.12: Resultados dos ensaios de resistência ao choque Treton.	86
Tabela 4.13: Resultados e limites dos ensaios de massa específica, absorção de água e porosidade aparente.	87
Tabela 4.14: Determinação da forma da escória.....	87
Tabela 4.15: Resultados do ensaio de carga pontual.	90
Tabela 4.16: Resultados para resistência à compressão axial.....	91
Tabela 4.17: Valores de C para a escória de aciaria LD.....	92
Tabela 4.18: Lixiviação para parâmetros inorgânicos para escória de aciaria recém produzida.	93
Tabela 4.19: Solubilização para parâmetros inorgânicos para escória de aciaria recém produzida.	94
Tabela 4.20: Monitoramento da expansão pelo método DMA-1.	96
Tabela 4.21: Propriedades geométricas obtidas a partir da granulometria.	100
Tabela 4.22: Composição química dos materiais adicionados à escória de aciaria LD.	101
Tabela 4.23: Resultados do ensaio de adsorção de N ₂ nos materiais adicionados à escória.	105
Tabela 4.24: Resultado da análise de capacidade de trocas iônicas.	106
Tabela 4.25: Médias dos resultados do ensaio de cal livre.	107
Tabela 4.26: Resultados das análises químicas por termogravimetria.	111
Tabela 4.27: Composição mineralógica dos materiais.	114
Tabela 4.28: Análise quantitativa em cada ponto da Figura 4.30.....	116
Tabela 4.29: Análise quantitativa em cada ponto da Figura 4.31.....	117
Tabela 4.30: Análise quantitativa em cada ponto da Figura 4.32.....	118
Tabela 4.31: Análise quantitativa em cada ponto da Figura 4.33.....	119

Tabela 4.32: Análise quantitativa em cada ponto da Figura 4.34.....	120
Tabela 4.33: Resultados morfológicos dos materiais.	121
Tabela 4.34: Classificação ambiental dos materiais.	122
Tabela 4.35: Solubilização - parâmetros inorgânicos para as misturas.	123
Tabela 4.36: Determinação da temperatura de fusão das misturas pelo THERMO-CALC.	129
Tabela 4.37: Propriedades geométricas obtidas a partir da granulometria.	135
Tabela 4.38: Composição química das misturas.....	137
Tabela 4.39: Médias dos resultados do ensaio de cal livre.....	140
Tabela 4.40: Composição mineralógica dos materiais.	148
Tabela 4.41: Análise quantitativa em cada ponto da Figura 4.76.....	150
Tabela 4.42: Análise quantitativa em cada ponto da Figura 4.77.....	151
Tabela 4.43: Análise quantitativa em cada ponto da Figura 4.78.....	152
Tabela 4.44: Análise quantitativa em cada ponto da Figura 4.79.....	153
Tabela 4.45: Análise quantitativa em cada ponto da Figura 4.80.....	154
Tabela 4.46: Análise quantitativa em cada ponto da Figura 4.81.....	155
Tabela 4.47: Análise quantitativa em cada ponto da Figura 4.82.....	156
Tabela 4.48: Análise quantitativa em cada ponto da Figura 4.83.....	157
Tabela 4.49: Análise quantitativa em cada ponto da Figura 4.84.....	158
Tabela 4.50: Análise quantitativa em cada ponto da Figura 4.85.....	159
Tabela 4.51: Resultados morfológicos dos misturas.	160
Tabela 4.52: Solubilização - parâmetros inorgânicos para as misturas.	162
Tabela 4.53: Resultados de caracterização dos materiais primários e misturas.	164

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIAÇÕES

#: mesh/peneira

//: paralelo

⊥: perpendicular

µm: micrometro

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

A_n: Abrasão “Los Angeles”

AREA: American Railway Engineering Association

AREMA: American Railway Engineering and Maintenance of Way Association

A_s: Área do plano de ruptura

ASTM: American Society for Testing and Materials

BET: Brunauer, Emmett e Teller

B_g: Índice potencial de quebra do lastro

BOF: Blast Oxygen Furnace

C: Condutividade

C₂S: Silicato dicálcico

C₃S: Silicato tricálcico

Ca(OH)₂: Hidróxido de cálcio

CaCO₃: Carbonato de cálcio (calcário)

C_c: Coeficiente de curvatura

CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente

CSA: Companhia Siderúrgica do Atlântico

CSN: Companhia Siderúrgica Nacional

CST: Companhia Siderúrgica de Tubarão

CTA: Capacidade de Troca Aniônica

CTC: Capacidade de Troca Catiônica

C_u: Coeficiente de não uniformidade

CVRD: Companhia Vale do Rio Doce

d: Distância (espaçamento) interplanar

D₁₀: Diâmetro efetivo para o qual passa 10% do material

D₃₀: Diâmetro efetivo para o qual passa 30% do material

D₆₀: Diâmetro efetivo para o qual passa 60% do material
D_e: Diâmetro equivalente das partículas de escória
DECIV: Departamento de Engenharia Civil
DEGEO: Departamento de Geologia
DEMET: Departamento de Metalurgia
DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EAF: Electric Are Furnace (FEA: Forno elétrico a Arco)
EB: Especificação Brasileira
EMBRAPA: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPA: United States Environmental Protection Agency
et al: expressão latina para citação de referência com mais de um autor:("e outros")
ETAV: Estação de Tratamento de Água e Vapores
ETED: Estação de Tratamento Efluente da Draga
EUA: Estados Unidos da América
FeO: óxido de ferro
FI: Fouling index ou índice de contaminação do lastro
FI: Índice de Contaminação
I_{a(50)}: Índice de resistência anisotrópico
IAB: Instituto Aço Brasil
IB: Índice de Basicidade
IBS: Instituto Brasileiro de Siderurgia
ICEB: Instituto de Ciências Exatas e Biológicas
ICP-OES: Espectrofotômetro de Emissão Óptica com Fonte Plasma Indutivamente Acoplado
II-A: Resíduo Classe II (não perigoso) A (não inerte)
II-B: Resíduo Classe II (não perigoso) B (inerte)
I_s: Índice de carregamento pontual
IUPAC: International Union of Pure and Applied Chemistry
Kg: quilograma
Kw: quilowatts
LD: Linz-Donawitz

LFA: Laboratório de Ferrovias e Asfalto
LGqA: Laboratório de Geoquímica Ambiental
LQ : Limite de Quantificação
ME: Método de Ensaio
MEM2: Mistura de Equilíbrio de Massa de escória e areia
MEM4: Mistura de Equilíbrio de Massa de escória e argila
MEM6: Mistura de Equilíbrio de Massa de escória e bentonita
MEM8: Mistura de Equilíbrio de Massa de escória e lama 2 -ETED
MEM10: Mistura de Equilíbrio de Massa de escória e lama 2 -ETA
MEV: Microscopia Eletrônica de Varredura
MG: Minas Gerais
MIM1: Mistura de Igualdade de Massa de escória e areia
MIM3: Mistura de Igualdade de Massa de escória e argila
MIM5: Mistura de Igualdade de Massa de escória e bentonita
MIM7: Mistura de Igualdade de Massa de escória e lama 1 -ETED
MIM9: Mistura de Igualdade de Massa de escória e lama 2 -ETA
MnO: Óxido de magnésio
MPa: Mega Pascal
NBR: Norma Brasileira Registrada
nm: nanômetro
°C: Graus Celsius
OH: Open Hearth
 P_{200} : Porcentagens em pesos passantes na peneira #200
 P_4 : Porcentagens em pesos passantes na peneira #4
pH: Potencial Hidrogeniônico
PI: Índice de Polarização
pt: ponto
PTM: Pennsylvania Testing Method
R: resistência de um condutor
 r_p : raio do poro
t: tonelada
TDC: Teoria da Dupla Camada

TG/DTG: Termogravimetria/Derivada Termogravimetria

UFOP: Universidade Federal de Ouro Preto

USIMINAS: Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais

V&M: Vallourec & Mannesmann

VSB: Vallourec & Sumitomo Tubos do Brasil

δ_{uc} : Resistência à compressão uniaxial

θ : Ângulo de incidência;

λ : Comprimento da onda

ρ : Resistividade

Ω : ohms

LISTA DE ANEXOS

Anexo I – Planilha dos Resultados do ensaio de Lixiviação - parâmetros inorgânicos para as misturas e argilominerais

Anexo II – Planilha dos Resultados do ensaio de Lixiviação - parâmetros inorgânicos para as misturas e argilominerais (DUPLICATA)

Anexo III – Planilha dos Resultados do ensaio de Solubilização - parâmetros inorgânicos para as misturas e argilominerais

Anexo IV – Planilha dos Resultados do ensaio de Solubilização - parâmetros inorgânicos para as misturas e argilominerais (DUPLICATA)

ÍNDICE

CAPÍTULO 1

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2	JUSTIFICATIVA	2
1.3	OBJETIVOS.....	3
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	4

CAPÍTULO 2

2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	AÇO.....	6
2.2	ESCÓRIA DE ACIARIA.....	9
2.3	ORIGEM E GERAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA LD	10
2.4	ESTADO DA ARTE SOBRE O USO DA ESCÓRIA DE ACIARIA	12
2.5	USO DA ESCÓRIA EM LASTRO DE FERROVIAS	13
2.5.1	Legislação e classificação	17
2.6	PROBLEMAS RELACIONADOS COM A EXPANSÃO DA ESCÓRIA	18
2.7	TRATAMENTOS DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA LD	21
2.7.1	Tratamento na fase sólida.....	22

2.7.2 Tratamento na fase líquida	23
2.8 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS E CAPACIDADE DE TROCA IÔNICA	25
2.9 VITRIFICAÇÃO DO SOLO.....	26
CAPÍTULO 3	
3 METODOLOGIA	28
3.1 MATERIAIS E ARGILOMINERAIS	28
3.1.1 Escória de Aciaria LD	29
3.1.2 Areia	29
3.1.3 Argila Comum	30
3.1.4 Bentonita	31
3.1.5 Lama 1 - ETED	31
3.1.6 Lama 2 - ETAV	32
3.2 PROCEDIMENTOS.....	33
3.3 CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA LD	37
3.3.1 Caracterização química	37
3.3.2 Caracterização física.....	47
3.3.3 Caracterização mecânica	55
3.3.4 Caracterização ambiental	56
3.3.5 Avaliação da condutividade e da expansibilidade.....	58
3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS ADICIONADOS À ESCÓRIA ...	61
3.5 CARACTERIZAÇÃO E PROCESSO DE FUSÃO DAS MISTURAS	61
3.5.1 Aquisição dos materiais adicionados à escória	61

3.5.2	Preparação e caracterização dos materiais	62
3.5.3	Balanço de massa e preparação das misturas	62
3.5.4	Homogeneização dos materiais adicionados à escória.....	67
3.5.5	Determinação da temperatura de fusão das misturas	67
3.5.6	Processo de fusão e tratamento térmico das misturas	68
3.5.7	Processo de cominuição das misturas após a fusão.....	72
3.6	CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS APÓS A FUSÃO	73

CAPÍTULO 4

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	74
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA LD	75
4.1.1	Caracterização química	75
4.1.2	Caracterização física.....	82
4.1.3	Caracterização mecânica	89
4.1.4	Caracterização ambiental	92
4.1.5	Avaliação da condutividade e da expansibilidade.....	95
4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS ADICIONADOS À ESCÓRIA ...	97
4.2.1	Caracterização física.....	97
4.2.2	Caracterização química	101
4.2.3	Caracterização mineralógica	111
4.2.4	Caracterização morfológica.....	115
4.2.5	Caracterização ambiental	121
4.3	CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS APÓS A FUSÃO	123
4.3.1	Determinação da temperatura de fusão das misturas	123
4.3.2	Caracterização física das misturas.....	130
4.3.3	Caracterização química das misturas	137

4.3.4	Caracterização mineralógica das misturas	142
4.3.5	Caracterização morfológica das misturas.....	149
4.3.6	Caracterização ambiental das misturas.....	161
 CAPÍTULO 5		
5	CONCLUSÕES.....	165
5.1	CONSIDERAÇÕES	165
5.2	CONCLUSÕES.....	166
5.3	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	171
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		172

ANEXOS

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O Desenvolvimento Sustentável considera a utilização de tecnologias que estejam em conformidade com as necessidades do presente sem incapacitar as possíveis gerações futuras de atender suas próprias necessidades (BOURDEAU, 2000). Assim os impactos ambientais são os responsáveis pela degradação dos recursos naturais e devem ser minimizados ao máximo pelas indústrias (ARAÚJO, 1997).

Uma das principais causas de degradação ambiental é a geração de resíduos. As alternativas 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 (SOUZA, 2007).

Uma proposta da reutilização de resíduos na área de pavimentação ferroviária seria um setor promissor para a reciclagem por vários motivos, como a redução de passivo ambiental e de insumos naturais que são extraídos de jazidas ou minerações. Além do ponto de vista financeiro e a viabilidade que está vinculada à quantidade disponível de resíduo e neste ponto ressalta-se a indústria siderúrgica (OLIVEIRA, 2006).

Dentre os resíduos siderúrgicos, pode-se salientar as escórias de aciaria LD (Linz-Donawitz), geradas na produção do aço. Estas apresentam um caráter expansivo, e são geralmente armazenadas em áreas abertas. Quando usadas sem controle de qualidade, essa característica é a principal responsável pelo surgimento de manifestações indesejadas nas aplicações em que foram incorporadas. Dessa maneira, a busca por novos materiais na área de pavimentação rodoviária, conjuntamente com a necessidade da indústria

siderúrgica em empregar seus resíduos constitui um grande esforço no sentido de alcançar o desenvolvimento sustentável.

1.2 JUSTIFICATIVA

O passivo ambiental representa os danos causados ao meio ambiente, proporcionando assim, a obrigação e a responsabilidade social da empresa com aspectos ambientais (ARAUJÓ, 1997).

Uma empresa tem passivo ambiental, quando ela agride de algum modo o meio ambiente e não dispõe de nenhum projeto para sua recuperação. Dessa forma, é necessário promover investimentos em prol de ações relacionadas à extinção ou amenização dos danos causados ao meio ambiente.

Desse modo, as empresas devem fomentar estudos técnicos junto à área acadêmica com o intuito de elaborar um plano de viabilização da destinação de resíduos, como é o caso deste estudo que consiste em um método para estabilizar quimicamente o coproduto siderúrgico produzido em aciaria, para tornar viável sua utilização como lastro em ferrovias.

A escória recém produzida é caracterizada como resíduo industrial classe IIA (não perigoso, não inerte) segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004), devido as concentrações do elemento alumínio ultrapassarem os limites permissíveis, sendo classificada como resíduo IIB (não perigoso, inerte), somente após umectação por 90 dias. Essa questão leva ao estudo da escória na fase líquida, com adições de argilominerais em fusão para estabilização do alumínio, que possibilite classificar o material como resíduo IIB sem a necessidade da cura úmida, otimizando assim sua utilização para ferrovias, além da questão da sua expansão que também seria melhorada. Essa linha de pesquisa é traduzida pela Tabela 1.1.

Tabela 1.1: Linha de Pesquisa.

Escória recém produzida = classe IIA (elemento Al) e expansiva
FASE SÓLIDA: Umectação = classe IIB (90 dias) e não expansiva
FASE LÍQUIDA: Adições de argilominerais

Com a fusão idealizada, hipoteticamente, seria simulado um “metamorfismo artificial” provocado na escória em analogia ao ciclo de rochas, que são convencionalmente utilizadas como produto britado para lastro de ferrovia.

Considerando a formação das rochas pelos processos de cristalização, intemperização e metamorfismo, compara-se a escória como rocha ígnea inicialmente no resfriamento em pátios, como rocha sedimentar pela ação de intempéries com a formação de finos; e fechando o ciclo, por meio do tratamento na fase líquida, com recristalização e acréscimo de argilominerais para suprir sua composição química, como rocha metamórfica.

Uma forma de contribuir para a diminuição dos custos de implantação de sistemas ferroviários e dos impactos ambientais seria a adoção de materiais alternativos em substituição aos materiais pétreos usados nos lastros, como britas de granito e basalto, que possuem alto custo e provocam impactos ambientais associados em todas as fases de sua obtenção.

Um material alternativo interessante, que poderia ser utilizado em lastros de pavimentos ferroviários, seria a escória de aciaria que é produzida em larga escala nas siderurgias.

1.3 OBJETIVOS

Este trabalho possui como principal objetivo o desenvolvimento de uma metodologia para estabilização química, mecânica e ambiental da escória de aciaria LD, adequando sua composição com adição de argilominerais em fusão, para verificar a viabilidade dessa mistura na aplicação como lastro ferroviário visando atender as conformidades referentes às normas brasileiras.

Quanto aos objetivos específicos deste trabalho, podem ser citados:

- ✓ Observar a influência da adição dos materiais, contendo argilominerais, na caracterização final da escória de aciaria LD;
- ✓ Determinar propriedades químicas da escória de aciaria LD;
- ✓ Avaliar e adaptar o processo químico de fusão 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 amostras de escória pura e misturas;
- ✓ Aplicação das normas técnicas como ferramenta científica sendo conduzida por meio dos ensaios prescritos na NBR 5564 (ABNT, 2011)

de Lastro Padrão e NBR 10004 (ABNT, 2004) de Classificação de Resíduos Industriais.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação de mestrado se encontra estruturada em capítulos, conforme a descrição que se segue:

O primeiro capítulo apresenta a introdução ao assunto estudado, contextualizando a aplicação de resíduos na pavimentação ferroviária, a justificativa do tema proposto, os objetivos e a estrutura da pesquisa.

Em seguida, o Capítulo 2 relativo à revisão bibliográfica, contempla o estado da arte sobre o uso e estudos abordando as escórias de aciaria LD, sua viabilidade, tratamentos de estabilização entre outros aspectos.

De acordo com a itemização, após a revisão bibliográfica, especifica-se o proposto nesse trabalho com o Capítulo 3 da metodologia adotada com descrição do tipo de tratamento dado a escória.

Neste capítulo são detalhados os ensaios de caracterização conforme as normas vigentes que foram feitos para os materiais. Em ordem de execução, primeiramente é descrita a caracterização da escória recém produzida e dos argilominerais. Após, são narradas as etapas do processo de fusão da escória com cada tipo de argilomineral proposto, constando da aquisição dos materiais, armazenamento, estudo de balanço de massa, preparação das misturas, determinação prévia da temperatura de fusão, o próprio tratamento térmico, resfriamento e cominuição das misturas.

O método finaliza com a caracterização dos novos materiais obtidos pelas misturas, repetindo os mesmos ensaios realizados na caracterização dos materiais puros, a título de comparação das mudanças e propriedades adquiridas, com foco geotécnico para a aplicação ferroviária.

Em sequência apresenta-se o Capítulo 4 dos resultados obtidos por meio dos ensaios e métodos de caracterização. Nesse avanço da pesquisa os resultados são discutidos e referenciados na revisão bibliográfica e metodologia, conforme mencionada a estratégia de comparação, a partir da repetição dos ensaios. Dessa forma demonstram-se neste capítulo os efeitos da técnica de fusão aplicada nos materiais primários.

No último tópico, Capítulo 5, 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 para este estudo e os anexos de importância.

Assim, este trabalho é constituído de cinco capítulos que definem e complementam o assunto abordado de forma abrangente.

CAPÍTULO 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nos últimos anos, os resíduos industriais têm recebido maior atenção para a reciclagem e aplicação alternativa. Este fato atribui-se tanto a aspectos econômicos quanto ambientais, ressaltando motivos que valorizam a proposta de reutilização.

O desafio para a Engenharia em um futuro próximo, 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).

Dentre os diversos resíduos, podem-se salientar as escórias de aciaria geradas em grande escala pelas siderúrgicas na produção do aço, que apresentam caráter expansivo e são armazenadas em áreas abertas, ou quando usadas não possuem controle de qualidade.

Dessa forma, a busca por novos materiais para serem utilizados como lastro para a área ferroviária conjuntamente com a necessidade da indústria siderúrgica em empregar a produção de seus resíduos constitui um grande esforço no sentido de alcançar um desenvolvimento sustentável e credenciar esse coproduto.

2.1 AÇO

O aço é uma liga metálica formada de ferro e carbono, com um teor em carbono de até 2% (MAIA, 2002). Os principais métodos de produção são: a fusão e refino da sucata em fornos elétricos a arco; ou o refino do gusa líquido em conversores a oxigênio (SANO *et al.*, 1997). A primeira técnica se fundamenta na produção a partir de uma carga sólida, enquanto que a segunda ocorre a partir de uma carga líquida, precedida de uma carga de sucata. Os respectivos processos são designados pelo tipo de equipamento utilizado, que são o forno elétrico a arco (FEA) e o conversor LD, ou Linz Donawitz, que é referência na região da Áustria. Os conversores LD a oxigênio vêm sendo

empregados para produção de elevadas quantidades de aço, sobressaindo à produção de produtos planos, como chapas automobilísticas (FERNANDES, 2010).

De acordo com o Instituto Aço Brasil (IAB) a indústria do aço no Brasil foi responsável pela produção, em 2011, de 35,2 milhões de toneladas de aço bruto, levando o país a ocupar a 9^a posição no ranking da produção mundial, como mostra a Tabela 2.1, e acompanhando proporcionalmente o crescimento em nível tanto da América Latina quanto mundial como revela o gráfico da Figura 2.1. Além dos grandes grupos que contribuem para esse desenvolvimento, composto por 29 usinas em 10 estados da Federação, como na Figura 2.2.

Tabela 2.1: Produção mundial de aço bruto (10^6 t) (Adaptada de Instituto Aço Brasil, IAB, 2011).

PAÍS	2010	2011
China	627,5	679,2
Japão	109,6	107,6
EUA	80,5	86,4
Índia	68,3	71,3
Rússia	66,9	68,9
Coréia do Sul	58,9	68,5
Alemanha	43,8	44,3
Ucrânia	33,4	35,3
Brasil	32,9	35,2
Turquia	29,1	34,1
Outros	268,2	281,4
Total Mundial	1419,1	1512,2

Produção de Aço Bruto (10^6 t)

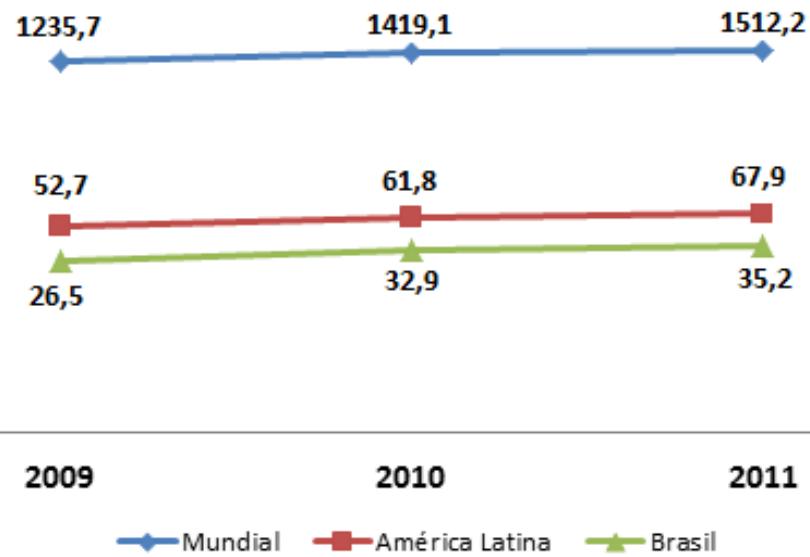


Figura 2.1: Gráfico do crescimento da produção de aço (IAB, 2011).

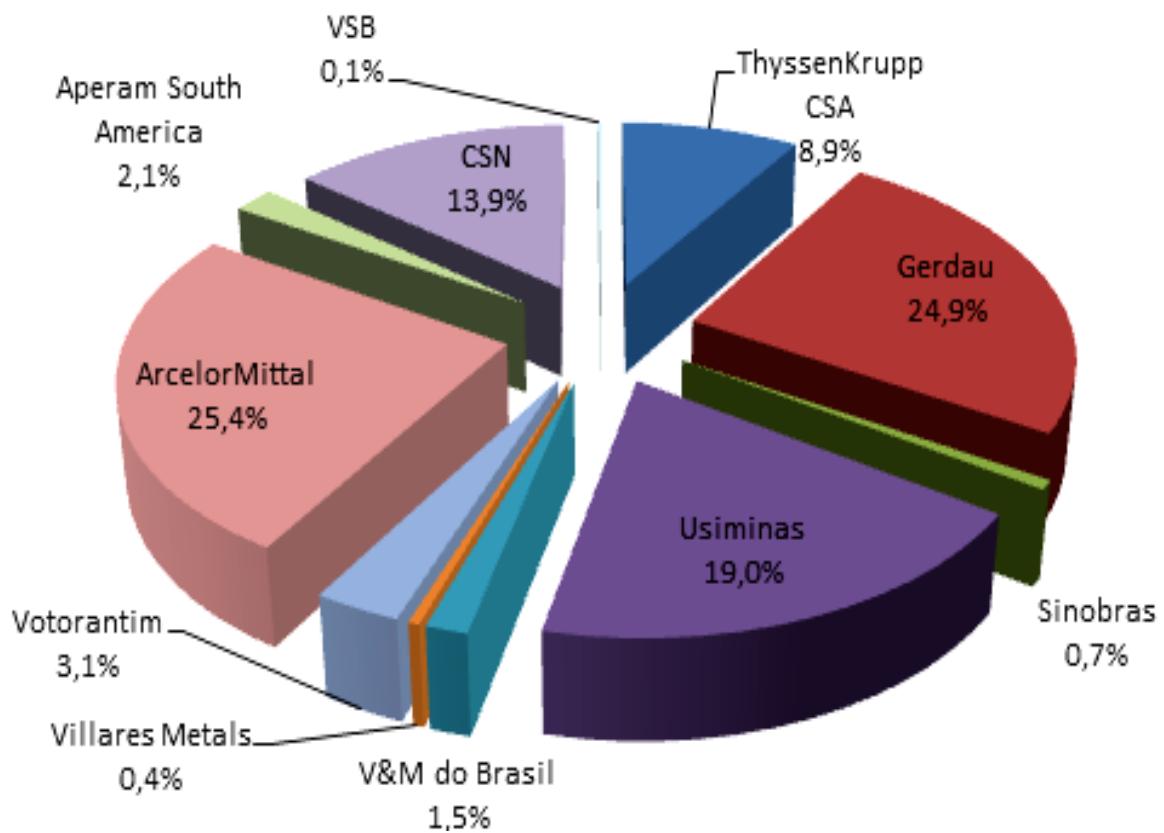


Figura 2.2: Gráfico dos grupos da produção de aço (IAB, 2011).

2.2 ESCÓRIA DE ACIARIA

A norma NBR 5019 (ABNT, 2001) define a escória como um produto líquido ou pastoso produzido durante operações pirometalúrgicas, geralmente contendo sílica, que se torna sólido à temperatura ambiente.

As escórias são os resíduos de maior geração no processo siderúrgico. A cada tonelada de aço produzido, gera-se de 70 a 170 kg de escória. Podem ser produzidos dois tipos de escória: a de alto-forno e a de aciaria, sendo a de alto-forno gerada durante a obtenção de ferro-gusa. A escória de aciaria é obtida na produção do aço (MASUERO, 2001).

A maioria das escórias é formada pela solução da mistura de óxidos e silicatos, algumas vezes com aluminatos, fosfatos e boratos em uma reação endotérmica (MOORE, 1993).

A escória é um material que apresenta funções fundamentais no processo de fabricação do aço, a fim de garantir boa qualidade ao produto final. A escória foi considerada um resíduo de pouco ou nenhum valor, mas hoje já é vista, em muitos países, como um subproduto capaz de conferir valor agregado aos materiais nos quais é aplicada. Além dessa vantagem, também reduz os gastos no transporte e no controle das extensas áreas de disposição geradas para seu descarte.

Dessa forma, o setor siderúrgico tem enfatizado o conceito sustentável por meio da reciclagem de resíduos, dos quais as escórias correspondem à maior parte.

Com a sua reutilização, a classificação de escória, do ponto de vista ambiental, passa de resíduo sólido para coproduto, ou seja, que pode servir de matéria-prima ou insumo para outros processos (PENA, 2004).

A norma brasileira para classificação de resíduos sólidos industriais, NBR 10004, define material perigoso (classe I) e não perigoso (classe II), esta última categoria ainda subdividida em inerte (IIA) e não inerte (IIB) (ABNT, 2004).

Em outros países, as escórias pertencem à classe não perigosa, e no Brasil, se enquadram também a categoria de não periculosidade, com subdivisão II-A, não inerte, por geralmente apresentarem valores de alguns elementos químicos acima dos limites da NBR 10004 (ABNT, 2004). Mesmo sendo definida como não inerte, a disposição das escórias em solos não provoca problemas no ponto de vista químico, pois os componentes são liberados em pequenas quantidades e dificilmente afetam a qualidade da água subterrânea (PENA, 2004).

Entretanto, a estocagem próxima a mananciais ou rios deve ser evitada, e cada escória de aciaria deve ser avaliada quanto as suas propriedades específicas, devido à heterogeneidade do material (MAAS, 1984).

2.3 ORIGEM E GERAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA LD

As escórias de aciaria se formam no processo de refino do aço onde se controla a percentagem de carbono e se elimina o excesso de impurezas que possam afetar a qualidade do produto (SILVA, 1988).

Há tipos diferentes de escórias que são caracterizadas pelo emprego também de distintos tipos de fornos de refino, como o LD ou BOF (Blast Oxygen Furnace) que utiliza o conversor a oxigênio; o elétrico ou EAF (Electric Arc Furnace) que utiliza o forno de arco elétrico e OH (Open Heart) que utiliza o forno Siemens-Martin (MACHADO, 2000; CASTELO BRANCO, 2004).

Na fabricação do aço em um conversor a oxigênio, a sucata e o gusa líquido são adicionados ao conversor. Em seguida, é introduzida uma lança injetando oxigênio gasoso a alta velocidade (ARAÚJO, 1997).

Após a fusão do metal no conversor, adiciona-se a cal virgem e a cal dolomítica. O oxigênio e a cal virgem são usados para a eliminação de elementos indesejáveis no aço, como carbono, silício e fósforo. A cal dolomítica é usada na proteção do revestimento refratário.

Finalmente é gerado o aço e a escória de aciaria, que ficam separados graças à diferença de densidade, como mostrado na Figura 2.3.

A escória de aciaria é transportada a um pátio para resfriamento. A partir desta etapa, a escória segue para os processos de fragmentação, britagem e moagem, separação magnética e granulométrica.

A composição química da escória de aciaria LD depende da matéria-prima usada, do processo de produção, do revestimento do conversor, do tipo de aço produzido, da forma de resfriamento e sua armazenagem.

Vários autores obtiveram as composições de suas respectivas escórias estudadas, onde se observa grande variedade, como mostra a Tabela 2.2.

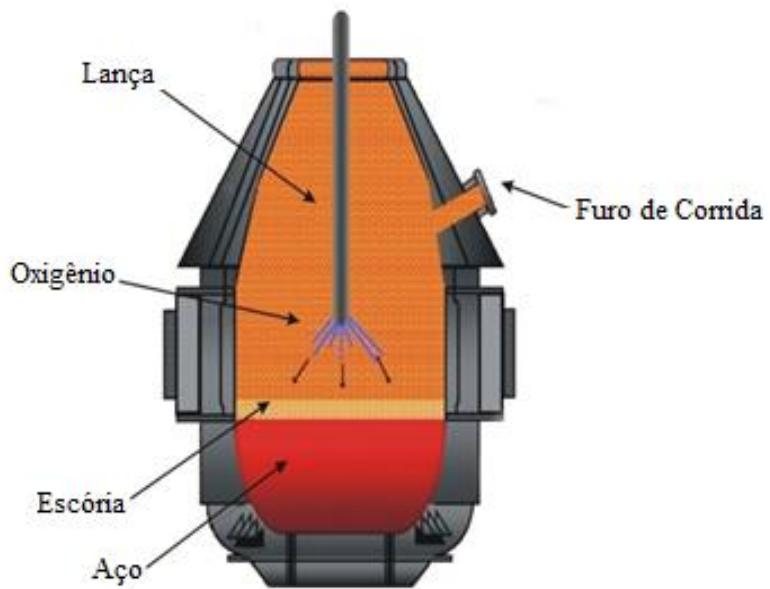


Figura 2.3: Detalhe do conversor a oxigênio (FERNANDES, 2010).

Tabela 2.2: Composições químicas de escórias de aciaria (Adaptada de FERNANDES, 2010).

Autor	Espécies químicas (% em massa)									
	CaO	CaO Livre	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	P ₂ O ₅	S	Fe Total	K ₂ O
GEORGE & SORRENTINO, 1982	47	-	13	1	6	5	2	<0,1	25	-
MURPHY <i>et al</i> , 1997	35	-	18	3,6	11,5	6,5	-	-	-	-
LITTLE & SETEPLA, 1999	36 - 46	-	11 - 15	0,8- 4	5- 12	-	-	-	14 - 22	-
GEISELER, 1999	48 - 54	-	11 - 18	1 - 4	1 - 4	1 - 4	-	-	14 - 19	-
MOTZ & GEISELER, 1998	45 - 55	-	12 - 18	< 3	< 3	< 5	< 2	-	18	-
GEISELER <i>et al.</i> , 2001	42 - 50	-	12 - 15	< 3	5 - 8	< 5	< 2	-	15 - 20	-
IGUCHI <i>et al.</i> , 2001	52	-	9	1,3	5	3,3	0,7	-	19,2	-
FILEV, 2002	44,3	-	13,8	1,5	6,4	5,3	-	0,07	17,5	-
GUMIERE, 2000	49,3	7,5	11,6	2,8	4,4	4,5	1,30	0,29	23	-
SOUZA, 2007	43,8	4,55	8,03	2,36	1,68	4,95	1,43	0,09	36,86	-
FERNANDES, 2010	28,68	0,87	8,32	9,44	1,33	5,46	5,44	-	40,01	1,32
PINTO JR., 2012	38,69	-	9,10	1,22	7,16	3,93	1,50	0,02	24,13	-

2.4 ESTADO DA ARTE SOBRE O USO DA ESCÓRIA DE ACIARIA

O estado da arte, ou seja, o ponto no qual se encontram as pesquisas científicas sobre as aplicações da escória de aciaria, compõe uma vasta revisão bibliográfica.

As pesquisas desenvolvidas entre os anos 70 e 90 tiveram como principal objetivo analisar o emprego das escórias de aciaria em pavimentação.

A grande maioria das escórias de aciaria é aplicada como agregados na estabilização de solos, em lastros de ferrovias, em contenções com gabiões e enrocamentos, construção de bases, sub-bases, revestimento asfáltico, materiais para aterros, obras hidráulicas e cimento. Gutt (1972), Kobe Steel (1977), Emery (1978), Piret (1978), Ando (1978), Nomura e Enokido (1981), Haga *et al.* (1981) e Holliday (1997), citam avaliações para o credenciamento das escórias de aciaria nestes tipos de obras. Outras aplicações divulgadas desse coproducto são ainda como fertilizante e corretivo de solos na agricultura, controle na drenagem de ácidos, entre outros.

A evolução de grande parte das técnicas de aplicação da escória de aciaria, a nível mundial, abrange além das normas internacionais vários autores com aprimorados trabalhos para viabilização desse coproducto.

Países como a Alemanha, França, Inglaterra, Japão, Estados Unidos e Rússia já contam com normalizações sobre o uso de escórias siderúrgicas. Enquanto Japão, Austrália, Canadá, e alguns países europeus já aplicam as escórias de aciaria na engenharia (GEISELER *et al.*, 2001).

No Brasil é extenso o banco de dados que reúne os vários estudos acadêmicos que seguem essa linha de pesquisa, que em ordem cronológica esclarecem o caminho seguido para habilitação do uso da escória de aciaria como lastro ferroviário e outros empregos em nível nacional.

Porém os índices de aproveitamento das escórias em obras de engenharia ainda são baixos no país, e se restringem a maioria para a fabricação de cimento na construção civil, como mostrado no gráfico de percentuais da Figura 2.4. (IAB, Instituto Aço Brasil, 2011).

Muitos estudos são desenvolvidos por universidades brasileiras, em parceria com siderúrgicas nacionais, visando o uso de escórias de aciaria LD em pavimentação rodoviária. Alguns desses trabalhos são os de Machado (2000), Gumiere (2000),

Geyer (2001), Masuero (2001), Mancio (2001), Rohde (2002), Nascimento (2003), Castelo Branco (2004), Fernandes (2005), Souza (2007), Diniz (2009), Fernandes (2010), entre vários outros.

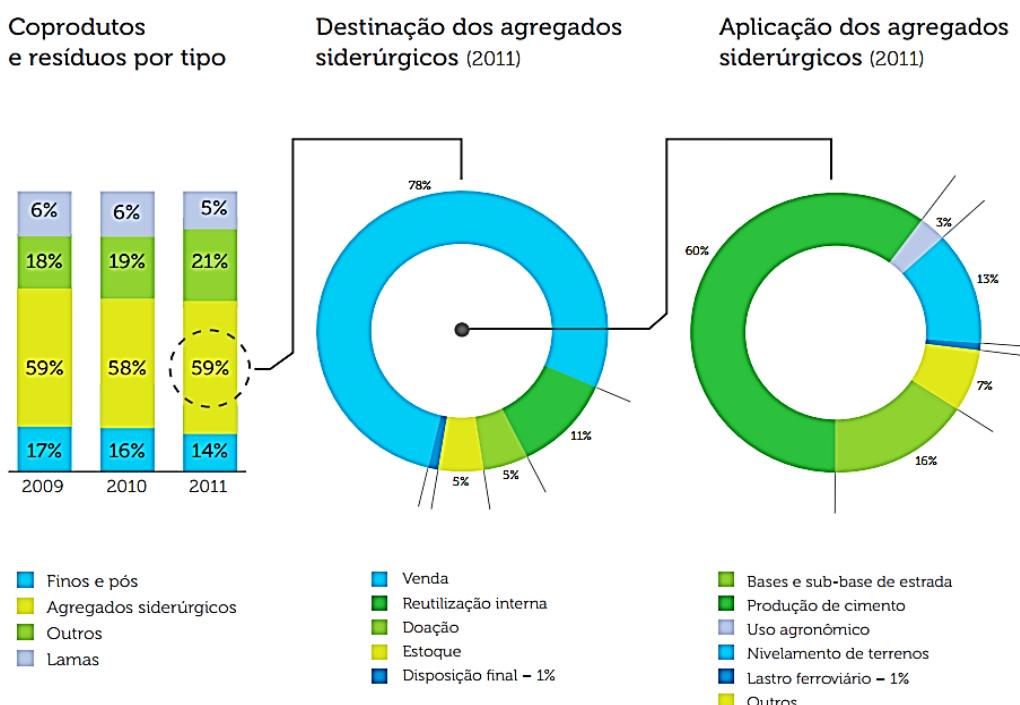


Figura 2.4: Percentual de aplicações das escórias (IAB, 2011).

2.5 USO DA ESCÓRIA EM LASTRO DE FERROVIAS

O lastro é o elemento da superestrutura da estrada de ferro situada entre os dormentes e o sublastro e tem a principal função de distribuir as cargas sobre essa plataforma. Ele deve atender, entre outras, qualidades e características como eliminar irregularidades da plataforma; garantir a elasticidade da via; fixar a posição dos dormentes; facilitar a restauração e manutenção da geometria da via; melhorar a permeabilidade e ventilação, evitar a formação de lama, além de a estabilidade e a durabilidade da via terem dependência direta com o lastro (FERNANDES, 2010).

As ferrovias que operam no Brasil utilizam lastro de pedra britada nas faixas granulométricas apropriadas para desempenho das suas funções. Tradicionalmente um bom lastro é aquele que possui rochas angulares, britadas e duras, uniformemente graduadas, livre de finos e impurezas e não propenso a cimentação (SELIG, 1994).

Logo se percebe que o lastro deve atender a várias especificações para ter bom desempenho e durabilidade. Então para uma visão geral dos componentes das vias férreas e da importância do lastro na infraestrutura, conforme ilustrado pela Figura 2.5, toma-se como exemplo os esforços atuantes no sistema ferroviário. Ensaios *in situ* mostram que ocorre uma quebra progressiva dos materiais de lastro, devido principalmente às cargas provenientes do tráfego e dos efeitos da socaria na manutenção da via, além da ação de materiais contaminantes. Essa deterioração é altamente dependente do tipo e da qualidade do material que é constituído o lastro e suas propriedades química e mecânica (MACHADO, 2000).

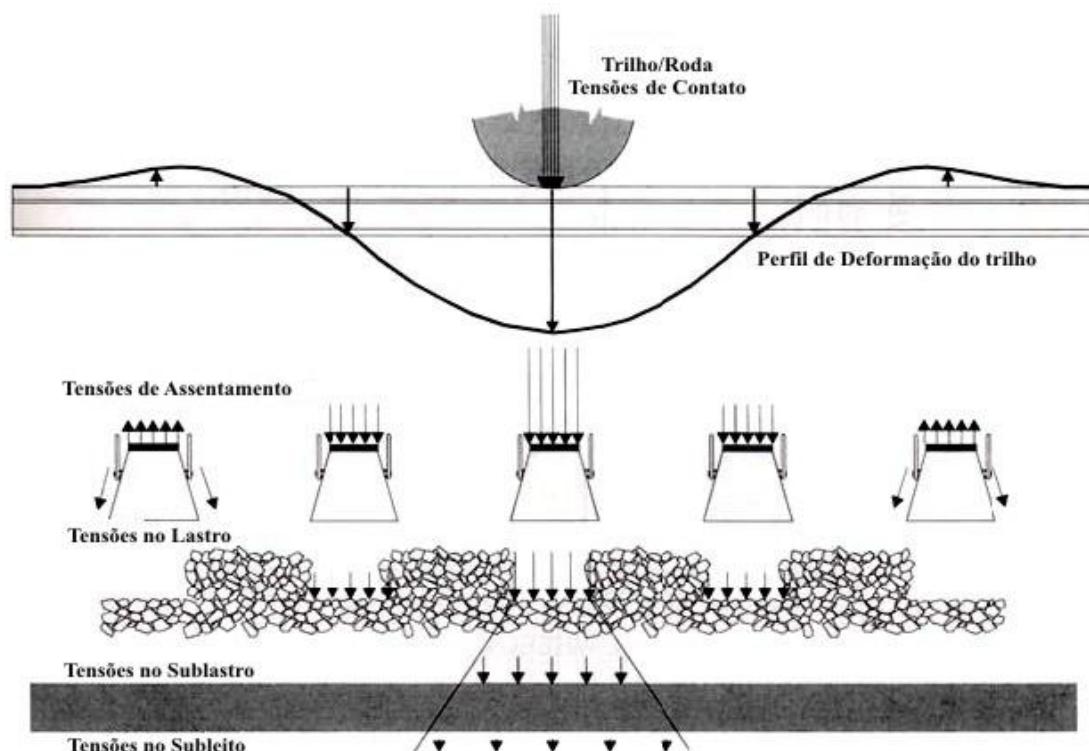


Figura 2.5: Transferência dos esforços atuantes no sistema ferroviário (SELIG e WATERS, 1994).

O sublastro é a camada que separa o lastro e o subleito com a função, assim como do lastro, de reduzir as tensões transmitidas para o subleito, evitando o aumento direto da espessura da camada de lastro. Mas sua função primordial é prevenir a penetração de partículas entre as camadas de lastro e subleito, funcionando como filtro. E o subleito é a fundação, podendo ser representado pelo terreno natural ou por solo de aterro, com a função de estabilizar a estrutura da via, evitando seu colapso por perda de capacidade de carga ou por recalques excessivos (SELIG e WATERS, 1994).

Retomando a inserção da escória de aciaria LD como agregado para lastro, após várias investigações, das propriedades e metodologias para melhora de sua performance técnica, a sua granulometria superior a 12,5 mm, salvo uma pequena tolerância de 5% da massa total (ABNT, 2011), foi disponibilizada no mercado ferroviário, pois apresenta características que a torna atrativa para essa utilização, além do fator econômico.

Os materiais para lastro no Brasil são selecionados, conforme já mencionado, de acordo com a especificação vigente na NBR 5564 (ABNT, 2011), contendo basicamente prescrições em termos de granulometria, propriedades de resistência e forma do material de lastro, como apresentados os parâmetros nas Tabelas 2.3 e 2.4.

Tabela 2.3: Propriedades físicas do lastro padrão (NBR 5564 (ABNT, 2011)).

Propriedade Física	Especificação	Referência
Massa específica aparente mínima	2,5g/cm ³	ANEXO B *
Limite de massa unitária	1,25g/dm ³	NBR NM 51
Absorção de água máxima	0,8%	ANEXO B *
Porosidade aparente máxima	1,5%	ANEXO B *
Resistência à compressão axial mínima	100 MPa	ANEXO D *
Resistência ao desgaste - abrasão Los Angeles máxima.	30%	NBR NM 51
Resistência ao choque-índice de tenacidade Treton máximo.	25%	ANEXO E *
Partículas lamelares máximo	15%	ANEXO A *
Formato da partícula	cúbica	ANEXO A *
Teor de fragmentos macios e friáveis**	5%	ANEXO F *
Material pulverulento máximo	1%	NBR NM 46
Torrões de argila máximo	0,5%	NBR 7218
Resistência à intempérie**	10%	ANEXO C *

NOTAS: (*) Anexos da NBR 5564 (ABNT, 2011); (**) Verificação Opcional.

Tabela 2.4: Distribuição granulométrica do lastro padrão (NBR 5564 (ABNT, 2011)).

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

NOTA: Padrão A e B referem-se, respectivamente, a lastro para aplicação em linhas principais e a lastro para aplicação em linhas de pátios. Na falta da letra A ou B, entende-se como A.

A NBR 5564 (ABNT, 2011) não considera materiais alternativos como as escórias para uso em lastro e também não aborda a questão da resistividade.

No entanto, a AREA, American Railway Engineering Association, institui um método para determinação da resistividade elétrica, estabelecendo um valor mínimo de $300\Omega\text{m}$, que pondera as possíveis interferências com o sistema de sinalização de algumas ferrovias (AREA, 1991).

Em termos de lastros com escórias de aciaria, a American Railway Engineering and Maintenance of Way Association, AREMA (2001), recomenda que a escória utilizada tenha um percentual de óxido de cálcio (CaO) menor do que 45% e que o somatório dos percentuais de óxidos de alumínio (Al_2O_3) e de ferro (Fe_2O_3 e FeO) seja inferior a 30% (SOUZA, 2007).

Segundo Machado (2000), a escória de aciaria tem melhores propriedades do que os agregados naturais na aplicação em via férrea, por exemplo, maior resistência ao desgaste, à abrasão e massa específica alta, o que permite um melhor comportamento do lastro quanto ao movimento lateral. Também não apresenta substâncias orgânicas e proporciona eficiente drenagem ao lastro por sua estrutura vesicular, evitando assim seu afundamento por penetração de água e vibração. Ainda confere melhor ajuste dos dormentes e dos grãos devido a sua rugosidade. Além destes fatores, a escória de aciaria

tem boa resistência elétrica, o que evita interferências em sinais utilizados nos sistemas de controle em ferrovias conforme o estudo de Souza (2007).

Mais vantagens do uso alternativo desse coproduto estão relacionadas ao meio ambiente, com a mitigação de danos e degradação ambientais, reduzindo a exploração de pedreiras; e também a questão logística, visto a proximidade do sistema siderurgia-ferrovia, que facilita o transporte e aplicação do produto (FERNANDES, 2010).

2.5.1 Legislação e classificação

A política ambiental de utilização de resíduos sólidos industriais ressalta que estes devem ser tratados obedecendo-se as disposições legais pertinentes, reduzindo assim, possíveis riscos de impacto ao meio ambiente e eventuais punições previstas na Lei de Crimes Ambientais – Lei nº.9.605, de 12 de fevereiro de 1998.

Quanto a essa legislação, a Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, preconiza as seguintes normas técnicas para a definição e classificação de resíduos sólidos industriais:

- ✓ NBR 10004 (ABNT, 2004) - Resíduos Sólidos Industriais: Classificação;
- ✓ NBR 10005 (ABNT, 2004) - Procedimento de obtenção do extrato lixiviado de resíduos sólido;
- ✓ NBR 10006 (ABNT, 2004) - Procedimento de obtenção do extrato solubilizado de resíduos sólidos.

Estas normas caracterizam resíduos, no estado sólido e semi-sólido, resultantes de atividades industriais e são obrigatórias na gestão de resíduos considerando o potencial de contaminação ao meio ambiente, tanto a curto, médio e longo prazo. A NBR 10004 (ABNT, 2004) classifica os resíduos nas seguintes categorias:

- ✓ Resíduos Classe I – Perigosos;
- ✓ Resíduos Classe II – Não Perigosos: Resíduos Classe IIA – Não Inertes;
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 II ou Não Perigosos são subdivididos em Classe IIA ou Não Inertes e Classe IIB ou Inertes. Os de Classe IIA são materiais que podem apresentar propriedades tais como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água. E os de Classe IIB são aqueles que, submetidos a testes de solubilização, conforme NBR 10006 (ABNT, 2004), não apresentem nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões definidos.

Para o uso da escória em lastro de ferrovia, a mesma deve passar pela classificação de resíduos sólidos, de acordo com a legislação anteriormente citada, enquadrando-se em uma categoria ambientalmente segura.

2.6 PROBLEMAS RELACIONADOS COM A EXPANSÃO DA ESCÓRIA

A escória de aciaria possui uma limitação quanto ao seu reaproveitamento. Este problema é devido à presença, em seu arranjo, de compostos expansivos que a tornam instável quando sujeita as ações do ambiente, pelas reações de hidratação, decomposição, oxidação e transformação estrutural.

A hidratação dos óxidos CaO e MgO livres é a causa principal da expansão da escória, sendo as reações deste processo representadas pelas seguintes equações:



A cal livre, quando hidratada, forma Ca(OH)₂ e, o MgO, forma Mg(OH)₂ como nas Equações 2.1 e 2.2.

Além dessas hidratações, há a reação de carbonatação da Equação 2.3, e ainda em menor escala, a corrosão de FeO, que também são prejudiciais por contribuir com o comportamento expansivo da escória (CASTELO BRANCO, 2004).

Os principais mecanismos que controlam a expansão ou estabilização da escória de aciaria são destacados por Machado (2000) conforme a Tabela 2.5.

Tabela 2.5: Parâmetros que influenciam na expansão da escória de aciaria (Adaptada de MACHADO, 2000).

Espécies Químicas	Parâmetros que influenciam na expansão	Mecanismo
CaO e MgO	Teor da espécie no estado livre; Umidade; Temperatura; Teor de CO ₂ ; Tamanho dos grãos de escória.	Hidratação
Fe ⁰	Teor de Fe ⁰ ; Umidade; Tempo de exposição ao ar; Teor de oxigênio no resfriamento; Tamanho dos grãos de escória.	Oxidação
C ₂ S	Velocidade de resfriamento; Impurezas iônicas; Temperatura de resfriamento; Basicidade das escórias.	Transformação alotrópica

A literatura indica uma relação direta entre a presença de CaO_{livre} e a expansibilidade da escória de aciaria. Existem os seguintes tipos de CaO nas escórias: a forma livre e a combinada. A forma livre pode estar ainda subdividida em residual ou precipitada, sendo a residual mais esponjosa e expressiva em termos de dilatação volumétrica (FERNANDES, 2010).

O excesso de CaO_{livre}, especialmente na presença de solução contendo pequenas quantidades de FeO ou wustita é a principal causa do aumento de volume das escórias (MONTGOMERY e WANG, 1991).

Outra relação envolvendo a cal livre é citada por Gupta *et al* (1994), onde estudos mostram que o teor de CaO_{livre} é diferente para amostras coletadas em uma mesma pilha, e cresce com a profundidade da coleta, mas mesmo nas escórias envelhecidas ao intemperismo, o teor de CaO_{livre} pode não reduzir. Isso se explica, pois parte do CaO_{livre} pode estar enclausurado pelos silicatos insolúveis ou nos poros internos das escórias, ficando portanto, protegidos do contato da água ou do CO₂.

Quanto à expansão devido ao óxido de magnésio, este composto pode ocasionar problemas de expansão quando sob a forma de periclásio, que é mais rara.

As Inequações 2.4 e 2.5 descrevem a estabilidade do óxido de magnésio, segundo Montgomery e Wang (1991).

$$\text{MgO estável} \rightarrow [\text{MgO} / (\text{FeO} + \text{MnO})] < 1 \quad (2.4)$$

$$\text{MgO instável} \rightarrow [\text{MgO} / (\text{FeO} + \text{MnO})] > 1 \quad (2.5)$$

Estas inequações são baseadas na premissa de que o MgO pode formar soluções sólidas com FeO e MnO. Para a maioria das escórias esta relação é menor que 1, apresentando o MgO sob forma estável (PINTO JR., 2012).

As escórias podem sofrer influência também da 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 (FERNANDES, 2010).

Ainda, quanto ao aumento volumétrico devido à transformação alotrópica do silicato dicálcico, o silicato tricálcico, C₃S, aparece especialmente em escórias de alta basicidade durante os primeiros estágios de resfriamento, mas irá se decompor em uma temperatura próxima de 1200°C.

A estrutura da alita torna-se termodinamicamente instável e se decomporá em 1200°C para silicato dicálcico e cal. Esta transformação depende da taxa de resfriamento da escória e pode ser extinta se esta taxa for alta (GUMIERE, 2000).

Seja por hidratação, carbonatação ou oxidação, irá ocorrer um significativo aumento de volume em relação às dimensões originais dos cristais que compõem a escória e este fenômeno conduzirá à expansão destrutiva da mesma, gerando muitos finos.

A cal livre é a principal responsável pela expansibilidade nas escórias de aciaria e em quantidade pode levar a uma ampliação de aproximadamente 50 % do seu volume inicial, com apenas um teor de 7 % de CaO_{livre}. Esse teor deve ser limitado como critério de classificação e aplicação das escórias e para garantir maior durabilidade dos pavimentos deve ser menor 3 % de acordo com as normas rodoviárias PRO 263 (DNIT, 1994), EM 262 (DNIT, 1994) e AREMA. Para alcançar esse resultado as escórias devem ser expostas a ação das intempéries para estabilizar-se num período mínimo de 3 meses.

São muitos os métodos de avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria LD e as metodologias variam de acordo com as normas de cada país.

No que se refere à quantificação do teor de CaO_{livre}, há uma preferência científica pela técnica de extração por meio de etilenoglicol, que é mais utilizada, por ser simples e eficiente.

A norma brasileira NBR NM 13 (ABNT, 2012) trata do teor de CaO_{livre} em cimentos por meio do etilenoglicol e contém o procedimento para essa determinação, mas esta metodologia não dissocia, a partir de um período de aproximadamente 30 dias, o Ca(OH)₂ do CaO_{livre} total, avaliando essas duas formas somadas (SOUZA, 2007).

A quantificação separada do Ca(OH)₂ pode ser feita por difração de raios-X se estiver totalmente na forma cristalina, ou a mais indicada termogravimetria, que fornece o comportamento dos materiais frente ao aquecimento, tendo como principais parâmetros analíticos a faixa de temperatura na qual a amostra estudada obtém uma composição química constante, a temperatura onde se inicia seu processo de decomposição e o acompanhamento das reações de desidratação, oxidação e combustão (SILVA, 2013).

2.7 TRATAMENTOS DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA LD

Conforme já colocado, a escória de aciaria recém produzida não está totalmente pronta para ser utilizada como lastro de ferrovia. Ainda necessita de um tratamento para ajuste

de sua composição química, de forma a evitar alguns desconfortos geotécnicos pela geração de finos, por exemplo, causada pela quebra excessiva após sua expansão.

A via ferroviária precisa de resistência mecânica e estabilidade, além de permanecer livre de contaminantes para proteção do solo e boa drenagem.

Essas e outras questões vantajosas associados ao uso da escória, levaram a alguns estudos que sugerem tratamentos para a estabilização desse coproducto. Essas metodologias variam conforme o estado físico que se conduz a escória em cada método, ou seja, em fases líquida ou sólida.

2.7.1 Tratamento na fase sólida

Os estudos mais recentes conhecidos no meio acadêmico para tratar a escória de aciaria LD em estado sólido foram desenvolvidos por Souza, em 2007, e Fernandes, em 2010.

Souza (2007) realizou um estudo onde o programa experimental envolvido constava basicamente na caracterização química, mineralógica, física, mecânica e ambiental, além da determinação da resistividade elétrica dos principais materiais utilizados como lastro de ferrovia por meio de ensaios realizados em campo e em laboratório. Foi realizada uma análise conjugada destes resultados permitindo apontar problemas e possíveis soluções no uso da escória de aciaria como material para composição de lastro. Com base nestes resultados constatou que a escória recém produzida era expansiva, condutora elétrica e classificada ambientalmente como II A, não perigosa e não inerte. Como saída para estas questões, foram feitas algumas considerações que levaram a novas pesquisas e aperfeiçoamento de métodos.

Fernandes (2010), então, realizou um procedimento através de umectação, que tornou a escória não expansiva e classe IIB, não perigosa e inerte, em 90 dias. O objetivo da sua pesquisa foi elaborar e implantar um método de estabilização química da escória de aciaria LD para fins de aplicação como lastro ferroviário em vias sinalizadas. Para atingir sua intenção definiu uma metodologia para a cura do material em pátio de beneficiamento de escória 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. Ainda com uma pilha controle, acompanhou o processo de

estabilização ao tempo. Na sua campanha de campo, houve monitoramento do teor de cal livre e também da expansibilidade presente nas pilhas de escória analisadas. Feitas as caracterizações química, geo-mecânica, física, ambiental, antes e depois do processo de estabilização, concluiu a eficiência deste tratamento, que trouxe os resultados anteriormente ditos.

Para chegar a esse nível de desenvolvimento das pesquisas sobre a escória para aplicação ferroviária, Fernandes (2005) realizou uma caracterização geotécnica dos principais parâmetros de resistência mecânica ao longo do tempo de uma escória de aciaria. Para isso, foram coletadas amostras de escória em um ramal ferroviário na fase de construção e, posteriormente, com a via já em operação. A partir dos ensaios de granulometria feitos em várias etapas, determinou-se o potencial de quebra B_g da escória da aciaria e fez-se um estudo de comparação com outros materiais de uso corrente como material de lastro, em termos de resistência. Adicionalmente, foram realizados ensaios de abrasão “Los Angeles” da escória em várias etapas, comparando-se os resultados com os de outros materiais convencionalmente utilizados. Os resultados obtidos mostraram que a escória tem resistência necessária para ser utilizada como material de lastro.

2.7.2 Tratamento na fase líquida

Souza (2007) referencia o pioneirismo de Silva *et al.* (2000), na aplicação de testes laboratoriais para certificação da qualidade da escória de aciaria LD, para fins de substituição da brita em obras de implantação de lastro ferroviário. Os autores desenvolveram um método para a estimativa da resistividade elétrica da escória de aciaria, avaliando assim, sua influência na sinalização ferroviária. Verificaram ainda que a cinética da reação de hidratação do MgO era muito lenta, exigindo um longo tempo de envelhecimento para assegurar a completa estabilização da escória. Como sugestão, propuseram a injeção de areia (SiO_2) no pote de escória, soprada com oxigênio, com o objetivo de minimizar a presença do $\text{CaO}_{\text{livre}}$.

Esse método foi adotado, na forma de adição de sílica e oxigênio em alta temperatura para que a escória permaneça líquida reagindo na dissolução da sílica.

O princípio desse tratamento está na neutralização do CaO_{livre} por meio de sua combinação com a sílica, o que minimiza a relação CaO/SiO₂. A fonte de calor exigida pode vir da reação exotérmica de oxidação do FeO, que se transforma em Fe₂O₃, outro composto que pode combinar-se com o CaO (FEDOTOV *et al.* 1997; MOTZ e GEISELER 1998; KUEHN *et al.* 2000; GEISELER *et al.*, 2001).

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 C₃S envolvidos numa matriz brilhosa de ferritas (C₂F) e wustitas (FeO_x). 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 C₃S que restou apresenta-se numa forma mais homogênea, já reagido com a sílica adicionada no tratamento, e a maioria dos cristais de C₃S convertida em C₂S. Nestas condições, o CaO_{livre} é completamente dissolvido, evidenciando o benefício principal do tratamento realizado (KUEHN *et al.* 2000).

Kuehn *et al.* (2000) ressaltam que este processo de tratamento foi desenvolvido pela 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.

Também, numa aplicação interessante, Takahashi & Yabuta (2002) promoveram moldes da escória de aciaria líquida em cubos de 1m³, solidificada por injeção de gás carbônico para promover carbonatação, num processo bem sucedido no Japão. Os blocos produzidos tiveram 19MPa de resistência à compressão e densidade de 2,4g/cm³, sendo monitorados por 5 anos. Nesse período nenhuma expansão foi detectada nos blocos executados, demonstrando boa estabilidade volumétrica (PENA, 2004).

Um estudo muito atual de tratamento de escória em fase líquida, feito por Pinto (2012) abordou a viabilidade técnica do aproveitamento de resíduo proveniente do corte de granito para ajustar a composição química da escória de aciaria LD visando à produção de cimento Portland. Para isso, o autor realizou a caracterização química dos resíduos para atingir a relação de basicidade (CaO/SiO₂) de 0,5, 0,9 e 1,2 para escória de aciaria.

Foram selecionadas amostras dos resíduos, misturadas, fundidas e resfriadas em água e no forno, para obter produtos amorfos e cristalinos, respectivamente.

Estes produtos foram analisados e com relação ao fenômeno de expansibilidade, para todos os cimentos, não ocorreu, constando que o ajuste da basicidade da escória com resíduo de granito viabilizou a formação de novas fases e estabilizou o CaO.

De modo geral estes são os estudos mais atualizados em termos de tratamento da escória na fase líquida e que dão subsídio a esta pesquisa.

2.8 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS E CAPACIDADE DE TROCA IÔNICA

Com a introdução de aditivos ao solo, dependendo do tipo destes, das dosagens aplicadas e das reações obtidas, promovem-se reduções da plasticidade e modificações granulométricas.

Devido aos fenômenos da coesão e da impermeabilização há a diminuição das características expansivas, aumento da resistência e o controle da ação da água sobre as camadas de solo tratadas, sejam por gravidade, por capilaridade e por tensão de sucção, atingindo assim, resultados satisfatórios de durabilidade e do objetivo a ser atingido por um pavimento (FILEV, 2002).

Estes fenômenos ocorrem no solo devido a Capacidade de Troca Iônica dos argilominerais, que pode ser Catiônica (CTC) ou Aniônica (CTA).

A título de simplificação será citada a Capacidade de Troca Catiônica (CTC) por ser mais abundante em solos.

Na CTC os cátions de carga mais forte substituem os íons de carga mais fraca na superfície das partículas de argila, onde há também um agrupamento de cátions, com predominância destes.

Sob determinadas condições de temperatura, pH, pressão, composição química e biológica da água, uma argila irá absorver determinados cátions em quantidades específicas de modo a equilibrar a carga deficitária das partículas sólidas.

Entretanto, reações de troca catiônica podem ocorrer em resposta às mudanças das referidas condições do ambiente e provocar alterações nas propriedades físico-químicas das partículas (MITCHELL, 1993).

Grim (1953) descreve as três principais causas da CTC dos argilominerais como sendo:

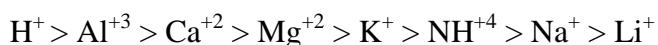
- 1) Ligações químicas quebradas nas bordas entre as unidades de silício e alumínio das unidades tetraédricas, que por sua vez geram cargas negativas excessivas, contrabalanceadas pela adsorção de cátions;
- 2) Substituição isomórfica do alumínio (unidades octaédricas) por cátions como magnésio, ferro, zinco, níquel, lítio, cálcio e sódio ou do silício (unidades tetraédricas) por fósforo;
- 3) Substituição do hidrogênio por hidroxilas ligadas ionicamente a outros cátions.

As montmorilonitas, por exemplo, caracterizam-se por apresentarem o alumínio substituído parcialmente por outros cátions, o que origina um excesso de carga negativa na superfície das partículas, além de apresentarem ligações químicas quebradas nas bordas, também compensadas por cátions (LEON, 2002).

Estes cátions adsorvidos nas faces e bordas de cada partícula podem ser substituídos por outros cátions, conferindo a estes argilominerais uma elevada CTC.

Esta situação ocorre pela chamada Teoria de Dupla Camada (TDC), onde se encontra água adsorvida à superfície da partícula de argila contendo os cátions intercambiáveis, e a água livre contendo mais cátions também trocáveis.

De acordo com Lemos (2006), a eletroafinidade de um cátion nas ligações das partículas pode ser sequenciada da seguinte forma:



Entretanto esta ordem pode ser alterada conforme a disponibilidade de cátions durante a reação, ou seja, se houver muito mais Na^+ do que Ca^{++} , o primeiro prevalecerá sobre o segundo (SANTOS, 1989).

2.9 VITRIFICAÇÃO DO SOLO

Um dos métodos de estabilização física do solo é o processo térmico denominado vitrificação. Vitrificação é o procedimento onde os compostos são permanentemente indisponibilizados em um bloco contínuo de solo, vitrificado por forças elétricas (EPA, 2001).

Este processo envolve o derretimento e fusão de materiais a temperaturas que excedem 1600°C, seguido de resfriamento rápido em uma forma não cristalina ou amorfa.

É considerada uma maneira de solidificação de solos contaminados porque proporciona uma diminuição do potencial de contaminação, além de uma estrutura mais estável.

Por causa das altas temperaturas, a contaminação fica retida no material vítreo que se forma. Neste processo a porosidade do solo varia muito, podendo alcançar uma redução de volume de 25 a 50%, chegando até 75%.

Esta técnica baseia-se na capacidade do solo de conduzir eletricidade. A condução térmica produz o aquecimento do solo e em temperaturas próximas da temperatura de fusão do solo, a condutividade elétrica do solo aumenta, acrescentando transferência de calor para o meio, e isso ocasiona aumento da capacidade de fusão do solo (HEINECK, 2010).

A vitrificação é potencialmente aplicada ao tratamento simultâneo de solos contaminados e de resíduos sólidos visando à obtenção de um produto com aplicação comercial, tal como material agregado para pavimentação.

Porém, é considerada uma técnica especial, pois está ainda sendo explorada em nível experimental e poucos são os casos relatados na literatura (HEINECK, 2010).

Contextualizando com as rochas mais apropriadas para utilização em lastro ferroviário, são exemplos os granitos, gnaisses, micaxistas, quartzitos, dioritos, diabásios, entre outras, predominando as rochas ígneas e metamórficas (FURTADO, 1999).

Vale citar os processos geológicos, como o magmatismo e o metamorfismo sofridos pelas rochas, pois revelam os mecanismos de transformação destas e conferem boas propriedades aos agregados naturais utilizados nas obras de engenharia. As rochas metamórficas compreendem uma gama complexa de variedades uma vez que resultam da alteração, por calor, pressão e atividade química, de rochas preexistentes. Por influência das altas temperaturas em profundidade, elas podem recristalizar-se ou fundir-se e gerar agregados de alta qualidade, assim como ocorre na vitrificação de solos (FURTADO, 1999).

Nesse raciocínio, a Ciência, ao seguir ou tentar reproduzir os princípios naturais, consegue desenvolver produtos de igual, ou melhor qualidade, reduzindo a chance de exaustão na natureza.

CAPÍTULO 3

3 METODOLOGIA

O presente estudo se desenvolveu de forma experimental visando estabilizar quimicamente a escória de aciaria de modo a melhorar seu comportamento mecânico e ambiental para aplicação em lastro de ferrovias.

3.1 MATERIAIS E ARGILOMINERAIS

Os materiais utilizados neste experimento foram a escória de aciaria LD e os aditivos foram areia comum, argila comum, bentonita, e dois tipos de lamas de Estações de Tratamento de efluente de draga e água e vapor, nomeadas como Lama 1 e Lama 2.

A escória, assim como os materiais compostos predominantemente por argilominerais, adicionados à mesma são descritos quanto às suas características gerais neste tópico.

Os argilominerais são silicatos de alumínio hidratados contendo, em proporções diversas, ferro, metais alcalinos e alcalinos terrosos, entre outros elementos, que constituem a maioria dos solos, principalmente argilosos. Apresentam propriedades físicas peculiares como plasticidade, sorção, hidratação, solvatação, troca de íons e endurecimento acentuado quando secos ou aquecidos a elevadas temperaturas, e que se manifestam diferentemente nos sedimentos (AMORIM, 2007).

Eles foram escolhidos devido à semelhança com a composição química da escória, além de serem argilominerais fáceis de serem adquiridos e de baixo custo.

Apesar de a escória de aciaria possuir os mesmos elementos presentes nos argilominerais, isto é, Si^{2+} , Al^{3+} , Fe^{2+} e Ca^{2+} , os teores desses elementos, expressos em óxidos, são consideravelmente diferentes. Uma importante diferença é o teor de ferro muito superior ao desejável na sua composição, nas formas bivalente, FeO , e trivalente, Fe_2O_3 e, principalmente, por encontrar-se também no estado elementar, Fe (MONTGOMERY e WANG, 1991).

Essas e outras características da escória serão averiguadas com a metodologia adotada.

3.1.1 Escória de Aciaria LD

Para a escória de aciaria do tipo LD, ou 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 SiO₂. 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 nas quantidades de óxidos de cálcio e magnésio presentes na escória de aciaria (MACHADO, 2000; CASTELO BRANCO, 2004).

Em termos de classificação ambiental, na maioria dos países, a escória de aciaria é considerada, em geral, resíduo sólido, mas nunca listada como resíduo perigoso ou não passível de reciclagem.

Os materiais como escória de aciaria, que podem ser destinados como matéria-prima ou insumo para outros processos, já são classificados como coprodutos e, portanto excluídos das regulamentações mais rigorosas específicas de resíduos (DUTRA, 1999). Segundo a norma brasileira, a escória de aciaria LD recém produzida, entra na classe IIA, ou seja, resíduo não perigoso e não inerte.

3.1.2 Areia

A areia é um material de origem mineral dividido em grânulos, composta basicamente de dióxido de silício ou sílica, SiO₂, com 0,063 a 2 mm.

Em seu estado natural pode ser encontrado em diversas formas diferentes. Possui 17 formas cristalinas distintas, entre elas o quartzo, o topázio e a ametista e seu ponto de fusão se encontra na faixa de 1720 C. Forma-se à superfície da Terra pela fragmentação das rochas por erosão, por ação do vento ou da água. Através de processos de sedimentação pode ser transformada em arenito. Como tem menor área de superfície em relação à argila e outras partículas menores do solo, a areia possui capacidade relativamente pequena de retenção de nutrientes no solo, que são lixiviados com facilidade.

Possui ainda poros grandes, perdendo facilmente água por gravidade e pouca coesão.

Tudo isto condiciona que um solo com teores altos de areia precisa de uma série de precauções quanto à adubação, que não pode ser aplicada de uma só vez no plantio, controle de erosão e, por vezes, irrigação (VELHO, 1998).

É utilizada nas obras de engenharia civil, em aterros, execução de argamassas, concretos, fabricação de vidros e também como aditivo à mistura de argila para a confecção de tijolos.

Para estabilização e reforço de solos é usada como drenos para acelerar recalques. Além da aplicação em ferrovias que usam areia para melhorar a tração das rodas sobre os trilhos.

A areia sendo formadas por quartzo, feldspatos, micas e outros silicatos, mostra que sua atividade química é quase nula e se decompõe lentamente liberando seus elementos constituintes. Com esse comportamento, e ensaios seguindo a NBR 10004 (ABNT, 2004) sua classificação ambiental é IIB, não perigosa e inerte (CARVALHO, 2012).

3.1.3 Argila Comum

Argila é o nome dado ao sedimento formado por partículas de dimensões muito pequenas, abaixo de 0,002 mm de diâmetro, podendo ser constituído por apenas um mineral argiloso, ou por uma mistura deles, com predomínio de um. Todos, porém, são filossilicatos, ou seja, silicatos que formam lâminas, de baixa dureza e densidade e boa clivagem em uma direção.

A argila comum é a mais abundante na natureza, sendo utilizada na fabricação de produtos cerâmicos de menor valor comercial.

Ocorre em depósitos sedimentares, geralmente de idades recentes na história geológica e de origens diversas.

Compreendem dois tipos principais de argilas, determinados pela sua utilização industrial, que são as argilas para olaria e argilas para tijolo.

As argilas possuem uma elevada área superficial com ligações químicas não saturadas, o que lhes permite interagir com outras substâncias.

Por isso, possuem um comportamento plástico quando misturadas com água e são capazes de inchar, aumentando muito de volume.

Outra característica importante é sua alta capacidade de troca iônica e na queima verifica-se uma região de vitrificação pouco ampla entre 1000-1100º C e uma fusão acentuada entre 1150-1330º C (VELHO *et al.*, 1998).

Sendo as argilas constituídas por silicatos e óxidos de Al e Fe que se caracterizam por apresentar propriedades coloidais, com predomínio de cargas eletrostáticas negativas, elas apresentam maior reatividade, e uma complexa constituição química.

Ainda são formadas por minerais secundários do grupo das montmorilonitas, ilitas, caulinitas, etc. Com esse comportamento, e ensaios seguindo a NBR 10004 (ABNT, 2004) sua classificação ambiental é IIA, não perigosa e não inerte (CARVALHO, 2012).

3.1.4 Bentonita

Bentonita é o nome genérico da argila composta predominantemente pelo argilomineral montmorilonita, de 55 a 70%; do grupo das esmectitas.

As esmectitas possuem como características principais o alto poder de inchamento, até 20 vezes seu volume inicial, alta CTC, na faixa de 60 a 170 meq/100g e tixotropia. Estas características conferem à bentonita propriedades bastante específicas, que têm justificado uma vasta gama de aplicações nos mais diversos segmentos (OLIVEIRA, 2004). Possui partículas extremamente finas, funde por volta dos 1200°C e sua fórmula geral é dada por $(OH)_2(Al, Mg, Fe)_2(Si_2O_5)_2$. Sua principal característica é a capacidade para absorver moléculas de água entre as camadas, devido a isto, argilas ricas neste argilomineral apresentam uma forte tendência a causar trincas de secagem, além de apresentar elevada plasticidade (MORANDINI, 2009).

Quanto à questão ambiental, conforme já mencionado para as argilas em geral, o comportamento da bentonita, assim como a especificação comercial rotulada pelo fornecedor aparecem como Classe IIA, não perigosa e não inerte.

3.1.5 Lama 1 - ETED

A Lama 1 é proveniente de uma Estação de Tratamento Efluente da Draga e foi coletada na calha de envio da lama para o filtro prensa.

Os aspectos úmido e seco são mostrados respectivamente na Figura 3.1.



Figura 3.1: Aspecto úmido e seco da Lama 1.

A composição química foi analisada por um laboratório químico da região do Vale do Aço, MG, que em laudo analítico classifica esta lama como resíduo Classe IIA, não perigoso e não inerte.

Baseado nos resultados obtidos dos ensaios, os parâmetros analisados apresentam concentrações adequadas para a NBR 10004 (ABNT, 2004) para os extratos lixiviados e se encontram inadequados quanto aos extratos solubilizados, por apresentarem os teores de Fe e Mn acima dos limites de solubilização.

3.1.6 Lama 2 - ETAV

A Lama 2 é proveniente de uma Estação de Tratamento de Água e Vapores e foi coletada nos leitos de secagem da Estação.

Os aspectos úmido e seco, mostrados respectivamente na Figura 3.2, evidenciam sua característica expansiva.

A composição química foi analisada por um laboratório químico da região do Vale do Aço, MG, que em laudo analítico classifica esta lama como resíduo Classe IIB, não

perigoso e inerte. Baseado nos resultados obtidos dos ensaios, os parâmetros analisados apresentam concentrações adequadas para a NBR 10004 (ABNT, 2004) tanto para os extratos lixiviados, quanto para os testes de solubilização.



Figura 3.2: Aspecto úmido e seco da Lama 2.

3.2 PROCEDIMENTOS

O método empregado nesse estudo consistiu na estabilização química por meio da mistura de distintos componentes com a escória de aciaria LD, com o objetivo de alterar as suas características. Buscou-se com a adição em fusão, de argilominerais e lodos provenientes da mesma empresa siderúrgica fornecedora da escória, melhorar as propriedades geotécnicas e ambientais, elaborando assim uma proposta de estabilização da escória de aciaria, na fase líquida.

No caso desse estudo houve estabilização química da escória com introdução de solos, ou argilominerais, ou seja, o processo inverso da estabilização química de solos.

O trabalho foi realizado em escala laboratorial experimental abrangendo a realização de ensaios para caracterização química, física, mecânica e ambiental da escória, como mostra o fluxograma da Figura 3.3. Adições dos argilominerais e os respectivos ensaios dos novos produtos, como mostra o fluxograma da Figura 3.4, também foram parte do estudo.

A metodologia utilizada consistiu na redução a pó da escória recém-produzida coletada no pátio de resfriamento da indústria siderúrgica e dos materiais contendo argilominerais para serem misturados e fundidos juntamente com a escória.

Estes argilominerais utilizados como aditivos compunham areia comum, argila comum, bentonita, e dois tipos de lamas de Estações de Tratamento, aqui nomeadas de Lama 1 e Lama 2.

A escória foi misturada a cada componente a ser testado separadamente, em proporções de igualdade de massa, 1:1, e equilíbrio ou balanço de massa, com ajuste da basicidade pela relação CaO/SiO₂, gerando dez novos produtos.

As misturas foram fundidas até 1700°C em forno específico para essa capacidade e novamente resfriadas à temperatura ambiente em atmosfera livre.

Os novos produtos foram novamente ensaiados para caracterização ambiental e química, além da análise de suas atuais propriedades mecânicas.

As reações iniciais serviram também para determinar as proporções ideais dos materiais, em termos de igualdade ou equilíbrio de massas, que proporcionaram melhor desempenho sob os aspectos geotécnico e ambiental para a aplicação proposta em lastro de ferrovia.

Foram realizadas campanhas de ensaios como mostram as Figuras 3.3 e 3.4, sendo divididas em duas fases: a primeira de ensaios para avaliação da escória de aciaria para lastro padrão, e a segunda de reações com os argilominerais.

Esta segunda fase ainda se subdivide em etapas de ensaios para caracterização física, química, mineralógica, morfológica e ambiental, dos materiais primários e dos novos produtos gerados pelas misturas, para acompanhar a evolução do experimento como mostra a Figura 3.4.

Essa caracterização foi conduzida pelos tipos de ensaios indicados no fluxograma, sendo os mesmos realizados antes e após as fusões para aferição das mudanças ocorridas.

A notação de maior relevância foi a análise dos ensaios prescritos nas normas NBR 10004 (ABNT, 2004) de Classificação de resíduos e NBR NM13 (ABNT, 2012) de Determinação de óxido de cálcio livre pelo etilenoglicol, que são os resultados preliminares que inviabilizam o uso da escória recém produzida como lastro.

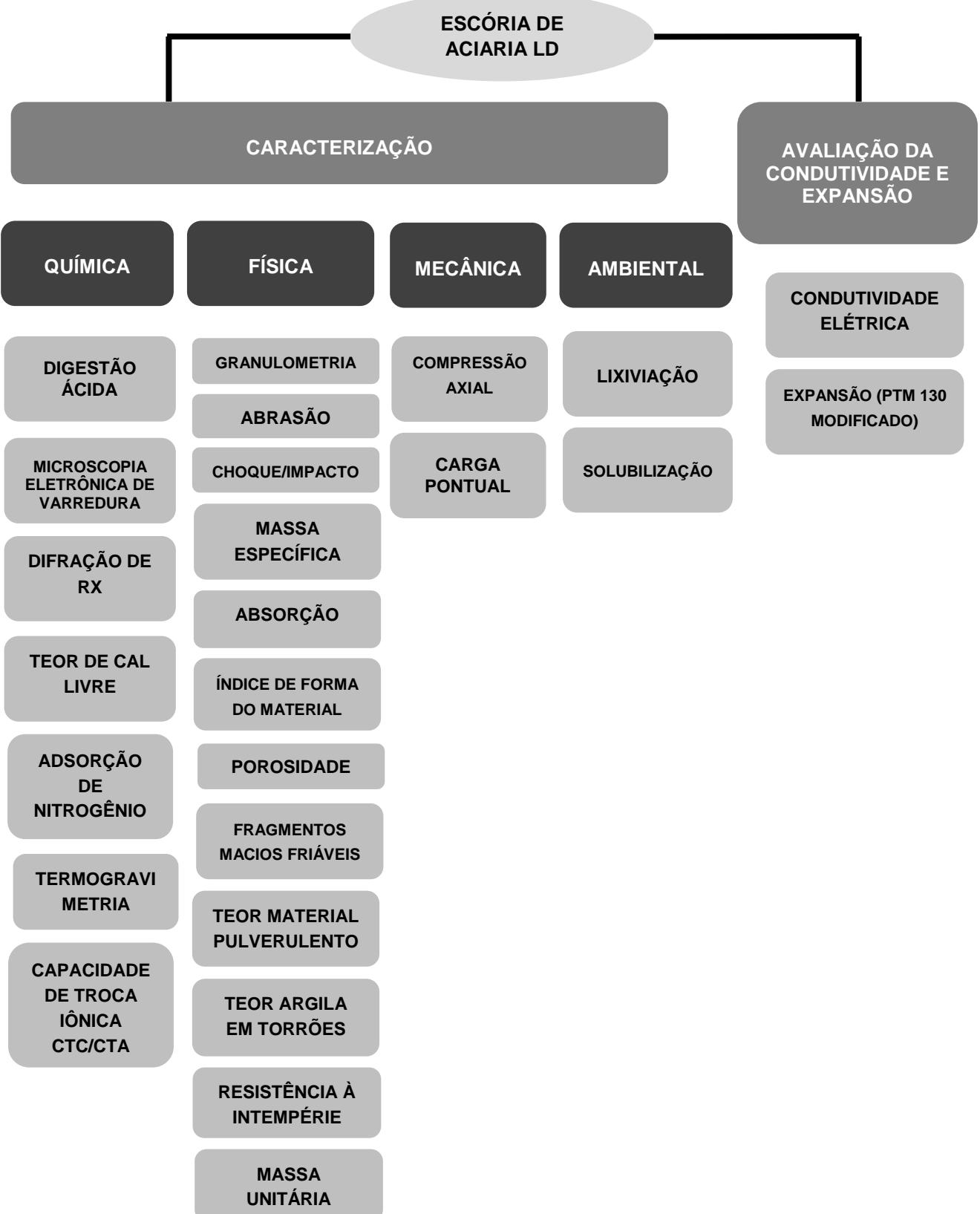


Figura 3.3: Fluxograma dos ensaios para caracterização da escória.

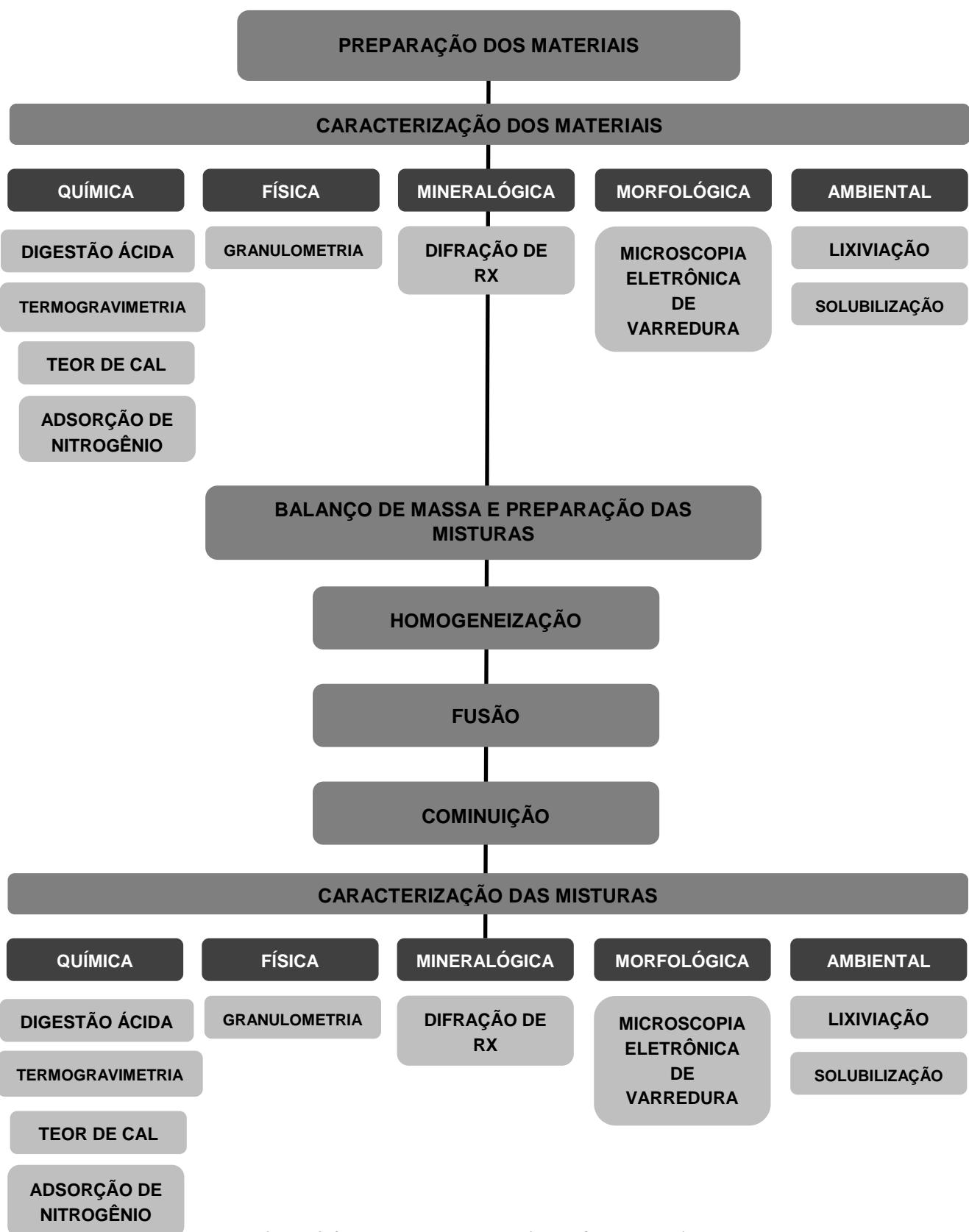


Figura 3.4: Fluxograma dos ensaios da fusão das misturas.

A realização do monitoramento e dos ensaios foi de essencial importância para avaliar se após o tratamento a que foi submetida, a escória apresentará as qualidades requeridas, compatíveis com as de materiais normalmente utilizados no lastro, para só assim ser credenciada para aplicação como lastro ferroviário.

O comparativo dos parâmetros antes e após a metodologia, também irá responder quais os materiais de melhor desempenho.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA LD

A escória de aciaria foi coletada no pátio de resfriamento de escórias de uma siderúrgica situada ao leste de Minas Gerais, na cidade de Ipatinga, seguindo os procedimentos norteados pela NBR 10007 (ABNT, 2004) e acondicionada em tambor com capacidade de 100 litros.

Posteriormente, as amostras foram transportadas para o Laboratório de Ferrovias e Asfalto/LFA do Departamento de Engenharia Civil/DECIV da UFOP, onde foram realizados todos os ensaios preconizados pela NBR 5564 (ABNT, 2011) necessários à caracterização mecânica para lastro de ferrovia.

A caracterização do material procedeu conforme os próximos tópicos que explicarão cada método de ensaio e equipamentos utilizados.

3.3.1 Caracterização química

A caracterização química de uma amostra baseia-se em vários ensaios com o intuito de qualificar e quantificar quimicamente a sua composição, tanto de forma genérica quanto específica para determinados elementos de interesse, como seguem as descrições adiante.

3.3.1.1 Difração de Raios – X

O ensaio de difração de raios-x realiza a identificação da composição cristalina da amostra estudada.

As células cristalinas são constituídas por planos definidos, diretamente associados com o raio atômico de cada um dos átomos e seus tipos de ligação, sendo detectadas pelo ensaio, as distâncias interplanares característica dos minerais presentes.

A falha desta técnica acontece para materiais isomorfos ou minerais com distâncias atômicas similares. As análises foram efetuadas em um Difratômetro da marca Panalytical, modelo EMPYREAN, do Laboratório de Difratometria de Raios-X do Departamento de Geologia/DEGEO da UFOP, como mostrado na Figura 3.5.



Figura 3.5: Difratômetro de Raios-X.

Os dados resultantes deste ensaio correspondem aos difratogramas que exibem picos característicos que são os resultados do processo de difração de raios-X em planos cristalográficos dos materiais analisados, correlacionados à posição, intensidade e forma da estrutura cristalina, determinando, dessa maneira, a composição mineralógica dos materiais pesquisados.

3.3.1.2 Análise Química Quantitativa por Digestão Ácida – Savillex

A digestão ácida ou total segue o método de Jacques Moutle (ETIENNE, 2006), com pequenas modificações. O procedimento consiste na abertura total da amostra pulverizada com adição e secagem de uma série de diversos ácidos, como HF, HClO₄, HCl, HNO₃.

O ensaio é todo feito em chapa aquecedora com temperaturas até 150°C, por um período de 7 dias, aproximadamente. Utiliza-se um frasco especial para resistir à agressão dos ácidos e o aquecimento, chamado Savillex (SALVIANO, 2010).

Após as amostras digeridas, ou abertas quimicamente, são analisados os teores de elementos químicos inorgânicos totais por Espectrofotômetro de Emissão Óptica com Fonte Plasma Indutivamente Acoplado, ICP-OES, modelo CIROS CCD, marca Spectro em operação no Laboratório de Geoquímica Ambiental/LGqA do Departamento de Geologia/DEGEO da UFOP. Para isso foram armazenadas alíquotas de 50 ml em frascos de polietileno, devidamente acidificadas com HNO₃ para evitar possíveis reações e precipitação.

A Figura 3.6 apresenta a sequência do procedimento de ensaio com as vidrarias e equipamentos utilizados.



Figura 3.6: Ensaio de digestão ácida - Savillex.

Outra análise química quantitativa é a fluorescência de raios-X, que também tem 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.

Ambos os ensaios descritos são técnicas analíticas instrumentais que se baseiam num mesmo princípio: excitação do átomo ou elemento a ser dosado e quantificação da resposta obtida, seja por emissão ou absorção atômica, fornecendo resultados de mesmo caráter (RATTI, 2011) .

3.3.1.3 Análise Química por Microscopia Eletrônica de Varredura

A microscopia eletrônica de varredura é um método que obtêm informações estruturais e químicas do material em análise.

Este ensaio morfológico foi realizado empregando-se um Microscópio Eletrônico de Varredura, MEV, do tipo JEOL JSM – 5510 Thermo, do Laboratório de Microscopia Eletrônica do Departamento de Geologia /DEGEO da UFOP, como mostra a foto da Figura 3.7.



Figura 3.7: Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV/EDS).

Um feixe fino de elétrons de alta energia incide na superfície da amostra onde parte do feixe é refletida e coletada por um detector que converte este sinal em uma imagem de elétrons retroespalhados ou de 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.

À 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 (FERNANDES, 2010).

3.3.1.4 Análises de Capacidade de Trocas Iônicas – CTC e CTA

A metodologia utilizada para determinação da capacidade de trocas iônicas, CTC e CTA, de determinada amostra obedece ao Manual de Métodos de Análises de Solos da EMBRAPA (EMBRAPA, 2007).

Nestes ensaios os solos analisados são mantidos em seu pH natural, garantindo assim que possa ser utilizado sem qualquer correção inicial.

O procedimento consiste basicamente na saturação de uma amostra de 1,0 g de material com a solução de cloreto de bário, BaCl₂. Adicionada à solução, o material é agitado e centrifugado, e o sobrenadante é recolhido.

O material é então lavado duas vezes com a solução de BaCl₂ e desse modo, garante-se a completa substituição de todos os elementos antes contidos na superfície do material por Ba²⁺ e Cl⁻. Após a segunda lavagem com BaCl₂ diluído, o solo úmido é pesado para determinação do sulfato de magnésio, MgSO₄, penetrante que será adicionado na próxima etapa da análise. Adiciona-se então MgSO₄ e ajusta-se para 0,3 µS/cm a condutividade elétrica da solução com a finalidade de garantir a troca iônica com agitação por 8 horas. Realiza-se após o procedimento a pesagem dos tubos para determinar o volume de MgSO₄ ou água adicionada.

Novamente as amostras são centrifugadas e o sobrenadante é retirado para determinação do Cl⁻ e Mg²⁺. O Mg²⁺ é determinado por espectrometria ICP-OES e a quantidade

adsorvida é calculada pela diferença entre o total adicionado, que são o volume inicial e o volume adicionado para ajuste da condutividade, e o valor obtido na leitura do sobrenadante.

A determinação do Cl^- é realizada por cromatografia iônica. Nesse caso, não é necessária subtração das quantidades, pois o Cl^- é totalmente substituído pelo SO_4^{2-} na superfície dos cristais do solo.

O equipamento denominado Cromatógrafo utilizado nas análises está ilustrado na Figura 3.8.

Este ensaio foi realizado por um laboratório de análises agrícolas e ambientais, em Paracatu, Minas Gerais.



Figura 3.8: Cromatógrafo Iônico.

3.3.1.5 Teor de Cal Livre

Para avaliar o teor de cal livre presente nas amostras estudadas, utilizou-se como referência o método de ensaio prescrito pela NBR NM 13 – Cimento Portland - Determinação de óxido de cálcio livre pelo etilenoglicol (ABNT, 2012).

Esta norma especifica a avaliação do óxido de cálcio livre por dissolução em etilenoglicol e posterior titulação em solução padronizada de ácido clorídrico, HCl, adotando-se também um indicador de pH.

Este método, a partir de um período aproximado de 30 dias, passa a não diferenciar o óxido de cálcio, CaO, do hidróxido, Ca(OH)₂, e nesse caso a quantificação pode ser auxiliada por ensaios de termogravimetria.

Todavia, para as análises pretendidas por essa metodologia de pesquisa, os resultados deste ensaio são suficientes.

A Figura 3.9 mostra a sequência do teste de teor cal livre, com as vidrarias e equipamentos utilizados na execução do ensaio que foi realizado no Laboratório de Ferrovias e Asfalto da UFOP.

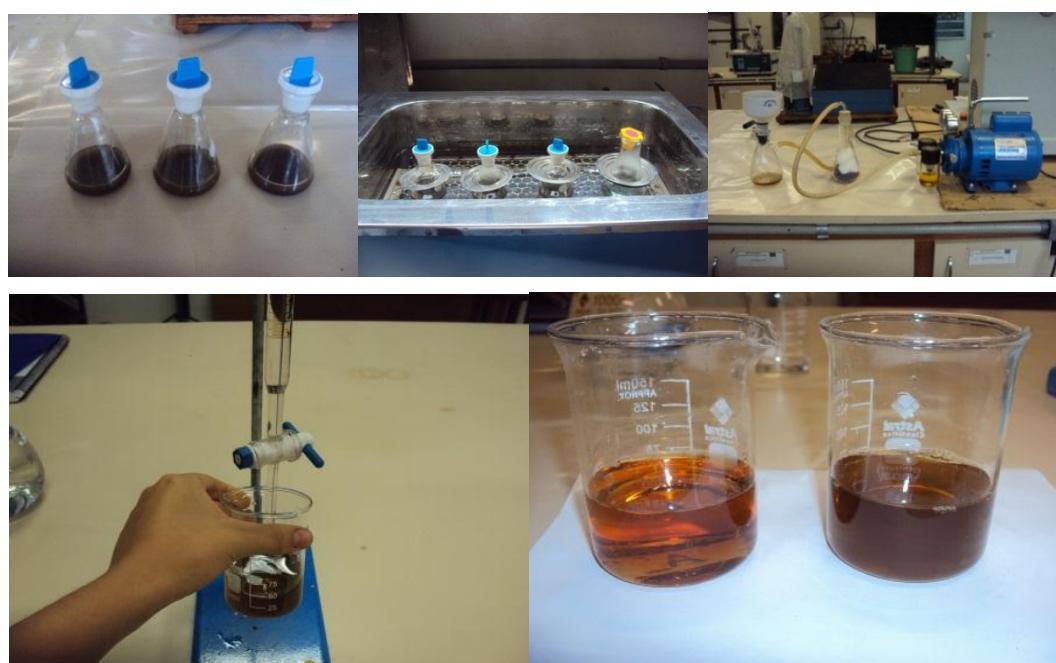


Figura 3.9: Equipamentos e execução do ensaio de teor de cal livre.

3.3.1.6 Termogravimetria

Os teores correspondentes ao Ca(OH)₂ dos materiais foram obtidos por técnica termoanalítica pelas curvas de termogravimetria/termogravimetria derivada (TG/DTG). Este método foi escolhido por ser o mais recomendado no ramo científico, conforme exposto no item 2.6 desta dissertação. Os testes foram conduzidos por termogravimetria dinâmica, ou seja, as amostras foram aquecidas em ambiente cuja temperatura varia a uma taxa pré-determinada, preferencialmente a uma razão linear. As amostras foram ensaiadas no equipamento Gas Controller GC200, modelo Star e system TGA/DSC do

fabricante Mettler Toledo. As condições de ensaio empregadas foram a taxa de aquecimento de 12°C por minuto e atmosfera dinâmica de N₂.

Os ensaios de perda ao fogo das escórias foram conduzidos de acordo com a NBR NM 18 (ABNT, 2004) – Cimento Portland – Determinação da perda ao fogo, utilizando o aparelho mostrado na Figura 3.10. As amostras foram calcinadas à temperatura de (950 ± 50)°C, conforme o “método A” desta norma. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Metalurgia Extrativa do Departamento de Metalurgia/DEMET da UFOP.



Figura 3.10:Equipamento Termogravimétrico.

3.3.1.7 Adsorção de Nitrogênio

O ensaio de adsorção de nitrogênio serve para determinar propriedades do material estudado, tais como porosidade, superfície específica e densidade real.

As características físicas do sólido influenciam no fenômeno da adsorção, principalmente a estrutura dos poros. A 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, isso acontece como resultado das forças de Van der Waals movimentadas entre as moléculas de gás e a superfície sólida. Chama-se de adsorvente o sólido e o gás ou vapor utilizado, de adsorvato (FERNANDES, 2010).

O gás empregado nos ensaios foi o nitrogênio e o equipamento para a determinação da densidade real dos grãos foi um Multipycnometer a gás hélio, da marca Quantachrome, presente no Laboratório de Metalurgia do Departamento de Metalurgia/DEMET da UFOP.

Conforme PENA (2004), o método consiste em desgaseificar uma massa conhecida da amostra, submetendo-a ao vácuo sob uma dada temperatura, buscando reduzir os possíveis contaminantes. São fixados os valores de pressão relativa durante o ensaio, enquanto a amostra é conservada à temperatura de -196°C, que é a de ebulição do nitrogênio líquido e depois submetida a um pequeno fluxo de N₂ gasoso. No momento em que atinge a pressão relativa pré-definida, o volume de N₂ adsorvido na superfície é medido. A partir da isoterma de adsorção, se estabelece a superfície específica (m²/g), aplicando o método baseado na teoria de Brunauer, Emmett e Teller, conhecida como BET, que desenvolveram o tratamento de 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 proposição BET.

Existem 6 tipos de isotermas, segundo a classificação da IUPAC, International Union of Pure and Applied Chemistry, conforme mostra a Figura 3.11, com um resumo das estruturas características.

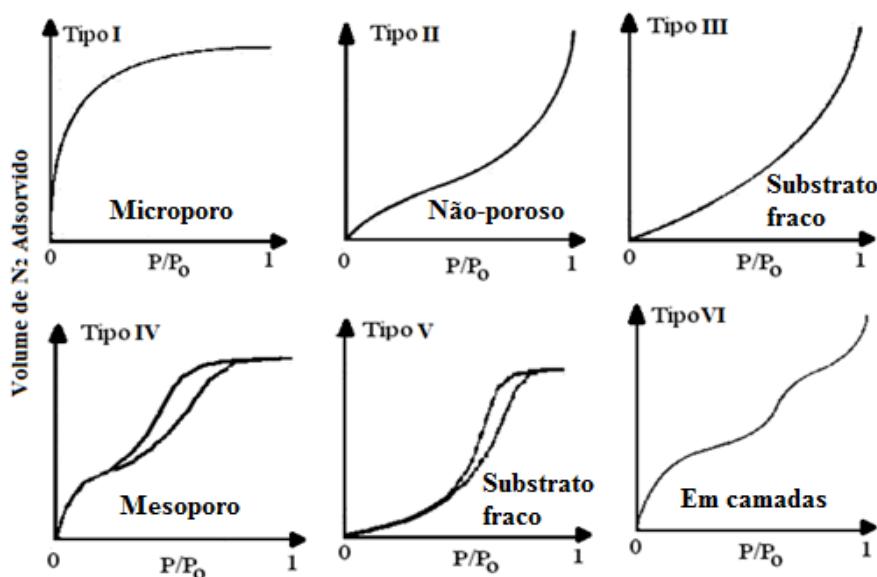


Figura 3.11: Tipos de isotermas de adsorção segundo a classificação da IUPAC (Adaptada de IUPAC, 1985).

A histerese significa que a curva de dessorção não coincide com a curva de adsorção e sua forma é determinada principalmente pela geometria dos poros.

A classificação da IUPAC para isoterma de adsorção engloba quatro tipos de histerese, designados de H1 à H4, sendo os tipos mais frequentes e a relação com os formatos do poro, apresentados na Figura 3.12.

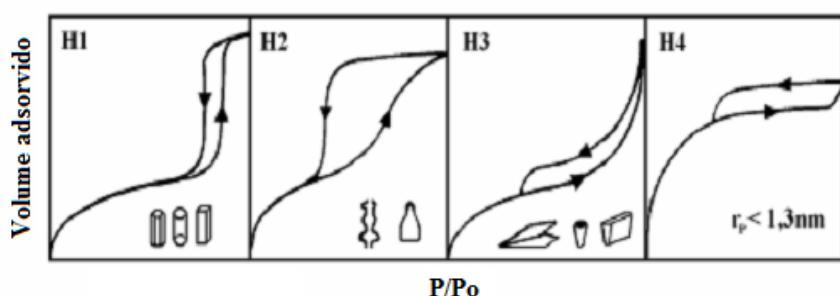


Figura 3.12: Tipos de histereses em isotermas de adsorção segundo a classificação da IUPAC
(Adaptada de SILVA, 2008).

O tipo H1 é encontrado em materiais cujos poros são regulares, de formato cilíndrico e/ou poliédrico com as extremidades abertas. H2 é formado pela composição de poros cilíndricos, abertos e fechados com estrangulações. Na histerese H3 os poros apresentam formatos de cunhas, cones e/ou placas paralelas. O tipo H4 ocorre em sólidos cujo raio do poro (r_p) é menor que 1,3 nm, ou seja, a morfologia dos poros não é definida (SILVA, 2008).

O ensaio de porosidade é caracterizado pela adsorção de nitrogênio à temperatura de ebulição de -196°C.

A técnica utilizada para descrever a porosidade consistiu na determinação do volume total e na distribuição do tamanho de poros.

Dessa maneira, foram obtidos como resultados do ensaio realizado no aparelho Surface Area & Pore Size Analyzer NOVA 1200, também da marca Quantchrome, 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, isoterma de adsorção e dessorção, que permitem a obtenção de diversas informações sobre a forma geométrica dos poros (FERNANDES, 2010).

A densidade real das amostras é determinada por meio da diferença de pressão no equipamento a gás hélio, que é um instrumento designado para medir o volume real de

material sólido ou em pó, usando o princípio de Archimedes de deslocamento de um fluido capaz de penetrar em poros pequenos, como o gás hélio (FERNANDES, 2005). Os equipamentos utilizados nas análises das superfície específica, porosidade e da densidade real dos grãos, respectivamente, são apresentados na Figura 3.13 e pertencem ao Laboratório de Tratamentos Térmicos Metalúrgicos do Departamento de Metalurgia DEMET da UFOP.



Figura 3.13: Equipamentos Surface Area & Pore Size Analyzer e Multipycnometer.

3.3.2 Caracterização física

Os ensaios apresentados neste item foram realizados nos laboratórios da Escola de Minas e do DEGEO da UFOP, principalmente no Laboratório de Ferrovias e Asfalto.

Assim como na caracterização química, para a definição física são necessários vários ensaios para investigação das propriedades de uma amostra.

3.3.2.1 Ensaio de Granulometria

A granulometria é um indicativo muito importante para a aferição de características do lastro, tais como resistência à quebra, resiliência, acumulação de deformação plástica e resistência ao cisalhamento.

A curva de distribuição granulométrica, produto do ensaio de peneiramento e sedimentação, determina a porcentagem em peso que cada faixa especificada de tamanho de partículas representa na massa total ensaiada. Com ela, classifica-se o material e também se estima a qualidade de parâmetros para filtros, bases estabilizadas, permeabilidade, capilaridade e outras.

O ensaio é feito de acordo com a norma NBR NM248 (ABNT, 2003) – Agregados: Determinação da composição granulométrica, e por meio de um peneirador mecânico convencional, como na Figura 3.14, com a série normal de peneiras padronizadas pela metodologia da norma, obtendo os pesos retidos e acumulados e, respectivamente, as porcentagens retidas e passantes em cada peneira. Neste mesmo ensaio é determinado o teor máximo de material pulverulento conforme exigência da NBR5564 (ABNT, 2011) e procedimento da NBR NM46 (ABNT, 2003), com lavagem do material passante na peneira de 0,075 mm.



Figura 3.14: Peneirador mecânico.

Outro método granulométrico é o a laser, realizado em meio dispersivo aquoso com a fração da amostra menor que 0,075 mm e ultrassom por 5 min no equipamento Particle Size Analyzer CILAS 1064 da Acil Weber Ltda., do Laboratório de Microscopia Ótica e Infravermelho do Departamento de Geologia/DEGEO da UFOP, como mostra a Figura 3.15.

Este ensaio pode substituir o método de sedimentação utilizado para solos finos, apresentando resultados rápidos, não necessitando do tempo de decantação dos grãos.



Figura 3.15: Particle Size Analyzer CILAS 1064.

3.3.2.2 Índice de Contaminação Granulométrica

Para analisar a contaminação granulométrica existente nos materiais de lastro, existe o índice de contaminação do lastro, FI, expresso por: $FI = P_4 + P_{200}$, sendo P_4 e P_{200} as porcentagens em pesos passantes nas peneiras 4 e 200, respectivamente. Na Tabela 3.1 são apresentadas as correlações deste índice com a contaminação do lastro (SELIG *et al.*, 1994).

Com base no exposto, avaliaram-se os índices de contaminação da escória de aciaria LD, partindo do ensaio granulométrico.

Tabela 3.1: Estado de contaminação do lastro (Adaptada de SELIG *et al.*, 1994).

Grau de Contaminação	Índice de Contaminação (FI)
Limpo	<1
Moderadamente Limpo	1-9
Moderadamente Contaminado	10-19
Contaminado	20-39
Altamente Contaminado	>39

3.3.2.3 Ensaio de Abrasão Los Angeles

Com o teste de Abrasão Los Angeles quantifica-se o desgaste sofrido pelo material em ensaio rotacionado junto a cargas abrasivas no equipamento padrão, ilustrado na Figura 3.16.



Figura 3.16: Equipamento e cargas abrasivas usados no Ensaio de abrasão Los Angeles.

O ensaio foi executado na faixa em que o material se enquadra para lastro de ferrovia, a partir do ensaio de granulometria, com 12 esferas de aço de carga abrasiva, correspondendo a uma massa total de 6 kg, e sendo essa quantidade de carga função do tipo de material a ser ensaiado.

O índice de Abrasão Los Angeles é calculado pela diferença da massa total seca colocada no tambor do equipamento padrão, da massa da amostra lavada na peneira de 1,7 mm e seca após o ensaio, dividida pela massa total seca novamente, e apresentada em porcentagem.

O procedimento é feito seguindo a norma NBR NM 51 (ABNT, 2001) e de acordo com as propriedades específicas para lastro padrão da NBR 5564 (ABNT, 2011).

3.3.2.4 Resistência ao Choque - Índice de Tenacidade Treton

A resistência ao choque está diretamente relacionada às propriedades de maior relevância para os materiais aplicados como lastro ferroviário, já que esse tipo de esforço é bastante habitual durante a passagem das composições. Assim, o resultado desse índice pode antecipar o desempenho que o material terá em uso (FERNANDES, 2010).

O ensaio segue em conformidade com o Anexo E da NBR 5564 (ABNT, 2011) de Determinação da Resistência ao Choque, que submete 60 fragmentos, a partir de 3 conjuntos de 20 fragmentos de material com dimensões entre 16 e 19 mm, escolhidos ao acaso, lavados, secos em estufa por 24 horas e submetidos a 10 choques no aparelho Treton.

Posteriormente as amostras são lavadas em peneira e secas em estufa por 24hrs, e então resfriadas e pesadas.

O índice de tenacidade treton é calculado de forma semelhante ao de abrasão Los Angeles, citado anteriormente, sendo a diferença da massa total seca das partículas colocada no equipamento padrão, da massa da amostra lavada na peneira de 1,7 mm e seca após o ensaio, dividida pela massa total seca novamente, e apresentada em porcentagem.

O equipamento Treton utilizado no ensaio é apresentado na Figura 3.17.



Figura 3.17: Equipamento Treton para medidas de resistência ao impacto.

3.3.2.5 Massa Específica Aparente, Porosidade Aparente e Absorção de Água

Os ensaios de massa específica aparente, absorção e porosidade aparente podem revelar as propriedades que o material dispõe em relação à sua utilização como material de lastro. Estas propriedades são definidas em conformidade com o Anexo B – Determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água, da NBR 5564 (ABNT, 2011).

O procedimento consiste na submissão de 10 corpos de prova, após lavados e escovados, ao dessecador e bandeja com água destilada até 1/3 de sua altura por 4 horas, 2/3 de sua altura por mais 4 horas e submerso por 48 horas. Secar as amostras com pano úmido e pesar ao ar (M_{sat}) e na condição totalmente submerso medir em balança hidrostática (M_{sub}). Submeter os corpos a estufa 70°C por 48 horas e medir sua massa (M_{sec}). E finalmente, proceder aos cálculos constantes no anexo da norma.

3.3.2.6 Forma dos Fragmentos do Material

A forma apropriada do material de lastro é importante para o seu funcionamento, sendo preferíveis as cúbicas. Essa análise do formato dos materiais ocorreu de acordo com os procedimentos do Anexo A – Determinação da forma dos fragmentos de pedra britada, da NBR 5564 (ABNT, 2011), que também determina o ensaio de máximo de partículas lamelares.

A partir de 100 fragmentos obtidos pelas peneiras com abertura 63, 50, 38, 25, 19 mm, as dimensões dos fragmentos são avaliadas com um paquímetro conforme indicado na Figura 3.18 e com a classificação prescrita na Tabela 3.2, que constam na norma.

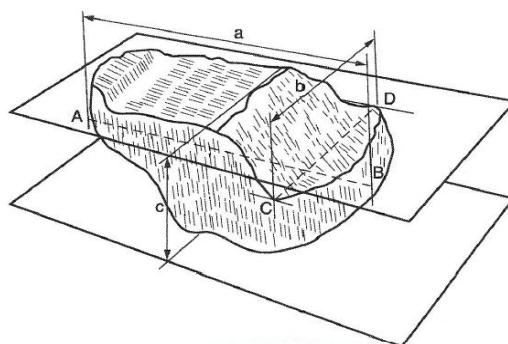


Figura 3.18: Dimensões para análise da forma dos fragmentos (NBR 5564 (ABNT, 2011)).

Tabela 3.2: Classificação da forma dos fragmentos (NBR 5564 (ABNT, 2011)).

Classificação NBR 5564 (ABNT, 2011) – Anexo A	
Medida das relações B/A e C/B	Forma
$b/a \geq 0,5$ e $c/b \geq 0,5$	Cúbica
$b/a < 0,5$ e $c/b \geq 0,5$	Alongada
$b/a \geq 0,5$ e $c/b < 0,5$	Lamelar
$b/a < 0,5$ e $c/b < 0,5$	Alongada-lamelar

3.3.2.7 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.

Dessa forma, o teor destes fragmentos constitui um condicionante para o uso de um determinado material.

A determinação desses teores foi feita em conformidade com os procedimentos do Anexo F – Determinação do teor de fragmentos macios e friáveis, da NBR 5564 (ABNT, 2011), a partir de uma vareta de bronze especificamente desenvolvida por meio da norma, como ilustrado na Figura 3.19. O cálculo é feito levando em consideração o efeito da vareta na superfície dos corpos de prova, sendo a porcentagem média ponderada das partículas macias e friáveis em relação ao total de corpos de prova.



Figura 3.19: Aparelhagem com vareta de bronze para o ensaio de fragmentos macios e friáveis.

3.3.2.8 Teor de Torrões de Argila

O teor de torrões de argila e outros materiais friáveis são elementos inadequados para a composição dos agregados para lastro e, dessa maneira, a análise desse teor é importante para a qualidade do lastro.

O referido ensaio é conduzido de acordo com a NBR 7218 (ABNT, 2010) de Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. O material na granulometria apropriada é destorrado manualmente após período de 24 horas em repouso em água. Em seguida peneirado por via úmida e calcula-se o teor com as relações das massas obtidas.

3.3.2.9 Resistência à Intempéries

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 no Anexo C – Determinação da resistência à intempérie, da NBR 5564 (ABNT, 2011).

O ensaio consiste na submissão de 10 fragmentos do material de 100 a 200 g, lavados, escovados e secos a 100°C, a 40 ciclos com imersão em solução de sulfato de sódio pelo período de no mínimo 8 horas seguindo com o material em estufa com temperatura de 100°C pelo mesmo período de no mínimo 8 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 ao desenvolvimento de trincas e/ou à inexistência de homogeneidade entre as amostras que são analisadas em cada ensaio.

3.3.2.10 Massa Unitária

A massa unitária é utilizada como medida indireta da quantidade de vazios presentes entre os grãos de agregados e para transformar quantidades de material de peso para volume e de volume para peso. Sua determinação é dada pela norma NBR NM 45 (ABNT, 2006), que estabelece o método para a determinação da densidade a granel e do

volume de vazios de agregados miúdos, graúdos ou de mistura dos dois, em estado compactado ou solto. Foi usado o “método C” da norma que deve ser empregado para determinar a massa unitária de material no estado solto.

Para o ensaio registrou-se a massa do recipiente vazio e a seguir, o recipiente é cheio até transbordar, utilizando uma concha, despejando o agregado de uma altura que não supere 50 mm acima da borda superior do recipiente. A camada superficial do agregado é nivelada, de forma a coincidir com a borda superior do recipiente, e após faz-se a medida da massa do recipiente mais seu conteúdo.

3.3.3 Caracterização mecânica

3.3.3.1 Compressão Axial

A resistência à compressão axial é um indicador da qualidade do material para lastro de via férrea.

Ela é avaliada por meio do ensaio prescrito no Anexo D – Determinação da resistência à compressão uniaxial no estado saturado, da NBR 5564 (ABNT, 2011).

Para ser realizado o ensaio, é preciso que as amostras tenham formas cúbicas de 7 a 8 cm e a submissão de no mínimo 5 corpos de prova, após saturação em banho por 48 horas, à uma prensa para execução do ensaio.

Na ausência de escória em tamanhos consideráveis para esse formato, não foi possível realizá-lo no equipamento próprio, mas utilizou-se de forma indireta para determinação da sua resistência, a estimativa a partir do ensaio de carga pontual descrito a seguir.

3.3.3.2 Carga Pontual

O ensaio de carga pontual é executado em amostras escolhidas com forma aproximadamente prismática, em conformidade com a norma D5731 (ASTM, 1995).

O carregamento pontual é empregado na posição correspondente à metade do comprimento e da largura de cada corpo-de-prova. A carga é aplicada com orientações variadas nas amostras; metade delas posicionados em direção paralela ao sistema de aplicação das cargas e a outra metade posicionada normalmente em relação ao mesmo.

A Figura 3.20 mostra o equipamento utilizado para romper as amostras de escória selecionadas.



Figura 3.20: Aparelho utilizado para romper os corpos de prova selecionados.

O ensaio é válido quando o plano de ruptura coincide com a seção transversal de cada corpo-de-prova. Para cada ensaio avalia-se o índice de carregamento pontual I_s , a partir da carga de ruptura dividida pelo quadrado do diâmetro equivalente das partículas de escórias, definido pela Equação 3.1:

$$D_e = \sqrt{(4 * A_s / \pi)} \quad (3.1)$$

sendo A_s a área do plano de ruptura, definida, de forma aproximada, de acordo com a norma D5731 (ASTM, 1995).

3.3.4 Caracterização ambiental

3.3.4.1 Ensaio de Lixiviação

O teste de lixiviação segue a NBR 10005 (ABNT, 2004) e caracteriza os resíduos como perigosos quando eles apresentam valores de poluentes no extrato lixiviado em concentração superior aos padrões permitidos.

O procedimento do ensaio consiste na pesagem de 100 g de amostra, triturada abaixo da peneira de 9,5 mm, transferida a um frasco de lixiviação, para mistura com solução de

extração de ácido acético glacial ou ácido acético e hidróxido de sódio, dependendo do pH do resíduo.

O conjunto é mantido sob agitação durante 18 horas à temperatura de 25° C, com rotação de 30 vezes por minuto em aparelho giratório. Depois desse período, realiza-se a filtração do produto e o extrato lixiviado é analisado quimicamente. A Figura 3.21 apresenta o equipamento utilizado no ensaio.



Figura 3.21: Agitador rotativo usado no ensaio de lixiviação.

3.3.4.2 Ensaio de Solubilização

O teste de solubilização segue a NBR 10006 (ABNT, 2004) e avalia a solubilidade dos compostos presentes no material estudado.

O ensaio consiste na pesagem de 250 g de amostra, triturada abaixo da peneira de 9,5 mm e misturada a 1 litro de água destilada, sem correção do pH. A mistura permanece em repouso durante um período de 7 dias.

Após essa duração, a amostra é filtrada e o material extraído analisado em ICP-OES conforme Figura 3.22, que também mostra os frascos em repouso com as amostras.

A análise do filtrado é feita de acordo com a metodologia proposta pelo "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater" (WEF, 1998).

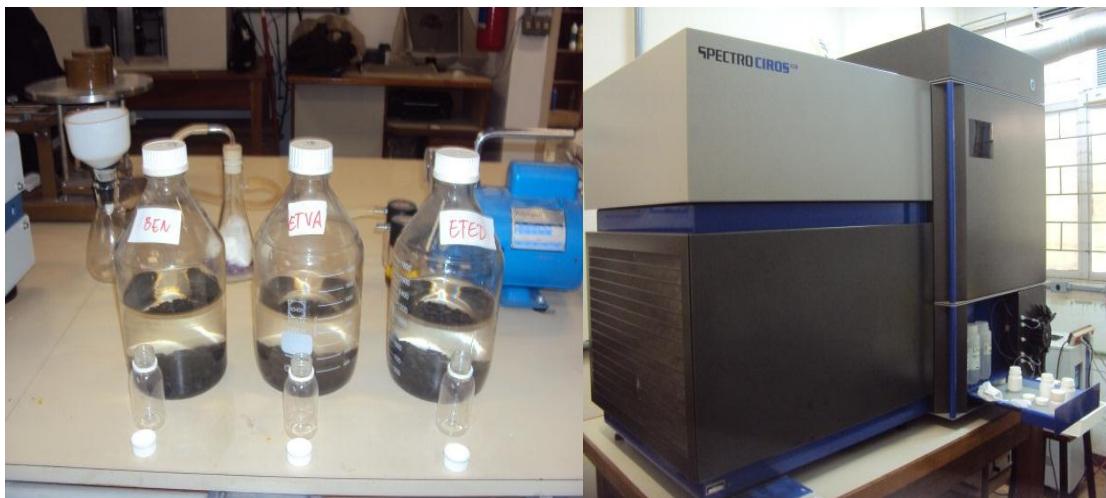


Figura 3.22: Equipamento usado no ensaio de solubilização.

Na classificação apontada pela NBR 10004 (ABNT, 2004), o ensaio de lixiviação define se um resíduo é perigoso ou não, ou seja, Classe I ou II, respectivamente. Enquanto no teste de solubilização diferencia-se um resíduo inerte, Classe IIB, de um não inerte, Classe IIA.

3.3.5 Avaliação da condutividade e da expansibilidade

3.3.5.1 Avaliação da Condutividade Elétrica

Como visto, uma das maiores dificuldades encontradas para aplicação da escória de aciaria LD como lastro ferroviário é o seu potencial expansivo.

Esta expansão pode atingir percentuais elevados e ocasionar fragmentação do material na ferrovia quando se faz uso de escórias não tratadas (SOUZA, 2007).

A consequência disso é a quebra excessiva de partículas com geração de pó e condução de eletricidade, comprometendo a operacionalidade da via.

Para avaliar a relação entre a expansão das escórias e sua influência sobre a condutividade elétrica das mesmas, utiliza-se uma montagem de caixa-teste ou tanque simulando uma seção transversal ferroviária.

Um condutivímetro, aparelho para medição da condutividade elétrica, faz as leituras e registra-se também o pH do sistema no decorrer do experimento.

Busca-se nesta montagem simular uma situação real possível de ocorrer em trechos ferroviários, quando a drenagem do lastro e da via são deficientes sob uma chuva intensa e prolongada, colaborando para a saturação do lastro.

Um esquema desse ensaio é apresentado pela Figura 3.23. A caixa feita de madeira, revestida por uma membrana plástica, possui 2,2 m de comprimento, 1,2 m de largura e 0,5 m de altura, sendo preenchida com escória e água até o nível acima da escória, como visto na Figura 3.24.

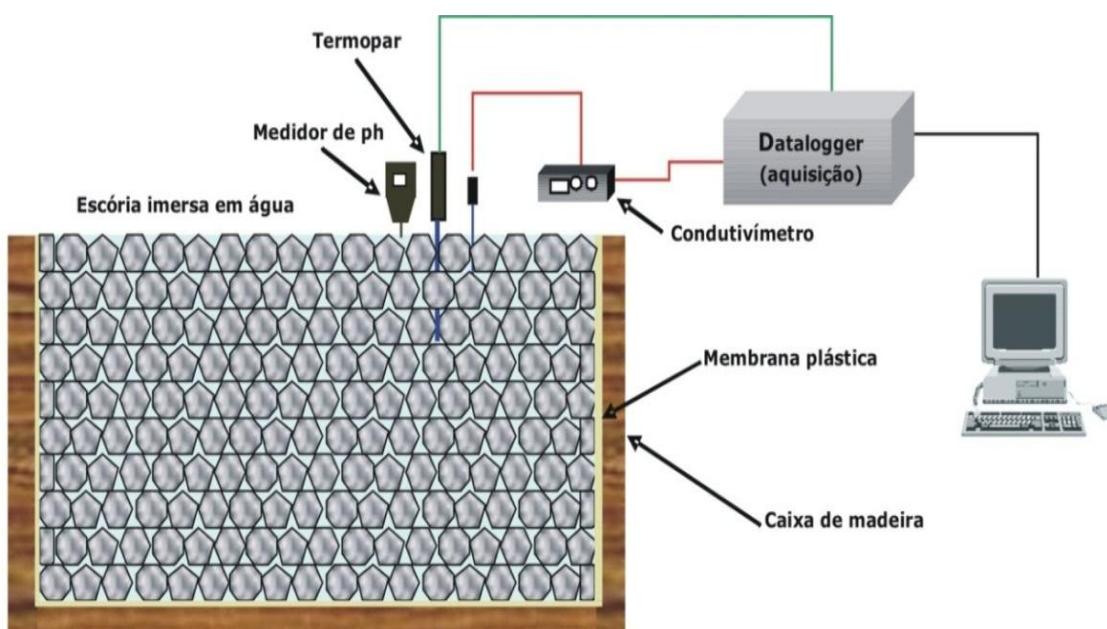


Figura 3.23: Esquema completo da montagem do experimento (SOUZA, 2007).



Figura 3.24: Caixa-teste para análise da condutividade nas escórias de aciaria.

Baseado nos estudos prévios de Souza (2007), o tempo de realização do ensaio é de 90 dias, com leituras diárias de condutividade e do pH.

A descarga da água contida nas caixas foi feita a cada 6 dias e o enchimento feito após 24 horas de cada descarga, todo o procedimento realizado no Laboratório de Ferrovias e Asfalto da UFOP.

3.3.5.2 Avaliação de Expansibilidade

A avaliação de expansibilidade da escória utiliza do Método PTM 130/78 adaptado de DMA-1 (DER-MG, 1992).

Este ensaio foi concebido a partir de estudos feitos por Emery (1978) e com mudanças na temperatura e no período do ensaio, surgiu a norma D4792 (ASTM, 2000).

Então o Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais, antigo DNER, desenvolveu uma adaptação no método original do PTM 130/78 originando o ensaio DMA-1 (FERNANDES, 2010).

O método consiste na imersão de corpos de prova cilíndricos compactados no ensaio Proctor Normal, de acordo com o ensaio de compactação M49-64 (DPT, 1981), em um banho térmico com água a $71 \pm 3^{\circ}\text{C}$ por um período de 7 dias com leituras diárias da variação volumétrica em função do aumento de altura do corpo de prova. Em seguida, os corpos-de-prova são retirados do banho e armazenados em estufa elétrica à mesma temperatura.

O corpo-de-prova precisa ser mantido na condição saturada, mas não submersa, por mais 7 dias, com leituras diárias da expansão. Uma modificação feita particularmente para ensaiar escória na faixa granulométrica de lastro, já que necessita ser compactada na energia Proctor, foi uma combinação em massa de 70% de material na granulometria para lastro e 30% em pó, já estabilizado quimicamente, para preencher o cilindro e torná-lo estável.

Após os 14 dias obtém a percentagem de expansão volumétrica total, sendo o limite permitido pelo PRO 262 (DNIT, 1994) de 3% para expansão acumulada após esse tempo de duração. Portanto o lote de escória de aciaria é aceitável quando sua expansão verificada pelo método PTM-130/78, for inferior ao limite de 3%.

Este ensaio foi realizado por um laboratório de análises de metais e minerais em Ipatinga, Minas Gerais.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS ADICIONADOS À ESCÓRIA

Quanto à caracterização dos materiais adicionados à escória que foram: areia, argila, bentonita e as duas lamas; os métodos utilizados consistiram em alguns dos mesmos para as caracterizações da escória.

No caso da caracterização química e mineralógica foram feitos os ensaios de digestão ácida, adsorção de nitrogênio, termogravimetria, difração de RX, teor de cal livre e capacidade de trocas iônicas, CTC e CTA, seguindo igualmente os procedimentos já citados nos referidos capítulos.

Para a caracterização morfológica optou-se também pela MEV e, para a caracterização física, pela granulometria a laser de cada tipo de material. Além da caracterização ambiental pelos ensaios de lixiviação e solubilização.

3.5 CARACTERIZAÇÃO E PROCESSO DE FUSÃO DAS MISTURAS

3.5.1 Aquisição dos materiais adicionados à escória

Os resíduos utilizados nesta pesquisa são provenientes das seguintes regiões ou fornecedores:

- ✓ Escória de aciaria LD de uma siderúrgica em Ipatinga – MG;
- ✓ Areia para construção civil da região de Ouro Preto – MG;
- ✓ Argila vermelha coletada próxima à região de Lavras Novas – MG;
- ✓ Bentonita de especificação de um fornecedor de Boa Vista – PB;
- ✓ Lama 1 ou ETED de uma siderúrgica em Ipatinga – MG;
- ✓ Lama 2 ou ETAV de uma siderúrgica em Ipatinga – MG;

A escória de aciaria foi coletada no pátio de resfriamento de uma siderúrgica em Ipatinga, seguindo os procedimentos norteados pela NBR 10007 (ABNT, 2004).

A amostra foi acondicionada em tambor com capacidade de 100 litros. Posteriormente, objetivando utilizar a escória como elemento para lastro de ferrovia, a amostra foi

dividida e quando necessário reduzida, segundo os procedimentos norteados pela NBR 5564 (ABNT, 2011), para a sua caracterização. Os solos e argilominerais foram obtidos de acordo com cada região já citada ou por fornecimento do fabricante.

3.5.2 Preparação e caracterização dos materiais

Todas as amostras dos materiais destinadas ao processo de fusão foram pulverizadas, na etapa de amostragem e submetidas ao peneiramento para separação da granulometria mais fina, destinada também a caracterização predominantemente química destes materiais.

A caracterização contou com alguns ensaios já realizados na etapa de caracterização da escória, não sendo necessário repeti-los para a mesma, e que, portanto tem igual procedimento para os solos e argilominerais.

As análises física, química, mineralógica, morfológica e ambiental vincularam os ensaios de granulometria, digestão ácida, adsorção de nitrogênio, teor de cal livre, difração de RX, MEV, termogravimetria, solubilização e lixiviação, conforme o Fluxograma 9 apresentado no item 3.2 e de iguais métodos já expostos nos itens subsequentes.

3.5.3 Balanço de massa e preparação das misturas

A presença de reação química no interior de um volume de controle leva a preocupação em relação ao termo de geração, mesmo com uma operação em regime estacionário. Efetuando o balanço em termos mássicos a geração aparecerá somente nos balanços por componentes.

Em termos molares, de acordo com os coeficientes estequiométricos da reação, pode haver geração também em termos globais. Esse fato ocorre quando o somatório dos coeficientes estequiométricos dos reagentes é diferente do somatório dos coeficientes estequiométricos dos produtos. Todavia, devido ao fato da equação estequiométrica fornecer informações diretamente em relação aos componentes, ao escrever o sistema de equações gerado pelo balanço de massa, normalmente utiliza-se as equações dos balanços por componentes, e não a equação do balanço global (MACH, 2011).

Desse modo, com os dados das composições típicas dos materiais adotados nessa pesquisa, procedeu-se o balanço de massa para determinação das proporções de cada amostra para adequação da basicidade (CaO/SiO_2) para 1,0 e preparação de misturas em equilíbrio, além das de igualdade de massa.

A Tabela 3.3, também apresentada no Capítulo 4, que corresponde ao saldo real por material puro, é resultado dos ensaios de caracterização química em porcentagem em massa de óxidos, e dão suporte aos cálculos a seguir apresentados para o balanço das misturas.

Tabela 3.3: Composição química dos materiais.

Amostra	ESPÉCIES QUÍMICAS (% em massa)										
	SiO_2	Al_2O_3	CaO	FeO	K_2O	MgO	MnO	Na_2O	P_2O_5	S	Ti
ESCÓRIA	21,12	2,94	36,83	22,96	0,51	9,66	3,10	0,43	1,15	0,49	0,50
AREIA	71,58	16,46	0,68	6,03	1,98	0,94	0,10	0,63	0,08	-	1,26
ARGILA	56,04	23,88	0,06	15,18	0,87	0,16	0,15	0,05	0,15	-	3,24
BENTONITA	53,20	12,20	12,04	12,95	0,72	4,91	1,16	1,26	0,40	0,20	0,75
LAMA ETAV	17,39	2,38	38,79	24,51	0,28	10,40	3,41	0,25	1,14	0,71	0,43
LAMA ETED	36,92	17,67	18,76	17,34	0,56	4,89	1,75	0,23	0,65	0,35	0,66

Através da análise química da escória de aciaria LD e dos argilominerais, procedeu-se a soma dos óxidos de cálcio e de silício para obtenção da basicidade desejada.

A título de cálculo das massas correspondentes dos materiais foi fixada a massa total da mistura final, em que se objetivou 1,5 Kg.

Considerando, Índice de basicidade, $\text{IB} = \text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1,0$ e sendo as incógnitas x e y , as massas de escória e de um argilomineral, respectivamente, para exemplo da mistura de escória e areia, matematicamente, tem-se:

✓ Mistura: Escória + Areia

X = massa de escória; Y = massa de areia; X + Y = 1500 gramas;

$$21,12(X) + 71,58(Y) = 36,83(X) + 0,68(Y)$$

$$- 15,71(X) + 70,9(Y) = 0 \text{ e relembrando que } X = 1500 - Y$$

Substituindo em X:

$$- 15,71(1500 - Y) + 70,9(Y) = 0$$

$$86,61(Y) = 23\,565$$

Daí: Y = 272,08 gramas de areia

X = 1227,92 gramas de escória.

Analogamente para as demais misturas, exceto para a que contém Lama ETAV, que por apresentar maior teor de cal do que a própria escória foi feito um cálculo adaptado, mas a título de comparação de resultados é possível ajuste, já que neste caso não houve possibilidade de neutralização da relação CaO/SiO₂. Esse cálculo diferenciado é mostrado abaixo:

✓ Mistura: Escória + Lama ETAV

$$21,12(X) + 17,39(Y) = 36,83(X) + 38,79(Y)$$

$$- 15,71(X) - 21,4(Y) = 0 \text{ e relembrando que } X = 1500 - Y$$

Substituindo em X:

$$- 15,71(1500 - Y) - 21,4(Y) = 0$$

$$-23\,565 + 15,71(Y) - 21,4(Y) = 0$$

$$-5,69(Y) = 23\,565$$

Y = -4141,5 gramas de lama ETAV

X = 1500 + 4141,5 = 5641,5 gramas de escória

A magnitude de x e y = 9783g = 100%

Daí x = 57,6% e y = 42,4%

Logo sendo 1500g a percentagem total da mistura, então:

57,6% = 864g de x = gramas de escória

42,4% = 636g de y = gramas de lama ETAV.

Com os resultados dos cálculos obtiveram-se as quantidades definidas para preparação de cada mistura, conforme apresentado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Quantidade das amostras utilizadas nas misturas em função da igualdade de massa e equilíbrio, pelo índice de basicidade.

Amostras de Escória de Aciaria LD	AMOSTRAS				MISTURAS				Sigla
	Massa (g)	Amostras de Argilo minerais	Massa (g)	Mistura	Quantidades em Massa (g)	Escória	Argilo mineral	Mistura Total	
ESC1	1500	ARE1	1500	ESC1+ARE1	750,0	750,0	1500	MIM1	
ESC2	1500	ARE2	1500	ESC2+ARE2	1227,9	272,1	1500	MEM2	
ESC3	1500	ARG3	1500	ESC3+ARG3	750,0	750,0	1500	MIM3	
ESC4	1500	ARG4	1500	ESC4+ARG4	1171,3	328,7	1500	MEM4	
ESC5	1500	BEN5	1500	ESC5+BEN5	750,0	750,0	1500	MIM5	
ESC6	1500	BEN6	1500	ESC6+BEN6	1085,6	414,3	1500	MEM6	
ESC7	1500	ETE7	1500	ESC7+ETE7	750,0	750,0	1500	MIM7	
ESC8	1500	ETE8	1500	ESC8+ETE8	804,2	695,7	1500	MEM8	
ESC9	1500	ETA9	1500	ESC9+ETA9	750,0	750,0	1500	MIM9	
ESC10	1500	ETA10	1500	ESC10+ETA10	864,0	636,0	1500	MEM10	

Legenda: ESC = Escória, ARE = Areia, ARG = Argila, BEN = Bentonita, ETE = Lama 1, ETA = Lama2, MIM = Mistura com igualdade de massa, MEM = Mistura por equilíbrio de massa.

Após o balanço descrito são feitos cálculos estimados para a composição química em porcentagem de massa de cada mistura, antecipando o resultado da digestão ácida das misturas, que apresenta saldo real no item 4.3.3.

Para o referido cálculo é feita uma regra matemática simples, utilizando as quantidades da Tabela 3.4 como o exemplo a seguir para o composto SiO_2 da mistura de areia e escória, MIM1:

$$\left. \begin{array}{l} (750\text{g} \times 21,12\%)/100 = 158,40\text{g de SiO}_2 \text{ na escória} \\ (750\text{g} \times 71,58\%)/100 = 536,85\text{g de SiO}_2 \text{ na areia} \end{array} \right\} \Sigma = 695,25\text{g de SiO}_2 \text{ na mistura MIM1}$$

E em porcentagem tem-se: $(695,25\text{g} \times 100)/1500\text{g} = 46,35\%$ de SiO_2 na mistura MIM1.

Todos os outros componentes químicos são relacionados de forma similar ao exposto e o resultado final é apresentado na Tabela 3.5, que também servirão de dados de entrada para o programa de simulação da temperatura de fusão, THERMO-CALC.

Tabela 3.5: Composições químicas das misturas e dados de entrada do THERMO-CALC.

Misturas	Espécies Químicas (% em massa)										
	SiO_2	Al_2O_3	CaO	FeO	K_2O	MgO	MnO	Na_2O	P_2O_5	S	Ti
MIM1	46,35	9,70	18,76	14,50	1,25	5,30	1,60	0,53	0,61	0,25	0,88
MEM2	30,28	5,39	30,27	19,89	0,78	8,08	2,55	0,46	0,95	0,40	0,64
MIM3	38,58	13,41	18,45	19,07	0,69	4,91	1,62	0,24	0,65	0,25	1,87
MEM4	28,77	7,53	28,77	21,26	0,59	7,58	2,45	0,34	0,93	0,38	1,10
MIM5	37,16	7,57	24,44	17,95	0,61	7,28	2,13	0,84	0,77	0,35	0,62
MEM6	29,98	5,50	29,98	20,19	0,57	8,35	2,56	0,66	0,94	0,41	0,57
MIM7	29,02	10,30	27,80	20,15	0,54	7,27	2,42	0,33	0,90	0,42	0,58
MEM8	27,82	9,18	29,17	20,58	0,53	7,64	2,52	0,34	0,94	0,43	0,57
MIM9	19,26	2,66	37,81	23,74	0,39	10,03	3,25	0,34	1,14	0,60	0,46
MEM10	19,39	2,68	37,74	23,68	0,40	10,00	3,24	0,34	1,14	0,59	0,47

3.5.4 Homogeneização dos materiais adicionados à escória

Após preparação das amostras destinadas à fusão, as mesmas foram misturadas em um equipamento cilíndrico rotativo por esteira, conforme mostrado na Figura 3.25, por um período de 1 hora para cada amostra, objetivando uma homogeneização e mistura mais efetiva possível.



Figura 3.25: Misturador cilíndrico rotativo por esteira.

As amostras ficaram acondicionadas em ambiente com temperatura e umidade controladas conforme NBR 14.081 (ABNT, 2012), até o momento do ensaio.

3.5.5 Determinação da temperatura de fusão das misturas

Para as simulações envolvendo o aquecimento dos materiais e determinação das temperaturas de fusão das misturas, utilizou-se o *software* THERMO-CALC, com a base de dados termodinâmicos SLAG3.

Os resultados obtidos com estas simulações deram subsídio para a determinação da temperatura de fusão a ser considerada no processo de fusão, a partir das composições das misturas, que foram mostradas na Tabela 3.5, com as quantidades em porcentagem de massa de óxidos contidos em cada amostra, baseadas nas quantidades estimadas já mencionadas.

O THERMO-CALC é um potencial pacote de programa computacional utilizado para realizar cálculos de diagramas termodinâmicos e de fase para sistemas multicomponentes de importância prática.

Os cálculos são baseados em bancos de dados termodinâmicos produzidos por avaliação de peritos de dados experimentais, utilizando o método SLAG3.

As bases de dados estão disponíveis para Aços, Ti, Al, Mg, Ni-ligas, multicomponentes óxidos e muitos outros materiais (THERMO-CALC, 2012).

Logo a termodinâmica computacional se apoia em modelos teóricos ajustados a bancos de dados termodinâmicos que possam descrever de forma satisfatória o comportamento das soluções reais, bem como outros aspectos de interesse. Descrever a conduta das soluções ou fases é essencial ao estudo de equilíbrios que envolvam metais, escórias e inclusões.

A viabilidade de se implantar métodos termodinâmicos em melhorias nas aciarias se deve ao fato de esta trabalhar com altas temperaturas e com uma cinética favorável. Trabalho este que é facilitado pelo uso de programas computacionais, tais como o THERMO-CALC utilizado neste estudo, que possibilita minimizar as incertezas nos cálculos realizados, uma vez que os problemas de acaria são complexos por serem multicomponentes e multifásicos.

3.5.6 Processo de fusão e tratamento térmico das misturas

Com o processo de fusão e o tratamento térmico das misturas por meio de resfriamento atmosférico, relativamente rápido, objetivou-se a recristalização ou até formação de material amorfó, uma vez que o aumento da velocidade de resfriamento implica na dificuldade de ordenação atómica da estrutura do material.

Para os ensaios de fusão utilizou-se um forno de fusão atmosférico do Centro de Pesquisas da mesma siderúrgica fornecedora da escória, com as seguintes especificações: capacidade de aquecimento máxima até 1700 °C, sistema de aquecimento por indução, potência máxima de 100 KW, fabricante JEOL e utilização preferencial para fabricação de ligas especiais.

A Figura 3.26 apresenta a fotografia do forno e do mecanismo de introdução do cadinho em seu interior.

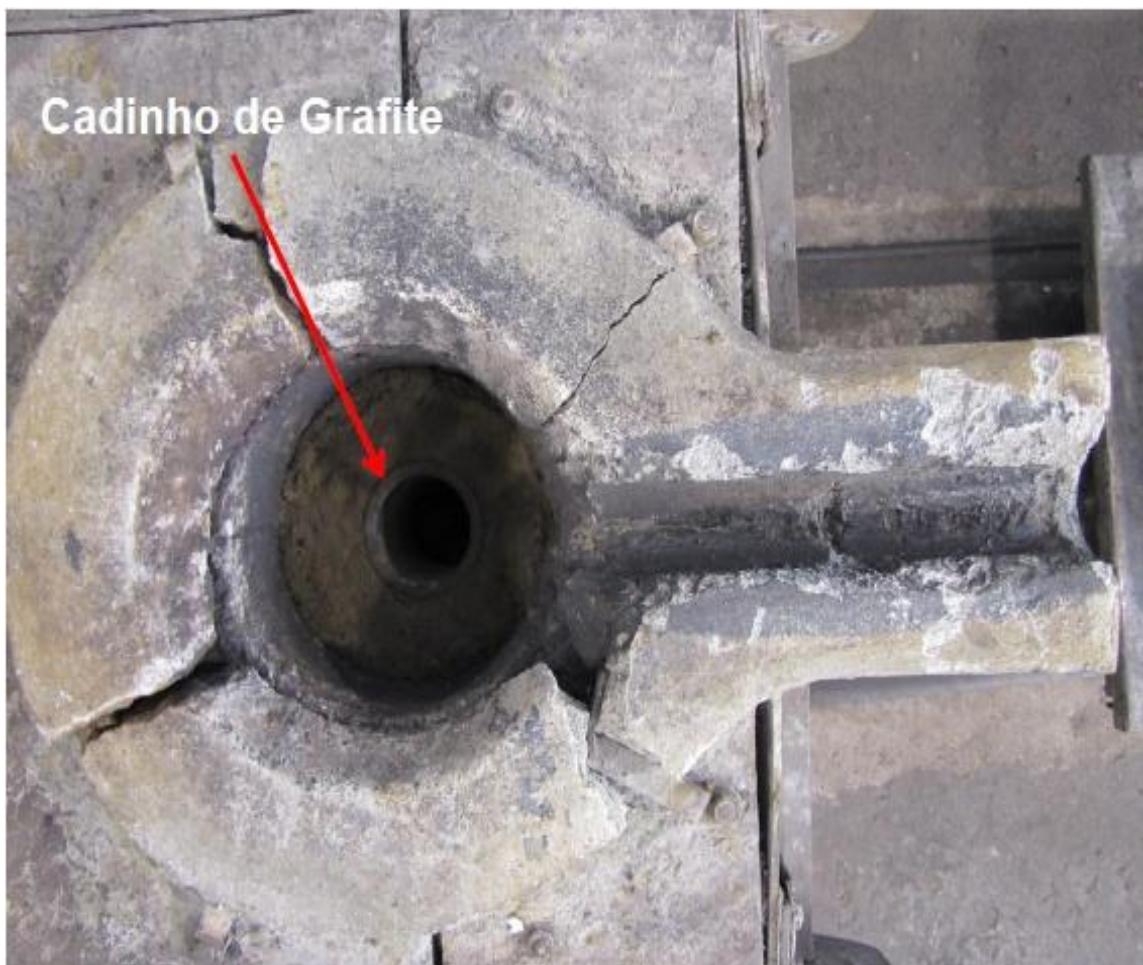


Figura 3.26: Forno de fusão atmosférico e mecanismo de introdução do cadinho em seu interior.

As temperaturas de ensaio utilizadas para a fusão das misturas foram determinadas com base nos aquecimentos simulados no software THERMO-CALC e usadas para a escolha do forno que possuísse essa capacidade.

Houve avaliação visual para perceber a ocorrência da fusão das misturas e manteve-se nesta temperatura atual por um tempo aproximado de 10 minutos para garantir completa fusão das amostras.

As Figuras 3.27 a 3.29 apresentam fotografias do forno durante a operação, retirada da amostra e seu resfriamento, respectivamente.

Notou-se forte reação com o material do cadinho gerando grandes quantidades de CO no ambiente, o que evidencia sinal da redução, com a elevada emissão de gás, o que é comprovado pela diferença das quantidades de amostra finais.



Figura 3.27: Forno de indução utilizado no processo de obtenção das misturas.



Figura 3.28: Retirada da mistura fundida do forno.

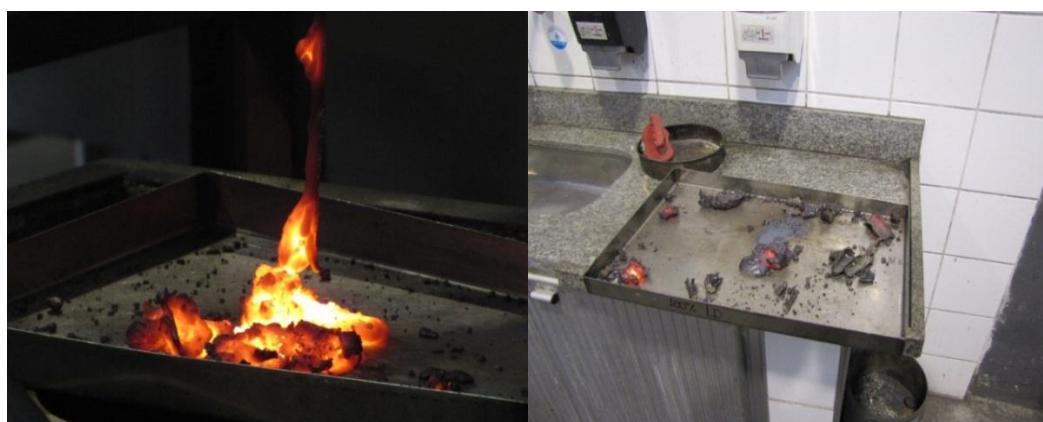


Figura 3.29: Amostras das misturas em resfriamento.

As amostras fundidas e resfriadas tiveram então os aspectos apresentados na Figura 3.30 e peso bastante reduzido, principalmente no caso da amostra MIM9, verificado na Tabela 3.6.



Figura 3.30: Aspectos das amostras após fusão.

Tabela 3.6: Determinação das quantidades de mistura antes e após fusão.

Mistura	Quantidade fundida (kg)	Quantidade gerada (kg)
MIM1	1,50	1,32
MEM2	1,50	1,28
MIM3	1,50	1,10
MEM4	1,50	1,07
MIM5	1,50	1,41
MEM6	1,50	1,39
MIM7	1,50	0,84
MEM8	1,50	0,91
MIM9	1,50	0,58
MEM10	1,50	0,76

A questão da redução em massa das misturas pode estar associada à quantidade de matéria orgânica presente principalmente nas lamas de estações de tratamento, sendo volatilizada durante a queima.

3.5.7 Processo de cominuição das misturas após a fusão

Em função da granulometria grosseira das misturas obtidas após o resfriamento identificou-se a necessidade de ajuste, visto que durante o processo de fusão no forno de indução ocorreu uma grande aglomeração de partículas.

As amostras foram então submetidas a um processo de moagem para adequação da finura e área específica. Essa moagem foi realizada em moinho de garras e reduzida a pó em um pulverizador, sendo então cada porção peneirada em #100, equivalente à peneira com abertura de malha de 0,15 mm.

O processo de moagem para adequação da granulometria das misturas foi realizado no Laboratório do Departamento de Geologia/DEGEO da UFOP.

3.6 CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS APÓS A FUSÃO

Para a caracterização das misturas foram realizados ensaios químicos para determinação da composição química, caracterização mineralógica, para identificação das fases formadas e caracterização morfológica, para visualização do aspecto, textura e morfologia das misturas. Além das avaliações de expansão e ambiental.

Portanto optou-se pelos ensaios de digestão ácida, difração de RX, MEV, termogravimetria, teor de cal livre, adsorção de nitrogênio, granulometria a laser, solubilização e lixiviação. Ou seja, os mesmos testes realizados anteriormente à fusão com os materiais ainda puros, com o objetivo de monitorar as mudanças ocorridas em cada estrutura.

CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios de laboratório executados ao longo de toda a pesquisa. A Tabela 4.1 apresenta os quantitativos de todos os ensaios realizados.

Tabela 4.1: Quantitativo dos ensaios de laboratório.

Ensaios	Origem dos materiais/ amostras				Total
	Escória de aciaria LD	Solos Naturais	Lamas de Estações de Tratamentos	Misturas	
Granulometria	2	3	2	10	17
Resistência à Abrasão “Los Angeles”	3	-	-	-	3
Resistência ao Choque “Treton”	3	-	-	-	3
Massa Específica, Porosidade e Absorção	3	-	-	-	3
Forma do Material	3	-	-	-	3
Teor de Argila em Torrões	3	-	-	-	3
Índice de Contaminação	3	-	-	-	3
Fragmentos Macios e Friáveis	3	-	-	-	3
Resistência à Intempérie	3	-	-	-	3
Carga Pontual/Compressão uniaxial	3	-	-	-	3
PTM 130 Modificado	2	-	-	-	2
Condutividade Elétrica	1	-	-	-	1
Digestão Ácida – Savillex	1	3	2	10	16
MEV	3	12	6	30	51
Difração - RX	1	3	2	10	16
Teor de Cal Livre	4	12	8	40	64
Adsorção de Nitrogênio	1	3	2	10	16
Lixiviação/ Solubilização	2	6	4	20	32
Termogravimetria - TG	1	3	2	10	16

Nos itens seguintes, os resultados dos ensaios de laboratório são apresentados e discutidos, de acordo com o cronograma da investigação realizado nesta pesquisa.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA LD

Neste tópico serão apresentados e discutidos os resultados referentes à caracterização da escória de aciaria recém produzida, ou seja, sem tratamento prévio e sem exposição às intempéries. Esta caracterização corresponde às premissas da norma NBR 5564 (ABNT, 2011), que dispõe do objetivo dessa pesquisa para avaliar a viabilidade da escória de aciaria para uso em ferrovia.

4.1.1 Caracterização química

4.1.1.1 Análise Química Quantitativa por Digestão Ácida – Savillex

A partir do ensaio de Digestão Ácida obteve-se a seguinte composição química em porcentagem de óxidos da escória estudada, conforme Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Composição química da escória de aciaria LD.

ESPÉCIES QUÍMICAS (% em massa)												
Amostra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	FeO	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	S	Ti	
Escória	21,12	2,94	36,83	22,96	0,51	9,66	3,10	0,43	1,15	0,49	0,50	

Observa-se que as quantidades são compatíveis com as composições típicas de escórias de aciaria do processo de produção do aço, sendo neste caso, elevados os teores dos óxidos de ferro, cálcio e silício, mas ainda permissíveis conforme as normas específicas. À exemplo, o regulamento americano para ferrovias, AREMA, preconiza que o lastro de escória de aciaria para ser empregado precisa apresentar a porcentagem de óxido de cálcio inferior a 45% e o somatório dos óxidos de alumínio e de ferro menor que 30%. Portanto nesta pesquisa os valores obtidos se encontram em conformidade com o prescrito.

4.1.1.2 Adsorção de Nitrogênio

Na Adsorção de Nitrogênio a amostra foi submetida à temperatura de -196°C, segundo a técnica BET, para se caracterizar os parâmetros intrínsecos de porosidade e superfície específica, sendo obtidas também as correspondentes isotermas de adsorção e os valores de densidade real, conforme Figura 4.1 e Tabela 4.3, respectivamente.

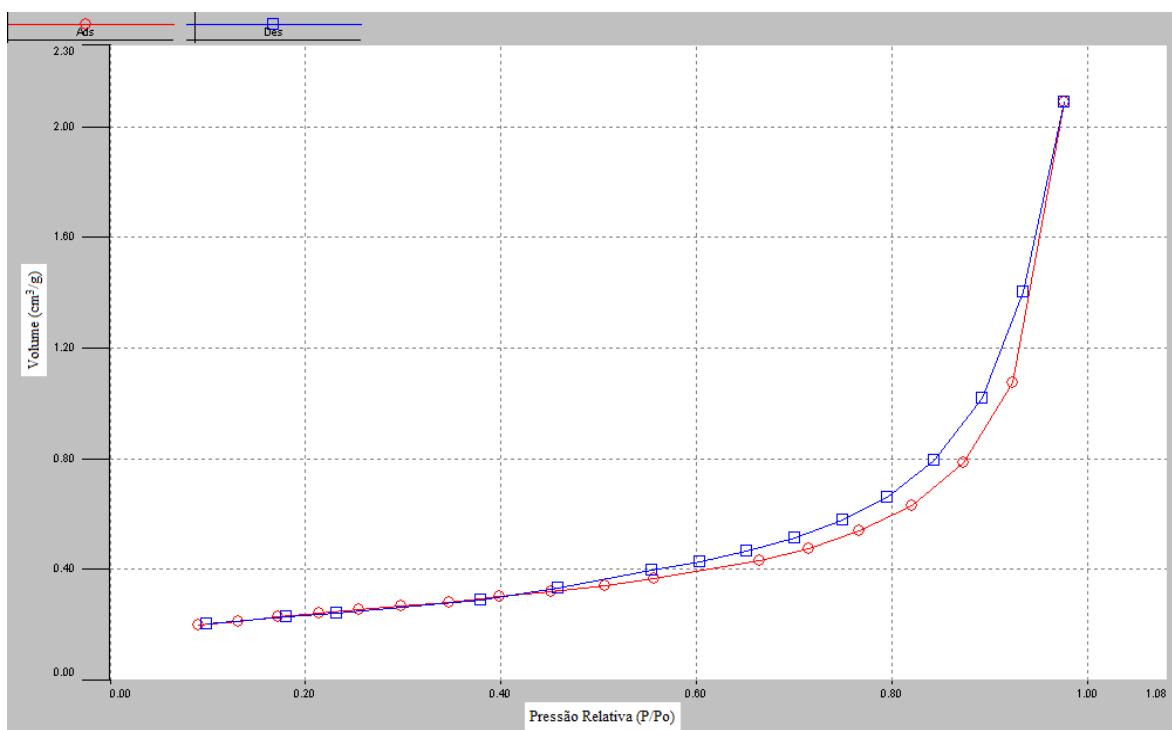


Figura 4.1: Curvas de adsorção e dessorção para escória.

Tabela 4.3: Resultados do ensaio de adsorção de nitrogênio na escória.

Parâmetros	Escória de Aciaria LD
Densidade (g/cm³)	3,5000
Superfície Específica BET (m²/g)	0,8300
Volume de Microporos (cm³/g)	0,0008
Área de Microporos (m²/g)	1,2530
Tamanho Médio dos Microporos (nm)	20,8590
Volume Total de Poros (cm³/kg)	$3,23 \times 10^{-3}$
Diâmetro Máximo dos Poros (A)	404,9000
Diâmetro Médio dos Poros (A)	77,7900
Coef. de Correlação	0,9997

O resultado final do ensaio é a superfície específica e possui o seu valor válido se a equação BET estabelecer uma relação linear para pressões relativas P/P_0 até 0,35. O valor da superfície específica é estabelecido em função do número de moléculas de gás nitrogênio aderidas às partículas da estrutura sólida da escória originando uma película contínua, cuja área total é dividida pela massa da amostra analisada.

A isoterma de adsorção/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. De forma generalizada a isoterma da escória pesquisada pode ser classificada como sendo do tipo IV, pela classificação IUPAC, revelando a existência conjunta de microporos, mesoporos e macroporos no esqueleto estrutural das partículas.

Este comportamento é comum para amostras de escórias de aciaria LD com ampla granulometria e formas dos poros. Sua histerese mais inclinada é classificada como tipo H3, indicativa da presença de poros em forma de cunhas, fendas ou placas paralelas.

4.1.1.3 Difração de Raios – X

Quanto ao ensaio Difração de RX o resultado é apresentado na Figura 4.2 que mostra o estado cristalino da escória de aciaria e a ocorrência das fases mineralógicas dos padrões difratométricos. Este estado cristalino está relacionado ao processo de resfriamento lento das escórias.

Os compostos encontrados através da difração de RX para a amostra analisada foram: hematita (Fe_2O_3), ilmenita (FeTiO_3), goethita (FeO(OH)), manganite (MnO(OH)), siderita (FeCO_3) e calcita (CaCO_3). Sendo os picos de maior intensidade, correspondentes aos principais constituintes mineralógicos de hematita, ilmenita e em destaque a calcita.

Estes compostos são similares aos encontrados nas escórias LD, corroborando os resultados descritos por Souza (2007) e Fernandes (2010), entre outros autores. Analisando-se ainda as fases mineralógicas encontradas no resultado do ensaio, pode-se afirmar que possuem produtos não hidratados como óxidos de ferro e cálcio, cuja hidratação pode trazer instabilidades ao material utilizado como lastro.

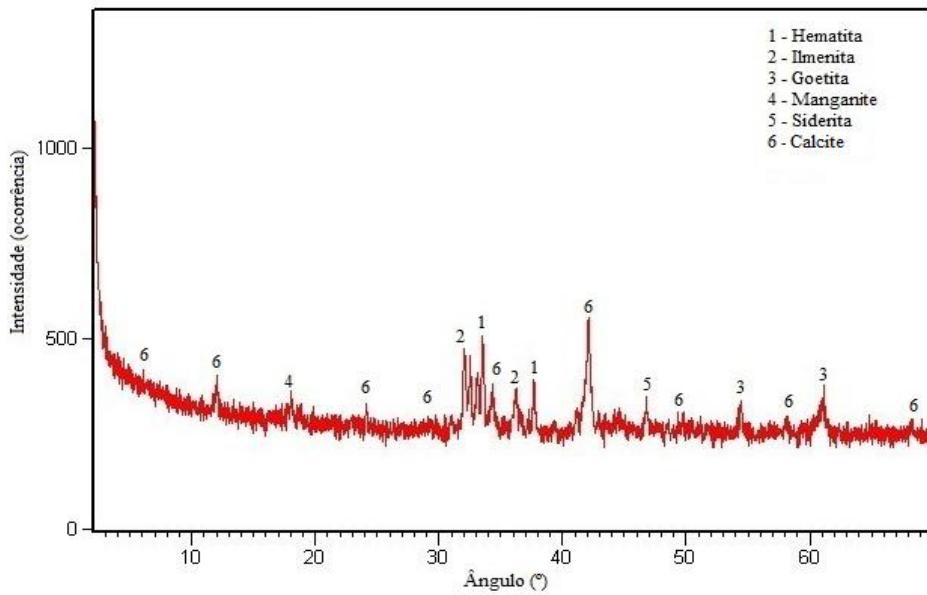


Figura 4.2: Padrão de difração de raios-X da amostra de escória.

4.1.1.4 Análise Química por Microscopia Eletrônica de Varredura

A Microscopia Eletrônica de Varredura, MEV, é empregada em caráter pontual para caracterização das diferentes fases minerais presentes na amostra. A análise química foi feita no material pulverizado e a Figura 4.3 apresenta a distribuição morfológica obtida. A Tabela 4.4 reúne as espécies químicas que foram encontradas e suas respectivas porcentagens para a análise pontual efetuada, cujos pontos apresentam-se na imagem da Figura 4.3.

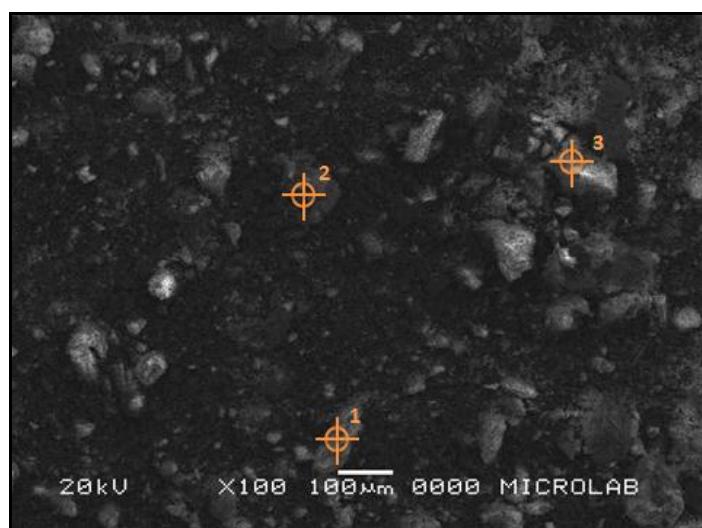


Figura 4.3: Morfologia típica encontrada na escória.

Tabela 4.4: Análise quantitativa em cada ponto da Figura 4.3.

Pontos	Espécies Químicas (% em massa)					
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃
Escória_ponto1	-	-	26,84	-	12,13	62,86
Escória_ponto2	-	-	28,14	-	18,30	52,19
Escória_ponto3	5,49	13,75	44,60	4,69	1,42	30,05

O método utilizado para determinação do percentual em massa foi o da análise semiqualitativa conforme a medição da superfície de picos identificados em cada alvo pontual.

Através da micrografia da amostra de escória de aciaria LD, observou-se uma textura homogênea com partículas irregulares, mas surgimento de frações globulares. Esse tipo de análise tem caráter subjetivo e depende da experiência do avaliador, porém aliada as demais análises microestruturais é de grande contribuição na interpretação dos resultados, somando a influência de rugosidades, poros ou trincas de partículas, que revelam muito sobre o comportamento do material em escala real.

No geral, na escória de aciaria foram confirmadas as presenças de agregações e grãos de hematita e caulinita, que para aumentos maiores de imagens, mostram formas lamelares e em blocos ou placas, respectivamente. Essa morfologia mais lisa e regular, não contribui efetivamente para a conformação dos grãos em termos de embricamento, pois permite que uma partícula deslize sobre a outra.

A análise da MEV também mostrou uma alta concentração de Ca e Fe, sendo o mesmo resultado do ensaio mineralógico e químico quantitativo, reafirmando os compostos encontrados anteriormente.

Diante destes resultados, com a quantidade elevada de óxido de cálcio livre presente na escória de aciaria, ratifica-se a necessidade do tratamento de estabilização química para uso como lastro ferroviário.

4.1.1.5 Análises de Capacidade de Trocas Iônicas – CTC e CTA

No ensaio de Capacidade de Trocas Iônicas, CTC e CTA, o resultado apresentado pela análise da escória de aciaria está indicado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Resultado da análise de capacidade de trocas iônicas.

Amostra	CTC (cmol/Kg)	CTA (cmol/ Kg)
Escória	16,03	0,30

Nota: CTC = Capacidade de troca catiônica, CTA = Capacidade de troca aniônica.

A partir do resultado obtido observa-se que a escória apresenta índice de CTC bem mais expressivo do que de CTA, portanto um material de maior capacidade de adsorção de cátions do que de ânions. Essa capacidade significativa revela o potencial de interação da escória com outros materiais também reativos como os argilominerais.

4.1.1.6 Teor de Cal Livre

O ensaio para Determinação do Teor de Cal livre por etilenoglicol, feito em triplicata, forneceu uma média de 5,97%, que mostra uma avaliação negativa da escória para aplicação em ferrovia, já que ultrapassou o limite permitível de 3% e que prenuncia a capacidade de expansão volumétrica.

4.1.1.7 Termogravimetria

O ensaio de Termogravimetria é baseado nas modificações de peso que ocorrem durante o aquecimento do material, e a Figura 4.4 apresenta a termoanálise obtida pelas curvas de termogravimetria (TG/DTG) para a amostra de escória de aciaria LD.

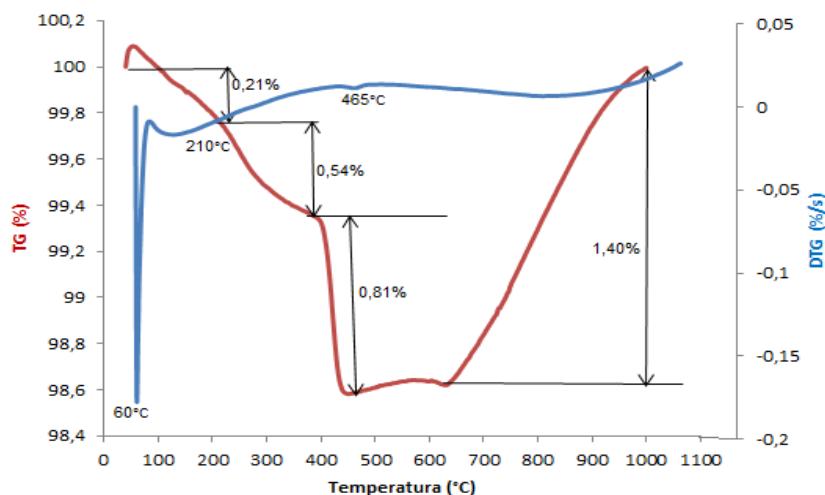


Figura 4.4: Curva de perda de massa do ensaio TG/DTG da escória de aciaria LD.

A Tabela 4.6 apresenta de forma resumida as temperaturas de pico ocorridas durante as reações bem como sua classificação quanto a liberação ou absorção de calor, os percentuais de perda de massa e faixa de temperatura onde ocorreram tais perdas.

Tabela 4.6: Resultados das análises químicas por termogravimetria.

Escória de Aciaria LD			
Pico	Temperatura do Pico (°C)	Perda de Massa (%)	Faixa de Temperatura (°C)
H ₂ O	60	0,21	40 - 150
Mg(OH) ₂	210	0,54	150 – 450
Ca(OH) ₂	465	0,81	450 – 570
Outros	-	1,40	570 – 1000

O pico de temperatura a 465°C, corresponde à perda de hidróxido de cálcio, de acordo com o estudo de Gumieri (2000), que apresenta a Equação 4.1 para cálculo estequiométrico do percentual de CaO.

$$\text{CaO}/56 = \Delta\text{H}_2\text{O}/18 \quad (4.1)$$

A variação de H₂O é correspondente a perda de massa indicada na Tabela 4.6 obtida pela curva TG, devido ao processo de desidroxilação do Ca(OH)₂. Os valores 56 e 18 correspondem aos pesos moleculares dos componentes CaO e H₂O, respectivamente. Desta forma, a Equação 4.1 foi calculada para a amostra de escória conforme a Equação 4.2 a seguir:

$$\text{CaO}/56 = 0,81/18 \longrightarrow \text{CaO} = 2,52\% \quad (4.2)$$

É importante observar que este valor obtido é do percentual de CaO_{Livre} calculado em função da desidroxilação do Ca(OH)₂, sendo esta a parcela hidratada. A parcela não hidratada é apresentada no resultado do ensaio de cal livre, citado anteriormente.

Calculados os componentes do CaO, ou seja, o valor de CaO_{livre} total obtido no ensaio de etilenoglicol igual a 5,97%, e o CaO_{livre} devido à desidroxilação do Ca(OH)₂ obtido nessa análise térmica; pela diferença tem-se a parcela restante, ou CaO_{livre} não-

hidratado, igual a 3,45%. Ressalta-se neste resultado final, também acima do limite permitível pela norma, que o considerável teor de CaO_{livre} remanescente pode hidratar posteriormente e inviabilizar o uso da escória devido a consequente expansão volumétrica.

4.1.2 Caracterização física

4.1.2.1 Análise Granulométrica

A distribuição granulométrica da escória estudada foi realizada em conformidade com as normas da ABNT e no ensaio utilizou-se um peneirador mecânico convencional, com a série de peneiras padronizadas, sendo obtidos os pesos retidos e acumulados e, consequentemente, as porcentagens retidas e passantes em cada peneira. Na Tabela 4.7 e Figura 4.5 apresentam-se os resultados e a curva granulométrica do ensaio feito para a escória de aciaria.

Tabela 4.7: Resultado do ensaio de granulometria.

Peneiras		Percentagem em Peso
Malha (#)	Diâmetro (mm)	% Passante
3"	76	96,6
2 ½"	63	85,7
2"	50	64,0
1 ½"	38	30,9
1"	25	10,5
¾"	19	7,0
½"	12,5	4,4
⅓"	9,5	3,5
¼"	6,3	2,9
4	4,8	2,7
8	2,4	2,4
10	2	2,4
16	1,2	2,4
30	0,6	2,4
50	0,3	2,4
100	0,15	2,4
200	0,075	0,5



Figura 4.5: Enquadramento da curva granulométrica da escória nas faixas padrão A e B da ABNT.

Conforme já mencionada na metodologia, para que um material seja empregado como lastro ferroviário, ele deve exibir uma granulometria superior a 12,5 mm, à exceção de um pequena tolerância de 5% da massa total, segundo a NBR 5564 (ABNT, 2011).

A quantidade excessiva de material de granulometria fina é prejudicial à boa funcionalidade do lastro, diminuindo suas propriedades de drenagem, podendo dar a ele uma maior rigidez devido à ocupação dos vazios. Nesse caso, o processo de cimentação pode ser facilitado se houver a presença de água e compostos químicos solubilizados.

Pelo gráfico da escória pôde-se perceber que a curva se manteve em sua maior parte fora do enquadramento das faixas dos padrões A e B da ABNT, exigindo ajuste do britador para atendê-las. Quanto a restrição granulométrica da norma, apresentou uma porcentagem de 4,4% do material passante na peneira de 12,5 mm, atendendo a tolerância de até 5%.

Após o ensaio foram obtidos os parâmetros característicos como o coeficiente de não uniformidade $C_u = D_{60}/D_{10}$, coeficiente de curvatura $C_c = (D_{30})^2/(D_{60} \times D_{10})$, dimensão máxima característica e módulo de finura, conforme apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Propriedades geométricas obtidas a partir da granulometria.

Parâmetro	Escória
D_{10} (mm)	25,0
D_{30} (mm)	36,3
D_{60} (mm)	48,5
Diâmetro Máximo Característico – DMC (mm)	76
Módulo de Finura – MF	8,44
Coeficiente de Não Uniformidade – C_u	1,94
Coeficiente de Curvatura – C_c	1,09

Pela análise do ensaio, a escória é bem graduada exibindo DMC de 76 mm que constitui um material graúdo e módulo de finura, que representa à soma das porcentagens acumuladas em todas as peneiras da série normal dividida por 100, de valor igual 8,44, ressaltando-se que quanto maior esse número, mais graúdo o material de lastro ferroviário.

Se a curva está bem ou mal distribuída, deve-se fazer a análise dos coeficientes, no caso, C_u , de não uniformidade, e C_c , de curvatura; sendo estes parâmetros geotécnicos e não ferroviários.

O C_c fornece a medida da forma e da simetria da curva granulométrica, devendo estar entre 1 e 3 para uma amostra bem graduada.

Já o C_u oferece o conceito da distribuição do tamanho das partículas, e para valores próximos de 1 indicam curva verticalizada, com os diâmetros variando em um intervalo pequeno, enquanto que, para valores maiores a curva granulométrica irá se abatendo e aumentando o intervalo de variação dos diâmetros.

A partir dos resultados alcançados observa-se a escória de aciaria recém produzida é granulometricamente viável para este tipo de aplicação.

Optou-se também pelo ensaio granulométrico da escória através do método a laser no equipamento Particle Size Analyzer CILAS 1064 da UFOP, conforme detalhado na Figura 4.6 e Tabela 4.9.

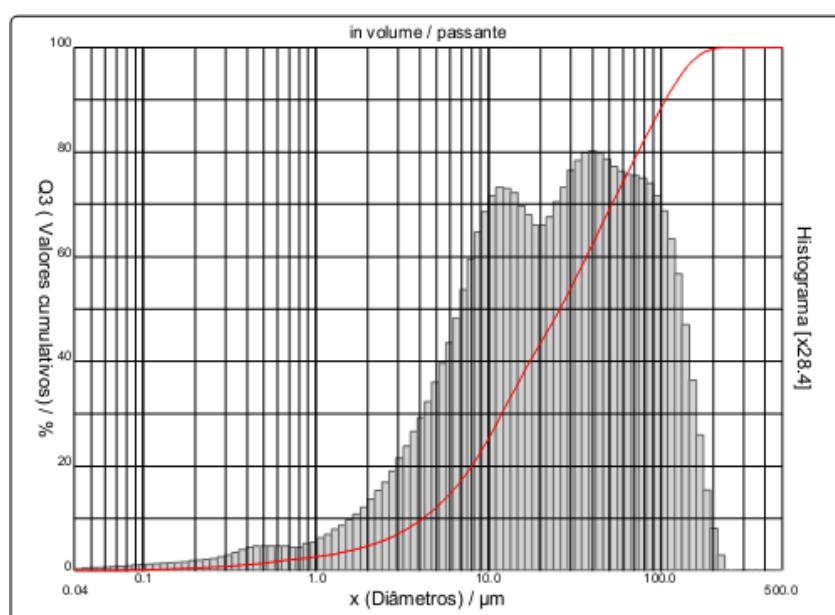


Figura 4.6: Gráfico do enquadramento granulométrico da escória.

Tabela 4.9: Propriedades geométricas obtidas a partir da granulometria.

Parâmetro	Escória
D ₁₀ (μm)	4,5
D ₃₀ (μm)	13
D ₆₀ (μm)	38
Diâmetro Máximo Característico – DMC (μm)	240
Diâmetro médio(μm)	41,77
Coeficiente de Não Uniformidade – C _u	2,44
Coeficiente de Curvatura – C _c	0,99

No gráfico da leitura a laser, a abscissa representa o tamanho dos grãos e a ordenada o seu valor cumulativo, que corresponde ao mesmo significado para a porcentagem passante em determinada peneira.

Os coeficientes de não uniformidade e curvatura encontrados anteriormente no peneiramento se aproximam também dos valores para este resultado. Pelo histograma observa-se a distribuição de frequência dos tamanhos dos grãos e o pico representativo do diâmetro médio, que para essa amostra é de 41,7 μm, relativo a material fino.

Apesar de nesse ensaio a escória ser classificada como agregado miúdo conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009), ao contrário de pedregulhosa segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995), tais resultados reafirmam o desfecho dado pelo peneiramento mecânico que a aponta como material bem graduado e exequível para uso como lastro de ferrovia.

Quanto ao ensaio de teor de material pulverulento, obteve-se o resultado de 0,25% abaixo do máximo preconizado pela norma, indicando baixa degradação e capacidade de absorção de água pelo coproduto.

4.1.2.2 Índice de Contaminação Granulométrica

Pelo ensaio de granulometria, determina-se o índice de contaminação e o grau de contaminação. A Tabela 4.10 mostra estes resultados.

Tabela 4.10: Índice e grau de contaminação da escória.

Amostra	Índice de Contaminação – FI	Grau de Contaminação
Escória de aciaria LD	2,05	Moderadamente Limpo

A escória é então classificada como moderadamente limpa, de acordo com a correlação considerada por Selig. O FI está diretamente associado à vida útil do lastro, ao passo que, quanto mais contaminado, menor sua capacidade estrutural, podendo chegar ao ponto extremo, quando há perda de drenagem por colmatação. Nessa sequência, considera-se mais uma viabilidade da escória para lastro.

4.1.2.3 Abrasão Los Angeles

Os resultados deste ensaio são apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11: Resultados do ensaio de Abrasão Los Angeles.

Amostra	Graduação da Amostra	Número de Esferas	Desgaste (%)
Escória	F	12	15,3

Conforme decorrência do teste, a escória demonstrou-se apta neste parâmetro, para ser empregada como lastro ferroviário. O limite máximo para a abrasividade recomendado pelas NBR 5564 (ABNT, 2011) e AREMA (2001), para as escórias de aciaria LD, é de 30%. Trata-se de um parâmetro inversamente proporcional, pois quanto menor o desgaste percentual, mais longa será a durabilidade do material.

4.1.2.4 Resistência ao Choque – Índice de Tenacidade “Treton”

Para os resultados do índice de tenacidade a escória apresentou resistência ao choque em conformidade com o limite permitível de máximo 25%, pelo Anexo E da NBR 5564 (ABNT, 2011). A Tabela 4.12 apresenta os resultados do ensaio.

Tabela 4.12: Resultados dos ensaios de resistência ao choque Treton.

Amostra	Nº de Fragmentos	Número de Golpes	Resistência ao Choque (%)
Escória	20	10	8,9

Da mesma forma que o comportamento para abrasividade, a conformação deste índice concede ao lastro ferroviário maior vida útil e, portanto menores custos de manutenção.

4.1.2.5 Massa Específica Aparente, Absorção e Porosidade Aparente

Para os referidos ensaios, os resultados e os padrões permissíveis em norma são apresentados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13: Resultados e limites dos ensaios de massa específica, absorção de água e porosidade aparente.

Amostra	Massa Específica Aparente (KN/m ³ x mín)	Absorção de Água (% máx)	Porosidade Aparente (% máx)
NBR 5564 (ABNT, 2011)	2,5	0,8	1,5
Escória	3,60	0,59	1,5

Os valores alcançados nos ensaios mostram que a escória estudada se encontra em conformidade com os limites da norma de Lastro Padrão.

A massa específica aparente exibiu ainda valor bem acima do mínimo recomendado e no que se refere à absorção de água, também passou no teste.

Com relação à porosidade aparente, atingiu o percentual máximo permitido, mas não ultrapassou. Isso pode ter ocorrido devido à natureza do material que tem sua origem de um processo industrial e não natural, como para os agregados usualmente aplicados para lastro. Entretanto, mesmo sendo a porosidade limite, esse valor não reflete necessariamente uma desvantagem, pois não interfere na resistência do material, somente reflete um ganho de massa.

4.1.2.6 Forma do Material

A geometria dos fragmentos da escória é representada pelo formato de uma amostra representativa. A Tabela 4.14 apresenta a classificação da forma estudada segundo o Anexo A da NBR 5564 (ABNT, 2011).

Tabela 4.14: Determinação da forma da escória.

Amostra	Relação B/A	Relação C/B	Relação $\sum A / \sum C$	Forma - NBR 5564 (ABNT, 2011)
Escória	0,76	0,74	1,79	Cúbica

A escória apresentou forma cúbica, em conformidade com a classificação determinada pela norma de Lastro Padrão, e porcentagem de forma lamelar de 5,3%, abaixo dos 15% máximo permitido pelo mesmo regulamento.

Essa predominância de formato facilita o intertravamento entre os fragmentos, que é benéfico à aplicabilidade da escória de aciaria como material para lastro, já que fornece maior rigidez e consequentemente estabilidade à via ferroviária.

4.1.2.7 Fragmentos Macios e Friáveis

O resultado do teor de fragmentos macios e friáveis foi de 6,4% na análise de 128 fragmentos de escória de aciaria LD. No entanto, o Anexo F da NBR 5564 (ABNT, 2011) recomenda o valor de 5% que é ultrapassado nesse ensaio. Essa desconformidade, porém não é suficiente para impedimento do uso da escória como lastro, por se tratar de um ensaio de cunho facultativo declarado na norma.

4.1.2.8 Teor de Argila em Torrões

Não foram encontrados teores significativos de argila em torrões na amostra ensaiada de escória. A norma NBR 7218 (ABNT, 2010) estabelece no máximo 0,5% de torrões de argila, e o resultado apresentou 0,17%. Esse limite é muito relevante para o material a ser usado como lastro padrão, pois demonstra sua qualidade e baixo grau de contaminação.

4.1.2.9 Resistência à Intempéries

O resultado alcançado no ensaio de resistência a intempéries, após ciclos de imersão em solução de sulfato de sódio e secagem em estufa, foi de 4,23% de resíduos gerados.

Logo a escória mostrou ser muito resistente a esse tipo de interferência, produzindo uma pequena quantidade de resíduos na solução de sulfato e se mantendo dentro do percentual de 10% permitido pelo Anexo C da NBR 5564 (ABNT, 2011).

Este ensaio procura demonstrar os possíveis danos causados pelas intempéries durante anos de exposição do lastro e, portanto antecipa a frequência de manutenção que deverá ter a ferrovia.

4.1.2.10 Massa Unitária

Conforme a norma, a massa unitária do agregado solto é a média dos resultados individuais obtidos em pelo menos três determinações, dividindo-se a massa do agregado pelo volume do recipiente utilizado, expressa em quilogramas por metro cúbico, que se aplica a agregados secos em estufa, até constância de massa.

A massa unitária determinada pelo método foi calculada pelas Equações 4.3 e 4.4.

$$\rho_{ap} = (\text{mar} - \text{mr}) * F \quad (4.3)$$

$$\rho_{ap} = (\text{mar} - \text{mr}) / V \quad (4.4)$$

Onde:

ρ_{ap} é a massa unitária do agregado, em quilogramas por metro cúbico;

mar é a massa do recipiente mais o agregado, em quilogramas;

mr é a massa do recipiente vazio, em quilogramas;

V é o volume do recipiente, em metros cúbicos;

F é o fator para o recipiente, em 1/metro cúbico.

A massa unitária de agregados é a propriedade que reflete sua compacidade, pois dependendo da maneira como se arranjam os grãos, resultará uma maior ou menor compacidade e consequentemente a estabilidade de uma estrutura. O resultado da massa unitária encontrada para a escória foi de 1850 kg/m^3 , que dentro das faixas de agregados leves ($\rho_{ap} < 1000 \text{ kg/m}^3$), normais ($1000 \text{ kg/m}^3 < \rho_{ap} < 1700 \text{ kg/m}^3$) ou pesados ($\rho_{ap} > 1800 \text{ kg/m}^3$), indica um material pesado e em termos de densidade, quantidade de vazios e compacidade, é benéfico para a estabilidade física do lastro ferroviário.

4.1.3 Caracterização mecânica

4.1.3.1 Carga Pontual

Na Tabela 4.15 são apresentados os resultados do ensaio de carga pontual na escória de aciaria.

Tabela 4.15: Resultados do ensaio de carga pontual.

Amostra	Índice de Carregamento $I_{s(50)}$ (Mpa)		Índice de Anisotropia $I_{a(50)}$
	Plano \perp	Plano $/\!/$	
Escória	8,90	7,95	1,12

Admitindo-se o diâmetro $D_e = 50$ 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; avaliou-se o índice de carregamento para este diâmetro, $I_{s(50)}$, com as cargas de ruptura.

Os resultados foram positivos, já que apresentaram bons índices de carregamento pontual tanto paralelo quanto perpendicular. Foi determinado também o respectivo índice de resistência anisotrópico pela Equação 4.5:

$$I_{a(50)} = I_{s \perp(50)} / I_{s/\!(50)} \quad (4.5)$$

Esse índice refere-se à resistência à compressão, onde sua magnitude indica:

- ✓ $I_a > 1$ = a resistência no plano perpendicular de aplicação da força é maior que no plano paralelo;
- ✓ $I_a = 1$ = a resistência é uniforme sob qualquer plano de aplicação da força;
- ✓ $I_a < 1$ = a resistência no plano paralelo de aplicação da força é maior que no plano perpendicular.

Dessa maneira, com índice de anisotropia pouco maior que 1, tem-se que a resistência da escória é praticamente uniforme sob qualquer plano de aplicação da força.

O índice de carregamento pontual constitui um parâmetro que representa a característica de resistência considerando a geometria das partículas e a porosidade, mas 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. (GOODMAN, 1989).

4.1.3.2 Compressão Axial

Como já relatada na metodologia, a resistência à compressão axial foi estimada de maneira indireta por meio do ensaio de carga pontual, devido não ser possível sua realização, pela falta de corpos-de-prova de escória com as dimensões padronizadas pelo ensaio.

Verifica-se pela Tabela 4.16, os resultados estimados.

Tabela 4.16: Resultados para resistência à compressão axial.

Amostra	Resistência a Compressão Uniaxial δ_{uc} (Mpa)	
	Plano \perp	Plano //
Escória	176,93	158,04

Para aferir os valores de resistência à compressão uniaxial, δ_{uc} , apontados na Tabela 4.16, empregou-se a Equação 4.6:

$$\delta_{uc} = C \cdot I_{s(50)} \quad (4.6)$$

Sendo C um coeficiente experimental variável com o diâmetro dos corpos-de-prova e das características do material, conforme estudo feito especificamente para escórias de aciaria LD por Fernandes em 2005.

A Tabela 4.17, adaptada do trabalho de Fernandes (2005), apresenta os valores desse coeficiente.

Tabela 4.17: Valores de C para a escória de aciaria LD (Adaptada de FERNANDES, 2005).

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

Pela análise, a escória se encontra bem acima do limite estabelecido pelo Anexo D da NBR 5564 (ABNT, 2011) que prescreve o valor mínimo de 100 MPa para a resistência, em ambos planos anisotrópicos.

4.1.4 Caracterização ambiental

4.1.4.1 Ensaio de Lixiviação

Os resíduos são caracterizados como perigosos ou não por meio deste ensaio, seguindo o método constante na NBR 10005 (ABNT, 2004) e a listagem de teores de poluentes no extrato lixiviado, no Anexo F da NBR 10004 (ABNT, 2004).

Os resultados do teste de lixiviação para parâmetros inorgânicos estão indicados na Tabela 4.18 para a amostra de escória de aciaria.

Tabela 4.18: Lixiviação para parâmetros inorgânicos para escória de aciaria recém produzida.

Parâmetros	Concentração no Resíduo Lixiviado da escória recém produzida	Concentração no Resíduo Lixiviado da escória - DUPLICATA	Limites da Norma NBR10004 (ABNT, 2004)	Limite de Quantif.- LQ
	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
Alumínio – Al	<LQ	<LQ	-	0,00951
Arsênio – As	<LQ	<LQ	1,0	0,103
Bário – Ba	0,0221	0,0187	70,0	0,000348
Berílio – Be	<LQ	<LQ	-	0,000529
Cálcio – Ca	812	567	-	0,0130
Cádmio – Cd	<LQ	<LQ	0,5	0,00474
Cobalto – Co	<LQ	<LQ	-	0,0088
Cromo – Cr	<LQ	<LQ	5,0	0,0129
Cobre – Cu	<LQ	<LQ	-	0,003
Ferro – Fe	0,0297	0,0310	-	0,00798
Potássio – K	1,20	1,39	-	0,0716
Lítio – Li	0,00218	0,00188	-	0,000552
Magnésio – Mg	3,97	4,07	-	0,00155
Manganês – Mn	0,0489	0,0503	-	0,00117
Molibdênio – Mo	<LQ	<LQ	-	0,0157
Sódio – Na	247	235	-	0,0152
Níquel – Ni	<LQ	<LQ	-	0,0212
Fósforo – P	<LQ	<LQ	-	0,0890
Chumbo – Pb	<LQ	<LQ	1,0	0,0652
Enxofre – S	6,99	7,26	-	0,0644
Escândio – Sc	<LQ	<LQ	-	0,000232
Estrôncio – Sr	2,087	2,088	-	0,000145
Titânio – Ti	<LQ	<LQ	-	0,00601
Vanádio – V	0,0399	0,0368	-	0,00711
Ítrio – Y	<LQ	<LQ	-	0,00125
Zinco – Zn	0,00924	0,00722	-	0,00384

LQ – Limite de Quantificação do equipamento utilizado: ICP-OES.

De acordo com as quantidades registradas nota-se que nenhum parâmetro foi superior ao limite permitido, classificando assim a escória de aciaria LD como resíduo Classe II (Não Perigoso). Este mesmo diagnóstico foi válido também para a duplicata do ensaio.

4.1.4.2 Ensaio de Solubilização

Os resíduos são caracterizados como inertes ou não por meio deste ensaio, seguindo o método constante na NBR 10006 (ABNT, 2004) e a listagem de teores de poluentes no extrato solubilizado, no Anexo G da NBR 10004 (ABNT, 2004). Os resultados do teste de solubilização para parâmetros inorgânicos estão indicados na Tabela 4.19 para a amostra de escória de aciaria.

Tabela 4.19: Solubilização para parâmetros inorgânicos para escória de aciaria recém produzida.

Parâmetros	Concentração no Resíduo Solubilizado da escória recém produzida	Concentração no Resíduo Solubilizado da escória - DUPLICATA	Limites da Norma NBR10004 (ABNT, 2004)	Limite de Quantif.- LQ
	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
Alumínio - Al	0,352	0,395	0,2	0,00951
Arsênio - As	<LQ	<LQ	0,01	0,103
Bário – Ba	0,443	0,472	0,7	0,000348
Berílio - Be	<LQ	<LQ	-	0,000529
Cálcio - Ca	473	461	-	0,0130
Cádmio - Cd	<LQ	<LQ	0,005	0,00474
Cobalto - Co	<LQ	<LQ	-	0,0088
Cromo - Cr	<LQ	<LQ	0,05	0,0129
Cobre - Cu	<LQ	<LQ	2,0	0,003
Ferro – Fe	<LQ	<LQ	0,3	0,00798
Potássio - K	2,62	2,60	-	0,0716
Lítio – Li	<LQ	<LQ	-	0,000552
Magnésio - Mg	<LQ	<LQ	-	0,00155
Manganês - Mn	<LQ	<LQ	0,1	0,00117
Molibdênio - Mo	<LQ	<LQ	-	0,0157
Sódio - Na	20,6	22,8	200,0	0,0152
Níquel - Ni	<LQ	<LQ	-	0,0212
Fósforo - P	<LQ	<LQ	-	0,0890
Chumbo - Pb	<LQ	<LQ	0,01	0,0652
Enxofre - S	6,41	6,12	-	0,0644
Escândio - Sc	<LQ	<LQ	-	0,000232
Estrôncio - Sr	0,585	0,509	-	0,000145
Titânio - Ti	<LQ	<LQ	-	0,00601
Vanádio - V	<LQ	<LQ	-	0,00711
Ítrio – Y	<LQ	<LQ	-	0,00125
Zinco – Zn	0,0192	0,0206	5,0	0,00384

LQ – Limite de Quantificação do equipamento utilizado: ICP-OES

De acordo com as quantidades registradas nota-se que o teor do elemento Alumínio ultrapassou o limite permitido, classificando assim a escória de aciaria LD como resíduo Classe II-A (Não Perigoso e Não Inerte). Este mesmo diagnóstico foi válido também para a duplicata do ensaio.

4.1.5 Avaliação da condutividade e da expansibilidade

4.1.5.1 Condutividade Elétrica

A condutividade indica o grau de sais ou outros compostos em solução. Em água doce, relaciona-se principalmente com as concentrações de íons determinantes de salinidade, que são cálcio, magnésio, sódio, potássio, carbonatos, sulfatos e cloreto. Como exemplo a água potável, apresenta condutividade entre 20 e 70 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (FATMA, 2007). O resultado para escória de aciaria LD no primeiro dia de ensaio foi da ordem de aproximadamente 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sendo que antes mesmo do final do ciclo de 90 dias, esse valor reduziu significativamente, mostrando que dentro de 25 dias diminuiu até atingir a condutividade da água potável e 90% do seu valor inicial. Essa evolução é apresentada no gráfico da Figura 4.7. O pH manteve-se sempre básico da ordem de 10 e 11.

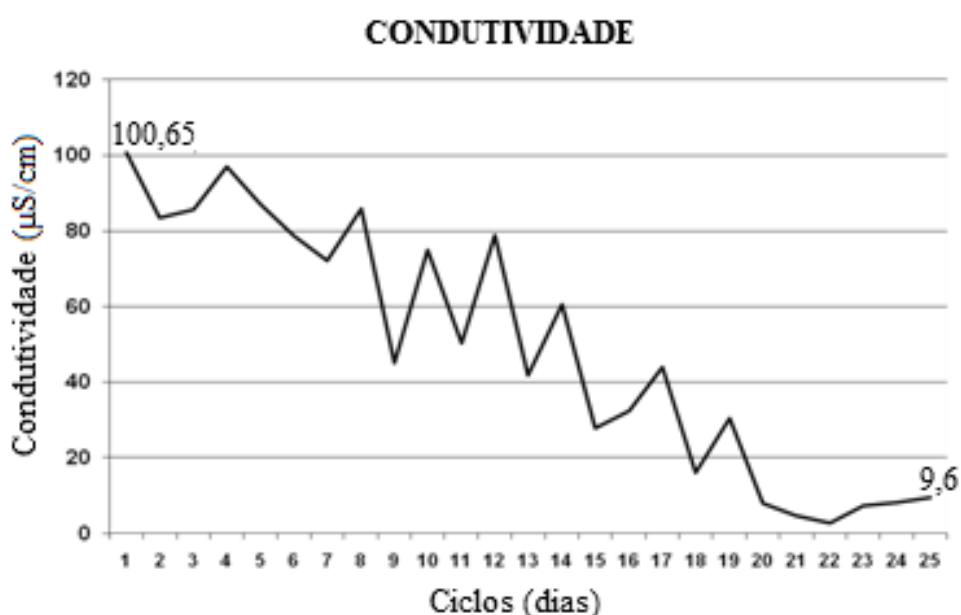


Figura 4.7: Gráfico de Condutividade.

Esse resultado vem reforçar que a escória necessita de estabilização química para corrigir sua expansão e consequentemente geração de finos, que influencia na sua condutividade, como confirmado pela hidratação deste ensaio.

4.1.5.2 Avaliação de Expansibilidade - PTM 130/78

Os resultados do ensaio em conformidade com o método DMA-1 (DER-MG, 1992) estão apresentados na Tabela 4.20 e no gráfico da Figura 4.8 com o monitoramento para PTM-130/78.

Tabela 4.20: Monitoramento da expansão pelo método DMA-1 (DER-MG, 1992).

Monitoramento (dias)	Expansão (%)	Monitoramento (dias)	Expansão (%)
0	0,05	8	3,09
1	0,05	9	3,41
2	0,07	10	3,78
3	0,19	11	4,14
4	0,92	12	4,54
5	2,11	13	4,89
6	2,85	14	5,09
7	0,05	Total	5,89

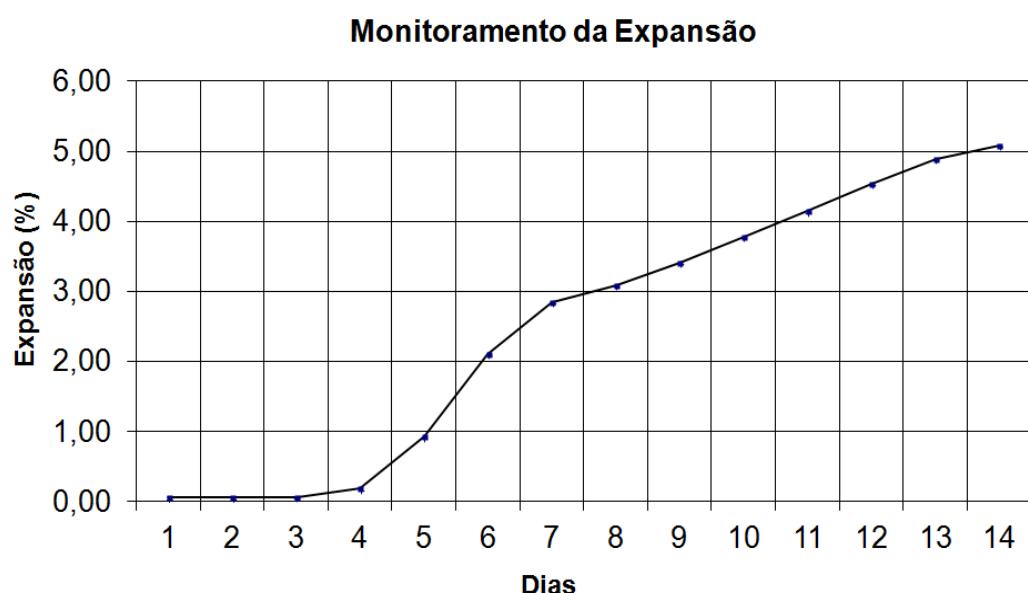


Figura 4.8: Monitoramento do ensaio de PTM-130/78 para escória de aciaria.

Nota-se que a escória recém produzida inicia com um volume e submetida aos procedimentos do ensaio começa a apresentar expansão significativa logo no 3º dia e a partir daí aumenta constantemente até os 14 dias de teste, finalizando com 5,09% de expansão. Este comportamento revela um obstáculo para o credenciamento do coproduto como lastro ferroviário.

Com a análise geral de toda a caracterização feita para a escória de aciaria LD recém produzida neste estudo, conclui-se que a mesma depende somente do parâmetro de expansão para comprovar sua total viabilidade para a aplicação proposta.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS ADICIONADOS À ESCÓRIA

4.2.1 Caracterização física

As distribuições granulométricas dos materiais adicionados à escória foram obtidas de ensaios a laser através do equipamento Particle Size Analyzer CILAS 1064 da UFOP e são detalhados e discutidos na sequência. As Figuras 4.9 a 4.13 apresentam os gráficos das distribuições granulométricas de cada um dos materiais.

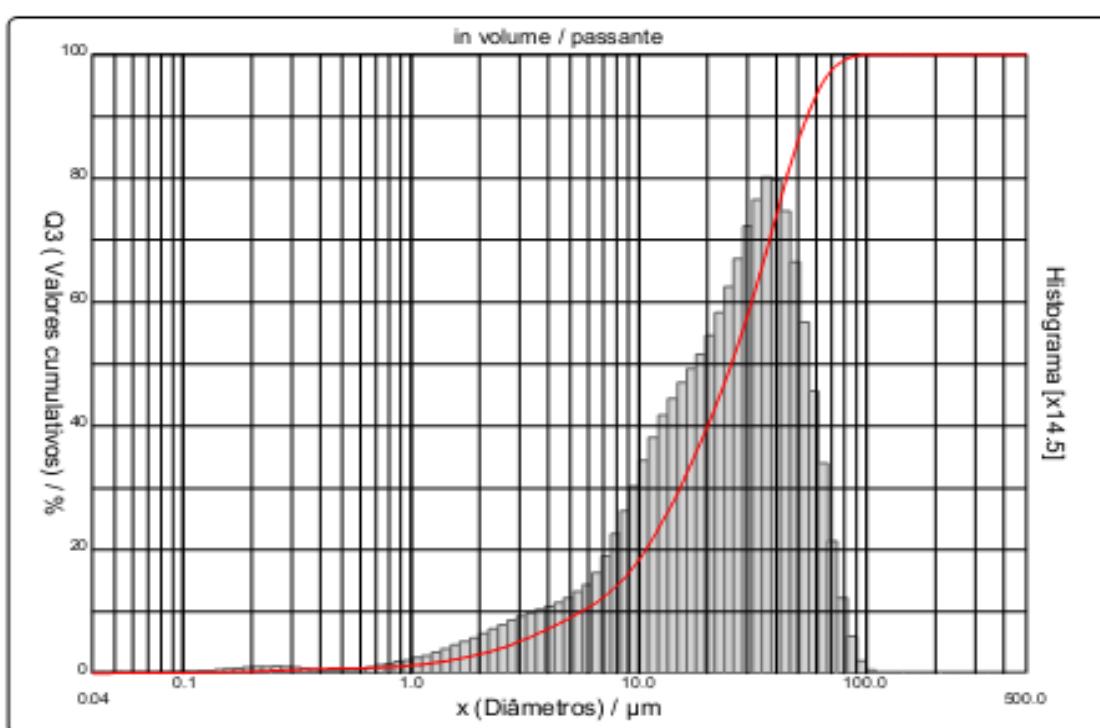


Figura 4.9: Gráfico do enquadramento granulométrico da areia.

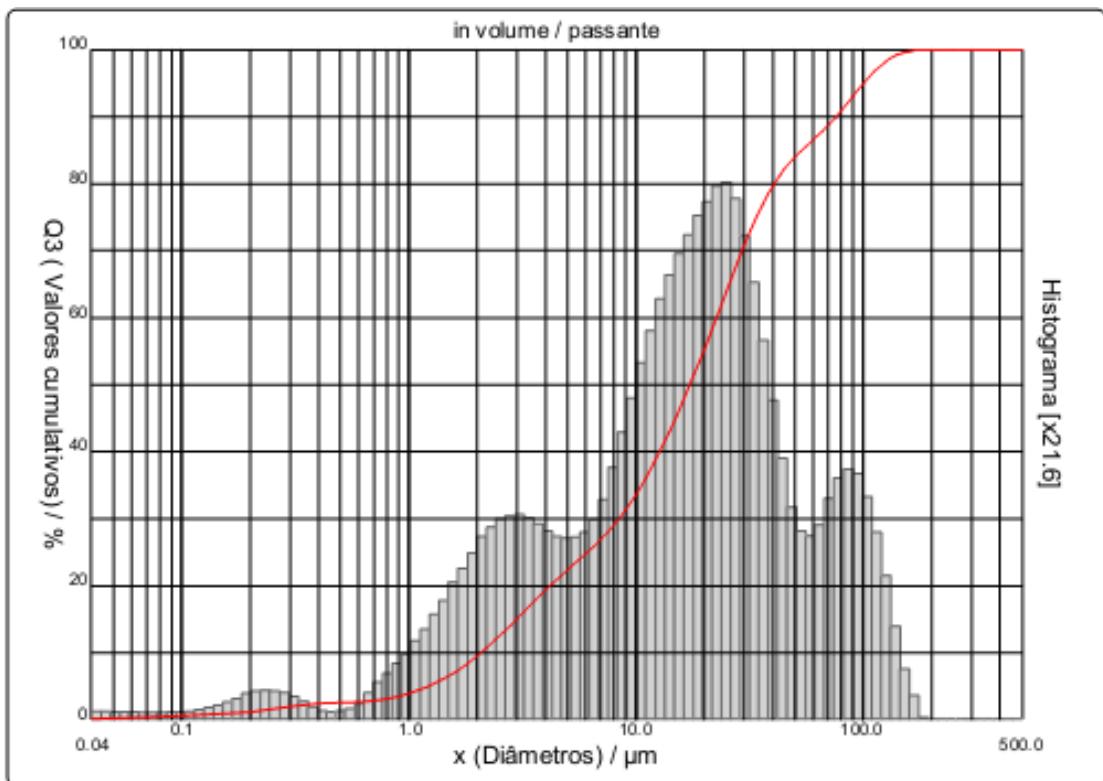


Figura 4.10: Gráfico do enquadramento granulométrico da argila.

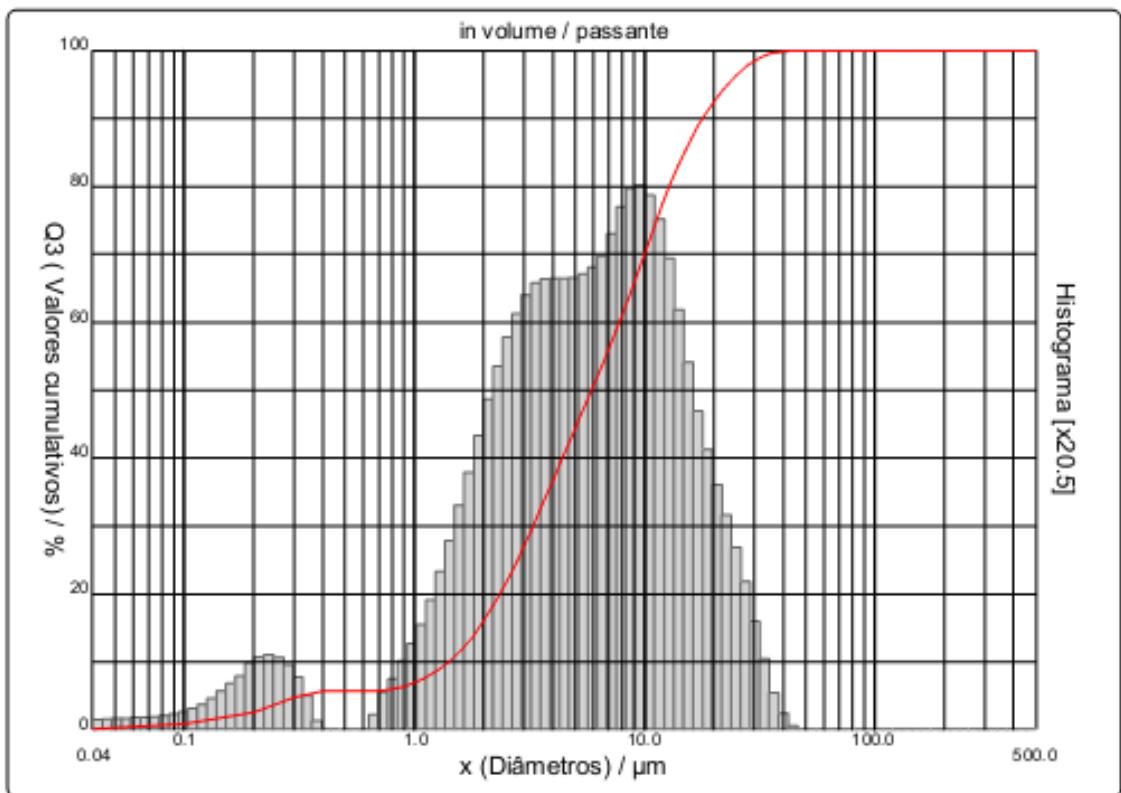


Figura 4.11: Gráfico do enquadramento granulométrico da bentonita.

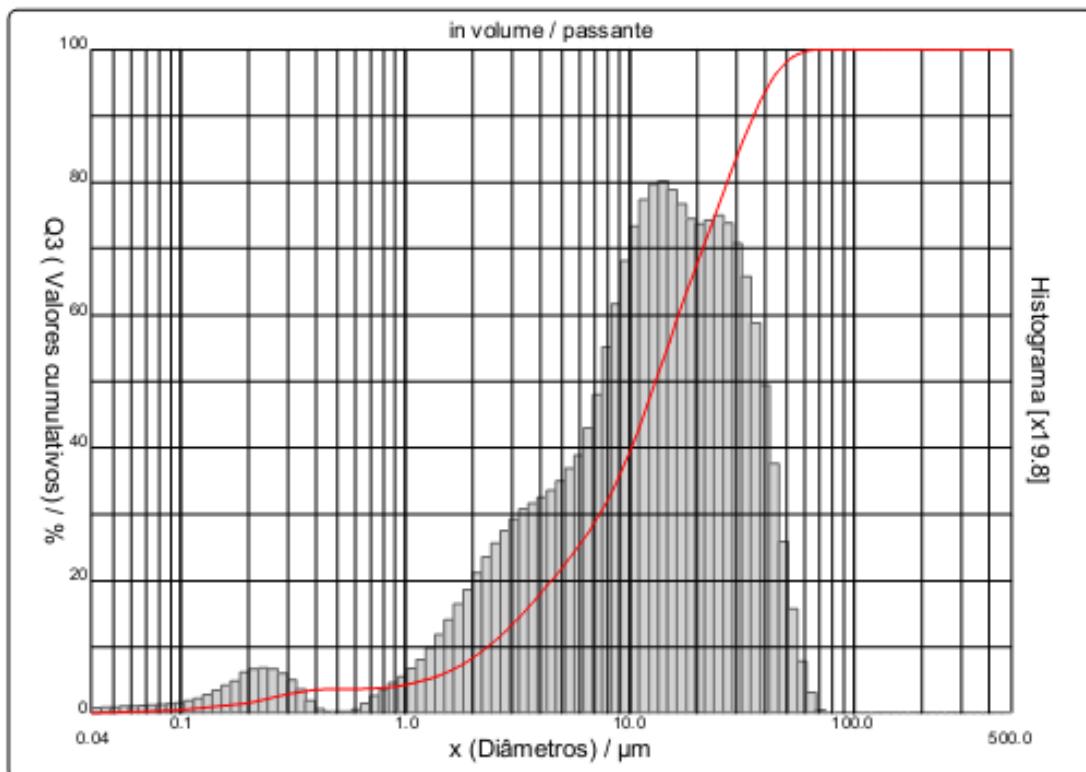


Figura 4.12: Gráfico do enquadramento granulométrico da Lama 1 - ETED.

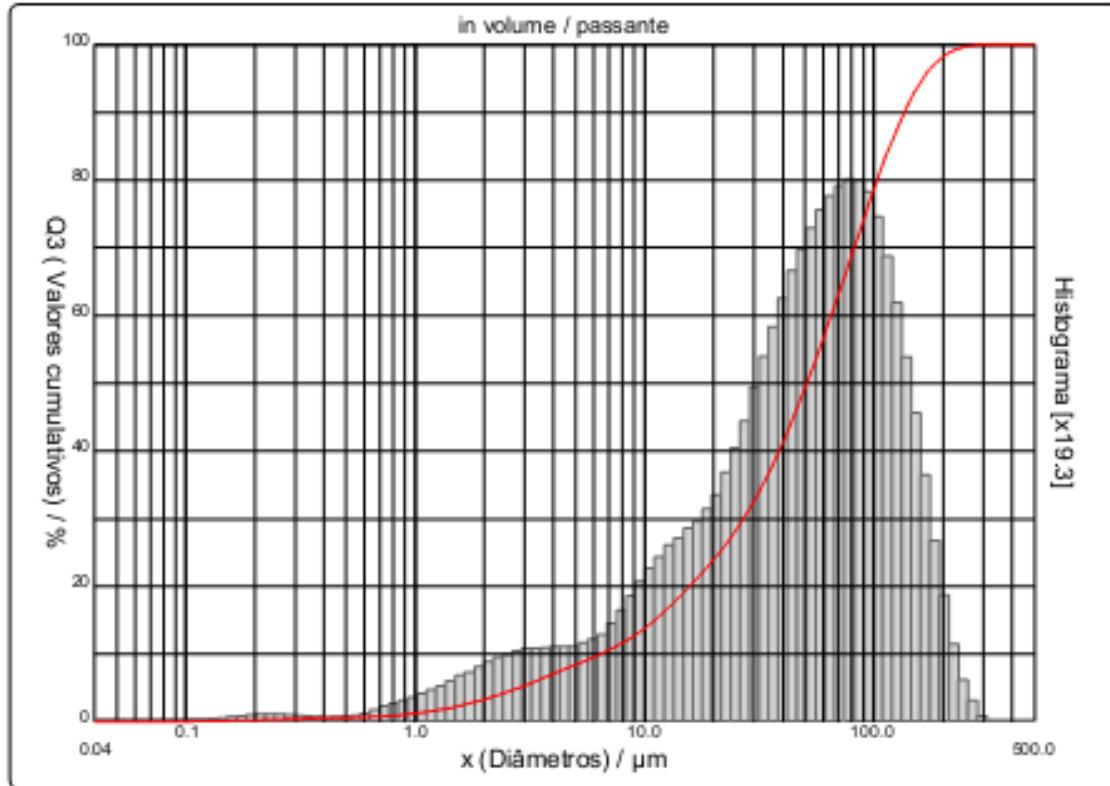


Figura 4.13: Gráfico do enquadramento granulométrico da Lama 2 - ETA V.

Após os ensaios foram obtidos os parâmetros característicos como o coeficiente de não uniformidade e o de curvatura, dimensão máxima característica e diâmetro médio, conforme apresentados na Tabela 4.21.

Tabela 4.21: Propriedades geométricas obtidas a partir da granulometria.

Parâmetro	Areia	Argila	Bentonita	Lama 1 ETED	Lama 2 ETAV
D ₁₀ (μm)	5,9	2,2	1,4	2,4	6,8
D ₃₀ (μm)	27,0	8,1	3,4	7,6	28,0
D ₆₀ (μm)	32,0	24	7,9	17,5	68,0
Diâmetro Máximo Característico – DMC(μm)	300	180	45	71	112
Diâmetro médio (μm)	58,27	27,58	8,04	16,33	52,57
Coeficiente de Não Uniformidade – C _u	5,4	10,9	5,6	7,3	10,0
Coeficiente de Curvatura – C _c	3,86	1,24	1,05	1,37	1,70

Pela análise dos resultados, em geral os materiais possuem granulometria predominantemente fina, observada principalmente pelos histogramas que revelam as distribuições de frequência de tamanhos de grãos, com picos em faixas granulométricas reduzidas. A seguir, são discriminadas as interpretações específicas para cada amostra analisada.

Inicialmente, pelos dados da areia, observa-se um material com diâmetro médio intermediário, cerca de 60μm, e o maior DMC, 300μm, dentre os outros argilominerais. Pela sua curva granulométrica percebe-se um comportamento mais verticalizado, apontando para uma amostra uniforme e com a maioria dos grãos compreendidos na faixa de 10 a 100μm. Este comportamento é confirmado pelos coeficientes encontrados, onde C_c maior que 3 indica uma curva uniforme e C_u igual a 5,4, caracteriza um material mais pedregulhoso e portanto uma areia grossa e mal graduada.

Para a argila, nota-se um diâmetro médio próximo da areia, mas o DMC bem menor, 180μm, portanto um material fino. Sua curva granulométrica apresenta comportamento abatido com grande intervalo de variação de diâmetros e contínua.

Este comportamento é confirmado pelos coeficientes encontrados, onde C_c igual a 1,24 indica uma curva aberta e C_u igual a 10,9, caracteriza um material bem graduado.

A bentonita é o material de menor granulometria, comprovado pelo seu DMC de 45 μm e diâmetro médio de 8 μm . Sua curva granulométrica mostra uma conduta inicialmente descontínua, indicando que há falta de grãos na faixa de 0,4 a 0,7 μm de diâmetro. Após esse patamar a curva segue contínua e levemente abatida. Esse comportamento, juntamente com os valores dos coeficientes ($C_u = 5,6$ e $C_c=1,24$), apontam a bentonita ainda como um material bem graduado.

Quanto as lamas, a Lama 1 – ETED, se aproxima do resultado da bentonita, em termos de curva e coeficientes, portanto uma amostra fina e bem graduada. Já a Lama 2 – ETAV tem a curva granulométrica mais abatida dentre os materiais, os coeficientes mais expressivos e, portanto a amostra de melhor graduação.

Comparativamente, as argilas e lamas têm muita semelhança entre os parâmetros analisados, aproximando-se em comportamento geotécnico. A partir dos resultados alcançados observa-se que os materiais escolhidos para adição à escória de aciaria, são compatíveis granulometricamente para este tipo de mistura por meio de fusão.

4.2.2 Caracterização química

4.2.2.1 Análise Química Quantitativa por Digestão Ácida – Savillex

A partir do ensaio de Digestão Ácida obteve-se a seguinte composição química em porcentagem de óxidos dos materiais estudados na adição à escória, conforme Tabela 4.22.

Tabela 4.22: Composição química dos materiais adicionados à escória de aciaria LD.

Amostra	ESPÉCIES QUÍMICAS (% em massa)										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	FeO	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	S	Ti
AREIA	71,58	16,46	0,68	6,03	1,98	0,94	0,10	0,63	0,08	-	1,26
ARGILA	56,04	23,88	0,06	15,18	0,87	0,16	0,15	0,05	0,15	-	3,24
BENTONITA	53,20	12,20	12,04	12,95	0,72	4,91	1,16	1,26	0,40	0,20	0,75
LAMA 1 – ETED	36,92	17,67	18,76	17,34	0,56	4,89	1,75	0,23	0,65	0,35	0,66
LAMA 2 – ETAV	17,39	2,38	38,79	24,51	0,28	10,40	3,41	0,25	1,14	0,71	0,43

Observa-se que os teores do óxido de cálcio são bem menores que na escória, exceto para a Lama 2 – ETAV, e no geral os valores de sílica são elevados em comparação também à escória.

Outra ressalva para as quantidades de óxidos de alumínio e ferro que são consideráveis, enquanto os óxidos de manganês e magnésio são bem inferiores aos da escória.

Essas observações serão discutidas com os resultados químicos obtidos para as misturas finalizadas ou produtos.

4.2.2.2 Adsorção de Nitrogênio

Na Adsorção de Nitrogênio as amostras foram submetidas à temperatura de -196°C, segundo a técnica BET, para se caracterizar os parâmetros intrínsecos de porosidade e superfície específica.

Foram obtidas também as correspondentes isotermas de adsorção e dessorção os valores de densidade real, conforme Figura 4.14 a 4.18 e a reunião dos resultados na Tabela 4.23.

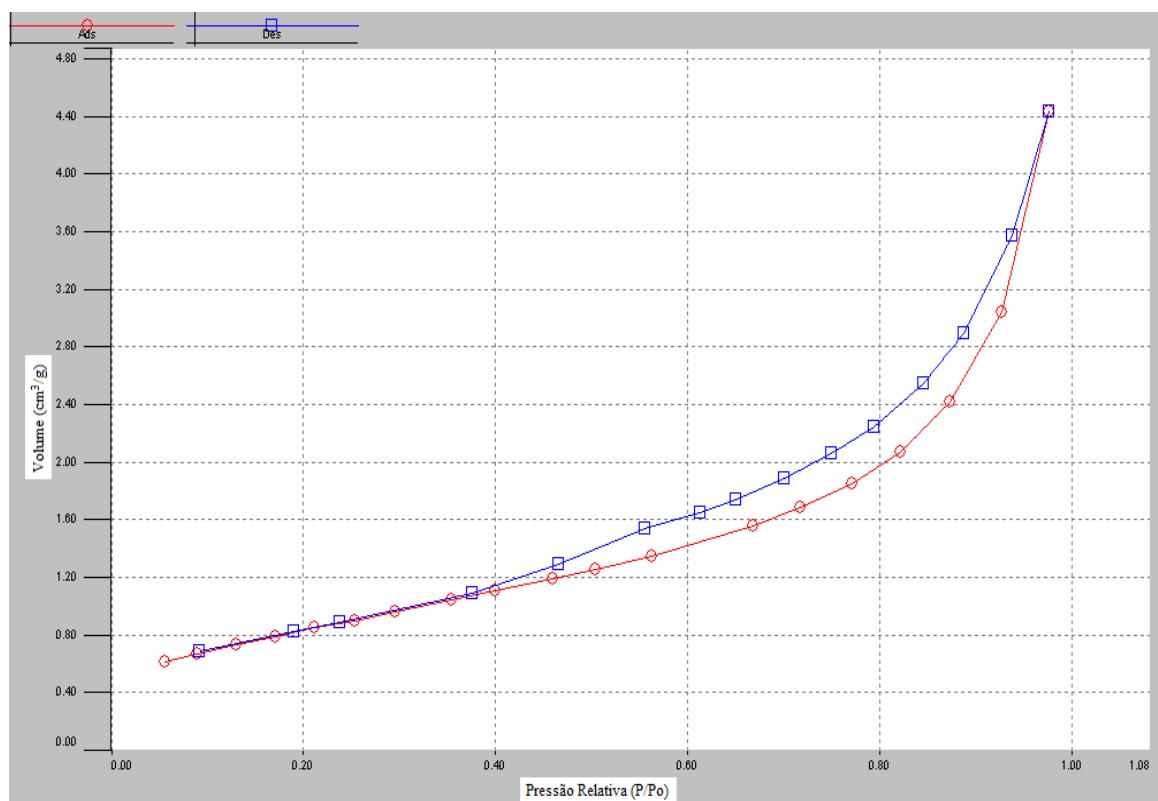


Figura 4.14: Curvas de adsorção e dessorção para areia.

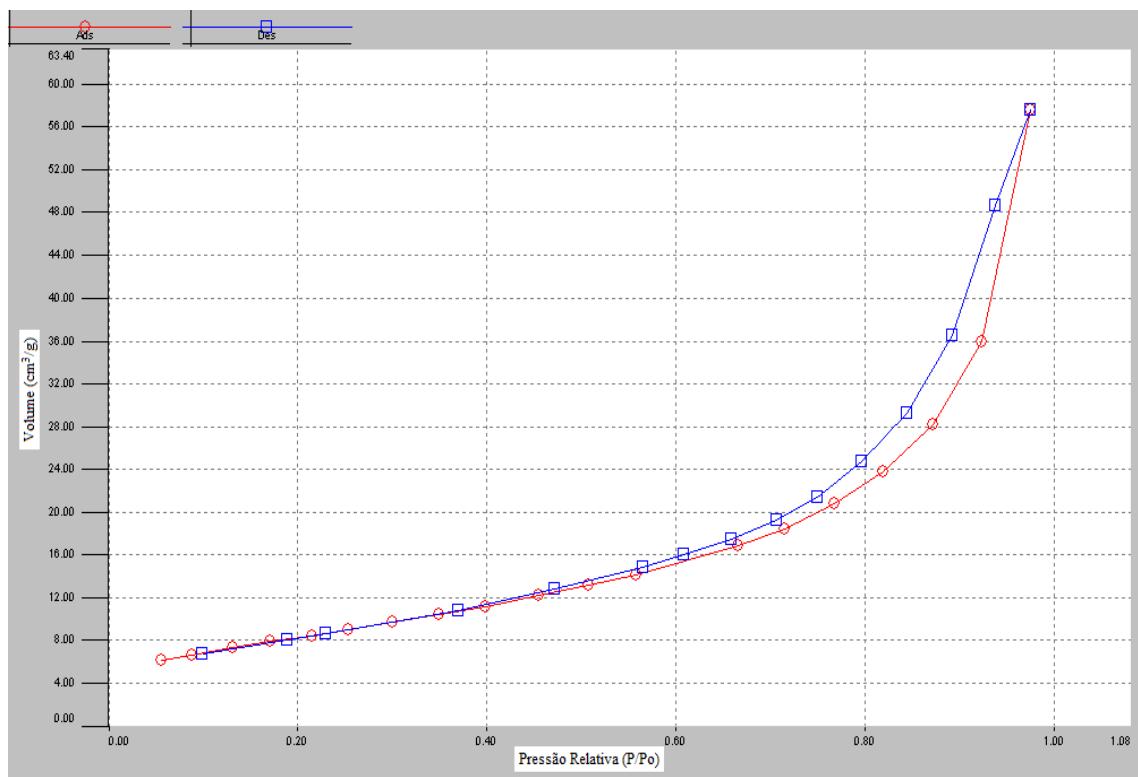


Figura 4.15: Curvas de adsorção e dessorção para argila.

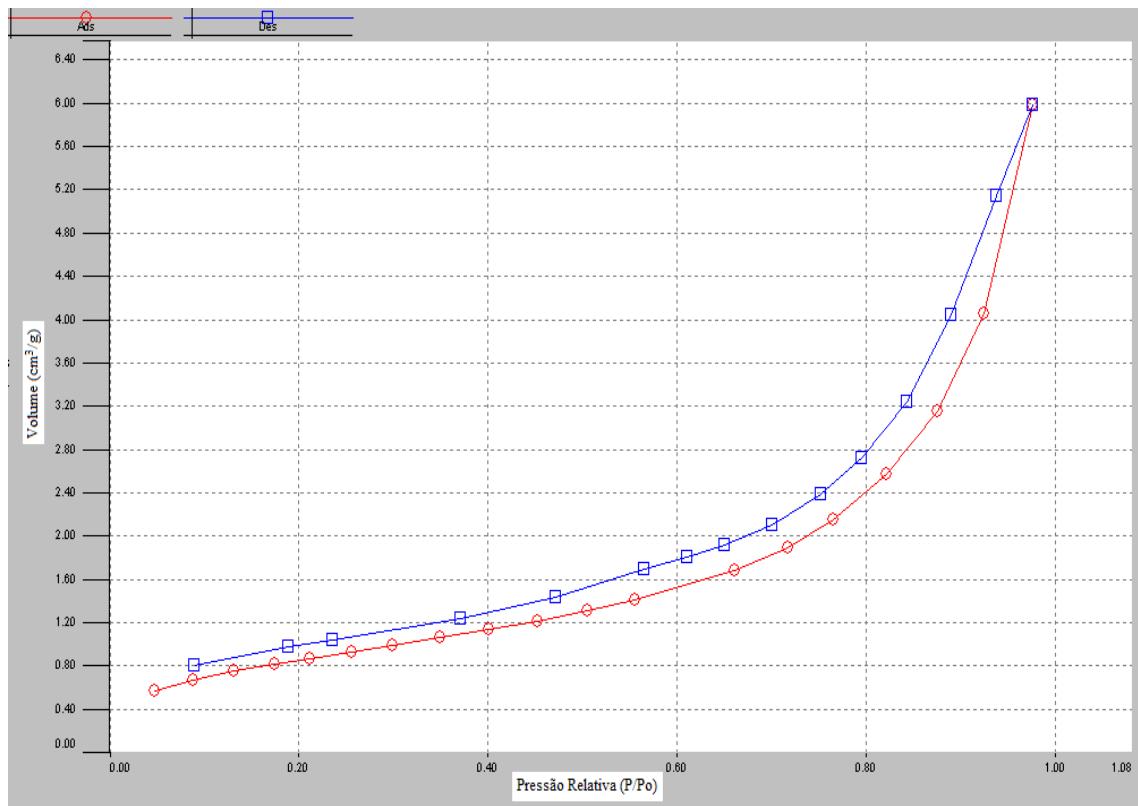


Figura 4.16: Curvas de adsorção e dessorção para bentonita.

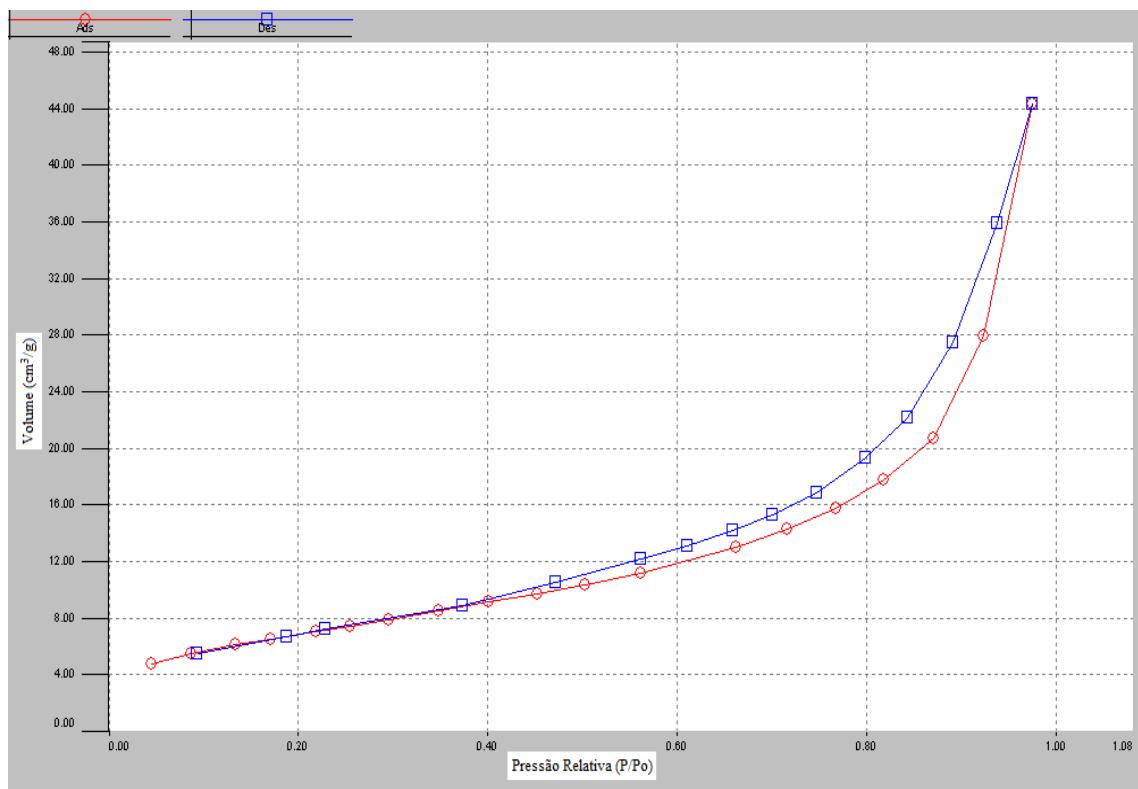


Figura 4.17: Curvas de adsorção e dessorção para Lama 1 - ETED.

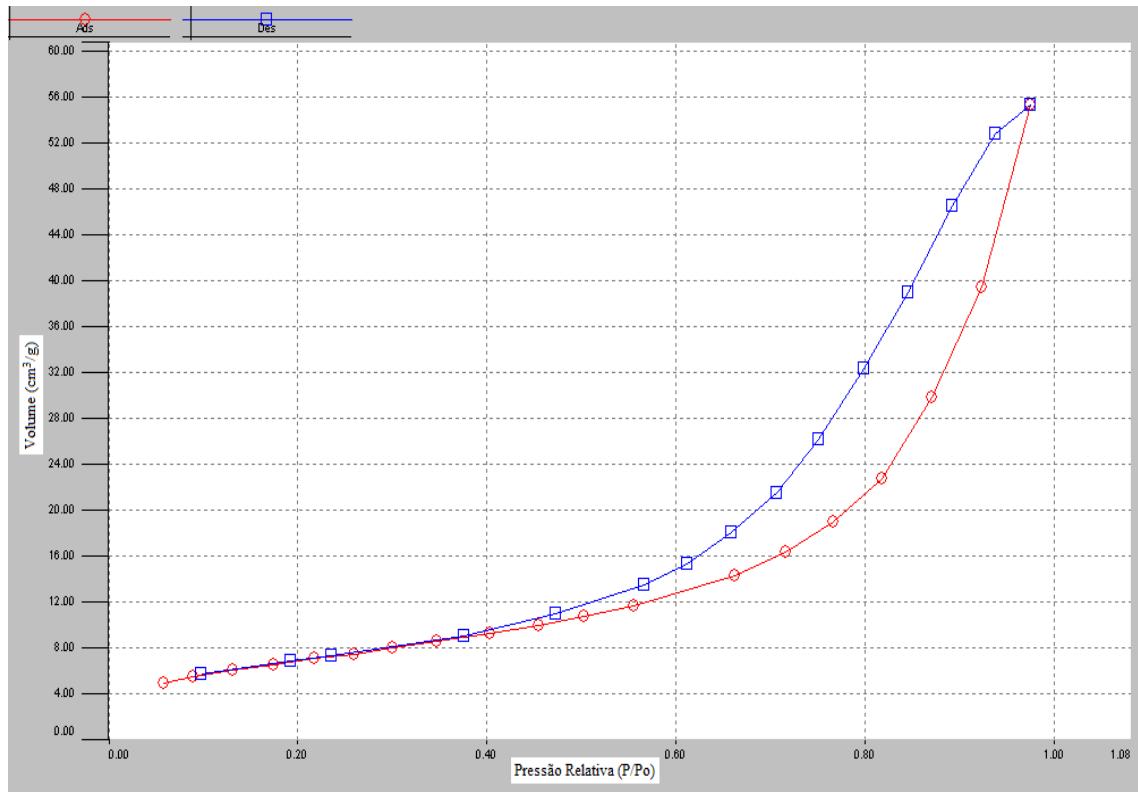


Figura 4.18: Curvas de adsorção e dessorção para Lama 2 - ETAV.

Tabela 4.23: Resultados do ensaio de adsorção de nitrogênio nos materiais adicionados à escória.

Parâmetros	Areia	Argila	Bentonita	Lama 1 - ETED	Lama 2 - ETAV
Densidade (g/cm ³)	2,568	2,57	2,182	2,278	1,716
Superfície Específica BET (m ² /g)	3,036	30,51	73,136	25,075	25,144
Volume de Microporos (cm ³ /g)	0,00200	0,0160	0,00223	0,0130	0,01300
Área de Microporos (m ² /g)	4,335	43,68	4,479	35,528	36,507
Tamanho Médio dos Microporos (nm)	19,888	20,25	20,578	19,675	21,094
Volume Total de Poros (cm ³ /kg)	6,86 x 10 ⁻²	8,91 x 10 ⁻²	9,26 x 10 ⁻³	6,86 x 10 ⁻²	8,55 x 10 ⁻²
Diâmetro Máximo dos Poros (A)	412,70	395,7	403,5	397,7	397,90
Diâmetro Médio dos Poros (A)	45,2	58,4	59,1	54,7	68,0
Coef. de Correlação	0,99997	0,999958	0,999997	0,999961	0,999935

Assim como para a escória, o resultado final do ensaio é a superfície específica e possui o seu valor válido já que a equação BET estabelece uma relação linear para pressões relativas P/P₀ até 0,35. Nestes casos os valores das superfícies específicas, também estabelecidos em função da área total da película formada pelo nitrogênio dividida pela massa da amostra analisada, são bem diferentes do valor encontrado para escória. Como se pode observar a superfície específica mais elevada corresponde a bentonita, com 73 m²/g, seguida pela argila comum e as duas lamas, da ordem de 30 m²/g, enquanto a areia apresenta 3 m²/g. Valores esses dentro das faixas esperadas, por exemplo para a bentonita , com argilas do grupo das esmectitas (LIMA *et al.*, 2012).

A forma das isotermas é correlacionada diretamente com o tamanho médio de poros e a interação adsorvente-adsorvato.

De forma geral as isotermas apresentadas, se enquadram na classificação II da IUPAC, revelando um sólido não poroso ou mesmo a existência de macroporos não interligados na estrutura dos materiais. Este comportamento é comum para amostras de granulometria muito fina como a das argilas, somente fugindo a regra o resultado da areia que mantém na classe IV, com mesoporos característicos.

As histereses prevalecem inclinadas como do tipo H3, indicativa da presença de poros em forma de cunhas, fendas ou placas paralelas, com exceção da Lama 2 – ETAV, que se enquadra no tipo H1, cujos poros são regulares, de formato cilíndrico.

A Figura 4.19 apresenta a relação do volume total de poros x densidades dos materiais estudados, inclusive a escória, no qual um parâmetro é inversamente proporcional ao outro, corroborando a tendência de aumento de resistência em termos de materiais menos porosos e mais densos, ou seja, um indicativo de melhores relações entre escória com areia ou bentonita.

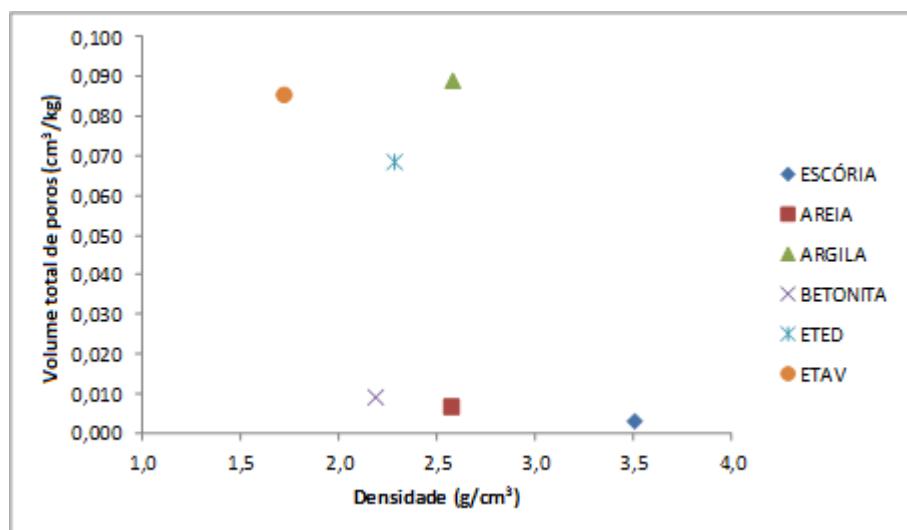


Figura 4.19: Correlação entre a porosidade e densidade dos materiais.

4.2.2.3 Análises de Capacidade de Trocas Iônicas – CTC e CTA

No ensaio de Capacidade de Trocas Iônicas – CTC e CTA os resultados apresentados pelas análises dos materiais estão indicados na Tabela 4.24.

Tabela 4.24: Resultado da análise de capacidade de trocas iônicas.

Amostra	CTC (cmol/Kg)	CTA (cmol/ Kg)
Areia	1,35	0,2
Argila	4,05	0,27
Bentonita	17,9	0,69
Lama 1 - ETED	3,59	1,29
Lama 2 - ETAV	5,12	0,76

Nota: CTC = Capacidade de troca catiônica, CTA = Capacidade de troca aniônica.

A partir dos resultados obtidos pelas análises dos argilominerais utilizados observa-se que a Bentonita apresenta os maiores índices de CTC, tornando-se, portanto, o solo de maior capacidade de adsorção de cátions dentre os analisados. Dos demais materiais, a Lama 2 tem maior expressão quanto a CTC.

Sabe-se que quanto maior a CTC, maior a adsorção de cátions básicos como o cálcio, magnésio e o potássio. Devido à formação de cargas variáveis nos latossolos, é esperado um aumento da CTC nestes com a adição de materiais corretivos, como, por exemplo, a escória, com a transferência de íons básicos (Ca, Mg, Na e K) da segunda para o primeiro.

Como a CTA está intimamente relacionada à retenção de ânions e os índices encontrados foram baixos, espera-se um resultado pouco expressivo na redução destes quando em mistura com outros materiais.

Ressalta-se a importância da verificação de quais elementos estão associados às cargas do solo, pois esses podem causar interferência na troca iônica com outros materiais a serem misturados na amostra, salientando que a CTC se mantém naturalmente carregada de vários íons.

4.2.2.4 Teor de Cal Livre

O ensaio para Determinação do Teor de Cal livre, feito em triplicata, forneceu as porcentagens médias dos teores de cal livre resumidas na Tabela 4.25.

Tabela 4.25: Médias dos resultados do ensaio de cal livre.

Amostra	Teor de CaO livre (%)*
Areia	0,11
Argila	0,14
Bentonita	0,08
Lama 1 – ETED	0,06
Lama 2 - ETAV	0,14

*média da triplicata.

Como mostram os resultados, para todos os materiais adicionados à escória, o teor de cal livre é muito baixo ou mínimo, bem abaixo do limite de 3% permitível pela norma, não contribuindo com um aumento significativo após as misturas.

4.2.2.5 Termogravimetria

No ensaio de Termogravimetria, baseado nas modificações de peso que ocorrem durante o aquecimento dos materiais, cujas Figuras 4.20 a 4.24 apresentam as termoanálises obtidas pelas curvas de termogravimetria (TG/DTG) para as amostras dos materiais adicionados à escória de aciaria LD.

Conforme mencionado no resultado do mesmo ensaio para a escória de aciaria recém produzida, os cálculos estequiométricos do percentual de CaO são análogos, de acordo com os picos de temperatura identificados nas curvas e a Tabela 4.26, ao final dos gráficos, apresenta de forma resumida estes picos ocorridos durante as reações seus respectivos percentuais de perda de massa e faixa de temperatura onde ocorreram. Em seguida são associados os componentes do CaO no intuito de determinar precisamente a parcela livre em cada material.

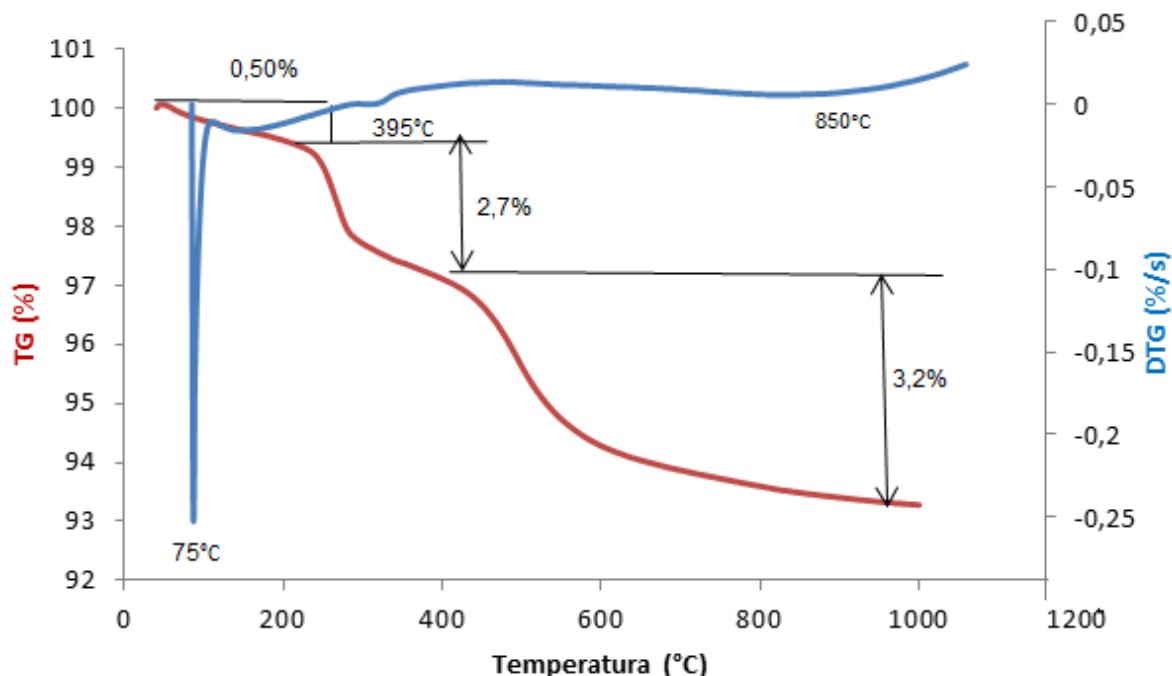


Figura 4.20: Curva de perda de massa do ensaio TG/DTG da areia.

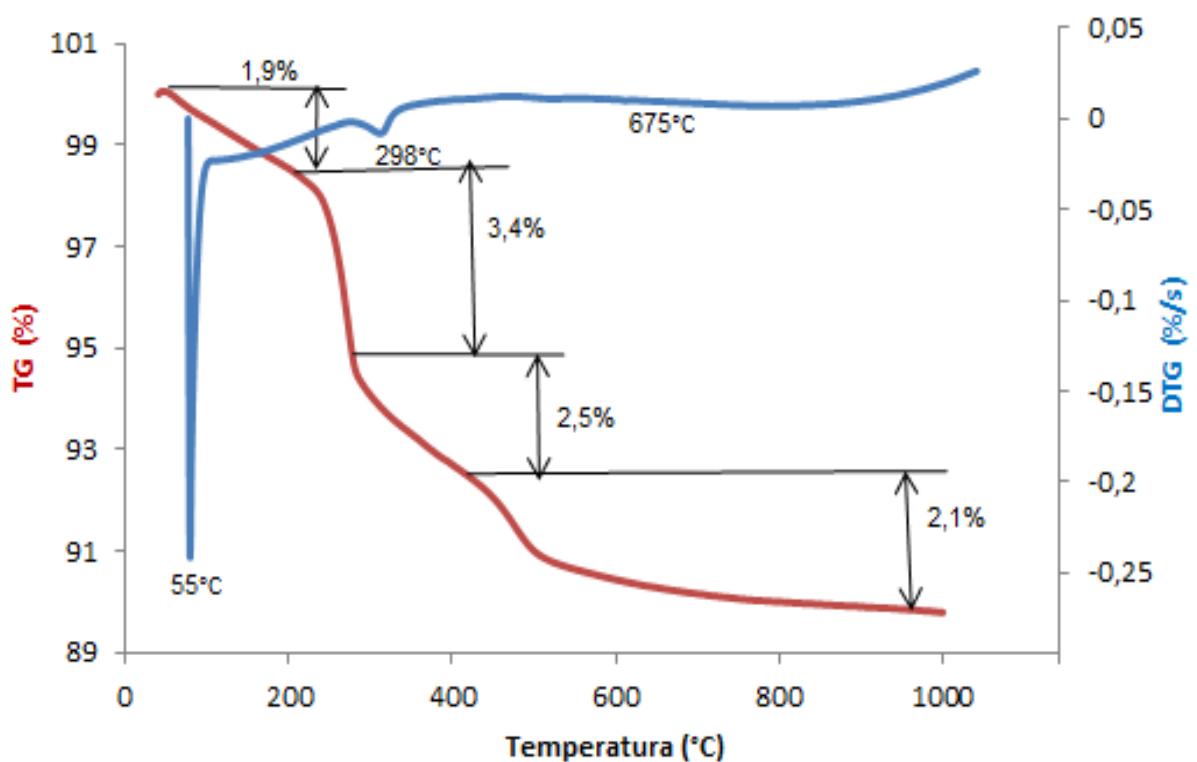


Figura 4.21: Curva de perda de massa do ensaio TG/DTG da argila.

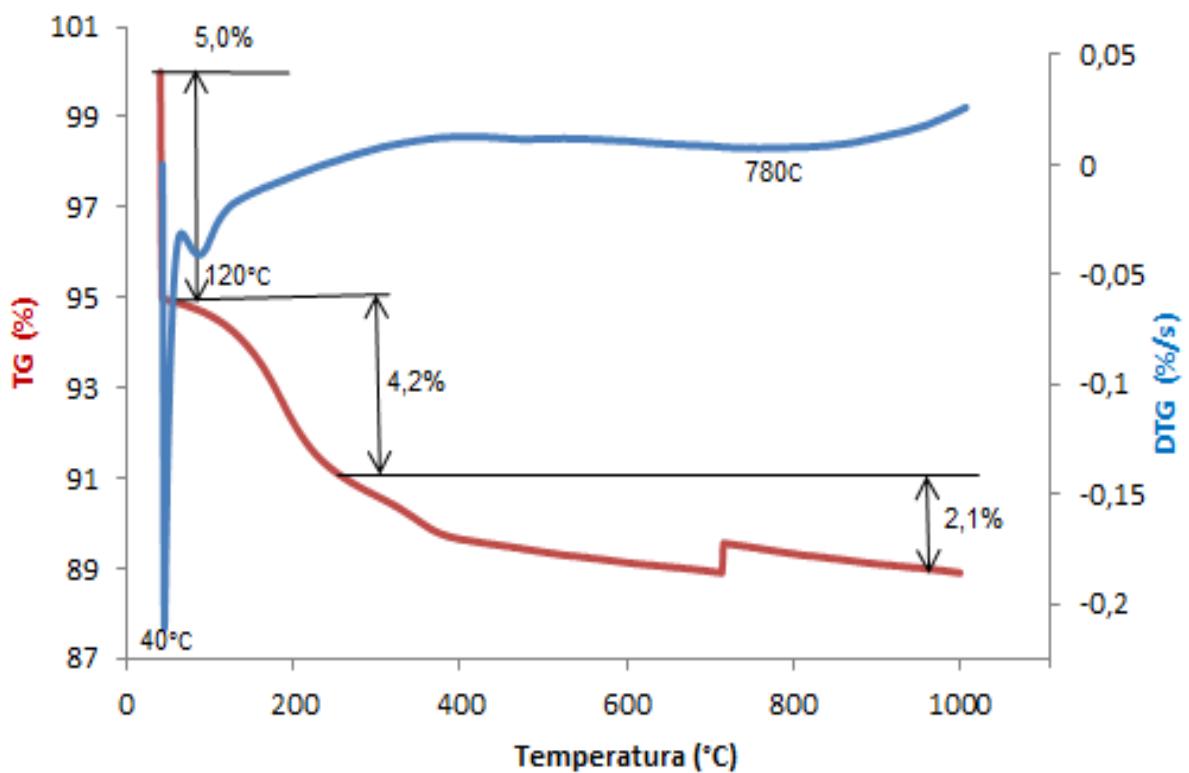


Figura 4.22: Curva de perda de massa do ensaio TG/DTG da bentonita.

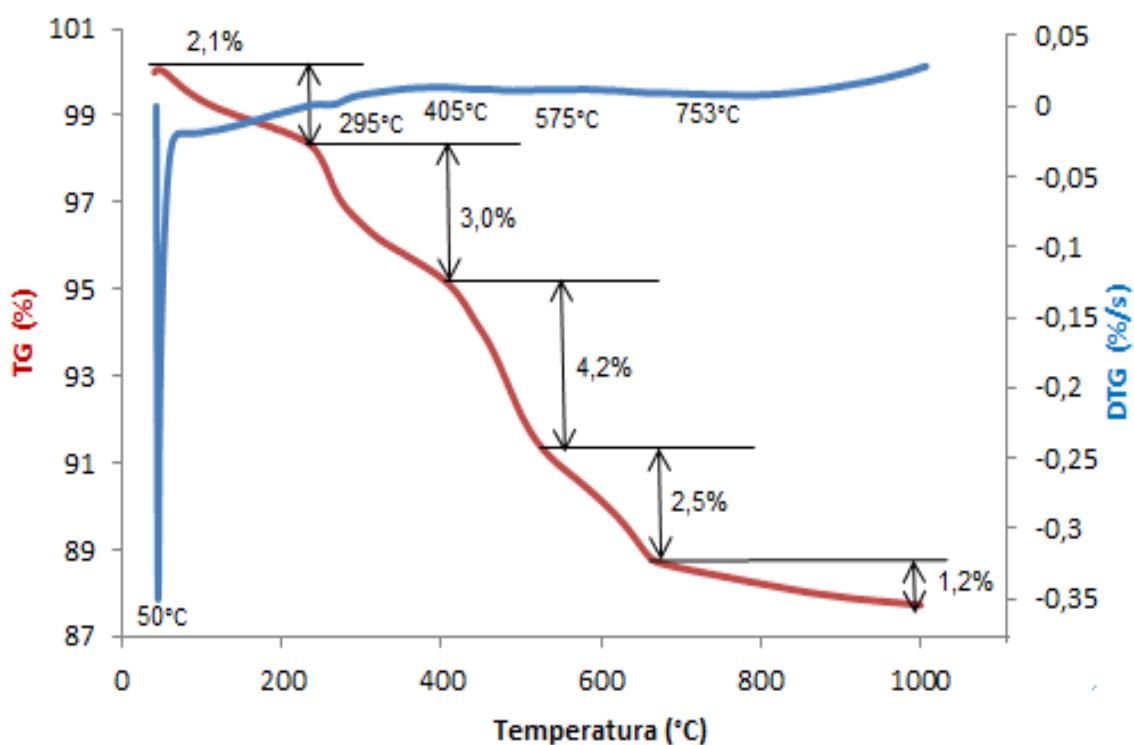


Figura 4.23: Curva de perda de massa do ensaio TG/DTG da lama 1 - ETED.

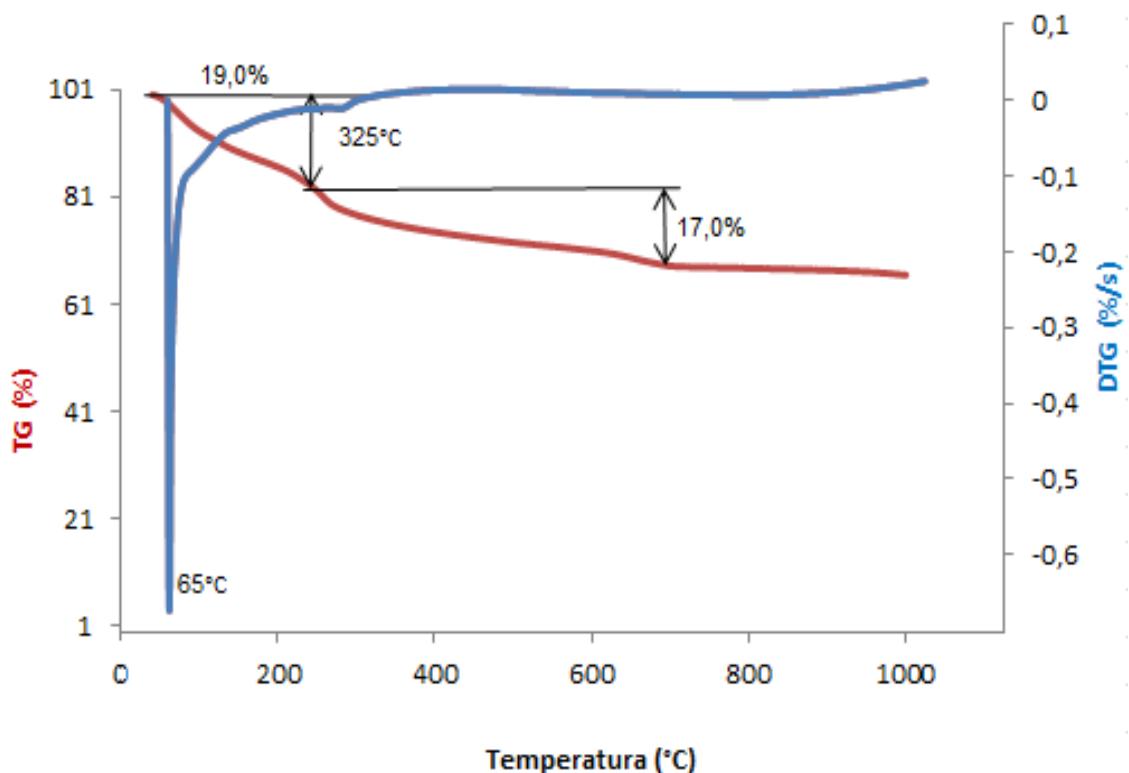


Figura 4.24: Curva de perda de massa do ensaio TG/DTG da lama 2 - ETAV.

Tabela 4.26: Resultados das análises químicas por termogravimetria.

Areia			
Pico	Temperatura do Pico(°C)	Perda de Massa(%)	Faixa de Temperatura (°C)
H ₂ O	75	0,5	40 - 380
Mg(OH) ₂	395	2,7	380 – 650
Outros	850	3,2	650 – 1000
Argila			
Pico	Temperatura do Pico(°C)	Perda de Massa(%)	Faixa de Temperatura (°C)
H ₂ O	55	1,9	40 – 290
Mg(OH) ₂	298	3,4	290 – 650
Outros	675	4,6	650 - 1000
Bentonita			
Pico	Temperatura do Pico(°C)	Perda de Massa(%)	Faixa de Temperatura (°C)
H ₂ O	40	5,0	40 – 100
Mg(OH) ₂	120	4,2	100 – 650
Outros	780	2,1	650 - 1000
Lama 1 – ETED			
Pico	Temperatura do Pico(°C)	Perda de Massa(%)	Faixa de Temperatura (°C)
H ₂ O	50	2,1	40 – 100
Ca(OH) ₂	405	3,0	100 – 380
Outros	575	7,9	380 - 1000
Lama 2 – ETAV			
Pico	Temperatura do Pico(°C)	Perda de Massa(%)	Faixa de Temperatura (°C)
H ₂ O	65	19,0	40 – 100
Mg(OH) ₂	325	17,0	100 – 300
Outros	-	-	-

Conforme os dados da tabela acima, os argilominerais não apresentaram picos de reação para o Ca(OH)₂ de interesse, exceto para a lama ETED, onde o pico de temperatura se encontra na faixa referente ao composto, com perda de massa de 3%. Porém, quanto a outro elemento instabilizante da escória, foi possível perceber pequenos picos de Mg(OH)₂ e destaca-se a lama ETAV, cuja perda de massa foi muito expressiva, de 17%, o que prova ser uma lama muito expansiva.

Esses resultados reafirmam o ensaio de teor de cal livre, que foi reduzido para todos os argilominerais, sendo o propósito deste estudo.

4.2.3 Caracterização mineralógica

Quanto ao ensaio Difração de RX os resultados são apresentados nas Figuras 4.25 a 4.29 que mostram a ocorrência das fases mineralógicas dos padrões difratométricos.

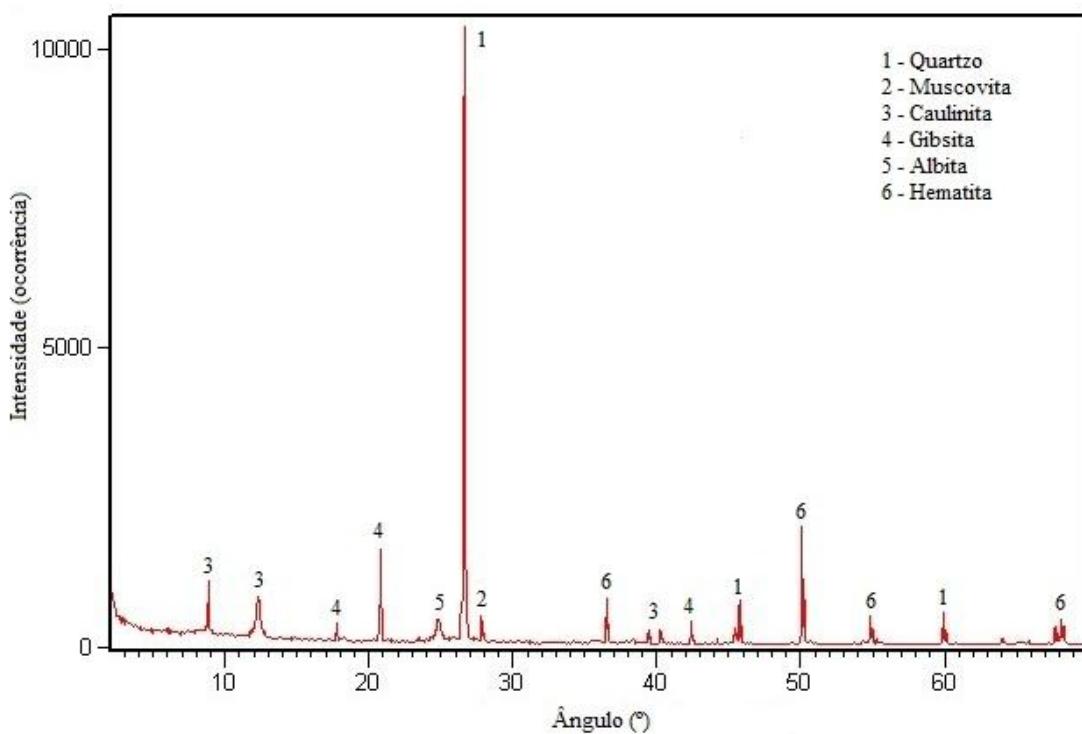


Figura 4.25: Difratograma da amostra de areia.

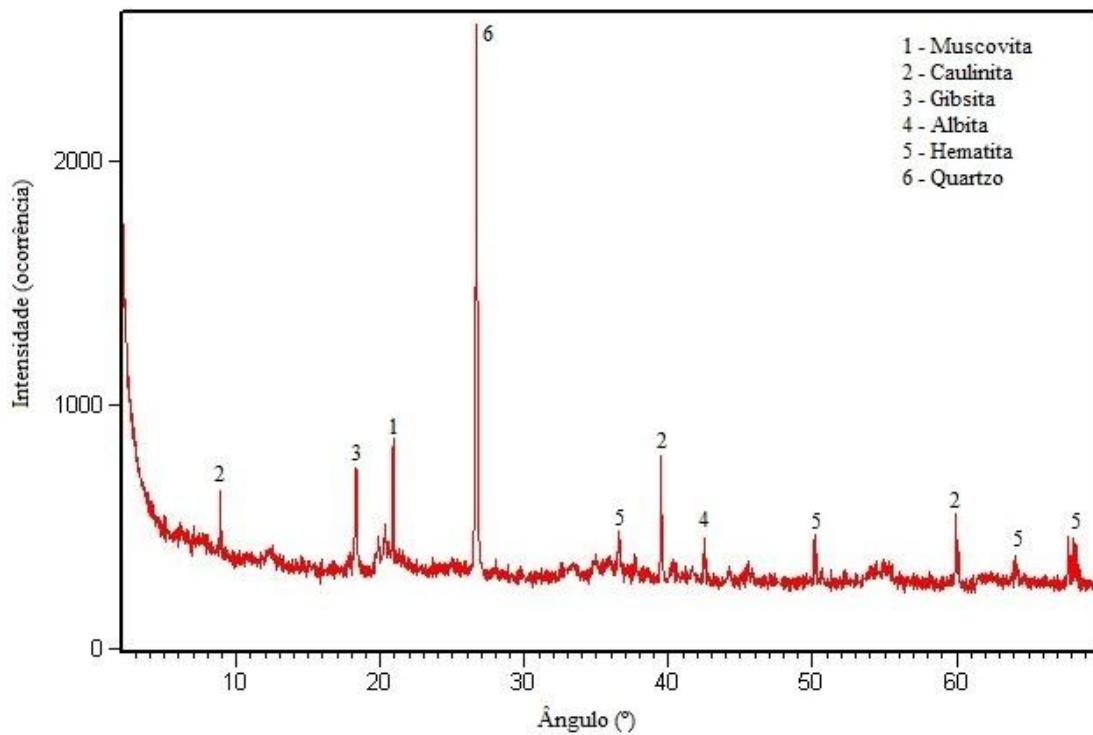


Figura 4.26: Difratograma da amostra de argila.

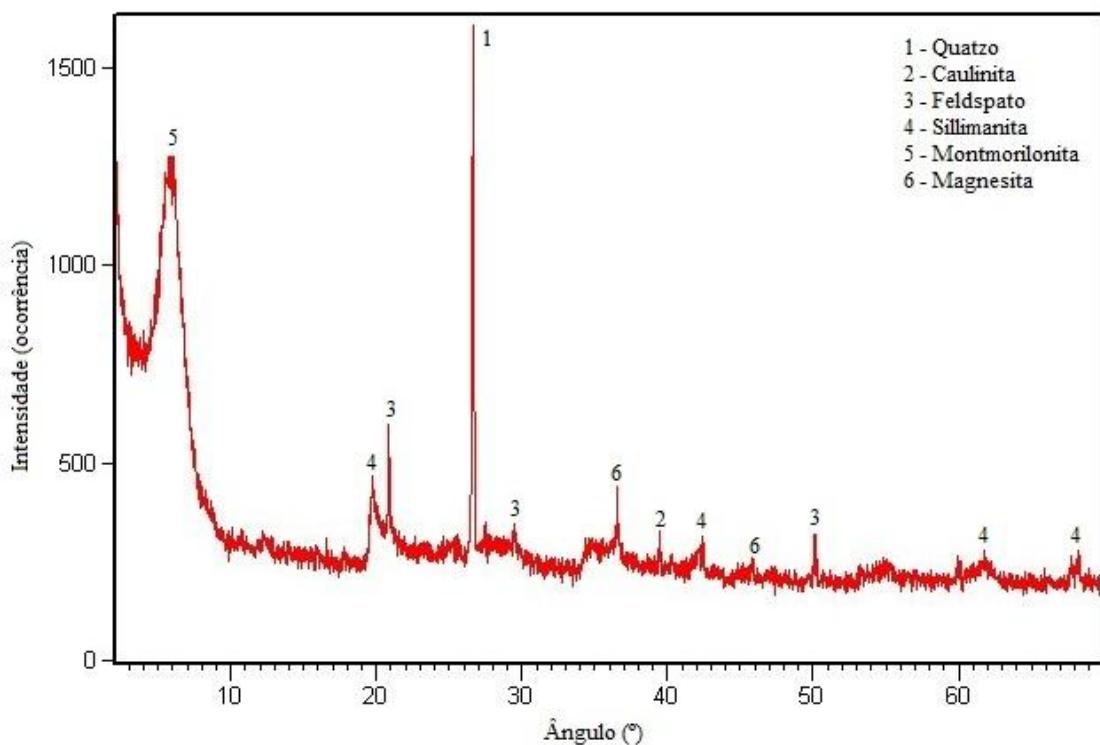


Figura 4.27: Difratograma da amostra de bentonita.

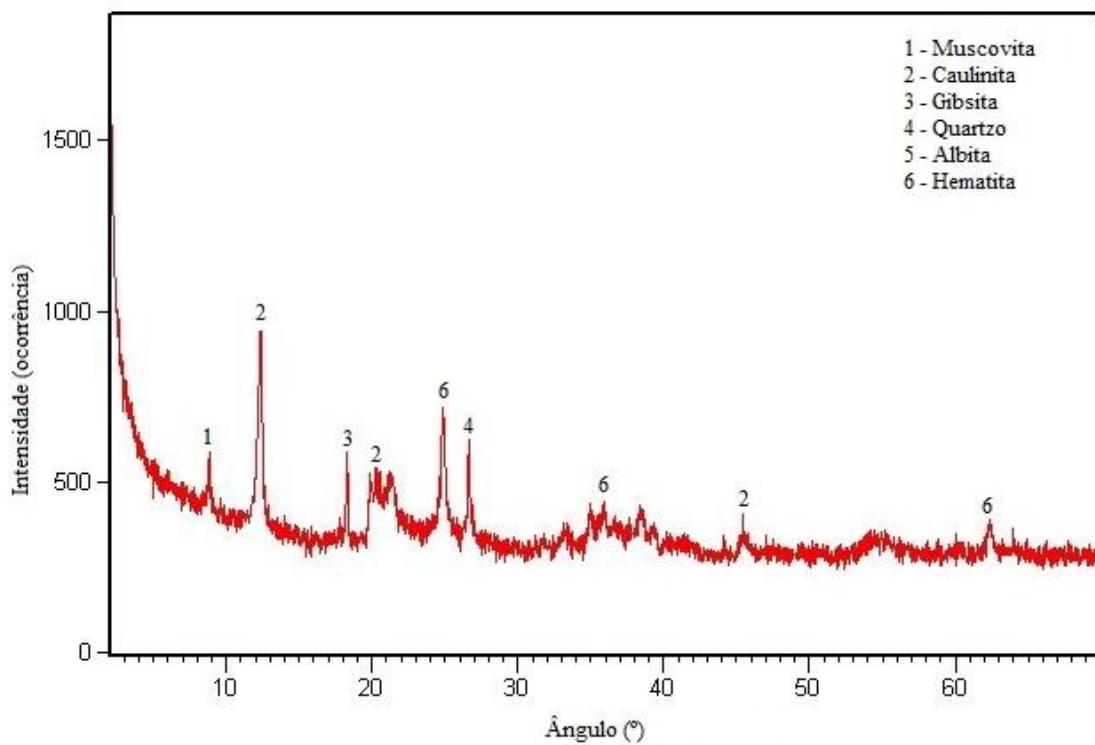


Figura 4.28: Difratograma da amostra de lama 1 - ETED.

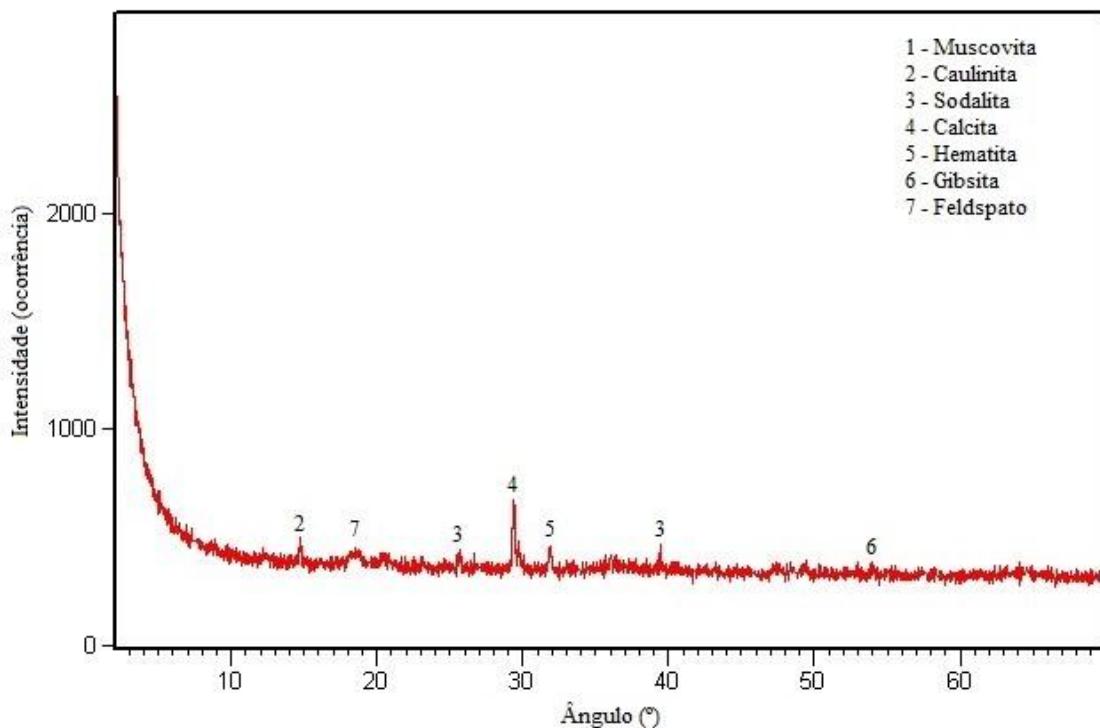


Figura 4.29: Difratograma da amostra de lama 2 - ETAV.

Na Tabela 4.27, encontram-se os principais constituintes mineralógicos encontrados nas amostras analisadas.

Tabela 4.27: Composição mineralógica dos materiais.

Amostra	Constituintes mineralógicos
Areia	Quartzo (SiO_2), Muscovita ($\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$), Caulinita ($\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), Gibsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), Hematita (Fe_2O_3)
Argila	Muscovita ($\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$), Caulinita ($\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), Gibsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), Hematita (Fe_2O_3), Quartzo (SiO_2)
Bentonita	Quartzo (SiO_2), Caulinita ($\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), Feldspato ($(\text{NaK})\text{AlSi}_2\text{O}_3\text{CaAl}_2\text{SiO}_3\text{BaAlSi}_2\text{O}_3$), Sillimanita (Al_2SiO_5), Montmorilonita ($(\text{Na,Ca})_{0,3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2\text{nH}_2\text{O}$), Magnesita (MgCO_3)
Lama 1 ETED	Muscovita ($\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$), Caulinita ($\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), Gibsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), Hematita (Fe_2O_3), Quartzo (SiO_2)
Lama 2 ETAV	Muscovita ($\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$), Caulinita ($\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), Sodalita ($\text{Na}_4\text{Al}_3(\text{SiO}_4)_3\text{Cl}$), Calcita (CaCO_3), Hematita (Fe_2O_3), Gibsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), Feldspato ($(\text{NaK})\text{AlSi}_2\text{O}_3\text{CaAl}_2\text{SiO}_3$)

De forma geral, todas as amostras apresentaram estado cristalino e pode-se observar que a maioria dos compostos encontrados se repetiu em amostras de materiais diferentes, visto a similaridade dos argilominerais, mas variando a intensidade dos picos.

O principal composto encontrado através da difração de raios-X nos cinco materiais foi a caulinita, que é encontrada em abundância na natureza.

Enquanto a muscovita e o quartzo se fizeram presentes em no mínimo quatro materiais, esse último mais expressivo na amostra de areia.

O elemento silício constitui estes três minerais e aponta para a estabilização química pretendida para a cal livre da escória, foco deste estudo.

Outra ressalva para a ausência de cal nos resultados, mostrando que os argilominerais escolhidos não contribuirão para elevar o teor de óxido de cálcio livre na amostra de escória, reduzindo seu potencial expansivo se hidratada.

Conclui-se ainda por esta discussão de resultados que a areia apresenta-se como o material com argilomineral de melhor potencial para estabilização da escória, por apresentar os maiores picos do mineral quartzo, predominantemente composto por sílica. Conforme o balanço de massa, que ajustará a relação CaO/SiO₂, tornando a cal indisponível para outras reações e consequentemente reduzindo a expansão volumétrica da escória.

4.2.4 Caracterização morfológica

A Microscopia Eletrônica de Varredura, MEV, é empregada em caráter pontual para caracterização das diferentes fases minerais presentes numa amostra.

A análise química foi feita no material pulverizado e a sequência das Figuras 4.30 a 4.34 e das Tabelas 4.28 a 4.32, apresenta a distribuição morfológica típica obtida para cada material adicionado à escória.

Os resultados reúnem as espécies químicas que foram encontradas e suas respectivas porcentagens para a análise pontual efetuada, em nível quantitativo que pode ser comparado as demais análises químicas.

A discussão dos resultados em termos texturais e homogeneidade de partículas se encontram ao final da série de dados gerados por este ensaio.

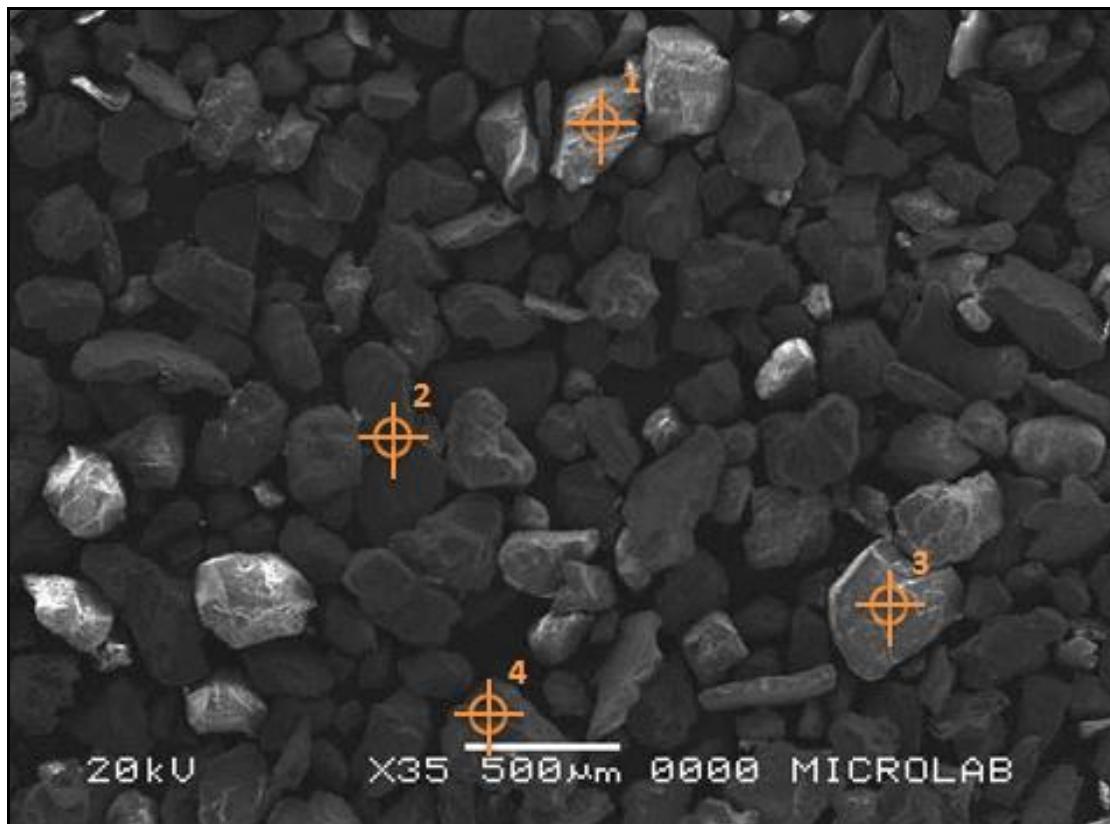


Figura 4.30: Morfologia típica encontrada na amostra de areia.

Tabela 4.28: Análise quantitativa em cada ponto da Figura 4.30.

Espécies Químicas (% em massa)	Areia_ponto1	Areia_ponto2	Areia_ponto3	Areia_ponto4
CO ₂	61.87	74.37	76.93	72.48
SiO ₂	19.79	16.57	6.65	14.58
K ₂ O	-	1.78	0.80	3.19
CaO	0.24	0.57	-	-
TiO ₂	-	0.47	0.42	0.22
Fe ₂ O ₃	-	3.20	6.16	0.33
Br	10.74	5.03	9.03	9.21
SnO ₂	7.36	-	-	-

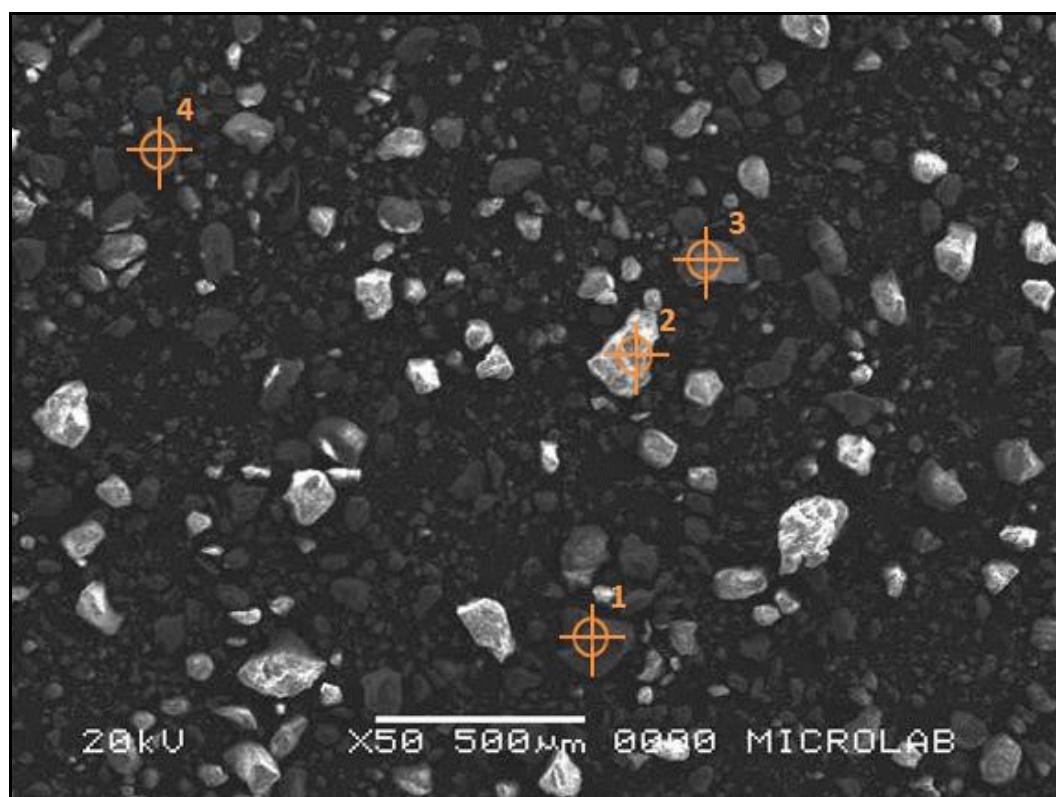


Figura 4.31: Morfologia típica encontrada na amostra de argila.

Tabela 4.29: Análise quantitativa em cada ponto da Figura 4.31.

Espécies Químicas (% em massa)	Argila_ponto1	Argila_ponto2	Argila_ponto3	Argila_ponto4
CO ₂	67.27	72.93	77.99	66.97
Al ₂ O ₃	1.77	3.92	10,31	-
SiO ₂	8.87	3.19	-	31.26
K ₂ O	-	0.34	0.19	-
CaO	-	0.09	-	-
TiO ₂	-	0.36	0.64	-
Fe ₂ O ₃	-	16.95	7.14	0.86
CaO	-	-	0.00	-
Cu ₂ O	-	-	0.09	0.13
ZnO	-	0.33	-	0.20
Br	-	-	3.40	-
SrO	-	-	0.01	-
TeO ₂	22.09	-	-	-
Ta ₂ O ₅	-	1.88	0.53	0.57

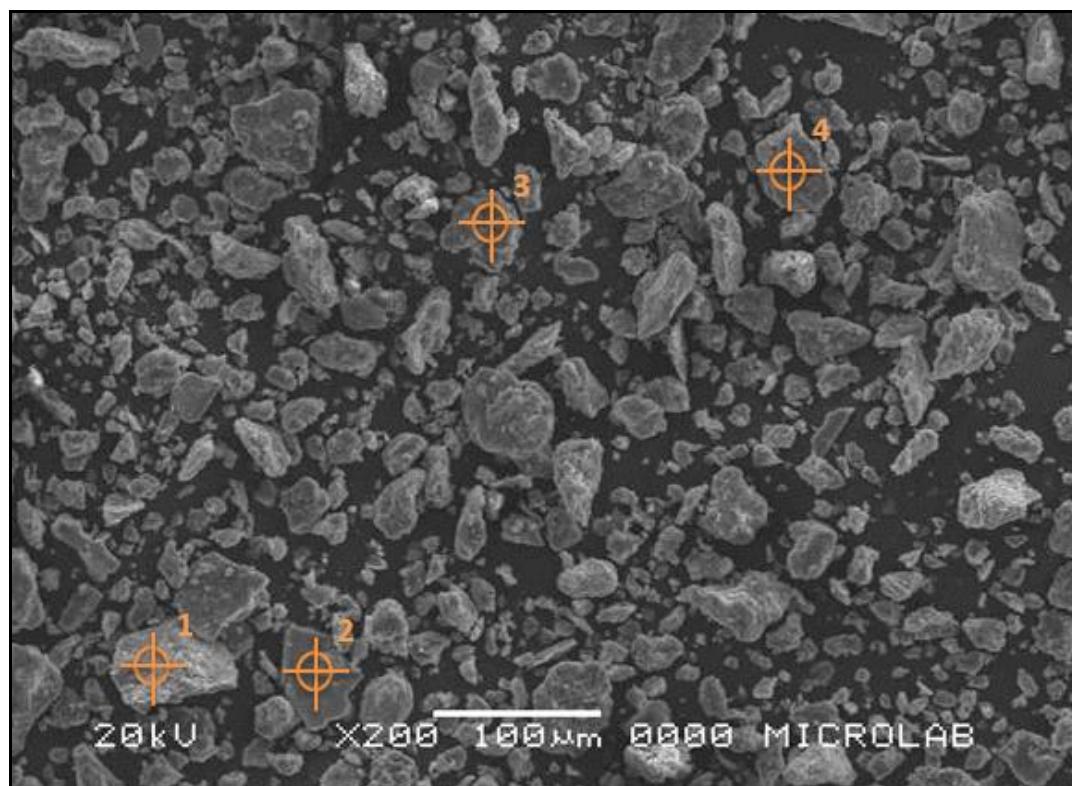


Figura 4.32: Morfologia típica encontrada na amostra de bentonita.

Tabela 4.30: Análise quantitativa em cada ponto da Figura 4.32.

Espécies Químicas (% em massa)	Bentonita ponto1	Bentonita ponto2	Bentonita ponto3	Bentonita ponto4
CO ₂	-	67.39	61.29	58.90
Na ₂ O	-	-	-	0.001
Al ₂ O ₃	-	-	8.57	-
SiO ₂	-	16.71	19.82	0.001
Cl	-	-	-	0.11
K ₂ O	-	5.81	0.25	0.13
CaO	-	-	0.75	0.62
TiO ₂	-	-	1.06	0.42
Fe ₂ O ₃	-	0.17	7.81	20.08
Cu ₂ O	-	-	-	0.36
ZnO	-	0.18	0.46	0.53
BeO	89,01	9.29	-	16.95
SrO	6.13	-	-	-
TeO ₂	3.87	-	-	-
Ta ₂ O ₅	-	0.45	-	1.90

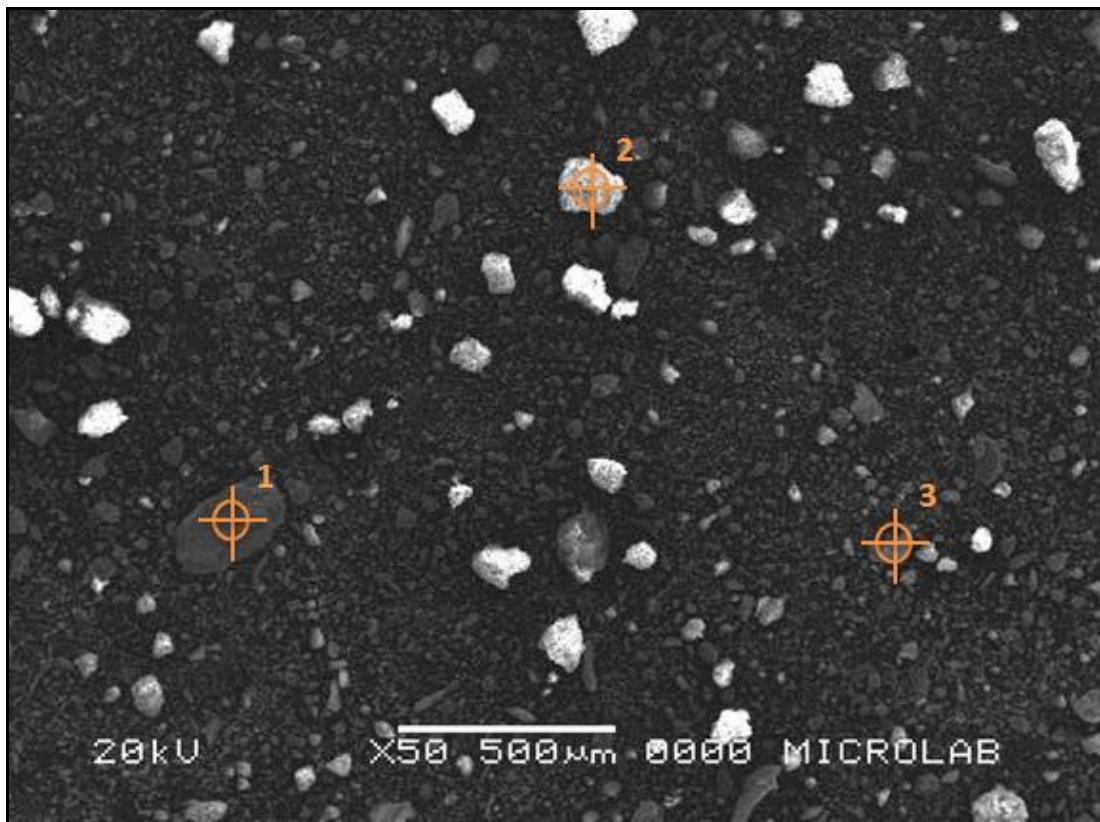


Figura 4.33: Morfologia típica encontrada na amostra de Lama 1.

Tabela 4.31: Análise quantitativa em cada ponto da Figura 4.33.

Espécies Químicas (% em massa)	ETED_ponto1	ETED_ponto2	ETED_ponto3
CO ₂	44.06	74.12	81.75
SiO ₂	-	3.76	0.00
K ₂ O	-	-	2.02
TiO ₂	-	-	0.88
Fe ₂ O ₃	-	3.83	7.32
ZnO	-	0.27	0.07
Br	13.09	18.02	7.07
SrO	4.22	-	-
TeO ₂	38.63	-	-
Ta ₂ O ₅	-	-	0.89

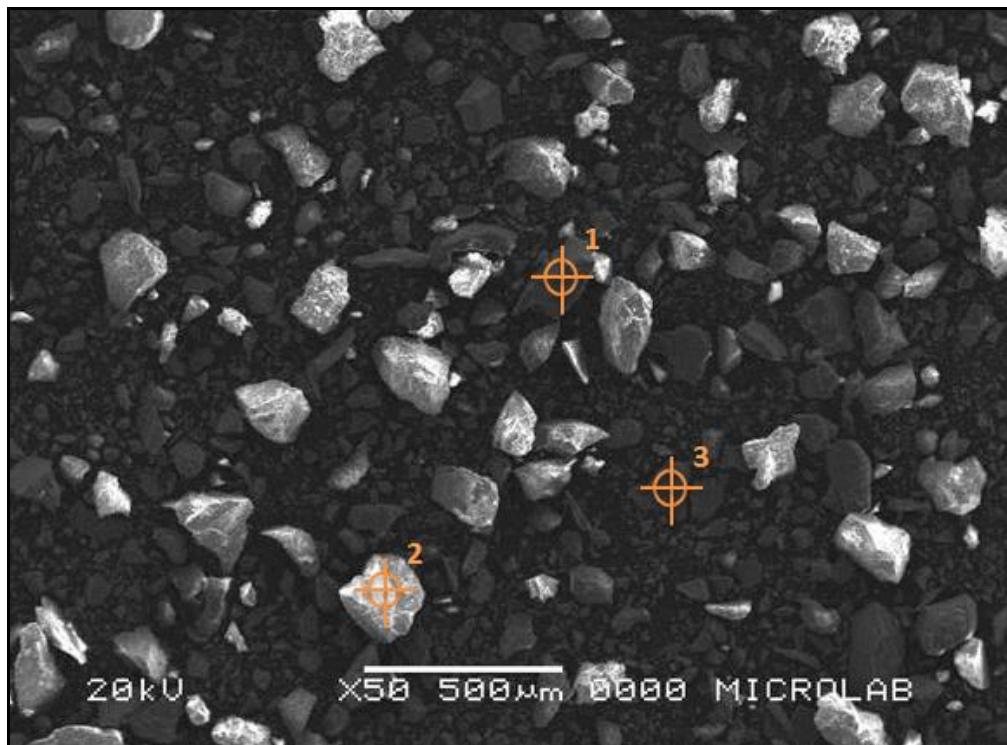


Figura 4.34: Morfologia típica encontrada na amostra de Lama 2.

Tabela 4.32: Análise quantitativa em cada ponto da Figura 4.34.

Espécies Químicas (% em massa)	ETAV_ponto1	ETAV_ponto2	ETAV_ponto3
CO ₂	46.98	-	54.62
Al ₂ O ₃	10.94	1.68	4.92
SO ₃	0.001	-	2.09
CaO	4.30	58.36	15.68
V ₂ O ₅	0.17	-	-
Cr ₂ O ₃	-	0.13	0.18
MnO	1.85	2.16	1.79
Fe ₂ O ₃	29.01	31.99	16.05
Cu ₂ O	-	0.41	-
ZnO	-	-	0.24
Ta ₂ O ₅	-	1.33	2.03

Na Tabela 4.33, encontra-se o resumo dos resultados da morfologia dos materiais estudados e os principais constituintes químicos identificados.

Tabela 4.33: Resultados morfológicos dos materiais.

Amostra	Distribuição das partículas	Textura	Constituintes químicos predominantes (%)
Areia	Irregular	Homogênea e lisa	Si
Argila	Regular	Homogênea e lisa	Si e Al
Bentonita	Regular	Heterogênea e rugosa	Si, Fe e Be
Lama 1 - ETED	Regular	Heterogênea e rugosa	Be e Te
Lama 2 - ETAV	Regular	Heterogênea e rugosa	Ca e Fe

O resultado da MEV foi muito parecido com o das análises quantitativas realizadas por Digestão Ácida, reafirmando os compostos encontrados anteriormente, além de detectar a presença de pequenas impurezas não identificadas na Difração de RX, como o elemento Berílio.

De modo geral os argilominerais analisados apresentam partículas regulares, exceto a areia, e expressivos teores de sílica.

A areia e argila mostraram textura mais lisa e homogênea, enquanto as lamas e a bentonita foram mais rugosas e heterogêneas, porém orientadas.

As morfologias apresentadas pelos materiais adicionados à escória serão comparadas após as misturas e avaliadas quanto a melhor influência para material de lastro.

4.2.5 Caracterização ambiental

A caracterização ambiental dos materiais adicionados à escória já foi mencionada no item 2.10, por ensaios já realizados em outros estudos e a Tabela 4.34 resume as amostras e suas respectivas classificações.

A maioria dos argilominerais por serem encontrados em recursos da natureza, já têm uma classificação ambiental definida, que nesta pesquisa, são confirmados com os resultados dos ensaios apresentados em sequência.

Tabela 4.34: Classificação ambiental dos materiais.

Material	Classe Ambiental
Areia	II B – Não perigoso e inerte
Argila	II A – Não perigoso e não inerte
Bentonita	II A – Não perigoso e não inerte
Lama 1 – ETED	II A – Não perigoso e não inerte
Lama 2 – ETAV	II B – Não perigoso e inerte

4.2.5.1 Ensaio de Lixiviação

Nos resultados do teste de lixiviação para os argilominerais todos os parâmetros inorgânicos mantiveram-se abaixo do limite permitível da norma ambiental, conforme já era esperado por informações da literatura que enquadram todos os materiais adicionados a escória neste trabalho, como Classe II, ou não perigosos.

Este mesmo diagnóstico foi válido também para a duplicata do ensaio e os resultados são apresentados nas planilhas dos Anexos I e II.

4.2.5.2 Ensaio de Solubilização

Os resultados do teste de solubilização são apresentados para o parâmetro inorgânico que não passou conforme a norma ambiental para a escória, ou seja, o elemento alumínio, e estão indicados na Tabela 4.35 para as amostras de argilominerais.

Tabela 4.35: Solubilização - parâmetros inorgânicos para as misturas.

Alumínio - Al	Concentração no Resíduo Solubilizado da escória recém produzida	Concentração no Resíduo Solubilizado da escória - DUPLICATA	Limites NBR10004 (ABNT, 2004)	Limite de Quantif.- LQ
	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
AREIA	<LQ	0,012	0,2	0,0024
ARGILA	0,523	0,588	0,2	0,0024
BENTONITA	0,403	0,421	0,2	0,0024
LAMA 1- ETED	0,189	0,255	0,2	0,0024
LAMA 2- ETAV	0,137	0,112	0,2	0,0024

LQ – Limite de Quantificação do equipamento utilizado: ICP-OES

De acordo com as quantidades registradas nota-se que o teor do elemento Alumínio ultrapassou o limite da norma nas amostras de argila e bentonita, classificando-as como II-A (Não Perigoso e Não Inerte). Além do elemento Fe que também ficou acima do permitido.

Este mesmo diagnóstico foi válido também para a duplicata do ensaio e os resultados dos demais elementos são apresentados nas planilhas dos Anexos III e IV.

A composição química também analisada por um laboratório químico, definiu em laudo analítico a lama 1, ETED, como resíduo Classe II A - Não Perigoso e Não Inerte.

Baseado nos resultados obtidos dos ensaios, os parâmetros analisados apresentam concentrações adequadas para a NBR 10004 (ABNT, 2004) para os extratos lixiviados e se encontram inadequados quanto aos extratos solubilizados, por apresentarem os teores de Al e Fe acima dos limites de solubilização.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS APÓS A FUSÃO

4.3.1 Determinação da temperatura de fusão das misturas

O THERMO-CALC obteve previsões acerca das transformações de fases que ocorrem no equilíbrio das misturas de escória e argilominerais.

As Figuras 4.35 a 4.44 apresentam os gráficos gerados pelo programa assim como as fases presentes nas amostras MIM e MEM, referidas anteriormente no item 3.5.3 do balanço de massa.

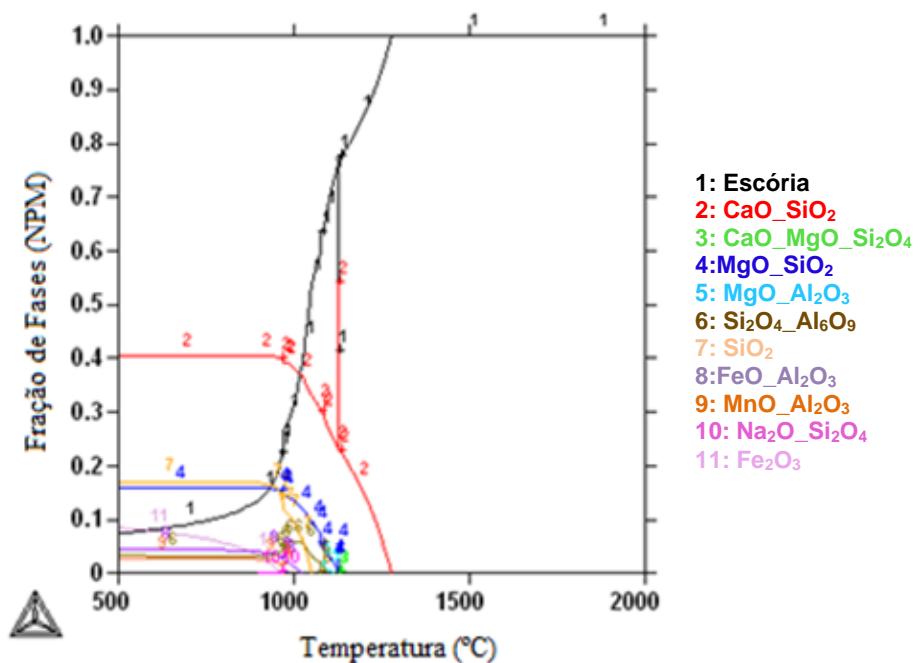


Figura 4.35: Diagrama de fases da temperatura de fusão para a mistura MIM 1.

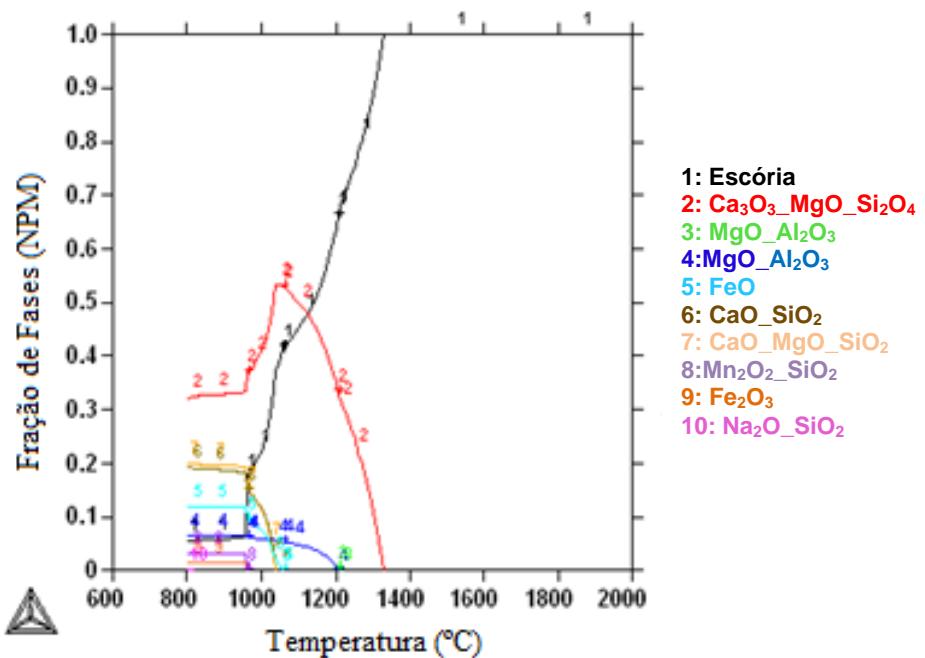


Figura 4.36: Diagrama de fases da temperatura de fusão para a mistura MEM 2.

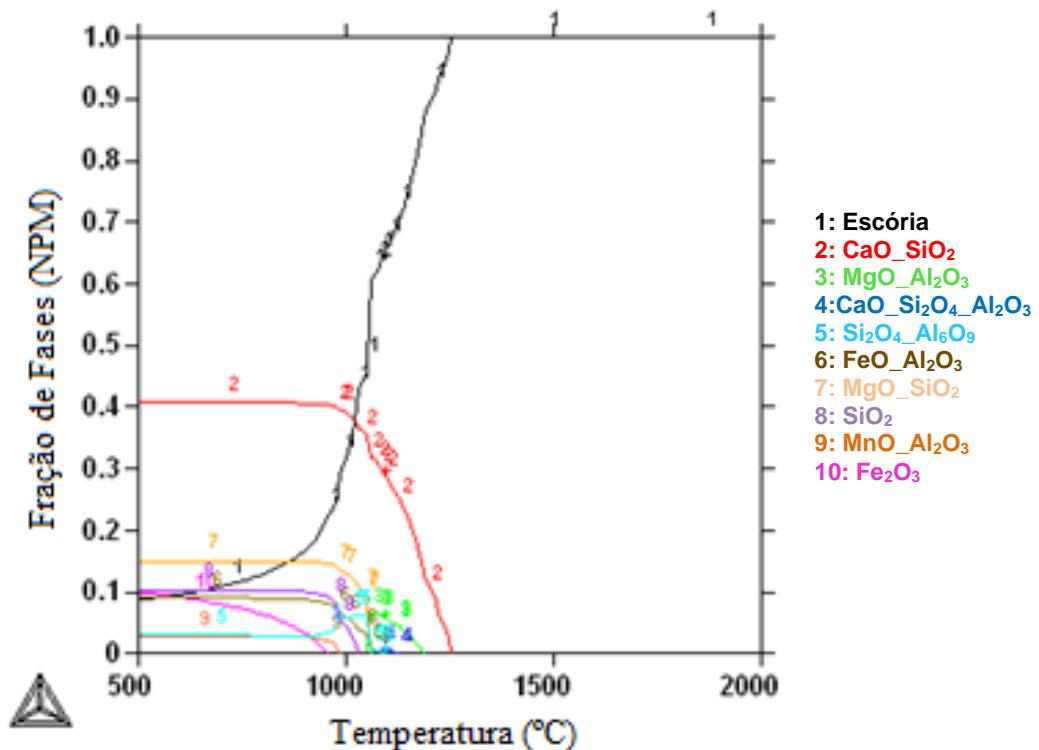


Figura 4.37: Diagrama de fases da temperatura de fusão para a mistura MIM 3.

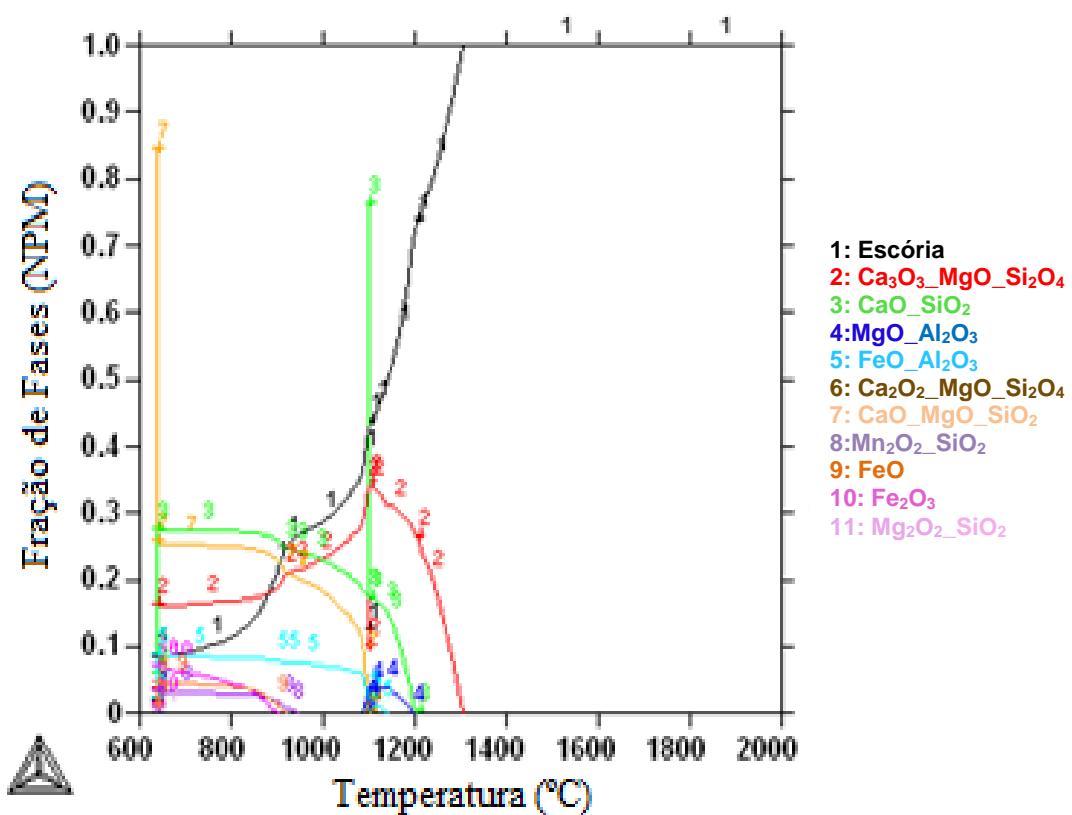


Figura 4.38: Diagrama de fases da temperatura de fusão para a mistura MEM 4.

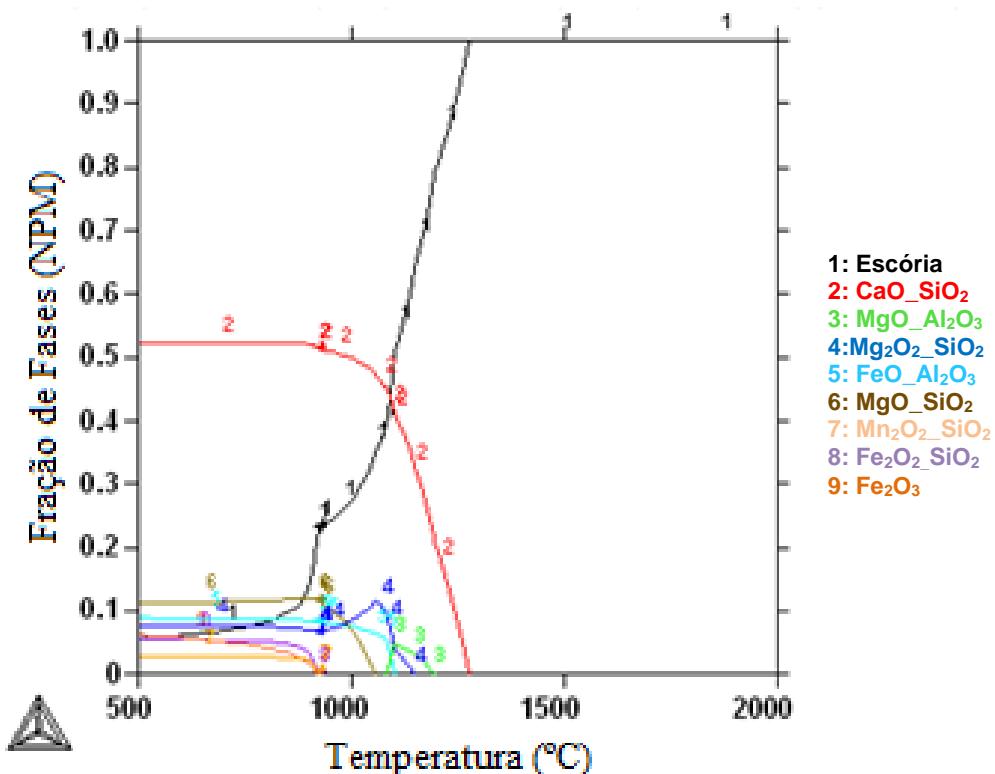


Figura 4.39: Diagrama de fases da temperatura de fusão para a mistura MIM 5.

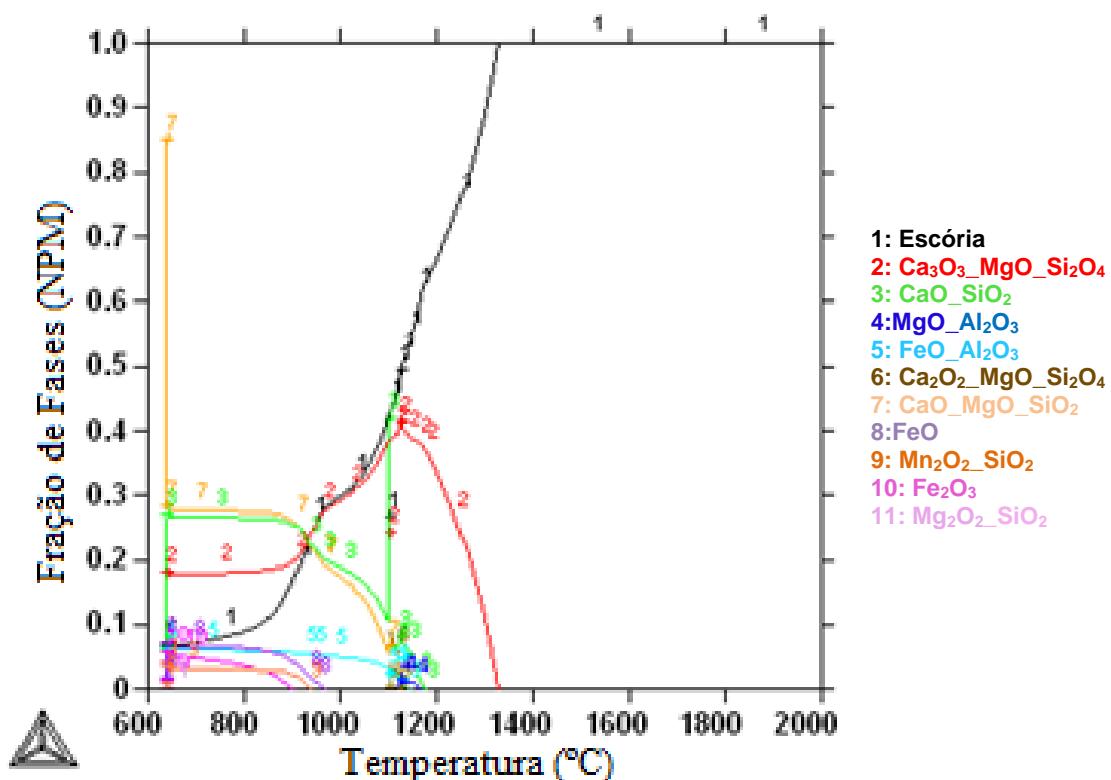


Figura 4.40: Diagrama de fases da temperatura de fusão para a mistura MEM 6.

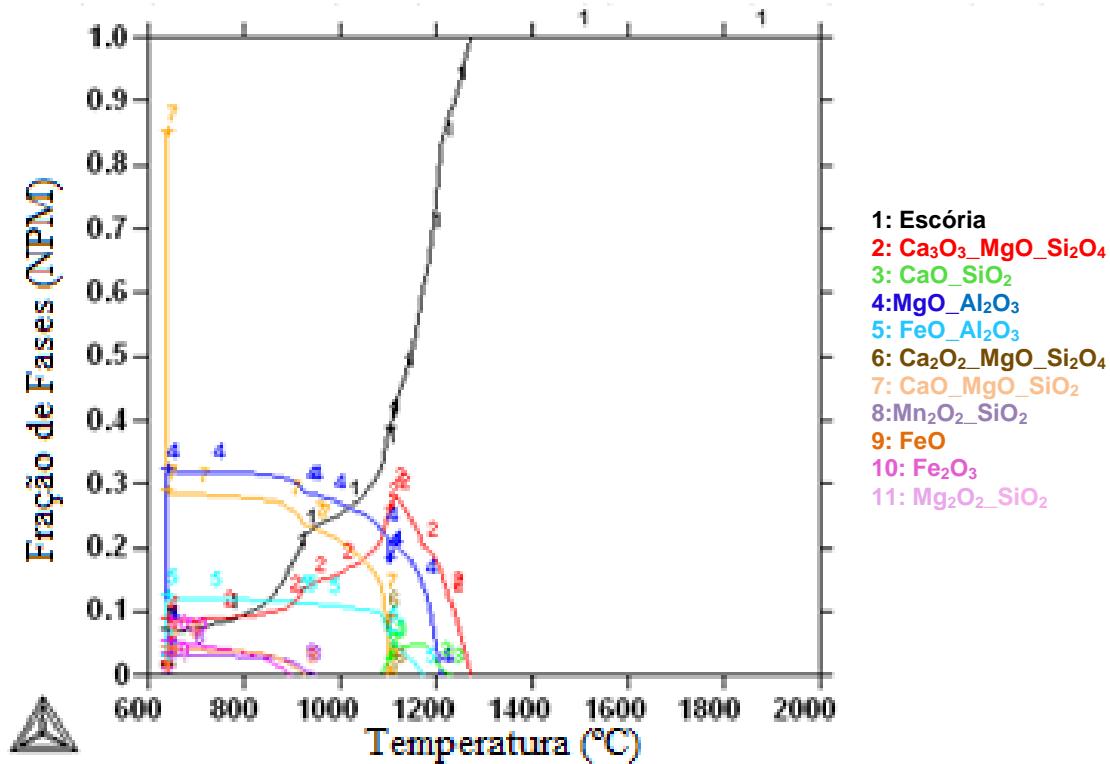


Figura 4.41: Diagrama de fases da temperatura de fusão para a mistura MIM 7.

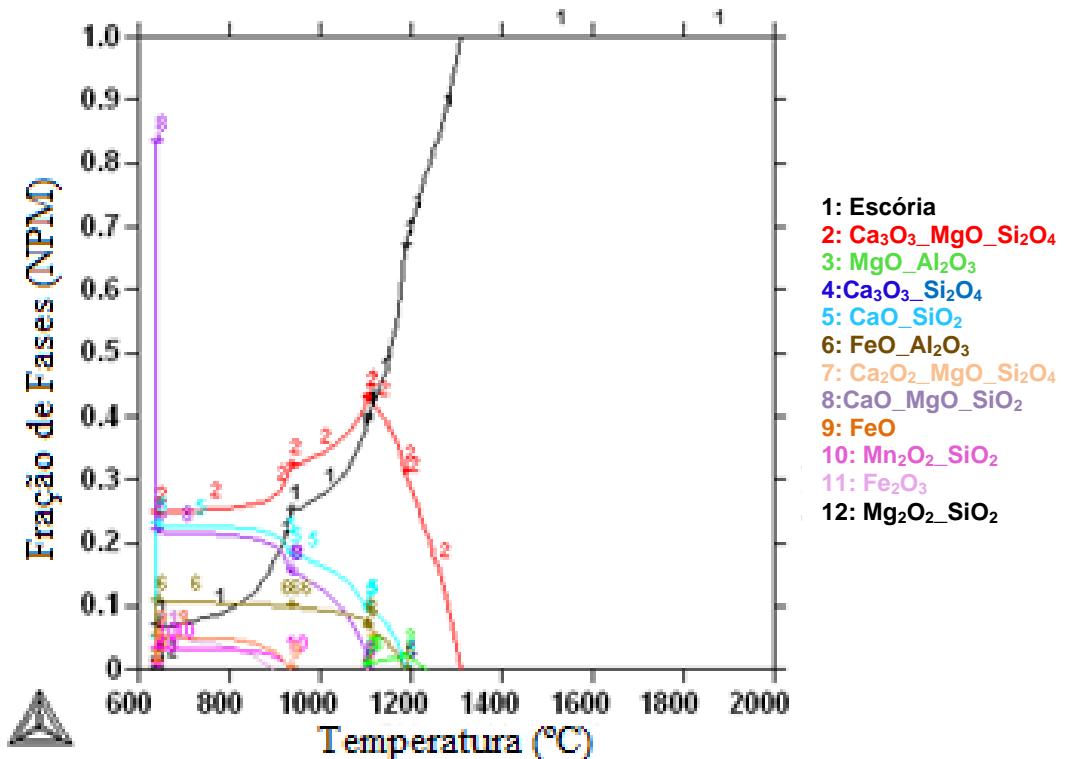


Figura 4.42: Diagrama de fases da temperatura de fusão para a mistura MEM 8.

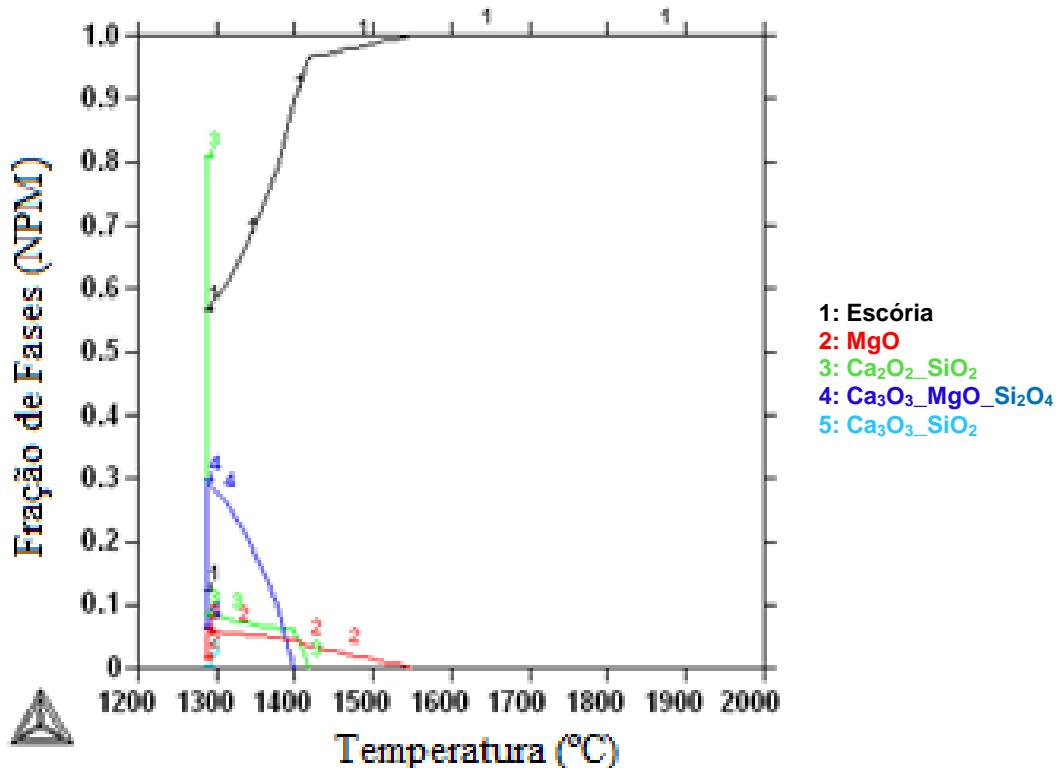


Figura 4.43: Diagrama de fases da temperatura de fusão para a mistura MIM 9.

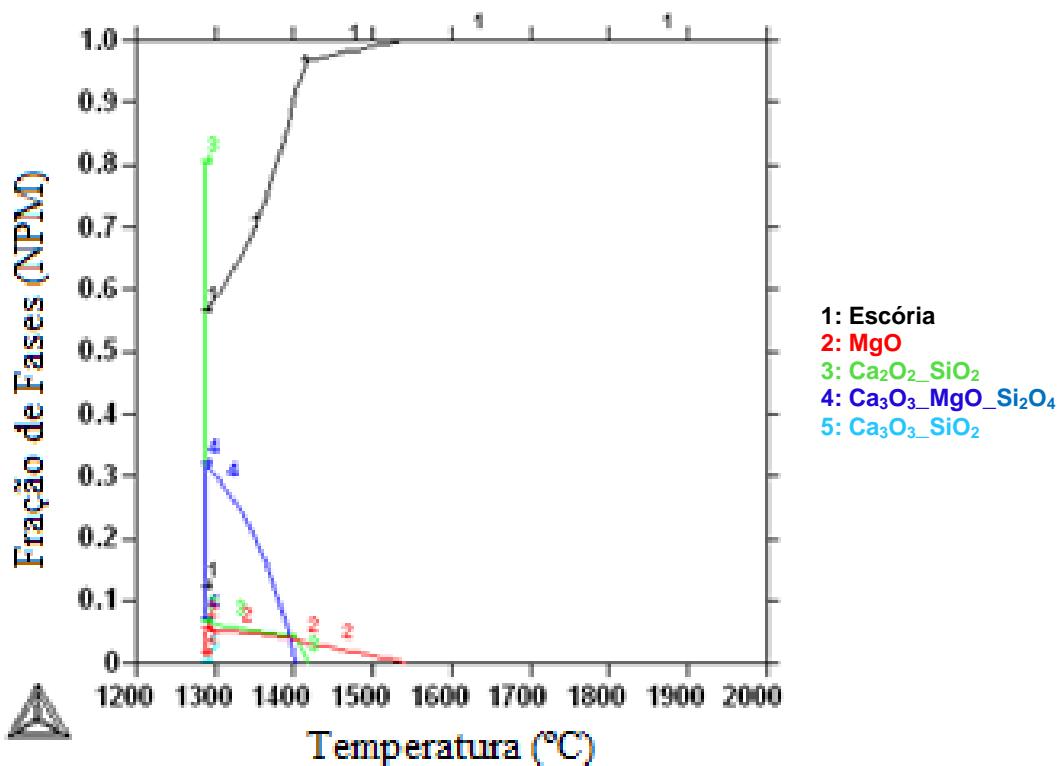


Figura 4.44: Diagrama de fases da temperatura de fusão para a mistura MEM 10.

Nota-se pelos diagramas, a porcentagem de líquido existente durante o processo de fusão da mistura de escória de aciaria LD e argilominerais em função da temperatura. Ou seja, a mistura estará completamente líquida quando a curva atingir o valor de fração de fase líquida igual a 1 ou 100%.

Ao lado de cada gráfico estão apresentadas as fases sólidas da mistura, como legenda em cores para as curvas de temperatura.

Conforme aumento a temperatura, as fases sólidas que se tornam líquidas começam a formar escória e gás, e atinge-se o objetivo da fusão. A Tabela 4.36 apresenta o resumo das temperaturas de fusão para as 10 misturas.

Tabela 4.36: Determinação da temperatura de fusão das misturas pelo THERMO-CALC.

Amostra	Temperatura de fusão (°C)
MIM1	1275
MEM2	1331
MIM3	1254
MEM4	1308
MIM5	1276
MEM6	1330
MIM7	1274
MEM8	1311
MIM9	1549
MEM10	1535

Através da simulação feita pelo THERMO-CALC, nenhuma das misturas apresentou temperatura de fusão acima de 1549 °C, isto justifica que a escolha da temperatura de

trabalho do forno na ordem de 1600 °C que garantiu a manutenção da escória no estado líquido e formação das novas fases identificadas na posterior difração de RX das misturas resfriadas ao ambiente.

4.3.2 Caracterização física das misturas

Para as distribuições granulométricas dos novos produtos obtidos das fusões foram feitos ensaios a laser através do equipamento Particle Size Analyzer CILAS 1064 da UFOP.

As Figuras 4.45 a 4.54 apresentam os gráficos das distribuições granulométricas de cada uma das misturas.

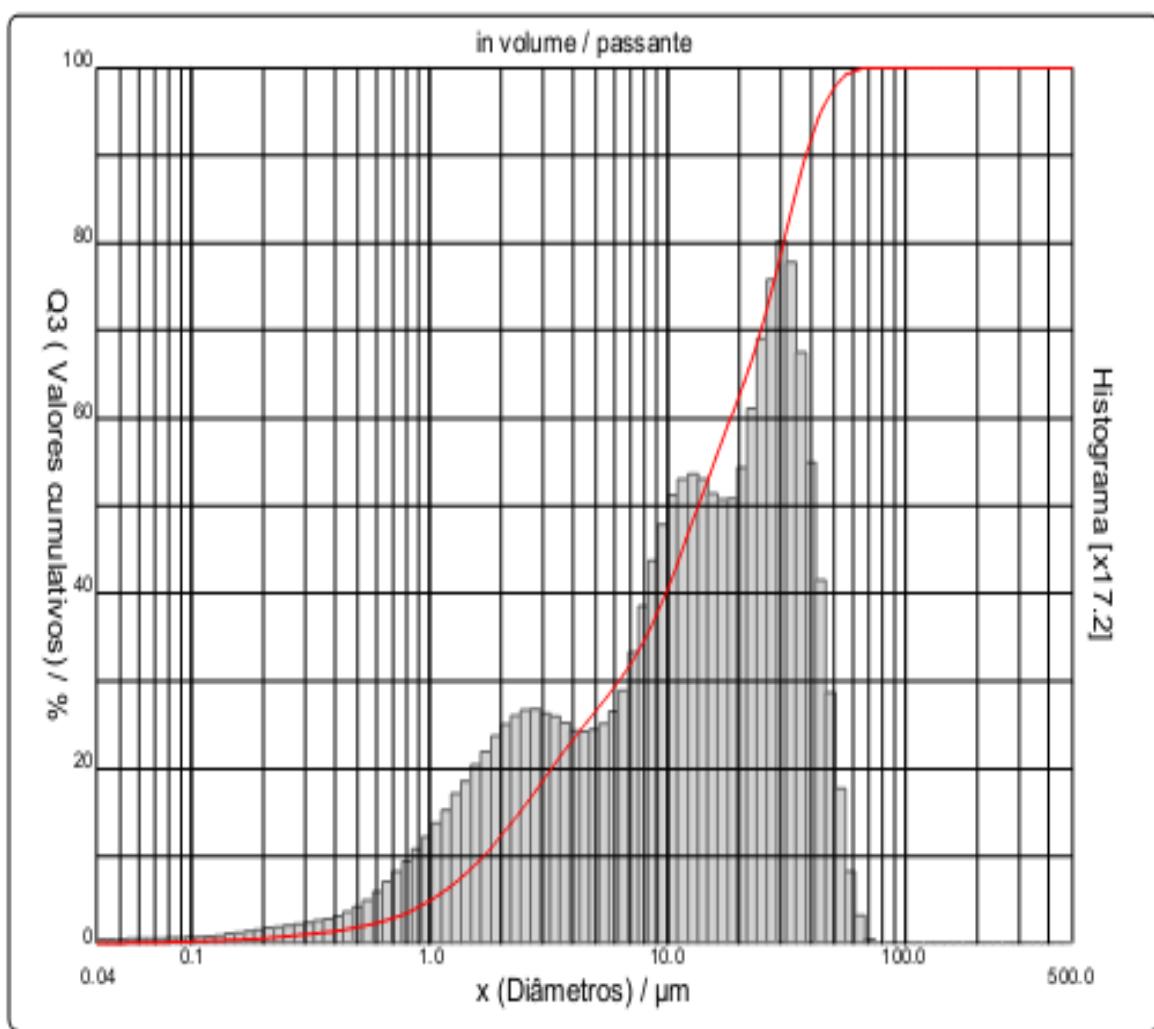


Figura 4.45: Gráfico do enquadramento granulométrico da amostra MIM1.

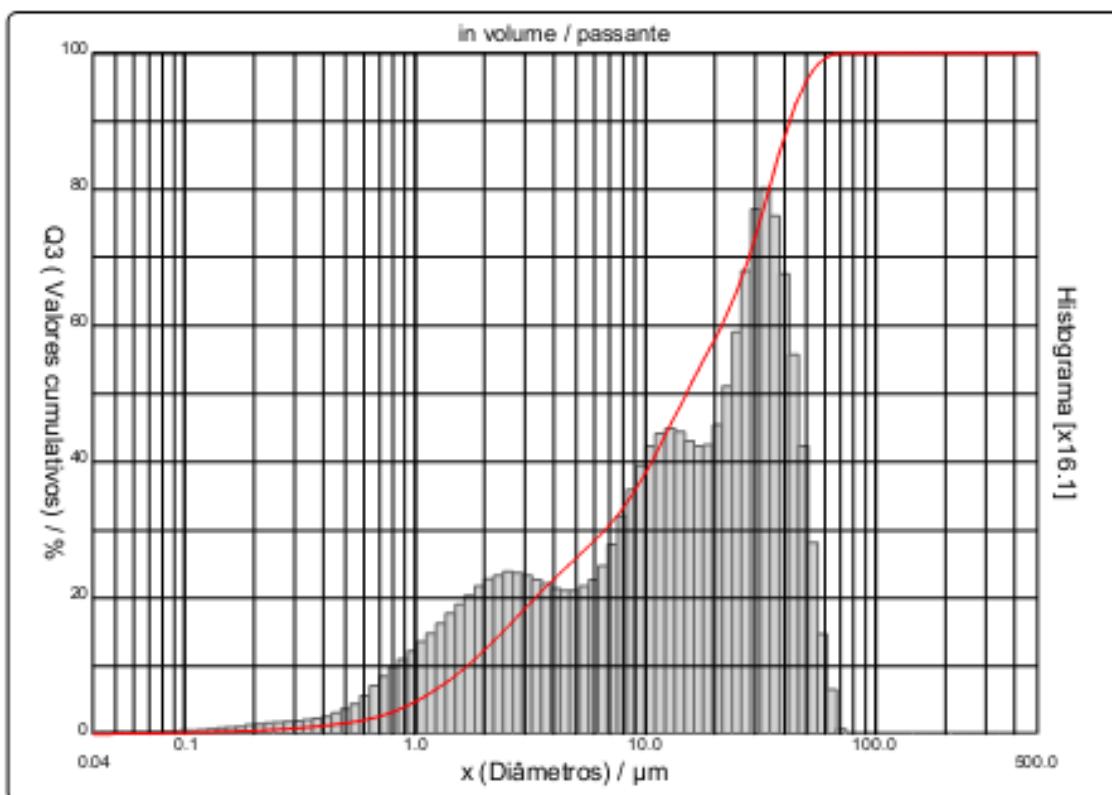


Figura 4.46: Gráfico do enquadramento granulométrico da amostra MEM2.

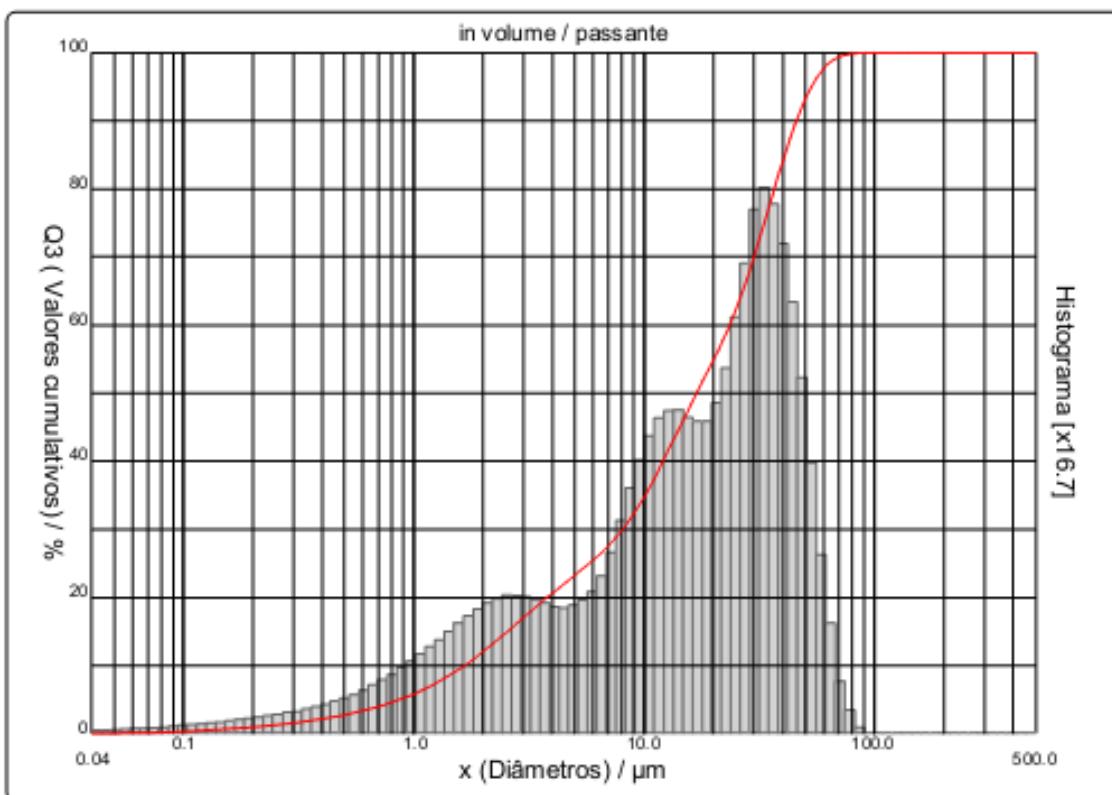


Figura 4.47: Gráfico do enquadramento granulométrico da amostra MIM3.

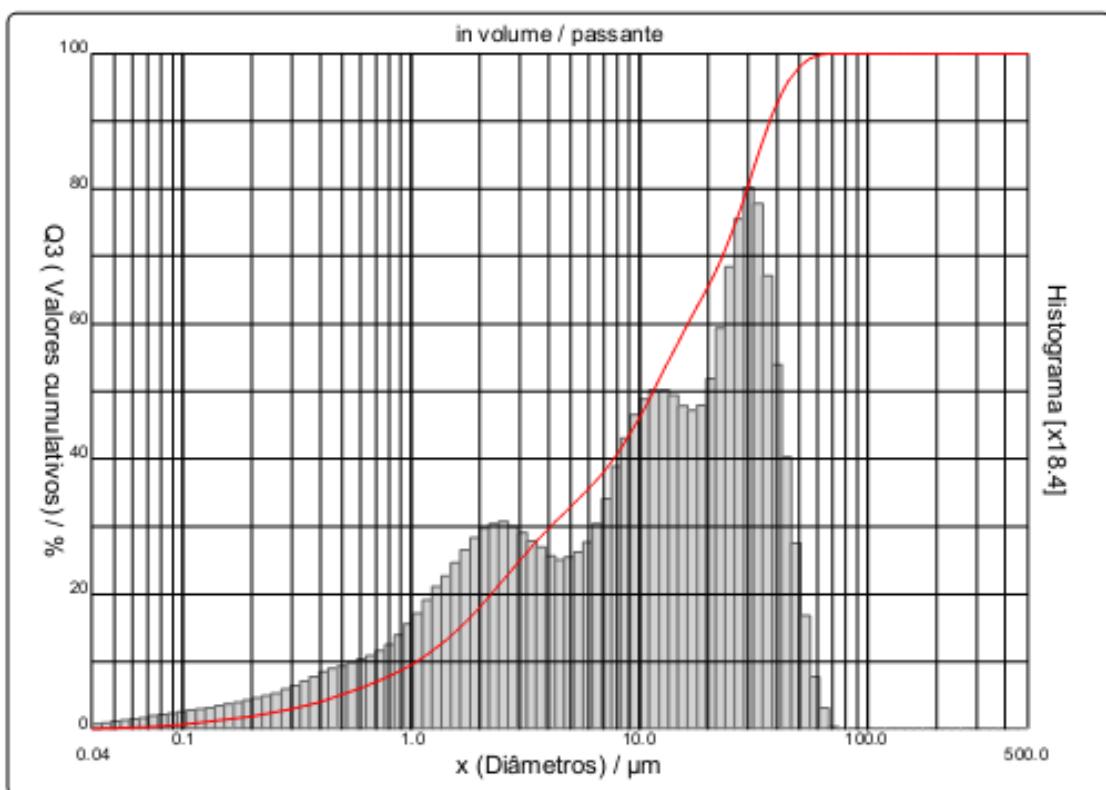


Figura 4.48: Gráfico do enquadramento granulométrico da amostra MEM4.

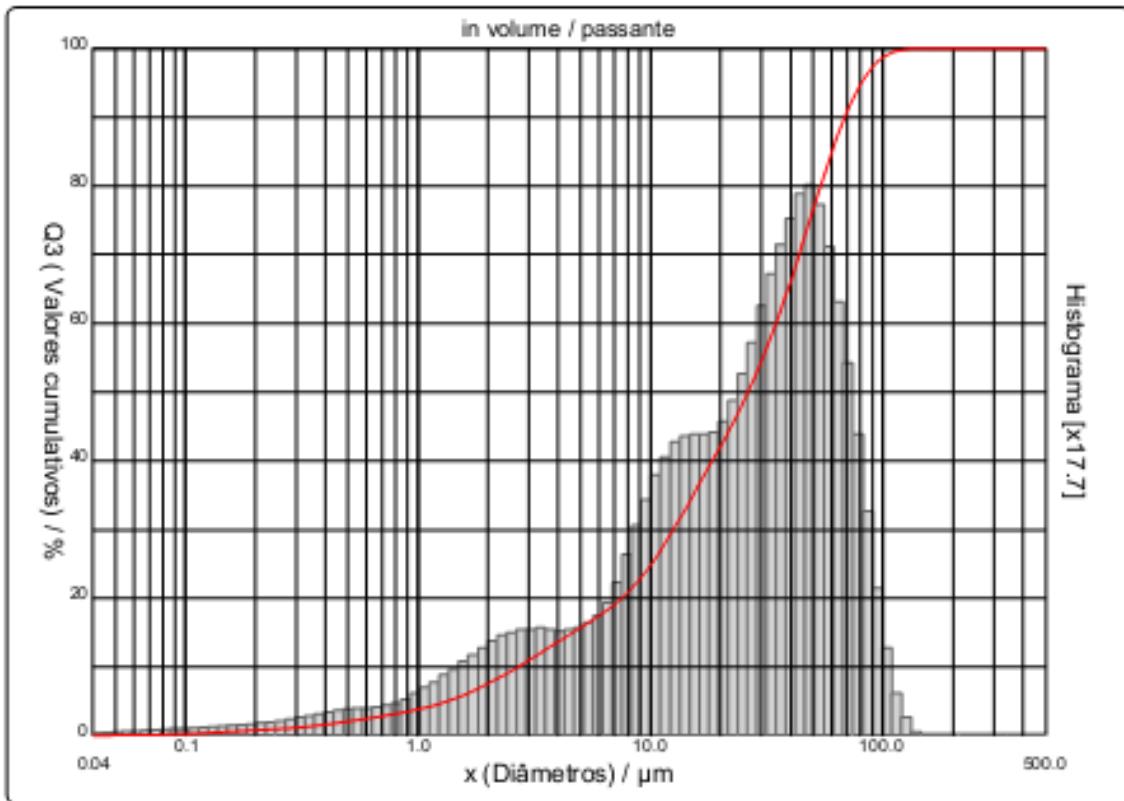


Figura 4.49: Gráfico do enquadramento granulométrico da amostra MIM5.

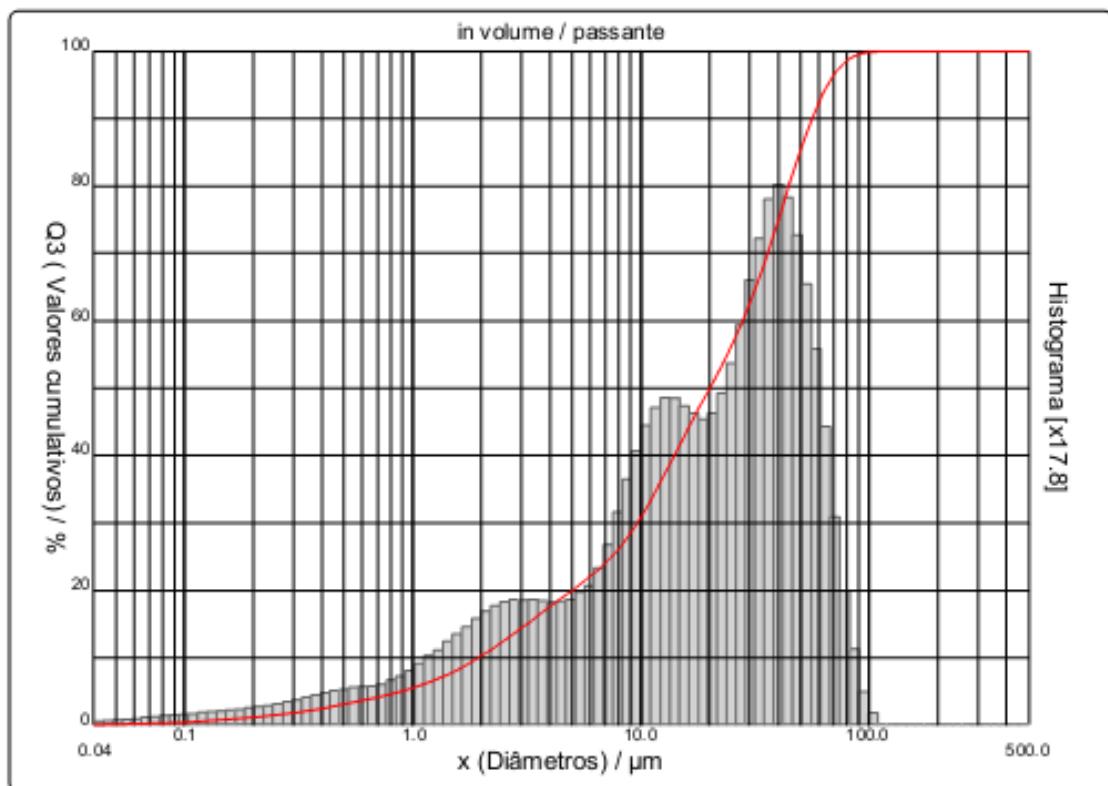


Figura 4.50: Gráfico do enquadramento granulométrico da amostra MEM6.

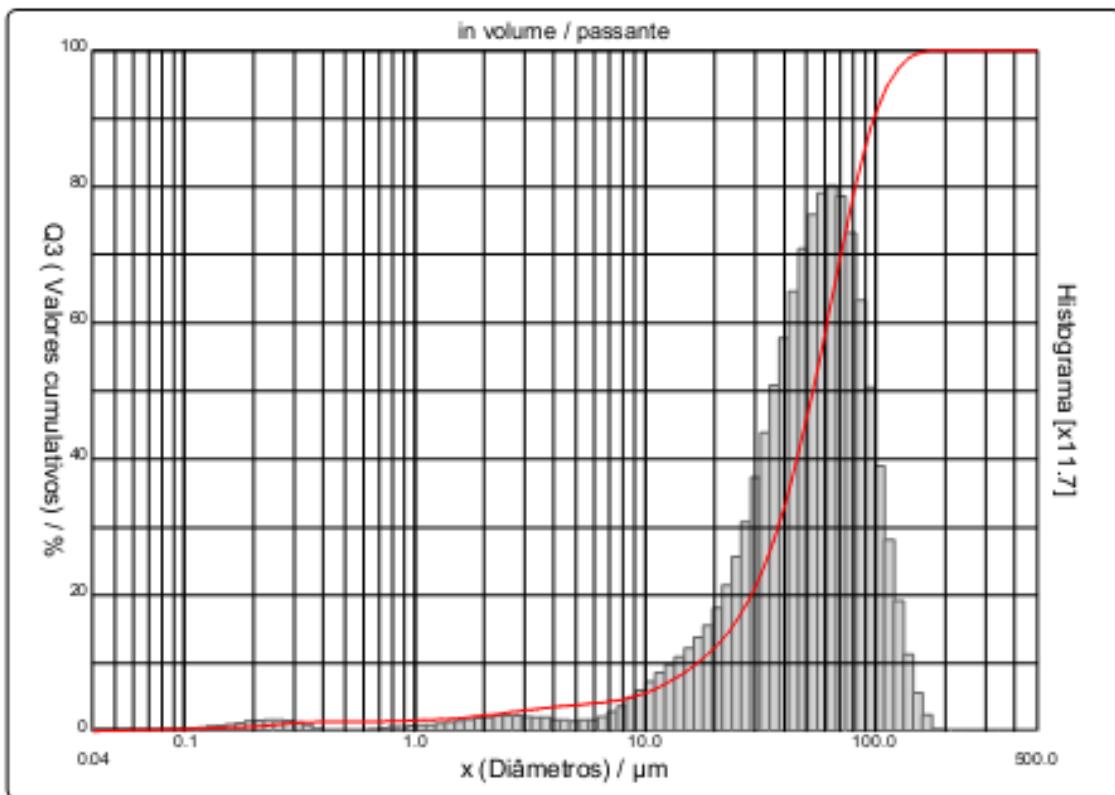


Figura 4.51: Gráfico do enquadramento granulométrico da amostra MIM7.

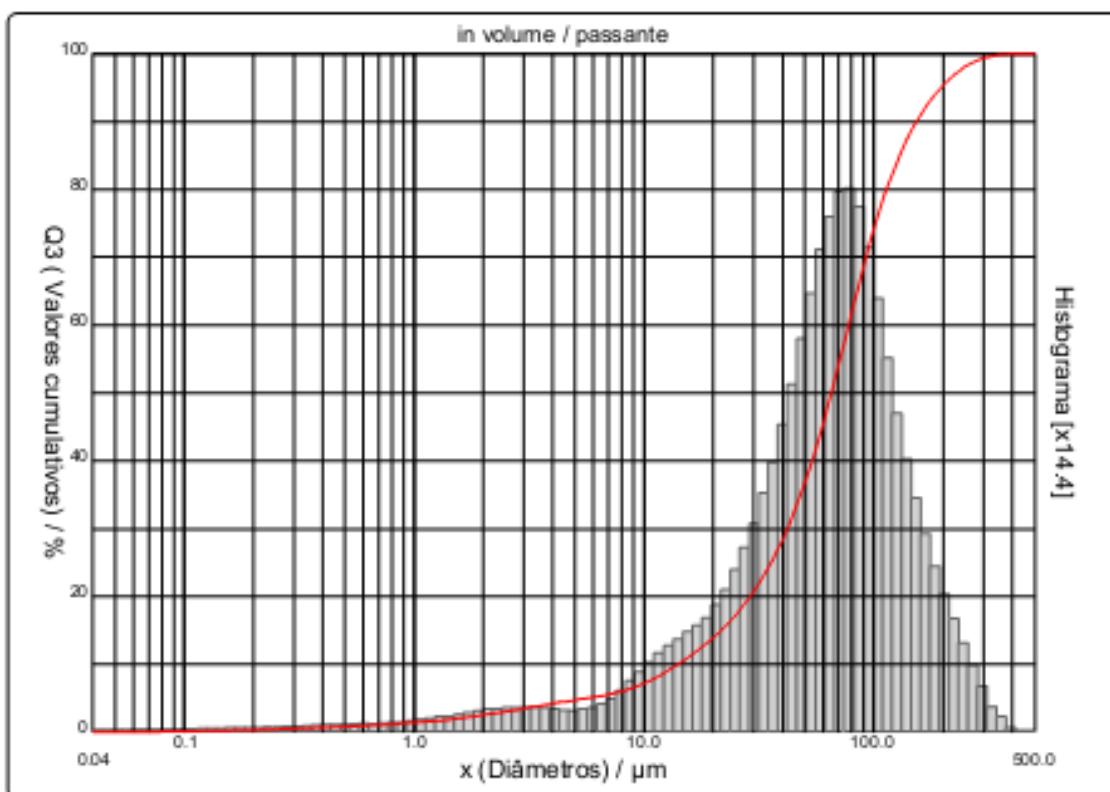


Figura 4.52: Gráfico do enquadramento granulométrico da amostra MEM8.

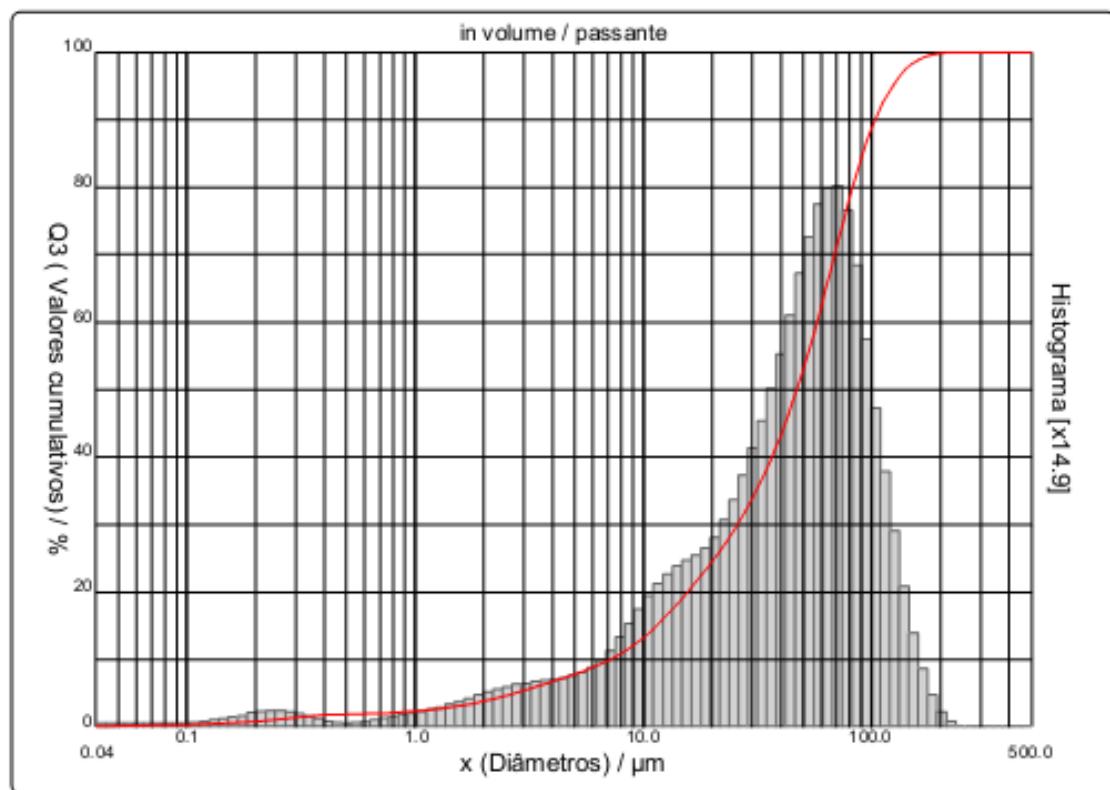


Figura 4.53: Gráfico do enquadramento granulométrico da amostra MIM9.

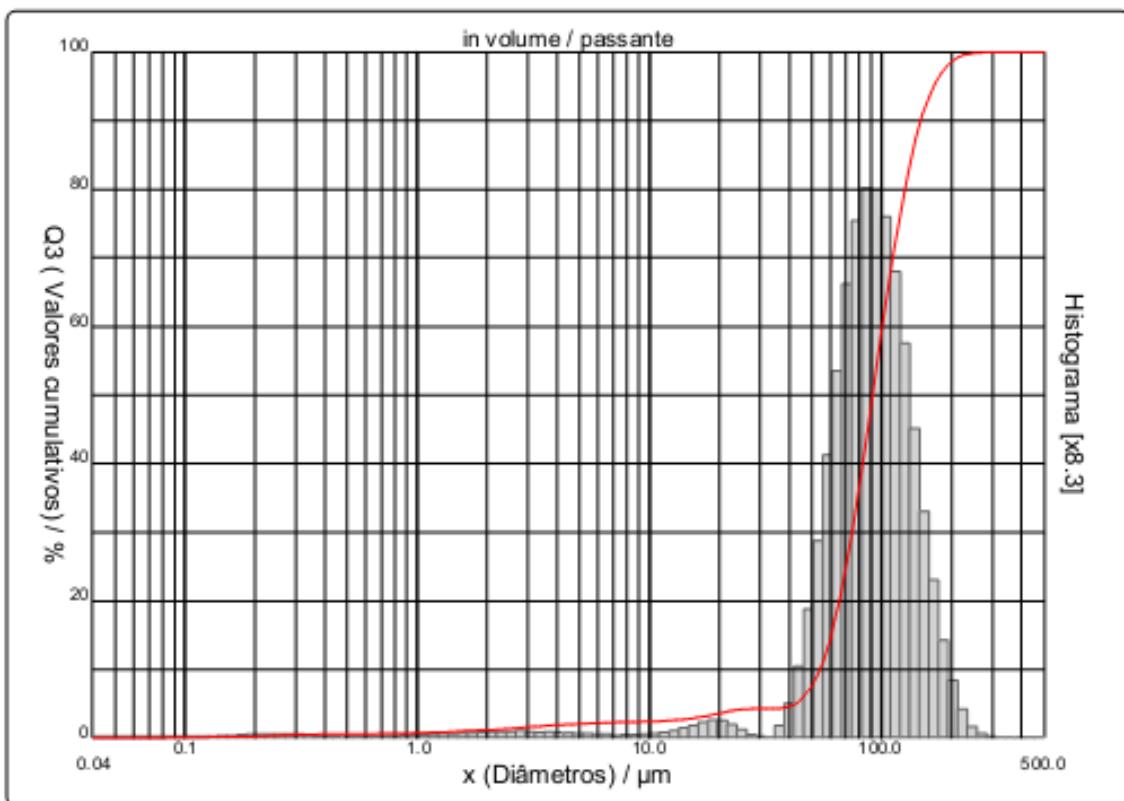


Figura 4.54: Gráfico do enquadramento granulométrico da amostra MEM10.

Após os ensaios foram obtidos os parâmetros característicos como o coeficiente de não uniformidade e o de curvatura, dimensão máxima característica e diâmetro médio, conforme apresentados na Tabela 4.37.

Tabela 4.37: Propriedades geométricas obtidas a partir da granulometria.

Parâmetro	MIM1	MEM2	MIM3	MEM4	MIM5	MEM6	MIM7	MEM8	MIM9	MEM10
D ₁₀ (μm)	3,2	1,7	1,7	1,1	2,7	1,9	16	15	7	54
D ₃₀ (μm)	6,2	6,4	8	4	13	9,6	37	41	25	70
D ₆₀ (μm)	18	23	24	17	45	28	60	78	56	100
Diâmetro Máximo Característico – DMC (μm)	71	71	90	71	140	112	180	400	240	300
Diâmetro médio (μm)	17,27	19,16	21	15,86	31,68	25,45	56,15	76,85	52,02	95,76
Coeficiente de Não Uniformidade – C _u	5,63	13,53	14,12	15,45	16,6	14,74	3,75	5,20	8	1,85
Coeficiente de Curvatura – C _c	0,67	1,05	1,57	0,86	1,39	1,73	1,43	1,44	1,59	0,91

Pela análise dos resultados, principalmente pelos histogramas, os novos materiais formados pelas misturas possuem granulometria bastante variável, devendo ser descrita individualmente cada tipo de combinação feita. A seguir, são discriminadas as interpretações específicas para cada amostra de mistura analisada.

Inicialmente, as amostras MIM1 e MEM2, compostas por escória e areia, cujas proporções foram fornecidas no item 3.5.3, apresentaram curvas e histogramas granulométricos muito semelhantes, evidenciados pelos valores dos coeficientes e diâmetros característicos da Tabela 4.37. Ambas amostras apresentaram curva contínua e inclinada indicando boa graduação de tamanhos de grãos, enquanto os histogramas apresentaram três picos crescentes, mostrando as faixas de diâmetros mais frequentes, sendo o médio da ordem de 20 μm . Os resultados da granulometria ficaram próximos tanto dos de areia quanto dos de escória, puros.

Para as misturas feitas com escória e argila, MIM3 e MEM4, notam-se os diâmetros médio e máximo, próximos das misturas anteriores, entretanto, bem menores que dos materiais de origem. As curvas granulométricas também se assemelham dos resultados para MIM1 e MEM2, portanto temos amostras bem graduadas e neste caso mais próximas das características da argila.

Escória e bentonita compuseram as misturas MIM5 e MEM6 que nos resultados de granulometria apresentaram curvas contínuas e abatidas, corroboradas pelos valores dos coeficientes C_c e C_u , seguindo a tendência dos resultados até agora obtidos. Porém, em termos de materiais de origem, essas misturas se afastaram das características da bentonita, como pode-se observar pelos diâmetros médio e máximo, cujos os das misturas foram maiores e portanto, os novos materiais se tornaram mais granulares.

Já as amostras MIM7 e MEM 8, misturas de escória e lama ETED, tiveram diâmetros máximos e médios expressivamente altos, diferentemente das misturas até então e da própria lama de origem. As curvas verticalizadas também revelaram materiais de comportamento distinto dos demais, com granulometria uniforme.

Os histogramas possuem somente um pico característico e deslocado para a direita, mostrando um resultado mais granular que acompanha o comportamento granulométrico da escória.

E finalmente os resultados das misturas MIM 9 e MEM10, de escória com a lama ETAV, mostraram-se condizentes com os da própria lama, cujos diâmetros médios e

máximos são elevados, curvas correspondentes a materiais mal graduados e histogramas com um pico deslocado para direita, apontando uma amostra uniforme e granular.

Sucintamente, as misturas MIM 1 à MEM6 tratam de produtos bem graduados e finos, enquanto as misturas MIM7 à MEM10, de produtos uniformes e granulares em relação a granulometria.

Como parâmetro para previsão do comportamento geotécnico de cada material, os de melhor desempenho como lastro ferroviário seriam os produtos formados pela escória e areia ou argila, devido a ampla graduação das amostras, que contribuem com a estabilidade e resistência, através do embricamento dos grãos ser mais efetivo e garantir melhor performance da via.

4.3.3 Caracterização química das misturas

4.3.3.1 Análise Química Quantitativa por Digestão Ácida – Savillex

Os resultados da análise química para determinação das composições das misturas, conforme os ensaios de digestão ácida, previstos pelos balanços de massa feitos, estão apresentados na Tabela 4.38.

Tabela 4.38: Composição química das misturas.

Misturas	Espécies Químicas (% em massa)										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	FeO	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	S	Ti
MIM1	46,90	9,25	19,08	14,06	1,53	5,58	1,60	0,47	1,13	0,22	1,01
MEM2	30,83	4,94	30,59	19,45	1,06	8,36	1,84	0,40	1,47	0,37	0,77
MIM3	39,13	12,96	18,77	18,63	0,97	5,19	0,91	0,18	1,17	0,22	1,87
MEM4	29,32	7,08	29,09	20,82	0,87	7,86	1,74	0,28	0,93	0,35	1,23
MIM5	37,71	7,12	24,76	17,51	0,89	7,56	1,42	0,78	1,29	0,32	0,62
MEM6	30,53	5,05	30,30	19,75	0,85	8,63	1,85	0,60	1,46	0,38	0,70
MIM7	29,57	9,85	28,12	19,71	0,82	7,55	1,71	0,27	1,42	0,39	0,71
MEM8	28,37	8,73	29,49	20,14	0,81	7,92	1,81	0,28	1,46	0,40	0,70
MIM9	19,81	2,21	38,13	23,30	0,67	10,31	3,25	0,28	1,66	0,57	0,59
MEM10	19,94	2,23	37,74	23,24	0,68	10,28	2,53	0,28	1,66	0,56	0,60

Observa-se que as quantidades estão compatíveis com as composições típicas dos materiais primários que foram combinados e do balanço de massa, mantendo-se a basicidade adequada.

Também de acordo com a AREMA, as porcentagens de óxido de cálcio estão inferiores a 45% e o somatório dos óxidos de alumínio e de ferro, menores que 30%, estão todos em conformidade.

Adverte-se que nas composições químicas prevaleceram altos teores de cal, mas devido às reações ocorridas, estão estabilizados pela sílica, conforme a finalidade da calibração da basicidade.

4.3.3.2 Adsorção de Nitrogênio

Na Adsorção de Nitrogênio as amostras foram submetidas aos referidos procedimentos da técnica BET, sendo obtidas também as correspondentes isotermas de adsorção/dessorção.

Nos resultados de todas as misturas, as isotermas tiveram classificação tipo III, que são características de substrato fraco, ou seja, sistemas onde as moléculas do adsorvato apresentam maior interação entre si do que com o sólido, não sendo uma análise favorável (SILVA, 2008).

Além disso, o resultado final de uma superfície específica somente possui o seu valor válido se a equação BET estabelecer uma relação linear para pressões relativas P/P_0 até 0,35 (PENA, 2002).

Para exemplo é apresentada na Figura 4.55 as curvas de adsorção e dessorção da primeira mistura MIM1, onde se observa claramente a ausência da relação linear para as pressões relativas abaixo de 0,35 e o formato da isoterma do tipo III.

Os comportamentos das demais misturas foram idênticos e, portanto os resultados indicam que o calor de adsorção entre as moléculas adsorventes foi menor do que o de liquefação, sendo assim, as moléculas do gás tiveram mais afinidade umas com as outras do que com a superfície do sólido, prejudicando a análise de área superficial e da porosidade (SILVA, 2008).

Para complementar as análises, quanto à porosidade, tem-se o ensaio de MEV, no item 4.3.5, cujas micrografias mostram a ausência de poros e discussão do resultado.

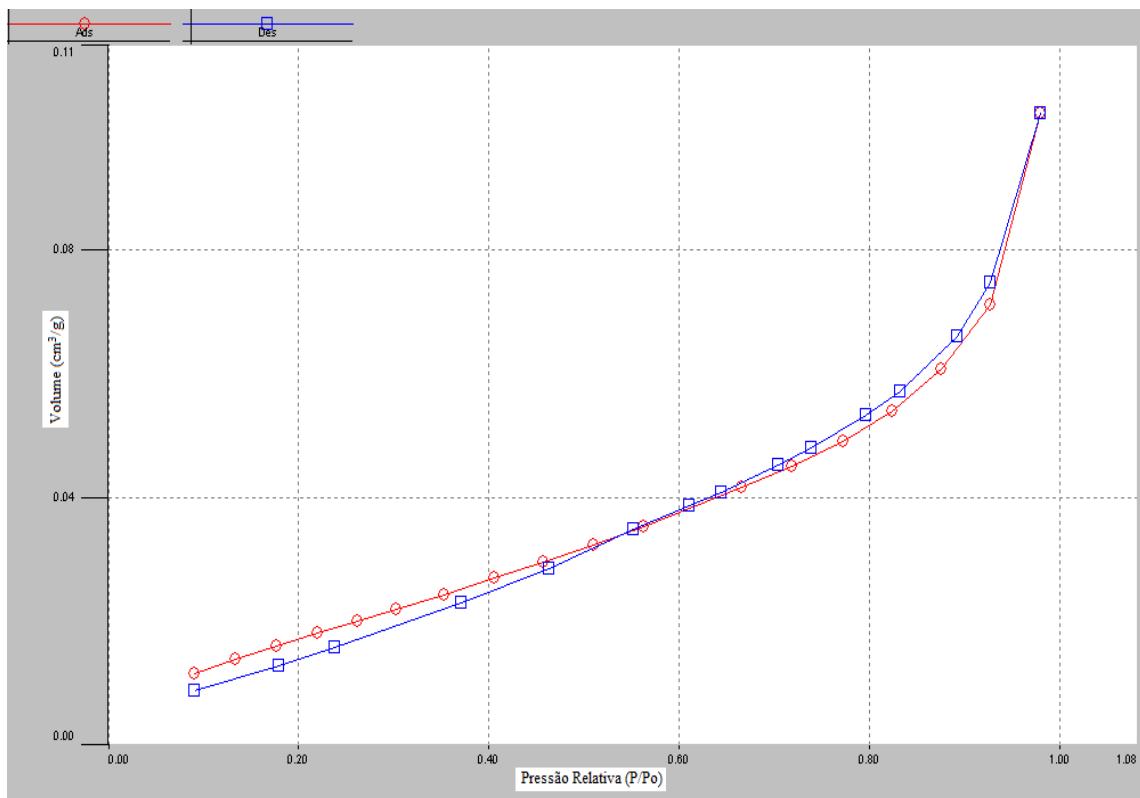


Figura 4.55: Curvas de adsorção e dessorção para MIM1.

Concluindo, nas isotermas do tipo III, incluindo as do tipo II, a quantidade adsorvida de N₂ tende para o infinito quando as pressões relativas tendem a 1, podendo corresponder à adsorção em camadas múltiplas sobrepostas e ocorrem em sólidos não porosos, ou mesmo a existência de macroporos não interligados na estrutura dos materiais.

Logo este ensaio não gerou valores para os parâmetros das misturas, pois os limites de detecção da técnica não foram atingidos, estando abaixo da sensibilidade das amostras testadas.

Isso significa que as reações ocorridas nas fusões das misturas deste estudo, alteraram a estrutura dos materiais e formaram novos cristais, com ausência ou muito poucos poros, conforme verificado nos resultados da microscopia, e que interferem diretamente na resistência mecânica desses materiais, em acordo com baixa expansão volumétrica.

4.3.3.3 Teor de Cal Livre

O ensaio para Determinação do Teor de Cal livre, feito em triplicata, forneceu as percentagens médias dos teores de cal livre resumidas na Tabela 4.39.

Tabela 4.39: Médias dos resultados do ensaio de cal livre.

Amostra	Teor de CaO livre (%)*
MIM1	0,21
MEM2	0,08
MIM3	0,25
MEM4	0,15
MIM5	0,17
MEM6	0,15
MIM7	0,23
MEM8	0,16
MIM9	0,12
MEM10	0,14

*média da triplicata.

Com a análise destes resultados pode-se considerar que o método foi eficiente para redução do teor de cal livre na escória, bem inferiores a 3%, que é fator predominante na capacidade de expansão volumétrica.

Nota-se também que o fato das proporções de massa das misturas intervém diretamente sobre a redução da cal, pois se observa a tendência de menores teores em todas as amostras de equilíbrio em relação às de igualdade de massa, exceto para as que utilizaram a lama 2, ETAV, inicialmente notificada por possuir maior concentração de CaO do que a própria escória.

O gráfico da Figura 4.56 mostra a evolução decrescente dos teores de cal livre determinados pelos ensaios, considerando desde os resultados da escória recém

produzida, dos materiais adicionados e dos novos produtos, corroborando a interpretação positiva quanto à expansão.

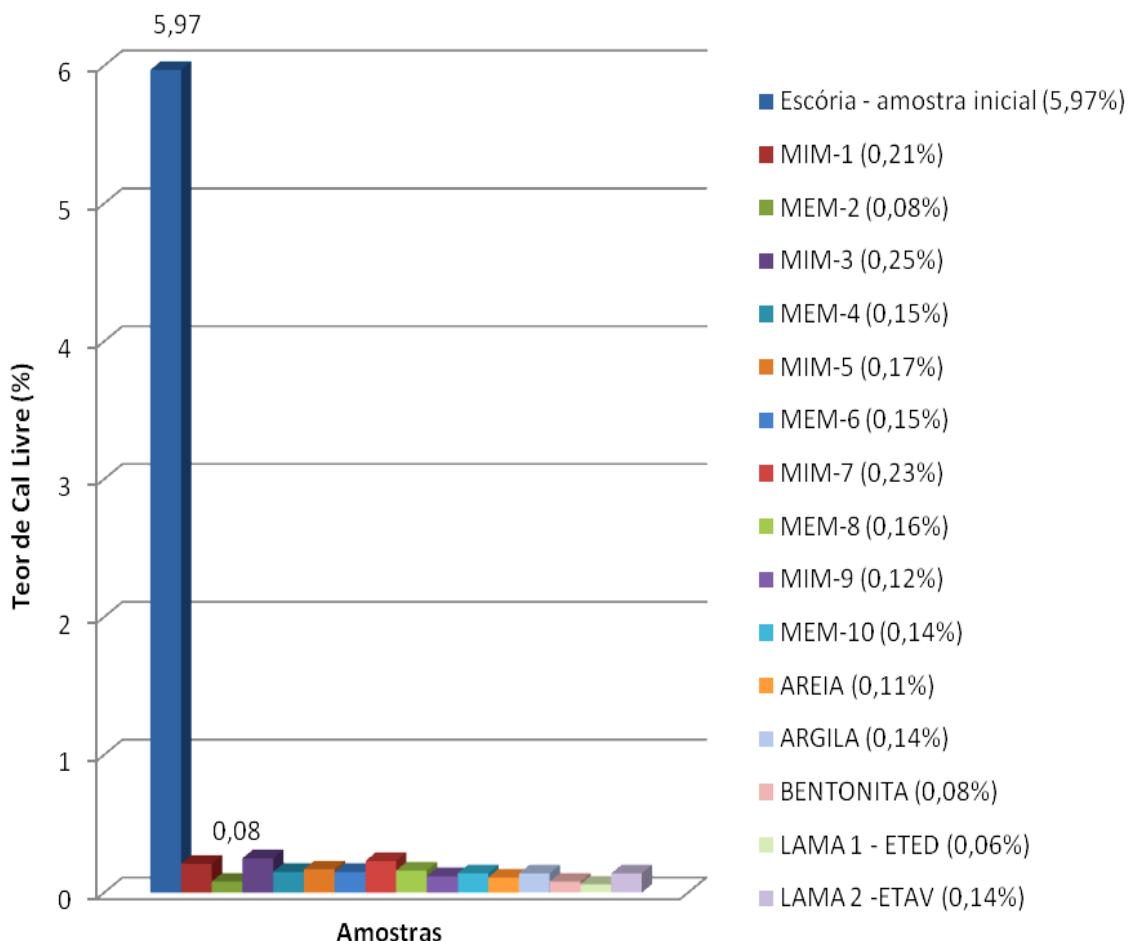


Figura 4.56: Gráfico do Teor de Cal livre determinado em todas as amostras.

4.3.3.4 Termogravimetria

No ensaio de Termogravimetria, baseado nas modificações de peso que ocorrem durante o aquecimento das amostras, a Figura 4.57 reúne as termoanálises obtidas pelas curvas de termogravimetria (TG) das misturas, mostrando uma breve comparação entre as mesmas.

De modo geral houve decréscimo das perdas de massa nas misturas em comparação com as perdas nos materiais primários, além do número de picos de reações.

Essa diminuição pode estar relacionada à estabilização dos compostos químicos após a

fusão, o que indica bons resultados em termos do desaparecimento das reações com Ca(OH_2).

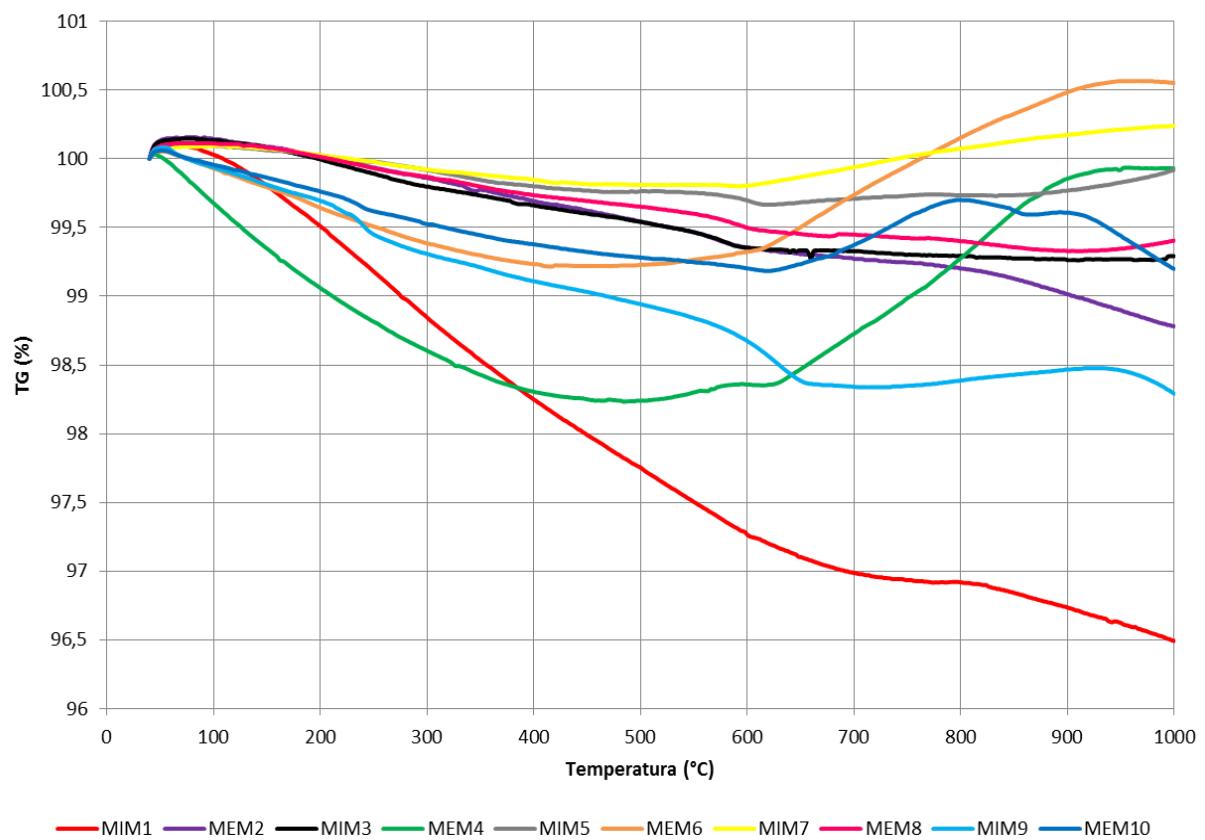


Figura 4.57: Curvas TG/DTG das misturas.

Esse resultado era esperado devido ao processo de fusão desidratar e fortalecer estruturalmente as ligações químicas entre os elementos constituintes.

Como o foco do trabalho neste ensaio é quantificar a parcela hidratada da cal para obter precisão no valor da cal livre, neste caso não haverá diferença, sendo o ensaio de determinação do teor de cal livre por etilenoglicol suficiente.

4.3.4 Caracterização mineralógica das misturas

Quanto ao ensaio Difração de RX os resultados para as misturas são apresentados nas Figuras 4.58 a 4.67 e mostram a ocorrência das fases mineralógicas dos padrões difratométricos.

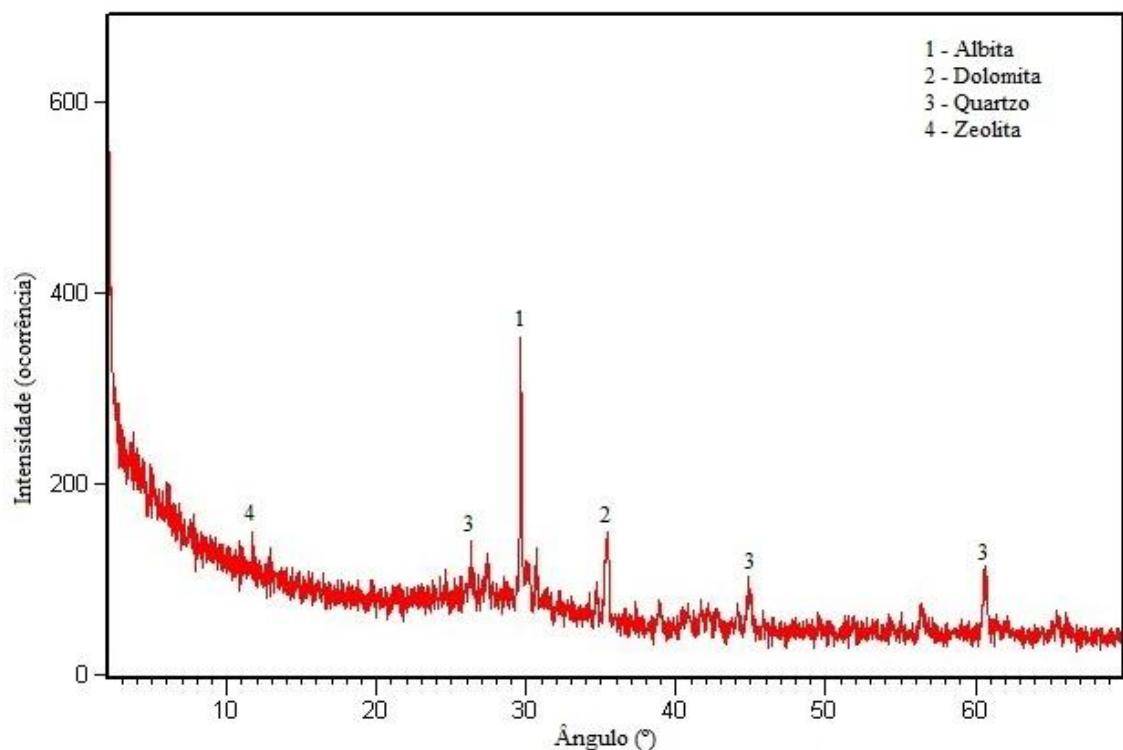


Figura 4.58: Difratograma da amostra MIM1.

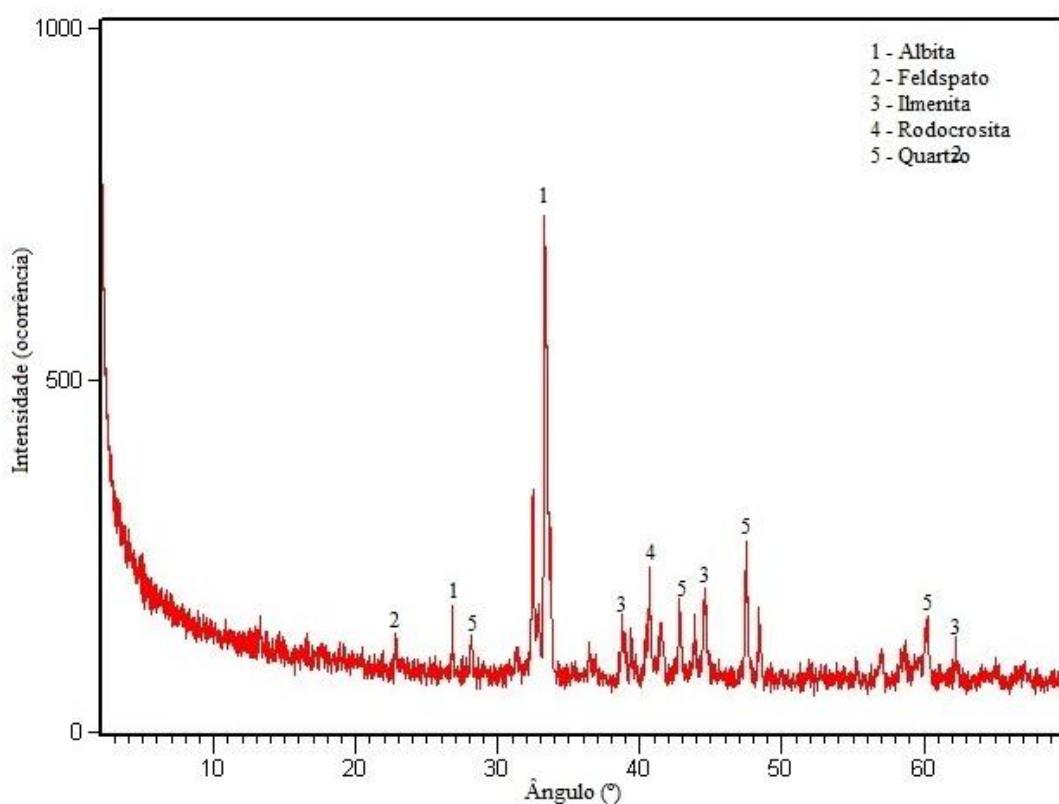


Figura 4.59: Difratograma da amostra MEM2.

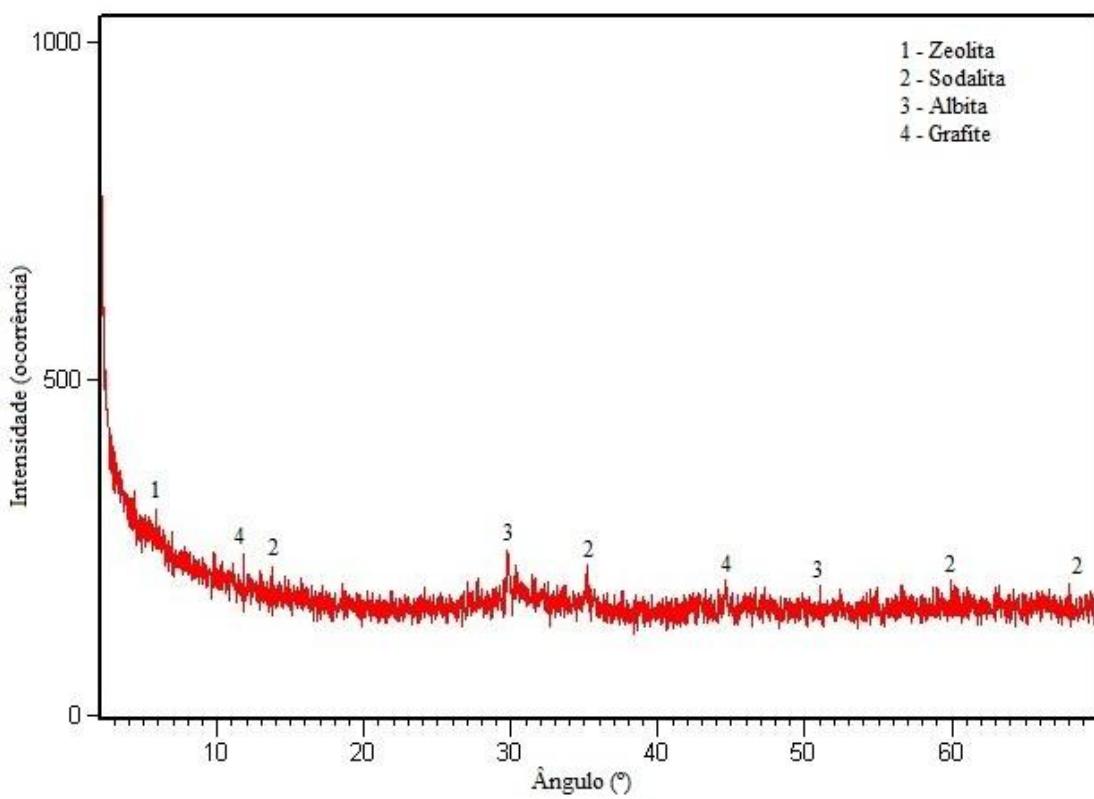


Figura 4.60: Difratograma da amostra MIM3.

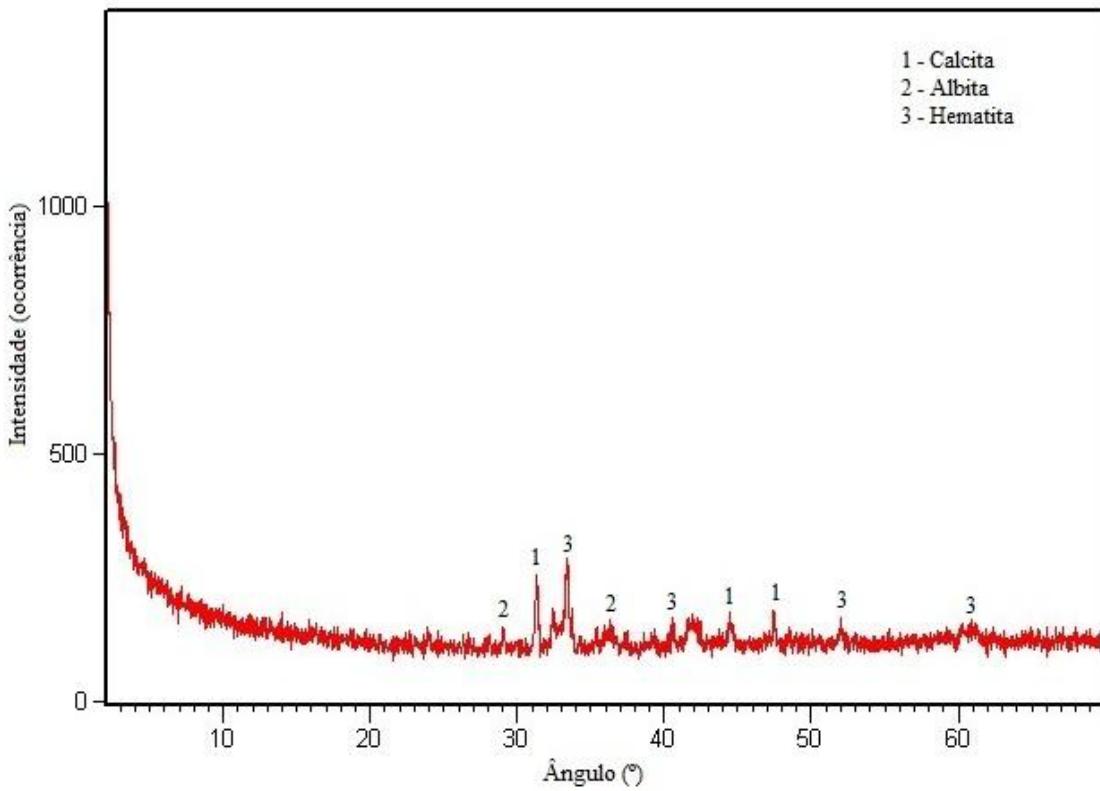


Figura 4.61: Difratograma da amostra MEM4.

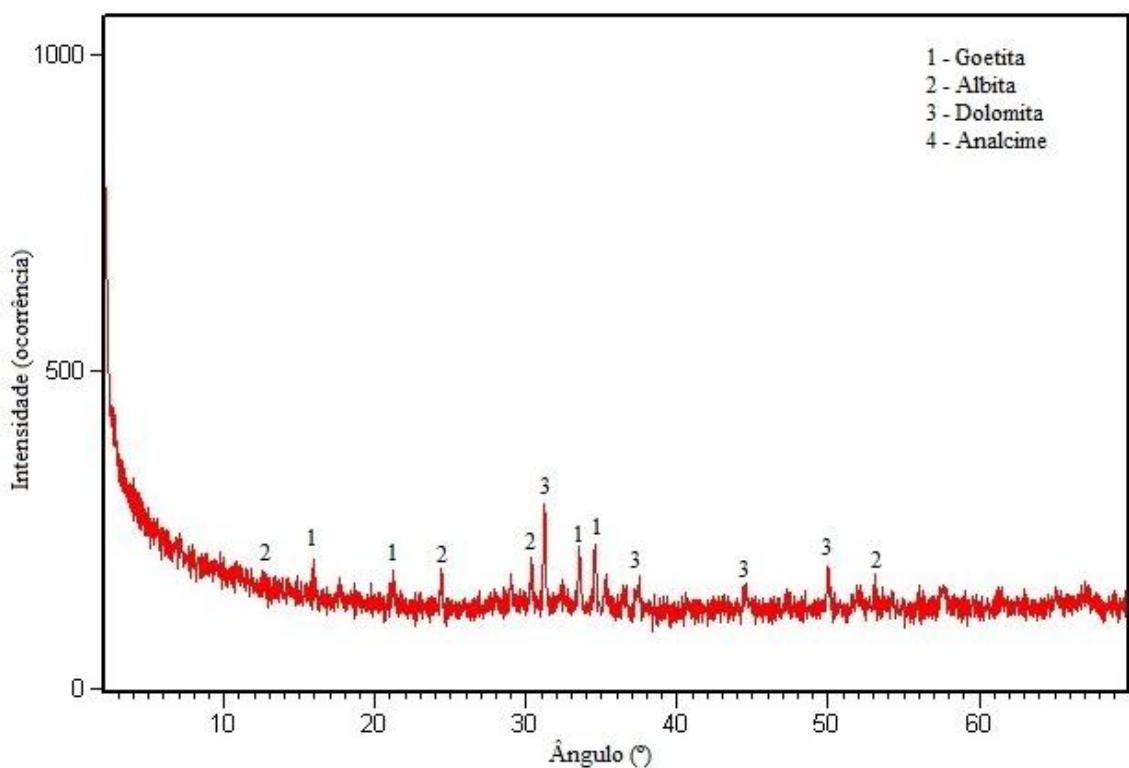


Figura 4.62: Difratograma da amostra MIM5.

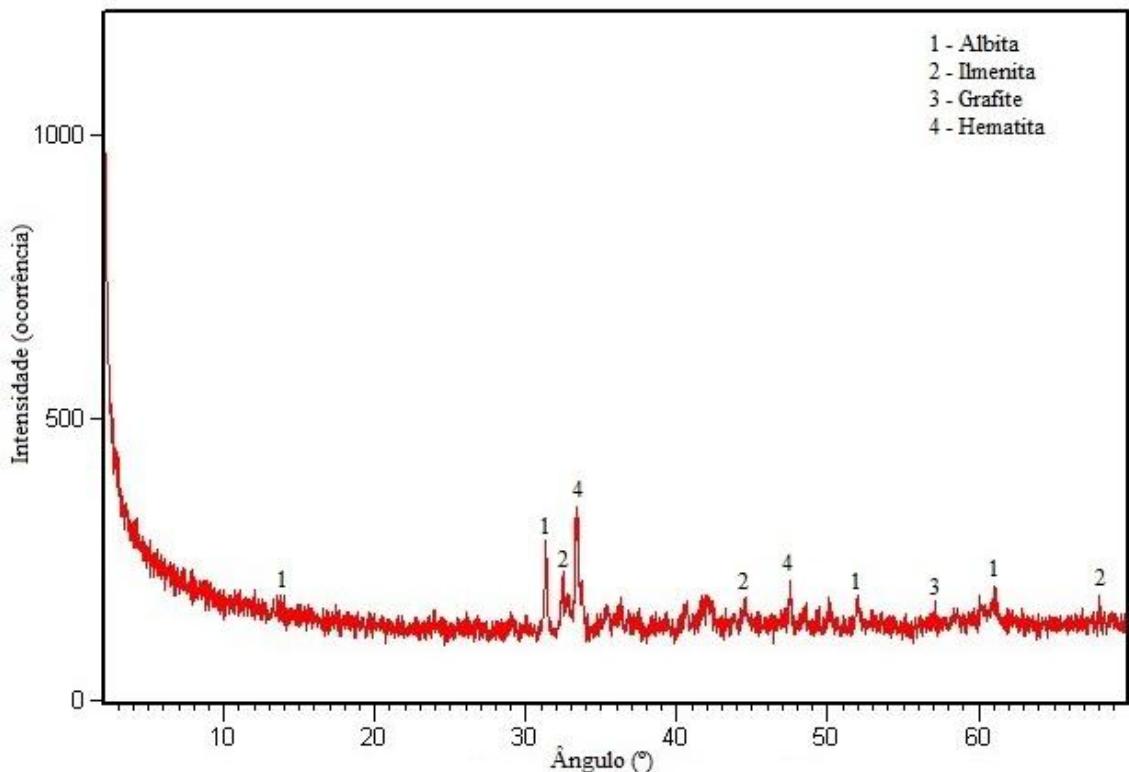


Figura 4.63: Difratograma da amostra MEM6.

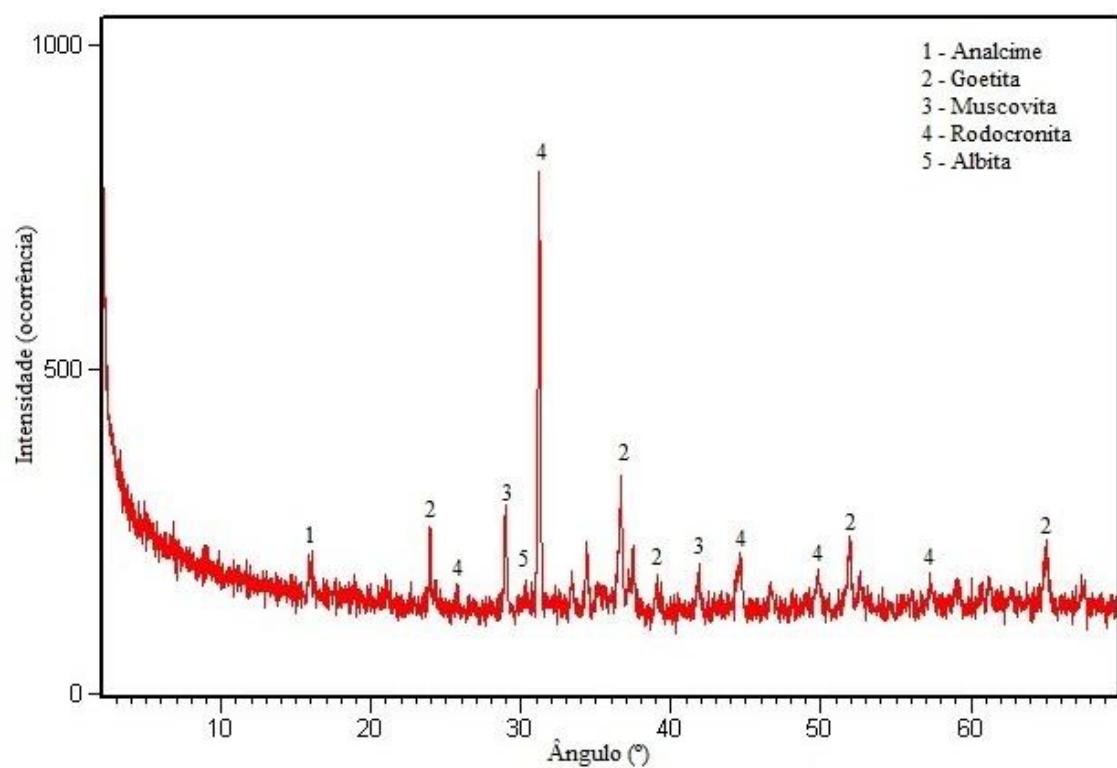


Figura 4.64: Difratograma da amostra MIM7.

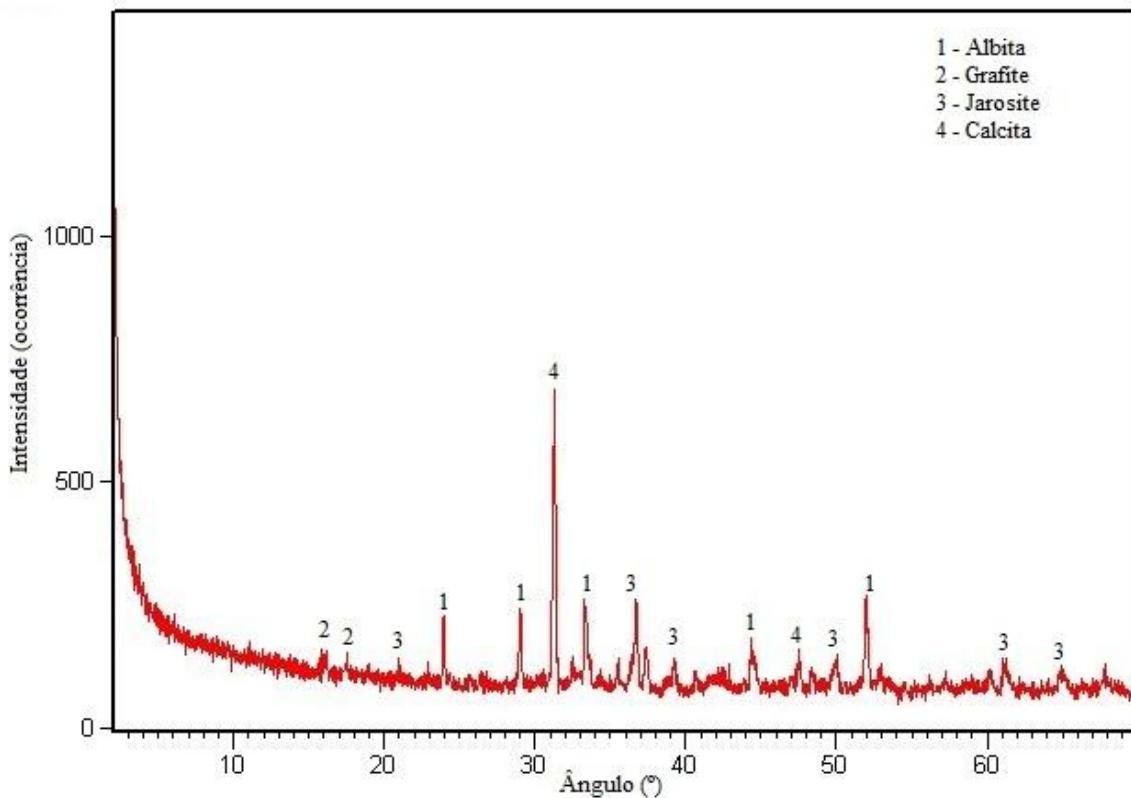


Figura 4.65: Difratograma da amostra MEM8.

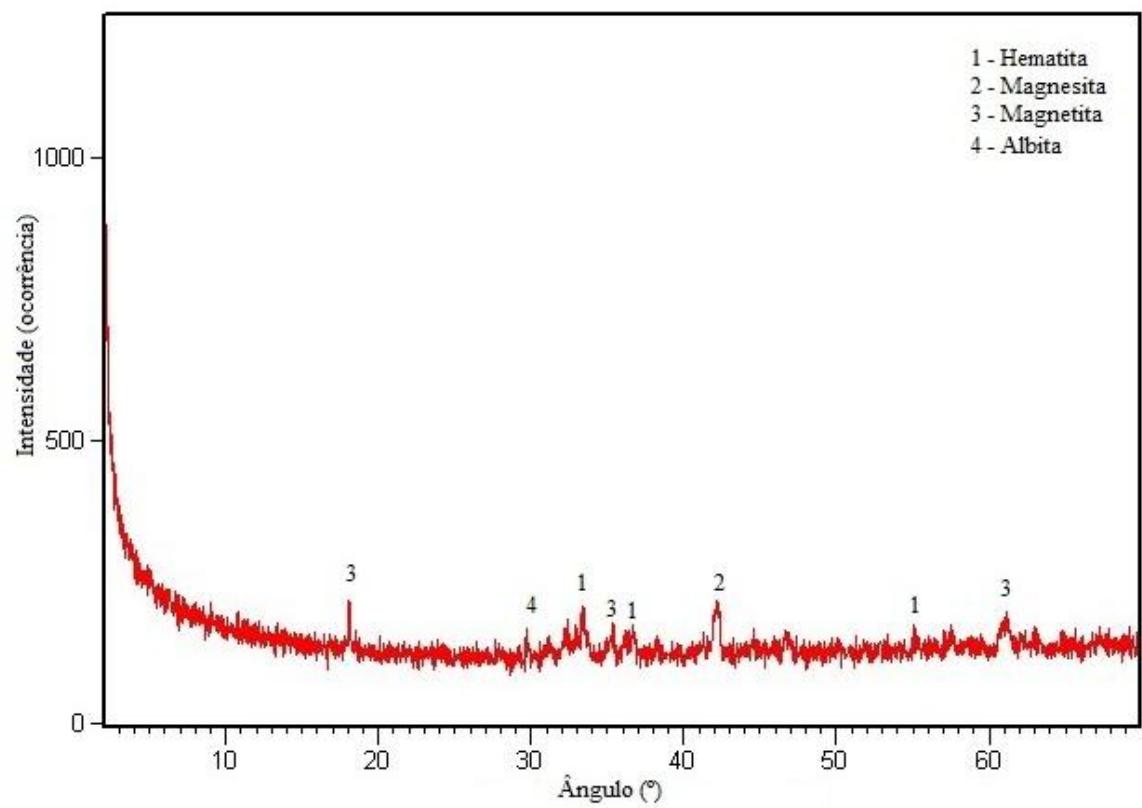


Figura 4.66: Difratograma da amostra MIM9.

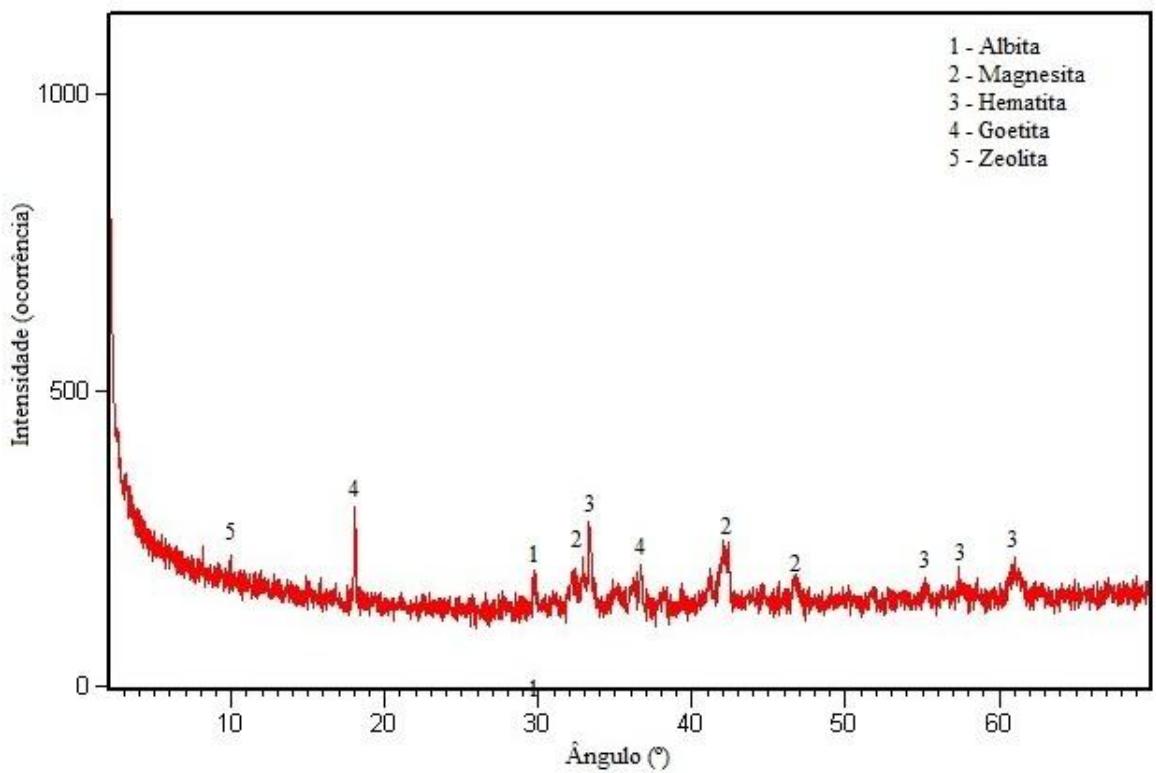


Figura 4.67: Difratograma da amostra MEM10.

Na Tabela 4.40, encontram-se os principais constituintes mineralógicos encontrados nas amostras analisadas.

Tabela 4.40: Composição mineralógica dos materiais.

Amostra	Constituintes mineralógicos
MIM1	Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), Dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), Quartzo (SiO_2), Zeolita ($\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
MEM2	Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), Feldspato ((Na, K) $\text{Al Si}_2\text{O}_3$, Al_2SiO_3 , Ba AlSi_2O_3), Ilmenita (FeTiO_3), Rodocrosita (MnCO_3), Quartzo (SiO_2)
MIM3	Zeolita ($\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), Sodalita ($\text{Na}_4\text{Al}_3(\text{SiO}_4)_3\text{Cl}$), Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), Grafite (C_n)
MEM4	Calcita (CaCO_3), Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), Hematita (Fe_2O_3)
MIM5	Goetita (FeO(OH)), Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), Dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), Analcime ($\text{NaAlSi}_2\text{O}_6\cdot \text{H}_2\text{O}$)
MEM6	Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), Ilmenita (FeTiO_3), Grafite (C_n), Hematita (Fe_2O_3)
MIM7	Analcime ($\text{NaAlSi}_2\text{O}_6\cdot \text{H}_2\text{O}$), Goetita (FeO(OH)), Muscovita ($\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$), Rodocrosita (MnCO_3), Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)
MEM8	Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), Grafite (C_n), Jarosite ($\text{KFe}_3+3(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2$), Calcita (CaCO_3)
MIM9	Hematita (Fe_2O_3), Magnesita (MgCO_3), Magnetita (Fe_3O_4), Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)
MEM10	Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), Magnesita (MgCO_3), Hematita (Fe_2O_3), Goetita (FeO(OH)), Zeolita ($\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

Todas as misturas, mesmo com o resfriamento atmosférico relativamente rápido, apresentaram estado cristalino e não vítreo, como esperado.

O estado amorfo, portanto estaria relacionado a um processo de resfriamento brusco das misturas, por exemplo, em água. Nas condições realizadas houve tempo para recristalização dos materiais como mostram os resultados do ensaio.

Analizando os componentes formados, percebe-se a presença predominante do mineral albita, em todas as misturas. A albita é um tipo de feldspato abundante em rochas ígneas e possui uso como matéria prima na indústria de cerâmica e de vidro. Esse feldspato é constituinte principal da maioria dos gnaisses e xistos e ocorrem também em muitas rochas geradas por metamorfismo termal, regional e dinâmico (OLIVEIRA, 2012).

Este mineral não apareceu nos resultados de exatamente todas as amostras primárias, mostrando portanto, que a fusão da escória com argilominerais gerou novos cristais.

Enquanto, dolomita e magnesita foram detectados expressivamente nas amostras MIM1, MIM5, MIM9 e MEM10, mas não foram encontrados nos resultados anteriores às misturas. Isso significa que novos minerais se formaram com a ordenação atômica da estrutura dos novos materiais.

Outros minerais frequentes nas misturas foram hematita e goetita, evidenciando o alto teor de ferro nas amostras, que sugere uma pré-separação magnética para melhor aproveitamento do recurso. Quanto à cal livre, ressalta-se sua ausência, mesmo presente anteriormente nas amostras de escória.

Com a fusão e a capacidade de troca catiônica em meio líquido dos componentes misturados, houve a estabilização química do óxido de cálcio junto a elementos de elevada afinidade eletrônica, como sódio, potássio e alumínio, principalmente, observada pela formação de minerais como muscovita, dolomita, albíta e feldspatos.

De forma geral, a não existência dos compostos responsáveis pela expansão do material nas misturas é um indicativo de que a escória foi realmente curada.

Conclui-se ainda por esta discussão de resultados que a mistura preferencial foi MEM2, pela ausência dos elementos químicos Ca e Mg, responsáveis pela expansão da escória, mesmo que ligados a compostos estáveis e ainda os maiores picos do mineral albíta.

4.3.5 Caracterização morfológica das misturas

A Microscopia Eletrônica de Varredura, MEV, é empregada em caráter pontual para caracterização das diferentes fases minerais presentes na amostra.

A análise química foi feita no material pulverizado e a sequência das Figuras 4.68 a 4.76 e das Tabelas 4.41 a 4.50, apresenta a distribuição morfológica típica obtida para cada mistura.

Os resultados reúnem as espécies químicas que foram encontradas e suas respectivas porcentagens para a análise pontual efetuada, em nível quantitativo que pode ser comparado as demais análises químicas.

A discussão dos resultados em termos texturais e homogeneidade de partículas se encontram ao final da série de dados gerados por este ensaio.



Figura 4.68: Morfologia típica encontrada na amostra MIM 1.

Tabela 4.41: Análise quantitativa em cada ponto da Figura 4.76.

Espécies Químicas (% em massa)	MIM1_ponto1	MIM1_ponto2	MIM1_ponto3
MgO	-	10.18	-
Al ₂ O ₃	40.56	1.15	0.001
SiO ₂	10.94	56.05	39.85
CaO	-	32.61	60.15
Fe ₂ O ₃	48.50	-	-

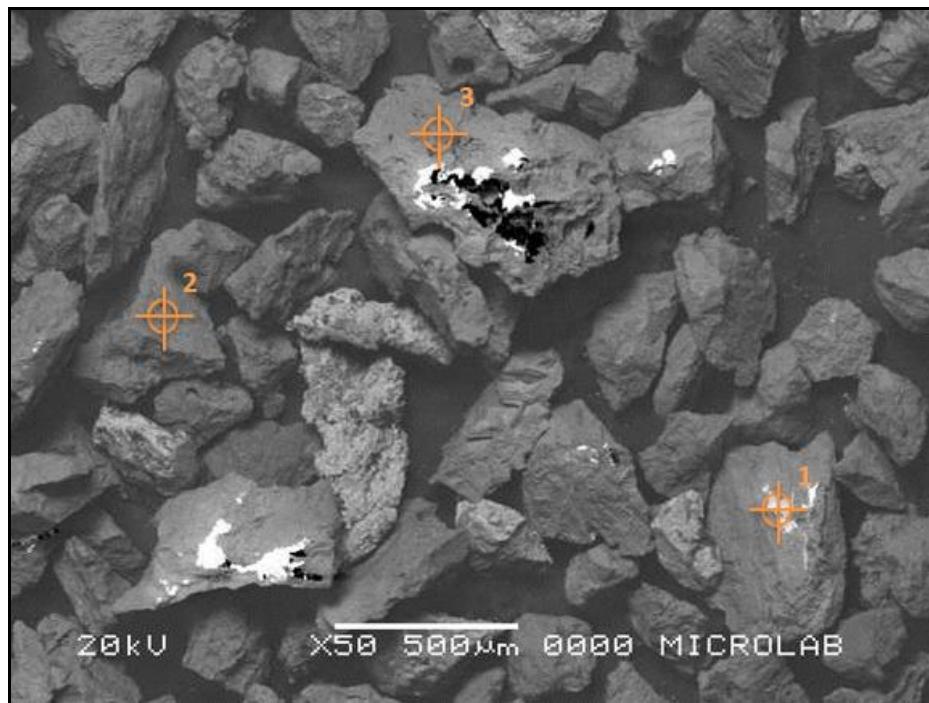


Figura 4.69: Morfologia típica encontrada na amostra MEM 2.

Tabela 4.42: Análise quantitativa em cada ponto da Figura 4.77.

Espécies Químicas (% em massa)	MEM2_ponto1	MEM2_ponto2	MEM2_ponto3
MgO	11.69	4.01	12.87
Al ₂ O ₃	8.79	11.22	6.98
SiO ₂	40.71	37.00	25.80
CaO	38.80	47.78	48.21
NiO	-	-	6.15

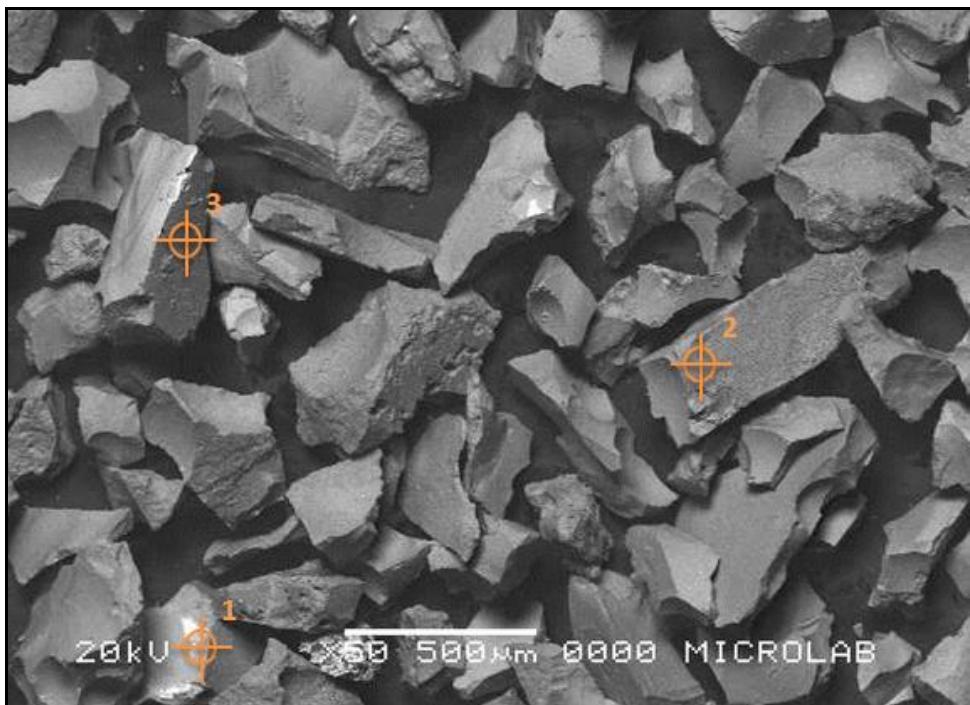


Figura 4.70: Morfologia típica encontrada na amostra MIM 3.

Tabela 4.43: Análise quantitativa em cada ponto da Figura 4.78.

Espécies Químicas (% em massa)	MIM3_ponto1	MIM3_ponto2	MIM3_ponto3
Al ₂ O ₃	0.22	19.18	28.65
SiO ₂	0.40	80.82	44.63
CaO	-	-	5.79
Fe ₂ O ₃	99.38	-	20.94

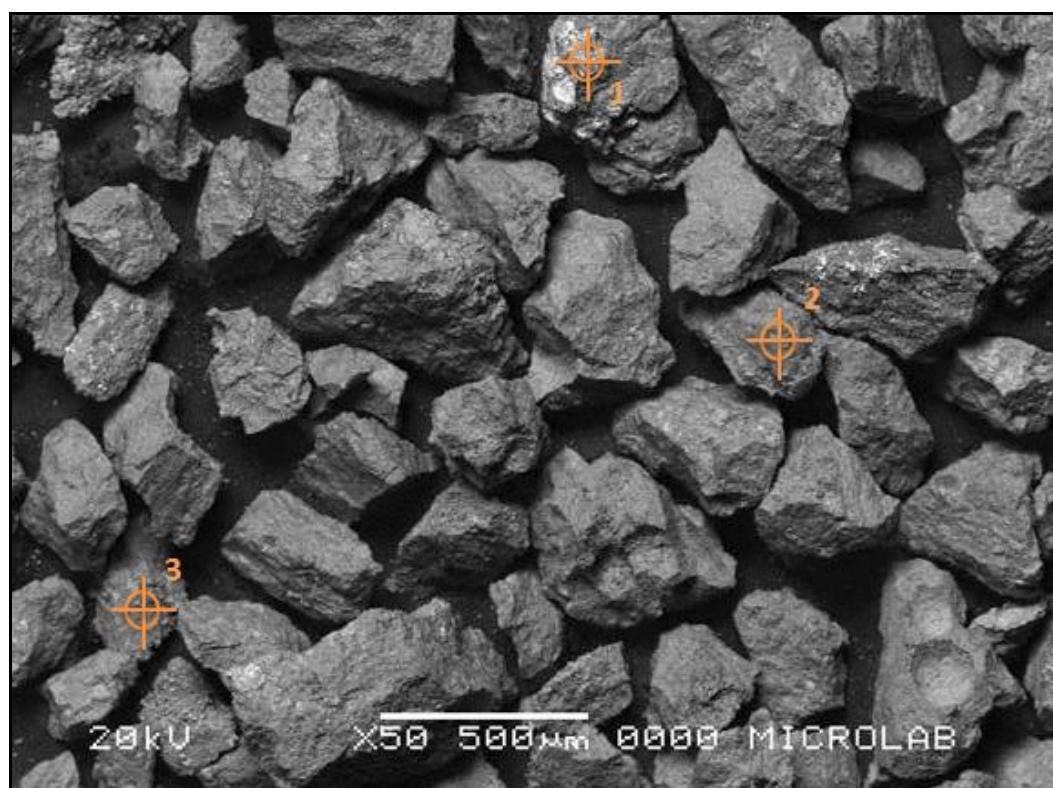


Figura 4.71: Morfologia típica encontrada na amostra MEM 4.

Tabela 4.44: Análise quantitativa em cada ponto da Figura 4.79.

Espécies Químicas (% em massa)	MEM4_ponto1	MEM4_ponto2	MEM4_ponto3
MgO	11.17	10.11	-
Al ₂ O ₃	16.02	1.60	39.24
SiO ₂	28.91	32.50	60.76
CaO	34.44	47.25	-
TiO ₂	-	8.54	-
MnO	9.45	-	-

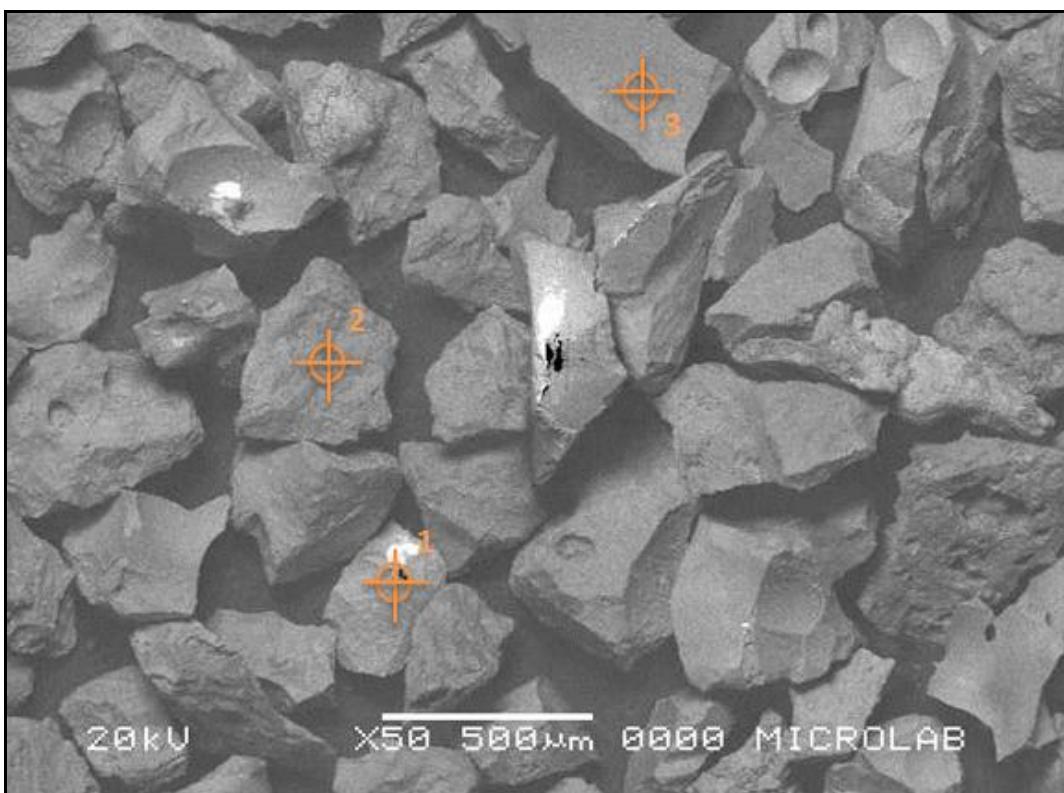


Figura 4.72: Morfologia típica encontrada na amostra MIM 5.

Tabela 4.45: Análise quantitativa em cada ponto da Figura 4.80.

Espécies Químicas (% em massa)	MIM5_ponto1	MIM5_ponto2	MIM5_ponto3
BeO	99.41	-	99.46
Al ₂ O ₃	0.14	-	0.17
SiO ₂	0.45	46.53	0.38
CaO	-	53.47	-

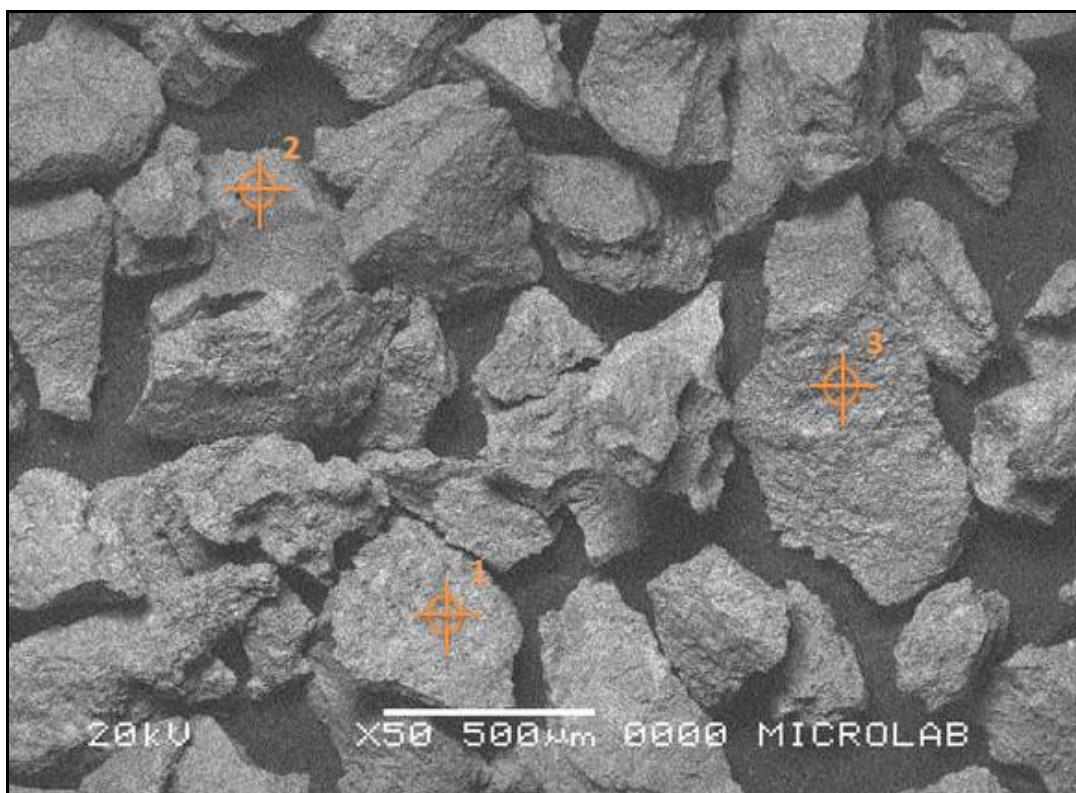


Figura 4.73: Morfologia típica encontrada na amostra MEM 6.

Tabela 4.46: Análise quantitativa em cada ponto da Figura 4.81.

Especies Químicas (% em massa)	MEM6_ponto1	MEM6_ponto2	MEM6_ponto3
BeO	-	88.00	-
Al ₂ O ₃	-	2.60	10.71
SiO ₂	32.54	5.40	27.70
CaO	67.46	4.37	61.59

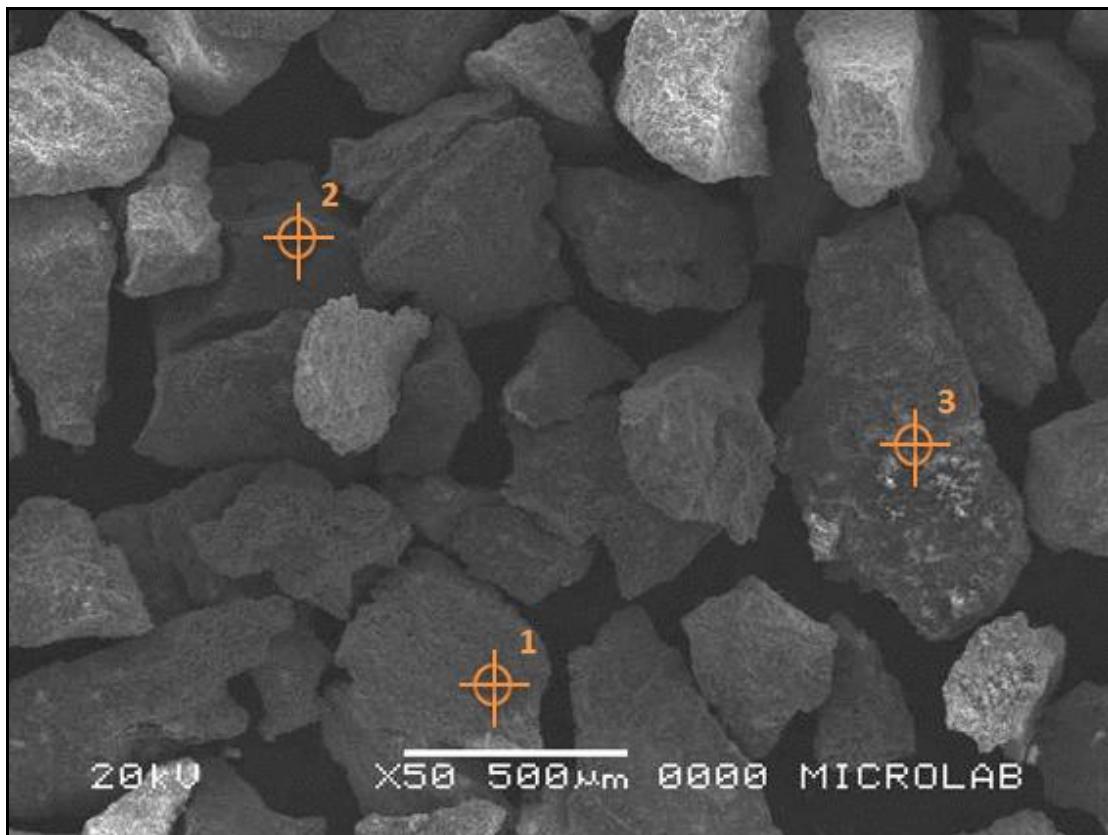


Figura 4.74: Morfologia típica encontrada na amostra MIM 7.

Tabela 4.47: Análise quantitativa em cada ponto da Figura 4.82.

Espécies Químicas (% em massa)	MIM7_ponto1	MIM7_ponto2	MIM7_ponto3
BeO	-	99.65	-
Al ₂ O ₃	11.20	-	-
SiO ₂	37.28	0.35	45.49
CaO	51.52	-	54.51

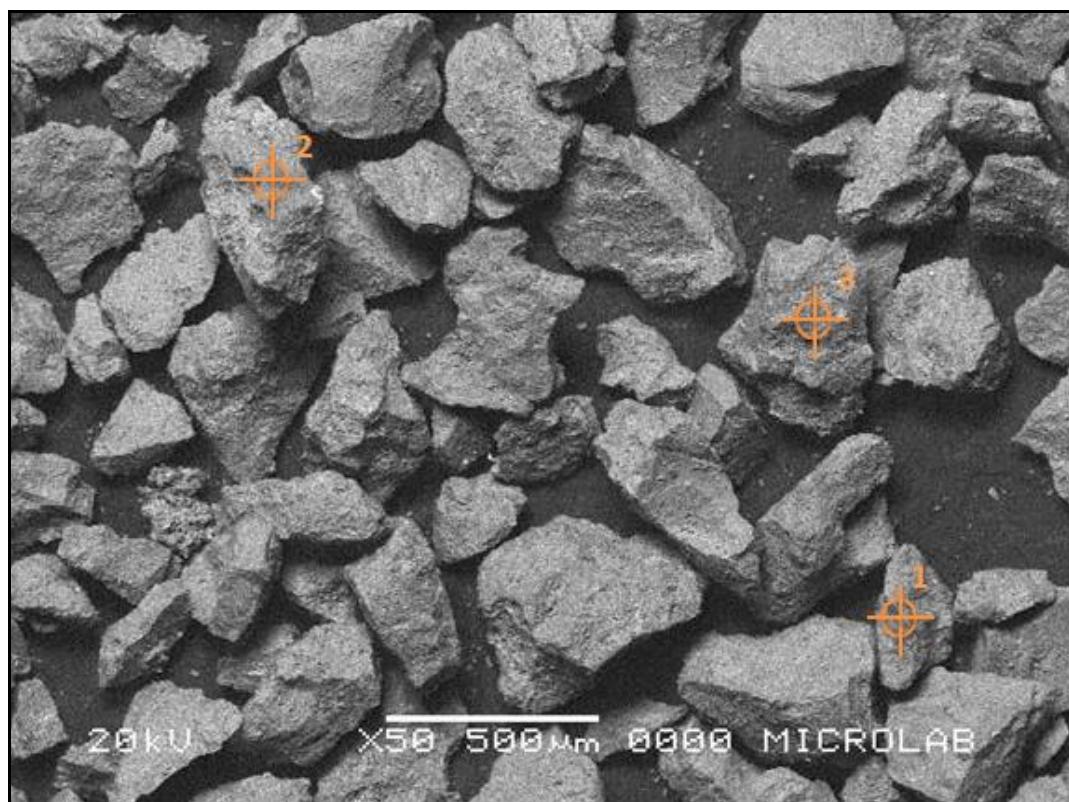


Figura 4.75: Morfologia típica encontrada na amostra MEM 8.

Tabela 4.48: Análise quantitativa em cada ponto da Figura 4.83.

Espécies Químicas (% em massa)	MEM8_ponto1	MEM8_ponto2	MEM8_ponto3
BeO	99.64	-	-
MgO	-	13.06	-
Al ₂ O ₃	-	12.41	-
SiO ₂	0.36	30.50	33.24
CaO	-	44.03	66.76

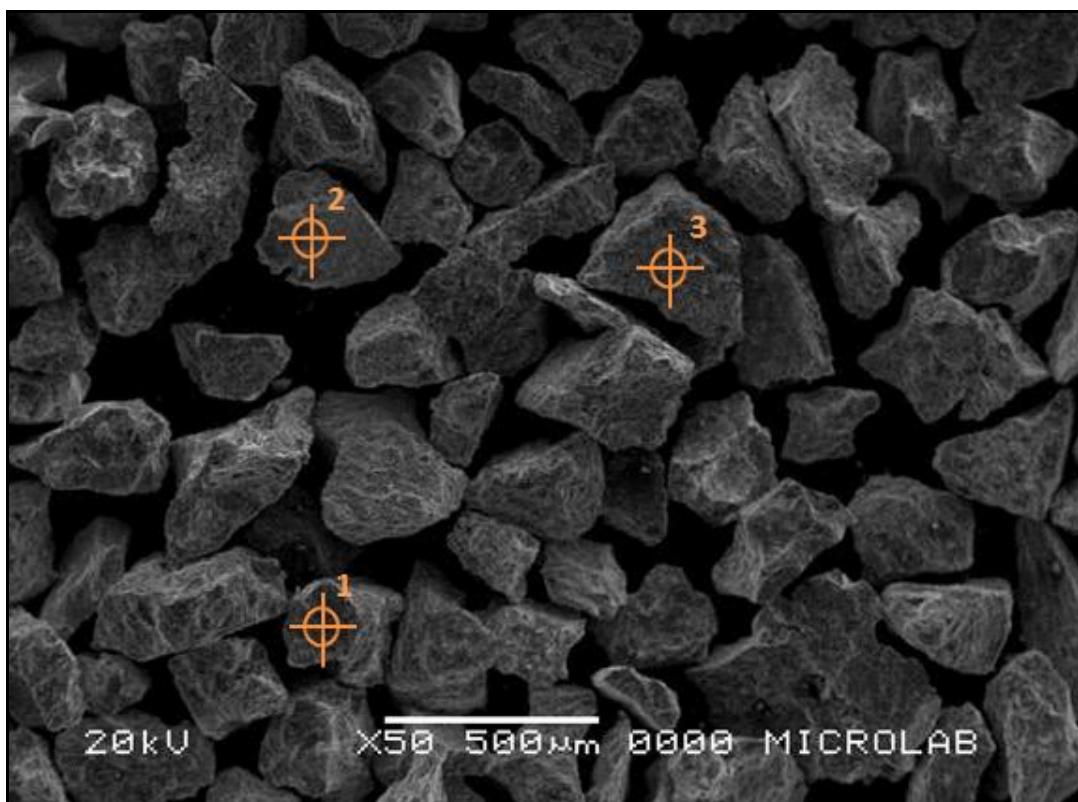


Figura 4.76: Morfologia típica encontrada na amostra MIM 9.

Tabela 4.49: Análise quantitativa em cada ponto da Figura 4.84.

Espécies Químicas (% em massa)	MIM9_ponto1	MIM9_ponto2	MIM9_ponto3
Al ₂ O ₃	0.07	-	21.70
SiO ₂	17.13	42.48	14.73
SO ₃	6.57	-	6.19
CaO	36.98	-	31.17
Sc ₂ O ₃	-	0.58	-
MgO	29,53	-	2.28
Fe ₂ O ₃	-	-	23.93
As ₂ O ₃	9.25	40,01	-
Br	-	13.34	-
MoO ₃	-	1.72	-

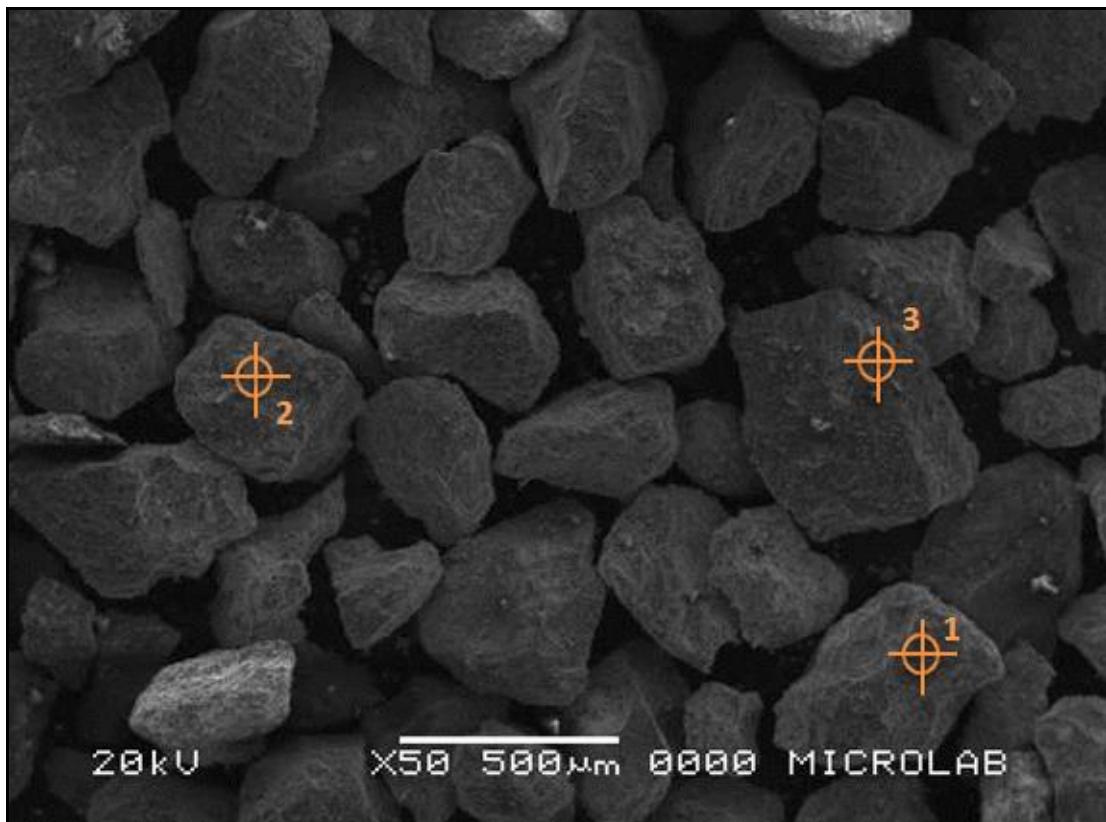


Figura 4.77: Morfologia típica encontrada na amostra MEM 10.

Tabela 4.50: Análise quantitativa em cada ponto da Figura 4.85.

Espécies Químicas (% em massa)	MEM10_ponto1	MEM10_ponto2	MEM10_ponto3
Al ₂ O ₃	3.51	-	28.71
SiO ₂	31,53	-	11.93
SO ₃	-	1.07	-
CaO	29,26	36.69	-
TiO ₂	-	1.01	-
MnO	-	6.80	-
Fe ₂ O ₃	-	41.79	16.88
As ₂ O ₃	7.54	-	-
SrO	-	3.52	-
MoO ₃	-	-	5.04
TeO ₂	3.28	-	-

Na Tabela 4.51, encontra-se o resumo dos resultados da morfologia das misturas estudadas e os principais constituintes químicos identificados nas amostras.

Tabela 4.51: Resultados morfológicos dos misturas.

Amostra	Distribuição das partículas	Textura	Constituintes químicos predominantes (% peso)
MIM1	Irregular	Homogênea e rugosa	Si, Ca, Fe e Al
MEM2	Irregular	Homogênea e rugosa	Si, Ca e Al
MIM3	Irregular	Homogênea e lisa	Si, Al e Fe
MEM4	Irregular	Heterogênea e rugosa	Si, Ca, Al
MIM5	Irregular	Heterogênea e rugosa	Si, Ca, Be
MEM6	Irregular	Homogênea e rugosa	Si, Ca, Be
MIM7	Irregular	Heterogênea e rugosa	Si, Ca, Be e Al
MEM8	Irregular	Heterogênea e rugosa	Si, Ca, Mg e Al
MIM9	Irregular	Homogênea e lisa	Si, Mg e Fe
MEM10	Irregular	Homogênea e lisa	Si, Ca, e Fe

O resultado obtido por meio da MEV foi parecido com o obtido pela análise quantitativa realizada por Digestão Ácida das misturas, reafirmando os compostos informados anteriormente. Como esperado, os compostos encontrados mostram uma igualdade das concentrações de Si e Ca, devido ao ajuste de basicidade pretendido nesse estudo.

Outros compostos em destaque são Al, Fe e Mg, também localizados pelos demais ensaios químicos, mas sem grande relevância, além de impurezas como o elemento Be. As micrografias mostram os aspectos das estruturas em grande escala de aproximação, permitindo verificar a textura dos grãos e distribuição das partículas de cada material.

A princípio, os argilominerais acrescidos à escória, apresentavam partículas regulares em sua maioria, com texturas lisas como a areia e a argila, o que não contribui para a estabilidade de uma conformação como o lastro. Mas em termos dos novos materiais gerados, nota-se que todos se tornaram microscopicamente irregulares, o que confere maior embricamento entre os grãos, tornando a estrutura fisicamente mais estável.

Quanto às proporções das misturas se destacam as de equilíbrio de massa que apresentaram texturas mais ásperas e rugosas Percebem-se as presenças de agregações e grãos de hematita, goethita, quartzo e albita, em muitas amostras.

Morfologicamente, as hematitas têm a forma lamelar, placóide com superfície mais lisa e regular; enquanto que os minerais de goethita apresentam uma forma mais áspera e irregular. Os grãos de quartzo são arredondados e subcirculares, e por outro lado, a albita apresenta-se em bloco e placa.

Também, é possível observar a distribuição de poucos poros em meio às estruturas, evidenciando o material não poroso identificado pelo ensaio de adsorção de N₂. Esses pequenos ou nenhum poros são isolados, ou seja, não existe comunicação entre eles e esse fato leva a menor absorção de água pelas amostras e susceptibilidade ao intemperismo (OLIVEIRA, 2012).

Logo, conforme o resumo das morfologias apresentadas pelos materiais na Tabela 4.51, o material de melhor desempenho para lastro de ferrovia é aquele identificado como a mistura MEM2, de escória acrescida de areia.

4.3.6 Caracterização ambiental das misturas

4.3.6.1 Ensaio de lixiviação

Nos resultados do teste de lixiviação para as misturas todos os parâmetros inorgânicos mantiveram-se abaixo do limite permitível da norma ambiental, conforme já era esperado já que todos os materiais primários combinados eram Classe II, ou não perigosos.

Este mesmo diagnóstico foi válido também para a duplicata do ensaio e os resultados são apresentados nas planilhas dos Anexos I e II.

4.3.6.2 Ensaio de solubilização

Os resultados do teste de solubilização são apresentados para o parâmetro inorgânico que não passou conforme a norma ambiental para os materiais primários, ou seja, o elemento alumínio, e estão indicados na Tabela 4.52 para todas as misturas.

Tabela 4.52: Solubilização - parâmetros inorgânicos para as misturas.

Alumínio - Al	Concentração no Resíduo Solubilizado das misturas	Concentração no Resíduo Solubilizado das misturas – DUPLICATA	Limites da Norma NBR10004 (ABNT, 2004)	Limite de Quantif.- LQ
	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
MIM1	0,367	0,452	0,2	0,0024
MEM2	0,354	0,398	0,2	0,0024
MIM3	2,733	1,423	0,2	0,0024
MEM4	1,885	0,992	0,2	0,0024
MIM5	1,640	1,830	0,2	0,0024
MEM6	1,921	2,560	0,2	0,0024
MIM7	0,621	0,762	0,2	0,0024
MEM8	0,650	0,920	0,2	0,0024
MIM9	0,490	0,482	0,2	0,0024
MEM10	0,532	0,412	0,2	0,0024

LQ – Limite de Quantificação do equipamento utilizado: ICP-OES

De acordo com as quantidades registradas nota-se que o teor do elemento alumínio aumentou nas misturas ficando acima do limite permitido, enquadrando assim os novos compostos formados como resíduo Classe II-A (Não Perigoso e Não Inerte). Este mesmo diagnóstico foi válido também para a duplicata do ensaio e os resultados dos demais elementos são apresentados nas planilhas dos Anexos III e IV. O aumento da

concentração de alumínio justifica-se pelos teores se somarem dos elementos utilizados para cada mistura, notado pela tendência dos valores.

Os demais elementos não ultrapassaram os limites permissíveis, como pode ser conferido nos anexos citados.

Como escolha dos novos materiais mais inertes, ou seja, com menores teores de alumínio, mesmo que acima do permitido pela norma, são apontadas as amostras MEM2 e MIM9, formadas por escória e areia ou lama 2, respectivamente, que foram os argilominerais inertes, inicialmente classificados.

A caracterização ambiental, portanto, confere viabilidade aos novos compostos para uso em lastro, já que se classificam necessariamente como resíduo não perigoso, sendo não inertes, o que não interfere no seu credenciamento.

Uma abordagem geral dos resultados leva a somatória de benefícios causados às propriedades dos novos materiais gerados, conforme cada grupo de ensaio realizado, como:

- ✓ Físico: melhoria na graduação da maioria das misturas;
- ✓ Químico: eficiência no ajuste de basicidade CaO/SiO_2 , com notória redução do teor de cal livre especialmente nas misturas de equilíbrio de massa, tornando mínima a expansão volumétrica esperada, além de aumento da densidade e/ou da resistência mecânica com formação de materiais não porosos;
- ✓ Mineralógico: permanência e formação de cristais presentes em rochas resistentes;
- ✓ Morfológico: formação de estruturas e distribuição de partículas irregulares de textura rugosa e áspera;
- ✓ Ambiental: nenhuma mistura apresentou caráter de periculosidade e todas classificadas como II-A, não perigosas e não inertes.

Dentre as misturas realizadas neste estudo, pode-se concluir pelos resultados alcançados um melhor desempenho para cada tipo de ensaio, conforme resume a Tabela 4.53 comparativa dos dados obtidos para os materiais primários e para as misturas.

Nesta planilha de dados são abordados os aspectos referentes a cada tipo de ensaio de caracterização, de acordo com a execução do experimento, antes e após as fusões, e o parecer conclusivo decorrente da análise dos resultados finais apresentados, elegendo a mistura de melhor performance para cada teste, em negrito.

Tabela 4.53: Resumo dos resultados de caracterização dos materiais primários e misturas.

TIPOS DE ENSAIOS	Físico	Mineralógico	Morfológico	Ambiental		Químico				
	Granulometria	Difração RX	MEV	Lix	Sol	Termogravimetria	Teor de Ca _{Livre}	Digestão ácida	Adsorção N ₂	
AMOSTRAS MATERIAIS PRIMÁRIOS	Escória Pura	Peneiramento: graúda Laser: fina	Cal (CaO), Hematita (Fe ₂ O ₃), Caulinita (Si ₂ Al ₂ O ₅ OH ₄), Ilmetita (FeTiO ₃)	Irregular a globular, homogênea e lisa. (Fe e Ca)	II	IIA	Presença de CaO não hidratados (1,68%)	5,97%	Alto teor de FeO e CaO	Mesoporosa
	Areia	Laser: fina e uniforme.	Quartzo (SiO ₂), Hematita (Fe ₂ O ₃)	Irregular, homogênea e lisa (Si)	II	IIB	Ausência de CaO não hidratado	0,11%	Baixo teor de CaO e alto de SiO ₂ e Al ₂ O ₃	Mesoporosa
	Argila	Laser: fina e bem graduada.	Quartzo (SiO ₂), Caulinita (Si ₂ Al ₂ O ₅ OH ₄)	Regular, homogênea e lisa (Si e Al)	II	IIA	Ausência de CaO não hidratado	0,14%	Baixo teor de CaO e alto de SiO ₂ e Al ₂ O ₃	Não porosa
	Bentonita	Laser: fina e bem graduada	Montmorilonita((NaCa) ₃ (AlMg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ nH ₂ O), Quartzo (SiO ₂)	Regular, heterogênea e rugosa (Si, Fe e Be)	II	IIA	Ausência de CaO não hidratado	0,08%	Alto teor de SiO ₂ e considerável de CaO e Al ₂ O ₃	Não porosa (maior Ss)
	Lama 1 ETED	Laser: fina e bem graduada	Caulinita (Si ₂ Al ₂ O ₅ OH ₄), Hematita (Fe ₂ O ₃)	Regular, heterogênea e rugosa (Be e Te)	II	IIA	Presença de CaO não hidratados (3,0%)	0,06%	Alto teor de SiO ₂ e considerável de CaO e Al ₂ O ₃	Não porosa
	Lama 2 ETAV	Laser: fina e bem graduada	Calcita(CaCO ₃), Sodalita(Na ₄ Al ₃ (SiO ₄) ₃ Cl)	Regular,heterogênea e rugosa (Ca e Fe)	II	IIB	Ausência de CaO não hidratado	0,14%	Alto teor de FeO e CaO	Não porosa
AMOSTRAS NOVOS MATERIAIS	MIM1	Laser: bem graduada	Albita (NaAlSi ₃ O ₈), Dolomita (CaMg(CO ₃) ₂), Quartzo(SiO ₂)	Irregular, homogênea e rugosa, (Si, Ca, Fe e Al).	II	IIA	Ausência de CaO não hidratado	0,21%	Alto teor de SiO ₂ , Menor teor de CaO e FeO	Não porosa
	MEM2	Laser: bem graduada	Albita (NaAlSi ₃ O ₈),Quartzo (SiO ₂), Ilmetita (FeTiO ₃)	Irregular, homogênea e rugosa (Si, Al e Ca)	II	IIA	Ausência de CaO não hidratado	0,08%	Igual teor de SiO ₂ e CaO, alto de FeO	Não porosa
	MIM3	Laser: bem graduada	Albita (NaAlSi ₃ O ₈),	Irregular, homogênea e lisa, (Si, Fe e Al).	II	IIA	Ausência de CaO não hidratado	0,25%	Alto teor de SiO ₂ , CaO, FeO e Al ₂ O ₃	Não porosa
	MEM4	Laser: bem graduada	Albita (NaAlSi ₃ O ₈), Hematita (Fe ₂ O ₃)	Irregular, heterogênea e rugosa, (Si, Ca e Al).	II	IIA	Ausência de CaO não hidratado	0,15%	Igual teor de SiO ₂ e CaO, alto de FeO	Não porosa
	MIM5	Laser: bem graduada	Goetita (FeO(OH)), Dolomita CaMg(CO ₃) ₂	Irregular, heterogênea e rugosa, (Si, Be e Ca).	II	IIA	Ausência de CaO não hidratado	0,17%	Alto teor de SiO ₂ e considerável de CaO e FeO.	Não porosa
	MEM6	Laser: bem graduada	Albita (NaAlSi ₃ O ₈),, Hematita (Fe ₂ O ₃)	Irregular, homogênea e rugosa, (Si, Be e Ca).	II	IIA	Ausência de CaO não hidratado	0,15%	Igual teor de SiO ₂ e CaO, alto de FeO	Não porosa
	MIM7	Laser: uniforme	Goetita (FeO(OH)), Rodocronita (MnCO ₃)	Irregular, heterogênea e rugosa (Si, Al, Be e Ca)	II	IIA	Ausência de CaO não hidratado	0,23%	Igual teor de SiO ₂ e CaO, alto de FeO e Al ₂ O ₃	Não porosa
	MEM8	Laser: uniforme	Albita (NaAlSi ₃ O ₈), Calcita (CaCO ₃)	Irregular, heterogênea e rugosa (Si, Al, Mg e Ca)	II	IIA	Ausência de CaO não hidratado	0,16%	Igual teor de SiO ₂ e CaO, alto de FeO	Não porosa
	MIM9	Laser: uniforme	Magnesita (MgCO ₃), Hematita (Fe ₂ O ₃)	Irregular, homogênea e lisa, (Si, Fe e Mg).	II	IIA	Ausência de CaO não hidratado	0,12%	Alto teor de CaO e considerável de SiO ₂ e FeO.	Não porosa
	MEM10	Laser: uniforme	Magnesita (MgCO ₃), Hematita (Fe ₂ O ₃), Goetita (FeO(OH))	Irregular, homogênea e lisa, (Si, Fe e Ca).	II	IIA	Ausência de CaO não hidratado	0,14%	Alto teor de CaO e considerável de SiO ₂ e FeO.	Não porosa

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSÕES

5.1 CONSIDERAÇÕES

Essa pesquisa visou à elaboração de uma metodologia de estabilização química para credenciamento da escória de aciaria LD como lastro de ferrovia e o entendimento do potencial de utilização de argilominerais nesse tratamento em fase líquida.

Conforme estudos bem sucedidos quanto ao tratamento da escória na fase sólida e líquida, por meios de diversos processos, também neste trabalho em escala laboratorial foi obtido êxito na aplicação de uma técnica mais avançada por meio de fusões de argilominerais presentes nas matrizes de solos naturais e em lamas com a escória na fase líquida resultando em novos compostos com melhores parâmetros.

Neste estudo foi possível uma visão colaborativa ao Desenvolvimento Sustentável, já que conclusivamente é uma alternativa que contribui com redução de passivo ambiental, reutilizando resíduos siderúrgicos e originando materiais alternativos para a vasta demanda ferroviária.

Abordou a viabilidade técnica do uso e aproveitamento de argilominerais, inclusive lamas residuais de processos industriais, para ajustar a composição química da escória de aciaria LD visando melhorar suas propriedades para o uso proposto.

Para isso contemplou uma extensa campanha laboratorial, com a caracterização completa inicial para uma escória de aciaria recém produzida, no intuito de conhecer suas propriedades.

E, a partir daí, a concepção de novos materiais processados por fusões da escória estudada com argilominerais disponíveis em diferentes proporções.

Os novos produtos foram analisados por caracterizações química, física, mineralógica, morfológica e ambiental, ou seja, ensaios predominantemente em escala microestrutural, que contribuiu para relacionar os índices físicos e as mudanças ocorridas, para posterior entendimento global e equalização das propriedades.

Os resultados indicaram entre os argilominerais e as proporções das misturas com escória, os que mostraram melhor desempenho quanto à estabilização química, que geraram misturas não expansivas e consequentemente não condutoras de eletricidade pela quebra e formação de finos. Além de melhorar a integridade do lastro, em termos de colmatação, o experimento mostrou a influência dos argilominerais e da escória na caracterização das misturas, deixando o novo produto com parâmetros que o credencia seguramente como material de lastro de ferrovia.

5.2 CONCLUSÕES

Com relação à caracterização da escória de aciaria recém produzida conclui-se que este coproduto está em conformidade com todos os parâmetros necessários para validação de qualidade como lastro ferroviário, de acordo com a NBR 5564 (ABNT, 2011), exceto para a propriedade de expansão volumétrica, causada pela cal livre, que ultrapassa o limite de 3% permitido. E também o teor de fragmentos macios e friáveis, acima de 5%, mas que se trata de uma verificação opcional ou ensaio facultativo ditado pela norma e, portanto um parâmetro não limitante.

Dentre as misturas realizadas neste estudo, pode-se concluir pelos resultados alcançados um melhor desempenho para cada tipo de ensaio, como relacionado a seguir:

- ✓ Granulometria: MIM5 pela maior graduação;
- ✓ Digestão Ácida: MIM1 pelo menor percentual de CaO;
- ✓ Difração RX e MEV: MEM2 pelos minerais mais estáveis, menor concentração de cal e textura mais rugosa e áspera;
- ✓ Adsorção de Nitrogênio: MIM5 pela ausência de poros e CaO;
- ✓ Termogravimetria e teor de cal livre: MEM2 pelo menor teor de cal livre e ausência de CaO não hidratado;
- ✓ Lixiviação/Solubilização: MEM2 pelo menor teor de alumínio solubilizado;
- ✓ CTC/CTA: MIM5 ou MEM6 pela maior CTC compatível com a da escória inicial;

No entanto, classificando os resultados pelos materiais combinados, tem-se as seguintes conclusões:

✓ Misturas de Escória e Areia:

As amostras que identificam esse tipo de mistura são as MIM1 e MEM2, sendo a primeira de igualdade de massa, e a segunda de equilíbrio por balanço da relação CaO/SiO₂. Esse tipo de mistura, conforme revisão da literatura já é utilizado em uma empresa alemã, de forma promissora.

Quanto à investigação desses novos materiais, ambas as granulometrias mostraram-se bem graduadas, que, como parâmetro para previsão do comportamento geotécnico desses materiais, é o ideal pelo intertravamento dos grãos que confere maior estabilidade à conformação do lastro e resistência às cargas advindas das composições ferroviárias. Quimicamente, são as amostras com maior percentual de SiO₂ e menor de CaO, comprovados também pela mineralogia, com predominância de cristais de quartzo. Quanto à estrutura morfológica mostraram uma distribuição homogênea de partículas irregulares, com textura rugosa. Pela microscopia é possível observar nessas amostras ausência ou poucos poros, que se confirma pela análise de adsorção de nitrogênio. Em termos ambientais, classificam-se como amostras IIA, não perigosa e não inerte, devido à concentração do elemento alumínio. O teor de cal livre e a termogravimetria, juntamente, apontam os materiais com as mais baixas alíquotas de CaO_{livre}, sendo que a mistura de equilíbrio de massa se destacou com apenas 0,08%, comprovando a consequente redução da expansão volumétrica aferida por ocasional hidratação deste composto e viabilizando conforme normas vigentes a utilização desse material como agregado competente para lastro de ferrovia. Entre as duas misturas compostas pelos mesmos materiais primários em proporções diferentes, a de melhor resultado foi a MEM2, devido a sua morfologia e menor teor de CaO_{livre}.

✓ Misturas de Escória e Argila:

Identificadas como MIM3 e MEM4, essas amostras também apresentaram granulometrias bem graduadas contribuintes com o embricamento dos grãos e estabilidade da aplicação proposta.

Nos ensaios químicos localizou-se concentrações do composto alumina e neutralização do óxido de cálcio.

Houve cristalização dos minerais albita e hematita, conferindo uma morfologia típica de partículas irregulares, sendo que a amostra de igualdade de massa com predominância do feldspato albita, mostrou textura lisa e nenhum ou poucos poros, na microscopia, conforme também o ensaio de adsorção de N₂. Enquanto a amostra de equilíbrio de massa foi heterogênea, com textura rugosa e apresentou pontualmente escassos macroporos, não interligados. Essa característica de superfície mais áspera e irregular atribui ao material melhor desempenho geotécnico devido ao encaixe das partículas não permitindo o deslizamento de um grão sobre o outro.

A classificação ambiental foi IIA, não perigosa e não inerte, para ambas as amostras, devido ao elemento Al ultrapassar o limite de solubilização. O teor de cal livre e a termogravimetria, mostraram percentuais de CaO_{livre} bem abaixo do permitido por norma. Entre as duas combinações com escória e argila optou-se pela de equilíbrio de massa, devido ao resultado morfológico citado anteriormente, além do menor teor de cal livre.

✓ Misturas de Escória e Bentonita:

São as combinações de siglas MIM5 e MEM6 conforme sequência das misturas. Granulometricamente, são as misturas mais graduadas, com o maior intervalo de diâmetros e coeficiente de não uniformidade. Nos ensaios químicos localizou-se elevadas concentrações de Fe, formação de cristais goetita, dolomita, hematita e albita, e estabilização do óxido de cálcio. A morfologia mostrou em ambos os materiais uma textura rugosa e áspera, de partículas irregulares e porosidade mínima também de acordo com o teste de adsorção de N₂. Enquadram-se na classe ambiental IIA, não perigosa e não inerte, também devido ao teor de Al. A melhor combinação foi a de equilíbrio de massa, devido também às propriedades morfológicas e ainda menor percentual de cal livre registrado pelos ensaios termogravimétricos e etilenoglicol.

✓ Misturas de Escória e Lama ETED:

MIM7 e MEM8 são as identificações para as amostras desse tipo de mistura. Essas combinações geraram materiais granulometricamente uniformes, ou seja, amostras mal

graduadas, cuja curva apresentou comportamento mais verticalizado. Essa característica impede concluir bom desempenho para aplicação em lastro ferroviário, devido à instabilidade da conformação dos grãos.

A questão química mostrou resultados coerentes com o esperado, com estabilização do CaO, apresentando algum teor de Fe em destaque e ainda minerais de goetita, calcita, albita e rodocronita. Microscopicamente os materiais exibem textura rugosa e áspera, de partículas irregulares e poucos poros ainda conforme o ensaio de adsorção de N₂. A classe ambiental foi IIA, não perigosa e não inerte, também devido ao teor de Al. O teor de cal livre também foi reduzido em conformidade com as termoanálises.

Dentre as duas proporções a melhor foi a de equilíbrio de massa onde se obteve diminuição em maior escala do teor de CaO_{livre}.

✓ Misturas de Escória e Lama ETAV:

Por fim as misturas de siglas MIM9 e MEM10, combinadas com a segunda lama residual testada neste trabalho.

Assim como com a outra lama utilizada, essas combinações geraram materiais de granulometria uniforme e mal graduada, também inviáveis ao uso como lastro para via. Em termos químicos, diferenciaram-se das demais misturas, por se tratar da única lama cuja relação CaO/SiO₂ foi modificada, devido à própria lama apresentar elevada concentração de óxido de cálcio.

Com a combinação, obteve-se considerável porcentagem de sílica, que pode ter estabilizado a cal, de acordo com os demais ensaios químicos, como a difração de RX que identificou minerais de hematita e magnesita, e ausência do elemento Ca nos cristais.

Pela presença de hematita, as micrografias revelaram textura lisa, partículas regulares e ausência de poros pela interpretação do ensaio de adsorção de N₂. Esse atributo confere instabilidade à estruturação dos grãos com deslizamento pelas arestas arredondadas das partículas.

Classificação IIA, não perigosa e não inerte, para a caracterização ambiental e teor de Al ultrapassando o limite permitido. As termoanálises e o ensaio de cal livre apresentaram pequenos teores.

A melhor proporção foi a de igualdade de massa onde se obteve menor teor de CaO_{livre}, em contrariedade aos demais pares de misturas, cujas de equilíbrio de massa tiveram maior redução da cal, e justificada pela alta concentração na própria lama, conforme já mencionado.

Para escolha da melhor proporção utilizada em cada tipo de mistura, devido muitas vezes a similaridade dos resultados, foi realizada uma estimativa de pontuação conceitual por competência ou conformidade de cada material.

Finalmente, de modo geral, dentre as misturas realizadas neste estudo e os novos produtos formados, pode-se concluir que o melhor desempenho global foi o da mistura de escória com areia; com ressalva para a mistura de escória com bentonita, que também mostrou-se competente em quase todos os ensaios.

Resultado este, evidenciado desde a análise de CTC que indicou melhor interação entre escória e bentonita.

Porém em uma análise de custo-benefício, pode-se optar pela combinação de escória e areia, já que se trata de um material abundante na natureza e economicamente acessível, com a vantagem do melhor resultado em termos de redução da expansão volumétrica apresentados pelos ensaios de determinação da cal livre.

Enquanto as misturas com bentonita, mesmo com seus bons resultados, deixou a desejar no quesito ambiental, em que apresentou elevados teores de alumínio solubilizado, além de ser um produto industrial que contém um considerável valor financeiro agregado. Portanto, a viabilização das escórias siderúrgicas misturadas a argilominerais como aproveitamento de material para lastro ferroviário é uma solução técnica, econômica e ambientalmente adequada, devido à utilização do material reciclado implicar em uma diminuição da extração de recursos naturais e evidenciar um lucro social através da disponibilidade de materiais alternativos. Logo, também é considerada uma ação mitigadora de passivo ambiental, nesse contexto.

Enfim, a escória de aciaria credencia-se para a aplicação proposta com a ressalva de que o material passe pelo pré-tratamento.

No caso deste estudo, o tratamento da escória em fase líquida foi eficiente e merece continuidade, pois aprimorou a adequação química e consequentemente geotécnica,

agregando e conferindo propriedades de resistência e segurança à plataforma ferroviária.

5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Alguns aspectos não foram contemplados nesta pesquisa, portanto, recomenda-se que sejam realizados estudos complementares para melhor compreensão das relações dos materiais na aplicação como lastro ferroviário. Dentre eles destacam-se:

- ✓ Estudo de outros métodos de ensaios de expansão, específicos para as escórias de aciaria, que possam avaliar os diversos agentes causadores da expansão, bem como métodos para avaliação do MgO presente nas escórias;
- ✓ Aprofundar estudos na determinação da influência do ferro nas propriedades do novo agregado, realizada uma separação magnética, de modo a investigar os teores máximos permissíveis de ferro nas misturas;
- ✓ Avaliação da evolução da resistência à compressão de corpos de prova representativos das dimensões do lastro de ferrovia com as misturas realizadas;
- ✓ Estudar a influência de índices de basicidade superior ao tratado neste trabalho, verificando o máximo de escória LD possível de ser adicionada a mistura de modo a não causar prejuízos nas propriedades de resistência mecânica e expansibilidade do lastro;
- ✓ Aumento da escala para nível experimental em campo, com resfriamento por choque térmico e apuração da granulometria;
- ✓ Avaliação dos custos e consumo energético para o processo de fusão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, C. L. G.; **Estudo do Efeito das Interações Água-Argila no Inchamento dos Argilominerais através da Difração de RX.** Tese Doutorado em Ciências em Engenharia Nuclear, COOPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

ARAÚJO, L. A.; **Manual de Siderurgia.** São Paulo: Editora Arte & Ciência, 1997.

AMERICAN RAILWAY ENGINEERING ASSOCIATION – AREA: **Manual for Railway Engineering.** American Railway Engineering Association, VI e VII, Washington, D.C., USA, 1991.

AMERICAN RAILWAY ENGINEERING AND MAINTENANCE OF WAY ASSOCIATION - AREMA - **Manual for Railway Engineering.** Lanham: American Railway Engineering and Maintenance Association – v. I – IV, 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM: **Determination of the point load strength index of rock** – D5731. American society for testing and materials, west conshohocken, Philadelphia, USA; 1995.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM: **Standard Test Method for Potential Expansion of Aggregates from Hydration Reaction** – D4792. American society for testing and materials, Philadelphia, USA; 2000.

ANDO, R. Points de vue japonais sur l'utilisation des scories LD. **Revue de Métallurgie**, Paris, p.297-301, 1978.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502:** Solos e Rochas: terminologia. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5019** - Produtos e ligas de cobre - Terminologia. Rio de Janeiro, 2001.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46:** Agregados: Determinação do material fino que passa através da peneira 75um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005**: Procedimento de obtenção do extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006**: Procedimento de obtenção do extrato solubilizado de resíduos sólidos. 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 NM 18**: Cimento Portland - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregados: Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto e argamassa. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7218**: Agregados: Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5564**: Via férrea Lastro Padrão: Especificação. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 13**: Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol, Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14.081**: Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas - Execução do substrato-padrão e aplicação de argamassa para ensaios, 2012.

BRASIL. LEI N° 9605 de 1998: **Lei de Crimes Ambientais**. Brasília, Brasil, 1998.

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

BOURDEAU, J.; **Collaborative Ontological Engineering of Instructional Design Knowledge for an ITS Authoring Environment**. Proceedings of the 6th Intl. Conference on Intelligent Tutoring Systems (ITS 2000), Springer Verlag, 2000.

CARVALHO, D. D.; Disciplina: **Engenharia do Meio Ambiente**/ UFRJ. Disponível em: <http://www.eq.ufrj.br/graduacao/aulas/eqb485_deniziedias/2012/ema.pdf> Acesso em: 25 de outubro de 2012.

CASTELO BRANCO, V. T. F.; **Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória como agregado**. Dissertação de Mestrado em Ciências em Engenharia Civil, COOPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE MINAS GERAIS. DMA1/DER-MG/92 **PTM 130/78**: Método PTM 130/78 adaptado, Minas Gerais, 1992

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

DEPARTAMENTO DE PESQUISAS TÉCNICAS. **DPT - DNER - M 49/64**: Determinação do Índice de Suporte Califórnia (CBR), Rio de Janeiro, 1981.

DINIZ, D. H.; **A Influência dos finos de escória de aciaria como estabilizante para uso em pavimentos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, CEFET-MG, Minas Gerais, 2009.

DUTRA, F.C.; **Meio Ambiente e Gerenciamento de Resíduos Industriais**. Seminário Anual da Divisão de Redução e Matérias-primas da ABM, 1999.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA: Centro Nacional de Pesquisa de Solos - Ministério da Agricultura e do Abastecimento; **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2^a Ed. MAPA 2007, Rio de Janeiro, 2007.

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

ETIENNE E. de S.; **Método de Digestão Ácida, Técnica Savillex**. Disponível em: <www.emse.fr/users/HTML/moutle/emplasma/preparar.htm#top>. Acesso em: 15 de janeiro de 2013.

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.; **Estudo da Estabilização Química, Geo-mecânica e Ambiental das Escórias de Aciaria LD para Fins de Aplicação como Material de Lastro Ferroviário em Vias Sinalizadas**. Dissertação de Mestrado em Geotecnica, NUGEO/UFOP, Ouro Preto, Minas Gerais, 2010.

FERNANDES, G.; **Comportamento de Estruturas de Pavimentos Ferroviários com Utilização de Solos Finos e/ou Resíduos de Mineração de Ferro Associados à Geossintéticos**. Tese de Doutorado em Geotecnica. UNB, Brasília, 2005.

FILEV, R.; **Escória de aciaria - Ficha técnica**, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/escoria_de_aciaria.htm> Acesso em: 13 de abril de 2013.

FUNDAÇÃO DO MEIO AMBIENTE DE SANTA CATARINA – FATMA: **PNMA II** - Programa Nacional de Meio Ambiente de Santa Catarina, 2007. Disponível em: <www.fatma.sc.gov.br/projetos/conveio_pnmaII.htm>. Acesso em: 21 de fevereiro de 2012.

FURTADO NETO, A.; Disciplina: **Ferrovias**. UFPR, Curitiba, 1999. 21 slides: color.

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, 2001.

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**. Tese de doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais, UFRGS, Porto Alegre, 2001.

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

GRIM, R. E.; **Clay Mineralogy**. McGraw-Hill Co., New York, 1953.

GUMIERE, A. G.; **Estudo da viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria do processo LD como adição em cimentos**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. UFRGS, Rio Grande do Sul, 2000.

GUPTA, J.D.; KNELLER, W.A.; TAMIRISA, R.; SKRZYPACK-JANKUN, E.; **Characterization of base and subbase iron and steel slags aggregates causing deposition of calcareous tufa in drains**. Transportation Research Record, Washington, n. 1434, p. 8-16, 1994.

GUTT, W.; **Agregates from waste materials**. Chemistry and Industry, p. 439, 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.

HEINECK, K. S.; **Vitrificação de Solos Contaminados - Apostila de Remediação de Sítios Contaminados**. UFRGS, Rio Grande do Sul, 2010. Disponível em: <<http://www.karlaheineck.eng.br/principal.php?inc=downloads&cat=7>> Acesso em: 26 de fevereiro de 2012.

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

IGUCHI, Y.; NARUSHIMA T.; IZUMI C.; **Calorimetric study on hydration of CaO-based oxides.** In.: Journal of alloys and compounds. Sendai. 2001. nº 321, p. 276 –281.

INSTITUTO AÇO BRASIL – IAB: **Relatório de Sustentabilidade referente ao desenvolvimento em 2011 e Siderurgia em Números.** Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/biblioteca/publicacoes.asp>> Acesso em: 05 de julho de 2012.

INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY. IUPAC: Recommendations. Pure and Applied. **Chemistry**, n. 4, p. 603-619, 1985.

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.

KUEHN, M.; DRSSEN, P.; SCHREY, H.; **Treatment of liquid steel slag.** In: EUROPEAN SLAG CONFERENCE – EUROS LAG, 2., 2000, Dusseldorf. 2000.

LEMOS, R. G.; **Estudo do comportamento hidráulico, mecânico e químico das barreiras hidráulicas verticais compostas por solo residual, bentonita e cimento sob ação de substâncias agressivas.** Tese de Doutorado em Engenharia Civil. UFRGS, Porto Alegre, 2006.

LEON, T. B. A.; **Modificação estrutural de bentonitas nacionais: caracterização e estudo de adsorção.** Tese de Doutorado em Engenharia Civil. UFRGS, Porto Alegre, 2002.

LIMA, W. S.; BRITO, A. L. F.; RODRIGUES, M. G. F.; Adsorção de zinco a partir de soluções aquosas usando argila Brasgel. Laboratório de Desenvolvimento de Novos Materiais. Engenharia Química, UFCG, **Revista Scientia Plena**, Vol. 8, num. 4, Campina Grande, Paraíba, 2012.

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

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

MACH, E.; Disciplina: **Engenharia Química - Capítulo 3 - Balanços de Massa na presença de Reações Químicas.** UFRJ, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <http://www.eq.ufrj.br/graduacao/aulas/eqe112_eduardomach/capitulo_3.pdf> Acesso em: 27de outubro de 2012.

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

MAIA, P.C.A.; NUNES, A.L.L.S.; ANTUNES, F.S.; Alterabilidade de Rocha Basáltica - Caracterização Mecânica. **Solos e Rochas**, Revista Latino - Americana de Geotecnica. ABMS/ABGE, v.26, n.3, p.205-215, 2002.

MANCIO, M.; **Caracterização e avaliação das escórias de aciaria elétrica.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. UFRGS, Porto Alegre, 2001.

MASUERO A. B.; **Estabilização das escórias de aciaria elétrica com vistas a sua utilização como substituição ao cimento.** Tese de Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais, UFRGS, Porto Alegre, 2001.

MITCHELL, J. K.; **Fundamentals of Soil Behavior.** New York, John Wiley & Sons, ed. 2, 437 p, 1993.

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

MOORE C.; MARSHALL R. I.; **Steelmaking.** London: The Institute of Metals, 172 p., London, 1993.

MORANDINI, T. L. C.; **Condutividade Hidráulica e Compatibilidade em Combinações de Solo Tropical e Bentonita para Uso em Barreiras.** Dissertação de Mestrado em Geotecnica, NUGEO/UFOP, Ouro Preto, Minas Gerais, 2009.

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

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.

NASCIMENTO, J. F.; **Estudo da expansibilidade em escória de aciaria para uso em pavimentação rodoviária.** Dissertação de Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, UFMG, Belo Horizonte, 2003.

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.

OLIVEIRA, M. L.; **Bentonita.** Sumário Mineral DNPM, Brasília, 2004.

OLIVEIRA, F. U.; **Avaliação de três Métodos de Ensaio para Determinação do Potencial de Expansão de Escórias de Aciaria para uso em Pavimentação.** Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.

OLIVEIRA, C. F.; **Influência do Teor de Feldspato Espodumênio e Albita na Sinterização de Uma Massa Cerâmica Triaxial.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de São João Del Rey, Minas Gerais, 2012.

PENA, D. C.; **Avaliação da expansibilidade da escória de aciaria curada a vapor para utilização em peças de concreto para pavimentação.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. UFES, Vitória, Espírito Santo, 2004.

PENA, E.Q.; **Caracterização dos parâmetros intrínsecos de porosidade e de superfície específica de pellet feed de minérios de ferro do quadrilátero ferrífero empregando o método de adsorção de nitrogênio.** Dissertação de Mestrado em Engenharia dos Materiais, REDEMAT/UFOP, Minas Gerais, 2002.

PINTO JR., L. A. B.; **Fabricação de cimento Portland contendo mistura de escória de aciaria LD e resíduo de granito.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, IFES, Vitória, Espírito Santo, 2012.

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, 1978.

RATTI, G.; Disciplina: **Engenharia Química - Técnicas de Análises Químicas de Compostos Inorgânicos.** São Paulo, 2011. Disponível em: <http://www.angelfire.com/crazy3/qfl2308/1_multipart_xF8FF_8_Analise_Quimica_PM-2201.pdf> Acesso em: 14de agosto de 2013.

ROHDE, L.; **Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos – estudo laboratorial.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2002.

SALVIANO, A. B.; **Avaliação de escória de aciaria para o controle e abatimento de drenagem ácida de mineração.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental, PROAMB/UFOP, Ouro Preto, Minas Gerais, 2010.

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

SANTOS, P. S.; **Ciência e Tecnologia de Argilas.** 2º Ed., Edgard Blücher. São Paulo, 1989.

SELIG, E.T.; WATERS, J.M.; **Track Geotechnology and Substructure Management.** London, Thomas Telford Services Ltda, 1994.

SILVA, E.A.; **Estudo de bases estabilizadas granulometricamente com ou sem mistura de argilas A-7-6 e escória de Aciaria.** 23a Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Florianópolis, SC, 1988.

SILVA, E. A. R. L.; MENDONÇA, C. H. M.; DOBELE, M.; SIQUEIRA, J. B.; SOARES, A; **Uma experiência inédita: uso da escória de aciaria LD em todas as camadas do pavimento.** In: Reunião Anual de Pavimentação, Campinas, 2000.

SILVA, J. B.; **Caracterização de Materiais Catalíticos.** Tese de Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos, São Paulo, 2008.

SILVA, A. O. M.; **Metodologia de Estabilização Química de Coproduto Siderúrgico para uso em Lastro de Ferrovias.** Dissertação de Mestrado em Geotecnica, NUGEO/UFOP, Ouro Preto, Minas Gerais, 2013.

SOUZA, G. M.; **Estudo Experimental de escórias de aciaria para fins de caracterização tecnológica como material de lastro ferroviário em vias sinalizadas.** Dissertação de Mestrado em Geotecnica, NUGEO/UFOP, Ouro Preto, Minas Gerais, 2007.

TAKAHASHI, T.; YABUTA, K.; **New applications for iron and steelmaking slag.** In: NKK tecnical review. 2002.

THERMO-CALC; User's Guide. Foundation of Computational Thermodynamics Stockholm, Sweden. Versão 3.0. [S.I.] Disponível em: <<http://www.thermocalc.com/products-services/software/thermo-calc/>> Acesso em: 5 de agosto de 2012.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA: **A Citizen's Guide to Vitrification.** Office of Solid Waste and Emergency Response, 2001.

VELHO, J.; GOMES, C. F.; ROMARIZ, C.; **Minerais Industriais:** geologia, propriedades, tratamentos, aplicações, especificações, produções e mercados. Coimbra, 1998.

WATER ENVIRONMENT FEDERATION. WEF; **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater,** 1998. Disponível em: <<http://www.wef.org/>> Acesso em: 24 de junho de 2013.

ANEXOS

Anexo I: Planilha dos Resultados do ensaio de Lixiviação - parâmetros inorgânicos para as misturas e argilominerais.

Parâmetros	Concentração no Resíduo Lixiviado das misturas e argilominerais														Limites NBR10004	Limite de Quantif		
	AREIA	ARGILA	BENTONITA	ETED	ETAV	MIM1	MEM2	MIM3	MEM4	MIM5	MEM6	MIM7	MEM8	MIM9	MEM10			
	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	
Alumínio – Al	<LQ	<LQ	<LQ	0,07	<LQ	0,325	<LQ	0,546	<LQ	<LQ	<LQ	0,134	<LQ	7,346	<LQ	-	0,0024	
Arsênio – As	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1	0,059	
Bário – Ba	3,422	1,664	1,339	0,301	1,452	0,995	0,243	0,107	0,201	0,3677	0,224	0,671	0,2	0,374	0,207	70	0,0003	
Berílio – Be	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	-	0,0006	
Cálcio – Ca	699	610	574	698	618	54,1	496,7	205,8	541	289,9	471,2	279,4	410,3	485,9	529	-	0,0220	
Cádmio – Cd	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,033	<LQ	<LQ	0,5	0,0062	
Cobalto – Co	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	-	0,0094	
Cromo – Cr	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,011	0,065	<LQ	5	0,0085									
Cobre – Cu	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,010	<LQ	-	0,0036									
Ferro – Fe	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	44,09	0,004	75,33	<LQ	26,886	<LQ	70,69	0,028	<LQ	<LQ	-	0,0078	
Potássio – K	1,967	1,639	1,199	4,32	1,71	1,407	2,179	5,15	5,69	4,589	8,26	7,6	8,12	1,96	1,97	-	0,0635	
Lítio – Li	0,012	0,0055	0,0036	0,026	0,358	0,001	0,0054	0,013	0,01	0,018	0,008	0,022	0,025	0,002	0,0034	-	0,0006	
Magnésio – Mg	34,03	43,43	7,49	0,413	14,88	2,062	49,29	42,13	39,99	85,3	31,41	74,1	82,3	16,94	10,5	-	0,0020	
Manganês – Mn	<LQ	0,0014	<LQ	<LQ	<LQ	2,454	0,0037	19,77	<LQ	23,018	0,002	27,98	5,348	0,017	0,119	-	0,0012	
Molibdênio – Mo	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,07	<LQ	-	0,0195										
Sódio - Na	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,043	<LQ	-	0,0001									
Níquel – Ni	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,021	<LQ	-	0,002									
Fósforo – P	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,3793	<LQ	0,203	-	0,1135
Chumbo – Pb	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1	0,083	
Enxofre – S	5,73	4,716	5,72	6,18	8,16	0,498	3,553	1,615	3,797	2,327	3,787	2,45	3,607	5,15	9,37	-	0,0714	
Escândio – Sc	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	-	0,0003	
Silício - Si	22,06	21,3	21,37	4,032	14,87	2,389	13,02	21,11	19,69	15,53	16,97	18,72	20,01	0,207	12,04	-	0,0121	
Estrôncio – Sr	4,108	3,092	2,897	1,506	3,418	0,161	1,417	0,675	1,461	0,84	1,338	0,615	1,097	1,901	2,123	-	0,0001	
Titânio – Ti	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,004	<LQ	0,012	<LQ	-	0,0045							
Vanádio – V	0,136	0,255	0,598	0,04	0,384	<LQ	0,113	<LQ	0,155	<LQ	0,22	<LQ	0,007	<LQ	0,035	-	0,0058	
Ítrio – Y	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,001	<LQ	0,006	<LQ	<LQ	<LQ	0,001	<LQ	<LQ	<LQ	-	0,0009	
Zinco – Zn	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,876	<LQ	0,588	<LQ	0,157	<LQ	0,331	0,0047	<LQ	<LQ	-	0,0046	

LQ – Limite de Quantificação do equipamento utilizado: ICP-OES.

Anexo II: Planilha dos Resultados do ensaio de Lixiviação - parâmetros inorgânicos para as misturas e argilominerais (DUPLICATA).

Parâmetros	Concentração no Resíduo Lixiviado das misturas e argilominerais - DUPLICATA													Limites NBR10004	Limite de Quantif		
	AREIA	ARGILA	BENTONITA	ETED	ETAV	MIM1	MEM2	MIM3	MEM4	MIM5	MEM6	MIM7	MEM8	MIM9	MEM10		
	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
Alumínio – Al	<LQ	<LQ	<LQ	0,08	<LQ	0,255	<LQ	0,521	<LQ	<LQ	<LQ	0,135	<LQ	7,844	<LQ	-	0,0024
Arsênio – As	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1	0,059
Bário – Ba	3,003	1,438	1,104	0,063	1,372	0,625	0,003	0,037	0,568	0,127	-0,005	0,369	0,03	0,095	0,025	70	0,0003
Berílio – Be	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	-	0,0006
Cálcio – Ca	753,75	617,75	580,75	701,75	717,75	59,55	476,45	245,55	580,75	255,05	475,95	279,15	410,05	455,65	528,75	-	0,0220
Cádmio – Cd	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,033	<LQ	<LQ	0,5	0,0062
Cobalto – Co	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	-	0,0094
Cromo – Cr	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,011	0,065	<LQ	<LQ	5	0,0085							
Cobre – Cu	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,010	<LQ	<LQ	-	0,0036							
Ferro – Fe	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	44,09	0,004	75,33	<LQ	26,886	<LQ	70,69	0,028	<LQ	<LQ	-	0,0078
Potássio – K	1,717	1,389	0,949	4,07	1,46	1,157	1,929	4,9	5,44	4,339	8,01	7,35	7,87	1,71	1,72	-	0,0635
Lítio – Li	0,042	0,0355	0,0336	0,056	0,388	0,031	0,0354	0,043	0,04	0,048	0,038	0,052	0,055	0,032	0,0334	-	0,0006
Magnésio – Mg	33,78	43,18	7,24	0,163	14,63	1,812	49,04	41,88	39,74	85,05	31,16	73,85	82,05	16,69	10,25	-	0,0020
Manganês – Mn	<LQ	0,0014	<LQ	<LQ	<LQ	2,454	0,0065	20,11	<LQ	23,018	0,002	27,98	5,348	0,017	0,119	-	0,0012
Molibdênio – Mo	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,07	<LQ	<LQ	-	0,0195								
Sódio - Na	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,043	<LQ	1,043	-	0,0001							
Níquel – Ni	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,021	<LQ	<LQ	-	0,002							
Fósforo – P	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,3793	<LQ	0,203	-	0,1135
Chumbo – Pb	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1	0,083
Enxofre – S	5,48	4,466	5,47	5,93	7,91	0,248	3,303	1,365	3,547	2,077	3,537	2,2	3,357	4,9	9,12	-	0,0714
Escândio – Sc	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	-	0,0003
Silício - Si	21,81	21,05	21,12	3,782	14,62	2,139	12,77	20,86	19,44	15,28	16,72	18,47	19,76	-0,043	11,79	-	0,0121
Estrôncio – Sr	3,858	2,842	2,647	1,256	3,168	-0,089	1,167	0,425	1,211	0,59	1,088	0,365	0,847	1,651	1,873	-	0,0001
Titânio – Ti	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,004	<LQ	0,012	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	-	0,0045
Vanádio – V	0,146	0,276	0,551	0,04	0,399	<LQ	0,173	<LQ	0,157	<LQ	0,22	<LQ	0,007	<LQ	0,035	-	0,0058
Ítrio – Y	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,001	<LQ	0,006	<LQ	<LQ	<LQ	0,001	<LQ	<LQ	<LQ	-	0,0009
Zinco – Zn	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,876	<LQ	0,543	<LQ	0,199	<LQ	0,401	0,0032	<LQ	<LQ	-	0,0046

LQ – Limite de Quantificação do equipamento utilizado: ICP-OES.

Anexo III: Planilha dos Resultados do ensaio de Solubilização - parâmetros inorgânicos para as misturas e argilominerais.

Parâmetros	Concentração no Resíduo Solubilizado das misturas e argilominerais														Limites NBR10004	LQ		
	MIM1 (mg/L)	MEM2 (mg/L)	MIM3 (mg/L)	MEM4 (mg/L)	MIM5 (mg/L)	MEM6 (mg/L)	MIM7 (mg/L)	MEM8 (mg/L)	MIM9 (mg/L)	MEM10 (mg/L)	AREIA (mg/L)	ARGILA (mg/L)	BENTONITA (mg/L)	ETED (mg/L)	ETAV (mg/L)			
Alumínio - Al	0,367	0,354	2,733	1,885	1,64	1,921	0,621	0,65	0,49	0,532	<LQ	0,523	0,403	0,189	0,137	0,2	0,0024	
Arsênio - As	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,01	0,0596	
Bário - Ba	0,161	0,351	0,212	0,391	0,27	0,3605	0,337	0,495	0,584	0,112	0,526	0,326	0,246	0,69	0,303	0,7	0,0003	
Berílio - Be	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	-	0,00064	
Cálcio - Ca	31,89	175,2	68,6	91,4	63,5	62,1	63,2	71,3	194,9	216,7	60,3	41,11	63,9	628	65,4	-	0,02201	
Cádmio - Cd	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,063	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,005	0,0062	
Cobalto - Co	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	-	0,0094	
Cromo - Cr	<LQ	0,292	0,011	<LQ	0,035	<LQ	0,025	0,025	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,034	<LQ	0,045	0,05	0,0085	
Cobre - Cu	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	2	0,0036	
Ferro - Fe	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,442	0,367	0,874	<LQ	0,3	0,0078
Potássio - K	0,542	5,01	0,816	4,301	0,834	20,93	6,59	13,36	7,99	5,61	2,193	1,248	0,734	14,13	1,32	-	0,00006	
Lítio - Li	0,002	0,007	0,0022	0,001	0,0018	0,0017	0,0008	0,0034	0,0027	0,0058	0,032	0,0013	0,0012	0,071	0,0007	-	0,00067	
Magnésio - Mg	0,3958	<LQ	0,0956	0,388	0,0792	<LQ	0,1112	-	0,000002									
Manganês - Mn	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,076	0,1	0,0012	
Molibdênio - Mo	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,043	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,049	-	0,0195
Sódio - Na	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,043	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,043	200	0,0001
Níquel - Ni	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	-	0,02	
Fósforo - P	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	-	0,0001	
Chumbo - Pb	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,01	0,0829	
Enxofre - S	1,17	3,413	2,337	3,892	1,703	6,06	5,24	4,748	1,709	1,657	1,738	0,649	2,885	5,49	5,88	-	0,00007	
Escândio - Sc	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	-	0,0003	
Silício - Si	4,703	1,768	1,265	1,111	1,279	2,353	1,615	1,717	0,2199	0,1987	4,039	13,01	9,77	0,3662	4,038	-	0,00001	
Estrôncio - Sr	0,1687	0,485	0,151	0,251	0,153	0,151	0,202	0,185	11,537	9,529	0,611	0,422	0,518	2,595	0,646	-	0,0001	
Titânio - Ti	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	-	0,0045	
Vanádio - V	0,054	0,01	0,034	0,025	0,024	0,128	0,343	0,052	<LQ	<LQ	0,072	0,253	0,209	<LQ	0,086	-	0,0057	
Ítrio - Y	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	-	0,0009	
Zinco - Zn	0,006	0,023	<LQ	0,0053	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,037	0,035	0,0108	0,0025	0,006	0,102	0,013	5	0,004	

LQ – Limite de Quantificação do equipamento utilizado: ICP-OES.

Anexo IV: Planilha dos Resultados do ensaio de Solubilização - parâmetros inorgânicos para as misturas e argilominerais (DUPLICATA).

Parâmetros	Concentração no Resíduo Solubilizado das misturas e argilominerais - DUPLICATA														Limites NBR10004	LQ	
	MIM1 (mg/L)	MEM2 (mg/L)	MIM3 (mg/L)	MEM4 (mg/L)	MIM5 (mg/L)	MEM6 (mg/L)	MIM7 (mg/L)	MEM8 (mg/L)	MIM9 (mg/L)	MEM10 (mg/L)	AREIA (mg/L)	ARGILA (mg/L)	BENTONITA (mg/L)	ETED (mg/L)	ETAV (mg/L)		
Alumínio - Al	0,452	0,398	1,423	0,992	1,83	2,56	0,762	0,92	0,482	0,412	0,012	0,588	0,421	0,255	0,112	0,2	0,0024
Arsênio - As	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,01	0,0596
Bário - Ba	0,184	0,313	0,315	0,401	0,275	0,405	0,388	0,502	0,484	0,222	0,537	0,299	0,246	0,65	0,113	0,7	0,0003
Berílio - Be	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	-	0,00064
Cálcio - Ca	33,77	173,4	68,6	91,4	63,5	62,1	63,2	77,3	194,9	216,7	60,3	45,30	63,57	628	65,4	-	0,02201
Cádmio - Cd	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,063	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,005	0,0062
Cobalto - Co	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	-	0,0094
Cromo - Cr	<LQ	0,292	0,011	<LQ	0,035	<LQ	0,025	0,025	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,034	<LQ	0,045	0,05	0,0085
Cobre - Cu	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	2	0,0036
Ferro - Fe	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,694	0,724	0,516	<LQ	0,3	0,0078
Potássio - K	0,562	6,04	0,816	4,301	0,834	20,93	6,59	13,36	8,23	5,61	2,193	1,248	0,797	15,63	1,24	-	0,00006
Lítio - Li	0,003	0,0079	0,0042	0,001	0,0020	0,0019	0,0006	0,0040	0,0044	0,0031	0,002	0,0013	0,0012	0,071	0,0004	-	0,00067
Magnésio - Mg	0,3958	<LQ	0,0914	0,317	0,0782	<LQ	0,0892	-	0,000002								
Manganês - Mn	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,1	0,0012
Molibdênio - Mo	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,043	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	-	0,0195
Sódio - Na	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,043	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	200	0,0001
Níquel - Ni	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	-	0,02
Fósforo - P	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	-	0,0001
Chumbo - Pb	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,01	0,0829
Enxofre - S	1,34	3,45	2,337	3,82	1,703	6,13	5,24	4,748	1,709	1,657	1,738	0,649	2,885	5,49	5,88	-	0,00007
Escândio - Sc	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	-	0,0003
Silício - Si	4,711	1,722	1,279	1,14	1,23	2,76	1,612	1,893	0,2199	0,1987	4,889	13,45	9,28	0,365	4,031	-	0,00001
Estrôncio - Sr	0,1687	0,485	0,151	0,251	0,153	0,11	0,22	0,15	11,57	9,529	0,611	0,428	0,518	2,595	0,646	-	0,0001
Titânio - Ti	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	-	0,0045
Vanádio - V	0,054	0,01	0,034	0,025	0,024	0,128	0,343	0,052	<LQ	<LQ	0,072	0,253	0,209	<LQ	0,086	-	0,0057
Ítrio - Y	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	-	0,0009
Zinco - Zn	0,008	0,034	<LQ	0,0033	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,047	0,035	0,0108	0,0095	0,013	0,125	0,093	5	0,004

LQ – Limite de Quantificação do equipamento utilizado: ICP-OES.