

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MINERAL

LEANDRO DE ARAUJO FREIRE

BENEFICIAMENTO DE UM REJEITO DE CROMITA EMPREGANDO-SE UM
CONCENTRADOR CENTRÍFUGO FALCON SB-40

RECIFE

2018

LEANDRO DE ARAUJO FREIRE

BENEFICIAMENTO DE UM REJEITO DE CROMITA EMPREGANDO-SE UM
CONCENTRADOR CENTRÍFUGO FALCON SB-40

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Pernambuco para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mineral.

Área de concentração: Minerais Industriais.
Linha de pesquisa: Tecnologia de Minerais Industriais (Concentração Centrífuga).

Orientador: Prof. Dr. José Carlos da Silva Oliveira.

Coorientador: Prof. Msc. José Yvan Pereira Leite

RECIFE

2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

F866b Freire, Leandro de Araujo.
Beneficiamento de um rejeito de cromita empregando-se um concentrador centrífugo falcon SB-40 / Leandro de Araujo Freire. – 2018.
69 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos da Silva Oliveira.
Coorientador: Prof. Msc. José Yvan Pereira Leite.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, 2018.
Inclui Referências.

1. Engenharia de Mineral. 2. Concentração centrífuga. 3. Concentrador centrífugo falcon. 4. Rejeito de cromita. I. Oliveira, José Carlos da Silva. (Orientador). II. Leite, José Yvan Pereira. (Coorientador). III. Título.

UFPE

622.35 CDD (22. ed.)

BCTG/2018-128



UFPE

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MINERAL
PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA

**BENEFICIAMENTO DE UM REJEITO DE CROMITA EMPREGANDO-SE UM
CONCENTRADOR CENTRÍFUGO FALCON SB-40**

Área de Concentração: Minerais Industriais

A comissão examinadora composta pelos professores abaixo, sob a presidência do **Prof. Dr. José Carlos da Silva Oliveira** considera o aluno Leandro de Araujo Freire, aprovado.

Recife, 30 de janeiro de 2018

Prof. Dr. José Carlos da Silva Oliveira
- Orientador – (UFPE)

Prof. Dr. Dwight Rodrigues Soares
- Examinador externo – (IFPB)

Prof. Dr. Belarmino Barbosa Freire
- Examinador interno – (UFPB)

Á minha família, por sempre me apoiarem na pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, por estarem sempre ao meu lado, apoiando o meu sonho em trilhar os caminhos da pesquisa científica.

A minha esposa Deborah Ellen, companheira para todas as horas. Obrigado por toda a paciência nestes anos em que vivíamos separados por conta do mestrado.

Ao meu coorientador Prof. Msc. José Yvan Pereira Leite, pela orientação nos ensaios de caracterização e concentração centrífuga no Laboratório de Tecnologia Mineral do IFRN.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Carlos da Silva Oliveira, por ter me aceito como orientando.

Aos professores da UFPE, pelos ensinamentos.

Ao professor Dr. Belarmino Barbosa Freire por ter aceito o convite para a apreciação deste trabalho.

Aos técnicos de mineração, Daniel Nunnes e Bruno Gonçalves, pela amizade, boas conversas, brincadeiras e apoio nos ensaios.

Aos amigos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral na UFPE, em especial os colegas Matheus, Itaquê, Elyda e Viviane.

RESUMO

A separação densitária de minerais, usando a força da gravidade, é viável para os tamanhos até 200 malhas (74 μm). Ela estende-se para uma faixa granulométrica mais ampla, 10 mm a 1 μm , quando se emprega a força centrífuga. O Brasil, em 2014, detinha 0,13 % das reservas mundiais de cromita e ofertava 2,47 % da sua produção. O incremento da produção brasileira dependerá então da descoberta de novas reservas de cromita e/ou o aproveitamento mais racional das jazidas existentes. Em um município do Estado da Bahia vem sendo produzido rejeitos a um longo tempo. Por isso, o tratamento do rejeito de cromita foi avaliado por meio de um concentrador centrífugo do tipo Falcon SB-40. Uma amostra de 150 kg foi coletada no underflow de um hidrociclone, por onde foi descartado um dos rejeitos de cromita de uma planta industrial da referida localidade. O material colhido foi seco ao ar livre, depois foi homogeneizado e quarteado para a retirada de alíquotas destinadas a caracterização tecnológica e aos ensaios de concentração centrífuga. A caracterização foi por difração de raio X, microscopia óptica, distribuição de tamanhos e fluorescência de raios X. A caracterização mostrou que: o rejeito tem teor médio de 8,41 % Cr_2O_3 ; é formado, majoritariamente, pelos minerais cromita, lizardita, talco e clinocloro; a cromita está 63,19 % liberada acima de 60 malhas (250 μm); mais que 78,41 % está liberada abaixo 60 malhas; 37,34 % da massa está acima de 60 malhas, com 56,15 % do Cr_2O_3 e; 62,66 % da massa está abaixo de 60 malhas, com 43,85 % do Cr_2O_3 . A concentração centrífuga da cromita para as faixas granulométricas amplas foi insatisfatória, todavia, ela foi significativa para os tamanhos menores que 60 malhas, tendo em vista a obtenção de um concentrado, com recuperação metalúrgica de até 72 % de cromita e teor de 28 % Cr_2O_3 , para uma única etapa de tratamento.

Palavras-chave: Concentração centrífuga. Concentrador centrífugo falcon. Rejeito de cromita.

ABSTRACT

The density separation of minerals, using the gravity force, is viable for sizes up to 200 meshes (74 μm). It extends to a wider particle size range, 10 mm to 1 μm , when centrifugal force is used. Brazil, in 2014, held 0.13% of the world's reserves of chromite and supplied 2.47% of its production. The increment in Brazilian production will then depend on the discovery of new chromite reserves and / or the more rational utilization of the existing deposits. In a municipality of the state of Bahia it has been producing tailings for a long time. Therefore, the treatment of the chromite tail was evaluated by means of a centrifugal concentrator of the type Falcon SB-40. A sample of 150 kg was collected under the underflow of a cyclone, where one of the chromite tailings of an industrial plant of that locality was discarded. The harvested material was dried in the open air, then homogenized and quarter for the removal of aliquots for technological characterization and centrifugal concentration tests. The characterization was by x-ray diffraction, optical microscopy, size distribution and x-ray fluorescence. The characterization showed that: the reject has an average content of 8.41% Cr_2O_3 ; it is formed, mainly, by the minerals chromite, lizardite, talc and clinoclino; the chromite is 63.19% released above 60 meshes (250 μm); more than 78.41% is released below 60 meshes; 37.34% of the mass is above 60 meshes, with 56.15% of Cr_2O_3 and; 62.66% of the mass is below 60 meshes, with 43.85% of Cr_2O_3 . The centrifugal concentration of the chromite for the large particle size ranges was unsatisfactory, however, it was significant for the sizes of less than 60 meshes, in order to obtain a concentrate with metallurgical recovery of up to 72% chromite and 28% Cr_2O_3 content, for a single treatment step.

Keywords: Centrifugal concentration. Centrifugal concentrator Falcon. Chromite tailings.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Oferta mundial de cromita.	16
Figura 2: Concentrador centrífugo Falcon SB em escala industrial.	18
Figura 3: Fluxograma simplificado da planta.	24
Figura 4: Comparação entre os Concentradores Centrífugos Falcon e Knelson.	25
Figura 5: Faixa de tamanhos das partículas para cada um métodos densitários.	26
Figura 6: Separação das partículas num concentrador centrífugo Falcon.	28
Figura 7: Funcionamento de um Concentrador Centrífugo Falcon SB.	28
Figura 8: Comportamento em que fica submetida uma partícula com o equipamento em operação.	29
Figura 9: Desenho esquemático mostrando a zona de segregação e separação (retenção).	30
Figura 10: Comportamento das taxas de rejeição de cinzas (RC), do enxofre total (RST) e da recuperação da matéria orgânica (RMO), com a variação da pressão de água de fluidização, (aceleração centrífuga de 78 G e faixa granulométrica de -0,5 + 0,25 mm).	31
Figura 11: Recuperação metalúrgica em função da variação da intensidade do campo centrífugo (Nº G).	33
Figura 12: Recuperação metalúrgica em função da variação da pressão de fluidização do sistema.	33
Figura 13: Recuperação metalúrgica em função da pressão.	34
Figura 14: Pilha prismática.	35
Figura 15: Quarteador Jones.	36
Figura 16: Difratorômetro Shimadzu XRD-6000.	37
Figura 17: Microscópio óptico utilizado.	38
Figura 18: Concentrador Centrífugo SB-40.	39

Figura 19: Vista por cima do Falcon mostrando por onde o material passa.	40
Figura 20: Vista lateral da cesta cilíndrico cônica mostrando os orifícios por onde entra a água de fluidização.	40
Figura 21: Minerais pesados retidos nos anéis.	41
Figura 22: Interior do equipamento.	41
Figura 23: Interior do equipamento.	42
Figura 24: Inversor de frequência CFW-08.	42
Figura 25: Metodologia do trabalho.	43
Figura 26: Grau de liberação em função das aberturas das peneiras.	46
Figura 27: Análise microscópica na fração entre 18 malhas (1.000 μm) e 20 malhas (830 μm).	47
Figura 28: Variação do teor da óxido de cromo no rejeito com a abertura da peneira (μm). .	50
Figura 29: Teores de Cr_2O_3 nos concentrados de cromita em função da pressão de água de fluidização, para os níveis de aceleração centrífuga 25, 50 e 100 G.	51
Figura 30: Recuperação metalúrgica em função da pressão de água de fluidização, para os níveis de aceleração centrífuga em 25, 50 e 100 G.	52
Figura 31: Teores de Cr_2O_3 nos concentrados de cromita em função da pressão de água de fluidização, para os níveis de aceleração centrífuga 150 e 200 G.	53
Figura 32: Recuperação metalúrgica em função da pressão de água de fluidização, para os níveis de aceleração centrífuga em 150 e 200 G.	54
Figura 33: Teores de Cr_2O_3 dos concentrados de cromita em função da pressão de água de fluidização para os níveis de aceleração centrífuga em 250 e 300 G.	54
Figura 34: Recuperação metalúrgica de Cr_2O_3 no rejeito de cromita em função da pressão de água de fluidização, para os níveis de aceleração centrífuga em 150 e 200 G.	55

Figura 35: Teor de Cr_2O_3 nos concentrados de cromita em função da massa de alimentação, das pressões 60, 70 e 80 kPa e acelerações de 50, 75 e 100 G.....	56
Figura 36: Recuperação metalúrgica de Cr_2O_3 em função da alimentação, das pressões 60, 70 e 80 kPa e acelerações de 50, 75 e 100 G.....	57
Figura 37: Teores de Cr_2O_3 nos concentrados de cromita em função massa da alimentação nos tamanhos menores que 60 malhas, nas pressões 60, 70 e 80 kPa e acelerações de 50, 75 e 100 G.	58
Figura 38: Teores de Cr_2O_3 nos concentrados de cromita em função massa da alimentação nos tamanhos menores que 60 malhas, nas pressões 60, 70 e 80 kPa e acelerações de 50, 75 e 100 G.	60
Figura 39: Teores de Cr_2O_3 dos concentrados obtidos em função da pressão de água de fluidização e aceleração centrífuga para o rejeito com tamanhos menores que 60 malhas (250 μm).	61
Figura 40: Recuperação metalúrgica com a pressão de água de fluidização para alimentação de 250 g na fração menor que 60 malhas (250 μm).	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Difração de raios X do rejeito de cromita.	44
Tabela 2: Grau de liberação da cromita por fração e faixa granulométrica.	45
Tabela 3: Análise granulométrica, teor e distribuição do Cr ₂ O ₃ , SiO ₂ e P do rejeito de cromita.	48
Tabela 4: Distribuições da massa de rejeito, do Cr ₂ O ₃ , SiO ₂ e P nas frações acima e abaixo de 60 malhas.	49
Tabela 5: Distribuições da massa de rejeito, do Cr ₂ O ₃ , SiO ₂ e P nas frações acima e abaixo de 200 malhas.	49
Tabela 6: Redução de massa do rejeito de cromita.	59
Tabela 7: Redução de massa do concentrado para tamanhos menores que 60 malhas.	62

LISTA DE SÍMBOLOS

W: velocidade angular

Ac: aceleração centrífuga

R: raio do motor

N: velocidade rotacional

m: massa da partícula

Número de G: quantidade de vezes em que a aceleração empregada é maior do que a da gravidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	USOS E FUNÇÕES DA CROMITA	20
2.2	BENEFICIAMENTO DA CROMITA.....	21
2.3	CONCENTRAÇÃO CENTRÍFUGA	25
2.4	CONCENTRADOR FALCON	26
3	METODOLOGIA	35
3.1	COLETA DO MATERIAL	35
3.2	HOMOGENIZAÇÃO E QUARTEAMENTO.....	35
3.3	DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA	36
3.4	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	36
3.5	ANÁLISE MINERALÓGICA	37
3.6	GRAU DE LIBERAÇÃO.....	37
3.7	CONCENTRAÇÃO CENTRÍFUGA	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1	COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA	44
4.2	GRAU DE LIBERAÇÃO.....	44
4.3	DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO E COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	47
4.4	CONCENTRAÇÃO CENTRÍFUGA	50
4.4.1	Concentração centrífuga em ampla faixa de tamanho.....	51

4.4.2	Concentração centrífuga em ampla faixa variando a massa de alimentação	56
4.4.3	Concentração centrífuga na fração granulométrica menor que 60 malhas.....	58
5	CONCLUSÃO	63
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	65
	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

O cromo é encontrado em vários minerais formando óxidos e silicatos. A cromita é o único mineral portador de cromo que é economicamente viável. A cromita tem a seguinte fórmula química teórica: FeCr_2O_4 , sendo 68 % de Cr_2O_3 e 32 % de FeO .

Em geral, esses valores nunca são alcançados, uma vez que o magnésio e alumínio aparecem na estrutura da cromita substituindo uma parte do ferro no seu processo de formação. Identicamente, os óxidos de titânio, zinco, manganês, vanádio, cobalto e níquel também substituem uma parte dos óxidos de ferro na estrutura da cromita, porém em menores proporções (SAMPAIO, J. A; ANDRADE, M. C; PAIVA, P. R. P., 2008).

A cromita é utilizada principalmente nas indústrias metalúrgicas (maior consumo), de refratários, químicas e de fundições. O primeiro emprego da cromita foi como pigmento, no final do século XVIII. No entanto, no início do século XIX, descobriu-se que a cromita proporcionava propriedades inoxidáveis às ligas de aço (SAMPAIO, J. A; ANDRADE, M.C; PAIVA, P. R. P., 2008).

Em 2014, as maiores reservas de cromita encontravam-se no Cazaquistão (230 milhões t), África do Sul (200 milhões t) e Índia (54 milhões t). O Brasil participava com somente 0,13 % das reservas mundiais da cromita (BRASIL, 2015).

Nessa mesma época, a África do Sul teve a maior participação na produção mundial de concentrados de cromita com 51,72 %, seguidos pelo Cazaquistão (13,79 %), Índia (10,34 %) e a Turquia (8,28 %). O Brasil participou com 2,47 % da produção, sendo, praticamente, o único produtor de óxido de cromo do continente americano. A Figura 1 mostra o perfil da produção de cromita no contexto mundial (BRASIL, 2015).

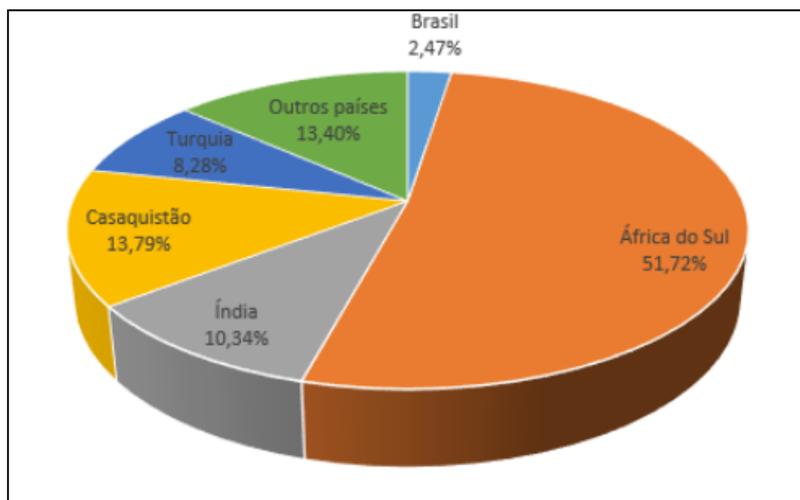


Figura 1: Oferta mundial de cromita.

Fonte: Brasil (2015).

No ano de 2014, a produção brasileira de cromita beneficiada foi de 716.674 t, equivalente a 285.340 t de ligas de ferro cromo. O Estado da Bahia produziu 507.423,7 t de cromita, com teor de 39 % de Cr_2O_3 , participando com 70,80 % da produção nacional. O Estado do Amapá produziu 209.251 t, com teor de 22,33 % de Cr_2O_3 , participando com 29,20 % da nossa produção. A capacidade nominal instalada para a produção de concentrados de cromo em Cr_2O_3 foi da ordem de 767 mil t/ano, distribuída entre os Estados da Bahia (69%) e o Amapá (31%) (BRASIL, 2015).

No Brasil, a cromita vem sendo lavrada e beneficiada pelas seguintes empresas:

- a) A Ferbasa, fundada em 1961, configura-se, atualmente, entre as 500 maiores empresas do País, estando entre as 10 maiores do Estado da Bahia, com um faturamento anual superior a US\$ 500 milhões. É líder na produção de ferroligas e a única produtora integrada de ferroligas das Américas (FERBASA, 2016);
- b) A Magnesita que atua na exploração de minerais industriais, tanto para produção de refratários como de outros segmentos. A extração de cromita localiza-se no Município de Santa Luz, no Estado da Bahia (MAGNESITA, 2017);

c) A Vila Nova Mineração que possui minas de cromita no Estado do Amapá. As suas atividades iniciaram-se em 1972. A extração de cromita localiza-se no Município de Mazagão-AP (MINERAÇÃO VILA NOVA, 2017).

A cromita brasileira vem sendo concentrada pelos métodos densitários com o emprego das forças gravitacionais, sendo bastante utilizados os concentradores espirais e as mesas oscilatórias, que são equipamentos de pequenas capacidades. A separação magnética é responsável pela retirada dos minerais magnéticos. Os hidrociclones e as peneiras respondem pela separação das partículas em função dos tamanhos. Enfim, os processos densitários com as forças gravitacionais mostram-se bastante eficientes para a concentração de partículas até 200 malhas (74 μm).

A concentração densitária empregando-se as forças centrífugas intensificam as diferenças de movimentos entre as partículas leves e pesadas num mesmo fluido, possibilitando a separação destes minerais numa larga faixa granulométrica.

Os primeiros separadores utilizando as forças centrífugas surgiram na década de 1980, que indistintamente foram chamados de concentradores centrífugos, os quais vem mostrando-se adequados para o tratamento de partículas minerais com diferenças de densidades para os tamanhos entre 10 mm e 1 μm (CARISSO e CHAVES, 2002).

Os principais equipamentos para a separação densitária com o emprego das forças centrífugas são os concentradores Knelson, Falcon, Multi-Gravity Separator (MGS) e os Jigues Centrífugos. Estes equipamentos distinguem-se pelas grandes capacidades de processamentos de minérios, representam reduzidos custos operacionais e, além disto, necessitam de um capital relativamente pequeno para a aquisição de cada um deles, conforme mostraram Sampaio e Tavares (2005). A Figura 2 ilustra um concentrador centrífugo do tipo Falcon SB em escala industrial.



Figura 2: Concentrador centrífugo Falcon SB em escala industrial.

Fonte: www.concentrators.com (2017).

A liberação satisfatória do mineral de interesse econômico é determinante para a obtenção de um produto concentrado para comercialização. Uma menor liberação favorece uma maior recuperação e a obtenção de um produto pré-concentrado, devido à forte presença de partículas mistas.

Inversamente, uma maior liberação propicia uma menor recuperação, mas em compensação a obtenção de um produto concentrado com alto teor. Esta última alternativa implica em substanciais aumentos de finos e maiores custos de produção.

A fragmentação de um minério, concomitantemente, com as operações de classificação e/ou peneiramento são decisivos para o sucesso da performance de um processo mineral. Enfim, enfatiza-se que a obtenção de uma alta recuperação com um alto teor de um dado mineral somente é possível com duas ou mais etapas de tratamento.

Os rejeitos das plantas industriais de tratamento de minérios vêm sendo estudado por muitos pesquisadores, porque eles podem proporcionar incremento de produção e redução

nos impactos ambientais. Os minerais de interesse econômico nos rejeitos, resultantes dos processos densitários com forças gravitacionais, geralmente, estão em pequenos tamanhos ou na forma de partículas mistas. Uma linha de pesquisa que é ainda pouco explorada na indústria mineral é a investigação dos rejeitos por processos centrífugos, com a vantagem de poderem ser aplicados para extensa faixa de tamanhos.

Este trabalho buscou uma solução tecnológica para a recuperação do óxido de cromo de um rejeito proveniente de uma planta industrial no Estado da Bahia.

O presente estudo teve as seguintes motivações: a) existência de uma grande reserva de rejeito, que vem sendo acumulada há vários anos, em decorrência da exploração das jazidas ali existentes; b) a modesta produção brasileira de óxido de cromo; c) a pequena participação brasileira no mercado de óxido de cromo e; d) a redução dos impactos ambientais que poderiam ser proporcionados para essa região.

Desse modo, os principais objetivos desta investigação foram os seguintes:

- i) A caracterização tecnológica do rejeito de cromita proveniente do underflow de um hidrociclone de uma planta industrial e;
- ii) A realização de ensaios de concentração por meio de um concentrador centrífugo do tipo Falcon SB-40, modelo de laboratório.

Nos ensaios de concentração centrífuga, foram avaliados os seguintes parâmetros: aceleração centrífuga (número de G), pressão de fluidização, massa da alimentação e o tratamento para duas faixas granulométricas, sendo uma para ampla faixa de tamanhos (menores que 1,65 mm), e uma outra para faixa de tamanhos pequenos, no caso inferiores a 60 malhas (250 μm).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 USOS E FUNÇÕES DA CROMITA

Segundo Sampaio, Andrade e Paiva (2008), os concentrados de cromita podem ser utilizados de formas distintas, nas seguintes indústrias:

- a) Química (8% da produção mundial de cromita). Na fabricação de catalisadores, como pigmentos, produtos para conservação da madeira (proteção contra insetos e intemperismo), inibidores de corrosão, dicromato de sódio, entre outros. O dicromato de sódio é responsável pela manufatura de muitos produtos químicos;
- b) Metalúrgica (80% do consumo mundial de cromita). Este é o uso mais nobre da cromita, sendo utilizada para obtenção de ligas ferro-cromo, a qual é uma fonte básica para a fabricação de aços inoxidáveis e ligas especiais. Os aços inoxidáveis correspondem a ligas à base de ferro, onde o cromo aparece como principal elemento, com pelo menos 10,5 % em peso. O cromo tem como finalidade proporcionar à liga uma alta resistência à oxidação e também aos ataques químicos;
- c) Fundição. A areia de cromita é utilizada para moldar o metal fundido até que ocorra a fundição do mesmo. Esta aplicação é menos abundante e de custo mais alto em comparação com a areia de quartzo. Entretanto, apresenta propriedades físicas e químicas especiais, tais como: ponto de fusão mais alto que o do quartzo, funde metais refratários, é quimicamente não reativo, tem estabilidade térmica (reduz as variações dimensionais do molde), entre outros.

2.2 BENEFICIAMENTO DA CROMITA

Para que se atinjam os níveis exigidos pelo mercado consumidor, são necessárias etapas de processamento mineral. Devido a cromita possuir densidade superior aos minerais de ganga, a maior parte das empresas que extraem esse mineral tende a utilizar os métodos gravimétricos. Além disso, são exigidas especificações químicas em relação ao teor de Cr_2O_3 , conforme o uso final do produto. Segundo Sampaio, Andrade e Paiva (2008), a utilização de técnicas e/ou métodos de tratamento de minérios dependem da dimensão do empreendimento mineiro, qualidade do produto final, natureza do minério, composição mineralógica, entre outros. De uma forma geral, pode-se dizer que o minério pode passar por catação manual, separações por meio denso, gravítica, magnética e, raramente, flotação.

A flotação é empregada para o material com granulometria fina que não pode ser recuperado por processos gravíticos. Entretanto, poucos casos são registrados no mundo de emprego da flotação para recuperação de cromita a nível industrial. Magalhães Filho (2013) realizou estudos verificando a possibilidade de utilizar o processo para aumentar o teor, alcançando resultados na faixa de 25 % Cr_2O_3 .

A separação magnética geralmente é utilizada como um processo adicional de concentração. A cromita apresenta uma susceptibilidade magnética superior aos dos seus minerais de ganga, devido ao maior teor de ferro na sua composição química. Sampaio, Andrade e Sobrinho (2004) realizaram um trabalho visando reaproveitar o rejeito de cromita. Eles verificaram que, após passar por processos gravimétricos (mesas e espirais), o concentrado tinha um teor indesejado de fósforo (0,027%), acima do limite de mercado (0,006 %). Como a cromita é um mineral paramagnético, utilizou-se a separação magnética com um campo de 1,8 Teslas, obtendo-se uma diminuição para 0,004 % de fósforo.

Segundo Sampaio, Andrade e Paiva (2008), no processamento mineral é comum o nível de desafio aumentar com a diminuição da granulometria do material. As frações finas,

abaixo de 100 μm , não respondem bem aos métodos gravíticos, devido à força associada a água se sobressair em relação à força gravitacional. Nas últimas décadas, alguns equipamentos foram desenvolvidos para superar esta dificuldade, como por exemplo, os concentradores centrífugos (Knelson e Falcon). Os concentradores centrífugos garantem uma boa eficiência mesmo para os tamanhos inferiores a 20 μm .

Na planta industrial do presente estudo, não se emprega a separação em meio denso, flotação e a concentração centrífuga. O minério chega a planta de concentração com o tamanho abaixo de 2 polegadas, sendo submetidos a etapas de cominuição, peneiramento e hidrociclonação. A planta opera com britadores de mandíbula e cônico. Na moagem primária e secundária são utilizados os moinhos de barras. Na sequência, o material fica abaixo de 18 malhas (-1 mm) e vai para a concentração por espirais com um teor em torno de 15 % Cr_2O_3 , passando por hidrociclones, separadores magnéticos de rolos e Jones (carrossel). A fragmentação fina é feita num moinho de bolas. O espessador tem a função de recuperar a água do processo junto a fração mais fina, sendo que o underflow é o rejeito de maior tamanho. O desaguador helicoidal tem a função de recuperar a água presente no concentrado de cromita. O separador magnético é utilizado em três etapas do processo: a primeira em baixa intensidade, logo após o minério entrar na torre de concentração; a segunda devido às contaminações no moinho de bolas, sendo usando também o mesmo tipo de separador de baixa intensidade e; a terceira em alta intensidade, com campo magnético da ordem de 0,8 Teslas, com o uso de um separador magnético de carrossel, cujo produto é um concentrado.

Como resultado final, têm-se três produtos: areia de cromita úmida (44 % Cr_2O_3 , 3,0 % SiO_2 e 0,006 % P), refino úmido (43 % Cr_2O_3 , 4 % SiO_2 e 0,006 % P) e concentrado (39 % Cr_2O_3 , 10 % SiO_2 e 0,008 % P). O destino final dos produtos refino e concentrado são para a metalurgia. A areia de cromita úmida passa por um processo de secagem, peneiramento e

embalagem em big bags para clientes externos. No passado, a empresa utilizava mesas oscilatórias, porém, após os ensaios, verificaram um melhor resultado do concentrado com espirais. A Figura 3 apresenta um fluxograma simplificado da planta industrial da empresa localizada na Bahia.

2.3 CONCENTRAÇÃO CENTRÍFUGA

Os concentradores Knelson e o Falcon, ambos desenvolvidos no Canadá, são os principais equipamentos de concentração centrífuga que utilizam a força centrífuga para concentração dos minerais pesados.

De uma forma geral, são equipamentos que permitem trabalhar numa faixa granulométrica mais fina e são, provavelmente, os que mais se aproximam da flotação em termos de granulometria. As principais vantagens dos concentradores centrífugos são: baixos custos operacionais, reduzida manutenção e uma alta capacidade unitária de processamento quando comparada com muitos outros equipamentos.

Ancia, Frenay e Dandois (1998) compararam o Knelson ao Falcon utilizando misturas artificiais contendo minerais pesados. Os resultados em uma separação quartzo/tungstênio (Figura 4), mostraram que o Falcon atingiu recuperações mais significativas que o Knelson, o que pode ser justificado por uma maior intensidade do número de G, que é 5 vezes maior.

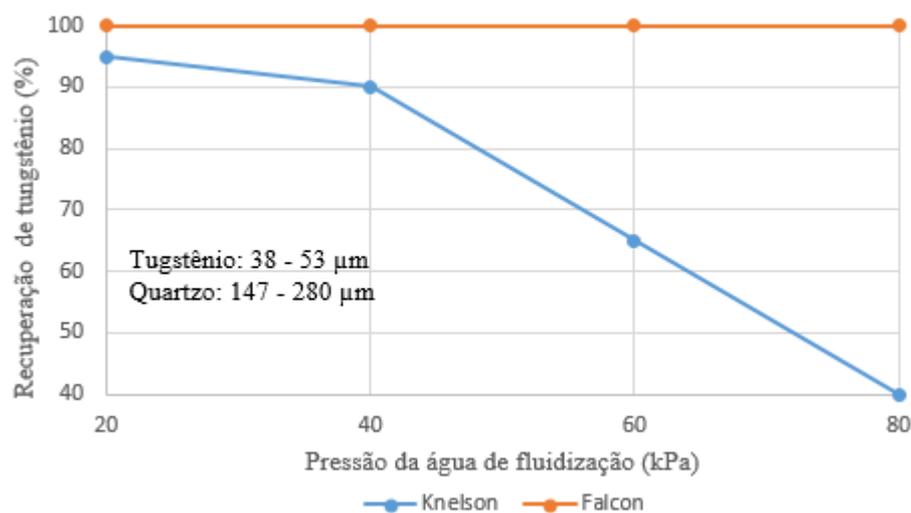


Figura 4: Comparação entre os Concentradores Centrífugos Falcon e Knelson.

Fonte: Adaptado de Ancia, Frenay e Dandois (1998).

Existem equipamentos que utilizam a força centrífuga combinada com outras forças geradoras de movimento, como o Jigue Kelsey (força centrífuga combinada com movimento de pulsação dos jigues) e o multi-gravity separator, comumente chamado de MGS (força centrífuga combinada com movimentos longitudinais semelhantes à da mesa vibratória). Em seu estudo, Cicek e Cocen (2002) recuperaram finos de cromita de uma planta de beneficiamento localizada na Turquia utilizando MGS.

2.4 CONCENTRADOR FALCON

O concentrado centrífugo Falcon apresenta uma cesta cilíndrico-cônica que gira a velocidades altas, podendo ultrapassar 2.000 rpm, proporcionando uma intensidade de campo gravitacional de até 300 G, provocando deposição e estratificação das partículas finas contra a parede interna lisa da cesta. Carisso e Chaves (2002) afirmaram que o equipamento realiza uma concentração eficiente numa ampla faixa granulométrica, conforme mostra a Figura 5.

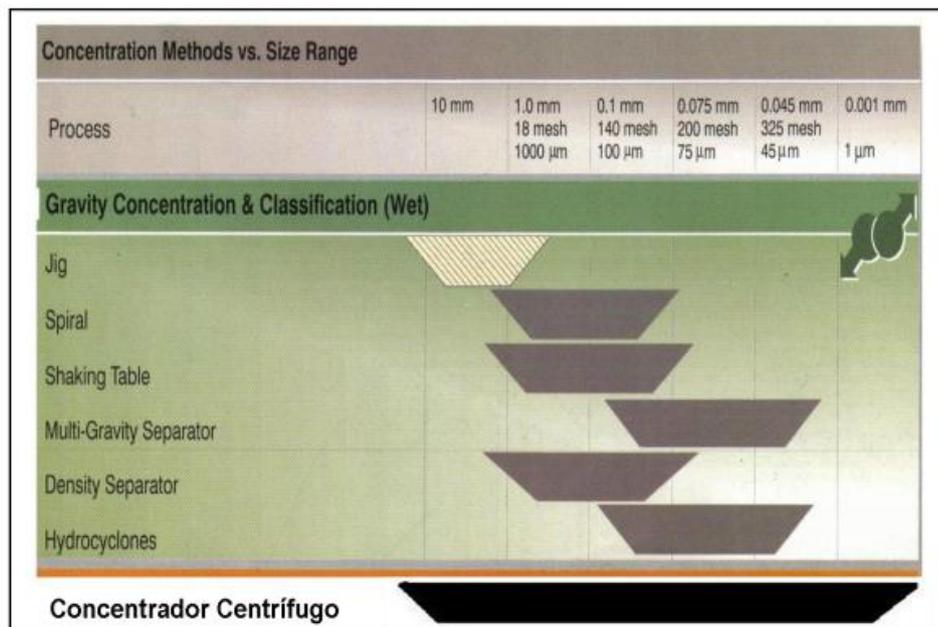


Figura 5: Faixa de tamanhos das partículas para cada um métodos densitários.

No concentrador Falcon, a polpa é alimentada através da parte central do fundo do cone por meio de um conduto que se estende ao longo do eixo de rotação. Rapidamente, a força centrífuga causa a separação da polpa em água e sólidos. Essa força centrífuga sobre as partículas na parede do cone é expressa por:

$$F_c = m [w^2 \times R] = m [N^2 \times (2\pi/60)^2 \times R = m a_c \quad (1)$$

Onde,

m = massa da partícula (g);

w = velocidade angular;

R = raio do rotor;

N = velocidade rotacional (rpm);

a_c = aceleração centrífuga.

Chaves e Filho Chaves (2013) afirmaram que caso uma partícula de 1 g esteja girando num raio de 1 m (100 cm) a 1 m/s (100 cm/s), terá uma força centrífuga de 100 gf. Em outras palavras, o seu peso foi multiplicado por 100.

No decorrer deste movimento, as partículas movem-se progressivamente para a parte superior da parede da cesta, fazendo com que a camada diminua de espessura devido às partículas leves se soltarem por causa do movimento rápido do fluxo de água, enquanto que as pesadas ficam retidas nas paredes internas do cone, ou seja, as partículas densas formam uma camada mais próxima a parede da cesta, enquanto que as mais leves formam uma camada próxima a superfície do fluido. A Figura 6 apresenta a separação de partículas no concentrador Falcon. A Figura 7 mostra o funcionamento do equipamento.

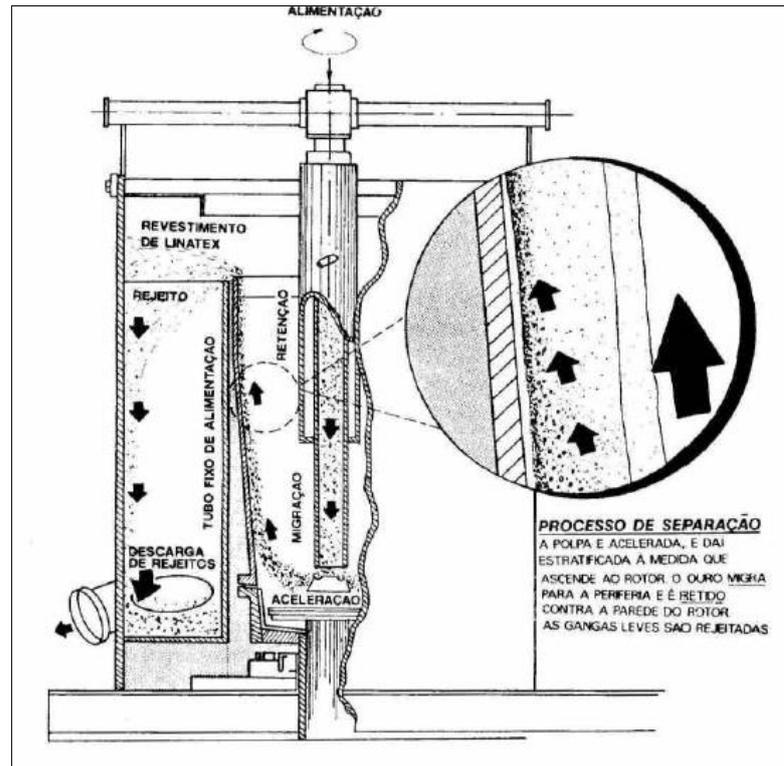


Figura 6: Separação das partículas num concentrador centrífugo Falcon.

Fonte: Lins et al. (1992).

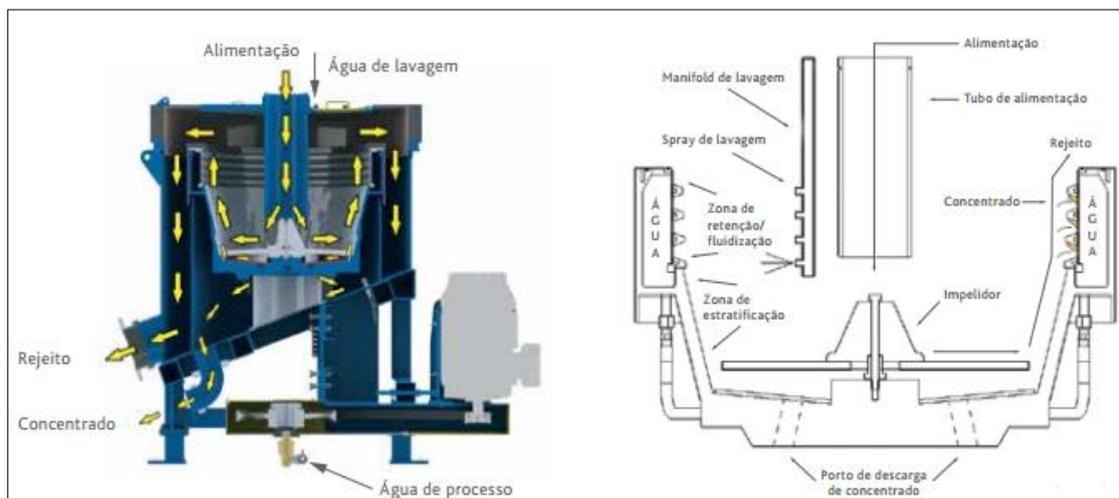


Figura 7: Funcionamento de um Concentrador Centrífugo Falcon SB.

Fonte: Oretec.

A Figura 8 apresenta o “confronto” que ocorre entre a força centrífuga e a pressão de água de fluidização quando o equipamento está em rotação.

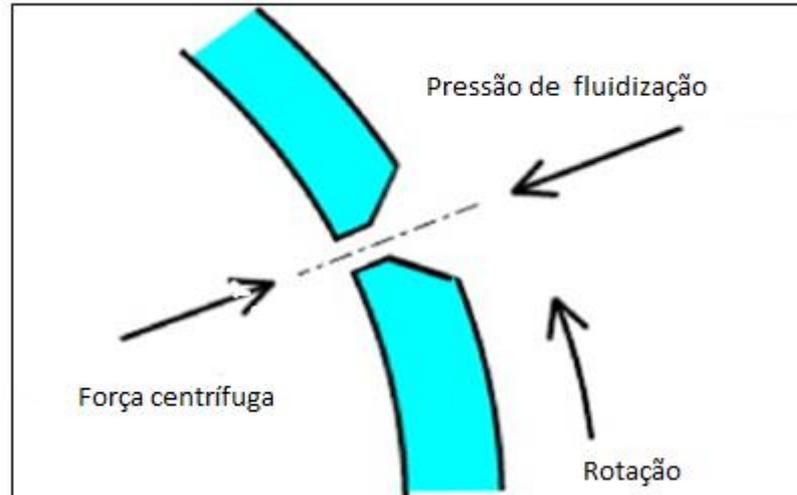


Figura 8: Comportamento em que fica submetida uma partícula com o equipamento em operação.

Fonte: Duan et al. (2009).

Sampaio e Tavares (2005) afirmaram que a separação no concentrador centrífugo pode ser entendida considerando que o equipamento é constituído por duas zonas. Na zona inclinada, conhecida como zona de segregação, a força centrífuga é decomposta em duas componentes. Uma componente é normal a parede, representa a força motriz da separação, que permite a estratificação e a separação no regime de sedimentação retardada, de acordo com a densidade e, secundariamente de acordo com o tamanho da partícula, já a componente menos intensa, paralela à parede da cesta, é responsável pelo transporte das partículas estratificadas. A outra zona é chamada de zona de retenção, é paralela ao eixo de rotação, de modo que a componente axial que se encontra ausente. A combinação da ausência de uma componente de força vertical e a presença dos anéis de retenção faz com que as partículas densas permaneçam estacionadas na direção axial. A Figura 9 apresenta um desenho esquemático do equipamento com as zonas de retenção e segregação.

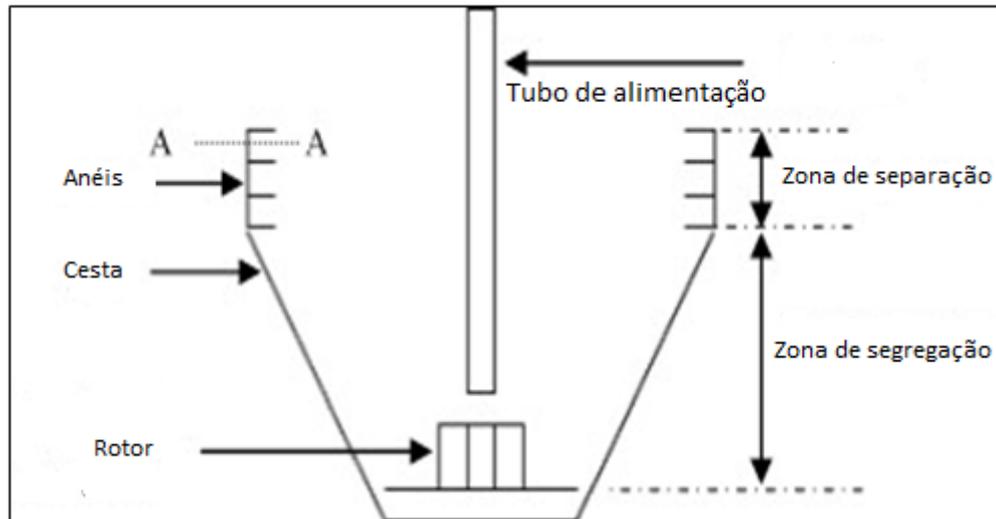


Figura 9: Desenho esquemático mostrando a zona de segregação e separação (retenção).

Fonte: Duan et al. (2009).

A fabricante do concentrador centrífugo Falcon é a empresa Falcon Concentrator Co.

Atualmente, este equipamento é comercializado em três modelos distintos:

- Falcon B: operada em batelada;
- Falcon SB: Opera em batelada com automatização do processo de descarga;
- Falcon C: modelo que opera com descarga contínua sendo indicado para pré-concentrações e operações de “scavenger”.

Segundo Sampaio e Tavares (2010), os parâmetros operacionais do equipamento são:

1) a taxa de alimentação (função da área superficial do cone aumenta progressivamente com o diâmetro da cesta); 2) porcentagem de sólidos na polpa; 3) velocidade de rotação e aceleração centrífuga; 4) ângulo do cone (influencia diretamente na precisão da separação); 5) pressão da água de contrapressão (pressões altas tendem a ter uma fluidificação excessiva, enquanto que pressões baixas podem fazer com que as partículas leves não sejam expulsas).

Diversas aplicações do Falcon podem ser encontradas na literatura. Inicialmente, os concentradores centrífugos foram aplicados para concentração de ouro. Leite e Freitas (2001), realizaram experimentos com esse minério numa região de Pedra Lavrada-PB, conseguindo

concentrações em torno de 82 %. Lins et al (1992) verificaram que o Falcon conseguiu recuperar partículas finas de ouro menores que 200 malhas (- 74 μm) na ordem de 44% em 30 minutos de operação em minério sulfetado (17% de pirita e 2% de calcopirita).

Aplicações em carvões foram estudadas por Honaker, Wang e Ho (1996). Os pesquisadores reduziram eficientemente o teor de cinzas e de enxofre nos finos de carvão, sendo a máxima separação alcançada na faixa granulométrica entre 210 x 37 μm . Siquela (2012) alcançou resultados significativos no beneficiamento de finos de carvão, sendo a variável de aspecto mais impactante no processo, a água de fluidização. Foram verificados os comportamentos das taxas de rejeição de cinzas, enxofre total e recuperação de matéria orgânica. Os experimentos foram realizados em duas faixas granulométricas entre 0,5 e 0,25 mm e menores que 0,25mm. A faixa granulométrica mais grosseira mostrou boas taxas de rejeição para uma aceleração de 78 G. Pressões muito baixas tem um efeito negativo para esta granulometria conforme visto na Figura 10.

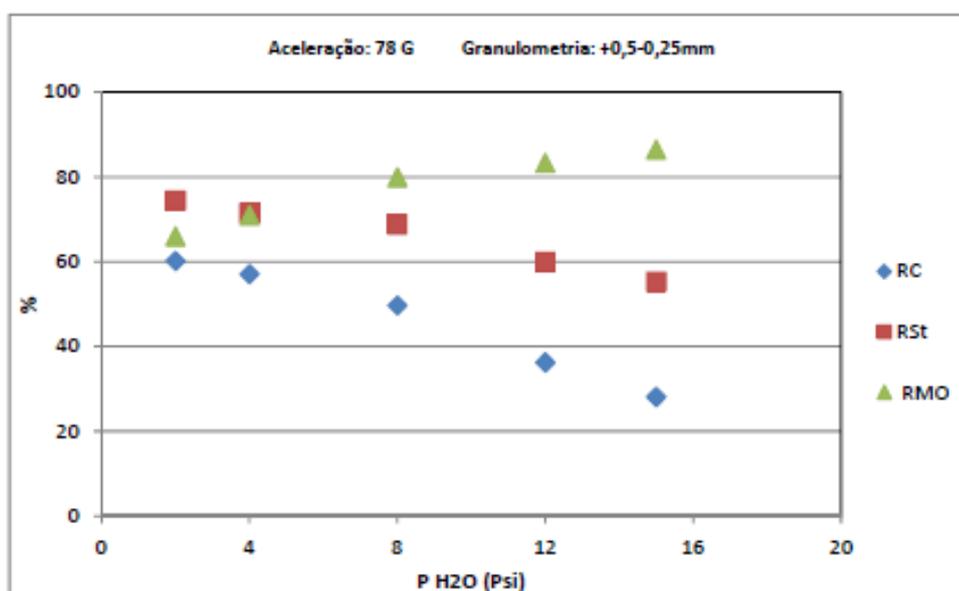


Figura 10: Comportamento das taxas de rejeição de cinzas (RC), do enxofre total (RST) e da recuperação da matéria orgânica (RMO), com a variação da pressão de água de fluidização, (aceleração centrífuga de 78 G e faixa granulométrica de -0,5 + 0,25 mm).

Fonte: Siquela (2012).

Boylu (2013) descobriu que para o beneficiamento de um carvão fino, as concentrações de sólidos devem manter-se altas, tendo como melhor resultado em torno de 50 % de sólidos.

El-Midany e Ibrahim (2011) verificaram o comportamento do Falcon com o minério de celestita fino, menor que 80 μm . Foi investigado o efeito das variáveis operacionais, como campo centrífugo e pressão da água de fluidização e também o efeito da calcita (ganga) no meio. Os resultados mostraram que foi possível obter um concentrado com apenas 4% de calcita e que, embora a força centrífuga fosse o fator dominante, a interação, a velocidade do motor e a pressão de fluidização afetaram fortemente o teor do concentrado. Verificou-se também que a porcentagem de calcita afeta as condições operacionais no processo.

Ibrahim et al. (2014), utilizou o Falcon Sb-40 para uma separação entre pirita sulfúrica e carvão, alcançando o melhor resultado em 300 G com água de fluidização em torno de 3,90 psi. Foi verificado também que o equipamento não é eficiente para reduzir a quantidade de partículas de pirita com granulometria inferior a 20 μm . Verificou-se que o aumento da pressão é o suficiente para prejudicar a eficiência de separação em baixas frequências, entretanto, em frequências mais altas, ocorre o inverso.

Duan et al. (2009), realizou experimentos visando recuperar metais provenientes de placas de circuitos. O material foi moído até uma granulometria inferior a 1 mm, em seguida foi submetido ao Falcon. Foi analisado o mecanismo de separação de partículas finas de diferentes densidades em detalhe. Recuperações metalúrgicas de 97,05 % foram alcançadas utilizando-se pressão de água de fluidização de 0,05 MPa e frequência de 30 Hz.

A combinação de técnica do Falcon seguida por uma separação magnética foi usada por Jordan et al. (2014) em minerais de terras raras.

Mais recentemente, os rejeitos gravimétricos têm sido estudados. Fernandes (2011) realizou uma pré-concentração de scheelita utilizando um Falcon SB-40 para uma posterior lixiviação ácida. O equipamento foi utilizado para recuperar os finos de scheelita da Mina

Brejuí-RN. Visando a otimização do processo, testou-se o N° de G com os valores 60, 99, 150, 200, 250 e pressão de fluidização com os valores de 21, 42, 62, 82, 94 kPa. Verificou-se que o equipamento descartou uma grande quantidade de massa, acima de 92 %, chegando a atingir 98,16 %. Os resultados mostraram que houve recuperações metalúrgicas próximas a 88 %, conforme visto nas Figuras 11 e 12.

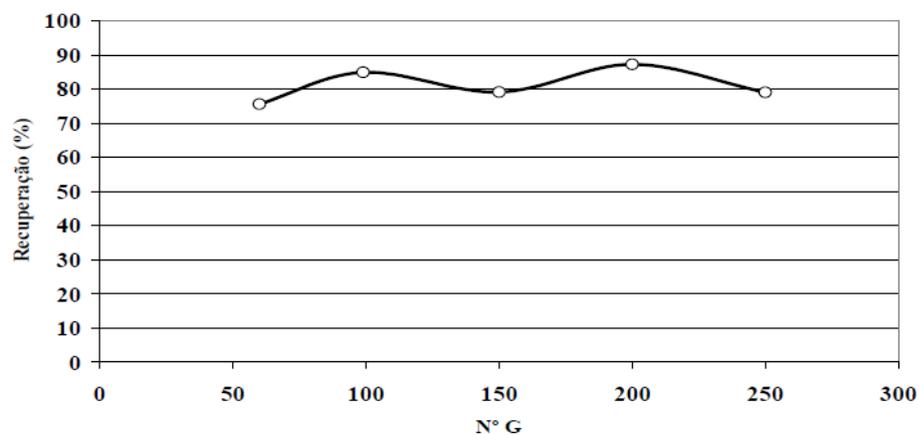


Figura 11: Recuperação metalúrgica em função da variação da intensidade do campo centrífugo (N° G).

Fonte: Fernandes (2008).

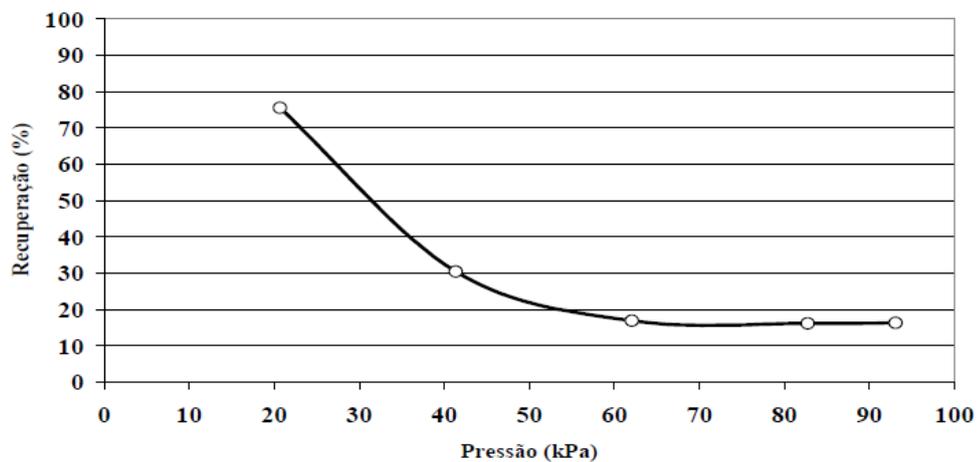


Figura 12: Recuperação metalúrgica em função da variação da pressão de fluidização do sistema.

Fonte: Fernandes (2008).

Leite e Souza (2010) estudaram o comportamento do rejeito do caulim e os resultados mostraram que o concentrador operou classificando as partículas com maior inércia, enquanto as partículas finas de caulim se comportaram como fluido. Esse processo levou a recuperações metalúrgicas da ordem de 90% de caulim, mostrando que a sua aplicação pode ser uma alternativa para a elevação da recuperação de caulim na região. Para otimizar o número de G, o valor de pressão foi fixado em 3 psi, nesse processo, o que apresentou melhor resultado foi 100 G, valor que foi usado para verificar a variação da pressão de água de fluidização. A Figura 13 apresenta a recuperação metalúrgica obtida.

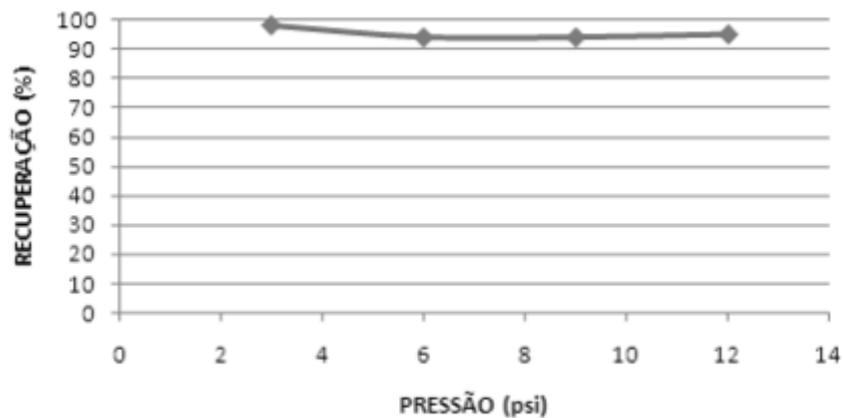


Figura 13: Recuperação metalúrgica em função da pressão.

Fonte: Leite e Souza (2010).

Sampaio, Andrade e Paiva (2008) afirmaram que já se empregam concentradores centrífugos em algumas minas de cromita, normalmente quando a mesma já não é mais recuperável por processos gravimétricos tradicionais.

3 METODOLOGIA

3.1 COLETA DO MATERIAL

O material utilizado para a realização deste estudo foi o rejeito descartado pelo underflow de um ciclone de uma planta industrial de tratamento de minérios, localizada no Estado da Bahia. Uma amostra de 150 kg foi coletada neste ponto do circuito e enviada para o Laboratório de Tecnologia Mineral do Instituto Federal do Rio Grande do Norte, em Natal, em sete sacos, cada um pesando em média 22 kg.

3.2 HOMOGENIZAÇÃO E QUARTEAMENTO

O material recebido da planta de tratamento foi homogeneizado utilizando-se uma pilha prismática que foi distribuída sobre uma lona plástica colocado no assoalho do Laboratório de Tecnologia Mineral do IFRN (Figura 14).



Figura 14: Pilha prismática.

Em seguida, 20 kg do material foram inseridos num Quarteador Jones, até a obtenção de uma alíquota de 312 gramas para análise granulométrica (Figura 15).



Figura 15: Quarteador Jones.

3.3 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

A distribuição granulométrica do rejeito foi realizada através de peneiramento a úmido utilizando-se as seguintes malhas: 18 (1.000 μm), 20 (830 μm), 30 (600 μm), 40 (430 μm), 50 (300 μm), 60 (250 μm), 70 (210 μm), 100 (150 μm), 120 (125 μm), 140 (106 μm), 200 (74 μm) e 270 (53 μm). A análise granulométrica foi feita com o auxílio de um peneirador vibratório, para um tempo de 30 minutos e uma vazão de água de 0,5 litros por minuto.

3.4 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

A análise química de cada fração granulométrica da peneira foi realizada utilizando-se um equipamento de fluorescência de raios X, para determinação dos teores de cromita, silicatos e fósforo do material recebido no laboratório.

3.5 ANÁLISE MINERALÓGICA

A caracterização mineralógica foi realizada no laboratório da empresa que forneceu o material, através de um difratômetro, modelo XRD-6000 SHIMADZU (Figura 16), utilizando-se o método do pó com as seguintes condições operacionais: radiação $\text{CuK}\alpha$ (30 kV/30 mA) e ângulo 2θ variando de 5 a 60 °.



Figura 16: Difratômetro Shimadzu XRD-6000.

3.6 GRAU DE LIBERAÇÃO

A análise microscópica foi realizada para a determinação do grau de liberação da cromita em cada fração granulométrica do rejeito. Neste sentido, foi empregando um microscópio óptico do Laboratório de Tecnologia Mineral do IFRN (Figura 17). No preparo das lâminas, foi utilizado o bálsamo do Canadá.



Figura 17: Microscópio óptico utilizado.

O grau de liberação foi então calculado pelo método de Gaudin. Na sequência, uma média ponderada permitiu a determinação do grau de liberação do rejeito e nas faixas granulométricas superior e inferior a 60 malhas (250 μm).

3.7 CONCENTRAÇÃO CENTRÍFUGA

Antes de iniciar os testes de concentração centrífuga, testou-se a frequência do equipamento (Falcon), de 5 em 5 Hz, até 60 Hz. Para tanto, foi utilizado um tacômetro, para fazer a verificação da velocidade de rotação com às frequências estabelecidas. Com as informações da velocidade de rotação, estabeleceu-se o número de G pela seguinte expressão:

$$N^{\circ} (G) = \frac{4 \times Vel^2}{70.421} \quad (2)$$

Na primeira etapa, a concentração centrífuga foi realizada com alíquotas de 1 kg para uma ampla faixa granulométrica. Os parâmetros analisados foram: força G, pressão da água de fluidização e massa de alimentação. Variou-se a aceleração centrífuga de 25 até 300 G. Para cada número de G, utilizou-se pressões de fluidização de 20 até 100 kPa.

Na segunda etapa, verificou-se a influência da quantidade de massa nos ensaios, ou seja, a taxa de alimentação dos sólidos, em ampla faixa granulométrica.

Na terceira etapa, foram feitos experimentos com material mais fino, ou seja, menor que 60 malhas (250 μm), com diferentes quantidades de massa. A Figura 18 apresenta o Concentrador Falcon SB-40. Os produtos do concentrador centrífugo foram encaminhados para análise química para a determinação das recuperações metalúrgicas.



Figura 18: Concentrador Centrífugo SB-40.

Legenda: 1-Inversor de frequência. 2-Bomba centrífuga, 3-Manômetro, 4-Motor, 5-Controle da Aceleração Centrífuga, 6-Alimentação, 7- Descarga do rejeito, 8- Tubulação de transferência de água de fluidização.

As Figuras 19, 20, 21, 22 e 23 mostram, respectivamente, as partes de interesse do Concentrador Centrífugo Falcon SB-40 que foi utilizado nos ensaios de concentração.



Figura 19: Vista por cima do Falcon mostrando por onde o material passa.



Figura 20: Vista lateral da cesta cilíndrico cônica mostrando os orifícios por onde entra a água de fluidização.

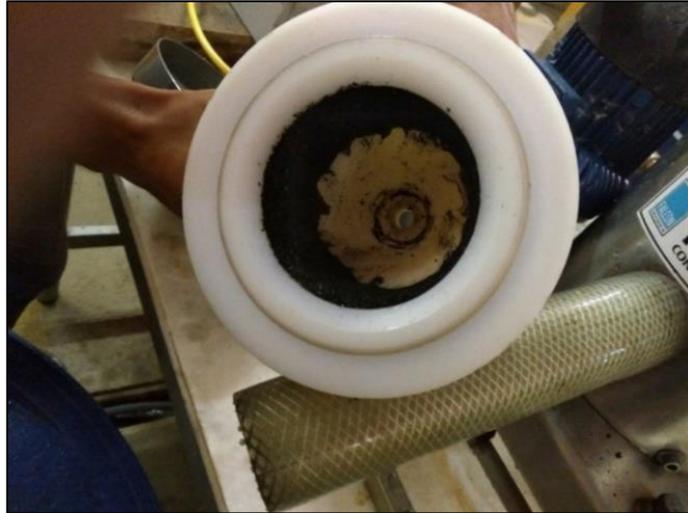


Figura 21: Minerais pesados retidos nos anéis.

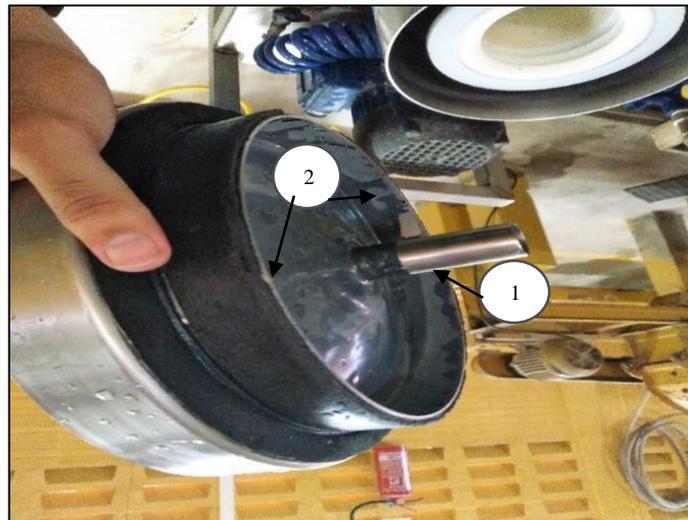


Figura 22: Interior do equipamento.

Legenda: 1- Conduto que leva a polpa a cesta, 2- Rejeito (minerais leves).

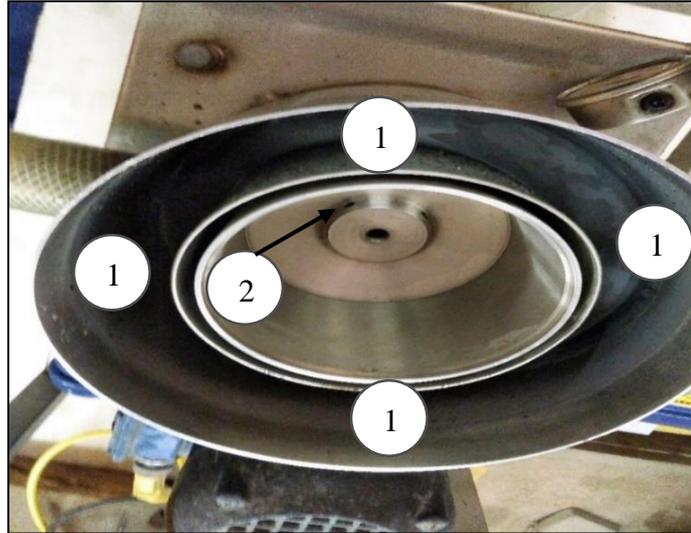


Figura 23: Interior do equipamento.

Legenda: 1- Locais onde o material leve cai. 2- Otimização da descarga do concentrado.

Um inversor de frequência CFW-08 foi utilizado para variar a velocidade de giro do motor da bomba centrífuga. Informações da bomba, como potência, velocidade de rotação e frequência foram inseridas no equipamento e registradas. A pressão da água de fluidização foi controlada por esse equipamento ao invés de utilizar válvulas, dessa forma, automatizando a operação. A Figura 24 ilustra o equipamento.



Figura 24: Inversor de frequência CFW-08.

A metodologia do trabalho pode ser resumida no fluxograma da Figura 25.

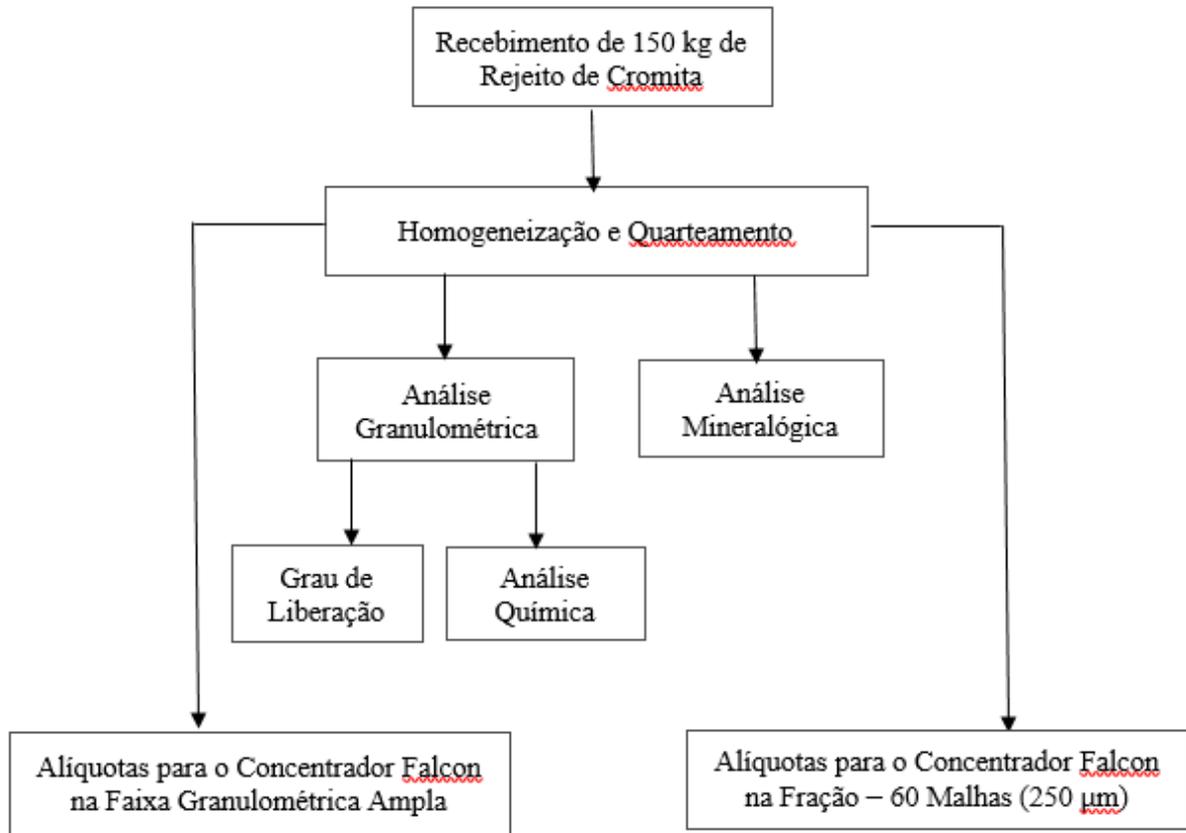


Figura 25: Metodologia do trabalho.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA

A Tabela 1 apresenta o resultado da difração de raios X de uma amostra representativa do rejeito de cromita, sendo a mesma proveniente do underflow de um hidrociclone de uma planta industrial no Estado da Bahia.

Os resultados na Tabela 1 mostram que os principais minerais presentes no rejeito são a cromita, talco, lizardita e o clinocloro. A biotita, pirrotita, calcopirita e a calcita são os minerais que aparecem em menor abundância. Deste modo, o rejeito de cromita é basicamente composto por silicatos, óxidos, sulfetos e carbonatos.

Tabela 1: Difração de raios X do rejeito de cromita.

Rejeito Banca (FBR)	Cromita	$(Mg_{0.43}Fe_{0.56})_8(Cr_{1.19}Al_{0.77}Ti_{0.03})_8O_{32}$	+++
	Talco	$Mg_3(OH)_2Si_4O_{10}$	+++
	Serpentina Maciça - Lizardita	$Mg_3(Si_2O_5(OH)_4)$	+++
	Clinocloro	$Mg_{4.54}Al_{0.97}Fe_{0.46}Mn_{0.03}(Si_{2.85}Al_{1.15}O_{10})(OH)_8$	++
	Biotita	$k(Mg_{1.48}Fe_{1.28}Ti_{0.24})(Al_{1.2}Si_{2.8}O_{10})(OH)_{1.4}FO_{.32}O_{0.28}$	+
	Pirrotita	Fe_7S_8	+
	Pentlandita	$FeNiS_2$	+
	Calcopirita	$CuFeS_2$	+
	Calcita	$CaCO_3$	+
	Abundância	Legenda	
Alta concentração	++++		
Média concentração	+++		
Baixa concentração	++		
Traços	+		

4.2 GRAU DE LIBERAÇÃO

A Tabela 2 apresenta o grau de liberação da cromita por frações e faixas granulométricas, referente ao rejeito coletado no underflow do hidrociclone da planta industrial.

O grau de liberação foi quantificado pelo Método de Gaudin nas seguintes frações: 18 malhas (1.000 μm), 20 malhas (830 μm), 30 malhas (600 μm), 40 malhas (430 μm), 50 malhas (300 μm), 60 malhas (250 μm), 70 malhas (210 μm) e 100 malhas (149 μm).

Os resultados mostram que acima de 60 malhas (250 μm) a cromita está liberada em 63,19 %. Nas frações compreendidas entre 70 malhas (210 μm) e 100 malhas (150 μm), a liberação da cromita atinge o valor de 78,41 % (Tabela 2). Deste modo, pode-se inferir que o grau de liberação da fração abaixo de 60 malhas (250 μm) é superior a 78,41 %.

Tabela 2: Grau de liberação da cromita por fração e faixa granulométrica.

Abertura Malha	μm	Massa Retida (%)	Grau Liberação por Fração (%)	Grau Liberação por Faixa (%)
18	1.000	5,08	36	
20	830	4,22	45	
30	600	14,32	57	
40	430	15,38	65	63,19
50	300	13,61	74	
60	250	10,05	76	
70	210	5,40	77	
100	150	12,91	79	78,41

A Figura 26 apresenta a relação entre o grau de liberação da cromita com as respectivas frações granulométricas ou abertura das peneiras.

A linha de tendência (cor azul) na Figura 26 mostra que o grau de liberação da cromita varia linearmente com as frações granulométricas, pelo menos, entre os tamanhos compreendidos entre 20 malhas (830 μm) e 100 malhas (150 μm).

A determinação do grau de liberação das partículas de cromita para os tamanhos menores que 100 malhas (149 μm) não foi possível pelo Método de Gaudin, tendo em vista a dificuldade de observação das partículas com o microscópio de que se dispunha.

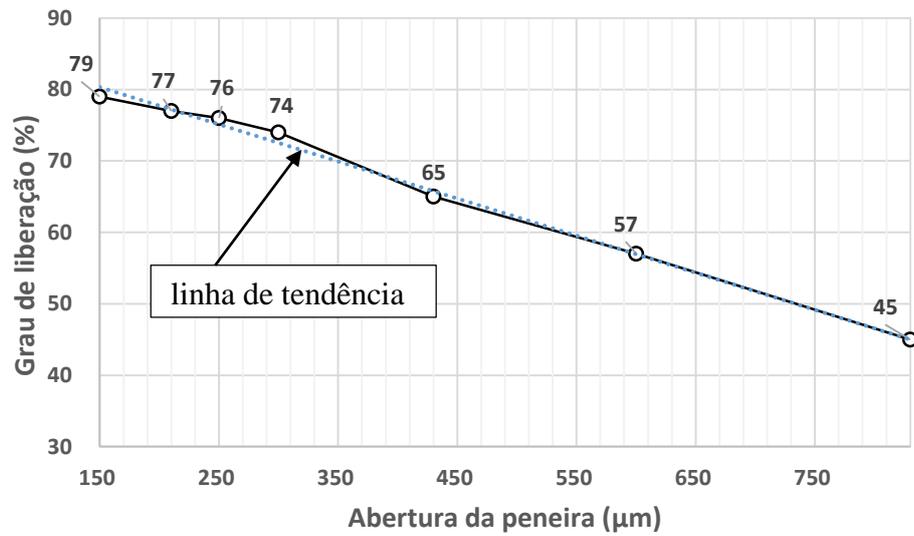


Figura 26: Grau de liberação em função das aberturas das peneiras.

A Figura 27 ilustra as partículas minerais no rejeito de cromita retida na peneira de 20 malhas (830 μm) e passante em 18 malhas (1.000 μm), para um aumento de 20 vezes. Nesta Figura 27, vê-se que os minerais biotita e o talco exibem claramente as suas formas lamelares, enquanto a cromita e lizardita mostram os seus contornos granulares.



Figura 27: Análise microscópica na fração entre 18 malhas (1.000 μm) e 20 malhas (830 μm).

4.1 DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO E COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A Tabela 3 apresenta a distribuição dos tamanhos das partículas do rejeito de cromita, oriundo do underflow de um hidrociclone de uma planta industrial de concentração de cromita do Estado da Bahia, bem como os teores de Cr_2O_3 , SiO_2 e P com as suas respectivas distribuições para cada uma das frações granulométricas.

Os resultados das análises granulométricas mostram que 94,92 % da massa do rejeito da cromita estão com o tamanho inferior a 18 malhas (1.000 μm). E acima de 18 malhas estão 5,08 % da massa do rejeito de cromita.

As análises químicas mostram que o rejeito de cromita do underflow do ciclone têm teores médios de 8,41 % de Cr_2O_3 , 29,27 % de SiO_2 e 0,015 % de P.

Tabela 3: Análise granulométrica, teor e distribuição do Cr₂O₃, SiO₂ e P do rejeito de cromita.

Malha	Abertura µm	Massa Retida (%)	Teor (%)			Distribuição (%)		
			Cr ₂ O ₃	SiO ₂	P	Cr ₂ O ₃	SiO ₂	P
18	1000	5,08	6,30	31,5	0,013	3,8	5,5	4,4
20	830	4,22	7,00	30,7	0,012	3,5	4,4	3,3
30	600	14,32	7,20	28,7	0,012	12,3	14,0	11,3
40	430	15,38	6,60	30,7	0,014	12,1	16,1	14,2
50	300	13,61	7,60	29,3	0,012	12,3	13,6	10,8
60	250	10,05	6,50	29,2	0,011	7,8	10,0	7,3
70	210	5,40	6,90	30,9	0,015	4,4	5,7	5,3
100	150	12,91	8,40	30,6	0,016	12,9	13,5	13,6
120	125	6,98	9,50	28,2	0,018	7,9	6,7	8,3
140	106	4,45	11,20	28,9	0,021	5,9	4,4	6,2
200	74	4,04	14,00	27,6	0,030	6,7	3,8	8,0
270	53	2,21	22,00	19,9	0,034	5,8	1,5	5,0
< 270	-	1,35	29,00	14,3	0,025	4,7	0,7	2,2
TOTAL	-	100,00	8,41	29,27	0,015	100,0	100,0	100,0

As Tabelas 4 e 5 representam um resumo da Tabela 3. Elas apresentam a distribuição da massa de rejeito de cromita, bem como do Cr₂O₃, SiO₂ e P, nas frações maiores e menores que 60 malhas (250 µm) e 200 malhas (74 µm), respectivamente.

A Tabela 4 denota que 62,66 e 37,34 % das massas de rejeito da cromita estão acima e abaixo de 60 malhas (250 µm), respectivamente. Na fração + 60 malhas, estão distribuídos 51,7 % do Cr₂O₃, 63,7 % da SiO₂ e 51,4 % do P. Na fração – 60 malhas, estão distribuídos 48,3 % do Cr₂O₃, 36,3 % da SiO₂ e 49,6 % do P.

Tabela 4: Distribuições da massa de rejeito, do Cr₂O₃, SiO₂ e P nas frações acima e abaixo de 60 malhas.

Malha	Abertura μm	Massa Retida (%)	Teor (%)			Distribuição (%)		
			Cr2O3	SiO ₂	P	Cr2O3	SiO ₂	P
> 60	250 μm	62,66	6,94	29,76	0,01	51,7	63,7	51,4
< 60	250 μm	37,34	10,88	28,45	0,02	48,3	36,3	49,6
Total		100,00	8,41	29,27	0,015	100,0	100,0	100,0

A Tabela 5 mostra que 96,44 e 3,56 % das massas de rejeito da cromita estão acima e abaixo de 200 malhas (74 μm), respectivamente. Na fração + 200 malhas, estão distribuídos 89,6 % do Cr₂O₃, 97,8 % da SiO₂ e 92,8 % do P. Na fração – 200 malhas, estão distribuídos 10,4 % do Cr₂O₃, 2,2 % da SiO₂ e 7,2 % do P. O reduzido percentual de finos (3,56 %) nos rejeitos da cromita deve-se ao ponto de coleta do material que foi o underflow de um hidrociclone.

Tabela 5: Distribuições da massa de rejeito, do Cr₂O₃, SiO₂ e P nas frações acima e abaixo de 200 malhas.

Malha	Abertura μm	Massa Retida (%)	Teor (%)			Distribuição (%)			
			Cr2O3	SiO ₂	P	Cr2O3	SiO ₂	P	
> 200	74 μm	96,44	7,81	29,70	0,014	89,6	97,8	92,8	
< 200	74 μm	3,56	24,65	17,78	0,031	10,4	2,2	7,2	
Total		-	100,00	8,41	29,27	0,015	100,0	100,0	100,0

A Figura 28 apresenta a distribuição do teor do óxido de cromo em função das frações granulométricas ou das aberturas das peneiras (μm).

A Figura 28 mostra que os maiores teores de óxido de cromo estão compreendidos entre 30 malhas (600 μm) e 120 malhas (125 μm) e que nesta faixa granulométrica estão distribuídos 69,61 % do Cr_2O_3 (Tabela 3).

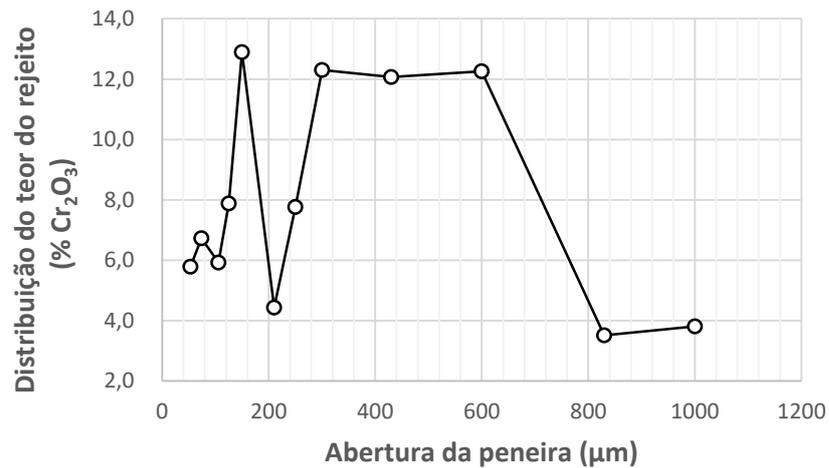


Figura 28: Variação do teor da óxido de cromo no rejeito com a abertura da peneira (μm).

Finalmente, todos esses resultados sugerem que a cromita poderia ter sido tratada por processos densitários por forças gravitacionais, através de mesas oscilatórias e concentradores espirais, uma vez que 96,44 % da massa de rejeito do underflow do hidrociclone encontram-se acima de 200 malhas (74 μm) e onde estão distribuídos 89,6 % do Cr_2O_3 .

4.4 CONCENTRAÇÃO CENTRÍFUGA

Os ensaios de concentração centrífuga com o rejeito de cromita foram realizados em duas granulometrias distintas a) faixa granulométrica ampla (partículas de todos os tamanhos); b) frações inferiores a 60 malhas (250 μm).

4.4.1 Concentração centrífuga em ampla faixa de tamanho

A Figura 29 apresenta os resultados dos ensaios da concentração do rejeito de cromita para uma ampla faixa de tamanhos empregando-se um concentrador Falcon SB-40, onde foram determinados os teores de óxido de cromo dos produtos concentrados, variando-se a pressão de água de fluidização e a aceleração centrífuga.

Os produtos concentrados de cromita com melhores teores de Cr_2O_3 foram obtidos na pressão de água de fluidização de 80 kPa, para as três acelerações centrífugas utilizadas, 25G, 50G e 100G. Noutras palavras, o aumento da pressão contribuiu para o aumento dos teores de Cr_2O_3 , até o limite de 80 kPa.

Por outro lado, os teores de Cr_2O_3 diminuem a partir de 80 kPa, sugerindo que as partículas de cromita são expulsas dos anéis de retenção pelo efeito da pressão de água de fluidização mais intenso no leito. Nas acelerações centrífugas 25, 50 e 100 G, o teor do rejeito de cromita passou de 8,41 % Cr_2O_3 para 18,60, 19,90 e 18,10 % Cr_2O_3 , respectivamente.

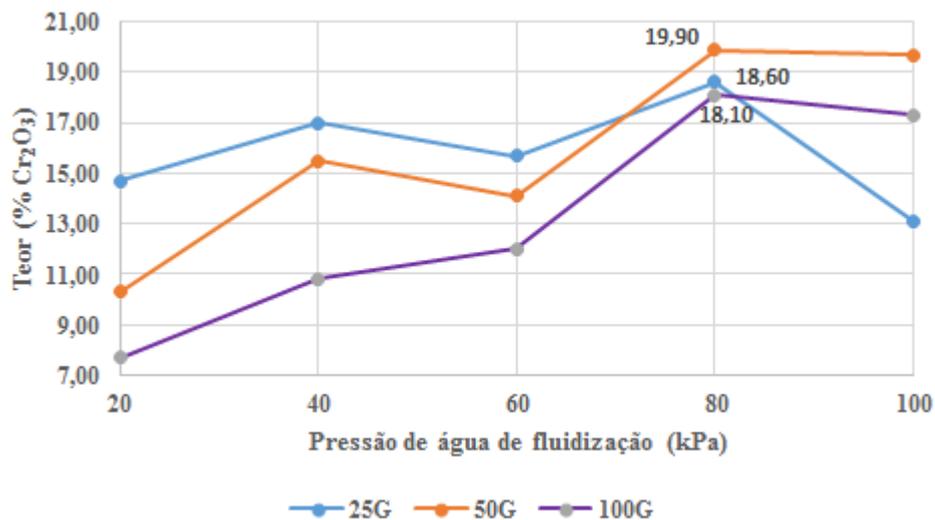


Figura 29: Teores de Cr_2O_3 nos concentrados de cromita em função da pressão de água de fluidização, para os níveis de aceleração centrífuga 25, 50 e 100 G.

A Figura 30 apresenta a recuperação metalúrgica de Cr_2O_3 do rejeito de cromita em função da pressão de água de fluidização, para as acelerações centrífugas de 25, 50 e 100 G.

As melhores recuperações metalúrgicas foram 23,27, 24,89 e 25,22 % Cr_2O_3 , as quais foram alcançadas nas acelerações centrífugas 25, 50 e 100 G e pressões de água de fluidização 40, 60 e 80 kPa, respectivamente.

Esses resultados indicam que as pressões da água de fluidização mais intensas requerem acelerações centrífugas mais elevadas. Nas acelerações centrífugas 25, 50 e 100 G, a recuperação metalúrgica diminuiu a partir de 40, 60 e 80 kPa, respectivamente, uma vez que as partículas de cromita foram expulsas dos anéis de retenção.

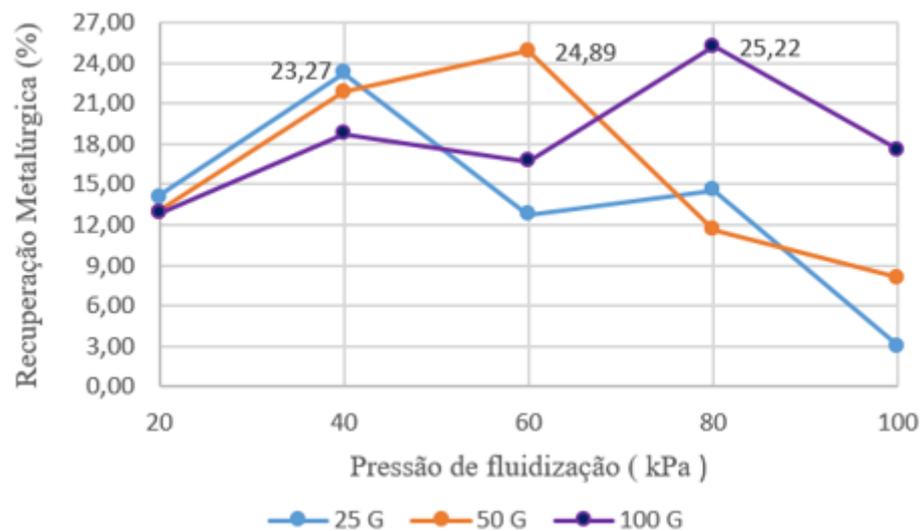


Figura 30: Recuperação metalúrgica em função da pressão de água de fluidização, para os níveis de aceleração centrífuga em 25, 50 e 100 G.

A Figura 31 apresenta os resultados referentes ao teor de Cr_2O_3 nos concentrados de cromita em função da pressão de água de fluidização, para as acelerações 150 e 200 G.

O teor do concentrado de cromita chegou a 15,40 % Cr_2O_3 para uma pressão de água de fluidização de 100 kPa e aceleração centrífuga de 150 G. Em 200 G, os teores dos concentrados ficaram inferiores a 11 % Cr_2O_3 , em todos os níveis de pressão de água de fluidização utilizados.

Estes resultados indicam que as acelerações centrífugas muito altas, como 150 G e 200 G, geram compactação da polpa e impedem a expansão do leito nos anéis de retenção, dificultando, em consequência, a separação entre os minerais leves e pesados.

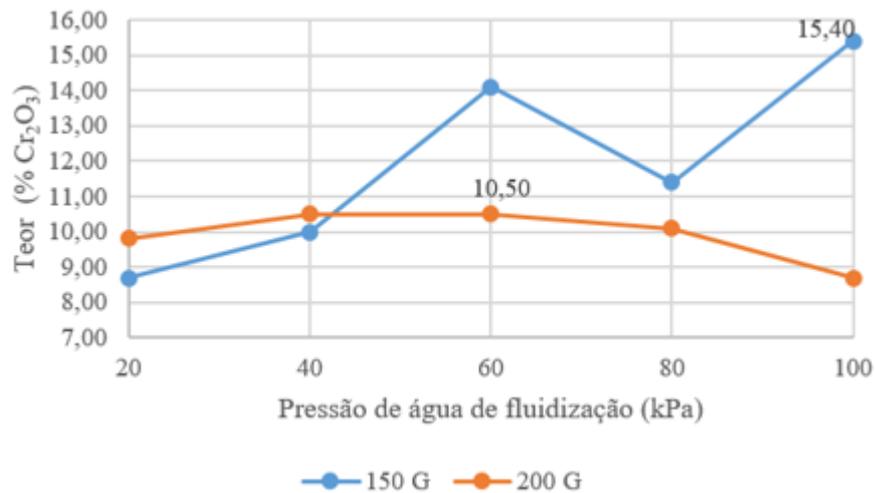


Figura 31: Teores de Cr₂O₃ nos concentrados de cromita em função da pressão de água de fluidização, para os níveis de aceleração centrífuga 150 e 200 G.

A Figura 32 apresenta a recuperação metalúrgica de Cr₂O₃ no rejeito de cromita em função da pressão de fluidização (20 a 100 kPa), em dois níveis de aceleração (150 e 200 G).

Nessas condições, as recuperações metalúrgicas foram todas inferiores a 20 % de óxido de cromo, tendo o melhor resultado sido alcançado com o valor de 18,75 % Cr₂O₃ para a pressão de fluidização de 60 kPa e aceleração centrífuga de 150 G.

Estes resultados refletem as altas acelerações centrífugas (150 G e 200 G), que compactam e impedem a expansão da polpa nos anéis de retenção, prejudicando, sensivelmente, a separação entre os minerais leves e pesadas (baixa recuperação).

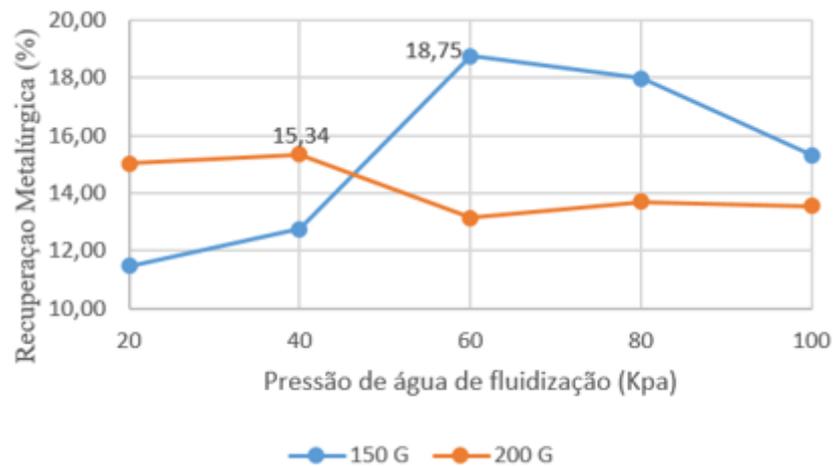


Figura 32: Recuperação metalúrgica em função da pressão de água de fluidização, para os níveis de aceleração centrífuga em 150 e 200 G

A Figura 33 apresenta os teores de Cr_2O_3 do concentrado de cromita para as acelerações centrífugas de 250 G e 300 G, variando-se as pressões da água de fluidização para valores entre 20 e 100 kPa.

Nas acelerações centrífugas 250 e 300 G, o teor do rejeito de cromita passou de 8,41 % Cr_2O_3 para 13,10 % e 11,30 % Cr_2O_3 , respectivamente.

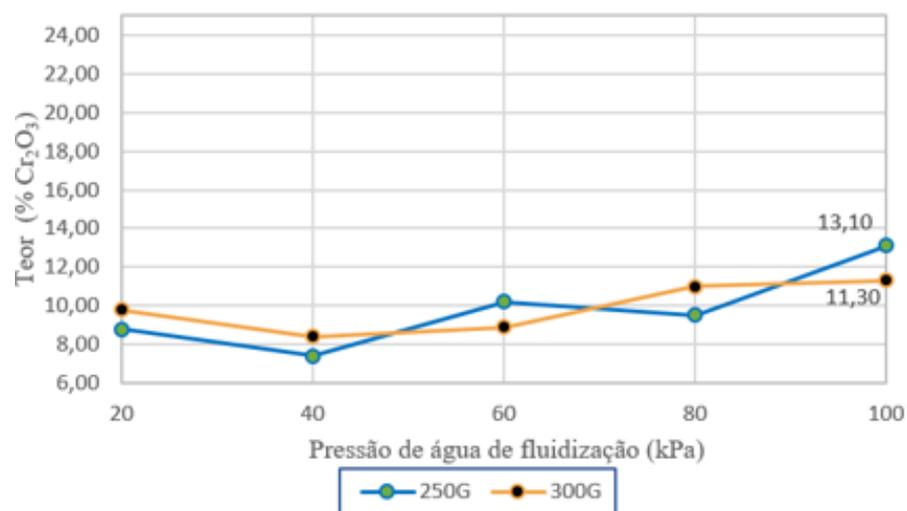


Figura 33: Teores de Cr_2O_3 dos concentrados de cromita em função da pressão de água de fluidização para os níveis de aceleração centrífuga em 250 e 300 G

Estes resultados confirmam as conclusões anteriores, de que as altas acelerações centrífugas são prejudiciais ao processo, na ampla faixa granulométrica. Todavia, estes efeitos são minimizados pelas maiores pressões de fluidização, como pode ser visto em 100 kPa, quando o teor do rejeito chega a 13,10 % Cr_2O_3 para 250 G e 11,30 % Cr_2O_3 para 200G.

A Figura 34 apresenta as recuperações metalúrgicas de Cr_2O_3 do rejeito de cromita em função das pressões de água de fluidização para níveis de aceleração de 250 e 300 G.

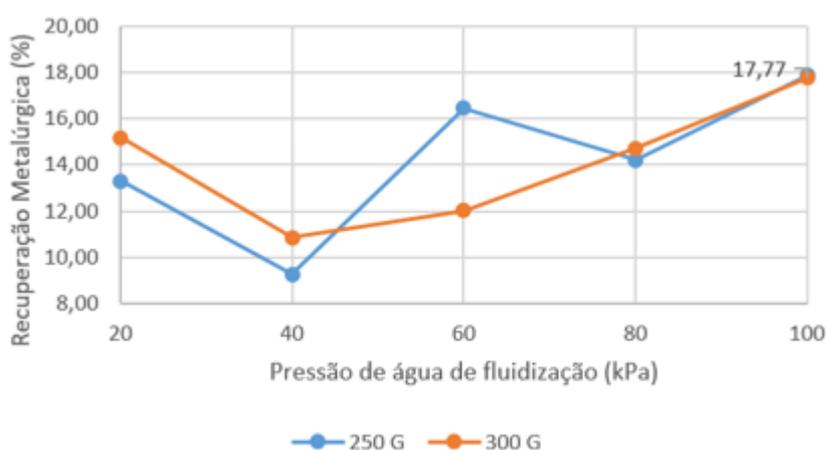


Figura 34: Recuperação metalúrgica de Cr_2O_3 no rejeito de cromita em função da pressão de água de fluidização, para os níveis de aceleração centrífuga em 150 e 200 G

Em 250 G e 300 G, as recuperações metalúrgicas de Cr_2O_3 do rejeito de cromita foram inferiores a 18% do óxido de cromo. Os melhores resultados de recuperação metalúrgica foram na pressão de água de fluidização de 100 kPa para ambas as acelerações.

Novamente, os resultados deste ensaio mostram-se compatíveis com as conclusões anteriores. As acelerações centrífugas elevadas, como 250 e 300 G, contaminam os concentrados de cromita, devido à falta de expansão da polpa nos anéis de retenção, que reflete negativamente na separação entre os minerais densos e leves.

4.4.2 Concentração centrífuga em ampla faixa variando a massa de alimentação

O teor e a recuperação metalúrgica da cromita foram também avaliados variando-se a massa de alimentação do concentrador centrífugo Falcon SB-40.

A Figura 35 ilustra o teor de Cr_2O_3 no concentrado de cromita obtidos em função da massa da alimentação, variando entre 250 a 1.000 g, para os níveis de acelerações centrífugas de 50, 75 e 100 G e pressões de água de fluidização de 60, 70 e 80 kPa, respectivamente.

No tratamento para uma ampla granulométrica (Figura 30), foi visto que as melhores recuperações metalúrgicas foram 23,27, 24,89 e 25,22 % Cr_2O_3 , as quais foram alcançadas para as acelerações centrífugas 25, 50 e 100 G e pressões de água de fluidização 40, 60 e 80 kPa, respectivamente. A aceleração de 75 G, que se situa entre 50 e 100 G, foi escolhida para a realização dos próximos ensaios, conforme mostra-se na Figura 35.

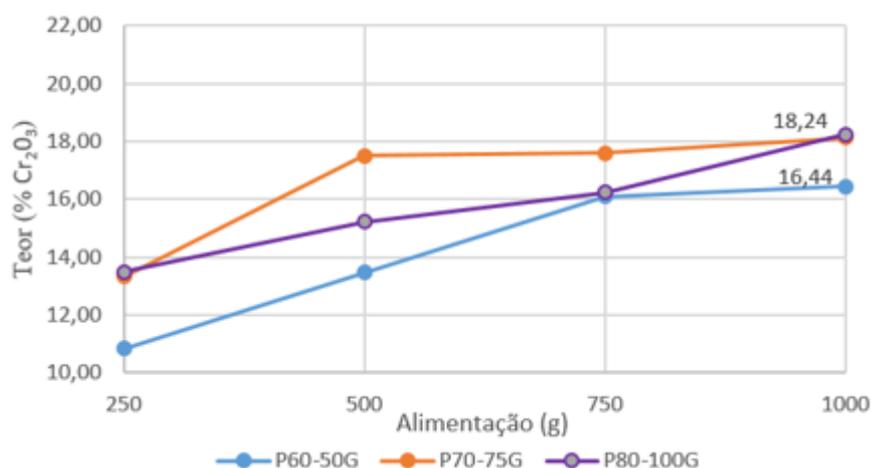


Figura 35: Teor de Cr_2O_3 nos concentrados de cromita em função da massa de alimentação, das pressões 60, 70 e 80 kPa e acelerações de 50, 75 e 100 G.

A Figura 35, mostra que as maiores taxas de alimentação contribuíram para o aumento do teor de Cr_2O_3 no concentrado de cromita. Deste modo, a taxa de alimentação de 1.000 g, o teor do rejeito de cromita passou de 8,41 % para 18,24 % Cr_2O_3 , nas acelerações de 75 e 100 G,

com pressões de 70 e 80 kPa, respectivamente. Na aceleração de 50 G, pressão de água de fluidização 60 kPa, o teor de concentrado de cromita foi para 16,44 % Cr_2O_3 .

A Figura 36 apresenta a recuperação metalúrgica de Cr_2O_3 em função da alimentação, acelerações centrífugas e pressões de água de fluidização.

Os resultados mostraram que as recuperações metalúrgicas tendem a diminuir quanto maiores forem às quantidades de massa da alimentação. Isso pode ser explicado pelo preenchimento do volume disponível dos anéis para concentrar os minerais em questão.

O volume disponível dos anéis da retenção do concentrador Falcon SB-40 empregado nos ensaios é de apenas $40,51 \text{ cm}^3$. A densidade aparente do rejeito de cromita é $2,84 \text{ g/cm}^3$, logo os anéis teriam que receber uma massa de 115 g. Noutras palavras, após o preenchimento dos anéis, o restante do material tem a tendência de ser descartado.

A Figura 36 mostra que as recuperações metalúrgicas foram mais elevadas para as menores massas de alimentação do rejeito de cromita (250 g), alcançando-se os seguintes valores: 69 % de Cr_2O_3 (P80-100 G), 65,94 % (P60-50 G) e 61,07 % (P75-70G). Estes resultados não são conflitantes com os alcançados na Figura 35, pois, em geral, maiores recuperações resultam em menores teores.

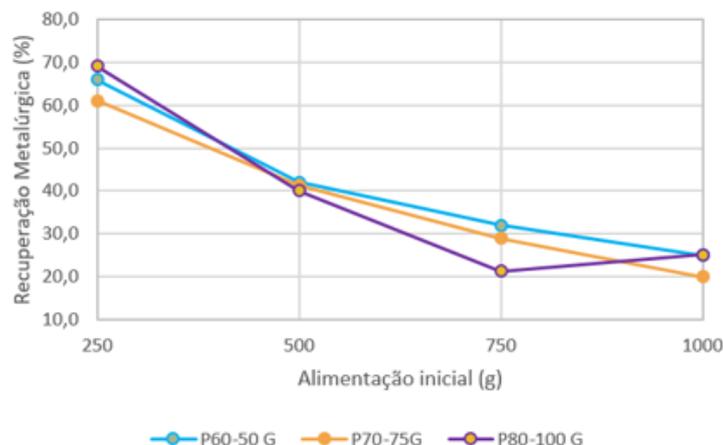


Figura 36: Recuperação metalúrgica de Cr_2O_3 em função da alimentação, das pressões 60, 70 e 80 kPa e acelerações de 50, 75 e 100 G.

4.4.3 Concentração centrífuga na fração granulométrica menor que 60 malhas

A concentração centrífuga foi avaliada para partículas com tamanhos inferiores a 60 malhas (250 μm). Esta fração específica, tem um teor médio de 10,88 % Cr_2O_3 , que representa 37,34 % da massa total do rejeito, onde estão distribuídos 48,3 % de Cr_2O_3 . Nessa fração, a liberação da cromita é superior a 78,41 %. Os ensaios de concentração centrífuga foram realizados com alíquotas do rejeito de cromita com tamanhos inferiores a 60 malhas.

A Figura 37 mostra como o teor do concentrado de cromita varia com a massa da alimentação depois que foram realizados os ensaios de concentração centrífuga para as seguintes condições operacionais: (P60-50 G), (P70-75 G) e (P80-100 G).

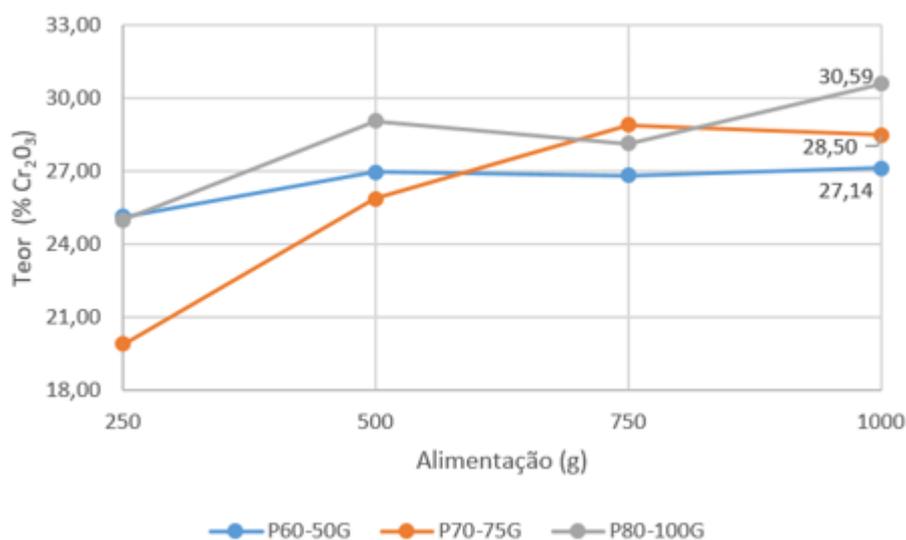


Figura 37: Teores de Cr_2O_3 nos concentrados de cromita em função massa da alimentação nos tamanhos menores que 60 malhas, nas pressões 60, 70 e 80 kPa e acelerações de 50, 75 e 100 G.

Os resultados mostram que o teor de óxido de cromo da alimentação pulou de 10,88 % Cr_2O_3 para um produto concentrado com 27,14, 28,50 e 30,59 % de Cr_2O_3 , respectivamente, quando alimentados com uma massa de 1.000 g, nas condições operacionais descritas.

A Tabela 6 mostra a massa do concentrado de cromita para as mesmas condições operacionais acima estabelecidas, ou seja, P60-50G, P70-75G e P80-100G.

Os resultados revelam que, para as condições discriminadas acima, a recuperação mássica do concentrado é baixa para uma alimentação de 1.000 g, sugerindo que a recuperação metalúrgica deverá ser relativamente pequena.

Por outro lado, a recuperação mássica aumenta para uma alimentação de 250 g, tendo sido calculados os valores de 9,22, 8,57 e 9,26 %, para as condições P60-50G, P70-75G e P80-100G, respectivamente. Este resultado sinaliza que a recuperação metalúrgica será comparativamente maior na alimentação de 250 g do que com 1.000 g.

Tabela 6: Redução de massa do rejeito de cromita.

Aceleração Centrífuga	Pressão de Fluidização (kPa)	Massa da Alimentação (g)	Massa do Concentrado (g)	Recuperação Mássica (%)
50 G	60	1000	18,28	1,83
		750	21,64	2,89
		500	17,98	3,60
		250	23,05	9,22
75 G	70	1000	29,92	2,99
		750	27,66	3,69
		500	25,59	5,12
		250	21,42	8,57
100 G	80	1000	22,85	2,29
		750	25,76	3,43
		500	30,49	6,10
		250	23,14	9,26

A Figura 38 mostra os valores de recuperação metalúrgica de Cr_2O_3 em função da massa de alimentação para as seguintes condições: (P60-50 G), (P70-75 G) e (P80-100G).

Os resultados destes ensaios confirmam a baixa recuperação metalúrgica do óxido de cromo, com valores inferiores a 9,0 % Cr_2O_3 , quando o concentrador centrífugo é alimentado com uma massa 1.000 g. A recuperação metalúrgica sobe para valores entre 16,0 a 22,0 % Cr_2O_3 , quando se alimenta o equipamento com 250 g, nas pressões de água de fluidização

variando-se entre 60 e 80 kPa. Logo, a massa da alimentação deverá estar compatível com a capacidade do equipamento, sob pena de perda de cromita no processo.

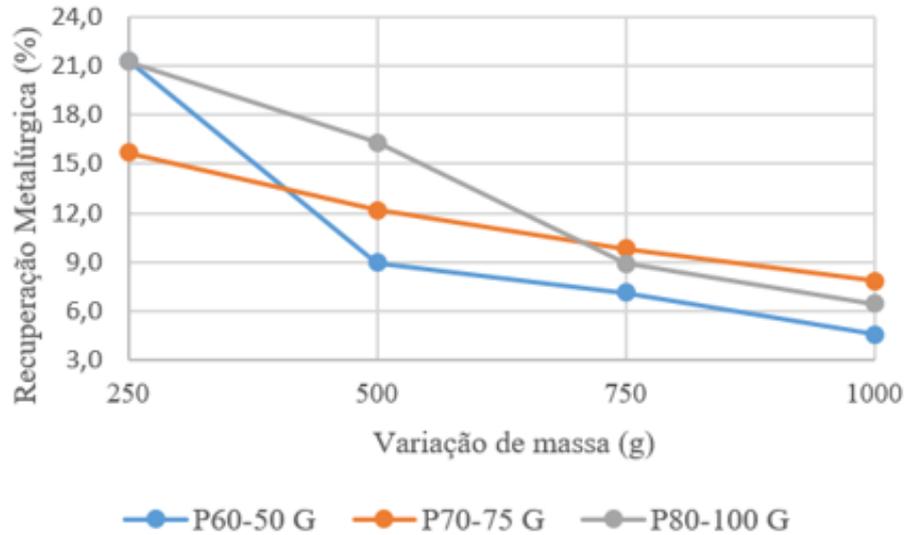


Figura 38: Teores de Cr_2O_3 nos concentrados de cromita em função massa da alimentação nos tamanhos menores que 60 malhas, nas pressões 60, 70 e 80 kPa e acelerações de 50, 75 e 100 G.

A Figura 39 apresenta os teores dos concentrados para os ensaios que foram realizados com acelerações centrífugas mais elevadas (100-150 G) e baixas pressões de água de fluidização (40-60 kPa), mantendo a massa de alimentação em 250 g.

Os resultados mostram que para uma aceleração centrífuga de 150 G e pressão de de água de fluidização de 60 kPa, o teor do concentrado de cromita foi para 28,38 % de óxido de cromo, com apenas uma única etapa de tratamento.

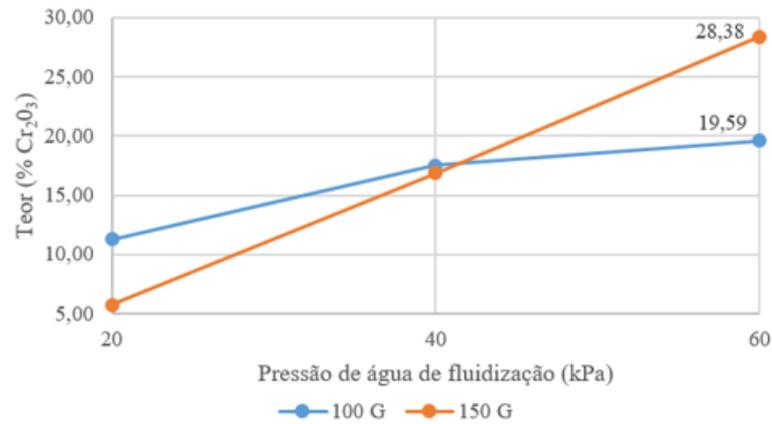


Figura 39: Teores de Cr_2O_3 dos concentrados obtidos em função da pressão de água de fluidização e aceleração centrífuga para o rejeito com tamanhos menores que 60 malhas (250 μm).

A Figura 40 apresenta os resultados da recuperação metalúrgica com a pressão de água de fluidização (20, 40 e 60 kPa) e aceleração centrífuga (100 e 150 G), para uma alimentação de 250 g.

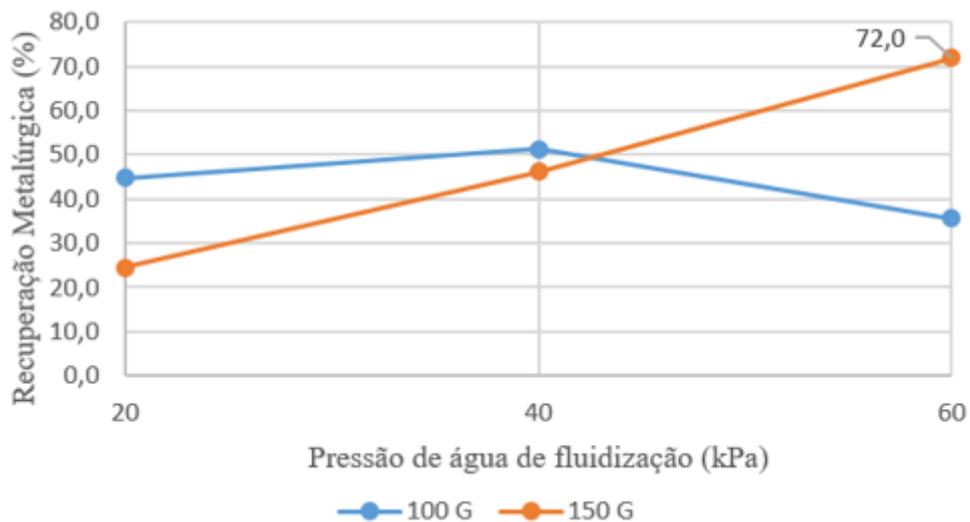


Figura 40: Recuperação metalúrgica com a pressão de água de fluidização para alimentação de 250 g na fração menor que 60 malhas (250 μm).

A recuperação metalúrgica atingiu o valor de 72 % de cromita, para uma pressão de água de fluidização de 60 kPa e aceleração centrífuga de 150 G. Todavia, na pressão 60 kPa e

aceleração de 100 G, a recuperação metalúrgica reduz-se substancialmente, mostrando que a aceleração centrífuga tem grande importância na recuperação de finos de cromita.

A Tabela 5 mostra que a recuperação mássica dos produtos concentrados para as frações granulométricas inferiores a 60 malhas, acelerações centrífugas de 100 e 150 G e níveis de pressão de água de fluidização de 20, 40 e 60 kPa.

Os resultados indicam a recuperação mássica diminui com o aumento da pressão da água de fluidização (20, 40 e 60 kPa) para uma aceleração centrífuga de 100 G. Contudo, a recuperação mássica aumenta com a pressão da água de fluidização quando a aceleração centrífuga para 150 G. Nas condições estabelecidas, a recuperação mássica aumenta porque a aceleração centrífuga tem maior efeito que a pressão da água de fluidização.

Tabela 7: Redução de massa do concentrado para tamanhos menores que 60 malhas.

Massa da Alimentação (g)	Aceleração Centrífuga	Pressão de Fluidização (kPa)	Massa do Concentrado (g)	Recuperação Mássica (%)
250	100 G	20	107,62	43,05
250		40	79,6	31,84
250		60	49,49	19,80
250	150 G	20	53,86	21,54
250		40	70,24	28,10
250		60	72,43	28,97

5 CONCLUSÃO

O rejeito de cromita proveniente do underflow da planta industrial tem um teor de 8,41 % Cr_2O_3 , sendo composto majoritariamente pelos minerais cromita, lizardita, talco e clinocloro. Os minerais que aparecem em menores proporções no rejeito de cromita são a biotita, pirrotita, calcopirita e calcita.

A caracterização revelou que 96,44 % da massa do rejeito do underflow do ciclone está acima de 200 malhas (74 μm), tendo uma distribuição de 89,9 % do Cr_2O_3 . A liberação da cromita é de 63,10 % nas frações maiores que 60 malhas (250 μm). Isto sinaliza que o rejeito da cromita, antes do seu descarte, deveria ter sido retornado para uma das etapas anteriores ou serem tratados por processos densitários, com forças gravitacionais, empregando-se as mesas oscilatórias e/ou os concentradores espirais.

Nas frações granulométricas inferiores a 60 malhas (250 μm), os resultados da concentração do rejeito de cromita empregando-se um concentrador centrífugo Falcon SB-40, foram bastante significativos, tendo em vista que foi possível a obtenção de um concentrado de cromita, para uma única etapa de tratamento, com uma recuperação metalúrgica de 72 % e teor do concentrado com 28 % Cr_2O_3 . Estes resultados foram alcançados com uma aceleração centrífuga de 150 G, pressão de água de fluidização de 60 kPa e uma massa de alimentação de 250 gramas. Estes resultados justificam ensaios em uma planta piloto.

Nas faixas granulométricas amplas, os resultados da concentração do rejeito de cromita por um concentrador centrífugo Falcon SB-40 foram insatisfatórios. Os ensaios revelaram que as grandes acelerações centrífugas são prejudiciais a concentração da cromita, nas faixas granulométricas amplas, uma vez que elas promovem a compactação da polpa nos anéis de retenção, impedindo a separação entre os minerais densos e leves, mesmo que pudessem ser minimizadas pelas pressões de água de fluidizações.

Nas faixas granulométricas amplas, variando-se a massa de alimentação, os resultados da concentração do rejeito de cromita por um concentrador centrífugo Falcon SB-40 foram também insatisfatórios. Os ensaios de concentração revelaram que a taxa de alimentação deve estar compatível com os volumes dos anéis de retenção, para evitar a perda do mineral de interesse econômico (cromita).

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os trabalhos futuros que poderiam ser demandados visando o aprofundamento desta investigação são os seguintes:

- i) Estudo de caracterização dos rejeitos de cromita oriundos do overflow do hidrociclone da planta industrial e os ensaios de concentração centrífuga;
- ii) Realização do retratamento dos produtos concentrados referentes aos melhores resultados revelados nesta investigação, visando a elevação dos seus teores, para se tornarem adequados a comercialização;
- iii) Realização de ensaios de concentração densitária com forças gravitacionais para a fração granulométrica superior a 200 malhas ($74 \mu\text{m}$), visando a identificação dos motivos que originaram as perdas de cromita nos equipamentos instalados na planta industrial de concentração.
- iv) Modelamento matemático do equipamento Falcon.

REFERÊNCIAS

ANCIA, P.; FRENAY, J; DANDOIS, P. Comparison of Knelson and Falcon centrifugal separators. In: Innovation in physical separation Technologies: Richard Mozley, 1998. London. **Anais..** London: IMM, 1998. p.53-62.

BOYLU, F. Modeling of Free and Hindered Settling Conditions for Fine Coal Beneficiation Through a Falcon Concentrator. **International Journal of Coal Preparation and Utilization**.v. 33, n. 6, p. 277-289, 2014.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL-DNPM. **Sumário Mineral**. v. 35, Brasília, 2016. 134 p.

CARRISO, R.C.C; CHAVES, A.P. **Mecanismo atuantes na concentração gravimétrica e principais equipamentos utilizados na concentração centrífuga**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2002. 36 p. (Série Tecnologia Mineral, 79).

CICEK, T; COCEN, I. Applicability of Mozley multigravity separator (MGS) to fine chromite tailings of Turkish chromite concentrating plants . **Minerals Engineering**, v. 15, n. 1–2, p. 91–93, 2002.

CHAVES, A.P; CHAVES FILHO, R.C. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios: Separação Densitária**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

DUAN, C; WEN, X; SHI, C; ZHAO, Y; WEN, B; HE, Y. Recovery of metals from waste printed circuit boards by a mechanical method using a water médium. **Journal of Hazardous Materials**. v. 166, n. 1, p.478-482, 2009.

EL-MIDANY, A. A.; IBRAHIM, S. S. Does calcite content affect its separation from celestite by Falcon concentrator ? **Powder Technology**, v. 213, n. 1–3, p. 41–47, 2011.

FALCON CONCENTRATOR. **Specialists in fine mineral recovery**. Disponível em :<<http://www.concentrators.net>>. Acesso em 15 de setembro de 2017.

FERBASA. **Mineração**: Histórico. Disponível em: <<http://www.ferbasa.com.br>> Acesso em 20 de dezembro de 2016.

FERNANDES, B. R.B. **Aproveitamento de finos de scheelita utilizando concentrador centrífugo e lixiviação ácida**. 2011. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Universidade Federal do Pernambuco, Recife, 2011.

HONAKER, R.Q; WANG, D; HO, K. Application of Falcon concentrator for fine coal cleaning. **Minerals Engineering**, v. 9, n. 11, p. 1143–1156, 1996.

IBRAHIM, S.S; ANADOLY, B.E.EL; FARAHAT, M.M; SELIM, ALI.Q; MENSRAWY, A.H.EL. Separation of Pyritic Sulfur from Egyptian Coal Using Falcon Concentrator. **Particulate Science and Technology**. v. 32, n. 6, p. 588-595, 2014.

JORDAN, A; SHERIDAN, R.S; ROWSON, N. A; WATERS, K. E. Processing a rare earth mineral deposit using gravity and magnetic separation. **Minerals Engineering**, v.62, n.1, p. 9-18, 2014.

LEITE, J.Y.P; SILVA, J; ARAUJO, F; VERAS, M; LIMA, R. APPLICATION OF CONCENTRATION CENTRIFUGE IN TAILINGS OF SMALL SCALE PLANT – PROVINCE PEGMATITE BORBOREMA (BRAZIL). In: International Mineral Processing Congress, XXVI, 2012, New Delhi. **Anais...**New Delhi: IMPC, 2012.p. 2830-2837.

LEITE, J.Y.P; FREITAS, F. Concentração de minério de ouro da fazenda Pedra Preta- PB utilizando concentrador centrífugo. IN: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, XVIII, 2001. Rio de Janeiro. **Anais...**Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2001.p.95-98.

LEITE, J.Y.P; SOUZA, L.L. Comportamento do rejeito de caulim em concentrador centrífugo. In: SIMPÓSIO DE MINERAIS INDUSTRIAIS DO NORDESTE, II, 2010. Campina Grande. **Anais...**Campina Grande: CETEM/UFPE, 2010. p. 83-90.

LINS, F.A.F. **Concentração Gravítica**. In: Luz, A.B; Sampaio, J.A; França, S.C.A (Ed). Tratamento de Minérios. 5^a ed. Rio de Janeiro: Cetem, 2010. p.301-325.

LINS, F.F; VEIGA, M.M; STEWART, J.A; PAPALIA, A; PAPALIA, R. PERFORMANCE OF A NEW CENTRIFUGE (FALCON) IN CONCENTRATING A GOLD ORE FROM TEXADA ISLAND, B.C., CANADA. **Minerals Engineering**, vol.5, n.10-12, p.1113-1121, 1992.

LINS, F.F; COSTA, L.S.N; DELGADO, O.C; GUTIERREZ, J.M.A. **Concentrador Centrífugo: Revisão e Aplicações Potenciais**. Rio de Janeiro: CETEM/CNPQ, 1992. 32.p. (Série Tecnologia Mineral, 55).

MAGALHÃES, T. A. **Estudo de alternativas para a flotação de cromita**. [s.l.] Universidade Federal do Pernambuco, 2013. 50 p. Dissertação (mestrado em Engenharia Mineral)-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal do Pernambuco, Recife, 2013.

MAGNESITA. **Outros minerais**. Disponível em: <<http://www.magnesita.com.br>> . Acesso em 05 de julho de 2017.

OROTEC. **Concentrador Falcon de Semi-Batelada**. Disponível em: <http://www.orettec.com.br/pdf/concentrador-Falcon-de-semi-batelada.pdf>. Acesso em 20 de dezembro de 2016.

MINERACAO VILA NOVA. História. Disponível em: <<http://www.mineracaovilanova.com.br>>. Acesso em 05 de julho de 2017.

SAMPAIO, C.F; TAVARES, L.M.M. **Beneficiamento Gravimétrico: Uma Introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade**. Porto Alegre: UFRGS, 2005. 605 p.

SAMPAIO, J.A; ALMEIDA, S.L.M; SILVA, A.O. Ensaio em mesas oscilatórias. In: SAMPAIO, J.A; FRANÇA, S.C.A; BRAGA, P.F.A (Ed). **Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais**. Rio de Janeiro: Cetem, 2007. p.255-265.

SAMPAIO, J.A; ANDRADE M.C; SOBRINHO, J. Aproveitamento de rejeitos de cromita por processos gravíticos. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, XVI., 2004. Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Unesc, 2004. p.283-290.

SAMPAIO, J.A; ANDRADE, M.C; PAIVA, P. R. P. Cromita. In: Luz, A.B; Lins, F.A.F (Ed). **Rochas e Minerais Industriais: Usos e Especificações.** 2^a ed. Rio de Janeiro: Cetem, 2008. p. 403-425.

SEMPRO-MINERAL SYSTEM. **Falcon SB gravity concentrators.** Disponível em: [http://seprosystems.com/products/gravity-concentrators/_Falcon-sb-gravity-concentrators.>](http://seprosystems.com/products/gravity-concentrators/_Falcon-sb-gravity-concentrators.) Acesso em 20 de dezembro de 2016.

SIQUELA, E.A. **Beneficiamento de finos de carvão por concentrador centrífugo.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012. 58 p. Dissertação (mestrado em Engenharia de Minas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais-PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.