

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais.
(PPGE3M)

EDUARDO ARMANDO SIQUELA

BENEFICIAMENTO DE FINOS DE CARVÃO POR CONCENTRADOR
CENTRÍFUGO - FALCON®

Dissertação para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Dezembro de 2012.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais.
(PPGE3M)

EDUARDO ARMANDO SIQUELA

BENEFICIAMENTO DE FINOS DE CARVÃO POR CONCENTRADOR
CENTRÍFUGO - FALCON®

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M) como parte dos requisitos para a obtenção do Título de *Mestre em Engenharia*.

Área de Concentração: Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa.

Porto Alegre, Dezembro de 2012.

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Tecnologia Mineral Ambiental e Metalurgia Extrativa e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Hoffmann Sampaio, UFRGS.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Otávio Petter - Prof. PPGEM/UFRGS

Dr. Gérson Miltzarek - Pesquisador da CNPq

Dra. Karime Ferreira de Souza - Pesquisadora da CNPq

Professor Telmo Strohaecker
Coordenador do PPGEM-UFRGS

Porto Alegre, Dezembro de 2012

Aos meus amores

Flor e Nweti

Dedico

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação é resultado de um trabalho que só foi possível graças a contributos de natureza diversa que nem com um número infinito de páginas seria suficiente para albergar a magnitude da gratidão que se eterniza dentro de mim.

Aos meus pais, Armando Siquela e Júlia Eduardo pela forma como me inculcaram a alegria de viver, o espírito de sacrifício e a confiança necessária para realizar os meus sonhos.

Ao Professor Carlos Sampaio, meu orientador, não tem palavras para agradecer suas valiosas recomendações, a cordialidade com que sempre me recebeu e também pela liberdade de ação que me permitiu, e que foi decisiva para que este trabalho contribuísse para o meu desenvolvimento pessoal.

Ao Jean e Rejane que me foram resgatar no índico e que sempre estiveram presentes com total atenção.

Ao professor Lopo, devo um profundo agradecimento pelas batalhas incansáveis e incondicionais pela minha formação.

Aos meus irmãos e amigos por estarem sempre a torcer por mim.

Aos Professores do PPGE3M, em particular os professores do LAPROM (PETER E IRINEU), todos os colegas do LAPROM e aos colegas moçambicanos.

Por fim, foi muito crucial o apoio institucional que me foi disponibilizado e desde já agradeço: **LAPROM, PPGE3M, UFRGS, REDE CARVÃO, CNPq, UEM.**

A todos vocês

KANIMAMBO

(Muito obrigado)

RESUMO

O objetivo deste trabalho é de avaliar o desempenho do concentrador Falcon® no beneficiamento de finos de carvão. Para tal foi usada uma amostra de carvão ROM da mina LEÃO II. Nos ensaios foi usado o concentrador Falcon® modelo L40. As variáveis operacionais estudadas foram: a aceleração da centrífuga, a granulometria da alimentação e a pressão da água de fluidização. Para todos os ensaios realizados na faixa granulométrica $-0,25\text{mm}$ as taxas de rejeição de enxofre variaram entre 42,55% e 69,51%, e a recuperação da matéria orgânica variou entre 65,79% e 95,85%. Na faixa granulométrica de $-0,5+0,25\text{mm}$ o valor mínimo da rejeição de enxofre total foi de 53,63% e o máximo de 75,22%. A recuperação de matéria orgânica variou entre 57,77% e 90,86%. Já a rejeição de cinzas mostra as taxas mais baixas para a faixa granulométrica $-0,25\text{mm}$, que varia entre 11,78% a 46,87%, comparada à faixa granulométrica de $-0,5+0,25\text{mm}$ que apresenta valores entre 29,98% e 60,42%. Em geral o processo mostrou-se mais eficiente quando operado com valores baixos de aceleração (78G), e pressão de água relativamente baixa (entre 4 e 8Psi).

Palavras chave: carvão, dessulfuração, pirita, concentrador Falcon®, enxofre total, cinzas.

ABSTRACT

This study aims to evaluate the performance of the Falcon® concentrator in beneficiation of fine coal. A sample from LEAO II ROM and a L40 Falcon® concentrator was used for all tests. Operating variables studied were: G forces, the feed particle size and the water backpressure. For the tests performed with samples of -0.25mm particle size, sulfur rejection rates ranged from 42.55% to 69.51%, and the coal recovery ranged from 65.79% to 95.85%. In the -0.5+0.25mm size fraction the minimum value of total sulfur rejection was 53.63% and a maximum of 75.22%. The recovery of organic matter ranged from 57.77% to 90.86%. The ash rejection shows the lowest rates for the -0.25mm particle size, ranging from 11.78% to 46.87%, compared to -0.5+0.25mm size fraction which has values between 29.98 % and 60.42%. In general the process was more efficient when operated at low values of G-Force (78G), and low water pressure (4 and 8Psi).

Keywords: coal, desulfurization, pyrite, Falcon® concentrator, total sulfur, ash.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	iv
LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE ABREVIATURAS.....	x
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS	3
1.1.1. OBJETIVO GERAL	3
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. BREVES CONSIDERAÇÕES SOBRE O CARVÃO BRASILEIRO	4
2.1.1. ASPECTOS GEOLÓGICOS.....	4
2.1.2. CARACTERÍSTICAS GERAIS DO CARVÃO	5
2.1.3. BENEFICIAMENTO DE CARVÃO NO BRASIL.....	6
2.1.4. RESERVAS E PRODUÇÃO.....	7
2.1.5. JAZIDA DO LEÃO	8
2.2. O PROBLEMA DAS CINZAS DO CARVÃO	9
2.3. PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DO CARVÃO.....	10
2.4. EQUIPAMENTOS, CUSTO E EFICIÊNCIA DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO GRAVIMÉTRICO.....	12
2.5. HISTÓRICO DO PROCESSO DA DESSULFURIZAÇÃO	14
2.5.1. MÉTODOS QUÍMICOS DE DESSULFURIZAÇÃO.....	14
Fonte: (Khoury, 1981)	15
2.5.2. DESSULFURIZAÇÃO FÍSICA.....	16
3. MATERIAIS E MÉTODOS	19
3.1. LOCALIZAÇÃO DA MINA LEÃO II.....	19
3.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	20
3.3. ANÁLISES QUÍMICAS IMEDIATAS	22
3.3.1 ANÁLISE DE ENXOFRE TOTAL (St).....	23
3.4. O CONCENTRADOR FALCON®	24
3.4.1. VARIÁVEIS OPERACIONAIS.....	26
3.5. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
4.1. REJEIÇÃO DE CINZA (%RC), REJEIÇÃO DE ENXOFRE TOTAL (%RSt) E RECUPERAÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA (%RMO).	38
5. CONCLUSÕES	51
6. BIBLIOGRAFIA.....	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Aplicabilidade de diferentes métodos de concentração gravimétrica em função da granulometria, Adaptado de Sampaio e Tavares (2005).	3
Figura 2. Localização da mina Leão II no estado de Rio grande do sul.	19
Figura 3. Fluxograma da metodologia utilizada na pesquisa.	20
Figura 4. Britadores usados na preparação das amostras, sendo da esquerda para direita, o britador de mandíbulas “Plang” e o britador de rolos “Maquibritt”.	21
Figura 5. Equipamento usado para análise de enxofre total no LAPROM, desenvolvido pela empresa alemã “ELEMENTAR Analysensysteme”.	23
Figura 6. Equipamento Falcon® usado para os ensaios no LAPROM, desenvolvido pela multinacional canadense “Sepro Mineral Systems Corporation”, com o realce do “autopack” e do manômetro da pressão da água.	24
Figura 7. Representação esquemática dos mecanismos de separação no concentrador Falcon® adaptado de Honaker (1995) e do site da Sepro Mineral Systems Corporation.	25
Figura 8. Representação esquemática do processo de beneficiamento com as principais componentes.	28
Figura 9. Representação esquemática resumida das principais forças que atuam numa partícula na zona de retenção.	37
Figura 10. Comportamento das taxas de rejeição de cinzas (RC) e do enxofre total (RSt) bem como a recuperação da matéria orgânica (RMO), com a variação da pressão da água de fluidização com aceleração.	38

Figura 11. Comportamento das taxas de rejeição de cinzas (RC), do enxofre total (RSt) e da recuperação da matéria orgânica (RMO), com a variação da pressão da água de fluidização, (aceleração de 176G e faixa granulométrica de -0,25mm).	39
Figura 12: Comportamento das taxas de rejeição de cinzas (RC), do enxofre total (RSt) e da recuperação (RMO), com a variação da pressão da água de fluidização, (aceleração de 300G e faixa granulométrica de -0,25mm).	40
Figura 13: comportamento das taxas de rejeição de cinzas (RC), do enxofre total (RSt) e da recuperação de matéria orgânica (RMO), com a variação da pressão da água de fluidização, (aceleração de 78G e faixa granulométrica de -0,5+0,25mm).	41
Figura 14: comportamento das taxas de rejeição de cinzas (RC), do enxofre total (RSt) e da recuperação (RMO), com a variação da pressão da água de fluidização, (aceleração de 176G e faixa granulométrica de -0,5+0,25mm).	41
Figura 15: comportamento das taxas de rejeição de cinzas (RC), do enxofre total (RSt) e da recuperação (RMO), com a variação da pressão da água de fluidização, (aceleração de 300G e faixa granulométrica de -0,5+0,25mm).	42
Figura 16: relação entre a recuperação de matéria orgânica (%RMO) e a taxa de rejeição enxofre total (%RSt) para a fração granulométrica de -0,25mm, considerando três valores de aceleração 78G, 176G e 300G.	43
Figura 17: relação entre a recuperação de matéria orgânica (%RMO) e a taxa de redução de cinza (%RC) para a fração granulométrica de -0,25mm, considerando três valores de aceleração 78G, 176G e 300G.	44
Figura 18: relação entre a recuperação de matéria orgânica (%RMO) e a taxa de redução de enxofre total (%RSt) para a fração granulométrica de -0,5+0,25mm, considerando três valores de aceleração	45

78G, 176G e 300G.

Figura 19: relação entre a recuperação de matéria orgânica (%RMO), taxas de rejeição de cinzas (%RC) para a fração granulométrica de -0,5+0,25mm, considerando três valores de aceleração 78G, 176G e 300G. 45

Figura 20. Relação entre a eficiência e a pressão da água, na separação do enxofre em diferentes valores de aceleração (78G, 176G e 300G) para a faixa granulométrica de -0,25mm. 48

Figura 21. Relação entre a eficiência e a pressão da água, na separação de cinzas em diferentes valores de aceleração (78G, 176G e 300G) para a Faixa granulométrica de -0,25mm. 48

Figura 22. Relação entre a eficiência e a pressão da água, na separação de enxofre em diferentes valores de aceleração (78G, 176G e 300G) para a faixa granulométrica de -0,5+0,25mm. 49

Figura 23. Relação entre a eficiência e a pressão da água, na separação de enxofre em diferentes valores de aceleração (78G, 176G e 300G) para a faixa granulométrica de -0,5+0,25mm. 50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resumo dos principais métodos químicos de dessulfurização, Khoury (1981).	15
Tabela 2. Características do carvão usado na alimentação.	33
Tabela 3. Variação do volume de água com o aumento da pressão da água de fluidização.	34
Tabela 4. Resultados obtidos nos ensaios da fração granulométrica de -0,25mm, partindo de uma alimentação com 2,32% de enxofre e 58,99% de cinzas.	35
Tabela 5. Resultados obtidos nos ensaios da fração granulométrica de -0,5+0,25mm, partindo de uma alimentação com 1,98% de enxofre e 57,89% de cinzas.	36

LISTA DE ABREVIATURAS

Apud: citado por outro autor

ASTM: American society for testing and materials

BEN: Balanço Energético Nacional

Ca: teor de cinzas de alimentação

Cc: teor de cinzas do produto

CE: Carvão Energético

CETEM: Centro de Tecnologia Mineral

CF: Carbono Fixo

CPL: Carvão pré-lavado

CRM: Companhia Rio Grandense de Mineração.

DAM: Drenagem acida de minas

DNPM: Departamento Nacional de Produção Mineral

et al.: entre outros autores

G: unidade da aceleração

g: grama

Km²: quilometro quadrado

L/min.: litros por minuto

LAPROM: laboratório de processamento mineral da UFRGS.

m: massa de carvão (amostra)

Ma (bsic): massa da alimentação, em base seca isenta de cinzas.

Ma: massa de alimentação

Mc(bsic): massa de carvão limpo, em base seca isenta de cinzas.

Mc: massa de produto

MT: milhão de toneladas

MTa: milhões de toneladas por ano

MV: matéria Volátil

MW: mega watt

NBR: Norma Brasileira Registrada

PPGE3M: Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de materiais.

RC: Rejeição de Cinzas

RMO: Recuperação de Matéria Orgânica

ROM: Run-Of-Mine- Minério bruto não beneficiado

RPM: rotações por minuto

RS: Estado do Rio Grande do Sul

RSt: Rejeição de enxofre total

St: enxofre total

Sta: teor de enxofre total na alimentação

Stc: teor de enxofre total no produto

U: teor de umidade

UEM: Universidade Eduardo Mondlane

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change

CNPq: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

LISTA DE SÍMBOLOS

%: por cento

<: menor que

>: maior que

°C: grau Celsius

Al_2O_3 : óxido de alumínio

Ca SO_4 : sulfato de cálcio

cm: centímetros

CO_2 : Dióxido de carbono

Fe (CO)_5 : carbonato de ferro

$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$: sulfato de ferro III

Fe_2O_3 : óxido de ferro

Fe_2S : pirita

Fe SO_4 : sulfato de ferro II

Fg: Força de gravidade

g: grama

g/cm^3 : gramas por centímetro cúbico

H_2O : água

He: Hélio

Hg: mercúrio

J/kg: Joule por quilograma.

Km: quilometro

m: metros

mg: miligrama

mm: milímetros

Na: sódio

Na OH: hidróxido de sódio

NH₃: amônia

O₂: oxigênio

P: Pressão

Pb: chumbo

PSI: libra por polegada quadrada

S: enxofre

Se: selênio,

SiO₂: dióxido de silício

1. INTRODUÇÃO

O aumento drástico de consumo energético verificado no século 20, a partir da revolução industrial, levou a um conseqüente aumento exacerbado da extração e utilização de combustíveis fósseis. Atualmente, todas as atividades industriais se encontram intrinsecamente dependentes da energia que é produzida através dos combustíveis. Destes combustíveis faz parte o carvão que sendo um dos mais usados, a seguir ao petróleo e gás natural, é em simultâneo ambientalmente o mais nocivo por se associar a elementos químicos tóxicos e a diversas formas do enxofre, que é por sua vez um dos responsáveis pelas chuvas ácidas.

Nas últimas décadas o rigor nas legislações ambientais internacionais de controle de emissões de enxofre tem ficado cada vez mais rigoroso o que força aos produtores de carvão a minimizarem os teores de enxofre no carvão como condição para a sua colocação no mercado.

Este desafio torna-se mais complicado e oneroso para carvões com altos teores desta substância (S) como é o caso dos carvões brasileiros que chegam a atingir teores de enxofre na ordem de 10,5% (KALKREUTH ET AL., 2006).

A redução dos teores de enxofre para os níveis legislados ou competitivos deve custar o mínimo possível dado o baixo valor unitário do carvão. Assim, os processos químicos de dessulfurização, por exemplo, vão se tornando cada vez menos competitivos dando lugar aos processos físicos.

Vários estudos têm revelado a possibilidade de a pirita (Fe_2S) ser convertida via processos hidrometalúrgicos e/ou pirometalúrgicos em produtos comerciais tais como, enxofre, ácido sulfúrico, sais (sulfato férrico e ferroso), óxidos de ferro e pigmentos (VIGÂNICO ET AL., 2008; MENESES E SCHNEIDER, 2007; MARCELLO ET AL., 2008). Desta forma a concentração da pirita do carvão não só minimiza os danos ambientais como também pode gerar produtos (concentrados) com teor suficiente para utilização econômica.

As cinzas são componentes indesejáveis do carvão daí a necessidade de reduzir o seu teor logo após a sua extração para o mínimo possível. Ela resulta das

matéria. Os problemas a elas associados partem desde a sua disposição final, danos aos equipamentos durante a sua utilização e redução do rendimento do carvão.

Vale ressaltar que hoje em dia com o avanço da ciência nem tudo é ruim nas cinzas resultantes da queima do carvão. Elas são majoritariamente constituídas por dióxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3), sendo por isso uma fonte importante de alumínio e silício para indústria de geopolímeros. A sua atividade pozolânica, faz com que ela reaja à temperatura ambiente e em presença de água com o hidróxido de cálcio e com álcalis, formando hidratos de silicato de cálcio. Estes são compostos com capacidade de aglutinação, isto é, que atuam como cimento em agregados (Cherif, 1999).

A composição química das cinzas depende das características dos carvões de que resultam e das impurezas que contenham. Todas as possíveis aplicações mencionadas, apesar de minimizarem os seus efeitos, não compensam os danos a elas associados. Outro aspecto importante é que as impurezas contidas no carvão constituem um custo bastante oneroso no transporte deste minério, cerca de 50% de despesas de transporte de material não combustível para o caso do carvão em estudo que apresenta altos teores de cinzas.

Teoricamente, a rejeição tanto do enxofre quanto de cinzas é mais facilmente obtida na faixa de carvão fino, devido à grande liberação das partículas. Os finos representam uma fração considerável da produção das plantas de beneficiamento e precisam ser recuperados para maximizar o seu rendimento.

Este documento apresenta os resultados de um estudo que foi realizado no LAPROM (Laboratório de Processamento Mineral da UFRGS), para avaliar o desempenho do concentrador Falcon® em tratar carvão fino da mina Leão II. Este carvão é caracterizado por alto teor de cinzas e de enxofre, sendo por isso que o tratamento preconizado incidiu nestas duas componentes.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho do concentrador Falcon® no beneficiamento de finos de carvão da mina Leão II.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Caracterizar o carvão da mina leão II em termos de cinzas e enxofre total.
- 2) Beneficiar finos de carvão pelo concentrador Falcon®, variando os seguintes parâmetros:
 - i. Granulometria da alimentação
 - ii. Pressão da água de fluidização,
 - iii. Rotação da centrífuga.
- 3) Determinar e comparar os teores de cinzas e enxofre da alimentação, do rejeito e do produto.
- 4) Determinar a recuperação e as taxas de rejeição de enxofre e de cinzas no produto limpo.
- 5) Determinar a eficiência do processo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. BREVES CONSIDERAÇÕES SOBRE O CARVÃO BRASILEIRO

2.1.1. ASPECTOS GEOLÓGICOS

O carvão brasileiro ocorre em coberturas de plataformas Fanerozóicas da Bacia do Paraná (DARDENNE e SCHOBENHAUS, 2001). A área de estudo faz parte desta bacia, que consiste de uma vasta região sedimentar do continente sul-americano, com cerca de 1,5 milhão de quilômetros quadrados em área. A Formação Rio Bonito é uma das unidades litoestratigráficas, que faz parte do contexto desta Bacia, e enquadra-se no Super Grupo Tubarão, Grupo Guatá de idade Permiana e contém várias jazidas conhecidas de carvão nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, (GOMES ET AL., 2003).

As camadas de carvão foram depositadas em ambiente de lagunas, atrás de barreiras, numa costa dominada por ondas com influência das marés, porém há registro de camadas e leitos de carvão, de importância secundária, que foram depositados em ambiente de planícies deltaicas ou aluviais, e em leques aluviais. Os altos teores de enxofre em muitas das camadas estão relacionados com a transgressão de águas marinhas ricas em sulfatos nas turfeiras, (HOLZ, 1998). Nove destas jazidas são de maior importância, a saber:

- ✓ Sul catarinense (SC),
- ✓ Santa Terezinha,
- ✓ Morungava–Chico Lomã,
- ✓ Charqueadas, Leão, Iruí,
- ✓ Capané e Candiota (RS) e
- ✓ Figueira–Sapopema (PR).

As jazidas de Capané, Iruí, Leão e Charqueadas, no Rio Grande do Sul, e outras menores, estão na bacia do rio Jacuí, e por isso são denominadas de jazidas do Baixo Jacuí.

A sequência deposicional do carvão da Formação Rio Bonito consiste de uma espessa sequência sedimentar (até 2.800 m) que compreende as unidades litoestratigráficas Itararé, Rio Bonito, Palermo e Irati. Esta formação apresenta uma sucessão sedimentar cíclica de pacotes de arenitos, siltitos e folhelhos, sendo portadora de importantes depósitos de carvão de idade permiana (Artinskiano-Kunguriano), (HOLZ ET AL., 2000).

2.1.2. CARACTERÍSTICAS GERAIS DO CARVÃO

Os carvões brasileiros são de baixa qualidade, principalmente em relação aos percentuais de cinzas e enxofre que são elevados, e percentuais de materiais voláteis que são menores quando comparados a outros carvões produzidos no mundo (REDIVO, 2002).

Silva (2012) classifica os carvões brasileiros, segundo o seu “rank”, como sendo sub-betuminosos e betuminosos de altos voláteis para os carvões do Rio Grande do Sul e da Santa Catarina respectivamente.

Redivo (2002) faz uma análise da variação espacial das características do carvão brasileiro. Segundo o autor, em relação às características químicas, o carvão brasileiro apresenta uma redução do teor de enxofre e um acréscimo no conteúdo de matéria inorgânica, do norte para o sul do país. O rendimento do carvão beneficiado em relação ao carvão bruto é baixo por comportar elevado teor de cinzas; o teor de enxofre é mais elevado no Estado do Paraná, decrescendo para o sul. Na Santa Catarina tem sido reportada a ocorrência de carvão com característica metalúrgica, porém, com teor de cinzas muito acima dos carvões internacionais, o que o torna pouco competitivo. Em razão disto, este tipo de carvão não é mais produzido desde o ano 1990 pela maioria das mineradoras, e as poucas empresas que o produzem utilizam-no para a fabricação de coque em coquearias da região.

2.1.3. BENEFICIAMENTO DE CARVÃO NO BRASIL

A primeira unidade para beneficiamento industrial de carvão mineral foi instalada no sul do Brasil na década de 40, em função da criação da Companhia Siderúrgica, (MILIOLI ET AL., 1981). A finalidade desta unidade era de fornecer carvão metalúrgico para uso na indústria siderúrgica e, secundariamente, carvão para locomotivas, navios e termoelétricas. Esta situação mudou a partir da década de 60 em função do aumento na demanda por carvão metalúrgico e energético, acarretando três alterações principais (REDIVO, 2002):

- ✓ A pré-lavagem do carvão bruto nas bocas das minas, obtendo-se então um produto chamado “carvão pré-lavado” ou CPL.
- ✓ Transformação e criação de subsidiárias dos sistemas elétricos (UTE - Serviços de Eletricidade), siderúrgicos (Lavador de Capivari) e de mineração (Carbonífera Próspera - CSN).
- ✓ Ampliação da capacidade do Lavador de Capivari.

Os esquemas de beneficiamento desenvolveram-se a partir do mercado disponível, sendo produzido inicialmente um carvão com 34% de cinzas, denominado “carvão Lavador”, no qual foi baseado o projeto do lavador Capivari, equipado com jiges, lavadores, mesas concentradoras, britadores, centrífugas, filtros, etc., o que possibilitava uma recuperação de 20 a 25% de carvão metalúrgico com 18,5% de cinzas (REDIVO, 2002 e GOMES ET AL., 2003).

O atual nível de desenvolvimento tecnológico permite a abertura de novos mercados para o carvão mineral, tanto na indústria carboquímica quanto na sua utilização como combustível energético, o que dependerá da qualidade do minério disponível, seus produtos e custos de produção. As atuais unidades de beneficiamento do carvão mineral em boca de mina já deixaram de produzir carvão metalúrgico ou pré-lavados, estando atualmente voltadas à produção de carvão

energético tipo CE 4500, empregado nas termoelétricas locais, projetadas com tecnologia desenvolvida entre os anos de 1960 a 1985 (REDIVO, 2002).

2.1.4. RESERVAS E PRODUÇÃO

Para o Brasil, os dados de 2010, do Balanço Energético Nacional 2011 (MME, 2012), indicaram a matriz energética formada por: petróleo 38,0%, derivados da cana 17,7%, hídrica 14,2%, lenha e carvão vegetal 9,6%, gás natural 10,2%, carvão mineral 5,1% e nuclear 1,4% e outros renováveis 3,9%. Com relação à oferta interna de energia elétrica a distribuição é a seguinte: hidráulica 74,9%, importação 6,3%, biomassa 5,5%, petróleo 3,1%, gás natural 5,8%, nuclear 2,6%, e carvão mineral 1,3% e Eólica 0,4%.

Segundo DNPM (2012), no ranking de produção do mineral fóssil no país, o estado do Rio Grande do Sul (RS), é o maior produtor, com 54,8% da produção total, ficando Santa Catarina (SC) com 43,6% e o Paraná apenas com 1,5%. Em termos de faturamento a Santa Catarina (SC) possui 65,7% do valor total, enquanto o RS possui 32,1%, e o PR com 3,3%, devido ao maior valor econômico do carvão beneficiado catarinense.

Do total produzido, 81,0% são consumidos na geração de energia elétrica e os 18,9% restantes, como combustível industrial. O uso do carvão para combustível industrial distribui-se aos seguimentos: papel/celulose (3,8%), petroquímica (3,3%), alimentos (1,5%), cerâmico (1,3%) e outras (9,0%), (DNPM, 2012).

Atualmente a produção do carvão brasileiro, de apenas 10 Mta em ROM, corresponde a 6 Mta de carvão vendável ou passível de consumo principalmente pelas usinas termoelétricas e está muito aquém do potencial das jazidas e da capacidade instalada das carboníferas, (GOMES ET AL., 2003). Segundo o mesmo autor, o carvão Brasileiro apenas contribui com 1% na matriz energética nacional, enquanto a indústria siderúrgica importa cerca de 13 milhões de toneladas/ano de carvão estrangeiro, custando cerca de US\$ 650 milhões/ano, contribuindo com o desequilíbrio da balança comercial brasileira e o aumento da dependência externa.

No Rio Grande do Sul até o momento observou-se uma maior regularidade na produção de carvão, atingindo um máximo de 4,5 a 5 Mta, entre os anos de 1983 e 1988, hoje esta se mantém na faixa dos 3,5 a 4 Mta. Tal fato deveu-se a este Estado não mais produzir o carvão metalúrgico e de ter um mercado de carvão energético diversificado e bastante estável.

2.1.5. JAZIDA DO LEÃO

Os recursos de carvão *in situ* da Jazida do Leão são da ordem de 2.442×10^6 t, sendo 2.432×10^6 t de recursos subterrâneos (DNPM/CRM, 1986), e a camada Inferior é a principal camada de carvão explorada, na Mina do Leão.

Tendo sido uma jazida bastante lavrada há muitas décadas, existem muitas denominações locais, tais como Recreio, Butiá Leste e outros, mas que de fato são partes pertencentes ao mesmo depósito. Sua extensão conhecida é de aproximadamente 1.070 km².

Os blocos sob pequenas coberturas estão quase esgotados nesta jazida, restando cerca de 10 Mt que continuam sob lavra intensiva pela COPELMI. A maior parte dos recursos encontra-se à profundidade entre 50 e 300 m, e uma parte significativa entre 300 e 800 m. A lavra a céu aberto usualmente recupera as camadas S₂, S₃ e I. Na mina subterrânea do Leão, da CRM, a camada I é a única visada, assim como na Mina Leão II, com suas aberturas de acesso e desenvolvimento prontas há vários anos, mas sem nunca ter produzido.

A camada I apresenta espessuras médias ao redor de 1,80m e tem um dos melhores “grade”, com mais de 50% de rendimento para carvão com 35% de cinzas e enxofre com 0,6%. Este carvão é classificado como “Betuminoso de Alto Volátil C, fracamente coqueificante”. A refletância das vitrinitas está por volta de 0,5%. Foram encontrados alguns resultados altos (15%) para o grupo da exinita, mostrando certa tendência à fácies sapropélico, e para grupo da inertinita, com valores entre 20 e 28% (GOMES ET AL., 2003).

2.2. O PROBLEMA DAS CINZAS DO CARVÃO

Um dos propósitos desta pesquisa é o beneficiamento do carvão visando à redução do seu teor de cinzas por influenciarem negativamente os processos de sua utilização.

O volume de cinzas gerado após queima do carvão é um grande problema devido a sua disposição final por ser um resíduo volumoso, e que pode poluir o solo, ar e água, visto que incorpora na sua composição uma série de elementos químicos que fazem parte dos componentes inorgânicos do carvão. Estes componentes podem, em alguns casos, ser tóxicos como é o caso dos elementos traço (ex: Hg, Pb, Se, etc.)

Bório e levasseur (1986) discutem de forma muito sucinta o problema criado pelas cinzas a nível econômico/industrial. Segundo eles, as cinzas nos processos de combustão criam nas caldeiras problemas que podem resultar em reduzida capacidade de geração, interrupções não programadas, e modificações onerosas. As cinzas que se depositam sobre as paredes da caldeira, na seção radiante da fornalha, são geralmente referidas como escória. A deposição de cinzas em seções do tubo de convecção, à jusante da zona de forno radiante, são normalmente referidas como incrustações.

Escória de cinzas e incrustações pode resultar em problemas como: baixa condutibilidade térmica, Impedância de fluxo de gás, e danos físicos às peças de pressão por corrosão e/ou erosão.

A erosão neste caso se refere ao resultado do impacto de cinzas abrasivas em peças de pressão. Depósitos de cinzas acumuladas em tubos de convecção podem reduzir as seções transversais da área de fluxo, aumentando o déficit de ventilação e também criando maiores velocidades locais de gás que acelera a erosão de cinzas volantes. Reações dentro dos depósitos podem produzir componentes em fase líquida, que são responsáveis pela corrosão nos tubos.

Impedância ao fluxo de gás é o resultado de formação de incrustações nos tubos na seção de convecção. Problemas deste tipo são mais prováveis de ocorrer em carvões possuindo teores elevados de sódio, geralmente encontrados em

depósitos de carvão de baixo *Ranking*, (BÓRIO e LEVASSEUR, 1986), como é o caso dos carvões brasileiros.

Os danos físicos às peças de pressão podem ocorrer se grandes quantidades de cinzas acumularam no forno superior podendo ser arrancados durante o processo e caírem sobre as encostas do forno inferior.

Sulfatos e piro sulfatos são frequentemente as causas da corrosão da parede pela água, embora as condições de redução podem também causar depleção de revestimentos das superfícies dos tubos. O cloro pode ser também um fator que contribui para a corrosão do metal do superaquecedor.

Tamanho/forma de cinzas volantes, a composição/concentração das partículas de cinza e as velocidades locais dos gases desempenham papéis importantes relativos ao fenômeno de erosão.

Durante o processo de gaseificação a alta temperatura, as cinzas podem derreter e formar uma mistura de líquido ou líquido-sólido, que pode fluir para baixo ao longo da parede por gravidade e para fora da parte inferior do gasificador. As propriedades de fluxo da escória são fatores importantes que afetam os regimes de gaseificação e custos operacionais. Se as cinzas do carvão forem aquecidas a uma temperatura suficientemente alta, formarão uma escória líquida, cuja viscosidade é determinada apenas pela temperatura e composição (YUAN ET AL., 2012).

2.3. PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DO CARVÃO

Hoje em dia, milhões de toneladas de carvão são extraídas e utilizadas com finalidades que vão desde a simples queima até a fabricação de coque metalúrgico empregado em altos fornos. O objetivo principal do beneficiamento de carvão é de melhorar a sua qualidade para uso em geração de energia termoelétrica, ou para usos especiais, como matéria-prima na indústria química, alimentar, liquefação, gaseificação, etc.

Devido a diferenças de gênese dos carvões, existe a ocorrência de material inorgânico, basicamente argilas, piritas e, em alguns casos, até carbonatos,

misturados com material orgânico (macerais). Assim os carvões apresentam estruturas físicas e químicas bastante variáveis. As propriedades e as quantidades de impurezas do carvão são consideradas como principais fatores que impõem limitações na sua utilização. Assim, o tipo de tecnologia de beneficiamento e a extensão de beneficiamento dependerão principalmente do tipo de carvão, o meio de mineração, e da finalidade da utilização do carvão limpo.

Nos últimos tempos tem se assistido a uma tendência de o carvão bruto que sai á boca da mina ser caracterizado por muita umidade e muitos finos, também apresenta mais impurezas do que no passado. Isto se deve entre vários motivos a (LOCKHART, 1984):

- i) Mineração de carvão de baixa qualidade,
- ii) Aplicação de tecnologias de mineração não seletivas, mais avançadas e contínuas, que provocam a geração de muitos finos e a incorporação de muitas impurezas no carvão.
- iii) Utilização de grandes quantidades de água para minimizar a poeira.

Embora a qualidade do carvão (ROM) tende a diminuir, a necessidade de tecnologia cada vez mais eficiente de beneficiamento vem aumentando significativamente, resultando em uma grande demanda de carvão de alta qualidade que atenda tanto ás necessidades do mercado bem como as exigências das normas ambientais cada vez mais severas. Por exemplo, para um grande número de processos que usam o carvão, este deve apresentar baixas quantidades de impurezas como as argilas, que são as principais responsáveis pelas cinzas geradas após a combustão, e que são muitas vezes prejudiciais ao processo empregado e danoso ao meio ambiente.

2.4. EQUIPAMENTOS, CUSTO E EFICIÊNCIA DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO GRAVIMÉTRICO.

O tratamento de minérios é uma atividade conhecida desde os anos 400 anos antes da Era Cristã onde os egípcios já recuperavam ouro de depósitos aluvionares, usando processos gravíticos. Os grandes desenvolvimentos na área de beneficiamento de minérios ocorreram no final do século XIX e início do século XX, sendo a utilização industrial da flotação, na Austrália, em 1905, a inovação mais impactante. Os avanços que se seguiram se orientaram, do ponto de vista tecnológico, mais ao desenvolvimento de design de equipamentos maiores e mais produtivos ou eficientes, à otimização de processos por meio de automação e computação, e à racionalização do uso de energia (LUZ ET AL., 2004).

Atualmente existe uma enorme diversidade de equipamentos de concentração gravítica, permitindo um vasto leque de opções para a indústria conforme as suas necessidades.

Outro aspecto muito frequente é a existência de equipamentos de mesmo tipo sendo produzidos por diferentes fabricantes, apenas com algumas diferenças construtivas, como é o caso de espirais e jiges. Isto torna difícil a tarefa de selecionar equipamentos para uma usina de beneficiamento.

As limitações impostas pela granulometria da alimentação e pela capacidade requerida restringem o número de equipamentos cuja aplicação seja viável para um determinado material. A escolha do equipamento ou processo mais adequado para uma operação específica depende de uma série de fatores, que incluem a granulometria, a taxa de alimentação, o estágio em que é empregado no circuito, o custo, a eficiência, etc. O beneficiamento de carvão mineral, normalmente requer equipamentos de alta capacidade e baixo custo, devido ao valor comparativamente inferior do produto (figura 1), Sampaio e Tavares (2005).

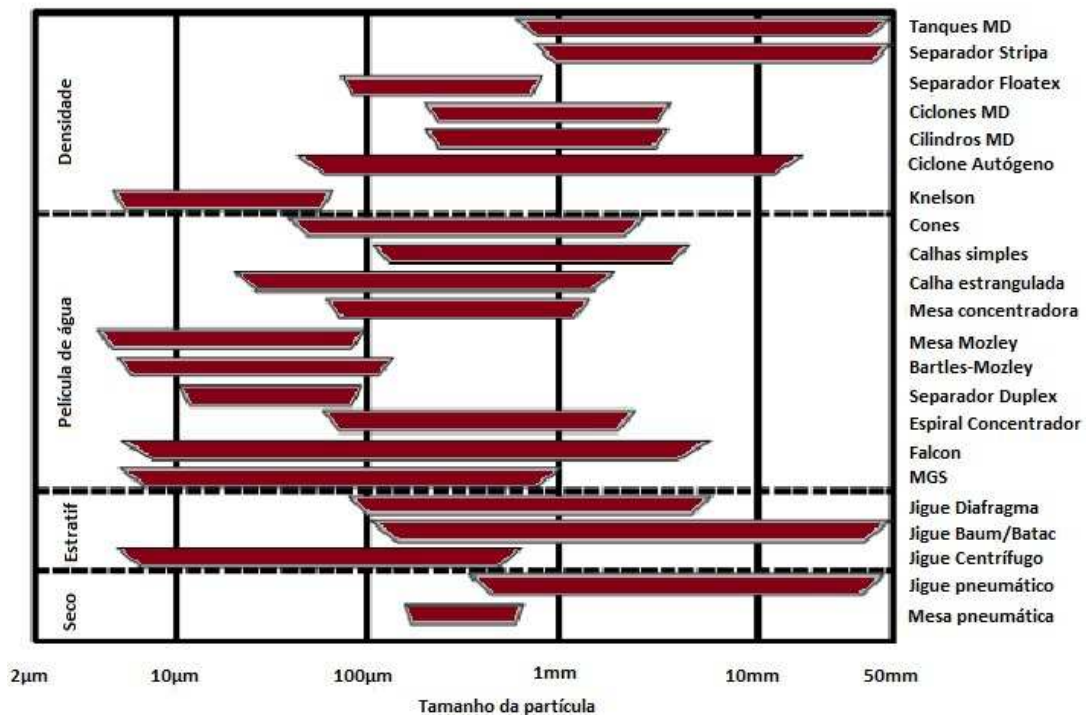


Figura 1. Aplicabilidade de diferentes métodos de concentração gravimétrica em função da granulometria, Adaptado de Sampaio e Tavares (2005).

Ainda na figura 1 pode se ler que as opções de equipamentos não só dependem da granulometria como também das características do minério a ser beneficiado, podendo optar-se pelo beneficiamento a seco ou a úmido.

De acordo com Sampaio e Tavares (2005), a maior eficiência é obtida pelo uso de um grande número de intervalos de tamanhos granulométricos estreitos na separação. Porém, os maiores custos de investimento e o aumento da complexidade operacional impõem um limite prático que depende da escala da operação e da mineralogia do depósito em particular. A razão entre o tamanho máximo e o mínimo a ser processado eficientemente em um aparelho depende da precisão de separação, da influência da granulometria e do critério de concentração.

2.5. HISTÓRICO DO PROCESSO DA DESSULFURIZAÇÃO

O aumento no consumo de carvão ocorreu com a revolução industrial e desde então o mundo se deu conta dos danos ambientais e tecnológicos por ele causado. Nessa altura os principais consumidores de carvão no mundo adotaram importantes instrumentos legais para regularem as emissões de enxofre para a atmosfera. É o caso da Convenção do Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC), adotada em 1992. Em 1997 foi adotado o Protocolo de Kyoto que estabelece metas obrigatórias para 37 países industrializados e para a comunidade europeia no sentido de reduzirem as emissões de gases de efeito de estufa.

Desde então a indústria tem estado a aprimorar as técnicas de determinação e remoção de enxofre no carvão usando métodos químicos, biotecnológicos e físicos.

2.5.1. MÉTODOS QUÍMICOS DE DESSULFURIZAÇÃO

Métodos químicos e biotecnológicos têm sido ensaiados com sucesso na remoção de enxofre, sobretudo orgânico (DEMIRBAS, 2002; HANGSUBCHAROEN, 1999). Eles podem reduzir até cerca de 90% de enxofre pirítico a 40% do enxofre orgânico a partir do carvão ROM. Isto pode resultar na redução de enxofre total no carvão em 50-80%, contudo a sua aplicação comercial é limitada devido aos custos dos reagentes e à formação de novas formas de resíduos ambientalmente nocivos (HUTTON, ET AL., 1982 e HANGSUBCHAROEN, 1999).

Os principais processos químicos de dessulfurização de carvão foram resumidos por Khoury (1981) conforme a tabela 1. Como se pode ver na tabela 1, nem todos os processos podem remover todas as formas de enxofre e a gravidade dos problemas ambientais associados varia de processo para processo.

O principal dilema dos métodos químicos de dessulfurização parte da seleção de materiais econômicos e adequados para evitar problemas inerentes à exposição

dos equipamentos a ácidos corrosivos, altas pressões e altas temperaturas (KHOURY, 1981).

O processo *Maxnex* é o único método químico de beneficiamento totalmente seco. No entanto, fazendo uma comparação entre os processos, o de *Meyers* é provavelmente o mais avançado, com a capacidade de remover entre 90 até perto de 100% de enxofre piritico (DEMIRBAS, 2002 e HANGSUBCHAROEN, 1999).

Tabela 1. Resumo dos principais métodos químicos de dessulfurização.

PROCESSO	MÉTODO	ENXOFRE REMOVIDO	PROBLEMAS ASSOCIADOS
Maxnex	O carvão pulverizado seco, tratado com $\text{Fe}(\text{CO})_5$ faz com que a pirita se torne magnético e possa ser removido magneticamente.	Mais de 90% de enxofre piritico.	Descarte de Enxofre e resíduos sólidos contendo S.
Syracuse	O carvão é cominuído por exposição ao vapor NH_3	50-70% de enxofre piritico.	Descarte de resíduos com enxofre.
Meyers	Lexiviação oxidativa usando $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ e O_2 em água.	90-95% de enxofre piritico.	Descarte do FeSO_4 e CaSO_4 acídicos, etapa de extração de enxofre precisa de prova.
LOL	Lixiviação oxidativa usando O_2 e água à temperatura e pressão moderada.	90-95% de enxofre piritico.	Corrosão ácida do reator.
ERDA (PETC, PERC)	Oxidação do ar e da água, à temperatura e pressão elevadas.	~95% de enxofre piritico; Mais de 40% de enxofre orgânico.	Descarte de lamas de gesso, a corrosão de ácido a temperaturas elevadas.
GE	Tratamento por micro-ondas de carvão impregnado com uma solução de NaOH converte formas de enxofre.	~75% de enxofre total.	Condição de processo não estabelecida, regeneração cáustica não definida.
Battelle	Lixiviação alcalina mista.	~95% de enxofre piritico; ~25-50% de enxofre orgânico.	Circuito fechado de regeneração não provada, Na fica no carvão.
JPL	Clorinose em solvente orgânico.	90% de enxofre piritico; Mais de 70% S orgânico.	Problemas ambientais.
IGT	O pré-tratamento oxidante, seguido por hidrodessulfurização a 800°C .	~95% de enxofre piritico; Mais de 85% S orgânico	Baixo rendimento BTU (<55%), mudança de matriz de carvão.

Fonte: (Khoury, 1981)

2.5.2. DESSULFURIZAÇÃO FÍSICA

Os métodos comercialmente mais usados para a dessulfurização de carvão são os físicos que se baseiam na sua diferença de densidade e os minerais a ele associados.

Métodos de separação física podem remover eficazmente a pirita do carvão, pois o enxofre orgânico é ligado quimicamente a sua matriz. Dessulfurização física tende a concentrar enxofre orgânico no carvão limpo, simplesmente através da remoção de matéria mineral.

A redução do teor de enxofre depende das características do material alimentado, contudo, em muitos casos, tem sido necessário cominuir o carvão a (<0,2 mm) para aumentar a liberação da pirita.

Processos de separação baseados em propriedades superficiais como flotação e aglomeração em óleo têm sido tradicionalmente reconhecidos como os únicos métodos práticos para o beneficiamento de finos de carvão. Destes métodos, segundo Fonseca (1995), a flotação é o mais usado comercialmente para granulometrias abaixo de 0,1mm, porém ela tem se mostrado ineficaz na remoção de pirita, isto porque quando oxidada tem propriedades hidrofóbicas e assumem um comportamento próximo ao carvão. Além disso, o intercrescimento da pirita nas partículas de carvão afeta negativamente o comportamento dessas partículas na flotação (HONAKER ET AL., 1995; YOON ET AL., 1993; LUTTRELL ET AL., 1995; VENKATRAMAN ET AL., 1995).

Uma série de pesquisas de processos gravimétricos altamente eficientes na concentração de finos de minerais pesados tem sido desenvolvida em escala de laboratório e industrial. Trata-se de concentradores centrífugos, tais como MGS, Falcon®, jigue centrífugo Kelsey e o concentrador Knelson. Estas tecnologias estão sendo introduzidos na indústria de minerais e têm um potencial enorme na preparação de carvão (CAMPOS, 2002; HONAKER ET AL., 1994; RUBIERA ET AL., 1997). Todas estas unidades são baseadas em água, e utilizam dispositivos de forças centrífugas para melhorar a separação de partículas finas com base nas diferenças de densidade. Embora a maioria dos resultados dos testes preliminares

sejam muito promissores, não há unidades em escala comercial instaladas na indústria do carvão.

Unidades Falcon® estão sendo usadas para concentrar uma variedade de minerais, incluindo sulfetos, ferro, estanho, titânio e minérios de ouro. Unidades Escala piloto foram recentemente demonstradas com sucesso para a dessulfurização de finos de carvão (HONAKER ET AL., 1994).

Segundo Sampaio e Tavares (2005) os concentradores centrífugos se distinguem dos outros usados na concentração de materiais finos e ultrafinos pela sua eficiência na separação, elevada capacidade unitária e baixos custos de operação e manutenção.

Infelizmente, nenhuma das unidades testadas até hoje parecem ser capazes de lidar com argila ultrafina que reporta com o produto por arrastamento. Assim, o carvão processado nestas unidades deve ser em muitos casos, deslamado para remover argilas ultrafinas antes ou depois do tratamento pelos separadores centrífugos (HONAKER ET AL., 1994).

Oruç (2010) fez uma série de experiências com uma combinação de Falcon® e hidrociclone tendo demonstrado a possibilidade deste dispositivo contribuir para a limpeza do carvão, contudo segundo ele, o concentrador Falcon® quando operado com forças de até 300G, mostrou-se ineficiente no beneficiamento de ultrafinos carvão.

Carvão fino, contendo quantidades significativas de matéria mineral finamente disseminada, tais como o carvão Gondwanico no hemisfério sul, pode ser mais eficazmente tratado pelo Concentrador Falcon®, pois este é o único método pelo qual o carvão oxidado pode ser economicamente recuperado (Honaker et al., 1996). Na África do Sul, onde a companhia (*Sepra Mineral Systems Corporation*) tem uma das suas representações, o concentrador Falcon® mostrou resultados muito promissores na concentração de ouro e carvão, (ABELA, 1997). Um estudo similar foi realizado com sucesso por (BOYLU, 2012) no beneficiamento de carvões na Turquia.

O carvão brasileiro é essencialmente caracterizado por elevados teores de cinzas e de enxofre, e já foi alvo de vários estudos intencionando a redução destes

teores na fração dos finos. Estes estudos apresentaram bons resultados em relação à redução do teor de cinzas, porém em relação à redução do teor de enxofre, não foram muito satisfatórios (CAMPOS E ALMEIDA, 1977; CAMPOS ET AL., 1981; LIMA ET AL., 1992).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. LOCALIZAÇÃO DA MINA LEÃO II

As amostras usadas neste estudo foram colhidas na mina Leão II, situada no município de Minas do Leão, a 92 km de Porto Alegre, no estado Brasileiro de Rio Grande do sul (figura 2).

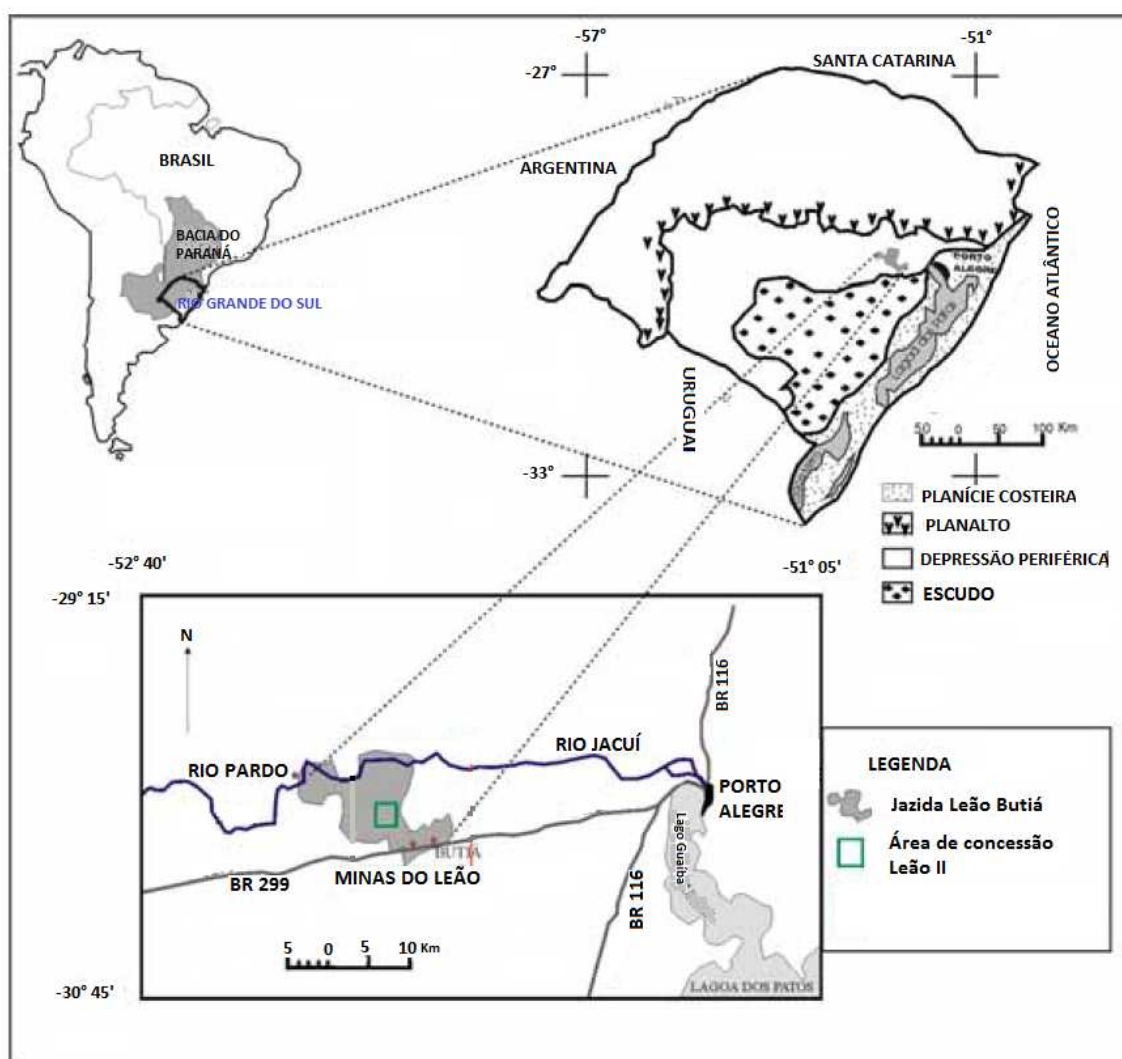


Figura 2. Localização da mina Leão II no estado de Rio grande do sul, adaptado de Silva (2000).

3.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Como consta na definição dos objetivos, a essência deste trabalho é avaliar a possibilidade de aplicar o concentrador Falcon® para reduzir os teores de cinza e enxofre total dos finos de carvão. Para tal, foi usada uma amostra de carvão coletada na mina LEAO II município de Minas do Leão.

A figura 3 mostra o resumo das principais etapas seguidas no desenvolvimento desta pesquisa.

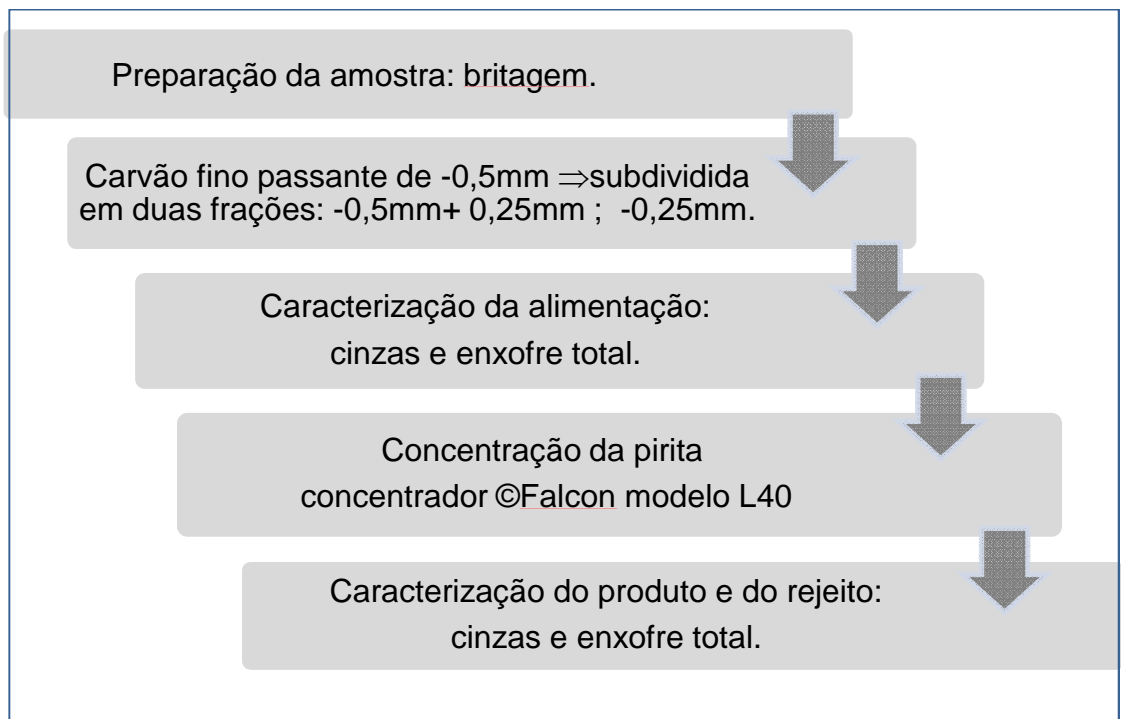


Figura 3. Fluxograma da metodologia utilizada na pesquisa.

O primeiro processo foi a preparação da amostra que consistiu na britagem tendo como objetivo a fragmentação da amostra. Para evitar a cominuição excessiva esta operação foi repetida duas vezes, mudando-se o equipamento, até se obter um material com a granulometria pretendida. Neste caso a amostra passou por um britador de mandíbulas “PLANG” e de seguida pelo britador de rolos “MAQBRITT” (figura 4), ambos alternados por um processo de peneiramento.



Figura 4. Britadores usados na preparação das amostras, sendo da esquerda para direita, o britador de mandíbulas “Plang” e o britador de rolos “Maquibritt”.

Uma vez pretendendo testar a utilização deste equipamento (Falcon®) para a fração de carvão fino, da amostra cominuída foi usada apenas a fração passante de -0,5mm. Esta por sua vez foi subdividida em duas frações:

- ✓ -0,5+0,25mm
- ✓ -0.25mm

Foi feita a caracterização da amostra para aferir a distribuição dos teores das cinzas e do enxofre total nas duas frações granulométricas.

Nos ensaios de concentração da pirita foi usado o concentrador Falcon® modelo L40. Para cada ensaio foram usados 1,5 litros de polpa de carvão, colocados no alimentador de fundo cônico com agitador. O teor de sólidos de alimentação foi mantido constante (7% em volume).

A velocidade de rotação foi regulada através do pacote automático (auto-pack) do concentrador e a água de fluidização é injetada dos anéis de retenção, regulada por uma válvula, para permitir que as partículas mais pesadas migrem para a zona de retenção.

No fim do teste, a água de fluidização foi desligada, o rotor paralisado, o rejeito foi recolhido e colocado para secagem na estufa a 45°C. O produto foi recolhido por decantação após 24 horas de sedimentação, passando posteriormente à secagem a mesma temperatura.

Para análises complementares foi usada uma mufla para a determinação das cinzas e o “elementar vario macro” para a determinação do enxofre total. O elementar é um dos equipamentos usados para a análise de elementos químicos como enxofre, Hidrogênio, Carbono, e Nitrogênio, que se baseia no método de combustão em alta temperatura, com conversão da amostra em gases e a subsequente separação e análise dos gases pela sua condutibilidade.

3.3. ANÁLISES QUÍMICAS IMEDIATAS

A análise química elementar de uma amostra define o conteúdo, em porcentagem de massa ou volume, dos elementos que formam parte da composição química do carvão, ou seja, carbono, hidrogênio, enxofre, oxigênio, nitrogênio. A análise imediata define o conteúdo, em porcentagem de massa ou volume, de carbono fixo, voláteis, cinzas e umidade.

Para a determinação da Umidade foram obedecidos os procedimentos preconizados na norma ABNT NBR 8293. A porcentagem de matérias voláteis é determinada a partir do carvão previamente seco pelo método da umidade de acordo com a norma ABNT NBR 8290. Para a análise de cinzas, foi utilizada a norma ABNT NBR 8289/19833. A determinação do carbono fixo é feita por diferença. Calculadas as porcentagens de umidade, de matéria volátil e de cinza, a diferença entre 100 e a soma dessas três porcentagens dará a porcentagem do carbono fixo.

3.3.1 ANÁLISE DE ENXOFRE TOTAL (St)

A determinação do enxofre total foi feita através do equipamento “ELEMENTAR VARIO MACRO” (figura 5).



Figura 5. Equipamento usado para análise de enxofre total no LAPROM, desenvolvido pela multinacional alemã “ELEMENTAR Analysensysteme”.

O princípio de funcionamento do equipamento é o de termocondutividade onde a temperatura de início de funcionamento do equipamento é de 1150°C e 850°C dependendo do elemento a analisar. A duração de análise por amostra é de aproximadamente 10 minutos. Os ensaios começam por quatro brancos, isto é com cadinho vazio, seguido por quatro padrões e finalmente vêm as amostras. Os brancos servem para certificar a operacionalidade do equipamento, pois circula apenas o Hélio (He) no sistema e oferece uma visão da pureza do gás. O padrão usado foi a *sulfadiazina* ou *sulfa* no peso de aproximadamente 40mg.

Todos os procedimentos seguidos foram de acordo com a orientação do fabricante do equipamento.

3.4. O CONCENTRADOR FALCON®

O concentrador Falcon® L40, utilizado neste estudo foi desenvolvido na década 80 pela multinacional canadense “*Sepro Mineral Systems Corporation*”. A figura 6 mostra o equipamento usado para os ensaios de concentração gravítica desta pesquisa.



Figura 6. Equipamento Falcon® usado para os ensaios no LAPROM, desenvolvido pela multinacional canadense “*Sepro Mineral Systems Corporation*”, com o realce do “autopack” e do manômetro da pressão da água.

O concentrador Falcon® consiste de uma cesta cilíndrica de topo aberto que está montada sobre um eixo, tem um diâmetro de 25 cm e está verticalmente alinhado, como mostrado na (Figura 7).

A velocidade de rotação do recipiente pode ser ajustada de modo a produzir uma força centrífuga de até 300 g, e conseqüentemente causar deposição e estratificação das partículas sobre a parede interna da cesta.

A polpa de carvão é continuamente introduzida na parte inferior da cesta rotativa por meio de uma conduta que se estende para baixo ao longo do eixo de rotação. A polpa é então impelida para a parede da cesta por um impulsor, assim causando estratificação ao longo da secção inclinada inferior da cesta, chamada a zona de migração, devido à aceleração diferencial. Nesta zona, o campo gravitacional gerado pela rotação da cesta é subdividido em duas componentes de força.

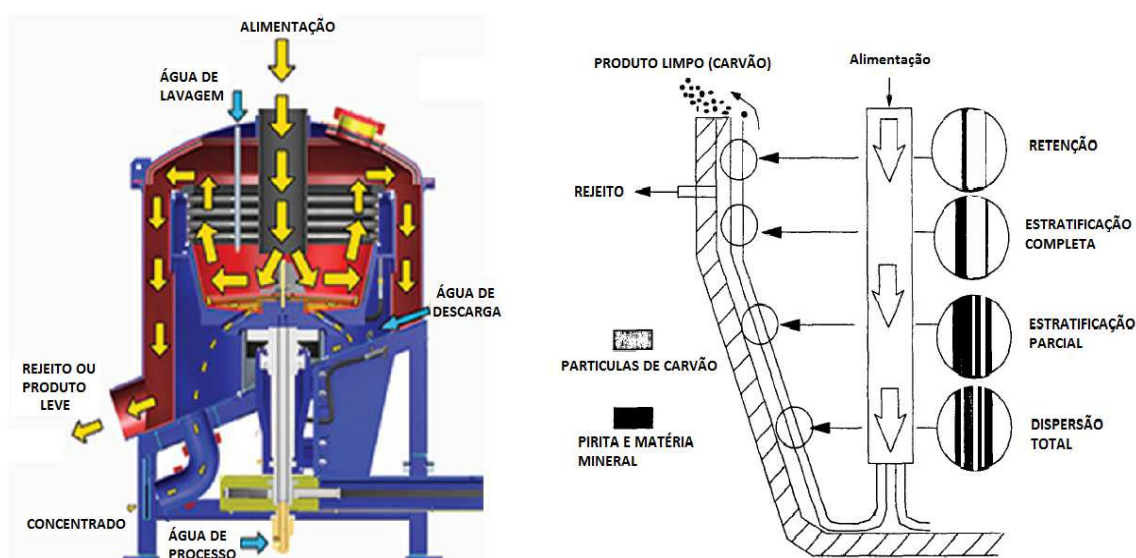


Figura 7. Representação esquemática dos mecanismos de separação no concentrador Falcon® adaptado de Honaker (1995) e da *Sepro Mineral Systems Corporation*.

A componente de força mais forte é normal à parede e constitui a principal força de concentração gravítica que permite a sedimentação e estratificação das partículas de acordo com, primeiramente, densidade e, secundariamente, tamanho de partícula.

A componente mais fraca é paralela à parede da cesta e empurra os sólidos estratificados em direção ao topo. Durante o movimento ascendente, as partículas densas e grossas formam uma camada mais próxima à parede da cesta, enquanto o produto e partículas leves formam uma camada mais distante da parede da cesta.

A fricção entre as partículas e a parede da cesta produz uma diferenciação de velocidades verticais das partículas nas diferentes camadas.

A parte superior da cesta, chamada a zona de retenção, é paralela ao eixo de rotação. Como resultado, não há nenhuma componente de força vertical que empurre as partículas para cima em direção ao topo da cesta.

Além disso, um anel de retenção restringe o leito de partículas de sair no *overflow*. A combinação da falta de uma componente de força vertical e a presença de um anel de retenção faz com que as partículas densas fiquem retidas enquanto a força centrífuga que é normal à parede, força estas partículas a entrar numa anel de retenção que existe em torno da circunferência da cesta.

Ao mesmo tempo, as partículas leves que formam o leito de partículas mais afastadas da parede da cesta, movem-se para cima do anel de retenção do recipiente usando o impulso acumulado na zona de migração e da força da película de água que se move para cima de fluxo. Estas partículas leves constituem o produto final com outras partículas que são muito finas para serem afetadas pela força gravitacional.

3.4.1. VARIÁVEIS OPERACIONAIS

O desempenho do concentrador Falcon® é influenciado por diversas variáveis operacionais. As mais estudadas são: a altura do anel de retenção, o ângulo de inclinação do cone, o tempo de operação, a velocidade de rotação da centrífuga e a concentração de sólidos na alimentação (SAMPAIO E TAVARES, 2005).

Segundo os mesmos autores, o tempo em que a válvula encontra-se aberta e a altura do anel de retenção influenciam diretamente na espessura do leito na zona de separação (em caso do modelo contínuo). O ângulo do cone influencia diretamente o tempo de residência das partículas no aparelho e, portanto, a capacidade e a precisão da separação. A principal função deste ângulo é fazer com que uma porção da força centrífuga, gerada pela rotação, crie uma componente de

força vertical paralela à parede da cesta, que atua sobre as partículas. Isto força-as a percorrer o sentido vertical em direção ao topo.

A concentração de sólidos na alimentação depende das características do minério sendo recomendada pelos fabricantes uma concentração de 5% a 70%.

A rotação da centrífuga é a chave de todo o processo, assim a sua velocidade de rotação tem um papel fundamental. Esta velocidade cria uma influência direta sobre a força centrípeta gerada que pode atingir 300G, porém são reportadas na literatura algumas versões do equipamento que chegam a atingir os 600G, desenvolvidos para a concentração de materiais ultrafinos. Embora velocidades maiores sejam recomendadas por alguns autores proporcionalmente á diminuição do tamanho da partícula, o seu emprego para alimentações com intervalo amplo de tamanho de partícula pode resultar em contaminação do produto denso por partículas leves grossas (HONAKER, 1995).

A pressão da água de fluidização aumenta com o tamanho e densidade das partículas. Com o aumento da pressão, o leito de partículas leves passa a ser totalmente fluidizado, e as partículas mais densas são as que atingem potencialmente o fundo do anel de retenção.

As principais variáveis operacionais e de processo estudadas, durante a realização dos ensaios, foram as seguintes:

- ✓ Granulometria de alimentação;
- ✓ Rotação da centrífuga;
- ✓ Pressão da água de contrapressão ou de fluidização.

A vazão de alimentação de polpa e a percentagem de sólidos na polpa de alimentação foram mantidas constantes em todos os ensaios.

Variou-se a rotação da centrífuga em 78G, 176G e 300G. as faixas granulométricas usadas foram: -0,5+0,25mm e -0,25mm. A pressão de água de contrapressão variou de 2PSI, 4PSI, 8PSI, 12PSI e 15PSI.

3.5. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO

A determinação da eficiência de um processo de separação é de extrema importância, pois além de influenciar na qualidade dos produtos, influencia também nos aspectos econômicos da técnica. Para determiná-la faz-se necessário o conhecimento prévio do balanço de massa do processo. Então, considera-se que toda operação de separação é baseada no seguinte princípio básico:

$$\text{ENTRADA} = \text{SAÍDA}$$

Ou, no caso mais real,

$$\text{ENTRADA} = \text{SAÍDA} + \text{PERDAS}$$

O resultado é a formação de pelo menos dois produtos conforme mostra a figura 8:

Rejeito: que neste caso contém a maior parte da espécie mais densa (pirita e cinza);

Produto: que corresponde à fração leve (carvão).

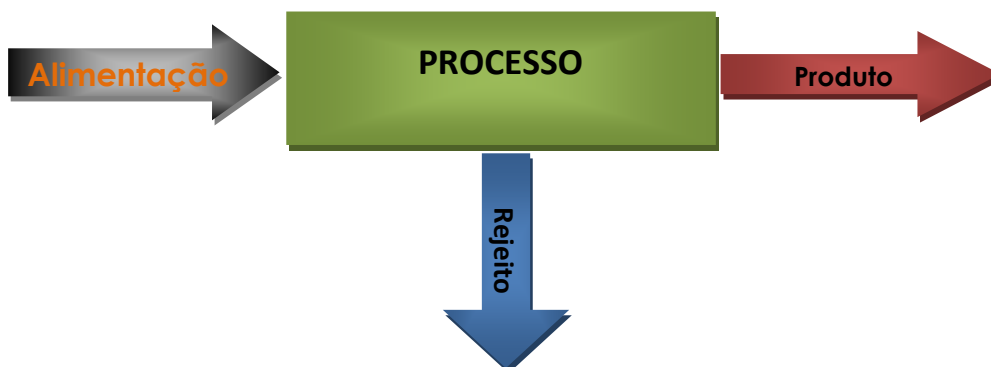


Figura 8: representação esquemática do processo de beneficiamento com as principais componentes.

A análise de todo o produto foi realizado em termos de "recuperação de matéria orgânica (%RMO)", "rejeição de cinza (%RC)" e "rejeição de enxofre total (RSt)". As fórmulas matemáticas são apresentadas abaixo sendo que o peso do carvão recuperado e o seu conteúdo de cinzas e enxofre foram também determinados antes dos cálculos.

$$\%RC = (1 - (Mc * Cc) / (Ma * Ca)) * 100$$

Onde:

RC = Rejeição de Cinzas

Cc = teor de cinzas do produto

Ca = teor de cinzas de alimentação

Mc = Massa de produto

Ma = massa de alimentação

$$(\%RSt) = (1 - (Mc * Stc) / (Ma * Sta)) * 100$$

Onde:

RSt = Rejeição de Enxofre total

Stc = teor de enxofre total no produto

Sta = teor de Enxofre total na alimentação

$$\%RMO = (Mc_{(ssc)}) / (Ma_{(ssc)}) * 100$$

Onde:

RMO = recuperação de matéria orgânica

Mc(bsic) = massa do produto, em base seca isenta de cinzas.

Ma (bsic) = massa da alimentação, em base seca isenta de cinzas.

Para a determinação do $M_{c(ssc)}$ e $M_{a(ssc)}$ foram usadas as seguintes expressões:

$$M_{a(ssc)} = \frac{M_a(100 - (U + C_a))}{100}$$

$$M_{c(ssc)} = \frac{M_c(100 - (U + C_c))}{100}$$

Onde:

U = teor de umidade

A rejeição de cinza dá uma ideia sobre a quantidade de cinzas que é retida no rejeito, portanto quanto maior o valor de (% RC), menor é o conteúdo de cinzas no produto e o mesmo sucede em relação à rejeição do enxofre.

A recuperação de matéria orgânica (%RMO) mostra a quantidade de matéria orgânica recuperada a partir da quantidade total de matéria orgânica anteriormente presente na alimentação.

Segundo Schneider (1987) avaliação de desempenho pode ser feita através de uma série de índices que medem a eficiência e a nitidez da separação do processo. Assim, a eficiência ou precisão de qualquer unidade de beneficiamento gravimétrico pode ser medida através dos seguintes critérios:

- ✓ Critérios independentes
- ✓ Critérios dependentes

Os critérios independentes do desempenho, característicos de uma unidade de beneficiamento, não dependem significativamente da composição densimétrica do carvão da alimentação nem da densidade de separação. Estes critérios são derivados da curva de partição do aparelho, também conhecida como curva de *Tromp*, curva de distribuição, curva de recuperação ou curva de erro. Esta curva

define quantitativamente a proporção de massas por faixa densimétrica que o equipamento distribui para o produto e para o rejeito. Para determinar-se a curva de partição de um determinado aparelho, são necessárias as recuperações e análises densimétricas dos produtos considerados.

Os critérios dependentes são, de modo geral, definidos tanto pelas características do carvão da alimentação, como pelas características da unidade de beneficiamento utilizada. Sendo assim, duas unidades de beneficiamento exatamente iguais poderão apresentar índices de eficiência diferentes se estiverem lavando carvões diferentes.

Os principais parâmetros que definem estes critérios dependentes são os seguintes: eficiência orgânica e material deslocado total.

Existem diversas formas de definir a eficiência orgânica de um aparelho ou de uma usina. A fórmula usada é a de Fraser & Yancey Apud Sampaio e Tavares, (2005):

$$\text{Eficiência} = (\text{recuperação de carvão lavado} / \text{recuperação teórica}) * 100$$

Onde a recuperação teórica é porcentagem de carvão contido na alimentação com o mesmo teor de cinzas do carvão lavado.

Este critério apresenta duas limitações importantes:

- ✓ A fórmula que o define é muito sensível ao cálculo do balanço de massas.
- ✓ Tem relação com a friabilidade de alguns carvões, os quais estão sujeitos a sofrer liberação durante o processo de beneficiamento, podendo-se encontrar não raramente valores de eficiência maiores que 100%.

Define-se como material deslocado total a quantidade de carvão lavado presente no rejeito. Estas quantidades são medidas em termos percentuais. Quanto menores as proporções de material deslocado, melhor o desempenho do

equipamento. As medidas são feitas com base nas curvas densimétricas dos produtos e na densidade de corte do equipamento.

Schulz apud Sampaio e Tavares (2005) apresenta uma fórmula para o cálculo da eficiência da separação baseada na recuperação de mineral de interesse e a de mineral de ganga no rejeito.

Esta equação foi ajustada para o caso do beneficiamento de carvão por Wills apud Sampaio e Tavares (2005), e atualmente tem sido adotada por vários autores para a avaliação de desempenho (VALADÃO ET AL, 2007; BARROSO, 2007; BISHAL, 2012, MOHANTA, 2011).

O índice de eficiência da separação foi, portanto útil para determinar o efeito de variáveis na eficiência. Este índice foi calculado em relação à remoção das duas espécies em estudo, as cinzas e o enxofre total. Matematicamente este índice é dado por:

$$EC = (\%RC + \%RMO) - 100$$

$$\%EST = (\%RSt + \%RMO) - 100$$

EC = Índice de eficiência na separação das cinzas.

EST = Índice de eficiência na separação do enxofre total.

Os efeitos das variáveis principais foram estudados através da representação gráfica da Rejeição de cinza (RC), Rejeição de enxofre total (RSt), Recuperação de matéria orgânica (RMO) e os índices de eficiência.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A amostra ROM de carvão da mina Leão II foi cominuída pelo britador de mandíbulas e posteriormente pelo britador de rolos. A fração passante em -0,5mm foi usada para os ensaios aqui apresentados.

A amostra foi subdividida em duas frações granulométricas cujas características são apresentadas na tabela 2.

Tabela 2. Características do carvão usado na alimentação

Granulometria (mm)	Massa (%)	Cinza (%)	St (%)	Umidade (%)	Voláteis (%)	C fixo (%)
-0,5+0,25	48,15	57,89	1,98	4,65	23,07	19,04
-0,25	51,85	58,99	2,32	4,72	22,65	18,36

Como se pode observar nos resultados da tabela 3, trata-se de um carvão com alto teor de cinza e de enxofre. A fração mais fina (-0,25mm) é a que apresenta maiores teores de cinzas (58,99%) bem como de enxofre total (2,32%), devido à concentração de argilas nesta faixa granulométrica.

A tabela 3 mostra os resultados da variação do volume da água em relação à variação da pressão da água de fluidização.

Tabela 3. Variação do volume de água com o aumento da pressão da água de fluidização.

Pressão da água de fluidização (PSI)	Volume médio da água usada (l)
2	20
4	30
8	60
12	90
15	120

O aumento da pressão da água de fluidização implica um maior consumo de água no processo (tabela 4). Embora essa água possa ser reutilizada, o volume da usado nos processos acima de 8Psi pode tornar o processo economicamente insustentável.

No processo de beneficiamento do carvão, a rejeição de cinzas (%RC), a rejeição de enxofre (%RSt), a recuperação da matéria orgânica (%RMO) e o índice de eficiência (%E) são os dados quantitativos que nos permitem saber até que ponto o carvão está limpo pela técnica em avaliação.

Para todos os valores usados para a avaliação do desempenho do processo, há um estabelecimento de uma ponte entre os teores dos materiais em estudo com as respectivas quantidades (massa) o que confere um significado importante a cada determinação realizada.

Os resultados de todos os ensaios realizados no concentrador falcon® são apresentados nas tabelas 4 e 5 para a faixa granulométrica -0,25mm e - 0,5+0,25mm, respectivamente.

Tabela 4. Resultados obtidos nos ensaios da faixa granulométrica de -0,25mm, partindo de uma alimentação com 2,32% de enxofre e 58,99% de cinzas.

P H ₂ O	G	Rejeito				Produto			Rejeição/Recuperação			Ind. eficiência		
		Massa		c	St	Massa		c	S	RSt	%RC	%RMO	Ecinza	ESt
		(g)	(%)	(%)	(%)	(g)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
2	78	47	31,33	72,48	2,91	98,30	65,53	52,16	1,12	68,36	42,05	76,45	18,50	44,80
2	176	50	33,33	69,71	2,90	92,00	61,33	52,53	1,15	69,51	45,38	72,34	17,72	41,84
2	300	56,9	37,93	66,16	2,58	86,90	57,93	54,10	1,38	65,42	46,87	65,80	12,67	31,22
4	78	16,2	10,80	80,03	5,76	125,70	83,80	53,81	1,23	55,57	23,56	95,85	19,41	51,43
4	176	32,1	21,40	73,95	3,45	105,50	70,33	53,11	1,21	63,39	36,68	81,82	18,50	45,21
4	300	55,8	37,20	67,06	2,60	89,40	59,60	55,25	1,20	69,17	44,18	65,79	9,97	34,96
8	78	12,5	8,33	80,95	8,30	130,80	87,20	55,68	1,31	50,59	17,69	95,22	12,91	45,81
8	176	20,6	13,73	79,95	6,01	125,80	83,87	55,02	1,26	54,46	21,78	93,11	14,89	47,57
8	300	30,8	20,53	76,90	4,17	114,70	76,47	57,53	1,42	53,20	25,43	79,57	4,99	32,77
12	78	10	6,67	81,61	6,89	133,40	88,93	56,76	1,36	47,87	14,43	94,44	8,87	42,31
12	176	13,6	9,07	79,90	7,85	132,3	88,20	56,87	1,40	46,70	14,97	93,39	8,36	40,09
12	300	14,9	9,93	79,91	5,90	121,1	80,73	57,80	1,46	49,19	20,90	83,40	4,30	32,59
15	78	9,3	6,20	81,07	6,98	136	90,67	57,40	1,47	42,55	11,78	94,67	6,45	37,22
15	176	11,4	7,60	79,73	8,10	134,48	89,65	57,29	1,43	44,59	12,93	93,89	6,82	38,47
15	300	11,8	7,87	79,59	7,08	133,7	89,13	57,94	1,48	43,27	12,45	91,73	4,19	35,00

Tabela 5. Resultados obtidos nos ensaios da fração granulométrica de -0,5+0,25mm, partindo de uma alimentação com 1,98% de enxofre e 57,89% de cinzas.

P H ₂ O	G	Rejeito			Produto			Rejeição/Recuperação			Ind. eficiência			
		Massa		c	St	Massa		c	St	RSt	RC	RMO	Ecinza	ESt
		(g)	%	(%)	(%)	(g)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
2	78	70,1	46,73	66,99	3,03	75,10	50,07	46,06	1,01	74,51	60,16	66,03	26,19	40,54
2	176	73,7	49,13	63,72	2,47	70,80	47,20	48,54	1,07	74,54	60,42	59,09	19,52	33,63
2	300	74,9	49,93	61,20	2,09	73,70	49,13	51,37	1,18	75,22	56,40	57,77	14,17	32,99
4	78	65,8	43,87	67,77	3,59	80,80	53,87	46,13	1,00	71,11	57,08	70,94	28,01	42,04
4	176	67,5	45,00	65,40	3,30	76,30	50,87	48,81	1,06	72,72	57,11	63,31	20,42	36,03
4	300	71,8	47,87	64,87	2,44	77,20	51,47	51,60	1,18	72,00	54,13	60,19	14,32	32,19
8	78	55,1	36,73	77,03	4,79	92,80	61,87	47,06	1,05	63,13	49,71	79,92	29,63	43,05
8	176	53,6	35,73	68,55	3,44	92,20	61,47	49,14	1,08	66,56	47,82	75,96	23,78	42,52
8	300	55,97	37,31	67,58	2,41	92,20	61,47	52,44	1,32	67,44	44,32	70,49	14,81	37,94
12	78	37,7	25,13	80,40	6,06	107,10	71,40	51,70	1,11	59,97	36,23	83,31	19,54	43,28
12	176	38,7	25,80	74,10	3,49	107,90	71,93	50,12	1,17	57,49	37,72	86,99	24,72	44,49
12	300	41,03	27,35	72,10	2,61	104,10	69,40	52,65	1,09	61,09	36,88	79,20	16,08	40,29
15	78	31,3	20,87	80,53	5,22	116,4	77,60	53,64	1,14	55,32	28,10	86,49	14,58	41,81
15	176	33,2	22,13	77,29	3,53	115,5	77,00	51,21	1,19	53,63	31,89	90,86	22,75	44,49
15	300	33,9	22,60	76,35	3,03	114,7	76,47	53,01	1,07	58,68	29,98	86,52	16,50	45,20

Para todos os ensaios realizados com amostras de granulometria -0,25mm as taxas de rejeição de enxofre variaram entre 42,55% a 69,51%, e a recuperação da matéria orgânica variou entre 65,79% a 95,85% (tabela 4).

Nestas tabelas estão listadas as principais variáveis operacionais usadas no processo, bem como os seus efeitos no rejeito e no produto, mais concretamente os teores de cinza e de enxofre total no rejeito e no produto.

Os resultados das (tabelas 5 e 6) mostram uma nítida diminuição da massa do rejeito com o aumento da pressão da água sendo que o teor de cinzas e do enxofre tende a ser maior em pressões de água mais elevadas.

O efeito da variação da força G mostrou-se contrária ao efeito da variação da água de fluidização, isto é, o aumento da força G é acompanhado por um aumento da massa do rejeito e diminuição do seu teor de cinza e do enxofre.

O teor de enxofre do rejeito, na fração passante de $-0,25\text{mm}$, teve seu valor máximo de $8,30\%$ e cinzas $81,61\%$ partindo de uma alimentação com $2,32\%$ de enxofre e $58,99\%$ de cinzas.

Para a fração de $-0,5+0,25\text{mm}$ (tabela 6) o valor máximo de enxofre total foi $6,06\%$ e o teor de cinzas foi de $80,40\%$ e foi verificado na combinação da maior pressão da água (15 Psi) e menor força ($78G$).

Quanto ao produto, as tabelas 5 e 6 mostraram um aumento da massa do produto recolhido com o aumento da pressão da água, porém, esta diminui com o aumento da aceleração, contrariamente ao teor de cinzas que aumenta com o aumento da aceleração da centrífuga.

O aumento da pressão da água de fluidização cria uma pressão contrária á força G sobre o material retido no anel de retenção aumentando a chance das partículas menos densas voltarem ao fluxo ascendente, podendo ser recolhidos no rejeito (figura 9).

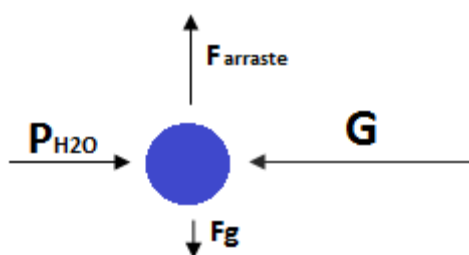


Figura 9: representação esquemática resumida das principais forças que atuam numa partícula na zona de retenção.

4.1. REJEIÇÃO DE CINZA (%RC), REJEIÇÃO DE ENXOFRE TOTAL (%RSt) E RECUPERAÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA (%RMO).

Cálculos das taxas de rejeição de enxofre e de cinza, assim como a recuperação de matéria orgânica no produto, foram realizados com o objetivo de avaliar o desempenho do concentrador no beneficiamento de finos de carvão e podem ser visualizados através dos gráficos das figuras 10 a 15.

Aplicando uma aceleração de 78G, a recuperação tende a aumentar com o aumento da pressão da água de fluidização até a pressão de 4PSI. A partir desta pressão o processo tende a estabilizar, ou seja, a partir de 4PSI, o aumento da pressão de fluidização tem efeito pouco significativo sobre a recuperação. O mesmo pode ser dito em relação à rejeição de cinzas e do enxofre total, que mostram uma redução pouco significativa com o aumento da pressão da água acima de 4PSI (figura 10).

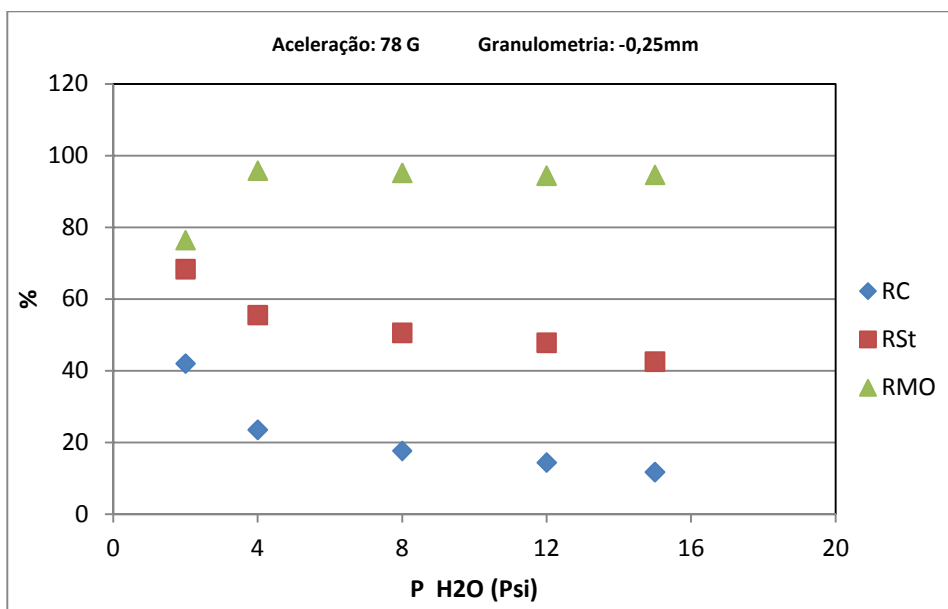


Figura 10: comportamento das taxas de rejeição de cinzas (RC) e do enxofre total (RSt) bem como a recuperação da matéria orgânica (RMO), com a variação da pressão da água de fluidização na faixa granulométrica de -0,25mm e aceleração de 78G.

Ainda na figura 8, pode se notar que acima de 4PSI, os valores da recuperação são muito elevados (RMO \approx 90%) e a taxa de rejeição de cinzas registra os valores mais baixos (RC \approx 20%).

Aumentando o valor da aceleração para 176G, a recuperação de matéria orgânica começa a se estabilizar a partir de 8PSI (figura 11).

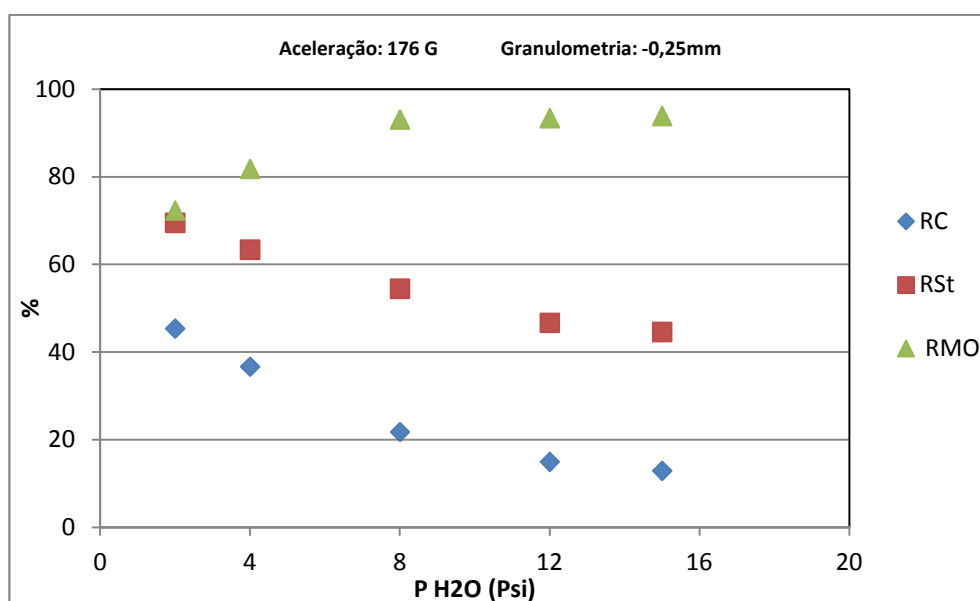


Figura 11. Comportamento das taxas de rejeição de cinzas (RC), do enxofre total (RSt) e da recuperação da matéria orgânica (RMO), com a variação da pressão da água de fluidização, (aceleração de 176G e faixa granulométrica de -0,25mm).

Neste intervalo de pressões ($P > 8$ PSI) as taxas de rejeição começam a registrar uma redução relativamente pouco significativa, com os valores mais baixos a se registrarem na rejeição de cinzas (figura 11).

Aplicando a aceleração máxima do concentrador Falcon® (300G) a tendência se mantém, crescente para a recuperação e decrescente para a rejeição, contudo esta tendência mostra-se contínua para todos os valores de PH₂O (figura 12), isto é, não se nota nenhum ponto onde a variação se torna pouco significativa como foi o caso das acelerações mais baixas.

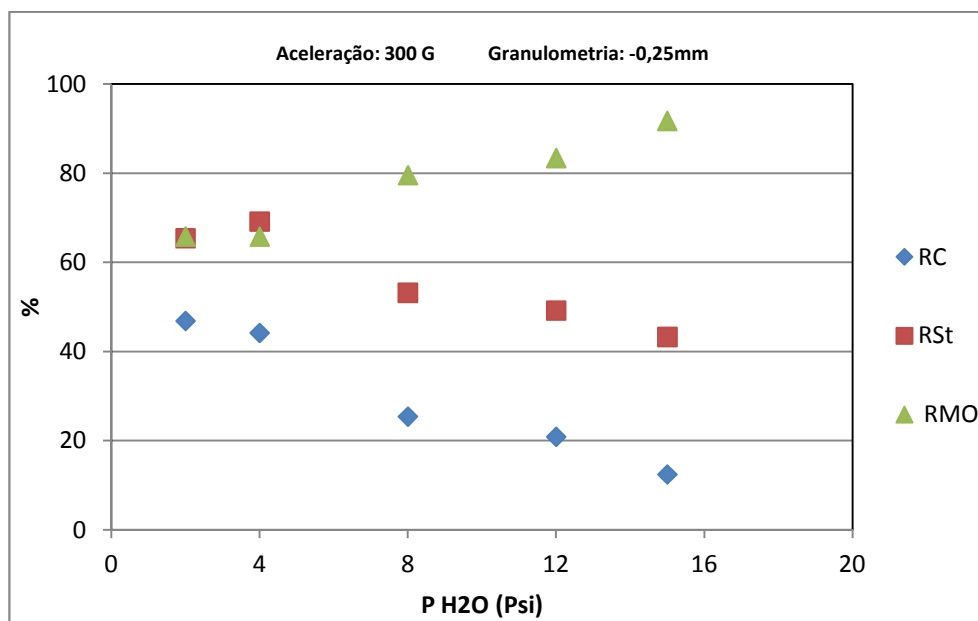


Figura 12: Comportamento das taxas de rejeição de cinzas (RC), do enxofre total (RSt) e da recuperação (RMO), com a variação da pressão da água de fluidização, (aceleração de 300G e faixa granulométrica de -0,25mm).

Outro aspecto importante é que para valores baixos de pressão da água a rejeição de enxofre é superior à recuperação. Ela tende a aumentar até 8PSI e decresce para pressões superiores a esta, (figura 12).

De acordo com as figuras 13, 14 e 15, que apresentam os resultados dos ensaios na faixa granulométrica -0,5+0,25mm, o valor mínimo da rejeição de enxofre total foi de 53,63% e o máximo foi de 75,22%. A recuperação de matéria orgânica variou entre 57,77% e 90,86% (tabela 6). Nesta granulometria para as pressões de água de 2PSI e 4PSI a rejeição de enxofre é maior que a recuperação (figuras 13, 14 e 15). Nestas figuras pode se fazer a leitura do comportamento das principais variáveis com o aumento da pressão da água.

O aumento da pressão da água é contrário às taxas de rejeição mesmo aplicando diferentes acelerações (78G 176G e 300G) (figura 13, 14, 15, respectivamente), em outras palavras, o efeito do aumento da aceleração é pouco significativo.

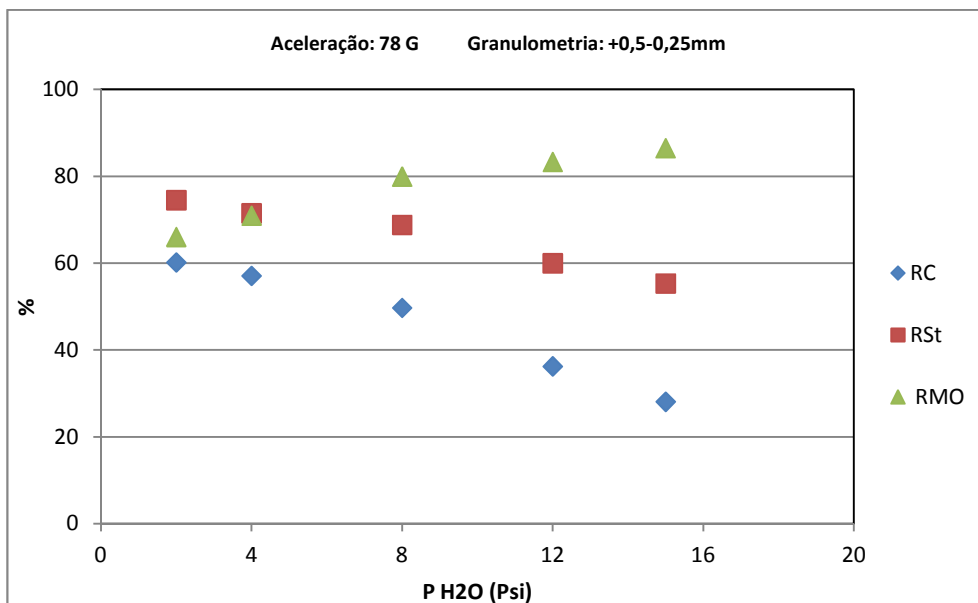


Figura 13: comportamento das taxas de rejeição de cinzas (RC), do enxofre total (RSt) e da recuperação de matéria orgânica (RMO), com a variação da pressão da água de fluidização, (aceleração de 78G e faixa granulométrica de -0,5+0,25mm).

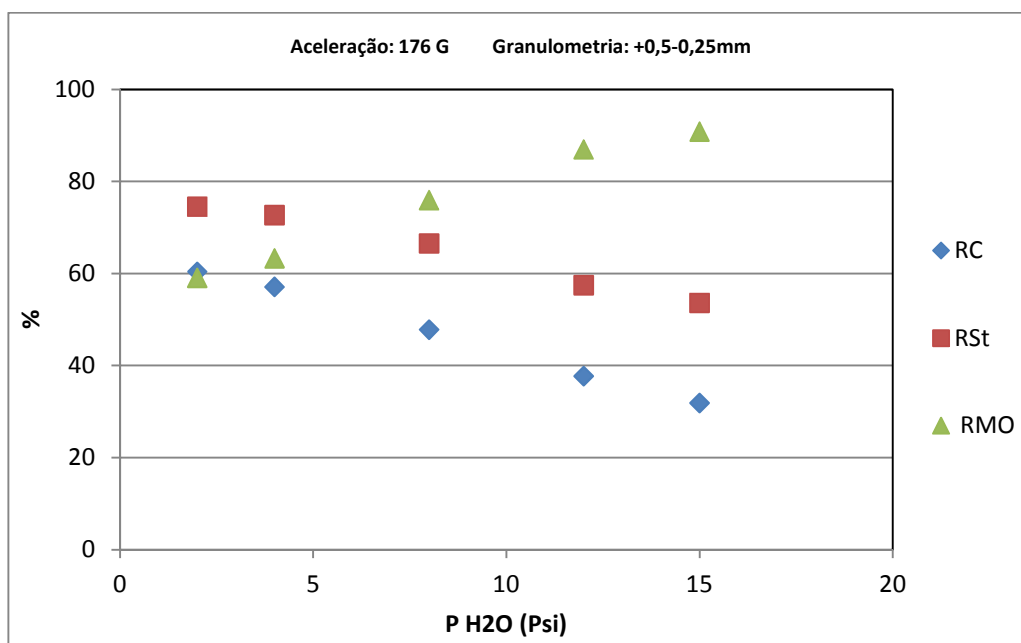


Figura 14: comportamento das taxas de rejeição de cinzas (RC), do enxofre total (RSt) e da recuperação (RMO), com a variação da pressão da água de fluidização, (aceleração de 176G e faixa granulométrica de -0,5+0,25mm).

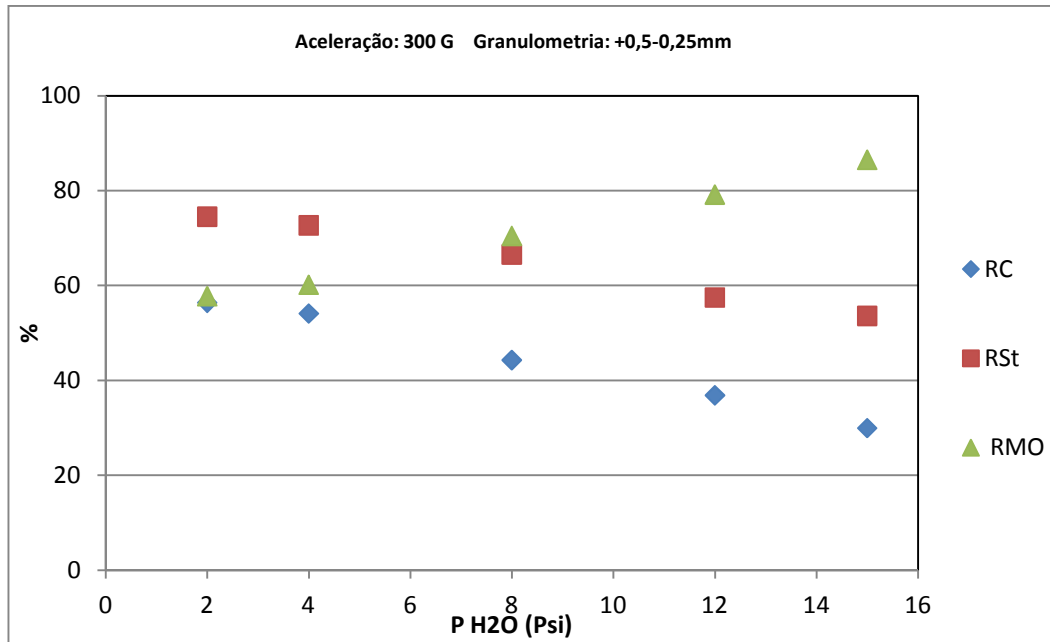


Figura 15: comportamento das taxas de rejeição de cinzas (RC), do enxofre total (RSt) e da recuperação (RMO), com a variação da pressão da água de fluidização, (aceleração de 300G e faixa granulométrica de -0,5+0,25mm).

Comparando os resultados das duas faixas granulométricas (-0,25mm e - 0,5+0,25mm) conforme mostram as figuras 10 a 15, a rejeição de cinzas mostra as taxas mais baixas para a faixa granulométrica -0,25mm, que varia entre 11,78% a 46,87%, do que a faixa granulométrica de -0,5+0,25mm, que apresenta valores entre 29,98% a 60,42%. Isto evidencia a dificuldade relativamente maior criada pelos ultrafinos, sobretudo associados às argilas que muitas vezes acabam reportando ao produto.

Valores mínimos de pressão de água de fluidização (2 e 4PSI) mostram bons resultados tanto na rejeição de cinzas assim como de rejeição enxofre na faixa granulométrica mais fina (-0,25mm).

A faixa granulométrica mais grosseira mostra boas taxas de rejeição com a pressão de 8PSI, isto considerando uma força de 78G. O aumento da pressão da água acima deste valor tem um impacto negativo sobre a taxa de rejeição de cinzas e de enxofre para a fração fina mesmo acompanhada por um aumento correspondente da aceleração. Na fração grosseira, pressões muito baixas tem um efeito negativo, porém acima da pressão 8PSI, o aumento da pressão quando

acompanhado por um correspondente aumento da força G tem um efeito positivo, mas pouco significativo.

A recuperação da matéria orgânica mostra uma tendência ascendente com o aumento da pressão da água, porém o efeito contrário foi observado em relação à força G que tende a baixar o valor da recuperação. Isto se deve à tendência da água em forçar a saída do produto retido no anel de retenção, tendência esta que é contrariada pela força G que atua no sentido oposto (figura 9).

Os gráficos das figuras 16 e 17 mostram a relação entre as taxas de rejeição de cinzas (%RC) e de enxofre total (%RSt) com a recuperação de matéria orgânica (%RMO), para a faixa granulométrica de -0,25mm.

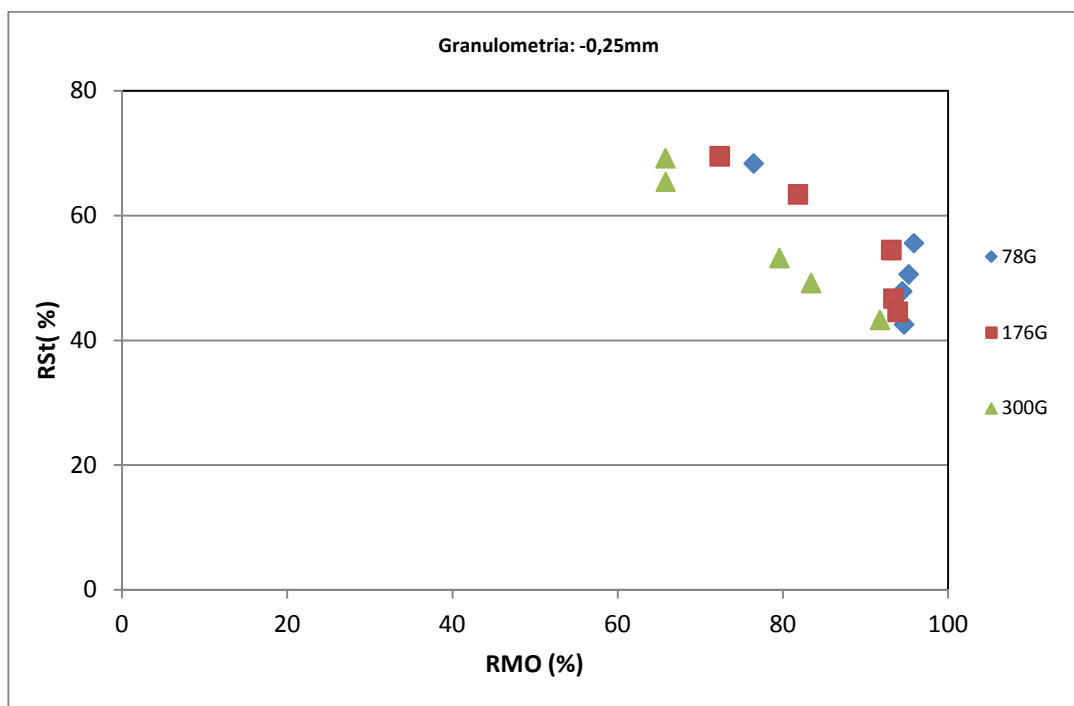


Figura 16: relação entre a recuperação de matéria orgânica (%RMO) e a taxa de rejeição enxofre total (%RSt) para a fração granulométrica de -0,25mm, considerando três valores de aceleração 78G, 176G e 300G.

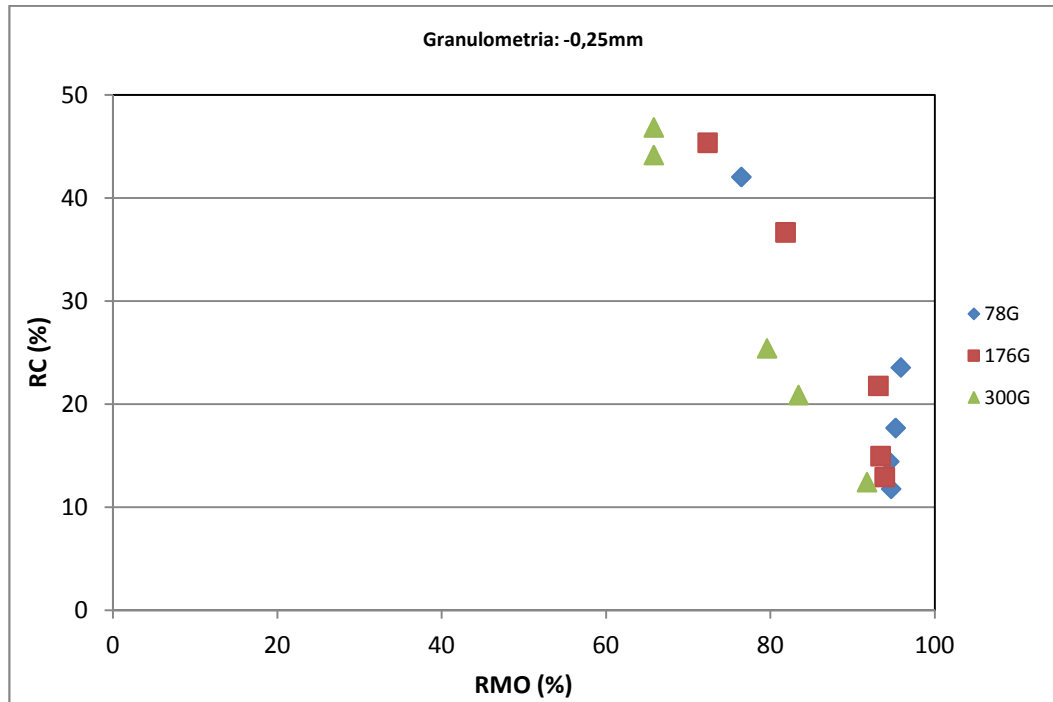


Figura 17: relação entre a recuperação de matéria orgânica (%RMO) e a taxa de redução de cinza (%RC) para a fração granulométrica de-0,25mm, considerando três valores de aceleração 78G, 176G e 300G.

Os gráficos das figuras 18 e 19, mostram a relação entre as taxas de rejeição de cinzas (%RC) e de enxofre total (%RSt) com a recuperação de matéria orgânica (%RMO), para a faixa granulométrica de-0,5+0,25mm.

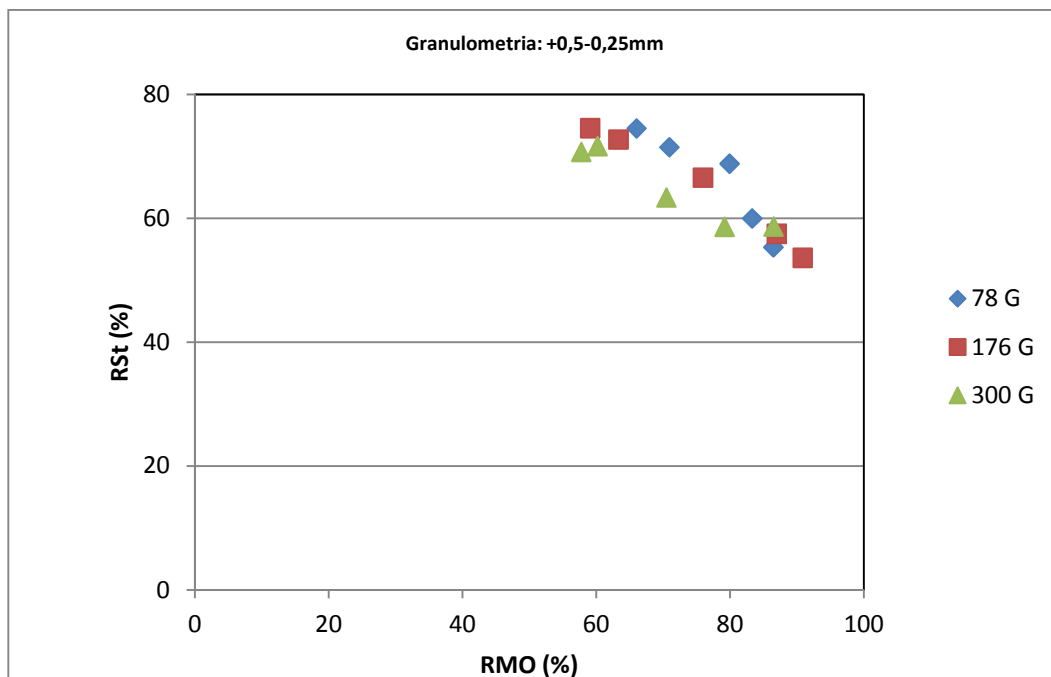


Figura 18: relação entre a recuperação de matéria orgânica (%RMO) e a taxa de redução de enxofre total (%RSt) para a fração granulométrica de -0,5+0,25mm, considerando três valores de aceleração 78G, 176G e 300G.

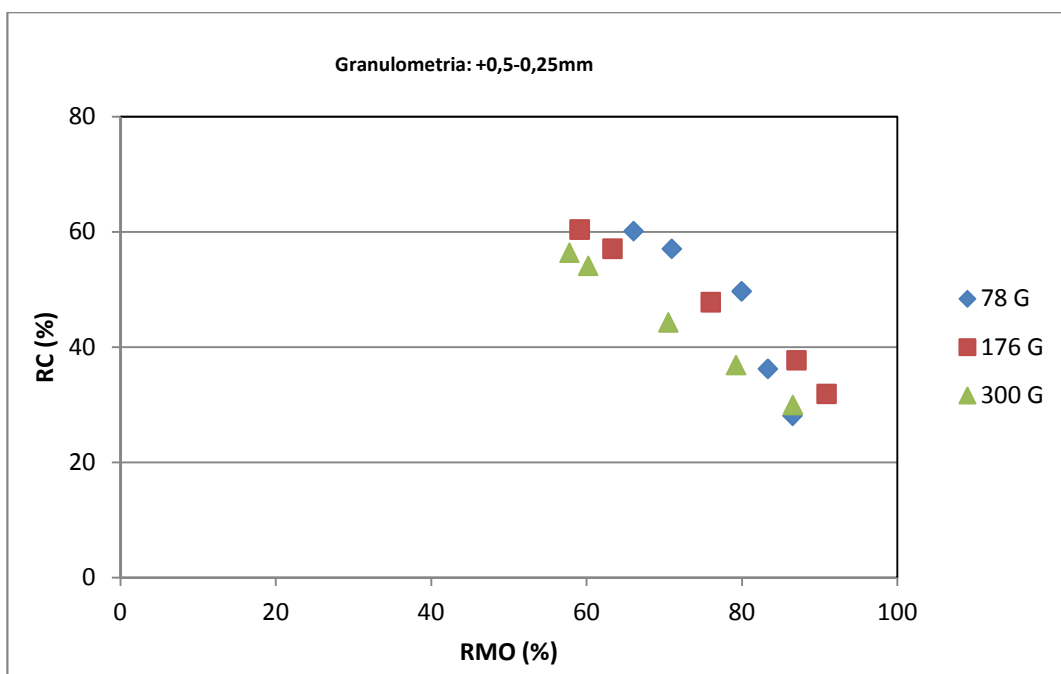


Figura 19: relação entre a recuperação de matéria orgânica (%RMO), taxas de rejeição de cinzas (%RC) para a fração granulométrica de -0,5+0,25mm, considerando três valores de aceleração 78G, 176G e 300G.

Em todos os casos um aumento na recuperação implica a diminuição das taxas de rejeição da cinza e enxofre total.

Para todas as figuras (16 a 19) consideraram-se os três valores de aceleração (78G, 176G, 300G).

Observa-se nestas figuras (16 a 19) que o aumento na recuperação da matéria orgânica implica a diminuição das taxas de rejeição de cinzas e de enxofre total.

Ainda nestas figuras (16 a 19) a relação entre as taxas de rejeição de cinzas e de enxofre total com a recuperação de matéria orgânica é nitidamente regular na faixa mais grosseira (-0,5+0,25mm). Ainda nas figuras 18 e 19 foram registrados os maiores valores de rejeição de enxofre e de cinzas (74,54 e 60,42), respetivamente.

As melhores combinações de parâmetros foram encontradas na Força de 78G diminuindo ligeiramente com o aumento da força G. Ainda numa análise dos gráficos das figuras 16, 17, 18 e 19, a relação entre as taxas de rejeição e a recuperação de matéria orgânica é nitidamente mais regular na fração mais grosseira (-0,5+0,25mm), onde foram igualmente registrados os maiores valores de rejeição 74,54% para enxofre e 60,42% para cinzas.

4.2. EFICIÊNCIA DO PROCESSO

Os cálculos de eficiência da remoção de enxofre e de cinzas mostram uma baixa eficiência para valores elevados de aceleração “G” aumentando para valores mais baixos de G.

Os resultados das tabelas 5 e 6 mostram que o processo é mais eficiente na remoção de enxofre (31,22% - 51,43%) do que para a remoção das cinzas (4,19% - 19,41%).

As figuras 20 a 23, permitem aferir que o aumento da pressão de água (a cima de 4Psi) tem um efeito negativo sobre a eficiência, porém apresenta uma ligeira melhora com um aumento da aceleração da centrífuga.

De acordo com a figura 18, a separação do enxofre é relativamente baixa para pressões muito baixas e aumenta com o aumento da pressão de água. Quando aplicada uma pressão de 4PSI combinada com uma aceleração de 78G, a eficiência encontra o seu ponto mais alto. Em contrapartida, considerando uma aceleração de 176G, o melhor desempenho é obtido quando se opera com uma pressão de 8PSI. Por outro lado, pode-se afirmar que para pressões de água acima de 8PSI o aumento da força G de 78G para 176G tem um efeito bastante similar na separação.

Em relação à separação de cinzas o comportamento é idêntico, porém com valores relativamente mais baixos (figura 19).

Ainda conforme as figuras 20 e 21 foi constatado que aplicando uma pressão de 15PSI, o valor da eficiência tende a ser similar para as três acelerações (78G, 176G e 300G).

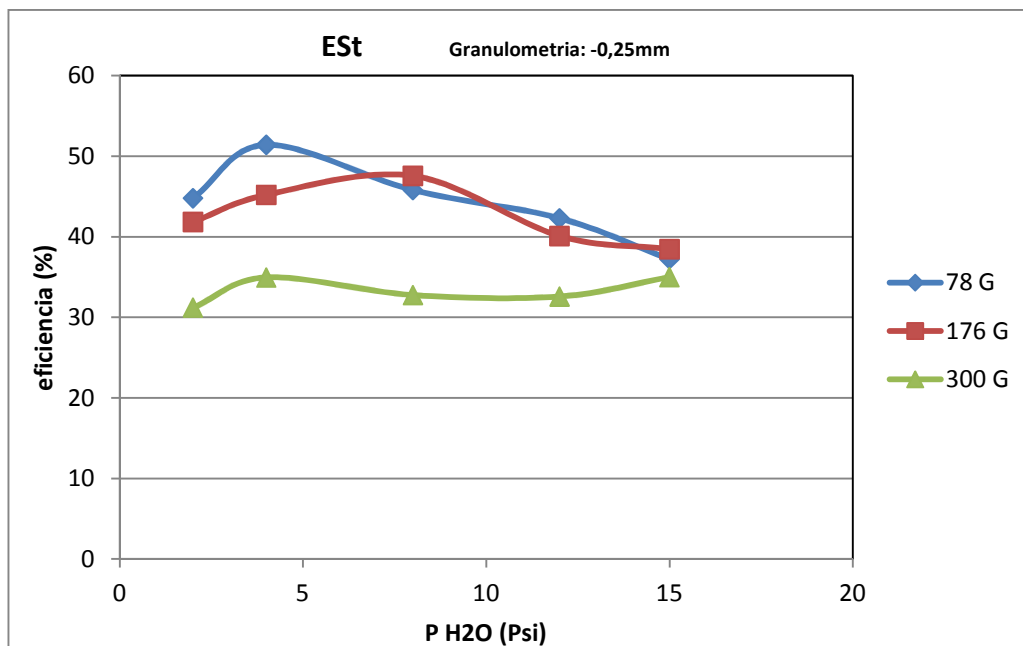


Figura 20. Relação entre a eficiência e a pressão da água, na separação do enxofre em diferentes valores de aceleração (78G, 176G e 300G) para a faixa granulométrica de - 0,25mm.

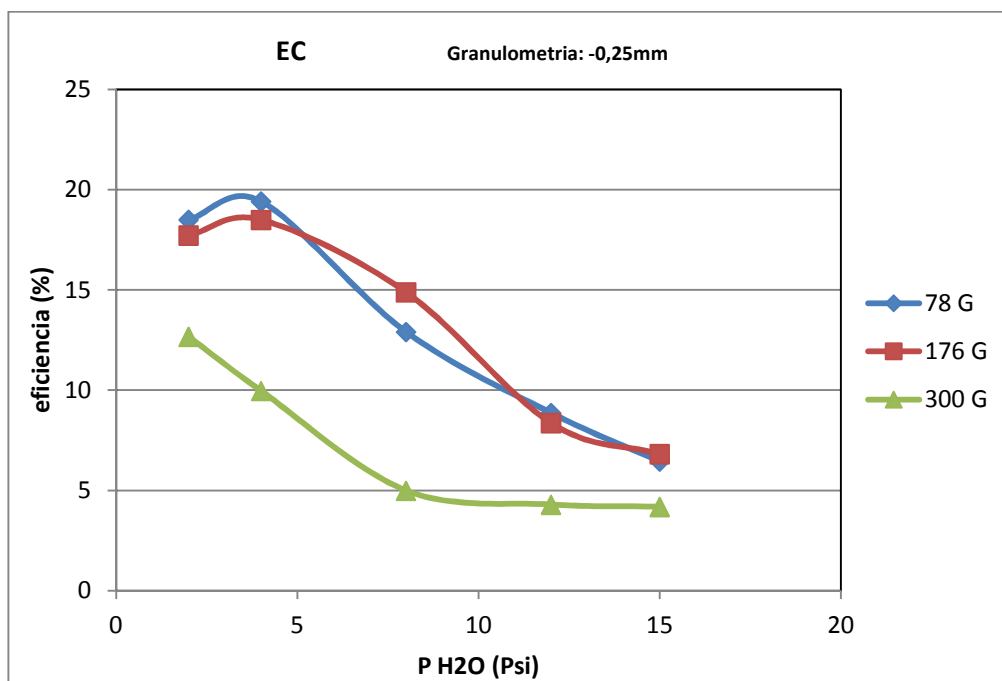


Figura 21. Relação entre a eficiência e a pressão da água, na separação de cinzas em diferentes valores de aceleração (78G, 176G e 300G) para a Faixa granulométrica de - 0,25mm.

Diferenças significativas no desempenho do equipamento foram verificadas com a variação da granulometria do material alimentado. Para a faixa granulométrica de $-0,5+0,25\text{mm}$, a melhor eficiência na remoção de enxofre foi obtida com a aplicação de uma pressão de água relativamente maior ($\text{PH}_2\text{O}=8\text{PSI}$) considerando uma aceleração de 78G (figura 22). Aumentando o valor da aceleração para 176G e 300G, a eficiência aumenta proporcionalmente com o aumento da pressão da água chegando a superar a eficiência obtida com a aceleração de 78G, quando a pressão aplicada é de 12 e 15PSI (figura 22).

Este comportamento é igualmente verificado ao avaliar a eficiência do Falcon® na redução do teor de cinzas conforme a figura 23.

Ainda numa análise das figuras 20 a 23, verifica-se que o aumento da aceleração tem em geral um efeito negativo sobre a eficiência em todos os ensaios.

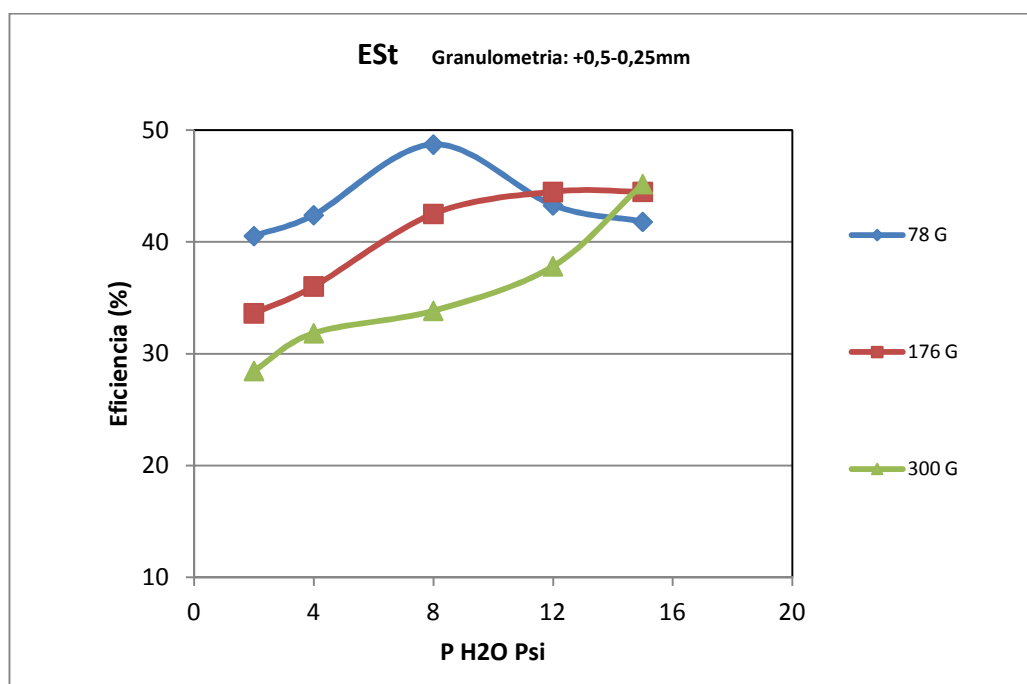


Figura 22. Relação entre a eficiência e a pressão da água, na separação de enxofre em diferentes valores de aceleração (78G, 176G e 300G) para a faixa granulométrica de $-0,5+0,25\text{mm}$.

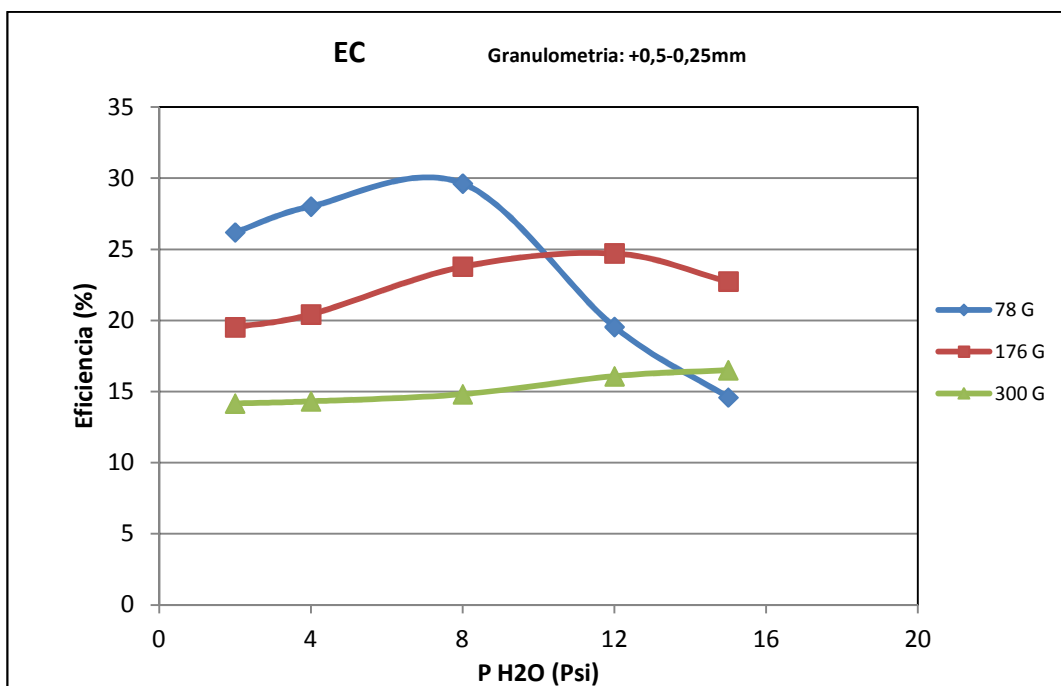


Figura 23. Relação entre a eficiência e a pressão da água, na separação de enxofre em diferentes valores de aceleração (78G, 176G e 300G) para a faixa granulométrica de -0,5+0,25mm.

A aceleração de 300G produz uma eficiência relativamente mais baixa em todos os ensaios, mesmo considerando todas as pressões de água usadas, sobretudo na remoção de cinzas.

Em geral, os valores da eficiência são mais elevados para a faixa granulométrica de -0,5+0,25mm (14,17% - 29,63% para cinza e 28,48% - 48,73% para enxofre total). Estes valores correspondem a pressões de água maiores contrariamente á faixa granulométrica mais fina (-0,25mm) que se apresenta mais eficiente em baixas pressões de água.

Para pressões de água superiores a 8PSI, a eficiência do processo pode ser melhorado, mediante o aumento da aceleração da centrífuga.

5. CONCLUSÕES

O carvão estudado é caracterizado por teores elevados de cinza e enxofre. A granulometria do material processado no concentrador Falcon® é fundamental no desempenho do equipamento.

Para os intervalos granulométricos usados neste estudo, os resultados de desempenho foram diferentes considerando os restantes parâmetros constantes.

Ambas as frações granulométricas podem ser beneficiados com reduções consideráveis de teores de enxofre e de cinza, porém outros parâmetros deverão ser considerados para obtenção de um rendimento ótimo (pressão da água de fluidização e rotação da centrífuga).

A pressão da água de fluidização foi a variável com um efeito mais visível na operação.

Pressão muito elevada ($P > 8\text{PSI}$) resultou num rejeito muito enriquecido em cinzas e enxofre e também em elevados valores de recuperação mássica do produto com teores de cinza e enxofre relativamente elevados. Isto sugere que grande parte de material (cinzas e enxofre) reportaram no produto devido á força da água de contrapressão.

Pressão de água muito baixa (2PSI) mostrou uma influencia negativa no processo, sobretudo na granulometria mais grosseira (-0,5+0,25mm), devido à ausência de uma fluidização suficiente do leito. Isto permitiria uma deposição mais seletiva de material no anel de retenção.

A variação da rotação da centrífuga teve melhores resultados nos valores mais baixos de G (78 G e 176G) para ambas granulometrias ensaiadas (-0,25mm e -0,5+0,25mm). Para os intervalos granulométricos usados a aceleração de 300G teve um efeito negativo sobre o desempenho do equipamento.

Alguns estudos consideram que uma força muito elevada deve ser aplicada para aumentar a eficiência do concentrador Falcon® no tratamento de granulometrias muito finas, mas isto não se verificou nos ensaios realizados. Isto

pode ser devido à definição dos intervalos granulométricos utilizados já que a fração mais fina usada neste estudo é relativamente extensa, levando à mistura de partículas finas e ultrafinas de carvão.

Todos os ensaios realizados mostraram uma nítida diferença nos teores de cinzas e enxofre da alimentação, do rejeito e do produto. O rejeito que apresentou maiores valores desses teores e o produto os menores. Isto mostra que para os intervalos considerados nos parâmetros utilizados houve uma certa redução dos teores de cinzas e de enxofre, porém a magnitude dos valores de eficiência deverá ser considerada.

Em geral, o processo mostrou-se mais eficiente quando operado com valores baixos de aceleração (78G), de pressão de água relativamente baixa (4PSI para a faixa granulométrica de $-0,25\text{mm}$ e 8Psi para a faixa granulométrica de $-0,5+0,25\text{mm}$).

6. BIBLIOGRAFIA

Abela, R.L. **Centrifugal Concentrators In Gold Recovery And Coal Processing**. Extraction Metallurgy Africa. (1997).

Barroso, R.C. **Redução do teor de cinzas dos finos de carvão vegetal por concentração gravítica a seco**. Dissertação de Mestrado. UFMG. Belo Horizonte, MG. 2007.

Biswal, A. **Effect of Key Variables on Coal Cleaning By Froth Flotation Technique**. B. Tech thesis. National Institute of Technology, Department of Chemical Engineering. Rourkela. (2012).

Borio, R.W., Levasseur, A.A. **Overview of Coal Ash Deposition in Boilers**. Proceedings of symposium on Mineral Matter and Ash in Coal, ACS Symposium Series 301. American Chemical Society. (1986).

Boylu, F., Sarioğlu.S., Kökkılıç, O., Yeşilyurt, Z. **Use of Falcon® Enhanced Gravity Separator for Effective Fine Coal Processing**. In Proc. XIII International Mineral Processing Symposium. Turkey. (2012).

Campos, A. R., Almeida, S. L. M. e Santos, A. T. **Estudo tecnológico dos carvões do Brasil**. Rio de Janeiro, CETEM/MME 124 p.(1977).

Campos, A. R.; Almeida, S. L. M. **Flotação de carvão de Santa Catarina em escala de bancada e piloto**. In VIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia, Porto Alegre, RS, p. 77 – 92 (1981).

Campos, A. R.; Chaves, A. P. **Dessulfuração de Finos de Carvão por Concentrador Centrífugo**. In 80 XIX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Recife, Pernambuco. (2002).

Cheriaf, M., Cavalcante, R.J., Pérao, J. **Pozzolanic properties of pulverized coal combustion bottom ash**. Cement and Concrete Research journal. 29(9):1387-91. 1999.

Dardenne, M.A., Schobbenhaus, C. **Metalogênese do Brasil**. Editora UNB, Brasília. (2001).

Demirbas, A. 2002. Demineralization and esulfurization of coals via column froth flotation and different methods. *Energy Conversion and Management* 43 (2002) 885–895. Elsevier Science Ltd. (2002).

Demirbas, A. 2002. **Demineralization and esulfurization of coals via column froth flotation and different methods.** *Energy Conversion and Management* 43 (2002) 885–895. Elsevier Science Ltd. 2002

DNPM. Departamento Nacional de Produção Mineral. CANO, T.M. **Sumário Mineral.** 2011. Disponível em:<
http://www.ibgm.com.br/admin/_upload/biblioteca/documento/477-DNPM-Estatisticasminerai2011.pdf > Acesso em: Dezembro. 2012.

DNPM. **Informativo anual da Indústria Carbonífera.** Ministério das Minas e Energia. Brasília. (1999).

Fonseca, A.G. **Challenges of coal preparation.** In: *Mining Engineering*, vol. 47, no 9, p. 828 - 834. (1995).

Gomes, A. J. P. Cruz, P. R. Borges, L. P. **Recursos Minerais Energéticos: Carvão e Urânio.** In: *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil* L. A. Bizzi, C. Schobbenhaus, R. M.; Vidotti e J. H. Gonçalves (eds.) CRM, Brasília, (2003).

Hangsubcharoen, M. A Study of Triboelectrification Mechanisms for Coal, Quartz and Pyrite. PHD Thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia. (1999).

Hangsubcharoen, M. **A Study of Triboelectrification Mechanisms for Coal, Quartz and Pyrite.** PHD Thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia. (1999).

Holz, M. **The Eo-Permian coal seams of the Paraná Basin in southernmost Brazil: an analysis of the depositional conditions using sequence stratigraphic concepts.** *International Journal of Coal Geology* 36, 141–163. (1998).

Holz, M., Vieira, P.E., Kalkreuth, W. **The Early Permian coal-bearing succession of the Paraná Basin in southernmost Brazil: depositional model and sequence stratigraphy.** Revista Brasileira de Geociências, 30 (3): 420-422. (2000).

Honaker RQ, Patil DP. **Parametric evaluation of a dense-medium process using an enhanced gravity separator.** Coal Pre; 22(1):1–17. (2002).

Honaker RQ, Wang D, Ho K. **Application of the Falcon® concentrator for fine coal cleaning.** Min Eng: 9(11):1143–56. (1996)

Honaker RQ. **Enhanced gravity separators: new alternatives for fine coal cleaning.** In: Pro 12th Int. coal pre con, Intertec. Inc., Lexington, Kentucky. (1995).

Honaker RQ. **High capacity fine coal cleaning using an enhanced gravity concentrator.** Min Eng;11(12):1191–9. (1998).

Honaker, R. Q., Wang, D. and Ho, K. **Application of the Falcon® Concentrator for fine coal cleaning.** Minerals Engineering, 9(11), 1143 - 1156. (1996).

Honaker, R.Q., Paul, B.C., Wang, D. and Huang, M., 1994. **The Application of Centrifugal Washing for Fine Coal Cleaning.** Preprint, SME Meeting. No. 94-259. Albuquerque, New Mexico.(1994).

Hutton, C. A., Gould, R.N., Allen, R.C. **Cleaning up coal: A study of coal cleaning and the use of cleaned coal.** Mass Ballinger Pub. Co. Cambridge. (1982)

Kalkreuth,W.; Holz,M.; Machado,G.; Mexias,A.; Silva,M.B.; Willett,J.; Finkelman,R.; Burger,H. **Petrology and chemistry of Permian coals from the Paraná Basin: 1. Santa Terezinha, Leão-Butiá and Candiota Coalfields, Rio Grande do Sul, Brazil.** International Journal of Coal Geology, 68: 79-116. 2006.

Khoury, D. L. **Coal Cleaning Technology.** N. D. C. Park Ridge, New Tessey. USA. Methods of Air Sampling and Analysis: 1977, (2rid Ed.) APHA. (1981).

Lima, R. M. F., Correia, J. C. G. e Campos, A. R. **Flotação em coluna de finos de carvão.** In : 3o Encontro do Hemisfério Sul sobre Tecnologia Mineral e 15º

Encontro Nacional de Tratamento de Minérios, São Lourenço - MG, p. 389 – 402. (1992).

Lockhart, N.C. **Dry beneficiation of coal**. Powder Technology, 40: 17-42. (1984).

Luttrell, G. H.; Honaker, R. Q.; and Philips, D. **Enhanced gravity separators: new alternatives for fine coal cleaning**. In Proc. 12th International Coal Preparation Conference, Lexington, Kentucky, pp. 282- 292. (1995).

Luz, A. B.; SAMPAIO, J.S.; Almeida, S.L.M. **Tratamento de Minérios**. 4ª Ed. CETEM. Brasil. (2004).

Marcello, R.R.; Galato, S.; Peterson, M., Riella, H.G.; Bernardin, A.M. **Inorganic Pigments Made from the Recycling of Coal Mine Drainage Treatment Sludge**. Journal of Environmental Management, v. 88, p.1280-1284. (2008).

Menezes, J. C. S. S.; Schneider, I. A. H. **Produção De um Coagulante a Base de Ferro (Fe₂(SO₄)₃) a Partir de Rejeito de Mineração de Carvão (pirita)**. Anais do XXII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, CD ROM, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil, (2007).

Milioli, V. A.; Bran Dalise, R. A. **Beneficiamento do carvão de Santa Catarina no Lavador de Capivari**. In: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios E Hidrometalurgia, Porto Alegre. (1981).

MME - Ministério de Minas e Energia. “Balanço Energético Nacional 2012 – Ano Base: 2011” Disponível em <https://ben.epe.gov.br/downloads/Resultados_Pre_BEN_2012.pdf> acesso em 27 de Novembro de 2012.

Mohanta, S.; Daram, A. B.; Chakraborty, S.; Meikap B. C. **Applicability of the air dense medium fluidized bed separator for cleaning of high-ash Indian thermal coals: An experimental study**. South African Journal of Chemical Engineering, 16, 50 – 62. (2011).

Oruç, F.; Ozgen, S.; Sabah, E. **An enhanced-gravity method to recover ultra-fine coal from tailings: Falcon® concentrator**, Fuel, 89, pp.2433-2437. 2010.

REDIVO, R.V. **Caracterização Tecnológica Do Carvão Das Camadas Barro Branco E Bonito Para Fins Energéticos Na Região De Criciúma – Sc.** Dissertação de Mestrado em Engenharia. Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. (2002).

Rubiera, F., S. T. Hall, and C. L. Shah. **Sulfur Removal by Fine Coal Cleaning Processes**. Fuel, 76(13), 1187–1194. (1997).

Sampaio, C. H. e Tavares, L. M. M. **Beneficiamento Gravimétrico: uma introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade**. UFRGS Editora, Porto Alegre. (2005).

Schneider, C.L. **Caracterização do Beneficiamento de Carvão por Jigagem no Brasil**. Dissertação de mestrado. UFRGS editora. Porto Alegre, RS. (1987)

Silva, J.L.B. **Geoprocessamento Aplicado À Identificação de Áreas para Rejeitos e Estimativa de Recursos de Carvão na Região da Mina Leão II**. Dissertação de mestrado. UFRGS editora. Porto Alegre, RS. 2000.

Silva, M. B. **Classificação Internacional do carvão (CEE-NU) da Camada Inferior, Mina do Leão, RS, Brasil**. REM. Revista Escola de Minas (Impresso), v. 65, p. 29-33, (2012).

VALADÃO, G. E. S.; ARAÚJO, A. C. **Introdução ao Tratamento de Minérios**. Escola de Engenharia da UFMG. Brasil. (2007).

Venkatraman, P.; Luttrell, G.H.; Yoon, R.-H.; Knoll, F.S.; Kow, W.S. and Mankosa, M.J. **Fine Coal Cleaning Using the Multi-Gravity Separator,” Proceedings, High Efficiency Coal Preparation: An International Symposium, SME, Littleton, Colorado, pp. 109-117. (1995).**

Venkatraman, P.; Luttrell, G.H.; Yoon, R.-H.; Knoll, F.S.; Kow, W.S. and Mankosa, M.J. **Fine Coal Cleaning Using the Multi-Gravity Separator,” Proceedings,**

High Efficiency Coal Preparation: An International Symposium, SME, Littleton, Colorado, pp. 109-117. 1995.

Vigânico, E. M. **Produção de sulfato ferroso a partir de rejeitos de carvão**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, (2008).

Yoon, R. -H., Luttrell, G. H. and Mankosa, M. J. **A method of improving sulfur rejection by combining flotation and fine gravity separation**. Proceedings of the 5th International Energy Conference, Seul, Korea, p. 1 - 9 (1993c).

Yuan, H., Liang, Q.,Gong, X. **Crystallization of Coal Ash Slags at High Temperatures and Effects on the Viscosity**. International Symposium on Coal Combustion No12, vol. 26. (22 ref.). American Chemical Society. Washington. (2012).