

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**JOEL MARTINS DOS SANTOS**

**COMPARAÇÃO ENTRE ROTAS TRADICIONAIS DE  
BENEFICIAMENTO DE MINÉRIOS PARA A CONCENTRAÇÃO DE  
ALUMÍNIO METÁLICO EM ESCÓRIAS**

**DISSERTAÇÃO**

**PONTA GROSSA**

**2013**

**JOEL MARTINS DOS SANTOS**

**COMPARAÇÃO ENTRE ROTAS TRADICIONAIS DE  
BENEFICIAMENTO DE MINÉRIOS PARA A CONCENTRAÇÃO DE  
ALUMÍNIO METÁLICO EM ESCÓRIAS**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia da Produção, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Ivanir Luiz de Oliveira.

**PONTA GROSSA**

**2013**

Ficha catalográfica elaborada pelo Departamento de Biblioteca  
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa  
n.9 /13

S237 Santos, Joel Martins dos

Comparação entre rotas tradicionais de beneficiamento de minérios para a concentração de alumínio metálico em escórias. / Joel Martins dos Santos. -- Ponta Grossa, 2013.

91 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Ivanir Luiz de Oliveira

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Ponta Grossa, 2013.

1. Alumínio metálico. 2. Escórias. 3. Minérios - Beneficiamento. 4. Energia - Consumo. I. Oliveira, Ivanir Luiz de. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa. III. Título.

CDD 670.42



Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Ponta Grossa  
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**



FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação Nº 215/2013

**COMPARAÇÃO ENTRE DUAS ROTAS TRADICIONAIS DE BENEFICIAMENTO  
DE MINÉRIOS PARA A CONCENTRAÇÃO DE ALUMÍNIO METÁLICO EM  
ESCÓRIAS**

por

JOEL MARTINS DOS SANTOS

Esta dissertação foi apresentada às 16 horas de 06 de fevereiro de 2013 como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo citados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Dr. Daniel Poletto Tesser  
(UTFPR)

---

Prof. Dr. Sergio Mazurek Tebcherani  
(UTFPR)

---

Prof. Dr. Marcio Ferreira Hupalo  
(UEPG)

---

Prof. Dr. Dr. Ivanir Luiz de Oliveira  
(UTFPR) – *Orientador*

Visto do Coordenador:

---

Prof. Dr. João Luiz Kovaleski (UTFPR)

FOLHA DE APROVAÇÃO ASSINADA ENCONTRA-SE NO DEPARTAMENTO DE  
REGISTROS ACADÊMICOS DA UTFPR – CAMPUS PONTA GROSSA

Dedico esse trabalho à minha esposa, Eliane Jorge dos Santos, por tudo o que ela representa em minha vida.

## AGRADECIMENTOS

A realização e a conclusão desse trabalho só foram possíveis graças ao apoio e estímulo de muitas pessoas, que foram somando informações, conhecimentos e incentivo, ao longo dessa jornada. A todas as minha eterna gratidão.

Meus sinceros agradecimentos:

- Ao meu orientador, Prof. Dr. Ivanir Luiz de Oliveira, pela oportunidade e honra em me acompanhar nesse trabalho, além da confiança, paciência e incentivo, tendo contribuído no meu crescimento acadêmico, técnico e profissional;

- Aos demais professores do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da UTFPR-PG, bem como aos funcionários do Departamento de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, pelo apoio dado;

- Ao Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial - SENAI Campus Ponta Grossa, na pessoa da Sra. Denise Terezinha Beninca de Paula - Gerente SESI/SENAI/IEL de Ponta Grossa, pelo grande apoio e a oportunidade de desenvolver os trabalhos em suas dependências;

- Sra. Rosmery Dallooglio Kostycz – Gerente de negócios SESI/SENAI/IEL Campus Ponta Grossa, pelo grande apoio na realização das pesquisas;

- Ao Laboratório Mineral do SEANAI - Ponta Grossa pela, na pessoa da engenheira Liliane Claudino Ferreira, pelo apoio na realização dos ensaios de Caracterização Tecnológica da Escória de Alumínio;

- A engenheira Eliane Jorge dos Santos, pelo acompanhamento, paciência, motivação ao longo do curso e da convivência;

- A Profa. Monalisa Rodrigues Zoldam, pelo apoio em momentos decisivos desta jornada;

- À banca de qualificação do projeto, pelas contribuições que fizeram para o desenvolvimento deste trabalho: Prof. Dr. Daniel Poletto Tesser e Prof. Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne;

- Aos amigos da vida, de longe ou de perto, e de todos aqueles que nos querem bem. Em especial, a Ricardo Dutra, Vitório Etny Lorenzi, Ronaldo Moyle Baêta, Karine Coelho Correa, Cristiano Aparecido Santos, pela troca de informações e pelo interesse no trabalho.

## RESUMO

SANTOS, Joel Martins dos. **Comparação entre duas rotas tradicionais de beneficiamento de minérios para a concentração de alumínio metálico em escórias**. 2013. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2013.

A etapa final da reciclagem do alumínio, após coleta, classificação e limpeza é sua transformação em ligas comerciais através da fundição do metal reciclado e sua correção química. Um dos impactos relevantes deste processo é a geração de escórias que representa um dos principais fatores de custo. A escória é um subproduto que surge na superfície do metal líquido decorrente da sua oxidação, da presença de impurezas nas sucatas e da adição de sais fundentes. Normalmente são ricas em alumínio metálico sob a forma de pequenas gotículas que se aprisionam em seu interior e podem levar a perdas consideráveis de produtividade. Pelo seu conteúdo em alumínio metálico, essas escórias têm valor de mercado para as indústrias especializadas em sua recuperação, normalmente com técnicas pirometalúrgicas. Porém frações granulométricas finas, menores que 0,15 mm, trazem dificuldades para a recuperação do alumínio contido. Neste trabalho foram investigadas duas rotas tradicionais de beneficiamento de minérios para a avaliação da concentração de alumínio contido em escórias de alumínio: (I) atricionamento em tambor rotativo e (II) a britagem. Em ambas utilizou-se de uma sequência de operação auxiliar de separação granulométrica. Para comparar a eficiência entre as duas rotas verificou-se a concentração do alumínio presente em produtos granulométricos obtidos em ambas. Outro fator comparativo foi o indicador energético denominado WI (Work Index). Este parâmetro é característico da indústria de processamento mineral e representa a energia consumida pela técnica ou rota empregada. Para a caracterização do concentrado de alumínio nas duas rotas foram utilizadas técnicas por via úmida com medição de hidrogênio, fluorescência de raios-X e pirometria em forno a indução. As avaliações dos concentrados revelaram aumento do alumínio metálico contido à medida que ocorria a redução na granulometria do material potencializando sua recuperação.

**Palavras-chave:** Alumínio metálico. Escórias. Minérios – Beneficiamento. Energia – Consumo.

## ABSTRACT

SANTOS, Joel Martins dos. **Comparison between two traditional routes of ore improvement for metallic aluminum in slags.** 2013. 91 p. Dissertation (Master in Production Engineering) - Federal Technology University - Parana. Ponta Grossa, 2013.

The final step of recycling aluminum, after collection, classification and cleaning is its transformation into commercial alloy using recycled metal and its chemical correction. One of the relevant impacts in this process is the creation of slags that represent one of the main cost factors. The slag is a byproduct that appears on the surface of liquid metal due to its oxidation, from the presence of impurities in the scraps and in addition of salts fluxes. Usually they are rich in metallic aluminum in the form of small droplets which are captured inside and can lead to a considerable loss of productivity. By its content in metallic aluminum, these slags have market value for industries specialized in recovery, usually with pyrometallurgy technique. However slim granulometries fractions, smaller than 0.15 mm, bring difficulties for the recovery of aluminum contained. This paper investigated two traditional routes of ore improvement in order to evaluate the concentration of the aluminum contained into the aluminum slags: (I) attrition in tumbling barrel and (II) crushing. In both were used a sequence of auxiliary operation for granulometric distribution. In order to compare its efficiency between the two routes it was verified, in both, the concentration of aluminum present into the granulometric products obtained. Another comparative factor was the energetic indicator denominated by WI (Work Index). This parameter is a characteristic from the industries of mineral processing and it represents the energy consumed by the techniques or routes applied. For the characterization of concentrated aluminum on the two routes techniques used were wet-way with measurement of hydrogen, x-ray fluorescence and induction furnace pyrometry. The evaluation for the concentrated revealed an increase of metallic aluminum contained as occurred into the particle size reduction of the enhancing material in its recovery.

**Keywords:** Metallic aluminum. Slags; Ores - Beneficiation. Energy - Consumption.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Formação da escória por oxidação e arraste mecânico de alumínio líquido.....	20
Figura 2 - Influência do tempo e da temperatura na oxidação do alumínio .....	22
Figura 3 - Formação de escória por cascata .....	23
Figura 4 - Formação de escória na fluxação do forno .....	23
Figura 5 - Perda na fusão em função da espessura do material .....	25
Figura 6 - Perda de metal em função da espessura da sucata e sua composição ...	25
Figura 7 - Fábrica canadense com forno a plasma .....	28
Figura 8 - Esquema de processamento de borra em fornos rotativos .....	30
Figura 9 - Esquema do forno elétrico a arco .....	31
Figura 10 - Etapas do processamento da reciclagem do alumínio em fornos plasma e produtos gerados: a) carregamento; b) limpeza da sucata; c) aquecimento e fusão; d, e) vazamento; f) lingote de alumínio; g) borra seca resfriada. ....	32
Figura 11 - Esquema de recuperação de escoria (Europeu).....	34
Figura 12 - Processamento da escória da JBM.....	35
Figura 13 - Esquema de recuperação de borra (Recicla).....	37
Figura 14 - Distribuição granulométrica das partículas de acordo com o mecanismo de fragmentação utilizado .....	41
Figura 15 - Britador de mandíbulas de um eixo.....	48
Figura 16 - Moinho de Martelos.....	50
Figura 17 - Peneira fixa DSM .....	51
Figura 18 - Peneira Vibratória .....	51
Figura 19 - Grelha fixa.....	52
Figura 20 - Representação esquemática de um Trommel .....	52
Figura 21 - Comportamento coletivo das partículas em uma peneira vibratória inclinada .....	53
Figura 22 - Tambor rotativo .....	54
Figura 23 - Amostra de escória de alumínio no estado natural .....	56
Figura 24 - Fluxograma de preparação das amostras de escória de alumínio.....	57
Figura 25 - Pilha alongada de escória de alumínio obtida mediante homogeneização e quarteamento .....	59
Figura 26 - 3 alíquotas que foram utilizadas para os ensaios .....	59
Figura 27 - Alíquotas utilizadas para a caracterização do teor alumínio .....	66
Figura 28 - Curva granulométrica das três alíquotas ensaiadas .....	72
Figura 29 - Teor de alumínio obtido por via úmida de medição de hidrogênio para cada uma das alíquotas analisadas .....	73
Figura 30 - Rendimento de alumínio obtido por pirometria para cada uma das alíquotas analisadas.....	75
Figura 31 - Análise semi-quantitativa por fluorescência de raios-x .....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição da escória ALUMAX .....	26
Tabela 2 - Caracterização de produtos .....	26
Tabela 3 - Work Index Bond para minerais diversos.....	44
Tabela 4 - Classificação dos estágios de fragmentação .....	46
Tabela 5 - Alguns dos principais tipos de britadores e suas respectivas características .....	46
Tabela 6 - Análise granulométrica da escória de alumínio.....	58
Tabela 7 - Denominação das amostras da distribuição granulométrica da alíquota de nº 1 .....	61
Tabela 8 - Denominação das amostras da distribuição granulométrica da alíquota de nº2 processado por atrição por tamboramento.....	63
Tabela 9 - Denominação das amostras da distribuição granulométrica do material processado por britador primário de mandíbula .....	65
Tabela 10 - Denominação das amostras das frações granulométricas por processamento pela rota da britagem (primária e secundária) .....	66
Tabela 11 - Separação granulométrica das alíquotas de escória de alumínio .....	71
Tabela 12 - Análise do alumínio metálica por via úmida de medição de hidrogênio.....	73
Tabela 13 - Análise do rendimento de alumínio metálico nas frações de escória de alumínio analisadas por pirometria .....	74
Tabela 14 - Análise semi-quantitativa por fluorescência de raios-x.....	76
Tabela 15 - Valores obtidos no consumo de energia do Tamboramento .....	78
Tabela 16 - Valores obtidos no consumo de energia na britagem primária .....	79
Tabela 17 - Valores obtidos no consumo de energia na britagem secundária .....	80

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABAL	Associação Brasileira do Alumínio
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Alumínio
Ar	Argônio
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BN	Nitreto de Boro
Ca	Cálcio
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ISRI	Institute of Scrap Recycling Industries
Kg	Quilograma
kW	<i>Kilowatt</i>
MCT	Ministério de Ciências e Tecnologia
Mg	Magnésio
MP	Matéria-prima
PPGEP	Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Gestão da Produção e Manutenção (2007)
Palr	Peso do alumínio retido
PmaisL	Produção mais Limpa
SiC	Carbeto de Silício
R	Rendimento
Ms	Massa da sucata carregada no forno
Mp	Massa de metal produzido
E	Energia consumida
E <sub>0</sub>	Coeficiente unitário de trabalho

D	Tamanho da alimentação
D-	Tamanho do produto
E <sub>o</sub> -	Constante(10WI)
W	Energia em kWh para moer uma tonelada curta do minério
Wi	<i>Work index</i>
P	Abertura da peneira, em micrômetros ( $\mu\text{m}$ ), através da qual passam 80% da massa do produto
F	Abertura da peneira, em micrômetros ( $\mu\text{m}$ ), através da qual passam 80% da massa da alimentação
AA	Abertura de alimentação

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	14
1.2 OBJETIVOS.....	15
1.2.1 Objetivo Geral.....	15
1.2.2 Objetivos Específicos.....	16
1.3 JUSTIFICATIVA.....	16
1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA .....	17
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	17
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>18</b>
2.1 ESCÓRIA DE ALUMÍNIO.....	18
2.1.1 Mecanismos de Formação da Escória.....	20
2.1.2 Oxidação do Metal Líquido .....	21
2.1.3 Filme de Oxidação do Lingote/Retalho .....	22
2.1.4 Transporte do Metal Líquido .....	22
2.1.5 Homogeneização Mecânica do Metal Líquido .....	23
2.1.6 Parâmetros de Avaliação de Geração de Escória .....	24
2.1.7 Influência das Características do Metal a ser Fundido na Geração de Escória .....	24
2.1.8 Alumínio Metálico e Componentes de Escórias.....	26
2.1.9 Tecnologia de Processamento da Escória (Pirometria) .....	28
2.1.10 Fornos Rotativos Horizontais.....	29
2.1.11 Fornos Rotativos Basculantes .....	29
2.1.12 Forno Elétrico a Arco.....	30
2.1.13 Processo Alurex.....	31
2.1.14 Fornos a Plasma.....	32
2.1.15 Tratamento da Escória de Alumínio.....	33
2.1.15.1 Europa.....	33
2.1.15.2 Estados Unidos .....	36
2.1.15.3 Brasil .....	36

2.2 TECNOLOGIAS DE BENEFICIAMENTO OU TRATAMENTO DE MINÉRIOS.....	37
2.2.1 Conceituação.....	37
2.2.1.1 Operações de cominuição .....	38
2.2.1.2 Mecanismos de fragmentação .....	39
2.2.1.3 Choque ou impacto .....	39
2.2.1.4 Compressão ou esmagamento .....	40
2.2.1.5 Abrasão por cisalhamento .....	40
2.2.1.6 Grau de redução .....	41
2.2.2 Aspectos Energéticos da Fragmentação .....	42
2.2.2.1 Lei de Bond.....	43
2.2.3 Estagiamento do Trabalho de Fragmentação .....	45
2.2.4 Equipamentos de Britagem.....	46
2.2.4.1 Britadores de mandíbulas .....	47
2.2.4.2 Moinhos de martelos.....	48
2.3 PRINCÍPIOS DE PENEIRAMENTO.....	50
2.4 ATRIÇÃO EM TAMBOR ROTATIVO .....	54
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>55</b>
3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA .....	55
3.2 PROCEDIMENTOS DA PESQUISA .....	55
3.3 COLETA E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS .....	57
3.3.1 Amostragem da Escória de Alumínio.....	57
3.3.2 Procedimento de Homogeneização e Quarteamento do Material do Grupo II .....	58
3.3.3 Característica Granulométrica da Alíquota de N°1 .....	59
3.4 ENSAIOS DE BENEFICIAMENTO .....	62
3.4.1 Ensaio de Atrição por Tamboramento da Alíquota de N°2 .....	62
3.5 BRITAGEM .....	64
3.5.1 Britagem Primária em Britador de Mandíbulas .....	64
3.5.2 Britagem Secundária em Britador de Martelos .....	65
3.6 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ALUMÍNIO NAS ESCÓRIAS PROCESSADAS .....	66

3.6.1 Análise de Alumínio Metálico em Escórias por Via Úmida de Medição de Hidrogênio .....	67
3.6.2 Análise do Rendimento de Alumínio Metálico por Pirometria .....	68
3.6.3 Fluorescência de Raios-X.....	69
<b>3.7 DETERMINAÇÃO DO CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGIA NAS ESCÓRIAS PROCESSADAS.....</b>	<b>69</b>
3.7.1 Consumo Específico de Energia nas Alíquotas de Escória Processadas por Atrição por Tambor, e Britagens, Através da Equação de Bond .....	69
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>71</b>
4.1 DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DE PARTÍCULAS .....	71
4.2 AVALIAÇÃO DO TEOR DE ALUMÍNIO DAS ESCÓRIAS PROCESSADAS ....	72
4.2.1 Análise de Alumínio Metálico por Via Úmida de Medição de Hidrogênio nas Três Alíquotas Ensaçadas.....	73
4.2.2 Análise de Alumínio Metálico por Pirometria nas Três Alíquotas Ensaçadas.....	74
4.2.3 Análise dos Elementos Presentes nas Frações das Alíquotas de Escória de Alumínio por Fluorescência de Raios-X .....	75
4.3 CONSUMO ENERGÉTICO NOS PROCESSAMENTOS.....	77
4.3.1 Consumo de Energia no Processo de Tamboramento (Alíquota de nº2) .....	78
4.3.2 Consumo de Energia na Britagem Primária, da Alíquota de nº3 .....	78
4.3.3 Consumo de Energia na Britagem Secundária da Alíquota de nº3 .....	79
4.4 CONSIDERAÇÃO ENTRE BRITAGEM PRIMÁRIA E SECUNDÁRIA .....	80
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>81</b>
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	82
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>84</b>
<b>APÊNDICE A - Cálculo para Determinar a Energia de Cominuição com Base no (WI) .....</b>	<b>89</b>

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

rotativo; britagem, seguido das operações auxiliares de separação granulométrica. Adicionalmente, estudou-se o consumo específico de energia em cada rota utilizada.

A produção comercial do alumínio vem ocorrendo há pouco mais de um século. Ele tornou-se o metal não-ferroso mais consumido do mundo e a demanda de seus produtos vêm aumentando ano após ano. Sua produção mundial em 2011 foi de aproximadamente 44,6 milhões de toneladas. Para o mesmo ano a produção mundial de alumínio secundário (reciclado), foi de aproximadamente 18 milhões toneladas. (WMS, 2011).

A produção brasileira em 2011 foi de aproximadamente 1,44 milhão de toneladas de alumínio primário, a indústria consumiu 22909 GWh de energia elétrica, equivalente a 5% de toda a energia consumida no Brasil. O volume corresponde a um consumo médio específico de 15,9 MWh/tonelada de alumínio produzido (ABAL, 2011, p.53)

Estima-se que, para o ano de 2020 o consumo mundial de alumínio seja de 70 milhões de toneladas, sendo que 30 milhões de toneladas provirão da reciclagem. Segundo Bertram, no ano de 2004 existiam no mundo 1200 plantas de reciclagem de alumínio e 200 plantas de alumínio primário (BERTRAM, 2008).

Segundo ABAL, no ano de 2012 existiam aproximadamente 500 empresas atuando diretamente na indústria (produtores, transformadores, recicladores e consumidores) do alumínio no Brasil. Desse total, cinco empresas são produtoras de alumínio primário, as demais atuam nas outras etapas da cadeia produtiva-mineração, refinaria, transformação e reciclagem/produção de ligas.

Desde 2001 o Brasil é líder mundial de reciclagem de latas de alumínio para bebidas, em 2011, 97,20% retornou ao mercado na forma de matéria-prima para novos produtos. Este percentual representa um total de 248,7 mil toneladas de sucatas de lata, o que corresponde a 18,4 bilhões de unidades (ABAL, Anuário Estatístico 2011.p.54).



Para avaliar o impacto social da reciclagem, vale ressaltar que o volume de latas de alumínio reciclado em 2011 significou uma injeção de R\$ 1,8 bilhão gerando emprego e renda para cerca de 250 mil pessoas (ABAL, Anuário Estatístico 2011.p.54).

Em 2011, o Brasil reciclou 511 mil toneladas de alumínio. A relação entre este volume e o consumo doméstico de alumínio indica um percentual de 35,2%, superior a média mundial de 28,3% (base 2010). (ABAL, Anuário Estatístico 2011.p.54)

A atividade de reciclagem é importantíssima para a indústria do alumínio não somente como fonte de metal, mas também sob aspectos ambientais. Na produção do alumínio primário o consumo de energia elétrica corresponde a um terço dos custos do processo. O consumo médio de energia do processo primário é de aproximadamente 15,2 kWh/kg. Para realizar a reciclagem do alumínio, levando em consideração todo processo desde a preparação até a fusão da sucata, são consumidos em torno de 6% a 8% do total da energia necessária para obtenção do alumínio primário, pelo processo eletrolítico (ABAL, 2007)

O reaproveitamento de escória para extrair o alumínio contido tem muito a contribuir com redução da extração de alumínio primário, e com a refusão de sucatas recuperadas (ABAL, 2012).

O presente trabalho realizou estudo sobre a recuperação de alumínio metálico de escória residual de alumínio com o uso de duas rotas de tratamento de minérios: atrição em tambor

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar duas rotas tradicionais de beneficiamento mecânico de minérios e propor uma metodologia para a concentração de alumínio metálico contido em escórias residuais.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Avaliar rotas tradicionais de beneficiamento de minérios aplicáveis à escória de alumínio com o objetivo de aumentar a produtividade e rentabilidade na concentração do alumínio metálico.

Levantar os principais indicadores utilizados para avaliação das rotas tradicionais de beneficiamento de minérios apropriadas ao processamento de escórias de alumínio.

Avaliar o uso de tecnologia sustentável para recuperação de escórias em micro e pequenas empresas produtoras de alumínio secundário.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

Estimou-se que no ano de 2010 o Brasil tenha depositado aproximadamente 200 mil toneladas residuais de escórias em aterros tornando-se um resíduo industrial. Um volume significativo, sendo que na constituição da escória elementos metálicos, e conseqüentemente seu manuseio e disposição final geram problemas técnico, ambiental e econômico para as fundições, justificando um tratamento antes de sua disposição (ABAL, 2010)

Quando as sucatas de alumínio são processadas, isto é fundida em fornos de revérbero a combustível ou elétrico, existe a formação 15-25 kg de escória de alumínio por tonelada de sucata processada (reciclada), um mal necessário para boa parte dos fundidores, ou seja, ela é inevitável na fusão do alumínio (FRETI; BBORNAND; BUXMAN, 1982).

A geração de escória é inevitável no processo de fundição de alumínio, dependendo da qualidade das sucatas e dos parâmetros de processo fusão, remoção, resfriamento, transporte do alumínio líquido. Essa escória gerada tem valor econômico, pois pode variar de 10 – 70% de alumínio metálico que foi aprisionado à escória durante a sua geração (ABAL, 2007).

Somente uma pequena porcentagem da produção anual deste resíduo está sendo usada na indústria cimenteira e de cerâmica, e cobertura de aterros sanitários, construções de estradas e aterros, enquanto que o maior volume de

escória é adicionado a outros resíduos e estocados e estocados em locais impróprios causando danos ambientais (ABAL, 2007).

Desta forma, verifica-se a necessidade de incentivar e financiar pesquisas desenvolvidas no sentido de maximizar o aproveitamento da escória gerada pela indústria secundária, pois pesquisas apontam que 45% a 65% do volume de escoria gerada pela indústria de alumínio secundário são compostas por alumínio metálico, ou seja, perdas diretas de rentabilidade e produtividades pelas indústrias. (ABAL, 2007)

#### 1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

A presente pesquisa se delimitou a estudar dois processos mecânicos clássicos de beneficiamento de minérios e avaliou sua produtividade em termos da qualidade do alumínio metálico obtido.

#### 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em 5 capítulos:

Capítulo 1 – Neste capítulo apresenta-se a contextualização envolvendo aspectos problemáticos da geração da escória, as consequências para as indústrias e a colocação inicial de alguns métodos para estabelecer as bases para a definição do problema, da definição do tema, os objetivos gerais e específicos alcançados, os argumentos para a justificativa do trabalho e a limitação do tema escolhido.

Capítulo 2 – Neste capítulo, é realizada uma revisão sobre as características tecnológicas da escória de alumínio e técnicas de processamento mineral.

Capítulo 3 – Apresenta a metodologia, determinação do instrumento de coleta de dados e descrição do processo produtivo analisado.

Capítulo 4 – Mostra os resultados do trabalho e discussões.

Capítulo 5 – Conclusões sobre o trabalho, os objetivos alcançados e sugestões para possíveis trabalhos.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 ESCÓRIA DE ALUMÍNIO

A escória ou borra de alumínio é um resíduo inevitável da fusão do alumínio, a quantidade produzida da mesma depende do processo utilizado. A formação da escória ou borra ocorre devido à oxidação do alumínio durante a fusão. Ela se forma quando as impurezas são separadas e removidas do metal líquido onde ficam retidas grandes quantidades de componentes contaminantes, juntamente com sais ou demais produtos adicionados ao processo. (FRETI; J. D., BORNAND; K. BUXMANN, 1982)

O tipo de escória varia segundo a técnica de produção. As escórias podem ser classificadas em três tipos: branca, preta e *saltcake* (KULIK; DALEY, 1990; TENÓRIO, 1996).

Borra branca (*white dross*): gerada na produção primária de alumínio, plantas de extrusão, plantas de laminação e fundições, e no transporte desse material. Sua cor é clara, não possuem fluxos salinos, e têm alto teor de alumínio metálico.

Borra preta (*Black dross*): ocorre na produção secundária de alumínio, durante este processo são usados fluxos salinos para reduzir a oxidação na superfície do metal líquido. Estes sais fundem a altas temperaturas e modificam a coloração, escurecendo a escória. O resultado é, portanto uma escória escura, com sais e com menores teores de alumínio.

A borra secundária ou *saltcake*: resulta do processamento de borras brancas e pretas. Neste processo também são fluxos salinos tornando-se a escura, mas tem preta.

Durante o processo de fusão, há a exposição do metal líquido à temperatura do forno e também à atmosfera, esta combinação de fatores resulta em uma camada de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) na superfície do banho. A composição química desta camada varia grandemente, pois depende basicamente da liga que está sendo produzida e da manipulação das matérias-primas necessárias para o processo, mas basicamente a escória é composta por: óxido de alumínio (25 a 30%), alumínio metálico (65 a 75%), carbeto de alumínio (2 e 3%), nitreto de

alumínio (3 a 5%), óxido de ferro (0,5 a 2%) e óxido de silício (0,5 e 1,5%). (ABAL, 2007).

Wang (2008) apresenta um estudo onde a recuperação do alumínio da escória foi feita pela refusão da escória em fornos elétricos com adição de sais fundentes. Para escórias provenientes de fornos de reverberação e do processo de transferência, o rendimento da recuperação fica em torno de 55% e 83% respectivamente. Isso mostra que existe uma quantidade muito maior de alumínio metálico nas escórias do transporte do que no seu reprocessamento por fusão em fornos de reverberação.

A escória produzida pela indústria de alumínio, apesar de descartadas, contém alumínio na forma metálica, desde as frações maiores, até as menores frações onde ele se encontra finamente dividida. (PETAVRATZKI, 2007).

A escória de alumínio é um subproduto do processo metalúrgico, obtido durante a fusão de sucatas, quando as impurezas são separadas e removidas em diversas faixas granulométricas, onde ficam retidas grandes quantidades de componentes contaminantes, juntamente com sais ou demais produtos adicionados ao processo, mas em especial, a presença de porções de alumínio metálico finamente devidos, e por este fato ela é considerada um importante subproduto da fusão (ABAL, 2007).

A moagem em moinhos de bolas e classificação granulométrica de escórias evita o uso de fluxos salinos para a fusão da mesma. Após a moagem é feita a classificação dos resíduos, a fração com granulometria superior a 4 mm é rica em alumínio metálico (cerca de 85%) e é enviada para a refusão, a fração entre 1 e 4 mm contém aproximadamente 70% de alumínio na forma metálica, este material é vendido para fabricantes de pó exotérmicos, enquanto que a fração inferior a 1 mm com aproximadamente 25% de alumínio é utilizado na indústria cimenteira. (TENÓRIO, 2010).

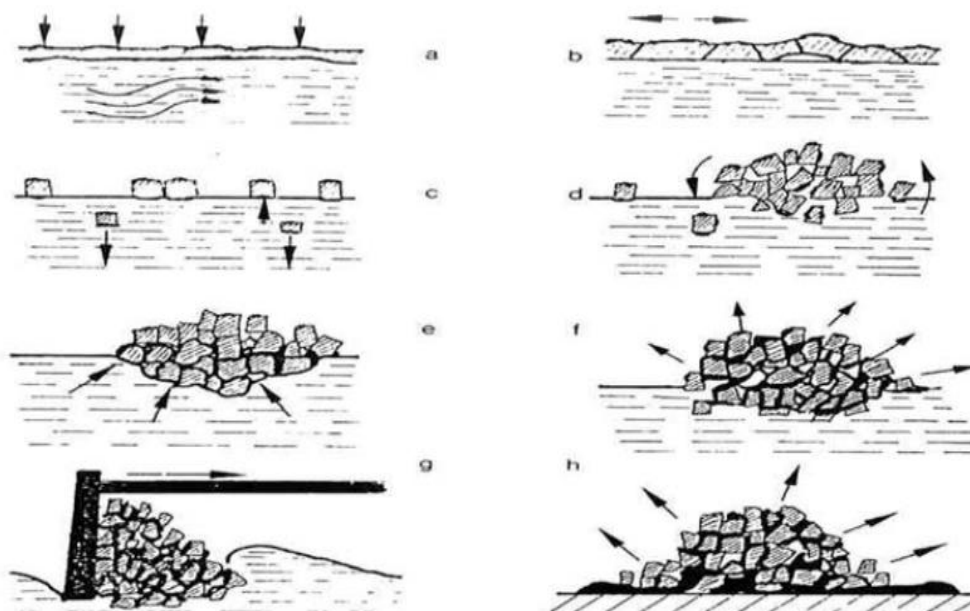
Melo (2007) fez um estudo similar para a borra preta, fundindo esse material em forno a indução, apontando valores na ordem de 40,3% de alumínio recuperável da porção mais fina da escória abaixo 0,83 mm para a liga SAE 329 e 42,9% para a liga SAE 326 sem a utilização de fluxos. Para a porção abaixo de 0,83 mm a recuperação foi de 54% para escórias de SAE 329 misturada à escória SAE 326. A dificuldade em processar o alumínio contido nos finos abaixo de 0,15 mm já é grande para a indústria, ainda mais, nas granulometrias mais finas da escória. Isso

justificaria a utilização da escória fina, abaixo de 0,83 mm, como possível agente redutor em reações de oxi-redução.

A escória do alumínio é um resíduo industrial de classe I, pois os efeitos do alumínio no organismo humano vão desde anemia por deficiência de ferro à intoxicação crônica. (AMBIENTE BRASIL, 2007). Segundo a norma NBR 10.004/2004, os materiais classificados neste grupo devem ser tratados adequadamente e destinados em locais próprios. Para o recebimento deste tipo de resíduo, os aterros industriais devem manter impermeáveis as camadas a fim de proteger o solo e a água da contaminação.

### 2.1.1 Mecanismos de Formação da Escória

A escória de alumínio é um mal inevitável nos processos de fundição de alumínio, e ocorre devido a oxidação do metal líquido, a presença de filme de óxidos presente no lingote/retalhos, movimentação e transporte do metal líquido, conglomerado de partículas de óxidos, interface aglomerada de alumínio metálico, oxidação do alumínio disperso. Os mecanismos são ilustrados na figura 1:



**Figura 1 - Formação da escória por oxidação e arraste mecânico de alumínio líquido**  
 Fonte: ABAL (2005, p.13)

- a) Oxidação do metal líquido;
- b) Filme de óxido inerente ao lingote/retalhos;
- c) Movimentação e transporte do metal líquido;
- d) Conglomerado de partículas de óxido;
- e) Interface aglomerada de alumínio metálico;
- f) Oxidação do alumínio disperso;
- g) *Desnatação* de escória da superfície de banho a derreter;
- h) O alumínio metálico escorre e acompanha a oxidação de sólido durante a formação da escória.

### 2.1.2 Oxidação do Metal Líquido

A oxidação ocorre logo após a fusão do material, formando uma camada delgada de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), é gerada pela reação do metal líquido com o oxigênio oriundo do vapor d'água e umidade presente no ambiente. A camada formada é diretamente proporcional à temperatura do banho, temperaturas mais elevadas resultam em camadas de óxidos mais espessas.

A figura 2 apresenta o efeito da temperatura e do tempo à ação oxidante na camada de escória formada no forno. Para ligas puras Al 99,5% e liga com 3% de Mg, nota-se a influencia da temperatura do metal na camada de escória nas temperaturas de 700°C e 800°C, comprovando que a temperaturas acima de 700°C são determinantes em termos de geração de escória. A curva da liga com 3% de Mg mostra que realmente ligas de Mg apresentam uma formação de camada de óxido superior à liga 99,5% de Al. (ABAL, 2007, p. 14).

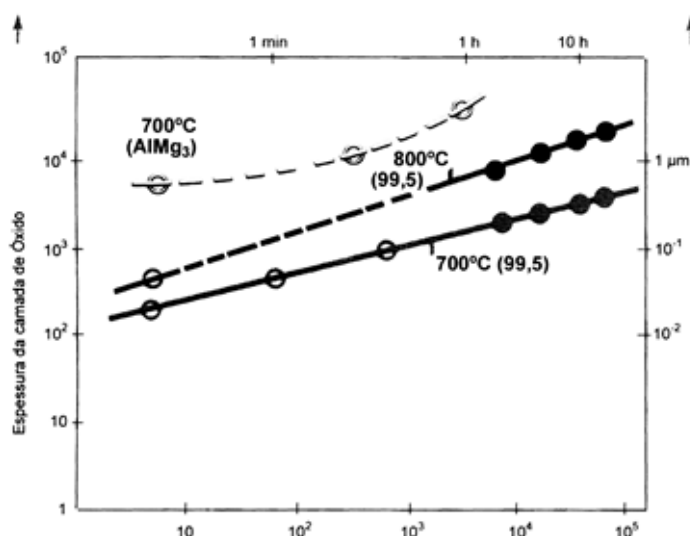


Figura 2 - Influência do tempo e da temperatura na oxidação do alumínio  
Fonte: ABAL (2007, p. 14)

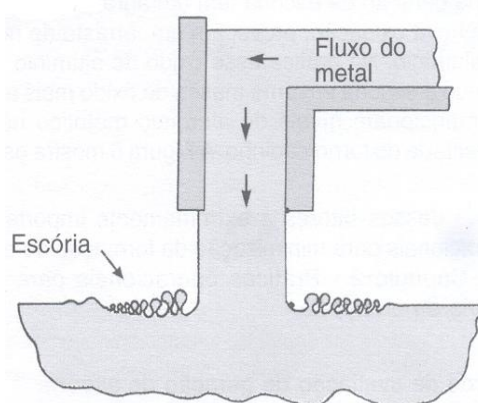
### 2.1.3 Filme de Oxidação do Lingote/Retalho

Lingote, retalho ou sucata de alumínio, mesmo livre de contaminação, possui uma camada de óxido em sua superfície, que se incorpora a escória, após a fusão. A geração de escória por esse método é diretamente proporcional a relação área dividida pelo peso, ou seja, quanto mais fino o material, maior será a participação da porcentagem de óxido em seu peso (ABAL, 2007).

### 2.1.4 Transporte do Metal Líquido

Esse é o mais importante fator no mecanismo de formação de escória e seu entendimento é fundamental para atenuar a geração de escória, a ruptura da camada (filme) de escória formada na superfície do metal líquido expõe novamente o metal às condições do ambiente (umidade), proporcionando nova oxidação do metal aumentando assim a quantidade de escória em várias fases do processo, quando o metal está no estado líquido, esse distúrbio do metal pode ocorrer dependendo da forma como o metal é despejado dentro do forno, ocorrem distúrbios e formação de escória por cascata conforme observado no esquema da Figura 3 (ABAL, 2007, p.15)

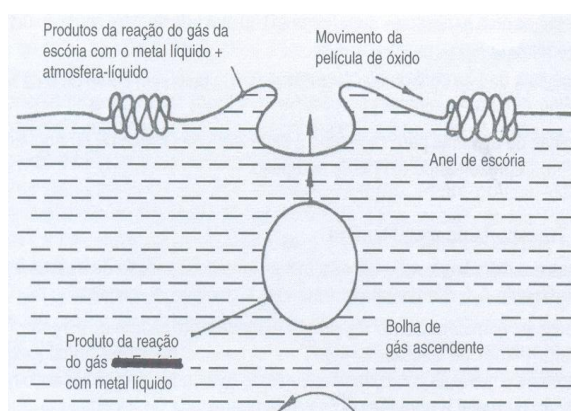




**Figura 3 - Formação de escória por cascata**  
**Fonte: ABAL (2007)**

### 2.1.5 Homogeneização Mecânica do Metal Líquido

A homogeneização mecânica por ferramentas ou através de lanças como gás neutro (nitrogênio ou gás argônio), mistura de nitrogênio/cloro objetivando a remoção de hidrogênio e inclusões não metálicas, uniformização de temperaturas para a adição de elementos de liga para uniformização da temperatura também promove uma forte agitação do metal, expondo-o à nova oxidação, provocam uma um arraste de metal líquido junto com os óxidos de alumínio, esse óxido de alumínio “envelopa” o metal, convertendo a escória em uma massa de óxido mais o alumínio metálico. A Figura 4 esquematiza a formação de óxidos gerados nessa movimentação.



**Figura 4 - Formação de escória na fluxação do forno**  
**Fonte: ABAL (2007)**

### 2.1.6 Parâmetros de Avaliação de Geração de Escória

Um parâmetro importante para avaliação do processo de reciclagem do alumínio é o rendimento do processo de fusão. Segundo Schmitz (2006) o rendimento do processo é a relação entre o total de alumínio recuperado, obtido após a fusão, pelo total de alumínio, já passado pelo processo de limpeza, carregado no forno, equação 03.

$$\eta = \frac{M_p}{M_s} \cdot 100\% \quad (\text{equação 01})$$

Sendo,

$\eta$  = Rendimento do processo;

$M_s$  = Massa da sucata carregada no forno;

$M_p$  = Massa de metal produzido.

Nessa equação 01, não estão sendo levados em consideração: possíveis matérias que alterem o peso da sucata que foi fundida, tintas, óleos, plásticos, madeira, pedra outros metais; o óxido protetor contido na sucata de alumínio, apesar de os teores de óxidos poderem atingir 7% do peso da carga, para sucatas com muito tempo de armazenagem e com grande área de superfície; Perdas de elementos de ligas, como magnésio e perda de partículas de material fundido carregadas pelos gases emitidos durante o processo de fusão. Pois quantificar todos esses parâmetros é algo difícil. (SCHMITZ, 2006)

### 2.1.7 Influência das Características do Metal a ser Fundido na Geração de Escória

Os tipos de chama proveniente dos queimadores dos fornos de fusão influenciam na oxidação do banho de alumínio. Segundo a ABAL (2007, p.17) este é um fator determinante para maior ou menor oxidação, juntamente com as características do material a ser fundido. Uma atmosfera oxidante do forno promove a oxidação do metal na razão direta à relação área/peso, ou seja, quanto maior esta relação maior a oxidação. A Figura 5 apresenta a perda de fusão em função da

espessura do material fundido, nota-se um crescimento exponencial em espessuras bem baixas.

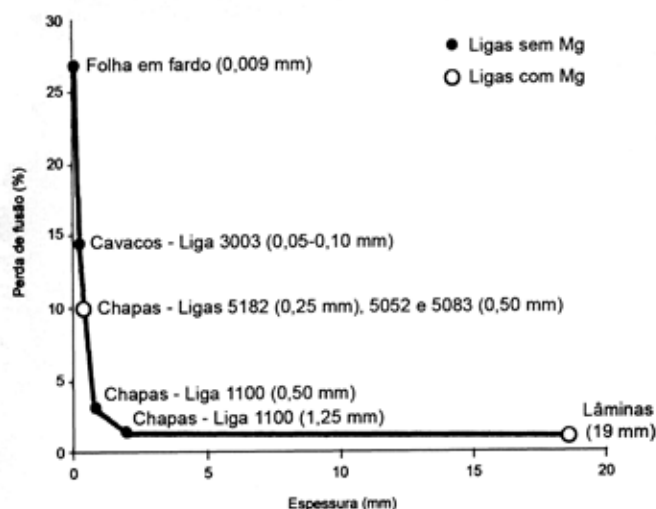


Figura 5 - Perda na fusão em função da espessura do material  
Fonte: ABAL (2007, p. 17)

A Figura 6 apresenta a perda na fusão em função da espessura do material utilizado, e sua composição química. Para temperatura de 750°C, a espessura de retalho decrescentes, em torno de 0,15mm apresenta um exponencial aumento na perda de fusão. Ligas puras de Al 99,5% e ligas de manganês têm o mesmo comportamento em termos de geração de escória. No entanto, as ligas com teores de 4,5% Mg apresentam uma considerável perda de fusão (ABAL, 2007, P.18).

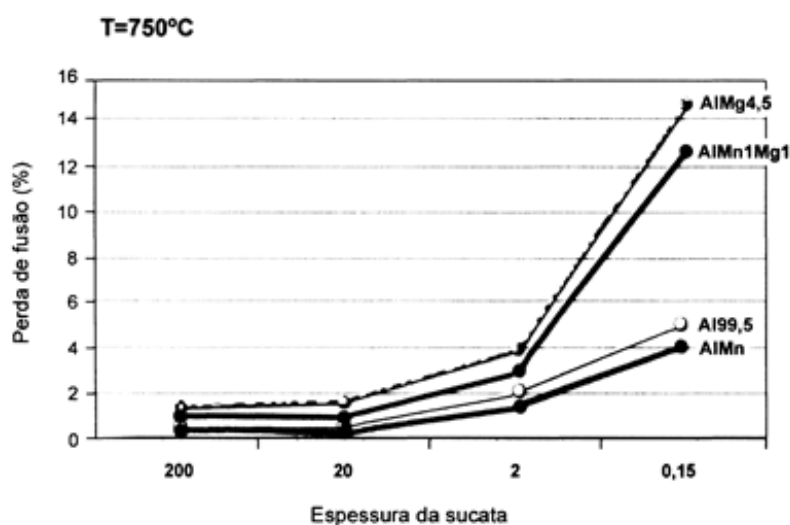


Figura 6 - Perda de metal em função da espessura da sucata e sua composição  
Fonte: ABAL (2007, p. 18)

Segundo ABAL (2007) a forma com que é feito o carregamento do forno influencia também na geração da escória, retalhos com espessuras inferiores 0,5mm apresentam uma perda de fusão bem superior a retalhos mais espessos. É de boa prática evitar que retalhos com espessuras baixas tenham contato com atmosferas oxidantes do forno e, sempre que possível tentar submergi-la no alumínio líquido presente no forno.

### 2.1.8 Alumínio Metálico e Componentes de Escórias

Moser (1976) apresenta a composição das escórias geradas em uma planta particular da empresa ALUMAX, de San Mateo – Califórnia (USA), e é mostrada na Tabela 1. Segundo o autor teores de 20% de alumínio metálico podem ser encontrados em pós mais finos das escórias (147 $\mu$ m). O autor não explica como foram encontrados os valores da composição, nem faz referência a outros trabalhos onde possa ser encontrada essa caracterização.

**Tabela 1 - Composição da escória ALUMAX**

<b>Óxidos de alumínio</b>	<b>25 – 30%</b>
Metais	65 – 75%
Óxidos de Mg – Óxidos de Cl	1,5
Carbeto de Al	2 – 3%
Nitreto de Al	3 – 5%
Óxidos de Fe	0,5 – 2%
Óxidos de Si	0,5 – 1,5%

**Fonte: Moser (1976)**

Mah, Toguri e Smith (1986) fizeram análise granulométrica, análise química e microscopia, para caracterizar uma fração fina da escória (-1700  $\mu$ m), e os resultados são apresentados na Tabela 2. Os autores não explicam o método usado para achar o teor de alumínio ou a quantidade de óxidos.

**Tabela 2 - Caracterização de produtos**

<b>Produto</b>	<b>% massa</b>	<b>% Al</b>	<b>% óxidos</b>	<b>Destino</b>
+ 9525 $\mu$ m	14	95	5	Reciclagem
+ 1700 $\mu$ m - 9525 $\mu$ m	19	70	30	Reciclagem
+ 150 $\mu$ m - 1700 $\mu$ m	38	25	75	
- 150 $\mu$ m	29	2	98	

**Fonte: Mah, Toguri e Smith (1986)**

Kogan e Reed (1985) apresentam resultados de composição química dos elementos para uma escória de alumínio. Eles mostraram resultados de teor

alumínio metálico para as diferentes frações granulométricas com valores 52,8% e 90% de Al, embora não expliquem como foram obtidos.

Matsuda, Aragaki e Takano (1993) fizeram a análise granulométrica e química de uma escória branca de alumínio metálico e obtiveram os seguintes resultados:

- As escórias na faixa granulométrica acima de 4 mm apresentam teores médios de alumínio metálico de 85%;
- Escórias com tamanhos entre 4 mm e 1mm apresentam teores de alumínio metálico de 70%;
- As escórias com granulometria inferior a 1mm apresentam teores de alumínio metálico entre 20 e 28%.

Segundo Lavoie, Wang e Litalien (1994) da ALCAN, Canadá, é possível determinar o teor de alumínio nas escórias mediante a medição das perdas de alumínio durante o processamento das escórias, e somado este valor a quantidade de alumínio recuperado. Estas perdas ocorrem por dois mecanismos diferentes: o alumínio metálico que não é drenado e fica misturado nos subprodutos, e por reação do alumínio com a atmosfera do forno e oxidação. Segundo eles o alumínio que está misturado deve ser medido mediante uma adequada amostragem e técnica de análise, mas não são sugeridas tais técnicas de análises, voltando ao mesmo problema, como medir o teor de alumínio nas escórias.

Manfredi, Wuth e Bohinger (1997) determinar o teor de alumínio em escórias brancas e pretas mediante a fusão. Eles fundiram amostra a 750°C, com uma mistura de 70% NaCl, 28% KCl, e 2% CaF<sub>2</sub> em cadinho de grafite. O lingote recuperado e as partículas com tamanho inferior a 0,5 mm foram considerados como alumínio metálico. Ao analisar as partículas de menor dimensão (<0,5 mm), pelo método de absorção atômica, encontraram menos de 53% Al total, como teoricamente Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contém 53% Al, concluíram que o resíduo estava composto principalmente por óxidos.

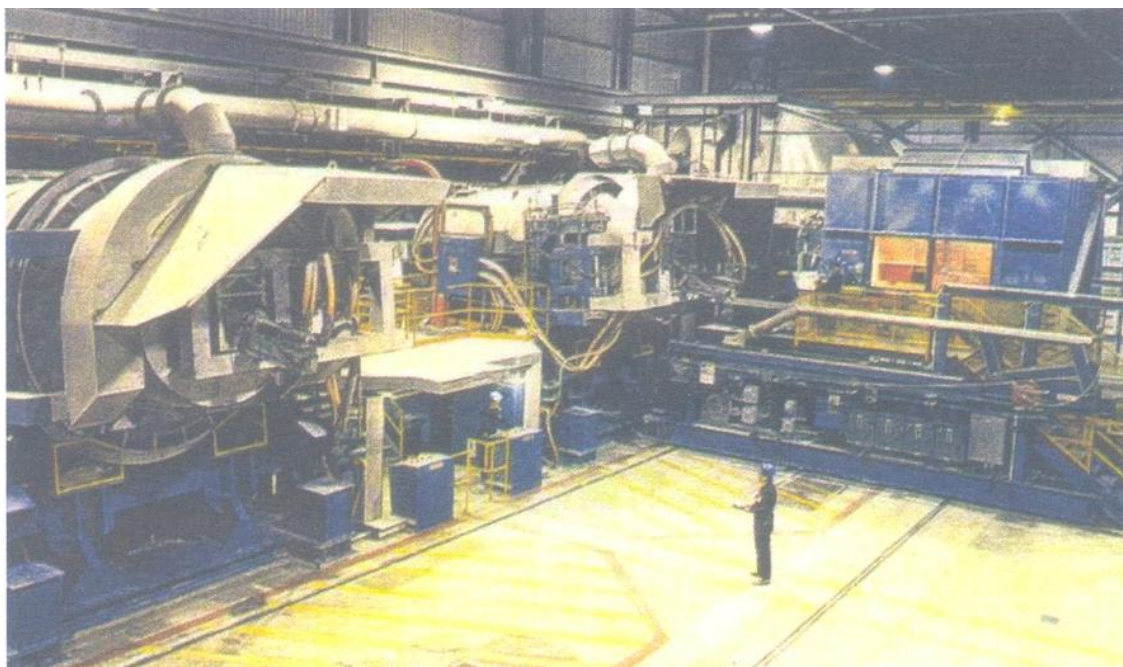
Fiore, Zanetti e Ruffino (2005) determinaram o teor de alumínio por digestão ácida de 0,25 g de escória com 2,5 ml de 96% de ácido sulfúrico e 85% de ácido fosfórico em um forno de micro-ondas, 5 ml de ácido fluorídrico foram adicionadas as amostras após a digestão, e uma nova fase de digestão começa. Finalmente as

amostras foram filtradas em filtro Whatman grau 542 e o teor de alumínio é obtido mediante análise por espectrometria da solução obtida. Os teores de outros elementos foram encontrados por processos similares de digestão.

#### 2.1.9 Tecnologia de Processamento da Escória (Pirometria)

Na década de 1980, houve um importante avanço na tecnologia de processamento de escória com a introdução dos fornos a plasma, com a grande vantagem de não utilizar sais e, como consequência, a não geração de borra preta. (ABAL, 2007, p. 42).

Segundo ABAL, no ano de 2007 existiam no mundo 3 plantas de reciclagem de escória de alumínio operando com forno plasma, sendo uma planta Província de Quebec, cuja foto da Figura 7. Na América do Norte somente duas fábricas operando com fornos a plasma. No Brasil, o IPT está desenvolvendo forno a plasma para fundição de sucata e também para o processamento de escória.



**Figura 7 - Fábrica canadense com forno a plasma**  
Fonte: ABAL (2007, p. 43)

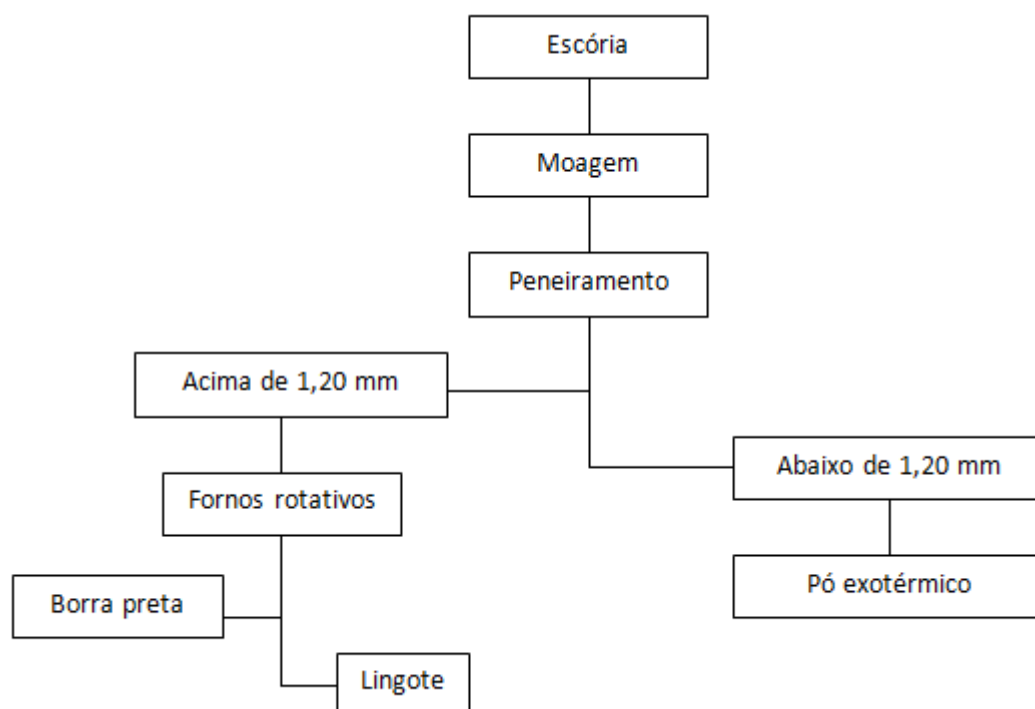
### 2.1.10 Fornos Rotativos Horizontais

Para esse tipo de forno há necessidade de uma preparação da escória antes de ser carregada no forno. Conforme já visto, a escória pode se apresentar em grandes aglomerados que necessitam ser moído, o que é feito em moinho de bolas. Após a moagem, a escória passa por peneiras, para a separação dos finos. Dimensões superiores a 16 mesh (1,19 mm) são separadas para serem carregadas no forno e as inferiores são armazenadas e utilizadas como pó exotérmico na fabricação de “cabeça quente” para as fundições de peças. A quantidade de sal utilizada (mistura de sais semelhante às misturas já descritas anteriormente) é diretamente proporcional à porcentagem de óxidos de alumínio contidos na escória. Na média, a quantidade de sal varia de 30 a 50%. O índice de recuperação do alumínio metálico contido na escória é apenas razoável. A geração de borra preta é grande e proporcional à quantidade de sal adicionado (ABAL, 2007, p. 43).

### 2.1.11 Fornos Rotativos Basculantes

Para esses fornos não há necessidade de proceder à moagem de escória pois têm uma abertura para o carregamento que comporta as dimensões dos aglomerados de escória. Face às explicações já mencionadas, a quantidade de sal adicionada, é bem inferior ao forno não-basculante. O índice de recuperação de alumínio é bem superior aos fornos horizontais, pois utiliza uma mistura de sais com criolita que aumenta o significativamente a recuperação de alumínio. A criolita tem a função de “desenvolver” o alumínio retido na escória, por sua ação de diminuir a tensão superficial do óxido de alumínio metálico, já mostrado na Figura 7. Por usar menos sal, a geração de borra preta é significativamente menor que nos fornos rotativos horizontais (ABAL, 2007, p. 44).

Para esses dois fornos, basculantes o esquema do processo é o mesmo e está apresentado na Figura 8.



**Figura 8 - Esquema de processamento de borra em fornos rotativos**  
 Fonte: ABAL (2007, p. 44)

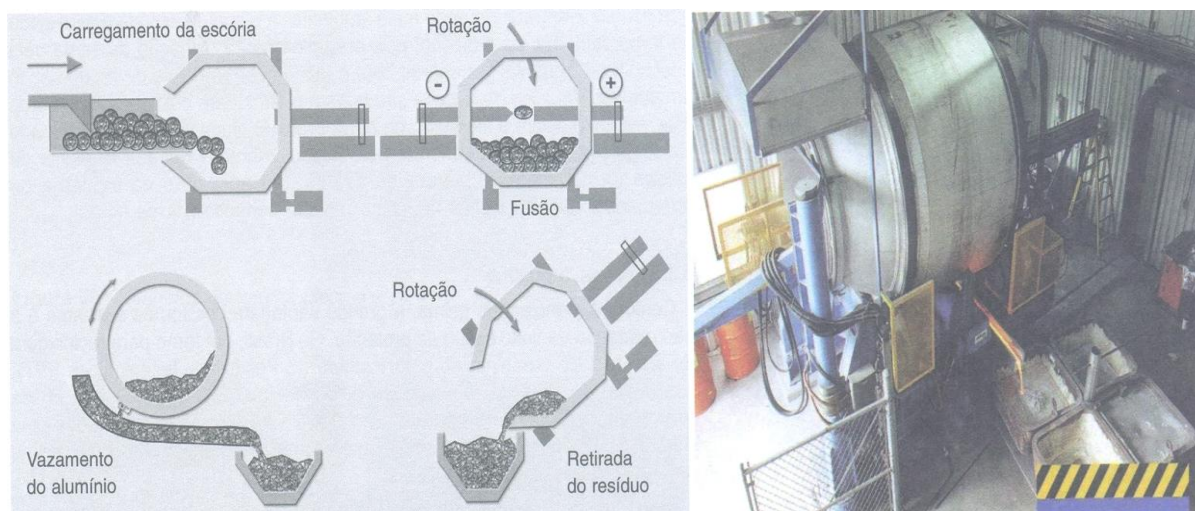
#### 2.1.12 Forno Elétrico a Arco

Esse processo foi desenvolvido pela LTEE da *Hydro-Quebec* (Canadá) e patenteado como *Drosscar*. Essa tecnologia usa o calor radiante gerado pelo arco elétrico de dois eletrodos de grafite, para aquecer a carga. Basicamente, consta de um forno rotativo a arco elétrico, quase selado para não permitir a entrada de oxigênio do ar, e sem uso de água de refrigeração, fluxo salino ou gás. A carga de escória é carregada no forno e o arco elétrico é formado pelos eletrodos na posição horizontal. Quando o alumínio da escória está praticamente fundido, é iniciada a rotação do forno, que permitirá a coalescência das partículas líquidas de alumínio, para formar o banho metálico. O metal líquido é vazado em lingotes e o resíduo formado pelo óxido de alumínio e outros compostos constituídos são também captados para utilização na indústria de refratários.

A grande vantagem do processo é a não-geração de borra preta, pois não utiliza sais de proteção (fluxo salino) e ainda apresenta uma boa recuperação do alumínio metálico da escória, que de acordo com a LTEE é da ordem de 95% de recuperação do alumínio nela contida (ABAL, 2007, p. 44).



O esquema mostrado na Figura 8 mostra a sequência das operações de carregamento, fusão e vazamento e descarregamento do resíduo final. A Figura 9 ilustra esse tipo de forno.



**Figura 9 - Esquema do forno elétrico a arco**  
**Fonte: ABAL (2007, p. 45)**

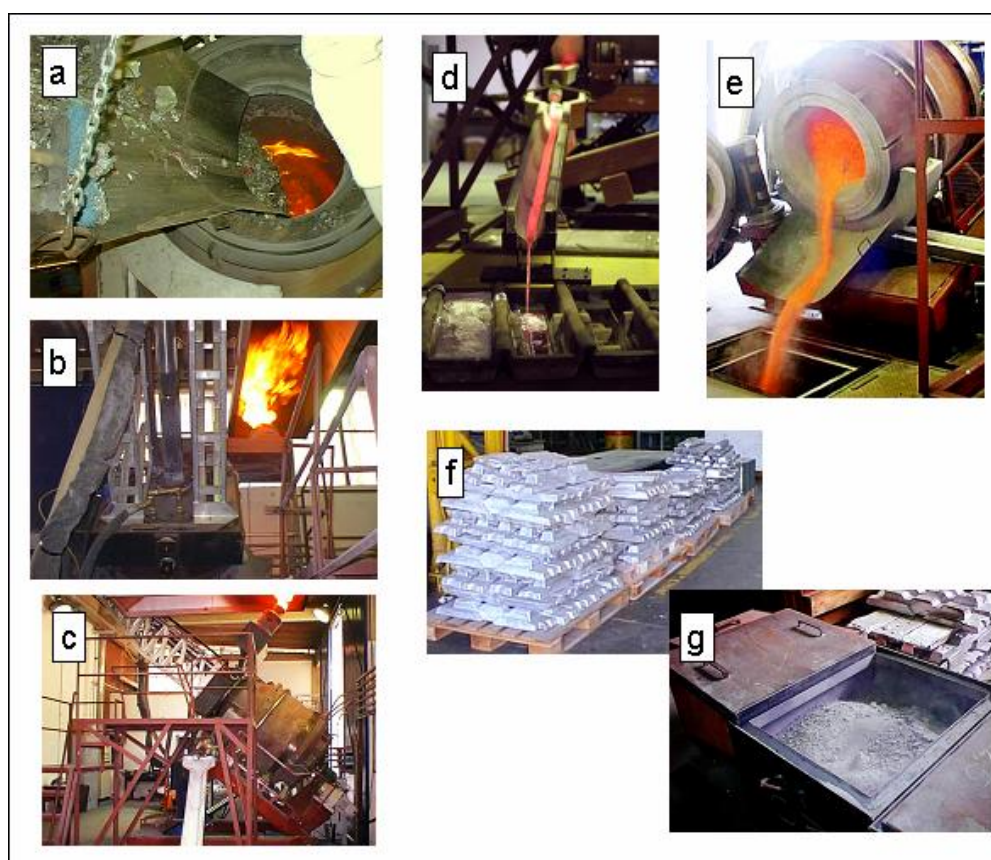
### 2.1.13 Processo Alurex

Esse processo foi desenvolvido em conjunto pela AGA (gases industriais) e a *Hoogovens Aluminium*, na Alemanha. Basicamente, trata-se de um forno basculante rotativo, com utilização de queimadores oxi-combustível. O forno é selado e é mantida uma pressão interna positiva através do gás neutro para não permitir a entrada de ar do meio ambiente. A carga de escória é carregada no forno sem sais de proteção, pois em tese não há oxidação da carga pela ausência de oxigênio. De acordo com o fabricante, os níveis de recuperação do alumínio metálico da escória são bons e a vantagem é não utilização de sais, evitando assim a formação da borra preta. O alumínio metálico é vazado em lingoteiras e, posteriormente, pelo basculante é retirada a massa de óxido formada. Essa mistura de óxidos tem aplicação na indústria de refratários e não é considerada como resíduo perigoso Classe I. (ABAL, 2007, p. 44).

### 2.1.14 Fornos a Plasma

Aquecido por plasma térmico, o conceito de forno proposto promove a recuperação do alumínio de sucatas em geral e de borra branca, sem o emprego de sais fundentes. Operando em atmosfera isenta de oxigênio, esse novo processo permite a recuperação do alumínio com grande eficiência metálica, sem gerar passivos ambientais, a exemplo da borra preta produzidas nos fornos convencionais aquecidos pela queima de combustíveis fósseis.

O forno a plasma possui elevada eficiência energética, apresentando consumo específico de energia entre 350 – 450 kWh/t para materiais que contenham entre 50-100% de alumínio, respectivamente, além disso, permite uma redução de 6 horas para aproximadamente 02h30min. O esquema da Figura 9 e as fotos apresentadas na Figura 10 ilustram o processo a plasma (ABAL, 2007, p. 46).



**Figura 10 - Etapas do processamento da reciclagem do alumínio em fornos plasma e produtos gerados: a) carregamento; b) limpeza da sucata; c) aquecimento e fusão; d, e) vazamento; f) lingote de alumínio; g) borra seca resfriada.**

Fonte: IPT (1999)

### 2.1.15 Tratamento da Escória de Alumínio

Foram apresentadas recomendações para a minimização da escória, porém sua eliminação é impossível com as tecnologias atualmente disponíveis.

Assim sendo a indústria do alumínio continua à busca de uma aplicação que consiga dar um destino ambientalmente adequado a esse resíduo. Algumas iniciativas no meio acadêmico são feitas tentando sua aplicação e alguns desenvolvimentos para aplicação na indústria cimenteira, tijolos e produção de fertilizantes.

O seguinte destino é dado à escória nos países desenvolvidos e no Brasil:

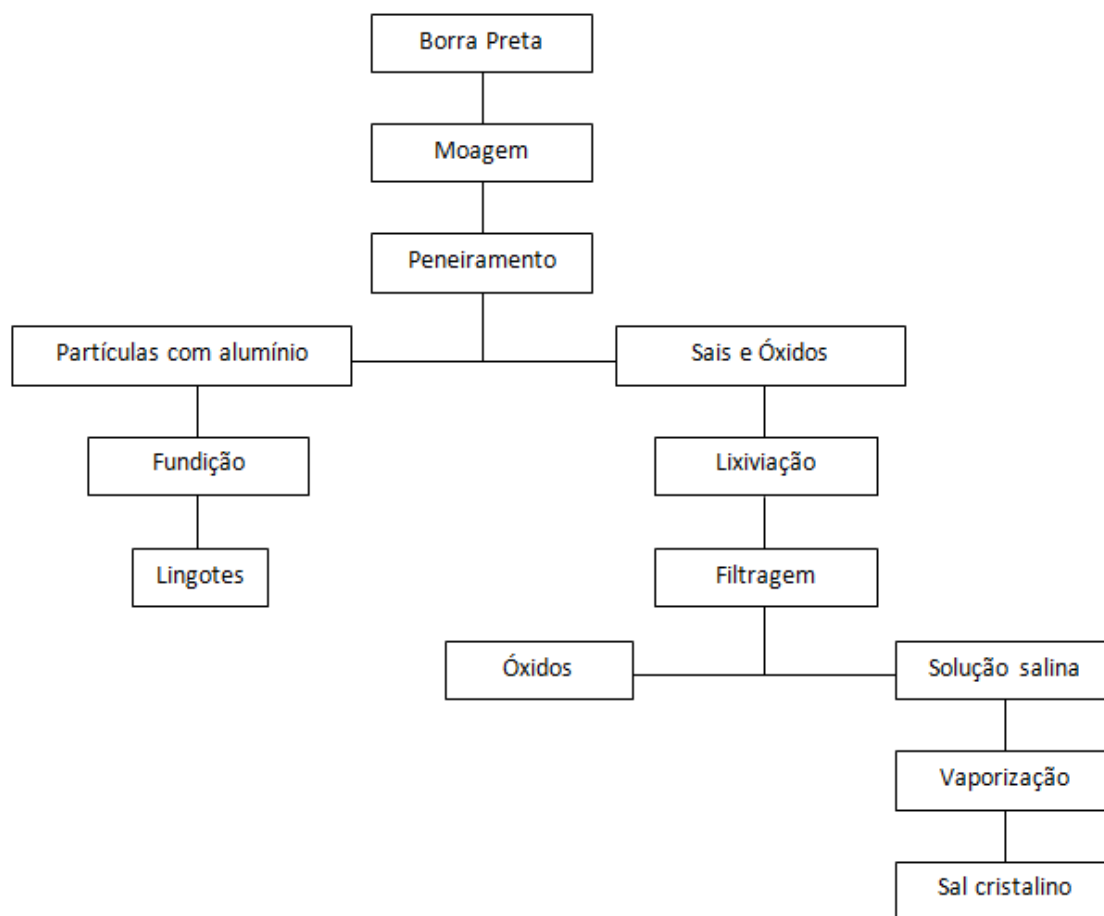
#### 2.1.15.1 Europa

Nos países europeus mais desenvolvidos, a escassez e inexistência de aterros, e a proibição de dispor esse resíduo indiscriminadamente em qualquer área obrigou as empresas a tratarem esse resíduo, descaracterizado sua condição de resíduo perigoso.

O processo químico convencional para o tratamento da escória compreende três etapas: moagem; peneiramento para recuperar partículas de alumínio; lixiviação para dissolver os sais; filtragem para dissolver os óxidos; vaporização da solução de sal, conforme o esquema da Figura 11.

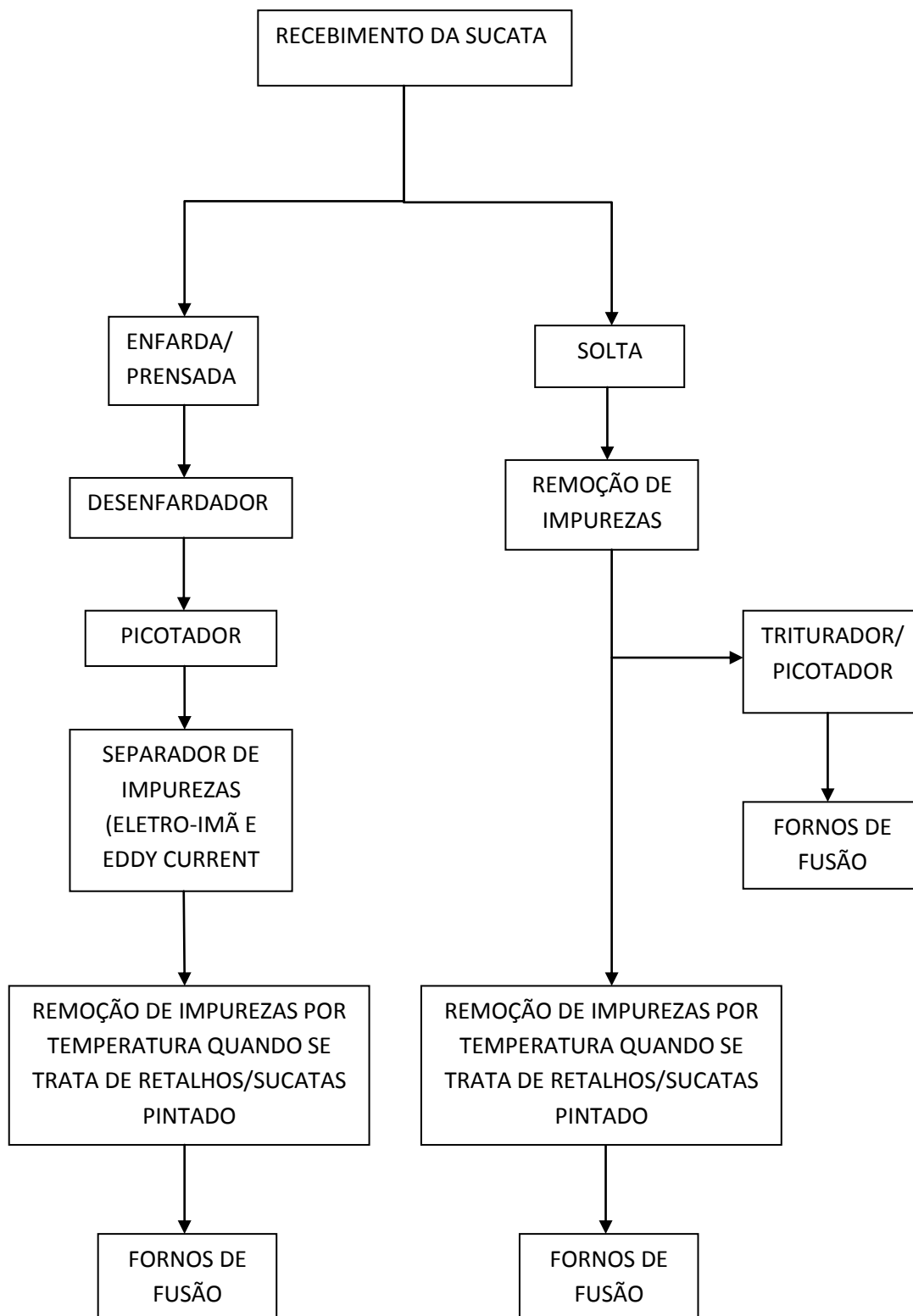
Os óxidos obtidos podem ser usados em cerâmica, refratários e indústria cimenteira. O sal cristalizado obtido pode voltar ao processo de fundição como sal de cobertura.

Esse processo, por trabalhar com atmosfera salina, apresenta sérios problemas de manutenção, para evitar a corrosão dos equipamentos. O custo do sal obtido é bem superior ao custo do sal original. De uma forma geral, o processo é a única alternativa independente de seu custo operacional e de manutenção.



**Figura 11 - Esquema de recuperação de escória (Europeu)**  
 Fonte: ABAL (2007, p. 50)

Segundo ABAL (2007) foi desenvolvido pela empresa *Jesse Brough Metals Group* (JBM International), um processo industrial que reprocessa os resíduos de fundição de alumínio com capacidade para retrabalhar todas as faixas das escórias de alumínio. Os processos envolvidos são mostrados na Figura 12.



**Figura 12 - Processamento da escória da JBM**  
**Fonte: ABAL (2007)**

Pelo fluxograma do processo apresentado, pode-se observar que inicialmente, a escória é triturada até a granulometria de 1,2 mm, e o material acima dessa faixa retorna ao processo de fusão diretamente. Esse procedimento também é

observado na literatura, visto que essa faixa de granulometria compreende a maior porção de alumínio metálico da escória.

O material abaixo da granulometria de 1,2 mm contém principalmente óxidos de alumínio, com pouco metal contido. Uma corrente de ar remove os pequenos resíduos metálicos presentes. Após isso, o material passa por um processo a plasma que produz matérias primas para siderurgia e óxido de alumínio para indústria cerâmica.

#### 2.1.15.2 Estados Unidos

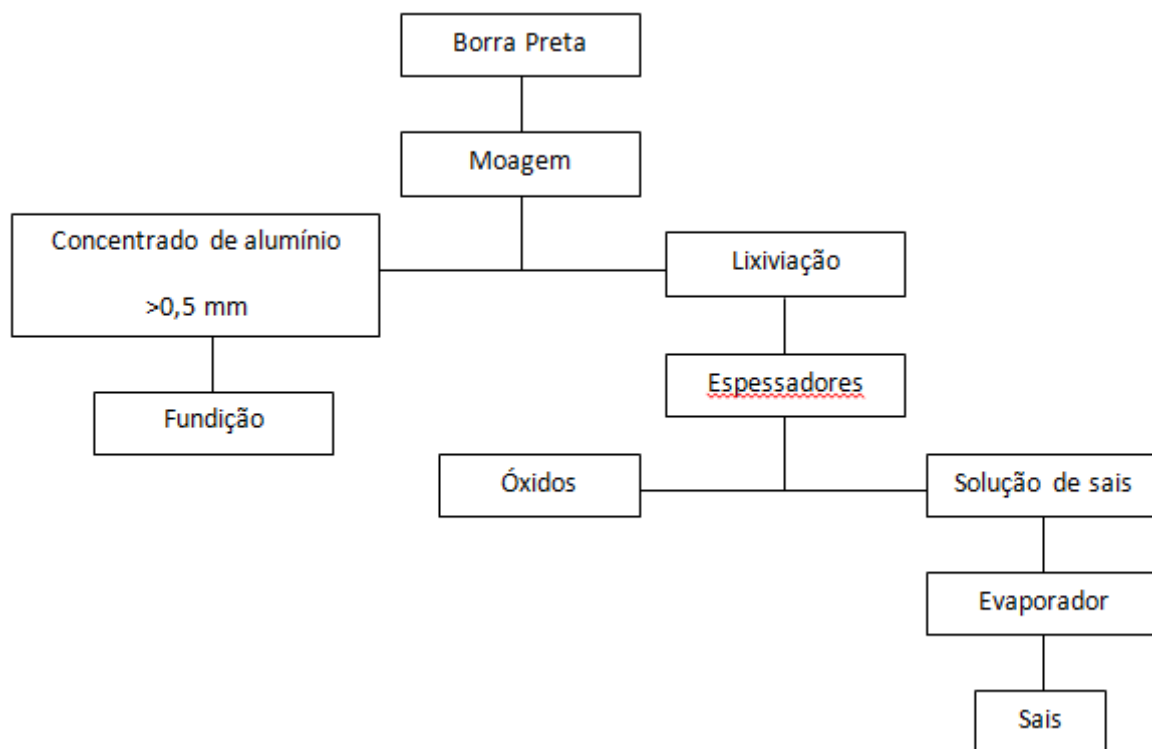
Nos Estados Unidos a escória de alumínio secundário é classificado como perigoso classe I. De acordo com a *The Aluminium Association* (Washington – DC), o destino dessa escória é para aterros municipais (*municipal solid waste landfills*). A legislação é mais branda no trato de resíduos industriais.

#### 2.1.15.3 Brasil

No Brasil, a legislação preconiza que a escória deve ser disposta em aterro industrial classe I.

Segundo ABAL (2007) foi desenvolvido pelo Grupo Metalur um processo de tratamento de escória de alumínio. Nesse processo, basicamente, a escória resultante do processo de fusão constituída por blocos, desagregados e granulados, passa por um processo de moagem, formado por duas linhas funcionando em circuito fechado. Sendo uma composta por um moinho de impacto por onde passam os materiais com granulometria superior a 25 mm, e a outra formada por um moinho vertical de alta velocidade, para onde são encaminhados os materiais com granulometria inferior a 25 mm. O circuito moinho secundário é interceptado por um conjunto de peneiras que faz a separação dos materiais menores que do que 2 mm Os finos são enviados para filtro de mangas e sofrem classificação por um separador gravimétrico na faixa granulométrica de 0,5 mm enquanto que os materiais com granulometria superior são enviados a um moinho de bolas que trabalha a úmido e processa a recuperação do alumínio metálico nesta faixa granulométrica. Nesse processo os sais entram em solução e, junto com os demais

óxidos, são enviados a um pré-misturador na planta química. Os finos inferiores a 0,5 mm captados pelo filtro de mangas são misturados com água no pré-misturador, promovendo a saturação da solução e enviados para um reator, onde os gases formados nos processos de reação química são eliminados. O processo está esquematizado na Figura 13.



**Figura 13 - Esquema de recuperação de borra (Recicla)**  
 Fonte: ABAL (2007, p. 51)

## 2.2 TECNOLOGIAS DE BENEFICIAMENTO OU TRATAMENTO DE MINÉRIOS

### 2.2.1 Conceituação

O processamento mineral pode ser conceituado como o conjunto de operações básicas que são realizadas em uma matéria prima mineral (minério bruto) com o objetivo de obter-se sua adequação, ou seja, produtos comercializáveis. A terminologia técnica inclui diversos termos que pode ser empregados para conceituar esse conjunto de operações, tais como: tratamento mineral, beneficiamento mineral, metalurgia e preparação de minérios, sendo esses dois

últimos menos utilizados no Brasil (ARAUJO, 2004). Neste trabalho os termos processamento mineral e de minérios, tratamento mineral e de minérios e beneficiamento mineral e de minérios serão adotados indistintamente.

O conjunto de operações realizadas no processamento de uma matéria prima mineral inclui, dentre outras: a fragmentação (redução do tamanho de blocos e/ou partículas), separação por tamanho (colocação dos materiais dentro de uma faixa adequada de tamanho), concentração (separação de espécies minerais de valor econômico das demais) separação de sólido/líquido (adequação da porcentagem de sólidos e/ou recuperação de água, em polpas minerais) e diversas outras operações auxiliares (manuseio, transporte, amostragem, estocagem). Deve-se ressaltar que, em quase a totalidade dos casos de aplicação industrial do processamento mineral, as diversas operações apresentam-se arranjadas sequencialmente, de forma a maximizar a recuperação dos minerais úteis contidos no minério e adequar os produtos obtidos aos seus usuários (ARAUJO, 2004).

Outro aspecto a ser ressaltado desde o início relaciona-se à variável existente em praticamente todas as operações de tratamento de minérios – a distribuição de tamanho de partículas (distribuição granulométrica). Ela afeta o desempenho de todas as operações e é, em muitos casos, uma característica que se busca como meta em produtos intermediários e/ou finais do tratamento de minérios. A distribuição do tamanho de partícula está presente, intrinsecamente, nos aspectos cinéticos das diversas operações, lembrando-se aqui que, também na grande maioria dos casos, os processos são contínuos. Assim, partículas de tamanhos diferentes terão respostas diferentes ao processo a que estão sendo submetidas, pelo simples fato de possuírem tempos de residência diferentes, que são função dos seus tamanhos. Assim, de forma genérica, pode-se esperar que qualquer processo responderá de forma otimizada para certas faixas de tamanho (ARAUJO, 2004).

### 2.2.1.1 Operações de cominuição

A cominuição, palavra derivada do latim *comminuere*, consiste de métodos específicos para a redução de tamanho de partículas através da aplicação de pressão (compressão), criação de impacto cinético entre minério e corpo moedor



(impacto), ou através de atrito da superfície de partículas do minério com a superfície dos corpos moedores abrasão. (OUTOKUMPU I, 2002)

As operações de cominuição compreendem diversos estágios que se aplicam ao minério desde a mina, até sua adequação ao processo industrial subsequente. Na etapa de lavra, o desmonte do minério ou rocha, com auxílio de explosivos pode ser visto como um primeiro estágio da de fragmentação, onde são produzidos blocos volumosos, mas de um tamanho que permite alimentar que permite alimentar os equipamentos de britagem. A britagem é a operação que fragmenta os blocos obtidos na lavra, podendo ser repetida diversas vezes por diferentes tipos de equipamentos, até se obter um material adequado à alimentação da moagem. A moagem é a operação de fragmentação fina obtendo-se nela um produto adequado à concentração ou a qualquer outro processo industrial, como a pelotização, lixiviação e combustão (FIGUEIRA, 2004).

#### **2.2.1.2 Mecanismos de fragmentação**

A maioria dos minerais são materiais cristalinos, onde os átomos estão em arranjos tridimensionais. A configuração dos átomos é determinada pelo tamanho e tipos de ligações físicas e químicas que os mantêm unidos na rede cristalina dos minerais. Essas ligações interatômicas são eficientes à pequena distância, e podem ser quebradas se tensionadas por forças externas (FIGUEIRA, 2004).

Os equipamentos de britagem e moagem se utilizam de diferentes mecanismos para realizar a quebra da rede cristalina. Em geral os três mecanismos de fragmentação principais listados a seguir estão sempre presentes, prevalecendo o efeito de um deles sobre os demais.

#### **2.2.1.3 Choque ou impacto**

A fratura ocorre quando forças são aplicadas de forma rápida e em intensidade muito superior à resistência das partículas. Faz uso, em geral, da energia cinética ( $1/2 mv^2$ ) de corpos em movimentos circulares ou cadentes. Resulta deste tipo de quebra um grande número de partículas em uma vasta faixa

granulométrica. Este é o mecanismo mais eficiente em termos de utilização da energia, mas, normalmente sua aplicação é mais restrita aos materiais menos abrasivos. (VALADÃO; ARAUJO, 2007). É observado em britadores de impacto e nas áreas de impacto dos corpos moedores cadentes no interior dos moinhos revolventes. (GALERY, 2011).

#### **2.2.1.4 Compressão ou esmagamento**

A quebra ocorre quando forças de compressão, de baixa intensidade, são aplicadas de maneira lenta e progressiva, permitindo-se que, com o aparecimento da fratura, o esforço seja aliviado. Em geral, as forças de compressão aplicadas são pouco superiores à resistência dos blocos rochosos ou partículas. Resulta deste mecanismo um número reduzido de fragmentos homogêneos de tamanho intermediário. É o mecanismo mais comum, desde blocos da ordem de metros até partículas micrométricas. É observado em britadores de mandíbulas, britadores giratórios e cônicos. Nos moinhos revolventes, o mecanismo está associado à compressão das partículas entre corpos moedores ou à compressão entre as partículas maiores e as partículas menores (GALERY, 2011).

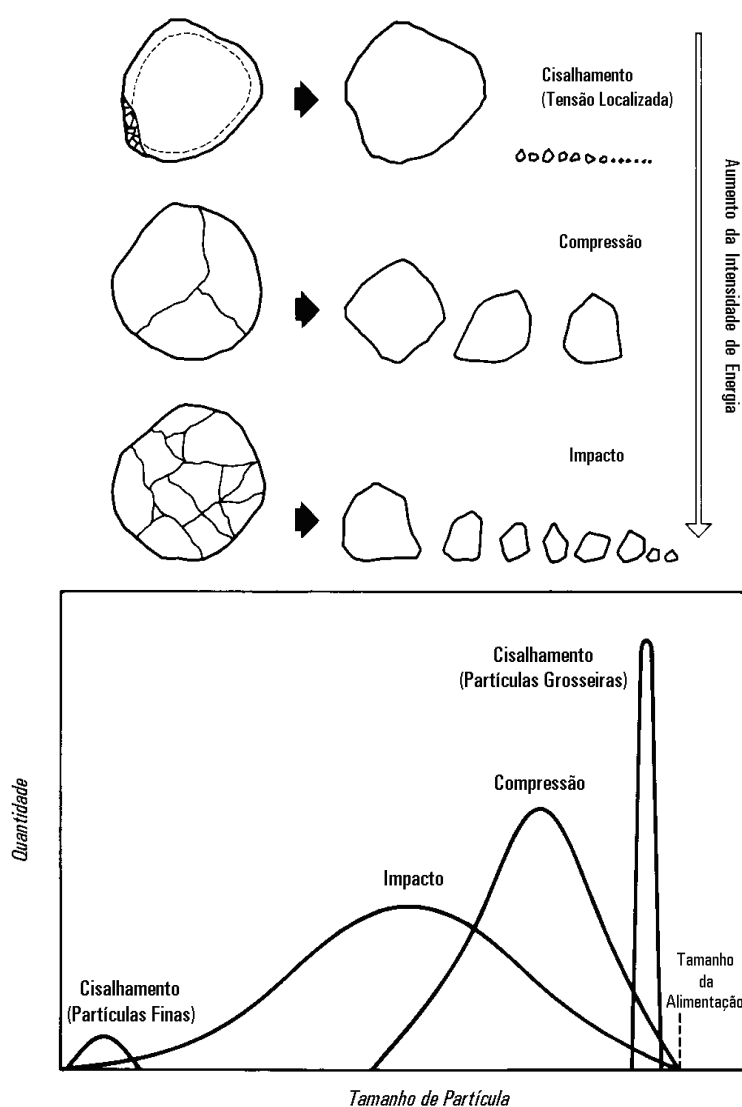
#### **2.2.1.5 Abrasão por cisalhamento**

As forças aplicadas são insuficientes para provocar fraturas ao longo de toda a partícula (VALADÃO; ARAUJO, 2007).

Prevalece uma concentração de esforços (tensão localizada) na área periférica, principalmente na superfície de contato das partículas, que provoca o aparecimento de pequenas fraturas. Resulta deste tipo de quebra uma distribuição granulométrica onde partículas muito pequenas convivem com partículas de tamanho próximo ao original as quais vão tendo seus diâmetros reduzidos gradativamente com o tempo. Esse tipo de quebra é geralmente provocado por atrito, quando partículas maiores são aprisionadas entre superfícies dotadas de movimento. Na maioria das vezes, o movimento entre as superfícies é contrário ao movimento das próprias partículas. Este mecanismo leva a um consumo alto de

energia e a uma produção alta de superfinos. É observado frequentemente nos produtos de moagem autógena (GALLERY, 2011).

A Figura 14 mostra qualitativamente os mecanismos de fragmentação de partículas juntamente e a distribuição granulométrica dos produtos.



**Figura 14 - Distribuição granulométrica das partículas de acordo com o mecanismo de fragmentação utilizado**  
**Fonte: Galery (2011)**

#### 2.2.1.6 Grau de redução

O grau de redução ou relação de redução máxima de um equipamento de cominuição é definido como sendo a razão entre o maior tamanho de partícula presente na alimentação e o maior tamanho de partícula presente no produto. O

termo maior tamanho é usualmente considerado como sendo aquele que representa a malha que deixa passar 80% das partículas (VALADÃO; ARAUJO, 2007). Desta forma tem-se que:

$$GR = \frac{F_{80}}{P_{80}} \text{ (equação 02)}$$

Onde:

Grau = grau de redução ou redução de redução;

$F_{80}$  = malha que deixa passar 80% das partículas na alimentação;

$P_{80}$  = malha que deixa passar 80% das partículas no produto.

### 2.2.2 Aspectos Energéticos da Fragmentação

Existem diversas formas de energia que, em tese, poderiam ser transformadas em energia de fragmentação incluindo-se a térmica (quebra por microondas), a elétrica, a acústica (quebra por ultra-som) e a mecânica. Porém as únicas formas de energia utilizadas em grande escala pela indústria mineral são a energia térmica, sob a forma de explosivos, sendo aplicada na etapa do desmonte de rochas nas frentes de lavra, e a energia mecânica através dos diversos equipamentos de fragmentação (GALERY, 2011).

Nos equipamentos de fragmentação industrial, onde milhares de partículas estão presentes, a redução de tamanho não é um fenômeno isolado. O conhecimento das relações de energia nesses equipamentos constitui preocupação constante, já que é o ponto mais oneroso em uma instalação industrial. Além disso, grande parte da energia disponível é dissipada (através de deformação, atrito, ruído, etc.) restando apenas uma fração da energia transferida à fragmentação propriamente dita. Até hoje não foi possível isolar e quantificar as diferentes parcelas de energia presentes no processo de fragmentação. Tem sido preferível correlacioná-las, todas num único índice que, de preferência, faça referência às dimensões das partículas minerais. Nesta linha, alguns pesquisadores apresentaram contribuições significantes (GALERY, 2011).

### 2.2.2.1 Lei de Bond

A 3ª Lei da Cominuição afirma que o trabalho necessário é proporcional ao comprimento das fissuras produzidas na quebra da partícula. Seguem as expressões:

$$E = E_0 \left[ \frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right] \text{ (equação 03)}$$

Onde:

E = energia consumida;

P = tamanho do produto;

F = tamanho da alimentação;

$E_0 = \text{constante}(10W_i)$

P e F expresso em  $\mu\text{m}$ , são os tamanhos das malhas que deixam passar 80% do produto e respectivamente da alimentação

$E_0 = 10 W_i$  (*work index*) = trabalho em kWh necessário para reduzir 1 (uma) tonelada curta (907 kg) de material desde um tamanho inicial infinito até um tamanho final de 80% passante em 100  $\mu\text{m}$ . (PEREIRA, 1989)

O  $W_i$  é uma característica do minério. É um parâmetro da cominuição que expressa a resistência de determinado minério de ser britado ou moído.

A expressão clássica de Lei de Bond (1961) é a seguinte:

$$W = 10W_i \left[ \frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right] \text{ (equação 04)}$$

onde:

W energia em kWh para moer uma tonelada curta do minério;

$W_i$  índice de trabalho (*work index*);

P abertura da peneira, em micrômetros ( $\mu\text{m}$ ), através da qual passam 80% da massa do produto;

F abertura da peneira, em micrômetros ( $\mu\text{m}$ ), através da qual passam 80% da massa da alimentação.

Segundo Chaves; Peres (2003), a malha por onde passa 80% da alimentação em britadores primários, está informação pode não ser disponível ou ser muito difícil de levantar. Recomenda-se, neste caso, adotar  $0,75 \times A$  (75% do valor da maior partícula da alimentação “*Gape* ou *top size*”).

Há mais de três décadas pesquisa sistemáticas do comportamento das rochas e minerais nos processos de cominuição tem sido desenvolvidos. Testes dos principais mecanismos de fratura, tais como compressão para reduzir o tamanho da partícula, impacto cinético entre o minério e o corpo moedor e abrasão/atrito entre as superfícies das partículas do minério ou da superfície das partículas do minério com superfície dos corpos moedores, em instalações industriais de mineração, e em planta-piloto, em condições rigorosamente controladas, usando-se de equipamentos de britagem e moagem para determinar a energia necessária para produzir a redução do tamanho requerido. Os materiais utilizados foram numerosas amostras de diferentes granitos, basaltos, calcários, escórias e minérios de ferro, foram processados e comparados os resultados entre si de distribuição granulométricas e consumo específico de energia. Na tabela 3 são apresentados os WI médios de alguns minérios e materiais em toneladas curtas (kWh/st). (METSO, 2005)

**Tabela 3 - Work Index Bond para minerais diversos**

<b>Material</b>	<b>Work index WI (kWh/t)</b>	<b>Peso Especifico (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Ardosia	13,86	2,48
Andersita	22,13	2,84
Arenito	11,53	2,68
Barita	6,24	4,28
Basalto preto	21,10	2,86
Basalto	20,41	2,89
Bauxita	9,45	2,38
Cliquer de cimento	13,49	3,09
Cimento	10,57	2,67
Minério de cromo	9,60	4,06
Argila	7,10	2,23
Hematita	12,68	3,76
Hematita-especular	15,40	3,29
Oolitica	11,33	3,32
Imenita	8,45	2,53
Magnetita	10,21	3,88
Taconita	14,87	3,52
Minerio de ouro	14,83	2,85
Cianita	18,87	3,23
Escória	15,76	2,93
Escória de alto-forno	12,16	2,39

**Fonte: Metso (2005)**

### 2.2.3 Estagiamento do Trabalho de Fragmentação

Genericamente, britagem pode ser definida como conjunto de operações que objetiva a fragmentação de blocos de minérios extraídos na jazida, levando-os a granulometria compatíveis para utilização direta ou para posterior processamento. (CHAVES; PERES, 2003).

Na britagem primária são empregados britadores de mandíbulas, giratório, de impacto e de rolos dentados de grande porte, operando sempre em circuito aberto, com ou sem grelha de escalpe para o descarte da fração fina contida na alimentação. A britagem primária é realizada a seco e tem uma razão de redução em torno de 8:1. Recebe normalmente tamanhos máximos de rocha da ordem de 1,0 a 2,0 m. (VARELA, 2011).

A britagem secundária é subsequente à primária e tem como alimentação material da ordem de 15 a 30 cm. É comum na britagem secundária o escalpe com a finalidade de aumentar a capacidade de produção. A operação é normalmente realizada a seco, em circuito aberto ou fechado. Os equipamentos geralmente utilizados são os britadores giratórios secundários, britadores de mandíbulas secundários, britadores cônicos, britadores de martelos e os britadores de rolos. Os britadores giratórios, de mandíbulas e de martelos são semelhantes aos empregados na britagem primária, apenas tendo dimensões menores (FIGUEIRA, 2004).

A britagem terciária é em geral o último estágio de britagem, no entanto, existem usinas com mais de três estágios, cujo propósito está ligado às características de fragmentação do material, ou à granulometria do produto final. Os equipamentos utilizados são os britadores cônicos. Estes equipamentos exigem um maior controle de operação, geralmente trabalhando em circuito fechado (FIGUEIRA, 2004).

A moagem é o último estágio do processo de fragmentação, no qual as partículas são reduzidas, pela combinação de impacto, compressão, abrasão e atrito, a um tamanho adequado à liberação do mineral, geralmente, a ser concentrado nos processos subsequentes. Cada minério tem uma malha ótima para ser moído, dependendo de muitos fatores incluindo a distribuição do mineral útil na ganga e do processo de separação que vai ser usado em seguida (FIGUEIRA, 2004).

Segundo Chaves (2003) para haver uma liberação satisfatória do mineral valioso, é necessário que o minério seja reduzido a uma granulometria fina. Nestas condições, a fragmentação desenvolve-se por meio de três estágios, isto é, grossa, intermediária e fina ou moagem. Nos dois primeiros estágios a fragmentação é realizada em britadores e no último estágio, em moinhos. Não há rigidez quanto aos estágios de britagem, porém, normalmente se usa a classificação mostrada na Tabela 4.

**Tabela 4 - Classificação dos estágios de fragmentação**

Estágio	Tamanho Máximo da Alimentação (mm)	Tamanho Máximo da Produção (mm)	Relação de Redução
Britagem primária	500 a 2000	100 a 305	8:1
Britagem secundária	100 a 635	19 a 102	6:1 a 8:1
Britagem terciária	10 a 100	1 a 25	4:1 a 6:1
Britagem quaternária	5 a 76	0,8 a 1,5	Até 20
Moagem grossa	9,5 a 19	0,4 a 3,5	Até 20
Moagem fina	13	Fino	100:1 a 200:1

Fonte: Metso (2005)

#### 2.2.4 Equipamentos de Britagem

Para uma correta aplicação do britador, além das características do material processado mencionadas anteriormente, outras premissas do projeto de britagem devem ser levadas em consideração. Alguns aspectos técnicos limitam e definem qual o tipo de equipamento a ser utilizado no processo. Entre estes fatores, ressaltam-se os parâmetros mecânicos e operacionais intrínsecos de cada tipo de equipamento, como a energia requerida, as forças envolvidas, o desgaste de componentes, a disponibilidade física e a taxa de produção máxima. Na Tabela 5 são listados alguns dos principais tipos de britadores e suas respectivas características.

**Tabela 5 - Alguns dos principais tipos de britadores e suas respectivas características**

Tipo de britador	Mandíbulas	Giratório	Cônico	Martelos
<b>Serviço</b>	Britagem 1 <sup>a</sup> e 2 <sup>a</sup>	Britagem 1 <sup>a</sup>	Britagem 2 <sup>a</sup> e 3 <sup>a</sup> e 4 <sup>a</sup>	Britagem 1 <sup>a</sup> , 2 <sup>a</sup> e 3 <sup>a</sup>
<b>Grau de Redução</b>	5:1 (4:1 a 9:1)	8:1 (3:1 a 10:1)	3:1 a 7:1	20:1 a 100:1
<b>Capacidade de processamento</b>	Baixa a média (até 1300)	Média a alta (até 1000)	Baixa a média (até 2400)	Baixa a média (até 2800)



(t/h)	Grandes tamanhos (até 1500)	Grandes tamanhos (até 1600)	Até 500	Até 1500
<b>Tamanho máx. da alimentação (mm)</b>	Grandes tamanhos (até 1500)	Grandes tamanhos (até 1600)	Até 500	Até 1500
<b>Granulometria do Produto</b>	Poucos finos. Top size alto p/ lamelas	Poucos finos. Top size menor que mandíbulas	Distrib. Granulom. Uniforme, formato cúbico.	Muitos finos e formas cúbicas
<b>Aplicação</b>	Duros e abrasivo, c/ sílica < 30% e umidade < 10%. Pouco indicado p/ minerais coesivos e c/ tendência a produzir partículas lamelares.	Abrasivo, umidade < 5% e c/ tendência a produzir partículas lamelares. Pouco indicado para / minerais coesivos	Duro e abrasivo e p/ umidade < 8%. Pouco indicado p/ minerais coesivos.	Dureza baixa a moderada, pouco abrasiva c/ sílica < 3 – 8% e umidade < 15 – 20%.

Fonte: Metso (2005)

#### 2.2.4.1 Britadores de mandíbulas

Os britadores de mandíbulas são equipamentos utilizados em britagem primárias, podendo ser aplicados também em britagens secundárias em algumas instalações, tendo como principal função produzir material que possa ser conduzida por um transportador de correia aos estágios subsequentes da instalação (METSO, 2005).

A britagem é realizada entre uma superfície, chamada mandíbula, fixa e outra superfície móvel, sendo esta integrada a um volante, o que fornece o movimento de vai e vem entre elas. Desta maneira o bloco alimentado na boca do britador vai descendo entre as mandíbulas enquanto recebe a compressão responsável pela fragmentação. (FIGUEIRA, 2004).

A especificação dos britadores de mandíbulas é dada pelas dimensões de abertura da alimentação. O tamanho da alimentação nominal situa-se em torno de 0,5 e 1,5 m. Os maiores modelos de britadores de mandíbulas possuem uma boca de entrada do material com 2 m de largura e 1,5 m de profundidade (VARELA, 2011).

Os britadores de mandíbulas são utilizados para fazer a britagem primária em blocos de elevadas dimensões e com grandes variações de tamanho na alimentação, são capazes de processar todo tipo de material, como rochas duras e materiais reciclados (METSO, 2005).

A granulometria do produto é estabelecida pelo ajuste da descarga, sendo definida pelo grau de redução em torno de 5:1 (FIGUEIRA, 2004).

Os britadores de mandíbulas são classificados basicamente em britadores de um ou dois eixos (tipo Blake) de acordo com o mecanismo de acionamento da mandíbula móvel, realizando um movimento elíptico ou pendular, respectivamente. Ambos os tipos são descritos a seguir.

Nos britadores de um eixo, como na Figura 15, o queixo se apoia num eixo excêntrico na parte superior. Na parte inferior, o queixo é mantido em posição por uma placa de articulação. Esta placa oscila somente em forma de pequeno arco. A combinação de movimento excêntrico em cima e oscilatório em baixo dá ao queixo um movimento de “mastigação” por toda a superfície de britagem. (METSO, 2005).



Figura 15 - Britador de mandíbulas de um eixo  
Fonte: Metso (2005)

#### 2.2.4.2 Moinhos de martelos

Os moinhos de martelos são largamente utilizados para materiais frágeis, moles e grudentos como fosfatos, calcários, amiantos e carvão, consiste de um eixo girando em alta rotação e no qual ficam presos, de forma articulada, vários blocos ou martelos. O material é alimentado pela parte superior e as partículas sofrem o impacto dos martelos e são projetados contra a superfície interna da câmara, fragmentando-se, para depois serem forçadas a passar por tela inferior que vai

bitolar a granulometria da descarga, conforme mostrado na Figura 16. (FIGUEIRA, 2004)

A energia aplicada à partícula é a cinética, do impactor, e a quebra ocorre ao longo de fraquezas estruturais pré-existentes, planos de menor resistência micro fraturas, contorno de grão. O produto de cominuição tem, portanto uma distribuição granulométrica natural e está praticamente isento de fraquezas (CHAVES; PERES, 2003)

A massa do impactor sendo muito maior que a da partícula, podemos imaginar que esta adquira velocidade imediatamente, sendo então lançada contra a carcaça ou barras de impacto e aí se quebrando (CHAVES; PERES, 1999)

Materiais que nos britadores de baixa velocidade, como os de mandíbulas, em que a força é aplicada lentamente, apresentam comportamento dúctil, passam a apresentar comportamento frágil nos equipamentos de alta velocidade. O comportamento mecânico dos materiais muda com a velocidade de aplicação da força. (METSO, 2005)

Partículas frágeis ou não elásticas fraturam-se imediatamente, enquanto que partículas dúcteis ou plásticas ou elásticas deformam-se, retornam ou não a sua forma, adquirem velocidade num tempo mínimo, insuficiente para que o comportamento elástico ou plástico prevaleça sobre a fratura. (CHAVES, PERES, 2003)

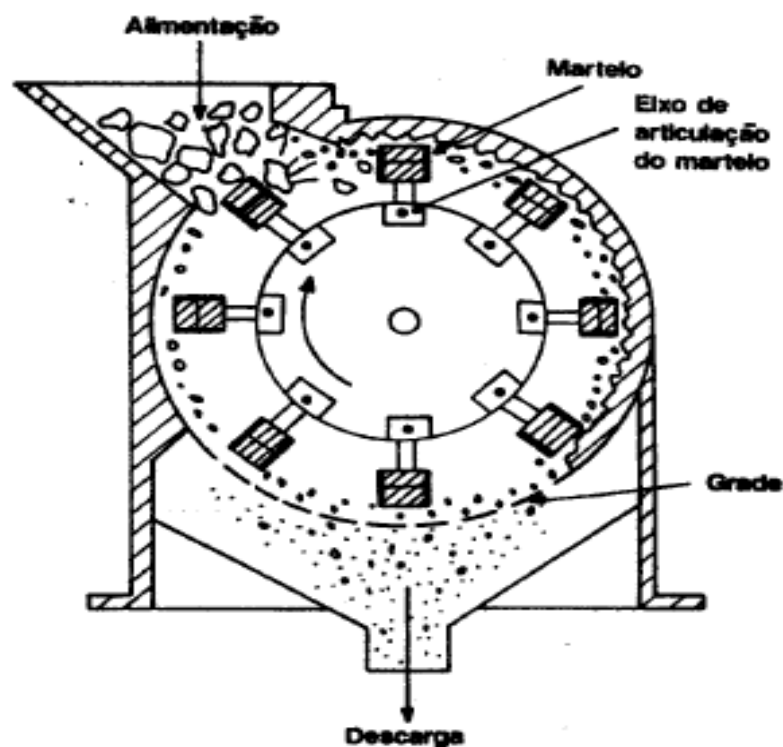


Figura 16 - Moinho de Martelos  
Fonte: Metso (2005)

### 2.3 PRINCÍPIOS DE PENEIRAMENTO

Uma das propriedades diferenciadoras que pode ser utilizada como critério de separação de material, é o tamanho da partícula. Entretanto a definição de tamanho para objetos retangulares está associada a um critério de medição, como volume, massa, dimensão, área, de projeção, etc. no caso de objetos irregulares, que representam a maioria deles, é necessária a adoção de critérios mais adequados como, por exemplo, a passagem ou retenção de partículas em uma abertura geométrica definida (CHAVES; PERES, 2003).

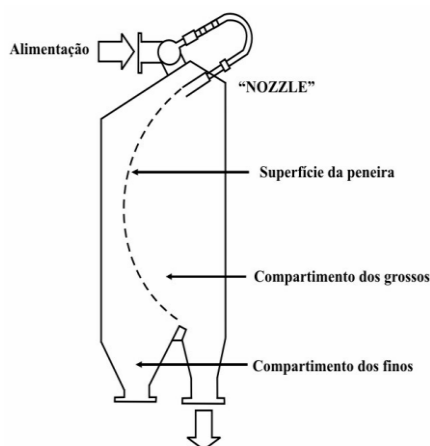
Segundo Chaves e Peres (2003), o peneiramento pode ser descrito como a separação de um material em duas ou mais classes, segundo o tamanho geométrico das partículas, podendo ser executado a seco ou a úmido, com o propósito de facilitar a passagem dos finos através da tela.

O peneiramento é a operação de separação de uma população de partículas em duas frações de tamanhos diferentes, mediante a sua apresentação a um gabarito de abertura fixa e pré-determinada. Cada partícula tem apenas as

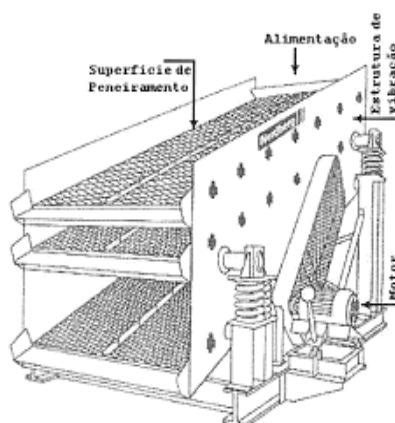
possibilidades de passar ou de ficar retida. Os dois produtos chama-se “oversize” ou retido e “undersize” ou passante. (CHAVES; PERES, 2003).

Segundo Chaves e Peres (2003), os gabaritos podem ser grelhas de barras paralelas, telas de malhas quadradas, telas de malhas retangulares, telas de malhas alongadas, telas de fios paralelas, capas perfuradas e placas fundidas.

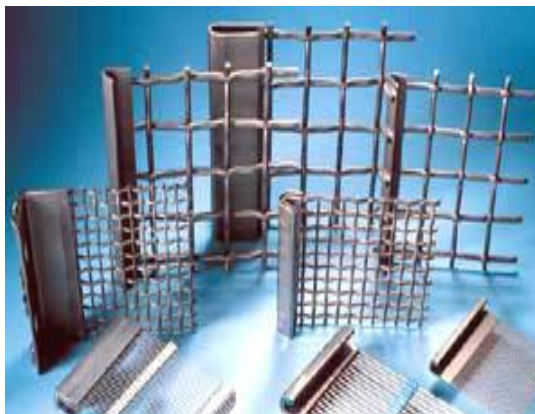
As faixas de tamanhos submetidos ao peneiramento vão desde blocos de (0,46 m) a talco (130  $\mu\text{m}$ ). Os equipamentos capazes de fazer este serviço são muitos e variados, podendo ser divididos genericamente em peneiras fixas, peneiras vibratórias inclinadas, peneiras vibratórias horizontais, grelhas e trômeis (peneiras rotativas). (METSO, 2005).



**Figura 17 - Peneira fixa DSM**  
Fonte: Metso (2005)



**Figura 18 - Peneira Vibratória**  
Fonte: Metso (2005)



**Figura 19 - Grelha fixa**  
**Fonte: Metso (2005)**



**Figura 20 - Representação esquemática de um Trommel**  
**Fonte: Metso (2005)**

Segundo Chaves e Peres (2003), para que a separação por tamanho ocorra de maneira satisfatória no peneiramento, é importante conhecer o comportamento das partículas sob os pontos de vista coletivos e o individual.

Segundo Chaves e Peres (2003), o comportamento coletivo das partículas numa peneira exerce três ações independentes e distintas sobre um conjunto de partículas que é alimentada a ela:

- a) Deve transportar as partículas de uma extremidade do deck até a outra.
- b) De estratificar o leito de modo que as partículas maiores fiquem por cima e as menores por baixo. Assim, dá a estas a chance de se apresentarem à tela e passarem através dela, o que o constitui o.
- c) Peneiramento propriamente dito.

A Figura 21 mostra um corte ideal do leito de partículas sobre o deck de uma peneira eficiente. Inicialmente o leito está todo desarranjado. Em seguida estratifica-se e as partículas finas começam a atravessar a tela. As partículas retidas vão seguindo seu caminho sobre a tela.

A parte inferior da mesma figura mostra a quantidade de material passante ao longo do comprimento do leito. No trecho inicial, a quantidade de material que atravessa é pequena (apenas partículas finas que já estavam por baixo). Esta quantidade à medida que o leito vai sendo estratificada e depois passa a diminuir, conforme a quantidade de partículas finas no leito sobre a tela diminui. Três situações podem ser identificadas: a situação inicial em que a estratificação ainda está ocorrendo o peneiramento de saturação, quando o leito está totalmente estratificado e o peneiramento de baixa probabilidade, em que as partículas finas remanescentes no leito têm de fazer tentativas repetidas até conseguirem atravessá-la.

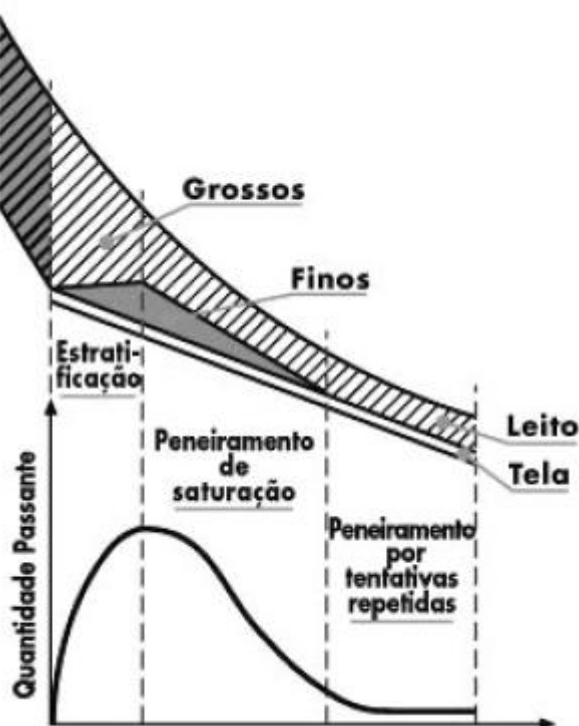


Figura 21 - Comportamento coletivo das partículas em uma peneira vibratória inclinada  
Fonte: Chaves e Peres (2003)

## 2.4 ATRIÇÃO EM TAMBOR ROTATIVO

A atrição em tambor rotativo é uma operação em que o material é movimentado por um sistema de pás em um recipiente fazendo com que as partículas se choquem uma com as outras com o objetivo de limpeza das frações grosseiras e desagregação e remover as contaminações superficiais, tais como substâncias argilo-ferruginosas (ITEP, 1980), na Figura 22 é demonstrado um tambor rotativo.



**Figura 22 - Tambor rotativo**  
**Fonte: Metso (2005)**



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

O método de pesquisa utilizado foi o hipotético-dedutivo, pois buscou confirmar a hipótese proposta na presente pesquisa, pela análise dos dados obtidos por meio de um estudo prático.

Quanto a sua natureza, a pesquisa caracteriza-se como aplicada, que Segundo Menezes e Silva (2001, p.20)“pois utilizou técnicas de beneficiamento de minérios para a concentração de alumínio metálico de escória, gerando informações possíveis de serem utilizadas, como norteadoras para futuros trabalhos e aplicações práticas para o setor de reciclagem de escória de alumínio secundário”.

A presente pesquisa pode ser classificada, do ponto de vista dos objetivos, como exploratória, pois foi realizada pesquisa bibliográfica e testes preliminares para melhor conhecimento das técnicas da reciclagem de escória de alumínio, auxiliando na formulação da hipótese. É descritiva e utilizou como procedimento técnico a pesquisa experimental, por realizar a caracterização do alumínio metálico de alíquotas de escória de alumínio produzidas tentando compreender a rota de melhor concentração de alumínio no lote de escória de alumínio.

#### 3.2 PROCEDIMENTOS DA PESQUISA

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Fundição da UTFPR/Campus Ponta Grossa, em parceria com o Laboratório de Tecnologia Mineral SENAI/Ponta Grossa.

Visando atingir os objetivos propostos optou-se por 2 duas técnicas tradicionais de tratamento de minérios e por via seca: (i) Técnica de Atrição por Tamboramento e (ii) Técnicas de Britagem. Estas técnicas foram escolhidas por se adequarem as características químicas e físicas das escórias e pela simplificação operacional visando futuras aplicações por pequenas e microempresas.

Inicialmente foram recolhidas escórias de fundição geradas na produção de ligas comerciais a partir de sucatas de alumínio. A escória foi recolhida de uma empresa de ligas secundárias. A escória utilizada representou uma média de

produção conforme a demanda das empresas clientes. Assim, o trabalho visou estender seus resultados aos produtores nacionais de ligas secundários e não a um estudo de caso.

A aparência da amostra coletada de escória de alumínio reciclado, em seu estado natural, pode ser vista na macrografia da Figura 23. Tendo como objetivo a caracterização através de ensaios tecnológicos.



**Figura 23 - Amostra de escória de alumínio no estado natural**  
**Fonte: Autoria própria**

Um quadro geral da execução dos ensaios desde a preparação das amostras até a caracterização pós-processamento é mostrado no fluxograma da Figura 24. Destacam-se as atividades de coleta e de amostragem, análises granulométricas e ensaios de beneficiamento; e a determinação do teor de alumínio por via úmida com medição de hidrogênio, fluorescência de raios-X e por pirometria. Estas atividades serão detalhadas a seguir.

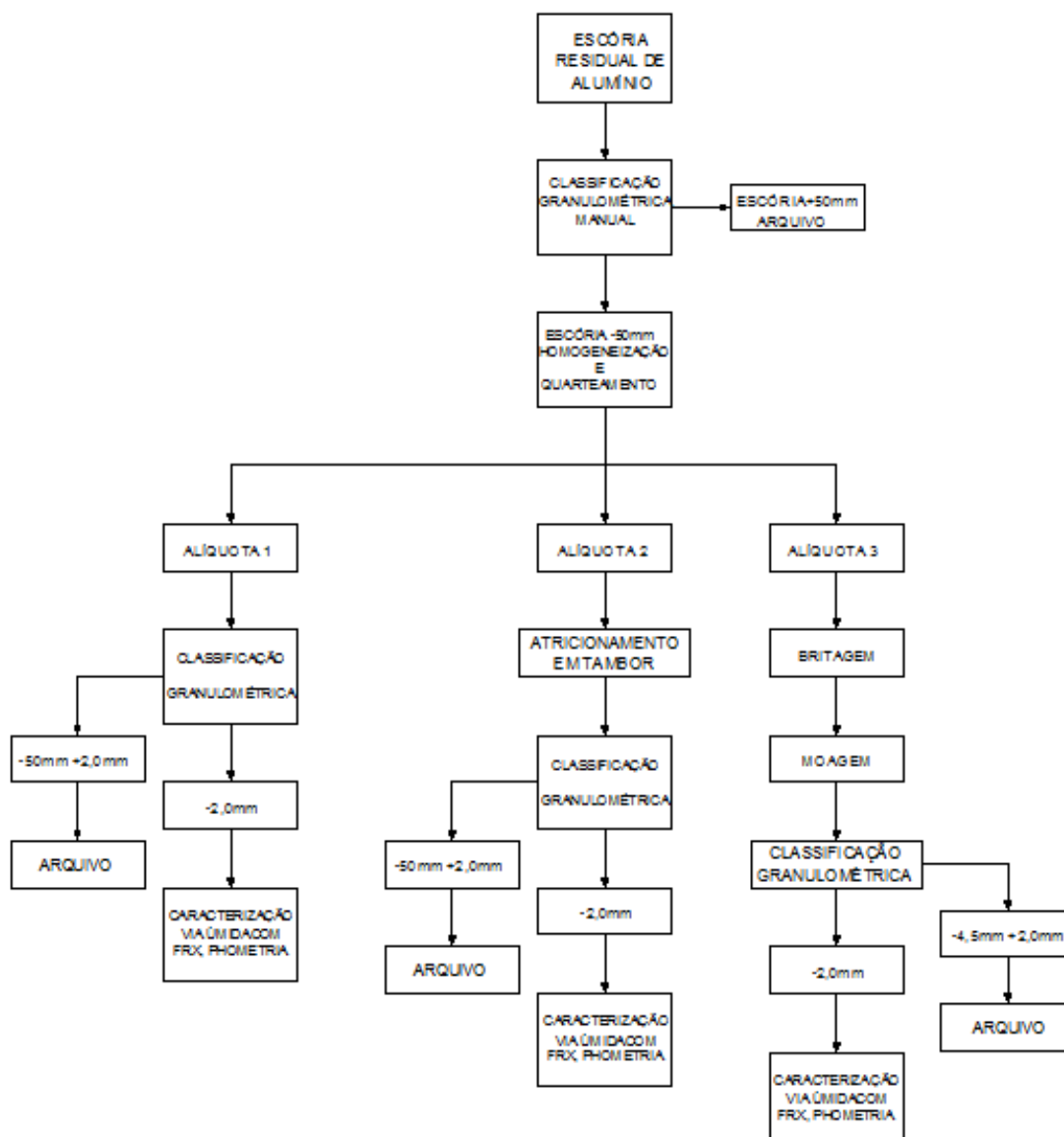


Figura 24 - Fluxograma de preparação das amostras de escória de alumínio  
Fonte: Autoria própria

### 3.3 COLETA E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

#### 3.3.1 Amostragem da Escória de Alumínio

O material utilizado para a realização dos ensaios foi retirado de uma pilha alongada de aproximadamente 338 kg, da forma como estava armazenada no pátio da fundição. A escória foi peneirada manualmente utilizando-se uma peneira com abertura graduada para 50 mm, e de diâmetro de 605,3 mm, para obter uma

granulometria uniforme para os ensaios de caracterização do material. Obtiveram-se os seguintes resultados conforme mostrado na Tabela 6.

**Tabela 6 - Análise granulométrica da escória de alumínio**

Amostra	Abertura (mm)	Massa (kg)	% em peso Retida	% em peso Acumulada
Escória de Alumínio	+ 50	185,00	54,73	54,73
	- 50	153,00	45,27	100,00
	Total	338,00	100,00	

**Fonte: Autoria própria**

Uma vez separados nas 2 frações granulométricas cada uma foi reservada em sacos plásticos, e cada uma foi pesada utilizando uma balança marca OHAUS modelo ARD 110. Para facilitar a representação dos dados, os materiais foram separados em dois grupos:

- Grupo I = Escória de alumínio com fração granulométrica superior a 50 mm, foi reservada (arquivada) para ensaios subsequentes de pirometalurgia em trabalhos futuros.
- Grupo II = Escória de alumínio com fração granulométrica inferior a 50 mm foi utilizado no presente trabalho seguindo as técnicas e caracterizações previstas.

### 3.3.2 Procedimento de Homogeneização e Quarteamento do Material do Grupo II

O material do grupo II foi homogeneizado pelo método de pilha alongada (LUZ; SAMPAIO; ALMEIDA, 2004). Por este método, o material foi depositado sobre uma lona em camadas sucessivas, no formato de uma fileira. Pelo método, a cada camada concluída iniciava-se uma nova camada ao final da anterior e assim sucessivamente até se obter a pilha, uma vez finalizada, o material das pontas da pilha era retirado e colocado novamente sobre a mesma, assim se obteve uma pilha homogênea e com uma espessura uniforme. A Figura 25 mostra uma pilha alongada obtida.

Após a operação anterior, realizou-se o corte transversal da pilha para obtenção de uma amostra considerada representativa do material do grupo II com

aproximadamente 96 kg. Três alíquotas de aproximadamente 16 kg foram obtidas por meio de um quarteador mecânico QT- 16 (Inbrás), as alíquotas foram embaladas conforme mostra a Figura 26, e utilizadas para os ensaios de caracterização do alumínio através dos ensaios de beneficiamento.



**Figura 25 - Pilha alongada de escória de alumínio obtida mediante homogeneização e quarteamento**  
Fonte: Autoria própria



**Figura 26 - 3 alíquotas que foram utilizadas para os ensaios**  
Fonte: Autoria própria

### 3.3.3 Característica Granulométrica da Alíquota de N°1

Uma das alíquotas de escória com aproximadamente 16 kg, foi utilizada para a determinação da distribuição granulométrica. Para isto, utilizou-se de um peneirador mecânico vibratório circular tipo *Syncro-Sizer* da Inbras/Eriez, do Laboratório de Tecnologia Mineral do SENAI - Ponta Grossa, com diâmetro de 609,50mm rotação de 40 RPM, motor de 5 CV, rendimento de 90%, sendo o tempo de peneiramento de 1 horas.

As peneiras utilizadas foram de abertura de: 0,045mm, 0,053mm, 0,075 mm, 0,104mm, 0,15mm, 0,60 mm, 2,0 mm, 4,8 mm, 6,35 mm, 12,5 mm, 19,1 mm, 25,4 mm, resultando em 13 frações granulométricas. Para facilitar a identificação das amostras a seguinte nomenclatura foi utilizada: EG que significa escória separação granulométrica seguida de um número que representa a faixa granulométrica a que

pertence a amostra. Sendo EG1 para a faixa mais fina ( $-0,045\text{mm}$ ), EG2 para a seguinte ( $+0,045\text{mm}-0,053\text{mm}$ ), e assim sucessivamente até EG13 que representa a faixa granulométrica mais grossa ( $+25,4\text{mm}$ ). Obteve-se assim a seguinte denominação para as amostras de distribuição de granulometria sem processamento prévio. Tabela 7 de identificação das amostras.

Uma vez separadas as 13 frações granulométricas cada uma foi reservada em sacos plásticos, e cada uma foi pesada utilizando uma balança marca OHAUS modelo ARD 110.

Tabela 7 - Denominação das amostras da distribuição granulométrica da alíquota de nº 1

DENOMINAÇÃO DAS AMOSTRAS														
	EG 13	EG 12	EG 11	EG 10	EG 9	EG 8	EG 7	EG 6	EG 5	EG 4	EG 3	EG 2	EG 1	EHG
ABNT (mm)		- 25,4	- 19,1	- 12,5	- 6,35	- 4,8	-	-	-	-	-	-	-	-
							2,0	0,6	0,15	0,104	0,075	0,053	0,045	0,15
	+ 25,4	+ 19,1	+ 12,5	+ 6,35	+ 4,8	+ 2,0	+ 0,6	+ 0,15	+ 0,104	+ 0,075	+ 0,053	+ 0,045		

Fonte: Autoria própria

### 3.4 ENSAIOS DE BENEFICIAMENTO

#### 3.4.1 Ensaio de Atrição por Tamboramento da Alíquota de N°2

Para a atrição por tamboramento da alíquota de n°2 com aproximadamente 16 kg, utilizou-se uma betoneira com volume de 380 litros, rotação de 380RPM, motor trifásico de 5 CV tensão nominal de 220 V e rendimento 90%, em um tempo total de 1 hora para a verificação do comportamento da amostra quanto à limpeza das frações grosseiras e desagregação da porção fina da mesma. Utilizando-se da mesma classificação granulométrica da tabela 7 o tamanho de partícula foi avaliado utilizando um peneirador tipo *Syncro-Sizer* da Inbras/Eriez resultando em 13 frações granulométricas. Para facilitar a identificação das amostras a seguinte nomenclatura foi utilizada: EAT que significa escória atricionada em tambor seguida de um número que representa a faixa granulométrica a que pertence a amostra. De forma equivalente gerou-se a Tabela 8 de identificação das amostras.

Uma vez separadas nas 13 frações granulométricas cada uma foi reservada em sacos plásticos, e cada uma foi pesada utilizando uma balança marca OHAUS modelo ARD 110.



Tabela 8 - Denominação das amostras da distribuição granulométrica da alíquota de n°2 processado por atrição por tamboramento

DENOMINAÇÃO DAS AMOSTRAS														
	EAT 13	EAT 12	EAT 11	EAT 10	EAT 9	EAT8	EAT 7	EAT 6	EAT 5	EAT 4	EAT 3	EAT 2	EAT 1	EHAT
ABNT (mm)		- 25,4	- 19,1	- 12,5	- 6,35	- 4,8	- 2,0	- 0,6	- 0,15	- 0,104	- 0,075	- 0,053	- 0,045	- 0,15
	+ 25,4	+ 19,1	+ 12,5	+ 6,35	+ 4,8	+ 2,0	+ 0,6	+ 0,15	+ 0,104	+ 0,075	+ 0,053	+ 0,045		

Fonte: Autoria própria

### 3.5 BRITAGEM

Para avaliação da rota de processamento mineral por britagem seguiu-se por duas etapas onde a alíquota nº3 passou por uma britagem primária, com britador de mandíbula, para redução de 50 mm para abaixo 12 mm e uma britagem secundária com moinho de martelos para a liberação das partículas mais finas.

#### 3.5.1 Britagem Primária em Britador de Mandíbulas

Para a redução do tamanho da alíquota de nº3 com aproximadamente 16 kg, utilizou-se um britador de mandíbulas Modelo BM 2010 com as dimensões da boca de alimentação 200 X 100 mm com rotação de 380 RPM, e produção horária de 1 a 4 t/h do Laboratório de tecnologia Mineral do SENAI. Para a execução do ensaio de britagem foi ajustada a abertura de saída do britador para 12 mm, em um tempo total de 3 minutos para a execução do ensaio de britagem.

Foi realizada a distribuição granulométrica do material passante em 12 mm, britagem, em função da necessidade de mensurar a energia gasta no ensaio de britagem. O material passante em m 12 mm foi separado em frações granulométricas por peneiramento mecânico vibratório tipo Syncro-Sizer da Inbras/Eriez. As peneiras utilizadas foram de abertura: 0,15 mm, 0,60 mm, 2,0mm, 12,0 mm, resultando em 4 frações granulométricas. Para facilitar a identificação das amostras a seguinte nomenclatura foi utilizada: EB que significa escória britada seguida de um número que representa a faixa granulométrica a que pertence à amostra. A Tabela 9 mostra a identificação utilizada.

Uma vez separadas as 4 frações granulométricas estas foram pesadas utilizando numa balança marca GEHAKA modelo 2000 e reservada em sacos plásticos e seguiram para britagem secundária em martelo.

**Tabela 9 - Denominação das amostras da distribuição granulométrica do material processado por britador primário de mandíbula**

<b>DENOMINAÇÃO DAS AMOSTRAS</b>				
	<b>EB 4</b>	<b>EB 3</b>	<b>EB 2</b>	<b>EHB1</b>
<b>ABNT (mm)</b>		-2,0	-0,6	-0,15
	+2,0	+0,6	+0,15	

**Fonte: Autoria própria**

### 3.5.2 Britagem Secundária em Britador de Martelos

O material passante na abertura de 12 mm do britador de mandíbulas seguiu integralmente para britagem em martelos. Foram utilizadas todas as frações da Tabela 9, ou seja, EHB1, EB2, EB3, EB4 num total de 15 kg.

O britador de martelos foi o MM 04F Chanceler, com as dimensões 725 X 460 mm, velocidade de rotação 1470 RPM, com uma produção média de 1 a 2 t/h, do Laboratório de tecnologia Mineral do SENAI. O britador foi ajustado com uma saída de 4,5mm, em um tempo total de 5 minutos para a realização do ensaio de britagem.

O material passante em 4,5 mm foi separado por meio um peneirador mecânico tipo Syncro-Sizer da Inbras/Eriez. As peneiras utilizadas foram de abertura: 0,045mm, 0,053mm, 0,075mm, 0,104mm, 0,15mm, 0,60mm, 2,0mm. Foi utilizada a seguinte nomenclatura para facilitar a identificação das amostras: EBM que significa escória britada em martelos seguida de um número que representa a faixa granulométrica a que pertence à amostra.

Sendo EBM1 para a faixa mais fina (-0,045mm), EBM2(+0,045mm-0,053mm), assim sucessivamente até EBM8 que representa a faixa granulométrica mais grossa (+2,0mm-4,5mm). Tabela 10 de identificação das amostras.

Uma vez que foi peneirada a totalidade do material, cada fração foi reservada em sacos plásticos, e pesadas utilizando uma balança marca OHAUS modelo ARD 110.

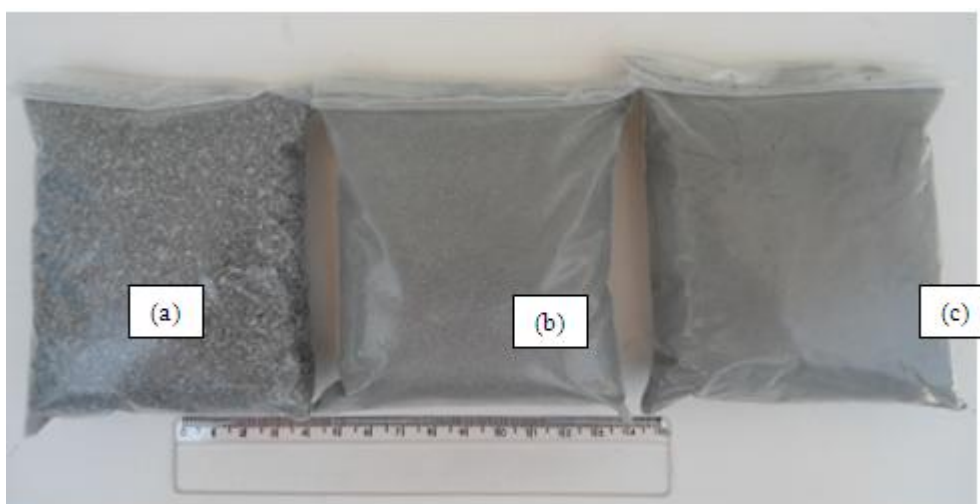
**Tabela 10 - Denominação das amostras das frações granulométricas por processamento pela rota da britagem (primária e secundária)**

DENOMINAÇÃO DAS AMOSTRAS									
	EBM 8	EBM 7	EBM 6	EBM 5	EBM 4	EBM 3	EBM 2	EBM 1	EHBM
<b>ABNT (mm)</b>		-2,0	-0,6	-0,15	-0,104	-0,075	-0,053	-0,045	-0,15
	+2,0	+0,6	+0,15	+0,104	+0,075	+0,053	+0,045		

Fonte: Autoria própria

### 3.6 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ALUMÍNIO NAS ESCÓRIAS PROCESSADAS

Para avaliar a concentração do alumínio metálico obtido nos diversos processamentos e operações foram utilizadas duas técnicas. A Pirometria foi utilizada para partículas maiores do que 0,15mm (+0,15mm) e a análise por via úmida/hidrogênio para as frações finas, menores do que este valor (-0,15mm). Exemplo de embalagens das amostras de caracterização do teor de alumínio é demonstrado na Figura 27 (a) (+0,60-2,0mm), (b) (-0,60mm+0,15mm), (c) (-0,15 mm).



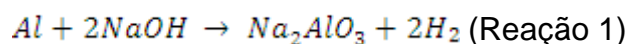
**Figura 27 - Alíquotas utilizadas para a caracterização do teor alumínio**  
Fonte: Autoria própria

### 3.6.1 Análise de Alumínio Metálico em Escórias por Via Úmida de Medição de Hidrogênio

Conforme o fluxograma experimental da Figura 27, a escória da alíquota de nº 1 (sem processamento), da alíquota nº2 (tamboramento) e da alíquota de nº3 (britagem) após serem classificadas em peneiras, separou-se o passante em 0,15mm (-0,15mm). Obteve-se assim 03 amostras para análise por via úmida/hidrogênio denominados respectivamente de EHG1 (sem processamento), EHAT1 (tamboramento) e EHBM1 (britagem). Portanto, representando uma média de todas partículas finas de cada processo, abaixo de 0,15mm.

Cabe lembrar que normalmente, nesta faixa de tamanho de grão, a escória é descartada pela indústria sem a recuperação do alumínio contido. As amostras foram embaladas em alíquotas de 200g utilizando um quarteador mecânico modelo QT-16 (Inbrás).

O ensaio consistia em promover a reação entre a escória e hidróxido de sódio (NaOH) com concentrações controladas. O alumínio metálico era medido indiretamente pelo volume de hidrogênio formado pela reação 1.



O ensaio seguiu o descrito na NBR 8959. Para realização do ensaio utilizou-se de uma amostra padrão com teor de alumínio conhecido e desta forma, para validação da metodologia, utilizou-se o padrão METALUR alumínio Metálico com Grau Químico com pureza de 99,86% de alumínio metálico, certificado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).

Os ensaios foram realizados com 10g de escória em um recipiente com 500 mL de Solução hidróxido de Sódio 20%. A metodologia consistiu na dissolução de 10g de escória em um kitassato juntamente com 500 mL de Solução hidróxido de Sódio a 20%. Para análise do teor de alumínio metálico, é foi necessário calcular, o fator de correção utilizando amostra padrão. Através do conhecimento do deslocamento da coluna de água para uma amostra com teor de alumínio metálico conhecido, foi possível correlacionar ao deslocamento provocado por amostras com

teores desconhecidos e calcular as concentrações de alumínio metálico através da equação:

$$\% Al^{+++} = \frac{L \times FC}{M} \text{(equação 05)}$$

Sendo:

$\% Al^{+++}$  = Teor de alumínio Metálico

FC = Fator de correção obtido anteriormente, % .ml (0,077)

L = leitura de deslocamento provocado na coluna em ml

M = Massa de amostra, g

### 3.6.2 Análise do Rendimento de Alumínio Metálico por Pirometria

A técnica de pirometria foi utilizada para as amostras com granulometria maiores de 0,15mm (+0,15). Utilizou-se de um forno elétrico a indução marca Irmãos Sanchimo modelo Fundlab potência 5,3KW, este tendo um cadinho com grafite com capacidade máxima de aproximadamente 2 kg de alumínio fundido.

Para a realização do ensaio de fusão foram utilizadas alíquotas de aproximadamente 1 kg das seguintes amostras de escória conforme as tabelas 8, 9 e 10: EG7 (+0,60mm-2,0mm), EG6 (-0.6mm+0,15mm), EAT7 (+0,60mm-2,0mm), EAT6 (-0.6mm+0,15mm), EBM7 (+0,60mm-2,0mm), EBM6 (-0.6mm+0,15mm). A alimentação do forno foi manualmente utilizando-se de fluxo salino de cloreto de sódio ((NaCl) e cloreto de potássio (KCl), na proporção de 50% em peso de cada um. Ao término do processo de fusão do alumínio, fez-se a escorificação (retirada da escória), com auxílio de uma escumadeira, durante 01 minutos. A seguir fez-se o vazamento do alumínio. O tempo médio de cada fusão foi de 1 hora e 10 minutos e a temperatura de trabalho variou entre 750°C a 800°C. O rendimento do processo foi calculado através da relação entre o peso do alumínio obtido e o peso da carga da alimentação, conforme a equação 10.

$$\text{Calculo do Rendimento} = \frac{\text{Produto}}{\text{Alimentação}} \times 100 \text{ (equação 06)}$$

### 3.6.3 Fluorescência de Raios-X

Os ensaios de FRX foram realizados com o objetivo de determinar os elementos presentes nas amostras de escória de alumínio obtidos nos ensaios de beneficiamentos. Para fazer as análises semi-quantitativas, o equipamento utilizado foi um espectrômetro de raios-X marca *Panalytical*, modelo *Axios Max*.

Para a realização do ensaio de fluorescência de raios-X foi utilizado uma alíquota de aproximadamente 200(g) das seguintes amostras de escória conforme as tabelas 7, 8, 9 e 10: EG7 (+0,60mm-2,0mm), EG6 (-0.6mm+0,15mm), EHG1 (-0,15mm), EAT7 (+0,60mm-2,0mm), EAT6 (-0.6mm+0,15mm), EHAT1 (-0,15mm), EBM7 (+0,60mm-2,0mm), EBM6 (-0.6mm+0,15mm), EHBM1 (-0,15mm)

## 3.7 DETERMINAÇÃO DO CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGIA NAS ESCÓRIAS PROCESSADAS

Nos equipamentos de fragmentação industrial, onde milhares de partículas estão presentes, a redução de tamanho não é um fenômeno isolado. O conhecimento das relações de energia nesses equipamentos constitui preocupação constante, já que é o ponto mais oneroso em uma instalação industrial. Além disso, grande parte da energia disponível é dissipada (através de deformação, atrito, ruído, etc.) restando apenas uma fração da energia transferida à fragmentação propriamente dita. Até hoje não foi possível isolar e quantificar as diferentes parcelas de energia presentes no processo de fragmentação. Tem sido preferível correlacioná-las, todas num único índice que, de preferência, faça referência às dimensões das partículas minerais (GALERY, 2011).

### 3.7.1 Consumo Específico de Energia nas Alíquotas de Escória Processadas por Atrição por Tambor, e Britagens, Através da Equação de Bond

Um dos grandes itens de custo da britagem é a energia consumida, e foi calculada a energia a ser consumida para fragmentar 1000 t de escória de alumínio, através da equação de Bond:

$$W = 10W_i \left[ \frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right] \text{(equação 07)}$$

onde:

W é energia consumida na britagem em kWh/t,

W<sub>i</sub> índice de trabalho “*Work index*” de Bond, expresso em kWh/t,

P abertura da peneira, em micrômetros (μm), através da qual passam 80% da massa do produto,

F abertura da peneira, em micrômetros (μm), através da qual passam 80% da massa da alimentação.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DE PARTÍCULAS

A Tabela 11 representa um resumo das principais características obtidas nos ensaios de distribuição de partículas. Nesta estão representados os percentuais retidos em cada peneira utilizada. A curva de distribuição granulométrica está mostrada na Figura 28.

Pode-se observar na Figura 28 que a curva de distribuição granulométrica do material atricionado em tambor ficou ligeiramente mais fino quando comparado com a curva granulométrica do material sem processamento. Observa-se que o tamboramento fraturou as partículas maiores com maior concentração entre -0,6mm e+0,15mm com 24,34%.

Para partículas menores de 0,15mm o valor obtido no tamboramento foi de 8,17% sendo maior do que a britagem primária com 7,11%.

Conforme a Figura 28, a curva granulométrica do material britado em martelo evidenciou uma granulometria menor quando comparada com a curva granulométrica do material britado em mandíbulas. Para partículas que 0,15mm houve redução de 2,2 vezes da mandíbula (7,11) para o martelo (15,7%) Segundo (MAIA, 1973), quanto menor o tamanho de partículas maior é a facilidade da liberação da espécie mineral pretendida.

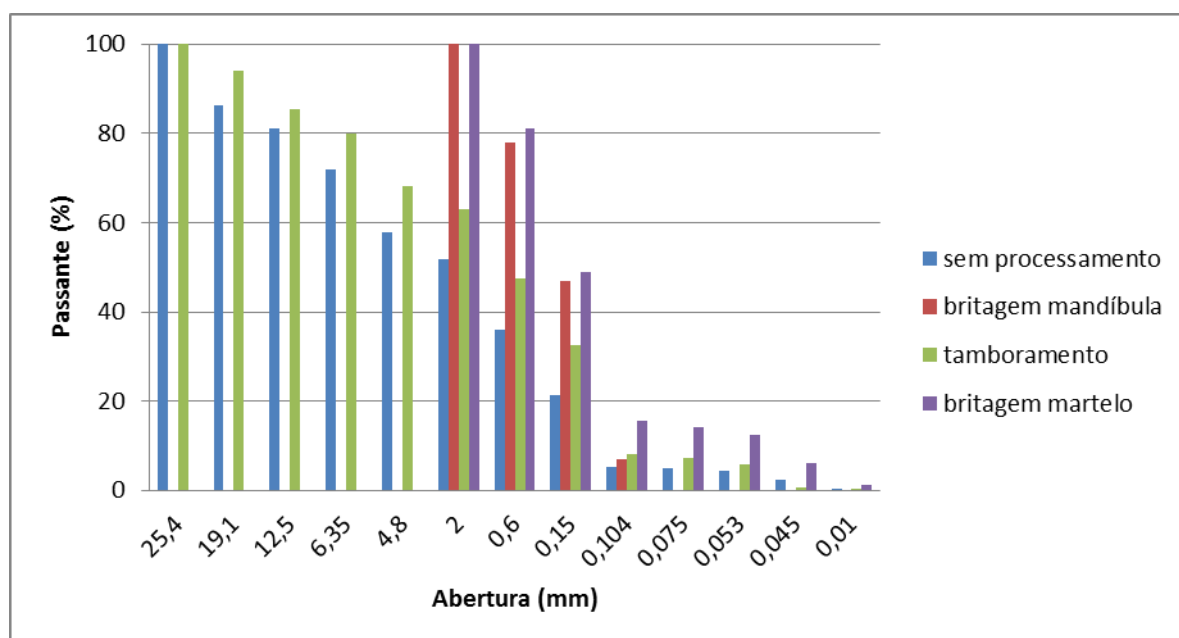
**Tabela 11 - Separação granulométrica das alíquotas de escória de alumínio**  
(continua)

ABNT (mm)	S/ processamento (%peso)	Tamboramento (%peso)	Britagem apenas Mandíbula (%peso)	Britagem Mandíbula + Martelo (%peso)
+ 25,4	13,72	6,11	-	-
+ 19,1 - 25,4	5,32	8,37	-	-
+ 12,5 - 19,1	9,07	5,64	-	-
+ 6,35 - 12,5	14,16	11,82	-	-
+ 4,8 - 6,35	5,81	4,97	-	-
+ 2,0 - 4,8	16,01	15,48	21,97 <sup>(1)</sup>	18,97
+ 0,60 - 2,0	14,70	15,10	31,10	32,17
+ 0,15 - 0,60	15,90	24,34	39,82	33,16

**Tabela 11 - Separação granulométrica das alíquotas de escória de alumínio (conclusão)**

ABNT (mm)	S/ processamento (%peso)	Tamboramento (%peso)	Britagem apenas Mandíbula (%peso)	Britagem Mandíbula + Martelo (%peso)
+ 0,104 - 0,15	0,43	1,03	7,11 (2)	1,48
+ 0,075 - 0,104	0,49	1,25		1,69
+0,053 - 0,075	2,07	5,10		6,30
+0,045 - 0,053	1,87	0,73		5,06
- 0,045	0,44	0,06		1,17

Fonte: Autoria própria



**Figura 28 - Curva granulométrica das três alíquotas ensaiadas**

Fonte: Autoria própria

#### 4.2 AVALIAÇÃO DO TEOR DE ALUMÍNIO DAS ESCÓRIAS PROCESSADAS

Conforme comentado no capítulo 3, para avaliar o efeito dos processos utilizados na concentração do alumínio metálico foram utilizadas duas técnicas; a análise por via úmida e a técnica por pirometria.

A pirometria foi empregada para amostras maiores que 0,15mm e a via úmida para amostras menores que este valor.

#### 4.2.1 Análise de Alumínio Metálico por Via Úmida de Medição de Hidrogênio nas Três Alíquotas Ensaçadas

Na Tabela 12 estão os resultados para as 03 amostras (alíquotas) “sem tratamento”, com “tamboramento” e com “britagem”. Adicionalmente é mostrada a porcentagem do material passante em (-0,15mm) de cada uma dessas três alíquotas.

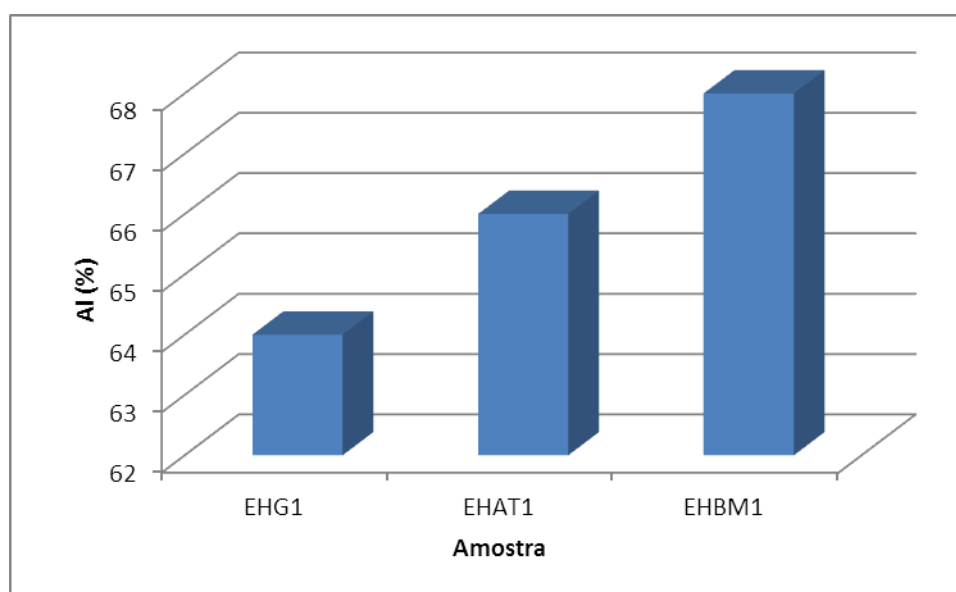
Pode-se observar na Tabela 12 que a maior concentração de alumínio metálico é obtida na amostra 3-britada. Esta rota de processamento permitiu também a maior porcentagem mássica de partículas menores de -0,15mm.

Na Figura 29 são mostrados os resultados em forma gráfica.

**Tabela 12 - Análise do alumínio metálica por via úmida de medição de hidrogênio**

Amostra	Código	% massa	(%) alumínio
Alíquota n°1 sem processamento	EHG1(-0,15mm)	5,30	64,0
Alíquota n°2 Atricionada em tambor	EHAT1(-0,15mm)	8,70	66,0
Alíquota de n°3 britada em mandíbula seguida de martelos	EHBM1(-0,15mm)	15,70	68,0

Fonte: Autoria própria



**Figura 29 - Teor de alumínio obtido por via úmida de medição de hidrogênio para cada uma das alíquotas analisadas**

Fonte: Autoria própria

#### 4.2.2 Análise de Alumínio Metálico por Pirometrias Três Alíquotas Ensaçadas

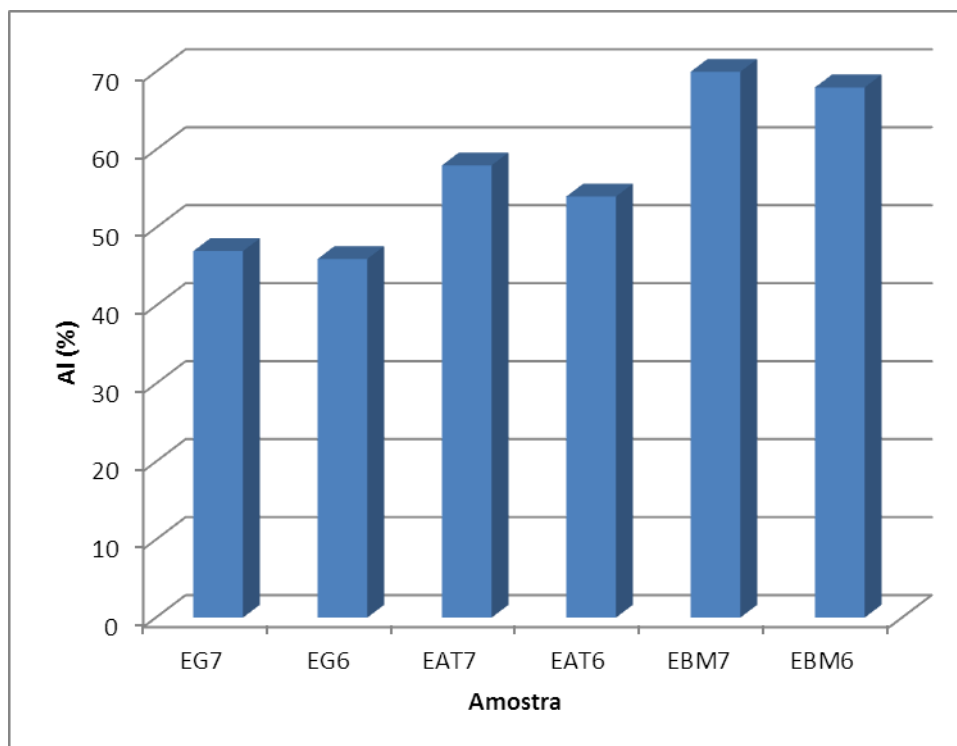
O teor de alumínio metálico nas amostras com granulometrias maiores de 0,15mm foram realizadas por pirometria. Método de análise do alumínio metálico por pirometria foi aplicado nas três alíquotas. Os resultados para as 03 alíquotas entre 0,15mm e 2mm de diâmetro podem ser vistos na Tabela 13 e pelo gráfico da Figura 30. Observa-se que novamente as amostras britadas apresentaram os maiores teores de alumínio metálico contido e as maiores quantidades liberadas de partículas nas granulometrias mais finas. Em ordem, o tamboramento simples também se mostrou eficiente em relação ao material sem processamento (apenas peneirado).

A maior concentração de alumínio metálico para a britagem não era esperada pois como visto no item 2.1, a escória apresenta grandes teores de sais e óxidos que ficam aprisionados nos seus grumos; efeitos mecânicos intensos poderiam liberar estes contaminantes diluindo o alumínio metálico.

**Tabela 13 - Análise do rendimento de alumínio metálico nas frações de escória de alumínio analisadas por pirometria**

Amostra			Código	% Massa	(%) alumínio
Alíquota n°1 processamento	sem		EG7 (-2,0mm +0,60)	14,70	47,0
			EG6 (-0,60+0,15mm)	15,90	46,0
Alíquota n°2 em tambor	Atricionada		EAT7 (-2,0mm +0,60)	15,10	58,0
			EAT6(-0,60+0,15mm)	24,30	54,0
Alíquota de n°3 mandíbula seguida de martelos	britada em		EBM7 (-2,0mm +0,60)	32,17	70,0
			EBM6 (-0,60+0,15mm)	33,16	68,0

**Fonte: Autoria própria**



**Figura 30 - Rendimento de alumínio obtido por pirometria para cada uma das alíquotas analisadas**  
**Fonte: Autoria própria**

#### 4.2.3 Análise dos Elementos Presentes nas Frações das Alíquotas de Escória de Alumínio por Fluorescência de Raios-X

Para avaliar a composição química global da escória utilizou-se de fluorescência de raios-x nas três alíquotas, para as mesmas amostras utilizadas na avaliação do concentrado de alumínio por pirometria e por via úmida.

A análise por fluorescência utilizada não é seletiva para o tipo de fase formada. Ou seja, a espécie metálica pode estar como fase metálica ou na forma catiônica. Assim, o resultado para os metais foi todo convertido na forma do óxido mais estável daquele metal. No entanto, todas as amostras de escória mostraram elevado teor de alumínio metálico, mesmo nas proporções granulométricas mais finas. Isto indica que a escória é bastante redutora desde a sua formação a elevadas temperaturas. Admite-se, pois que elementos metálicos adicionados nas ligas de alumínio mantiveram-se na forma reduzida metálica. Isto seria válido para o caso do ferro, silício, cobre, manganês, cromo cujos óxidos são facilmente reduzidos pelo alumínio. O caso mais expressivo é o do silício que apresenta elevados teores em todas as amostras. Como este elemento não foi adicionado posteriormente na

escória admite-se que está ligado com o alumínio metálico que quantificado na pirometria e na via úmida/hidrogênio.

Pode-se observar que em todos processos o teor de alumínio/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aumenta com o tamanho das partículas. Destaque para a britagem que mostra os maiores teores. No entanto, os elementos cloro, sódio e potássio, que foram adicionados sob a forma de sais, seguem relação inversa com o tamanho de partícula para a britagem e nenhuma relação para o tamboramento e para sem tratamentos. Isto indica que a britagem é um processo mais eficiente para a liberação destes componentes para as porções mais finas da escória.

Na Figura 31 é mostrado de forma gráfica o teor de alumínio encontrado para cada alíquota, bem como o teor dos elementos: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, MgO, Na<sub>2</sub>O, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O.

**Tabela 14 - Análise semi-quantitativa por fluorescência de raios-x**

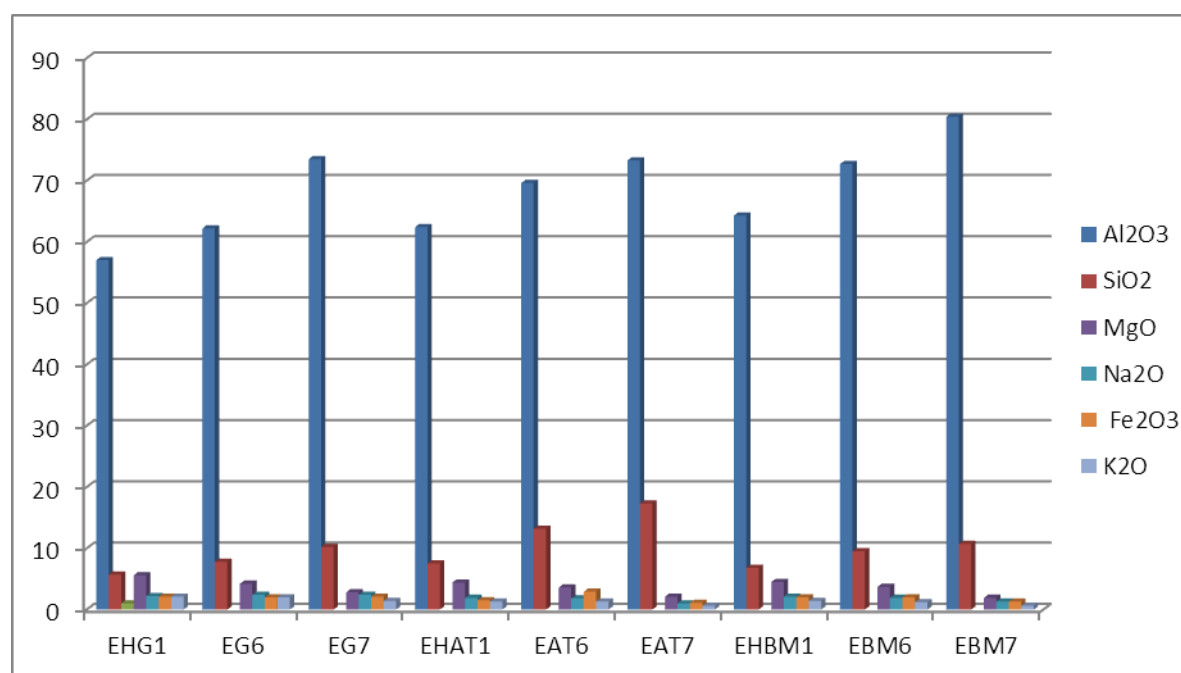
(continua)

Base	Sem tratamento			Tamboramento			Britagem		
	EHG1	EG6	EG7	EHAT1	EAT6	EAT7	EHBM1	EBM6	EBM7
Óxidos	*	<b>+0,15</b>	<b>+0,60</b>	*	<b>+0,15</b>	<b>+0,60</b>	*	<b>+0,15</b>	<b>+0,60</b>
	<b>-0,15</b>	<b>-0,60</b>	<b>-2,0</b>	<b>-0,15</b>	<b>-0,60</b>	<b>-2,0</b>	<b>-0,15</b>	<b>-0,60</b>	<b>-2,0</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	57,0	62,2	73,5	62,4	69,6	73,3	64,3	72,7	80,4
SiO <sub>2</sub>	5,7	7,8	10,2	7,5	13,15	17,3	6,8	9,5	10,7
Cl	4,0	4,4	3,3	2,4	1,9	1,0	3,2	2,8	1,2
MgO	5,6	4,2	2,8	4,4	3,6	2,1	4,5	3,7	1,9
Na <sub>2</sub> O	2,2	2,4	2,4	1,9	1,8	1,0	2,1	1,9	1,3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,1	2,0	2,1	1,5	2,9	1,1	2,0	2,0	1,3
K <sub>2</sub> O	2,1	2,0	1,4	1,3	1,3	0,6	1,4	1,2	0,6
TiO <sub>2</sub>	3,8	3,1	1,1	2,4	1,2	0,6	1,4	2,0	0,5
SO <sub>3</sub>	2,1	1,6	1,0	1,6	1,2	0,6	1,5	1,2	0,5
CaO	1,9	1,1	0,8	1,4	1,3	0,9	1,3	1,0	0,5
BaO	1,9	1,1	0,4	1,1	0,2	0,1	1,3	0,2	0,2
CuO	0,4	0,2	0,3	0,2	0,3	0,5	0,3	0,2	0,2
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,2	0,2	0,2	1,1	0,6	0,5	0,2	0,9	0,3
F	0,2	0,2	0,2	1,3	0,2	0,1	0,3	0,2	0,1
MnO	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1
ZnO	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	< 0,1
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	< 0,1
PbO	0,1	0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	< 0,1	< 0,1
NiO	0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	< 0,1	< 0,1

**Tabela 14 - Análise semi-quantitativa por fluorescência de raios-x (conclusão)**

Base	Sem tratamento			Tamboramento			Britagem		
ZrO <sub>2</sub>	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	----	< 0,1	< 0,1	< 0,1
SrO	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-----	< 0,1	0,1	< 0,1
P.F.	11,10	6,98	-19,86	10,20	14,74	-20,61	7,56	-8,21	-28,20

Fonte: Autoria própria



**Figura 31 - Análise semi-quantitativa por fluorescência de raios-x**  
Fonte: Autoria própria

### 4.3 CONSUMO ENERGÉTICO NOS PROCESSAMENTOS

Em todos os processos de cominuição de minerais, as necessidades energéticas para tal trabalho ocupam um lugar de destaque por influenciar diretamente na seleção dos processos e dimensionamento dos equipamentos a serem utilizados. Nesse sentido, o modelo de Bond foi utilizado para comparar o processo de tamboramento com o de britagem, conforme foi explicado no capítulo 3.

O Apêndice A demonstra os cálculos aqui utilizados com base na equação 5.

#### 4.3.1 Consumo de Energia no Processo de Tamboramento (Alíquota de nº2)

O cálculo do consumo de energia é feito através da equação 5, e os valores obtidos são demonstrados na Tabela 15. O valor de ( $F_{80}$ ) é a abertura da peneira, em microns ( $\mu\text{m}$ ), através da qual passam 80% da massa da alimentação, demonstrado na Tabela 6. O valor de ( $P_{80}$ ) é a abertura da peneira, em microns ( $\mu\text{m}$ ), através da qual passam 80% da massa do produto, conforme demonstrado no gráfico da Figura 28.

O valor obtido do consumo específico de energia (kWh/t) no tamboramento calculado pela equação Bond foi de 5,5kWh/t. Este valor pode ser considerado um valor elevado quando comparado com processamento de materiais tradicionais da indústria mineral. Um exemplo de materiais que tem valores abaixo de 5 kwh/t, é a Cromita com consumo de 1,2kWh/t, e para minério de ferro de 3,24kWh/t (SAMPAIO; LUZ; LINS, 2001)

Pode-se observar na Figura 28, que a curva de distribuição granulométrica do material atricionado em tambor, ficou ligeiramente mais fino, quando comparado com a curva granulométrica do material sem processamento. Desta forma valor de 5,5kWh/t, reforça a observação de que um tamboramento simples, mesmo para um tempo excessivo é pouco eficiente para a cominuição da escória e a liberação de materiais úteis. Este fato pode justificar o menor teor de alumínio encontrado granulometria menor que 0,15 mm

**Tabela 15 - Valores obtidos no consumo de energia do Tamboramento**

Cálculo de energia consumida no Tamboramento		
Passante na alimentação em $\mu\text{m}$ ( $P_{80}$ )	Passante no produto em $\mu\text{m}$ ( $F_{80}$ )	Energia consumida (WKh/t)
650	40.000	5,5

**Fonte: Autoria própria**

#### 4.3.2 Consumo de Energia na Britagem Primária, da Alíquota de nº3

O cálculo do consumo de energia é feito através da equação 5, e os valores obtidos são demonstrados na Tabela 16. O valor de ( $F_{80}$ ) é a abertura da peneira, em microns ( $\mu\text{m}$ ), através da qual passam 80% da massa da alimentação, demonstrado na Tabela 6. O valor de ( $P_{80}$ ) é a abertura da peneira, em microns ( $\mu\text{m}$ ), através da



qual passam 80% da massa do produto, conforme demonstrado no 3.5.1 abertura do britador de 12mm.

O valor obtido do consumo específico de energia (kWh/t) na britagem primária calculado pela equação Bond foi de 0,79kWh/t. Este valor pode ser considerado muito baixo quando comparado com processamento de materiais tradicionais da indústria mineral. Um exemplo de material que tem valor acima é a alumina com 3,79 kWh/t. (CHAVES; PERES, 2003)

Pode-se observar na Figura 28, que a curva de distribuição granulométrica do material britado em mandíbulas ficou ligeiramente semelhante, quando comparado com a curva granulométrica do material britado em martelos mostrando-se eficiente para a liberação de materiais úteis. Este fato pode justificar os valores os teores de alumínio encontrados nas frações granulométricas inferiores a (- 2 mm).

**Tabela 16 - Valores obtidos no consumo de energia na britagem primária**

Cálculo de energia consumida na britagem primária		
Passante na alimentação em $\mu\text{m}$ ( $P_{80}$ )	Passante no produto em $\mu\text{m}$ ( $F_{80}$ )	Energia consumida (KWh/t)
9600	40000	0,79

**Fonte: Autoria própria**

#### 4.3.3 Consumo de Energia na Britagem Secundária da Alíquota de n°3

O cálculo do consumo de energia é feito através da equação 5, e os valores obtidos são demonstrados na Tabela 17. O valor de ( $F_{80}$ ) é a abertura da peneira, em microns ( $\mu\text{m}$ ), através da qual passam 80% da massa da alimentação, demonstrado na tabela. O valor de ( $P_{80}$ ) é a abertura da peneira, em microns ( $\mu\text{m}$ ), através da qual passam 80% da massa do produto, conforme demonstrado no 3.5.2 abertura do britador de (4,5mm).

O valor obtido do consumo específico de energia (kWh/t) na britagem secundária calculado pela equação Bond foi de 0,95kWh/t. Este valor pode ser considerado muito baixo quando comparado com processamento de materiais tradicionais da indústria mineral. Um exemplo de material que tem valor acima é a Apatita com 2,68 kWh/t. (SAMPAIO; LUZ; LINS, 2001).

Na Figura 28, são apresentadas as curvas da distribuição granulométrica do material britado em mandíbulas e martelos. Observou-se que a curva granulométrica

do material britado em martelos mostrou-se ligeiramente superior. Com base nos resultados obtidos na recuperação de alumínio metálico, e consumo de energia o ensaio de britagem foi selecionado com o mais indicado, entre os tipos pesquisados, para a recuperação de alumínio metálico da escória.

**Tabela 17 - Valores obtidos no consumo de energia na britagem secundária**

Cálculo de energia consumida na britagem secundária		
Passante na alimentação em $\mu\text{m}$ ( $P_{80}$ )	Passante no produto em $\mu\text{m}$ ( $F_{80}$ )	Energia consumida (KWh/t)
3600	7680	0,95

**Fonte: Autoria própria**

#### 4.4 CONSIDERAÇÃO ENTRE BRITAGEM PRIMÁRIA E SECUNDÁRIA

De forma a estudar o comportamento da escória quanto a concentração do alumínio metálico, utilizou-se da britagem primária, e secundária, o objetivo básico foi a redução de tamanhos, e utilizando-se operações unitárias de separação de tamanho, separação de espécies minerais, de modo a obter concentrados e produtos aceitáveis pelas indústrias metalúrgica, cerâmica ou química.

Com base nos resultados obtidos no circuito britagens, seguido do conjunto de operações unitárias permite concluir, quanto aos teores e recuperações finais dos concentrados, que a rota britagem permite obter o melhor teor de alumínio no concentrado e a máxima recuperação do elemento ou substância útil.

## 5 CONCLUSÃO

- As frações granulométricas avaliadas com a separação granulométricas demonstraram que a maior cominuição foi obtida na britagem com os percentuais de 15,7% de concentração abaixo de 0,15mm contra 8,17% para o tamboramento. Isto comprova a eficácia da britagem na liberação das partículas.
- O tamboramento fraturou as partículas maiores em relação ao material de referencia (sem processamento). Com concentração de 24,34% para grãos menores de 0,6mm e maiores que 0,15mm.
- A curva granulométrica do material britado em martelo evidenciou uma granulometria menor comparada com a curva granulométrica do material britado em mandíbulas. Para partículas que 0,15mm houve redução de 2,2 vezes da mandíbula (7,11%) para o martelo (15,7%).
- As análises químicas por via úmida mostraram que o processamento de britagem (primária+ secundária) produziu as maiores quantidade de materiais finos e também o maior teor de concentração de alumínio metálico no produto abaixo de 0,15mm; 68% de Al.
- O teor de alumínio metálico para partículas entre 2,0mm e 0,15mm foi maior para o processo de britagem com 70%Al. O tamboramento superou a amostra de referencia (sem tratamento) com maior teor de 58%.
- Observou-se por fluorescência de raios - X que em todos os processos o teor de alumínio/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aumentou com o tamanho das partículas obtidas. Destaque para a britagem que mostrou os maiores teores. No entanto, os elementos cloro, sódio e potássio, que foram adicionados sob a forma de sais, seguiram relação inversa com o tamanho de partícula para a britagem e pouca relação para o tamboramento e para sem tratamentos. Isto indicou que a britagem é um processo mais eficiente para a liberação destes componentes para as porções mais finas da escoria.
- Ainda por fluorescência de raios - X pode-se observar que o teor de silício aumentava proporcionalmente ao alumínio presente. Uma vez que o silício está na forma metálica (dada a condição redutora da escoria) pode

afirmar que o alumínio metálico analisado por via úmida e pirometria está ligado com este elemento.

- A facilidade para a liberação de partículas foi avaliada pelo modelo de Bond através de análise energética considerando um WI de 15,76kWh/t (tabelado). A energia (W) para a britagem foi de 1,44kWh/t enquanto que para o tamboramento foi de 5,5kWh/t. Este valor de 3,16 vezes maior do tamboramento representa a dificuldade deste processo para a cominuição da escória.
- A rota de britagem foi executada em uma amostra de escória em duas etapas estagiadas (primária e secundária), que posteriormente foram juntadas para a execução da caracterização do teor de alumínio nas faixas granulométricas supracitadas, e consumo de energia. Com base nos resultados obtidos verificou-se que esta rota é melhor pelas seguintes razões: teor de alumínio superior a rota de atrição por tamboramento, facilidade operacional dos equipamentos utilizados, baixo investimento na sua aquisição. Permitindo-se aos geradores e recicladores de escória secundária, a obtenção de material conforme a fração granulométrica desejada, e assegura o controle de processo monitorando continuamente o material produzido nas diferentes faixas granulométricas, desta forma maximiza reaproveitamento de todos os elementos contidos na escória possibilitando assim a redução. Sendo, portanto, apropriadas para pequenos produtores de alumínio secundário.
- Os teores de alumínio foram superiores aos obtidos na rota de atrição por tamboramento.
- O método de Bond foi utilizado para determinar o consumo energético na britagem primária o qual apresentou um valor de 0,79 kWh/t, e para a britagem secundária 0,95 kWh/t.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudo da incorporação da escória de alumínio britado na composição de ligas de alumínio metálico.

- Estudo de novas composições de escória britada para uso como matérias-primas para a indústria de fundição secundária.

## REFERÊNCIAS

ABAL (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO). **Anuário Estatístico 2009**. São Paulo: 2010.

\_\_\_\_\_. **Anuário Estatístico 2010**. São Paulo: 2011.

\_\_\_\_\_. **Guia técnico do alumínio: geração e tratamento de escória**. São Paulo: ABAL, 2007.

\_\_\_\_\_. Mundo Automotivo. **Aluauto** (Boletim Eletrônico do Centro de Informações Automotivo e de Transportes da ABAL). n. 12. Disponível em: <<http://www.abal.org.br/aluauto/ed12/mundoautomotivo2.asp>>. Acesso em 16 jan. 2007.

\_\_\_\_\_. **Reciclagem: no Brasil**. Disponível em: <<http://www.abal.org.br/reciclagem/brasil.asp>>. Acesso em: 14 nov. 2011.

AMBIENTE BRASIL. **Metais pesados**. Disponível em: <[http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=residuos/index.php3&cont\\_eudo=./residuos/artigos/metais.html](http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=residuos/index.php3&cont_eudo=./residuos/artigos/metais.html)>. Acesso: 11 set. 2007.

ANTREKOWITSCH, H. **Treatment of Al-Dross and Recovery of Metal**. Short Report of Department of Nonferrous Metallurgy, Montan University Leoben.2005.

ARAUJO, A. C. **Introdução ao tratamento de minérios**. In: Apostila de Tratamento de Minérios. Departamento de Engenharia de Minas. Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, p.1-8, 2004.

BERTRAM, M. **The global and European dimension of aluminium recycling**. Disponível em: <[http://www.aluminiumcentrum.nl/aluminiumcentrum.nl/files/Doc/Congres%202006/module%20a/2-Mrs.\\_Marlen\\_Bertram.pdf](http://www.aluminiumcentrum.nl/aluminiumcentrum.nl/files/Doc/Congres%202006/module%20a/2-Mrs._Marlen_Bertram.pdf)>. Acesso em: 20 jul. 2008.

CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. **Teoria e prática do tratamento de minérios: britagem, peneiramento e moagem**. 2. ed. São Paulo: Signus, 2003. v. 3

CHIEKO, M.; HIPOLITO, R. Como reciclar o alumínio sem riscos ambientais. **Revista Ciência Hoje**, São Paulo, v. 29, n. 169, p. 66-8, mar. 2001.

COCHRAN, C. N.; BELITSKUS, D. L.; KINOSZ, D. L. Oxidation of aluminium magnesium melt in air, oxygen, flue gas, and carbon dioxide. **Metallurgical Transition B**, v.8, 1977.

DROUET, G.D. et al. Dross treatment in a rotary arc furnace with graphite electrodes. **JOM**, v. 46, n. 5, 1994.

DROUET, M. G.; et al. A rotary arc furnace for aluminum dross processing. In: QUENEAN, P. B.; PETERSON, R. D. (Eds.). INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON RECYCLING OF METALS AND ENGINEERED MATERIALS, 3., 1995, **Proceedings...** 12–15 November 1995, Point Clear, Alabama. The Mineral, Metals and Materials Society, 1995.

FIGUEIRA, H. V. O.; ALMEIDA, S. L. M.; LUZ, A. B. **Cominuição**. Rio de Janeiro: CETEM, 2004. Cap. 4. p. 113-194.

FILLETI, A. Minimização da perda de fundição de a e sais ligas. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA DA INDÚSTRIA DO ALUMÍNIO NO BRASIL, 4. São Paulo, 1993 **Anais**. São Paulo: ABAL, 1993. p.106-116.

FIGUEROA, S.; ZANETTI, M. C.; RUFINO, B. Waste characterization and recycle in aluminium foundry. Resources. **Conservation and Recycling**, v. 45, n. 1, p. 48-59, 2005.

FRETI, J.D.; BBORNAND, K.; BUXMAN, K. Metallurgy of dross formation on aluminium melts. **Light Metal**, AIME, p. 1003-1016, 1982.

GALERY, R. **Fragmentação de minérios**: primeira parte. Belo Horizonte: Ed. da UFMG, 2011.

HINE, R.A.; GUMINSKI, R.D. High-temperature oxidation of aluminium-magnesium alloys in various gaseous atmospheres. **Journal of Institute of Metals**, v. 89, p. 417-422, 1996.

ROSSEL, H. **Fundamental investigations about metal loss during remelting of extrusion and rolling fabrication scrap.** Light Metals, 1990, ed. C. M. Bickert (Warrendale, PA: The Minerals, Metals, and Materials Society, 1990), 721-729.

HWANG, J.Y., HUANG, X., XU, Z. Recovery of metals from aluminium dross and salt cake. **Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering**, v. 5, n. 1, p. 47-62, 2006.

IAI (International Aluminium Institute). **Global aluminium recycling: a cornerstone of sustainable development.** 2009a. Disponível em: <<http://www.worldaluminium.org/cache/fl0000181.pdf>>. Acesso em 10 mar. 2011.

ITEP (Fundação Instituto Tecnológico do Estado de Pernambuco). **Tratamento de Minérios.** Recife, 1980.

KANTI, D. E.; et al. Numerical simulation of early stages of oxide formation in molten aluminium-magnesium alloys in a recuperatory furnace. **Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering**, v. 12, p. 389-405, 2004.

KOGAN, M.; REED, G. Dross processing at commonwealth aluminium plant. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON RECYCLE AND SECONDARY RECOVERY OF METALS AND THE FALL EXTRACTIVE AND PROCESS METALLURGY MEETING, FORT LAUDERDALE, 1995. **Proceedings...** (S.I.): The Metallurgical Society of AIME, 1995 p. 65-72.

LAVOIE, S.; WANG, Z.; LITALIEN, M. Evaluation of the Aluminium recovery efficiency of the plasma dross treatment process. In: ANNUAL CONFERENCE OF METALLURGIST OF CIM, 33., Toronto, 1994. **Proceedings...** New York: The Metallurgical Society of CIM, 1994. p. 477- 485

STEWART, L.; MCCUBBIN, J. G. **Melting aluminum and aluminum alloys.** Aluminum Company of Canada Ltda.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; SILVA, S. L. M. **Tratamento de minérios.** 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004.

MAH, K.; TOGURI, J. M.; SMITH, H. W. Eletrostatic separation of aluminium from dross. **Conservation & Recycling**, v.9, n.4, p. 325 – 334, 1986.



MAIA, J. Conceitos fundamentais do tratamento de minerais. **Revista Brasil Mineral**, p. 154 - 160, 2008.

MANFREDI, O.; WUTH, W.; BOHLINGER, I. Characterizing the physical and chemical properties of aluminium dross. **JOM**, v.49, n.11, p.48-51. 1997

MELO, G. W. **Estudo para minimização e reaproveitamento de escórias geradas na fundição de alumínio**. 2007. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica) Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2007.

MOSER, C. J. Furnace-dross – its formation and recovery. **Light Metals**, New York, v. 2, p. 299-311, 1976.

METSO - MINERALS. **Basics in minerals processing**. USA, 2002.

\_\_\_\_\_. **Manual de britagem**. 6. ed. São Paulo: Grafilínea, 2005.

OUTOKUMPU, I. **Grinding technology**. Finland. Disponível em: <<http://www.outokumpu.fi/mineralprocessing/grind-1b.htm>>. Acesso em 15 nov. 2012

OLIVEIRA, J. R. et al. Rendimento de alumínio obtido por reciclagem de escória primária. In: SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO TECNOLÓGICA, 6. **Anais...** Resende, 2008.

PEREIRA, C. E. Moagem. In: PERES, A. E. C.; et al. **Curso de beneficiamento de minérios**. Belo Horizonte: 1989. p. 60-65.

PETAVRATZKI, E. **Case study**: residues from aluminium dross recycling in cement. Characterization of mineral wastes. resources and processing technologies - Integrated waste management for the production of construction material. WRT 177 / WR0115, nov., 2007.

POPOVICI, M. Geração e destinação dos subprodutos da indústria secundária de alumínio. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RECICLAGEM DE ALUMÍNIO, 5. 1999. **Anais...** São Paulo: ABAL, 1999.

SAMPAIO, J. A., LUZ, A. B. , LINS, F. F. **Usinas de beneficiamento de minérios do Brasil**. São Paulo: CETEM, 2001.

SCHMITZ, C. **Handbook of aluminium recycling**: fundamentals, mechanical preparation, metallurgical processing e plant design. Essen: Valkan-Vergal GmbH, 2006.

TENÓRIO, J.A.S. Tecnologia de fusão para reciclagem do alumínio. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DO ALUMÍNIO, 8., São Paulo, 2001. **Anais...** São Paulo: ABAL, 2001.

\_\_\_\_\_. ESPINOSA, D. C. R. Recycling of aluminum. In: TOTTEN, G. E; MACKENZIE, D. S. **Handbook of aluminum**. New York: Marcel Dekker, 2003. p. 115- 153.

MATSUDA, G. T.; ARAGAKI, L., TAKANO, C. Unidade para reciclagem de borra de alumínio. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA DA INDÚSTRIA DO ALUMÍNIO NO BRASIL, 4. São Paulo, 1993. **Anais...** São Paulo: ABAL, 1993. p. 71-85.

VALADÃO, G. E. S.; ARAUJO, A. C. **Introdução ao tratamento de minérios**. Belo Horizonte: Ed.UFMG, 2007.

VARELA, J. Critérios de seleção de britadores aplicados ao processamento mineral. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 24., 2011. **Anais...** Salvador, 2011. p. 384-391.

WANG, S. et al. **Dross recovery of aluminum alloy 380**. CastExpo 08. Atlanta - Georgia. May 2008.

WMS (WORLD METAL STATISTICS). **World Bureau of Metal Statistics**. abr. 2011.

**APÊNDICE A - Cálculo para Determinar a Energia de Cominuição com Base no (WI)**

## CÁLCULO PARA DETERMINAR A ENERGIA DE COMINUIÇÃO COM BASE NO (WI)

O consumo específico de energia (kWh/t) no tamboramento pela equação Bond:

$$W = 10Wi \left[ \frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right]$$

onde:

Wi = 15,76KWh/t retirado da Tabela 3

P abertura da peneira, em micrômetros ( $\mu\text{m}$ ), através da qual passam 80% da massa do produto igual 650 $\mu\text{m}$ , conforme demonstrado no gráfico da Figura 28.

F abertura da peneira, em micrômetros ( $\mu\text{m}$ ), através da qual passam 80% da massa da alimentação. Alimentação = 50 mm (50000 x 0,80) = 40000 $\mu\text{m}$ .

$$W = 10 \times 15,76 \left[ \frac{1}{\sqrt{650}} - \frac{1}{\sqrt{40000}} \right]$$

$$W = 157,6[0,04 - 0,005]$$

$$W = 5,5 \text{ kWh/}$$

Consumo específico de energia (kWh/t) na britagem pela equação Bond:

### BRITAGEM PRIMÁRIA

$$W = 10Wi \left[ \frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right]$$

onde:

Wi = 15,76KWh/t retirado da Tabela 3

P abertura da peneira, em micrômetros ( $\mu\text{m}$ ), através da qual passam 80% da massa do produto.

F abertura da peneira, em micrômetros ( $\mu\text{m}$ ), através da qual passam 80% da massa da alimentação.

Dados:

Massa de escória processada é igual a 16,35Kg

Alimentação 80% passante em 50 mm Tabela 7

Produto 80% passante em 12 mm (abertura do britador)

Resolução

$$W = 10 \times 15,76 \left[ \frac{1}{\sqrt{9600}} - \frac{1}{\sqrt{40000}} \right]$$

$$W = 157,6 [0,0102 - 0,005]$$

$$W = 157,6 [0,005]$$

$$W = 0,79 \text{KWh/t}$$

Consumo específico de energia (kWh/t) na britagem pela equação Bond:

### BRITAGEM SECUNDÁRIA

$$W = 10W_i \left[ \frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right]$$

onde:

$W_i = 15,76 \text{KWh/t}$  retirado da Tabela 3

$P$  abertura da peneira, em micrômetros ( $\mu\text{m}$ ), através da qual passam 80% da massa do produto.

$F$  abertura da peneira, em micrômetros ( $\mu\text{m}$ ), através da qual passam 80% da massa da alimentação.

Dados:

Massa de escória processada é igual a 16,35Kg

Alimentação 80% passante em 12 mm Tabela 7

Produto 80% passante em 4,5 mm (abertura do britador)

$$W = 10 \times 15,76 \left[ \frac{1}{\sqrt{3600}} - \frac{1}{\sqrt{7800}} \right]$$

$$W = 157,6 [0,017 - 0,011]$$

$$W = 157,6 [0,006]$$

$$W = 0,95 \text{KWh/t}$$