



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS DO SUL E SUDESTE DO PARÁ
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MINAS E MEIO AMBIENTE

VINÍCIUS DA SILVA MOREIRA

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA HIDROCICLONAGEM DA USINA DO PROJETO
MANGANÊS DO AZUL

MARABÁ-PA

2011

VINÍCIUS DA SILVA MOREIRA

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA HIDROCICLONAGEM DA USINA DO PROJETO
MANGANÊS DO AZUL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente da Universidade Federal do Pará – UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Reginaldo Sabóia de Paiva.

MARABÁ-PA

2011

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca II do CAMAR/UFPA, Marabá, PA

Moreira, Vinícius da Silva

Modelagem e simulação da hidrociclonagem da usina do projeto manganês do Azul / Vinícius da Silva Moreira ; orientador, Reginaldo Sabóia de Paiva. — 2011.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Marabá, Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente, Marabá, 2011.

1. Beneficiamento de minério - Parauapebas (PA). 2. Manganês - Minas e mineração. 3. Separação (Tecnologia). I. Paiva, Reginaldo Sabóia de, orient. II. Título.

CDD: 22. ed.: 622.7098115

VINÍCIUS DA SILVA MOREIRA

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA HIDROCICLONAGEM DA USINA DO PROJETO
MANGANÊS DO AZUL

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de
Engenharia de Minas e Meio
Ambiente da Universidade Federal do
Pará – UFPA, em cumprimento às
exigências para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Minas e
Meio Ambiente.

Data da aprovação: _____

Conceito: _____

Banca examinadora:

Prof. Dr. Reginaldo Sabóia de Paiva

Prof. Dr. Lucinewton Silva de Moura

Prof. M.Sc. Marinésio Pinheiro Lima

Aos meus pais,
meus melhores professores.

AGRADECIMENTOS

À Deus, que durante toda minha estadia em Marabá me manteve determinado e saudável para o cumprimento de minhas metas e anseios acadêmicos e profissionais.

À minha família, pelo apoio e compreensão, representada pelos meus pais, Raimundo Alves Moreira e Raimunda da Silva Moreira, e irmãos, Allyne da Silva Moreira e Werney da Silva Moreira.

Ao discente e amigo Jordan Pacini pela ajuda na realização dos ensaios de hidrociclonagem.

Aos amigos Jordan Pacini, Ever Dias, Marcinato Ferreira e Victor Albuquerque pela amizade e companheirismo durante todo o período do curso, tendo fundamental participação na minha formação acadêmica e profissional.

À minha namorada, Tainara Lopes de Moraes, e sua família, pela constante companhia e conforto em momentos determinantes no final do curso.

A Prof. Dr. Reginaldo Sabóia de Paiva, pela orientação e determinação em superar os desafios durante todo o trabalho, e, principalmente, por me inserir na pesquisa científica através da concessão de bolsa de iniciação científica.

Ao CETEM, Centro de Tecnologia Mineral, pelo estágio realizado em suas instalações no Rio de Janeiro/RJ, o que ampliou meus conhecimentos em tratamentos de minérios, fundamental para a realização deste trabalho.

À Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente pelo fornecimento da estrutura da usina piloto e laboratórios para a realização dos experimentos.

À Vale, pela oportunidade do estágio na usina de beneficiamento do Manganês do Azul, pelo apoio técnico e concessão das amostras para a realização dos ensaios. Principalmente ao supervisor da usina, Rivelino Pereira, e aos funcionários Roseane Cardoso, Guilherme Cipriano e Hamilton Sales.

Se fosse fácil achar o caminho das pedras tantas pedras no caminho não seria ruim.

Humberto Gessinger

RESUMO

A Mina do Azul está localizada no município de Parauapebas-PA, distante 63 Km de sua sede. Atualmente é a maior mina de manganês em operação do Brasil, pertencente a Vale Manganês S.A. O projeto é composto por três minas, depósitos de estéril, duas barragens, oficinas, escritórios, pátios de estocagens e usina de beneficiamento. Tal usina consiste basicamente de processos de britagem, lavagem, peneiramento e classificação, gerando três produtos de diferentes granulometrias: o granulado (35-75 mm), o médio granulado (9-35 mm) e o sinterfeed (0,15 a 9 mm). Nesse contexto os hidrociclones têm papel fundamental na recuperação de sinterfeed, transformando em produto o material que seria direcionado à barragem de rejeitos. Dessa forma, além de agregar valor ao minério, essa operação unitária permite o aumento da vida útil da barragem. Para garantir que esses equipamentos funcionem corretamente, ou seja, que direcione para o overflow partículas menores que 0,15 mm, e ainda, que a partição de água para o underflow seja pequena, é necessário otimizar algumas variáveis operacionais e de projeto. A modelagem e simulação vem a contribuir com este dimensionamento de forma rápida e menos onerosa. Modelos como os de Plitt e Linch e Rao são muito utilizados até hoje. Seguindo este raciocínio foram coletadas amostras da alimentação dos hidrociclones de 4" da usina de beneficiamento da Mina do Azul para a realização dos ensaios em hidrociclone na UFPA em Marabá. A partir da análise granulométrica da alimentação, overflow e underflow desse hidrociclone, foi possível a calibração da partição de Plitt à partição experimental. Segundo o modelo, para se obter apenas partículas menores que 0,15 mm no overflow, deve-se aumentar a seção cilíndrica do hidrociclone e diminuir a percentagem de sólidos da alimentação.

Palavras-chave: Modelagem e simulação, classificação, hidrociclones, manganês.

ABSTRACT

The Manganês do Azul manganese mine is located 63 km from Parauapebas town. It is currently the largest manganese operation mine in Brazil, and it is explored by Vale Manganês SA company. In this project contain three mines, wastes deposits, two dams, workshops, offices, storage yards and mineral processing plant. This plant contain crushing processing, washing, screening and classification, obtain three products: the granulado (35-75 mm), the médio granulado (9-35 mm) and the sinterfeed (0,15 a 9 mm). The hydrocyclones have key role in the sinterfeed production, because transform in product the materials that would be directed to the dam. So, this unit operation adds value to the ore and increases the lifespan of the dam. For this equipment to work properly it's necessary that optimization of operating variables and design. For it the modeling and simulation is important method, it's a fast and cheap form. Plitt and Lynch and Rao models are used a lot today. For this work were collected feed hydrocyclones samples in the mineral processing plant. The samples was taken to UFPA, in Marabá, for the tests. From the feed, overflow and underflow analysis the Plitt model was calibrated. By the model, for obtain smaller particles that 0,15 mm in the hydrocyclone overflow is needed to increase the cylindrical section and decrease the feed solids percent.

Keywords: Modeling and simulation, classification, hydrocyclones, manganese.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Vista das três minas..	17
Figura 2: Localização da Mina de Manganês do Azul..	19
Figura 3: Mapa geológico da Província Mineral de Carajás..	20
Figura 4: Distribuição das litologias na mina..	22
Figura 5: Amostra da litologia detrítico..	23
Figura 6: Amostra da litologia pelito tabular..	23
Figura 7: Amostra da litologia pelito rico..	24
Figura 8: Amostra da litologia maciço..	25
Figura 9: Pilha pulmão da usina. Carregadeiras alimentando os silos.	26
Figura 10: Processos presentes na usina..	27
Figura 11: Silos de produtos e pátio de semiacabados..	28
Figura 12: Fluxograma da usina..	28
Figura 13: Equipamentos de classificação da usina..	29
Figura 14: Esquema de um hidrociclone..	30
Figura 15: Características das famílias de hidrociclones..	31
Figura 16: Tipos de alimentação ..	32
Figura 17: Esquema dos tipos de descarga de um hidrociclone..	33
Figura 18: Distribuição granulométrica..	35
Figura 19: Imagem ilustrativa do equipamento utilizado nos ensaios..	42
Figura 20: Detalhe do hidrociclone utilizado..	46
Figura 21: Análise granulométrica da alimentação, underflow e overflow..	47
Figura 22: Balanço de massa..	48
Figura 23: Curva de partição real..	50
Figura 24: Curva padrão de partição simulada e experimental (partição corrigida)..	51

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	13
3	REVISÃO DE LITERATURA	14
3.1	MANGANÊS.....	14
3.2	MINERAIS DE MANGANÊS	15
3.3	MINA DE MANGANÊS DO AZUL	17
3.3.1	Localização da mina e aspectos fisiográficos	18
3.3.2	Geologia regional	19
3.3.3	Minérios	21
3.3.3.1	Minério de Manganês Detrítico (DET).....	22
3.3.3.2	Pelito Manganífero Tabular (PMT).....	23
3.3.3.3	Pelito Manganífero Rico (PMR)	24
3.3.3.4	Minério de Manganês Maciço (MMM).....	24
3.3.4	Usina de beneficiamento	25
3.4	HIDROCICLONES	29
3.5	DESEMPENHO DE HIDROCICLONES	31
3.6	PRINCIPAIS VARIÁVEIS DO PROCESSO	33
3.6.1	Diâmetro de corte	33
3.6.2	Propriedades físicas do sistema sólido-fluido	34
3.6.3	Distribuição granulométrica das partículas	34
3.6.4	Variáveis geométricas e operacionais	36
3.7	MODELOS DE HIDROCICLONES	37
3.7.1	Modelo de Linch e Rao	37
3.7.2	Modelo de Plitt	38
4	MATERIAIS E MÉTODOS	41
4.1	AMOSTRAGEM.....	41
4.2	ENSAIOS DE HIDROCICLONAGEM.....	41
4.3	CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	43
4.4	MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE HIDROCICLONES.....	44
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
5.1	ENSAIOS DE HIDROCICLONAGEM.....	46

5.2	CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	47
5.3	BALANÇO DE MASSA	47
5.4	MODELAGEM E SIMULAÇÃO	49
6	CONCLUSÃO	52
	REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

O manganês foi reconhecido como elemento químico em 1774, após ser identificado por J.G. Gahn ao reduzir o dióxido de manganês com o carbono (Vieira, 2008). Como possui uma distribuição muito irregular na face da Terra já chegou a ser considerado um metal estratégico. Hoje sua importância se baseia principalmente na indústria metalúrgica, participando na composição do aço.

A maior mina de manganês do Brasil se encontra no sudeste do Pará, a cerca de 57 km do município de Parauapebas. O projeto conta com três minas, usina de beneficiamento, depósito de estéril e duas barragens, atualmente, uma de captação de água e a outra para despejo de rejeito da usina. Esta, por sua vez, é composta basicamente por operações de britagem, lavagem, peneiramento e classificação.

Nesse contexto, os hidrociclones têm papel fundamental no aproveitamento de partículas finas, de forma a aumentar a recuperação de minério e ainda, a vida útil da barragem, transformando em produto o que seria descartado. O funcionamento dos hidrociclones se baseia na ação da força centrífuga que a polpa adquire ao ser bombeada e na ação da gravidade. Estes equipamentos são relativamente simples e não possuem partes móveis, facilitando consideravelmente sua manutenção. Entretanto o consumo energético é superior a de outros equipamentos, uma vez que necessita do funcionamento ininterrupto de bombas (Chaves, 2006).

A modelagem e simulação de hidrociclonagem aparecem como importantes alternativas para garantir seu correto funcionamento, economizando tempo e dinheiro, recursos escassos em qualquer processo industrial. Uma vez criado um modelo que represente de forma fidedigna os processos da usina, para se observar os efeitos de modificações que venham a sanar algumas limitações da planta, é necessária apenas a realização de algumas simulações em computador. Não sendo, portanto, necessário que tais modificações propostas sejam realizadas na prática, o que necessitaria de deslocamento de mão-de-obra, gastos com amostragens e tempo de realização das análises.

Softwares específicos foram criados ao longo dos anos, sendo cada vez mais inseridos no dia a dia de empresas de mineração. Tais softwares utilizam modelos já consagrados em modelagem de hidrociclones, como o modelo de Plitt e de Lynch e Rao. Uma forma mais simples de utilização desses modelos é através de planilhas eletrônicas.

2 OBJETIVOS

Deseja-se, a partir dos ensaios em laboratório, fazer a calibração do modelo de Plitt ao funcionamento da hidrociclonagem da usina da mina do Manganês do Azul, de sorte que as simulações posteriores representem fielmente o funcionamento do hidrociclone, possibilitando a otimização das variáveis geométricas e operacionais do processo.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Determinação do diâmetro mediano da partição (d_{50});
- b) Determinação do diâmetro de corte (d_{95});
- c) Determinação da curva padrão de partição;
- d) Dimensionamento do hidrociclone;
- e) Otimização das variáveis operacionais.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 MANGANÊS

O manganês é metal de transição, situando-se no grupo 7 (7B) da tabela periódica dos elementos, sendo Mn seu símbolo, número atômico 25 e massa atômica 55. Como a grande maioria dos metais, é sólido a temperatura ambiente.

Devido à distribuição muito irregular na face da Terra, o manganês entre as décadas de 40 e 60 foi considerado um metal estratégico. As reservas mundiais de manganês, medidas e indicadas, possuem cerca de 5,9 bilhões de toneladas. As maiores reservas se localizam na África do Sul, totalizando 4 bilhões de toneladas, e no Brasil, com 570 milhões de toneladas. Estes dois países são os maiores produtores de concentrado do manganês. Em 2008 o Brasil produziu 3 milhões de toneladas, o que correspondeu a 20,1% do mercado mundial, enquanto que a África do Sul produziu 2,6 milhões de toneladas, sendo 19,1% do mercado mundial (DNPM, 2009).

A importância desse elemento se deu no início da era industrial, como importante insumo na produção do aço, devido suas propriedades dessulfurante e desoxidante, conferindo maior ductibilidade à liga. O minério de manganês denominado químico é utilizado na coloração de tijolos e na pigmentação de tintas. Seu sulfato é comercializado na produção de fertilizantes e rações animais. A forma não metalúrgica mais importante desse minério é na fabricação de pilhas.

Nessa última aplicação o dióxido de manganês é usado como catodo e despolarizador em pilhas zinco/carbono (Zn/C). Para ser utilizado na fabricação de pilhas o dióxido de manganês necessita apresentar propriedades como o alto grau de pureza, grande atividade eletroquímica e livre de impurezas como cobre, níquel, arsênio, cobalto e teores de óxido de ferro inferiores a 4% (Roriz, 2010). Com o aumento da preocupação ambiental nos últimos anos, vê-se a necessidade da substituição dos íons cobalto (LiCoO_2) e níquel (LiNiO_2), que são ambientalmente tóxicos, na fabricação de pilhas por outros de menos toxicidade. O espinélio (LiMn_2O_4) é uma boa alternativa para tanto, este por sua vez possui íons de manganês.

A indústria de aço e outras ligas de manganês participa com 85% do consumo desse minério no Brasil, seguido pela fabricação de pilhas com 10,2% e pela indústria química com 4,8% (DNPM, 2004).

Dependendo do minério de manganês, o seu teor pode variar. De acordo com essa variação tem-se a denominação “minério de manganês” quando é composto por mais de 35% de manganês, “minério ferruginoso” para quantidades de manganês que variam entre 10 e 35% e “minério de ferro manganésífero” quando o teor de manganês é superior a 5% e inferior a 10%.

3.2 MINERAIS DE MANGANÊS

O manganês é encontrado em mais de uma centena de minerais, entretanto apenas alguns constituem minerais de minério, ou seja, que possuem viabilidade econômica para extração. Os minérios mais importantes desse metal são os dióxidos, onde a pirolusita (MnO_2), a psilomelana e a manganita ($Mn_2O_3 \cdot H_2O$) são suas principais fontes comerciais (Luz e Lins, 2008). Na tabela 1 encontram-se os minerais de manganês encontrados na mina do Azul, assim como informações sobre os mesmos.

Tabela 1: Minerais de manganês presentes na mina do Azul.

Minerais	Fórmula Química	Teor molecular de Mn	Descrição
Criptomelana 	KMn_8O_{16}	59,83%	Densidade de 5,5 e 4,5 g/cm^3 . Ocorrência em depósitos supergênicos e sedimentares.

Minerais	Fórmula Química	Teor molecular de Mn	Descrição
<p>Pirolusita</p> 	$\text{MnO}_{2-\beta}$	62-63%	Formado pela oxidação de outros minerais de manganês. Possui densidade de $4,75 \text{ g/cm}^3$
<p>Todorokita</p> 	$[(\text{Na}, \text{Ca}, \text{KMn}^{2+})(\text{Mn}^{4+}, \text{Mn}^{2+}, \text{Mg})] \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$	56,54%	Seu nome originado na mina de manganês em Todoroki, no Japão. Tem densidade de 3,49 a $3,82 \text{ g/cm}^3$.
<p>Nsutita</p> 	$[\text{Mn}^{4+}, \text{Mn}^{2+}, (\text{O}, \text{OH})_2]$	62,97%	Sua densidade varia de 4,2 a $4,9 \text{ g/cm}^3$. Muito importante devido suas propriedades eletroquímicas.

Fonte: Vieira, J.M.A. (2008).

3.3 MINA DE MANGANÊS DO AZUL

No ano de 1965, a United States Steel, empresa norte americana, iniciou pesquisas por reservas de manganês, seu objetivo era sua aplicação no mercado de pilhas e baterias. Inicialmente descobriu a reserva de minério de ferro de Carajás e, em 1971, a reserva de manganês do Azul. Aproveitando a infraestrutura logística criada para o escoamento da produção das minas de ferro, as operações de lavra e beneficiamento de manganês tiveram início em 1985 (Vale, 2010).

Atualmente é a maior mina de manganês do Brasil em operação. A área total impactada é cerca de 280 ha, com 1,1 km de largura máxima e 5 km de extensão, abrangendo as três minas do projeto, mina 1, 2 e 3, como pode ser visto na figura 1. (Souza *et al.* 2006).

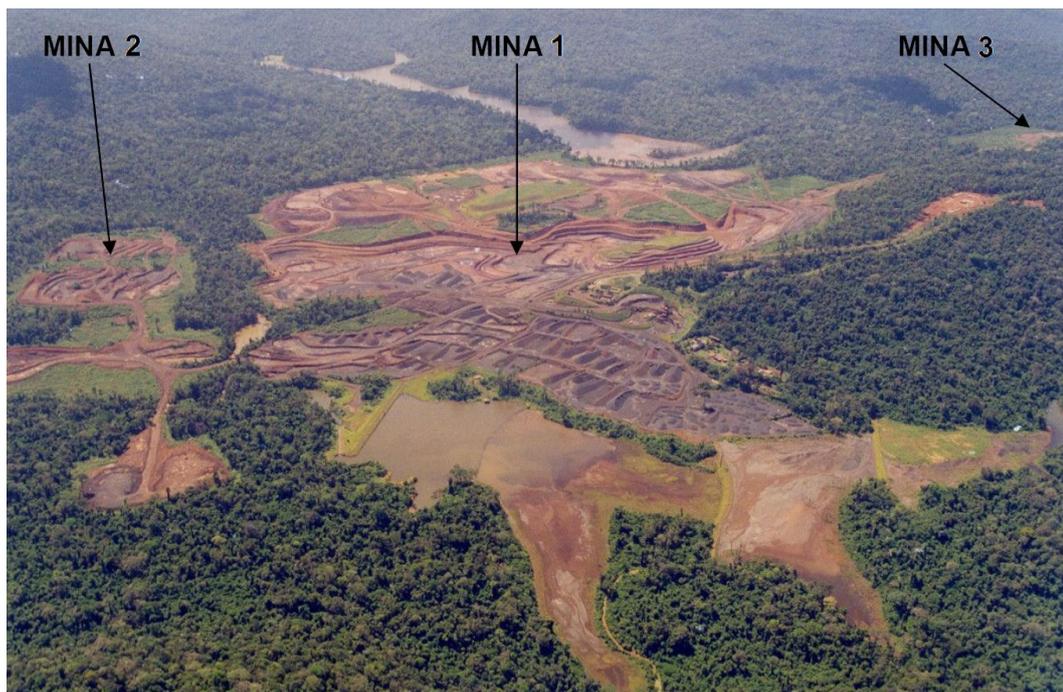


Figura 1: Vista das três minas. (Modificada de Souza *et al.* 2006).

O método de lavra utilizado é mina a céu aberto, com a lavra feita por desmonte mecânico através de tratores de esteira e carregadeiras. Caminhões de grande e pequeno porte transportam os materiais, estéril e minério, até as pilhas de estéril e usina de beneficiamento, respectivamente.

O beneficiamento do minério é feito em uma planta com operações de britagem, peneiramento, lavagem e classificação. A água utilizada no processo é advinda 100% da barragem do Kalunga, não havendo, portanto reaproveitamento. Os rejeitos são lançados na barragem do Azul. Os produtos da usina possuem três faixas granulométricas distintas, denominadas de granulado, com granulometria variando de 35 a 75 mm, médio granulado (de 9 a 35 mm) e o sinterfeed (de 0,15 a 9 mm). Esses produtos são direcionados a quatro silos, sendo dois de médio granulado, um de granulado e um de sinterfeed. Tais silos descarregam o minério em caminhões, que os direcionam ao pátio de semiacabados.

Após o tempo pré-determinado de residência no pátio, a fim de se reduzir a umidade do material de forma a atender a especificação dos clientes, o minério é transportado à pera ferroviária da mina de ferro de Carajás através de caminhões, onde após o carregamento dos vagões é levado ao Porto de Ponta da Madeira, em São Luiz - MA. Viradores de vagões são utilizados para descarregar o trem, sendo transportado ao pátio de estocagem e posteriormente embarcado em navios até seus clientes.

Para se obter produtos em conformidade com especificações requeridas pelos clientes, são feitas amostragens do minério na mina para análises químicas e granulométricas, de forma a se controlar a qualidade do minério que chega até a usina de beneficiamento. Tal trabalho é repetido ao final de cada turno da usina. Os principais contaminantes são o Fe, Al_2O_3 , SiO_2 , K_2O , P, CaO, MgO, Na_2O , TiO_2 , H_2O e a PPC (perda por calcinação) (Sampaio, 2002).

3.3.1 Localização da mina e aspectos fisiográficos

O projeto Manganês do Azul está localizada na Província Mineral de Carajás, no município de Parauapebas-PA, estrada Raimundo Mascarenhas, km 57. Dista 40 Km do Núcleo Urbano de Carajás e 57 km da sede do município.

O projeto Manganês do Azul, assim como toda a Serra dos Carajás está localizada em uma área de clima tropical úmido de monção, com temperaturas que variam de 10 a 35°C e umidade relativa média de 85% (Costa, 2007). A Província Mineral de Carajás inclui terrenos relativamente elevados se tratando de Amazônia, uma vez que as altitudes variam entre 600 e 900 m (Da Costa *et al.* 2008). A mina do Azul encontra-se entre encostas de platô leste - oeste com até 600 m de altitude, entre os igarapés Azul, atual barragem de rejeito da usina, e

Kalunga, atualmente utilizada como barragem de captação de água, mas que no passado era utilizada para deposição dos rejeitos.

A figura 2 mostra a localização das principais minas presentes na Serra dos Carajás, assim como os modos de acesso e os centros urbanos próximos.

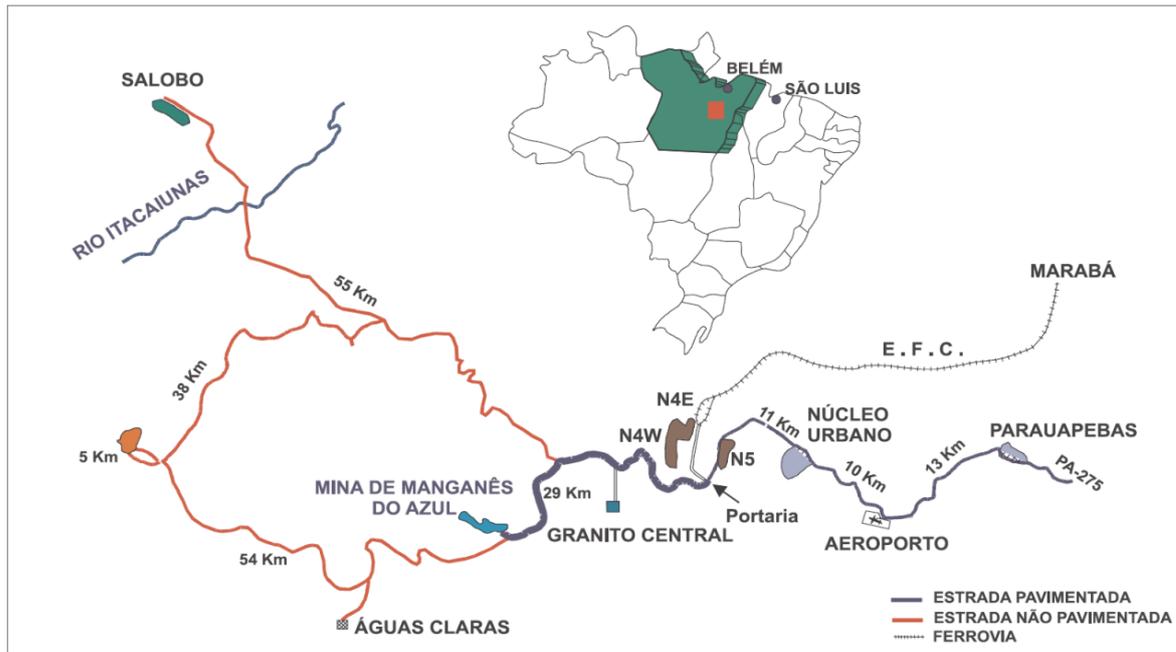


Figura 2: Localização da Mina de Manganês do Azul. Fonte: Da Costa *et al.* (2008).

3.3.2 Geologia regional

O depósito pertence à formação Azul, do Grupo Águas Claras, e está associado aos sedimentos pelíticos. Os sedimentos presentes na região foram depositados em plataforma marinha e estão representados por conglomerados, arenitos brancos, siltitos e folhelhos pretos, ricos em matéria orgânica. Segundo Bernadelli (1982) *apud* Dardenne & Schobbenhaus (2001), a mineralização do protominério de manganês é associada à seqüência pelítica na forma de duas unidades manganesíferas. Tal unidade é composta por rodocrosita, quartzo, filossilicatos, feldspato e matéria orgânica. Já a mineralização secundária é de origem laterítica, sendo resultado do enriquecimento supergênico da Unidade Manganesífera Inferior, constituindo a maior parte do minério explorado.

O teor de manganês nos depósitos subsuperficiais, que são representados por pelitos manganésíferos, se encontra entre 20 e 30%, com camadas que podem ter até 60 metros de espessura. Nessa camada também possui bióxidos de manganês, com teor médio de 46% e espessura média de 15 metros, e o mineral predominante é nsutita. Os pisolitos se localizam nos depósitos superficiais, sua espessura pode atingir 20 metros. Seu conteúdo de manganês, após deslamagem, varia de 14 a 18%. Os materiais detríticos também se encontram nessa porção da jazida, representando o minério mais rico da mina, com teor médio de 45% de manganês, sendo a criptomelana o mineral principal (Dardenne & Schobbenhaus, 2001). A figura 3 mostra o mapa geológico da região considerada, pertencente à Formação Águas Claras.

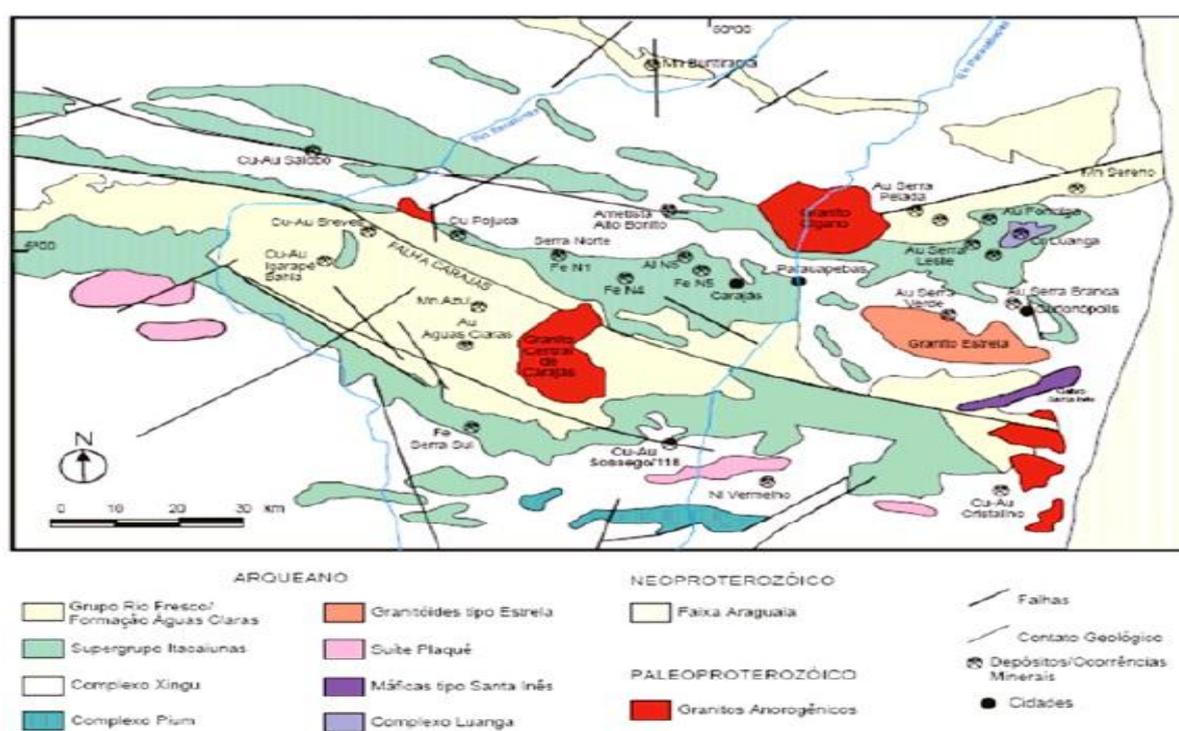


Figura 3: Mapa geológico da Província Mineral de Carajás. Fonte: Bernardelli (1982).

De acordo com Bernadelli e Beisiegel (1978) *apud* Dardenne & Schobbenhaus (2001) a mina possui uma a camada superior, podendo chegar a 70 metros de espessura, de quartzo anguloso, matriz argilosa e siltito com óxidos de manganês, com teores aproximados de 6% de manganês, tal parcela da coluna estratigráfica da mina pertence a Unidade 6. Com espessuras entre 33 e 54 metros, a Unidade Manganésifera Superior, Unidade 5, possui leitos intercalados e leitos argilo-carbonatados, e mais próximos a superfície transformam-se me

pelitos ricos, que é um dos litotipos manganésíferos presentes na mina, os teores de manganês se encontram entre 14 e 16%. Siltitos avermelhados, estratificado, placóides com leitões intercalados de concreções manganésíferas estão na Unidade 4, onde os teores de manganês são inferiores a 5%, com espessura entre 17 e 44 metros. A Unidade 3, com espessura variando de 16 a 50 metros, e teores de manganês não chegando a 4%, possui silito carbonoso, estratificado, placóide, com intercalações mais argilosas de folhelho carbonoso na base.

Na Unidade Manganésífera Inferior, Unidade 2, ocorre camada de folhelho manganésífero carbonático, ou pelito manganésífero, alternância entre estratos argilosos com rodocrosita, quartzo e pirita. Esta unidade sofreu alteração e enriquecimento, produzindo material manganésífero granulado e pelitos enriquecidos. Os teores de manganês nesta unidade se encontram entre 21 e 16%. Completando a coluna estratigráfica da mina, chega-se a Unidade 1, onde estão presentes os siltitos e argilitos carbonatados escuros, em que o teor de manganês não supera 14%, com espessuras aproximadas de 65 metros.

3.3.3 Minérios

Uma característica marcante dessa mina é a presença de várias litologias manganésíferas, o que deixa um pouco mais complexa a adequação da usina de beneficiamento a todos eles, uma vez que se comportam de formas distintas no decorrer do processo de beneficiamento. Os minérios são o maciço, detrítico, pelito rico e pelito tabular, tendo ainda o pelito silito, que hoje é estéril, em fase de testes para futura denominação de minério. A figura 4 mostra a distribuições desses litotipos nas minas do projeto.

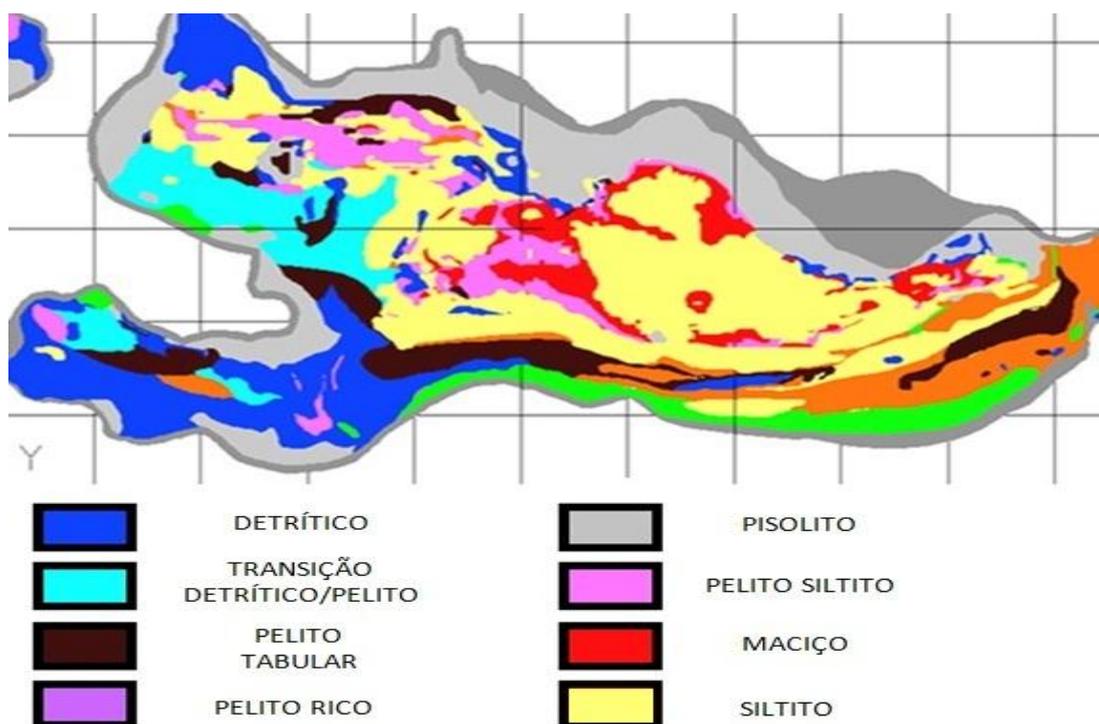


Figura 4: Distribuição das litologias na mina. Fonte: Vale (2008).

O plano de lavra é preparado com o corte dos minérios de manganês na faixa do sinterfeed em 32% para as litologias detrítico e pelito tabular, porém com a tendência de mercado para valorização do preço do Manganês e absorção de produtos com teor inferior ao praticado atualmente pode viabilizar reservas com teor mais baixo. A descrição de cada litologia manganésifera segundo Vale (2009) segue abaixo:

3.3.3.1 Minério de Manganês Detrítico (DET)

Minério superficial formado pelos detritos das unidades manganésíferas inferiores, com a presença de fragmentos angulosos e pouco arredondados de tamanhos que variam de 1,0 a 10,0 cm, coesos, compactos e duros com tonalidades de cinza claro a escuro imerso em matriz argilosa de coloração amarela avermelhado. Principais minerais são: criptomelana [$K(Mn^{2+}, Mn^{4+})_8O_{16}$], pirolusita [MnO_2], caulinita [$Al_2Si_2O_5(OH)_4$] e gibsita. A espessura dessa camada varia de 1 a 20 metros. O teor global está entre 30 e 40% de Mn. Nos produtos da usina os teores se distribuem da seguinte forma: granulado: 44%; médio granulado: 43%; sinterfeed: 38%. Na usina, esta litologia produz muito médio granulado, pouco granulado e sinterfeed, com uma recuperação de 69%,



Figura 5: Amostra da litologia detrítico. Fonte: Vale (2008).

3.3.3.2 Pelito Manganífero Tabular (PMT)

Folhelhos manganíferos carbonosos de coloração cinza intercalados com pequenas camadas de siltitos e caulinita, apresenta fissilidade, granulometria fina, tendo como uma das características principal o baixo teor de fósforo. Os principais minerais são: criptomelana [$K(Mn^{2+}, Mn^{4+})_8O_{16}$], todorokita [$(Mn^{2+}, Ca, Mg)Mn_3^{+4O}7H_2O$], Nsutita [∞MnO_2], caulinita [$Al_2Si_2O_5(OH)_4$] e gibsita. A espessura desta camada varia de 1 a 60 metros e forma lenticular. No granulado os teores giram em torno de 40% de Mn, 43% no médio granulado e 41% no sinterfeed. Sendo o teor global acima de 35%, na mina. Dentre as litologias presentes na mina, é a que gera menor recuperação na usina, 58%.



Figura 6: Amostra da litologia pelito tabular. Fonte: Vale (2008).

3.3.3.3 Pelito Manganífero Rico (PMR)

Folhelhos manganíferos carbonosos de coloração cinza escuro intercalado com pequenas lamina síltica esbranquiçadas, apresenta fissilidade, granulometria fina e alto teor de Mn. Os principais minerais são: criptomelana $[K (Mn^{2+}, Mn^{4+})_8 O_{16}]$, todorokita $[(Mn^{2+}, Ca, Mg)Mn_3^{+4O} H_2O]$, pirolusita $[MnO_2]$, nsutita $[\infty MnO_2]$, Caulinita $[Al_2Si_2O_5(OH)_4]$ e gibsita. A espessura desta camada varia de 1 a 60 metros e forma lenticular. O teor global desse minério é de 35 a 40% de Mn. No granulado os teores são de 45%, no médio granulado, 47%, e no sinterfeed, 46%.



Figura 7: Amostra da litologia pelito rico. Fonte: Vale (2008).

3.3.3.4 Minério de Manganês Maciço (MMM)

Folhelhos cinzas a negros, com aspecto maciço laminar com muita matéria orgânica carbonosa (MOC) e presença de lamina de caulim, por vezes apresenta blocos de maciço de tamanhos métricos de características densas e bastante duros. Sendo esta litologia o minério mais rico da mina. Os principais minerais são: criptomelana $[K (Mn^{2+}, Mn^{4+})_8 O_{16}]$, nsutita $[\infty MnO_2]$ e todorokita $[(Mn^{2+}, Ca, Mg)Mn_3^{+4O} H_2O]$. A espessura dessa camada varia de 1 a 15 metros e formato lenticular. O minério maciço é o que gera, além de alta recuperação, 82%, os maiores teores de Mn: global: >45%; granulado: 51%; Médio Granulado: 51%; Sinterfeed: 52%.



Figura 8: Amostra da litologia maciço. Fonte: Vale (2008).

3.3.4 Usina de beneficiamento

A usina de beneficiamento da Mina do Azul é composta basicamente por processos de britagem, lavagem, peneiramento, e classificação. O minério é transportado da mina para a pilha pulmão por caminhões. Dessa pilha é levado por carregadeiras a dois silos, os quais alimentam duas linhas de britagem, figura 9. Correias transportadoras direcionam o ROM às peneiras desbastadoras com dois decks, tendo a função de retirada dos finos, que são direcionados à duas peneiras desaguadoras, sendo o oversize o sinterfeed, e seu undersize é direcionado à dois hidrociclones de 26". Seu overflow é rejeito e seu underflow se dirige ao classificador espiral ou, através de um by-pass, para uma peneira desaguadora. O oversize desta última peneira é produto sinterfeed e o undersize é rejeito.



Figura 9: Pilha pulmão da usina. Carregadeiras alimentando os silos.

O oversize das peneiras desbastadoras são direcionados a dois scruber's, com o objetivo de desagregar o minério e, principalmente, o estéril (composto basicamente por siltitos), que por sua granulometria muito fina ao ser desagregado é passante nas peneiras e é direcionado ao classificador espiral, saindo por seu overflow. A descarga dos scruber's é peneirada em duas peneiras classificadoras com dois decks, sendo a primeira malha de 75 mm e a segunda de 9 mm, que são justamente os limites superior e inferior, respectivamente, do produto granulado e médio granulado. O undersize é direcionado a um classificador espiral, objetivando a recuperação das partículas finas. O transbordo desse equipamento é direcionado aos hidrociclones de 4", com overflow lançado no tanque de rejeito e o underflow em uma peneira desaguadora, seu oversize é produto sinterfeed e seu undersize é rejeito.

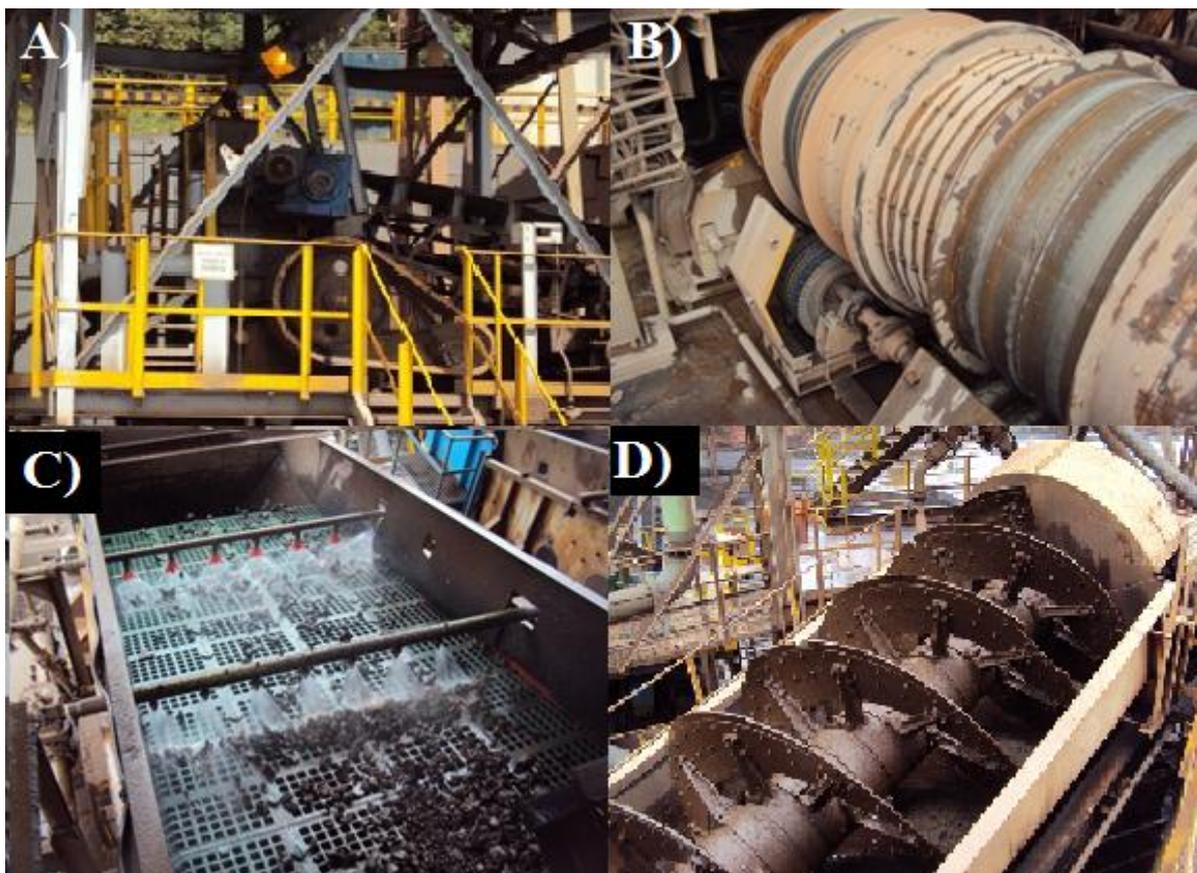


Figura 10: Processos presentes na usina: A) Britagem. B) Lavagem. C) Peneiramento e D) Classificação.

O retido na primeira malha das peneiras classificadoras é rebritado, de forma que todo o minério esteja numa granulometria abaixo de 75 mm. O retido na segunda malha (-75+9 mm) é peneirado em equipamentos com dois decks, o primeiro com malha de 35 mm e o segundo com malha de 9 mm. Essas malhas objetivam a separação entre granulado e médio granulado, sendo o retido na malha de 35 mm o produto granulado, que é direcionado por correias transportadoras a um silo, e o retido na malha de 9 mm o produto médio granulado, também direcionado a dois silos por correias transportadoras. Dessa forma, somando com o silo de sinterfeed, a usina possui quatro silos de produtos. Caminhões são alimentados por estes silos, transportando os produtos ao pátio de semiacabados, onde depois de cumprido seu tempo de residência, que objetiva a perda de umidade, é transportado à pera ferroviária da mina de ferro, distante 29 km.



Figura 11: Silos de produtos e pátio de semiacabados.

Todos os processos citados estão sintetizados no fluxograma abaixo (figura 12):

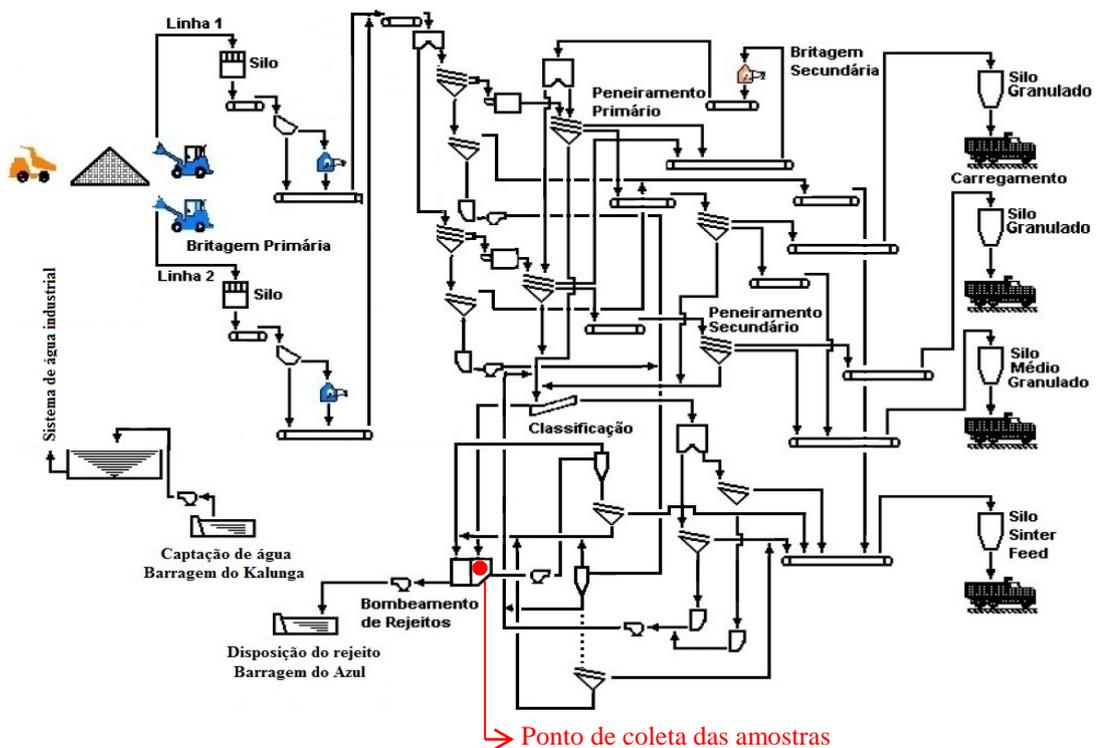


Figura 12: Fluxograma da usina. (Modificada de Sampaio, 2002).

A importância da classificação nesta usina se baseia na recuperação das partículas finas do minério, que são comercializadas como sinterfeed. Dessa forma é possível agregar valor ao que seria designado como rejeito e ainda aumentar a vida útil da barragem. Os equipamentos para este fim são os hidrociclones de 26” e 4” e o classificador espiral (figura 13).



Figura 13: Equipamentos de classificação da usina. A) Hidrociclones de 26”. B) Hidrociclones de 4”. C) Classificador espiral.

3.4 HIDROCICLONES

Os hidrociclones são equipamentos constituídos por uma parte cilíndrica e uma parte cônica, com três orifícios por onde entra a alimentação e saem os produtos, o grosso pelo underflow e o fino pelo overflow (Valadão e Araújo, 2007). O equipamento é alimentado através de um orifício tangencial na parte superior da seção cilíndrica, injetada por uma bomba a altas pressões. O fluxo da polpa dentro do ciclone é governado pelas forças radiais, verticais e horizontais. As partículas mais grossas são lançadas para as extremidades do equipamento, enquanto de as partículas finas ficam no centro do mesmo. A gravidade direciona as partículas grossas ao underflow, e fluxo ascendente de ar provocado pela pressão negativa gerada dentro do equipamento transportam as partículas finas ao overflow.

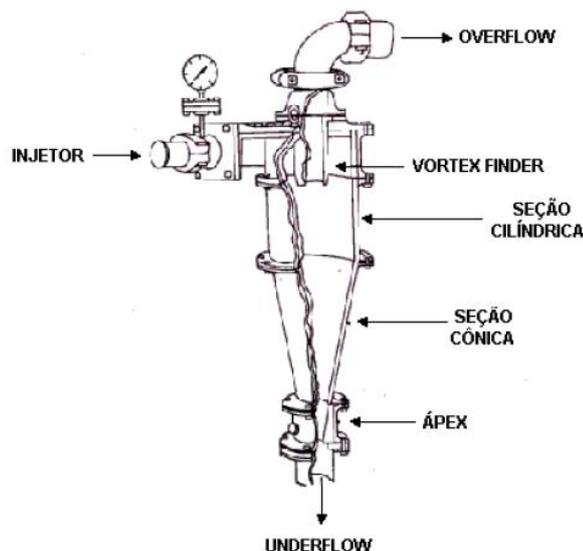


Figura 14: Esquema de um hidrociclone. Fonte: Luz (2004).

Foi desenvolvido por Dutch States Mines Department, na Holanda, sendo utilizado para classificações finas, entre 100# e 2 mm (Chaves, 2006). É o equipamento mais utilizado em circuito fechado com moinhos, devido principalmente sua eficiência não ser alta, entre 60 e 70%. Dessa forma é possível o retorno de material fino para o moinho, o que aumenta a eficiência da moagem.

Outras aplicações em que os hidrociclones são empregados: Desaguamento, através de ajustes nas variáveis geométricas e operacionais o equipamento elimina maior parte da água na polpa; Deslamagem, utilizada para eliminar as partículas finas; Classificação seletiva, utilizando-se uma configuração em série se obtém um conjunto de produtos com granulometrias definidas; Pré-concentração, a concentração é feita por gravidade, onde os minerais mais densos são descartados pelo underflow, é conseguido com hidrociclones de fundo chato (Carrisso e Correira, 2004).

Comparativamente a outros equipamentos de classificação os hidrociclones têm a vantagem de possuir alta capacidade em relação à área ocupada, fácil controle operacional, entra em regime rapidamente e de fácil manutenção. Entre as desvantagens destaca-se principalmente o custo operacional mais elevado, uma vez que por necessitar de bombas funcionando ininterruptamente é elevado o custo energético. Eficiência de classificação menor que a de classificadores espirais e falta de capacidade de armazenar grande volume de polpa.

Quanto à geometria, as proporções entre as dimensões do equipamento e de seus orifícios, os hidrociclones podem ser, principalmente, do tipo Bradley, Rietema e Krebs. A figura 15 mostra estas configurações, sendo D_i o diâmetro do inlet, D_c o diâmetro do hidrociclone, D_o o diâmetro do vortex finder, L o comprimento do equipamento, L_1 o comprimento da parte cilíndrica e ϕ o ângulo da parte cônica.

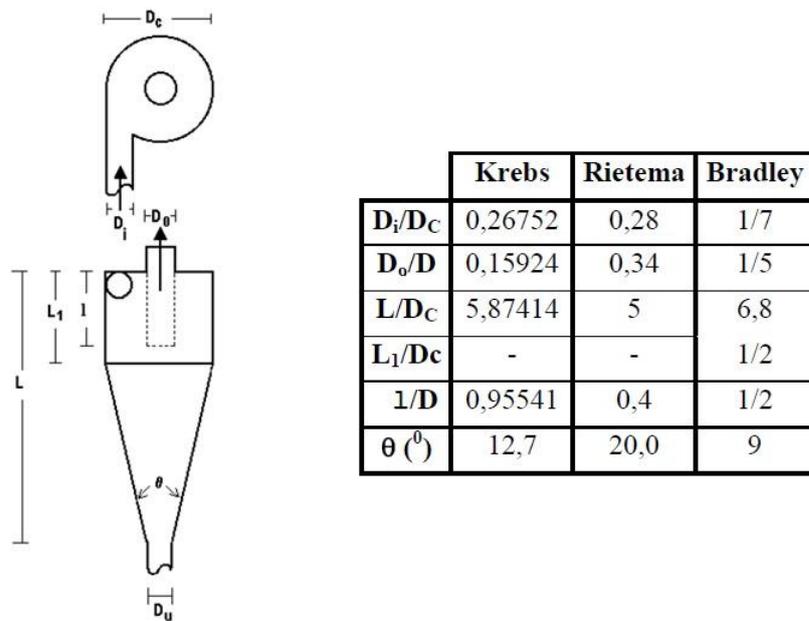


Figura 15: Características das famílias de hidrociclones. (Adaptado de Arruda *et al.* 2001).

O local de instalação desses equipamentos sempre são pontos altos na usina, uma vez que o bombeamento da alimentação é regra. Dessa forma os produtos do hidrociclone escoam por gravidade para as operações posteriores, economizando energia.

3.5 DESEMPENHO DE HIDROCICLONES

O desempenho dos hidrociclones é influenciado por suas dimensões, pelas variáveis operacionais e pelas propriedades físicas dos sólidos e da polpa alimentada (Luz, 2004). Entende-se como variáveis geométricas o diâmetro do equipamento, do apex, do vortex finder, do inlet, ângulo da parte cônica, altura da seção cilíndrica. As variáveis operacionais são a vazão de fluido e concentração de sólidos na alimentação, enquanto que a densidade do sólido e do fluido, viscosidade do fluido, distribuição granulométrica das partículas são as

propriedades do sistema sólido-fluido de maior influência no desempenho de hidrociclones (Massarani e Scheid, 2000).

As usinas de beneficiamento cada vez mais necessitam da recuperação de frações mais finas dos minérios, para tanto se utilizam de hidrociclones de pequeno diâmetro a altas pressões. Entretanto esbarrasse na necessidade de grandes áreas para tal instalação, uma vez que para altas vazões tem-se que recorrer a grandes quantidades desses equipamentos. Outros problemas são o desgaste dos revestimentos, os altos custos com o bombeamento e a dificuldade de se distribuir de forma homogênea a polpa nos hidrociclones. A utilização de equipamentos de grandes diâmetros resolveria estes problemas, entretanto diminuiria o desempenho da hidrociclonagem. Equipamentos com alimentação tangencial se mostra limitado em relação aos que possuem alimentação involuta. Tal fato se dá pela diminuição da turbulência, o que permite uma separação mais fina e com alta capacidade (Drucker *et al.* 2001). De forma semelhante atua o fluxo da alimentação em uma entrada retangular, pois orientam as linhas de corrente do escoamento, evitando a perturbação do fluxo (Chaves, 2006). A figura 16 mostra as duas geometrias dos orifícios, tangencial e involuta.

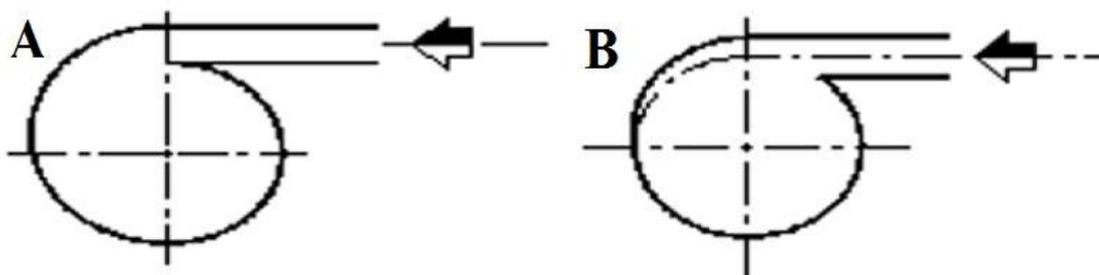


Figura 16: A) Alimentação tangencial. B) Alimentação involuta. Fonte: Drucker *et al.* (2001)

Através do comportamento do fluxo do underflow é possível se retirar considerações sobre o desempenho do hidrociclone. Descargas do tipo “cordão” indica que está havendo perda de minério para o overflow, mostrando que a abertura o apex é insuficiente, o que impede a entrada o fluxo ascendente de ar que carrega as partículas finas para o overflow. Comportamento do tipo “guarda-chuva” indica que a abertura do apex é muito grande, de forma que as partículas finas dirigem-se ao underflow. Quando o fluxo assemelha-se ao de um “chuveiro” o desempenho do hidrociclone está em um nível adequado. A figura 17 mostra tais comportamentos.

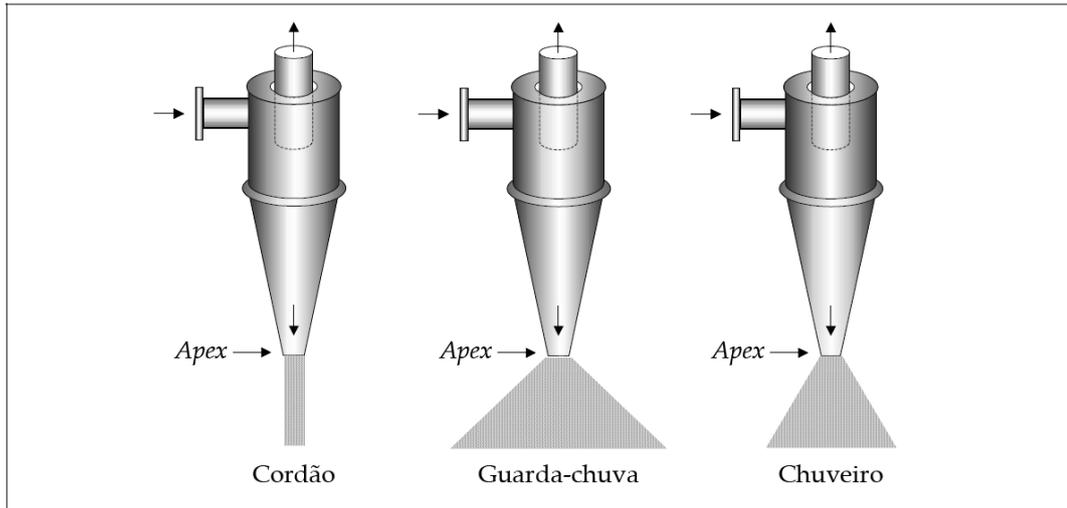


Figura 17: Esquema dos tipos de descarga de um hidrociclone. Fonte: Sampaio *et al.* (2007).

3.6 PRINCIPAIS VARIÁVEIS DO PROCESSO

3.6.1 Diâmetro de corte

O diâmetro de corte é um parâmetro criado para caracterizar granulometricamente uma população de partículas. Em peneiramento esta caracterização se dá através de faixas de tamanhos, com um limite superior e inferior. Em que as partículas são passantes em uma malha e retidas em outra. O diâmetro de corte usualmente utilizado nesta operação unitária é o d_{80} . O seu valor será a malha pela qual 80% das partículas são passantes. A distribuição granulométrica do material será dada através da plotagem de uma curva que mostra a percentagem de material em cada uma destas faixas de tamanho. No entanto isto não é possível em operações de classificação, pois não há limites superiores e inferiores de tamanho no material. Dessa forma o diâmetro mediano da partição (d_{50}) é utilizado para se saber o tamanho das partículas com mesma probabilidade de se direcionar ao overflow e underflow.

Para se encontrar o d_{50} em uma operação de classificação, uma hidrociclonação, por exemplo, é necessária a coleta de amostras e análise granulométrica da alimentação, underflow e overflow. Calcular a partição para o underflow, considerar a curto-circuitagem de finos para o underflow e recalculá-la, encontrando chamada partição corrigida. Com as malhas utilizadas para análise granulométrica e com a partição corrigida, através de

interpolação, encontra-se a malha correspondente a 50% na partição corrigida. Este diâmetro é muito importante para a modelagem e simulação, uma vez que todos os modelos a utilizam.

O d_{95} é a malha pelo qual 95% do overflow é passante. Seu valor é definido através da análise granulométrica do overflow, definir o passante acumulado em cada malha e interpolar esses valores com o tamanho das malhas de forma a encontrar o diâmetro que corresponde à 95% na coluna do passante acumulado. Por caracterizar melhor o processo de classificação, o d_{95} é considerado por muitos autores o diâmetro de corte, enquanto que o d_{50} é apenas o diâmetro mediado da partição.

3.6.2 Propriedades físicas do sistema sólido-fluido

Um dos fatores que aumentam o diâmetro de corte é a grande presença de lamas na polpa que alimentará os hidrociclones. Isto é causado devido o aumento da viscosidade da polpa, dificultando a sedimentação das partículas no campo centrífugo. De forma contrária ocorre com o aumento da percentagem de sólidos, o que diminui a viscosidade e a densidade da polpa, facilitando a sedimentação das partículas e conseqüentemente diminuindo o diâmetro de corte.

3.6.3 Distribuição granulométrica das partículas

Distribuição granulométrica é a forma como as massas se distribuem em cada faixa granulométrica, definida em um limite superior e inferior, dessa forma não se pode determinar o tamanho exato das partículas, mas através desse conceito é possível determinar que certa massa é menor que uma malha e maior que outra malha, através de peneiramento, sendo passante em uma e retida em outra malha.

A figura 18 (A) mostra um minério classificado em faixas granulométricas, uma classificação perfeita é mostrada no ítem (B), nas quais as partículas maiores que certo diâmetro se direcionam ao underflow e as menores ao overflow. As partículas muito finas obedecem à partição de água, se direcionando ao underflow, como mostra o ítem (C). Como

as partículas exatamente do tamanho do diâmetro de corte não podem ficar acumuladas dentro do equipamento, imagina-se que estas tenham as mesmas chances de irem p underflow e overflow, dessa forma a curva ficaria como no item (D). O item (E) mostra como se apresentaria a curva após esses fenômenos. Finalmente, o item (F) é a forma como as curvas de partição se apresentam, devido a introdução do conceito de eficiência de classificação.

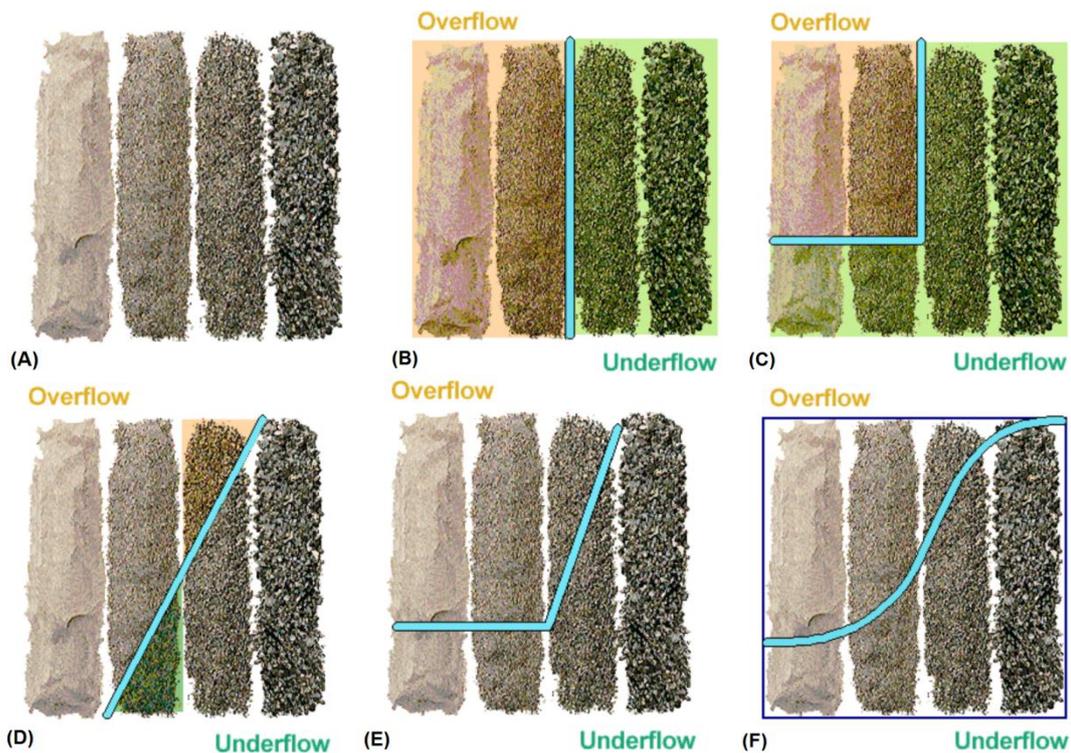


Figura 18: (A) Minério classificado em faixas granulométricas. (B) Classificação perfeita. (C) Classificação causada pelo by-pass. (D) Classificação não perfeita. (E) Classificação não perfeita somada ao efeito by-pass. (F) Curva de partição resultante.

A curva de partição é derivada da distribuição granulométrica, sendo a percentagem de material da alimentação que se desloca ao underflow em cada fração granulométrica. É através desta curva que se calcula o d_{50} (diâmetro pelo qual as partículas têm 50% de probabilidade de serem deslocadas ao underflow e overflow).

3.6.4 Variáveis geométricas e operacionais

O diâmetro do equipamento é sem dúvida o parâmetro geométrico mais importante, uma vez que comanda o diâmetro da classificação. Dessa forma a escolha do diâmetro do hidrociclone é determinada a partir da necessidade de se obter aquele corte granulométrico desejado para o material. Ou parâmetro que esta variável afeta é a vazão que o equipamento pode suportar. Quando se necessita de altas capacidades é necessária à instalação de baterias de hidrociclones. Outro parâmetro que influencia tal capacidade é a área do orifício de entrada da polpa, além de determinar a velocidade de entrada do material. O tempo de residência da polpa no equipamento é governado pelo comprimento da seção cilíndrica e pelo ângulo da seção cônica.

O diâmetro de corte varia conforme modificações na geometria do equipamento e das condições operacionais. Quanto maior o diâmetro do vortex finder, maior será a facilidade das partículas passarem por este orifício, aumentando a quantidade de material deslocado para o overflow, o que provoca um aumento do diâmetro de corte. Seguindo esse mesmo raciocínio imagina-se que aumentando o diâmetro do apex maior será a massa de partículas dirigidas ao underflow e dessa forma diminuindo o diâmetro de corte. Entretanto é pelo apex de entra o fluxo ascendente de ar que faz as partículas finas se deslocarem ao overflow, dessa forma com o aumento desse orifício maior quantidade de ar entra no equipamento, elutriando maior quantidade de finos.

Quando se necessita obter um diâmetro de corte menor a Krebs, tradicional fabricante de hidrociclones, recomenda o uso de porções cilíndricas mais longas, e para separações mais grossas, uma porção cilíndrica curta. Dessa forma, aumentar a seção cilíndrica provoca uma diminuição do diâmetro de corte.

Outro fator que provoca a diminuição desse diâmetro é o aumento da pressão de alimentação da polpa, uma vez que aumenta o campo centrífugo.

3.7 MODELOS DE HIDROCICLONES

Muitos autores ao longo dos anos desenvolveram modelos matemáticos tentando simular o funcionamento de muitas operações unitárias em tratamento de minérios. Em classificação, estes modelos foram criados devido a grande necessidade de se prever a distribuição granulométrica das partículas. A maioria dos modelos possuem dois parâmetros que descrevem a forma da curva, um que representa o tamanho da separação e outro que representa a eficiência da separação.

3.7.1 Modelo de Lynch e Rao

Neste modelo foi inserido o conceito de *by-pass*, que considera que uma fração de todos os tamanhos das partículas se direciona para o underflow devido o arraste pela água, dessa forma não sofreram classificação. Portanto não é apenas o campo centrífugo e os mecanismos de classificação que governam a partição. Devido a este efeito a curva de partição não passa pela origem, tendo de ser corrigida para isto ocorrer. Para tanto considera-se que a fração curto-circuitada é proporcional a partição de água, como propõe a equação (1).

$$Partição\ corrigida = \left(\frac{partição - partição\ de\ água}{100 - partição\ de\ água} \right) 100 \quad (1)$$

O parâmetro que determina a eficiência da classificação no modelo de Lynch e Rao é determinado pela variável α . Segundo Beraldo (1987) *apud* Chaves (2006), o seu valor mais comum é 4 e a eficiência diminuiria para valores menores. A partição neste modelo é calculada segundo a equação (2):

$$y = \frac{e^{\alpha(d/d_{50})} - 1}{e^{\alpha(d/d_{50})} + e^{\alpha} - 2} \quad (2)$$

Nesta equação, y é a partição, d é o diâmetro considerado e o d_{50} é o diâmetro mediano da partição. O segundo parâmetro utilizado para caracterizar a hidrociclonagem é o diâmetro mediano da partição, o d_{50c} . Para Lynch e Rao este diâmetro é proporcional à pressão de alimentação e ao diâmetro do vortex finder, e ainda, inversamente proporcional ao diâmetro do apex e à vazão de água no overflow. O valor do d_{50c} é calculado de acordo com a equação (3):

$$\log d_{50c} = 0,0173FPS - 0,0695spig + 0,013VF + 0,000048Q + k \quad (3)$$

Onde:

FPS = percentagem de sólidos na alimentação, em volume;

spig = diâmetro do apex, em cm;

VF = diâmetro do vortex finder, em cm;

Q = vazão da alimentação, em l/min;

k = constante.

3.7.2 Modelo de Plitt

Este modelo pode ser utilizado para scale-up de instalações industriais, uma vez que não necessita de dados experimentais. Isto se deve ao fato de todas as constantes já estarem calculadas através dos ensaios realizados por Plitt e outros autores. No entanto, Chaves (2006) recomenda que os parâmetros do modelo sejam calculados para cada material e instalação particular.

A performance do hidrociclone é fortemente influenciada pelo curto-circuito das partículas para o underflow, determinado pelo fluxo volumétrico que divide o overflow do underflow. Este fluxo é uma função da relação entre o diâmetro do vortex finder e do apex, mas também depende da taxa de alimentação.

A relação entre as vazões volumétricas do underflow e overflow é encontrada pela equação (4), onde os valores recomendados para os coeficientes são os seguintes: a = 3,79; b = 3,31; c = 0,36; d = 0,54; f = 1,11; e g = 0,24 (King, 2001):

$$S = \frac{a(D_u/D_o)^b (D_u^2 + D_o^2)^c h^d e^{0,54\phi}}{D_c^f H^g} \quad (4)$$

Sendo:

S = relação entre vazões volumétricas do underflow e overflow;

D_u = diâmetro do apex, em cm;

D_o = diâmetro do vortex finder, em cm;

h = altura da extremidade do vortex finder em relação ao topo do apex, em cm;

φ = percentagem de sólidos na alimentação, em volume;

D_c = diâmetro do hidrociclone, em cm;

H = área do inlet, cm^2 .

A partição volumétrica é dada por:

$$R_v = \frac{S}{S+1} \quad (5)$$

Como já explicitado, todos os modelos possuem dois parâmetros, um que representa o tamanho da separação e outro que representa a eficiência do processo. O primeiro parâmetro, neste modelo, é o d_{50c} (diâmetro mediano da partição). Este por sua vez é função da geometria do hidrociclone (diâmetro da seção cilíndrica, do inlet, do vortex, do apex, da altura da extremidade do vortex finder em relação ao topo do apex), das características do minério (densidade do sólido), das condições operacionais (vazão no underflow, percentagem de sólidos na alimentação), conforme a equação (6):

$$D_{50c} = \frac{a D_c^b D_i^c D_o^d \exp(6,3\varphi)}{D_u^f h^g Q^i (\rho_s - \rho_f)^{0,5}} \quad (6)$$

Onde: $a = 39,7$; $b = 0,46$; $c = 0,6$; $d = 1,21$; $f = 0,71$; $g = 0,38$; $i = 0,45$;

D_c = diâmetro do hidrociclone, em cm;

D_i = diâmetro do inlet, em cm;

D_o = diâmetro do vortex finder, em cm;

φ = percentagem de sólidos na alimentação, em volume;

D_u = diâmetro do apex, em cm;

h = altura da extremidade do vortex finder em relação ao topo do apex, em cm;

Q = vazão da alimentação, em l/min;

ρ_s = densidade dos sólidos, em g/cm^3 ;

ρ_f = densidade da água, em g/cm^3 .

Este último parâmetro, neste modelo, é encontrado através da equação (7). Em que a eficiência é dita alta para valores de “m” superiores a 3 e baixa para valores inferiores a 2.

$$m = 1,08 e^{(0,58-1,58(Q_u/Q))(D_c^2 h/Q)^{0,15}} \quad (7)$$

Em que:

Q_u = vazão do underflow, em l/min;

Q = vazão da alimentação, em l/min;

D_c = diâmetro do hidrociclone, em cm;

h = altura da extremidade do vortex finder em relação ao topo do apex, em cm.

A partição de Plitt é função das características do fluxo da alimentação, das dimensões do hidrociclone, das características do mineral e das condições operacionais. Esta partição pode ser definida conforme a equação (8), em que Y_i é a partição, d_i é o diâmetro considerado e d_{50} o diâmetro mediano da partição:

$$Y_i = 1 - e^{-0,693(d_i/d_{50})^m} \quad (8)$$

A curva de partição corrigida de Plitt também é calculada conforme equação (1).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 AMOSTRAGEM

As amostras foram coletadas da alimentação dos hidrociclones de 4” da usina de beneficiamento de manganês do Azul. Cerca de 80 litros de polpa de minério foram coletados no dia 14/10/2010. Como na data da amostragem a usina estava processando minério detrítico, esta foi a litologia utilizada nos ensaios. Devido a problemas mecânicos com a bomba que direciona o material do tanque para a bateria de hidrociclones, não foi possível a coleta do material diretamente da saída do distribuidor desta bateria. Sendo assim, as amostras foram coletadas diretamente no tanque (ponto vermelho na figura 12) que recebe o transbordo do classificador espiral. Para diminuição dos erros de amostragem foram coletados incrementos a cada 20 minutos, durante uma hora, de cerca de 20 litros de polpa. Totalizando 80 litros de material. Foram condicionadas em quatro galões de 20 litros e direcionadas ao laboratório de tratamento de minérios da Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente, na Universidade Federal do Pará, em Marabá, onde foram realizados os ensaios de hidrociclonagem.

4.2 ENSAIOS DE HIDROCICLONAGEM

Antes da realização dos ensaios, primeiramente foram reguladas as geometrias do equipamento, de forma a se obter um hidrociclone com as proporções entre as geometrias iguais as da família Krebs, conforme a figura 15. Uma vez que os hidrociclones da usina do Manganês do Azul pertencem a esta família.

O procedimento para a realização dos ensaios foi seguido conforme recomenda Sampaio *et al.* (2007). Como a amostra já se encontrava na forma de polpa de minério, a vazão foi regulada com a própria polpa, e não com água, como recomenda o procedimento adotado. Para tanto os 80 litros de polpa do minério foi adicionada ao tanque de agitação, onde foi homogeneizada durante 10 minutos. Após este tempo, ligou-se a bomba, mantendo a válvula R2 fechada e a R1 aberta (figura 19), deixando o material circular. Logo após, fechou-se o registro R1 e, simultaneamente abriu-se o registro R2. Aguardou-se o hidrociclone entrar

em regime estacionário, de forma que a pressão se mantenha constante. Verificou-se se o fluxo do underflow apresentava um pequeno ângulo, e não na forma de cordão ou guarda-chuva. Procedeu-se então a medição da vazão na alimentação, no underflow e overflow, através da contagem do tempo necessário para se adquirir o volume determinado, repetiu-se esse procedimento dez vezes, para que se pudesse obter um valor confiável.

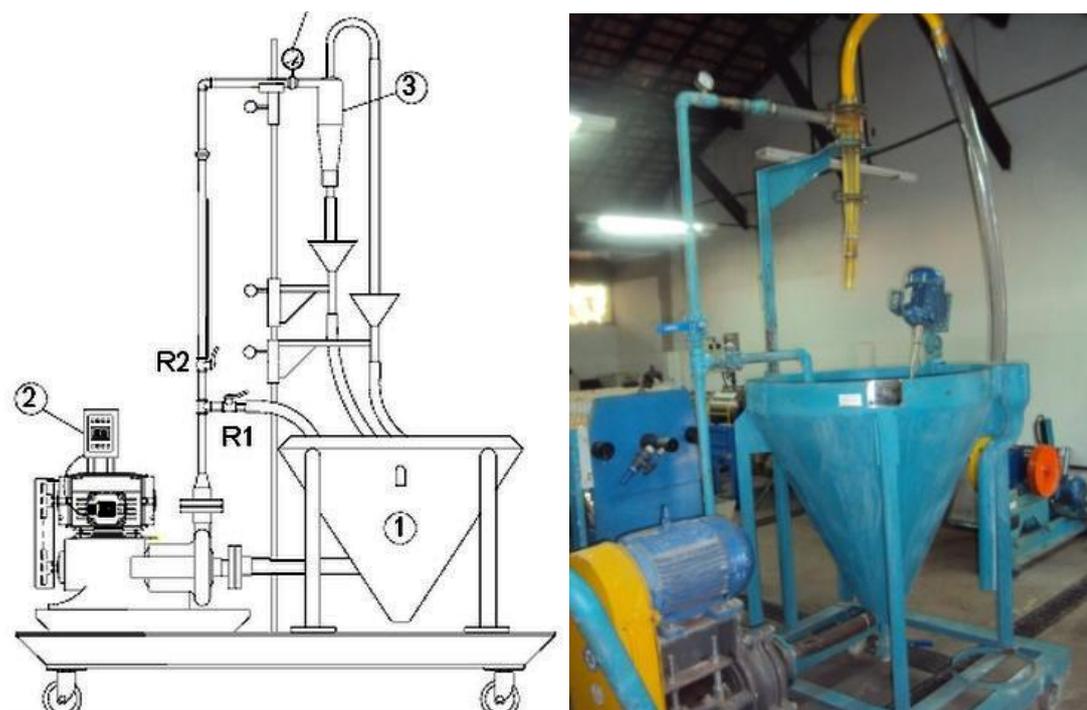


Figura 19: Imagem ilustrativa do equipamento utilizado nos ensaios. 1: Tanque de polpa. 2: Inversor de frequência. 3: Hidrociclone. R1: Registro de atalho. R2: Registro de alimentação.

A etapa seguinte foi a amostragem dos produtos do hidrociclone. Coletou-se amostras do underflow e overflow em curtos espaços de tempo, visando a não perturbação do sistema. Utilizou-se o mesmo procedimento utilizado para medição da vazão da alimentação (L/min) para a descarga do apex e vortex finder. As amostras foram dirigidas às análises granulométricas, de densidade e percentagem de sólidos.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Como foi visto anteriormente a densidade é uma importante propriedade do sistema fluido-partícula quando se trata de processamento de minérios, principalmente de hidrociclonagem. Sendo assim, a determinação da densidade da polpa é essencial ao sucesso dos ensaios. A densidade é uma propriedade intensiva, ou seja, não dependem do tamanho da amostra, e é resultado da razão entre duas propriedades extensivas (Atkins e Jones, 2001).

Tal propriedade pode ser real ou aparente, entretanto, em hidrociclonagem, é densidade real que nos interessa. Para esta determinação o método mais simples é a picnometria. Picnômetro é basicamente um balão de fundo chato equipado com uma rolha de vidro, pelo qual passa um canal capilar. Este método é utilizado para a determinação da densidade de sólidos. Tal determinação, assim como da densidade da polpa, é utilizada para se encontrar a percentagem de sólidos.

$$d_s = \frac{A_2 - A_1}{(A_4 + A_2) - (A_1 + A_3)} \quad (9)$$

Onde:

d_s = Densidade dos sólidos;

A_1 = Massa do picnômetro;

A_2 = Massa do picnômetro + amostra;

A_3 = Massa do picnômetro + amostra + água;

A_4 = Massa do picnômetro + água.

A densidade da polpa (d_p) pode ser encontrada pela simples razão entre a massa da polpa (m_p) e seu volume (V_p):

$$d_p = \frac{m_p}{V_p} \quad (10)$$

A importância da determinação da percentagem de sólidos se baseia no balanço de massa. É através do balanço de massa que se encontra a recuperação. A percentagem de sólidos (%S), como pode ser visto pela equação (11), é função da densidade do sólido (d_s), da polpa (d_p) e da água. Para densidade da água igual a 1000 Kg/m^3 , tem-se:

$$S(\%) = \frac{d_s(d_p - 1000)}{d_p(d_s - 1000)} 100 \quad (11)$$

A distribuição granulométrica do material é encontrada através de peneiramento. Em que uma série de peneiras é colocada uma sobre a outra, enquanto um sistema de agitação proporciona a passagem das partículas pelas malhas, as quais foram: 10#, 18#, 35#, 60#, 100#, 150#, 200#, 250#, 325# e 400#. A medição das massas retidas em cada peneira, assim como sua percentagem, possibilita a geração da curva de distribuição granulométrica. É através desta curva que se visualiza o comportamento granulométrico do material. Uma vez realizadas as análises granulométricas, determina-se os valores dos diâmetros que caracterizam a amostra, o d_{50} , que é calculado a partir da curva de partição, e o d_{95} , retirado da análise granulométrica do overflow, sendo a malha que retêm 5% das partículas.

4.4 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE HIDROCICLONES

Para a realização deste trabalho foi adotado o modelo de Plitt devido sua grande aceitação e de fácil utilização. Conforme recomenda Chaves (2006), não foram utilizadas todas as constantes predeterminadas por Plitt, mas sim encontradas para o material utilizado, o minério detrítico de manganês da Mina do Azul.

Para se determinar a curva de partição de Plitt são necessárias as malhas em que foram feitas as análises granulométricas dos produtos dos ensaios de hidrociclonagem, as dimensões do equipamento, as características do mineral e as condições de operação.

A relação entre as vazões do underflow e overflow foram encontradas de acordo com a equação (4). O diâmetro mediano da partição foi encontrado seguindo a equação (6). A forma de adquirir um melhor ajuste da curva simulada à experimental é variar cada uma variáveis geométricas e operacionais, encontrando vários valores de d_{50} e realizar um ajuste

exponencial. Dessa forma a cada um dos coeficientes (b, c, d, f, g e i) serem otimizados. A multiplicação de todos os coeficientes lineares destes ajustes seria o coeficiente “a”. No entanto seriam necessários inúmeros ensaios. Nesta impossibilidade, devido à quantidade limitada da amostra, procedeu-se um ajuste linear. O parâmetro que define a eficiência da separação “m” foi calculado de acordo com a equação (7).

Para se gerar a curva padrão de partição é necessário calcular a partição de Plitt para cada faixa granulométrica. Isto é possível através da equação (8), que está em função das malhas utilizadas no peneiramento, do parâmetro “m” e do diâmetro de corte. O gráfico deve ser plotado com os valores da partição no eixo Y e d/d_{50} no eixo do X.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ENSAIOS DE HIDROCICLONAGEM

A figura 20 mostra o equipamento utilizado assim como o processamento dos ensaios. Observou-se a descarga do underflow em forma de chuva, mostrando que estava havendo classificação.

A pressão do equipamento foi de cerca de 18 psi e 18,97% foi percentagem de sólidos da alimentação, a densidade da polpa foi de $1,15 \text{ g/cm}^3$ na alimentação, 1,2 no underflow e 1,12 no overflow. A geometria do hidrociclone foi dimensionada para se obter as mesmas proporções entre as geometrias do equipamento utilizado na usina, são eles: Diâmetro do ciclone: 7 cm; do inlet: 1,9 cm; do vortex finder: 2 cm; do apex: 1 cm; comprimento: 42 cm; comprimento da parte cilíndrica: 30 cm. As medições das vazões retornaram os seguintes resultados: no overflow: 32,86 L/min; no underflow: 15,85 L/min.

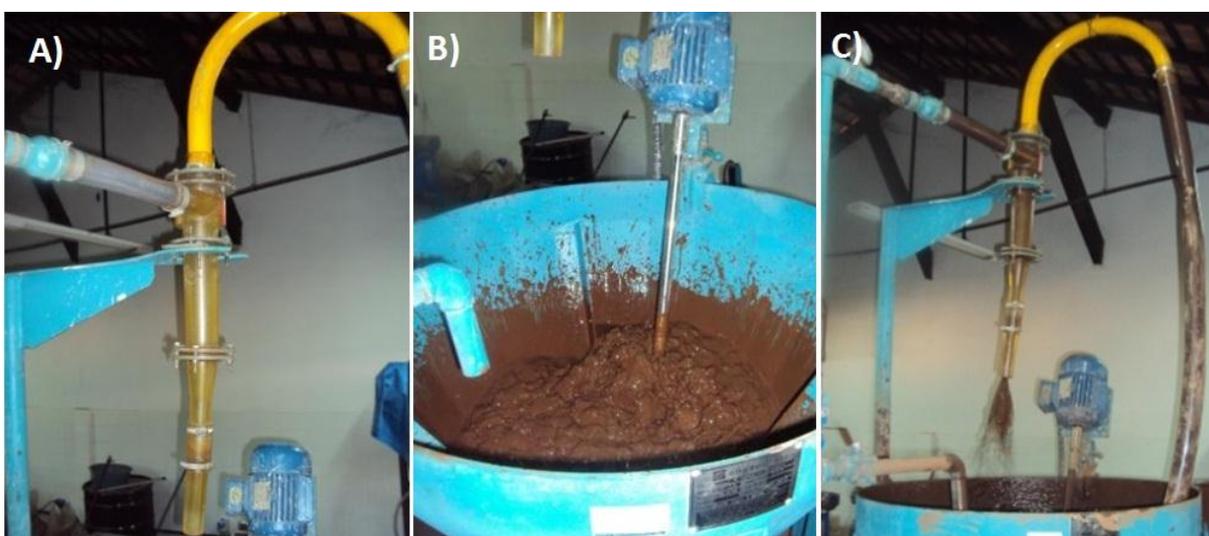


Figura 20: (A) Detalhe do hidrociclone utilizado; (B) Homogeneização da polpa; (C) Hidrociclone em funcionamento.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

As análises granulométricas da alimentação, underflow e overflow foram realizadas com o objetivo de determinar a curva de partição corrigida, de forma a se encontrar o valor do d_{50} e, principalmente, do d_{95} , o qual vai mostrar se o hidrociclone está ou não mandando material acima de 0,15mm para o overflow. Dessa forma, pode-se perceber pela análise granulométrica do overflow que o valor do d_{95} é de 0,201 mm. Este valor mostra que granulometrias pertencentes ao sinterfeed não está sendo recuperado pelo hidrociclone.

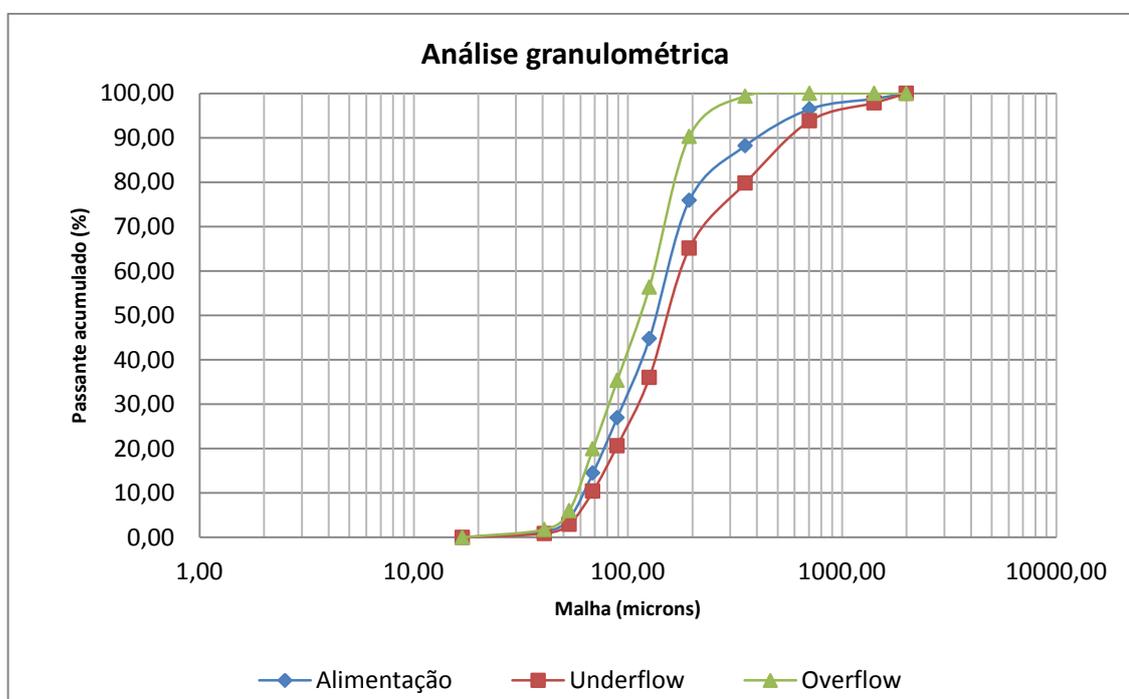


Figura 21: Análise granulométrica da alimentação, underflow e overflow.

5.3 BALANÇO DE MASSA

Através dos dados da análise granulométrica, o que permitiu a descoberta da partição de sólidos, foi realizado o balanço de massa e de água, uma vez que a partição de água é um dos parâmetros que medem a qualidade da classificação. A partição de água para o underflow foi de 36,8%, e segundo o critério de avaliação da qualidade da operação de ciclones de

Napier-Munn (1996), como mostrado na tabela 2, se enquadra como de qualidade razoável, muito próxima de ser considerada pobre.

Tabela 3: Critério para avaliação da qualidade da operação.

Partição de água para o underflow (%)	Qualidade da separação
>50	Muito pobre
50 - 40	Pobre
40 - 30	Razoável
30 - 20	Boa
20 - 10	Muito boa
< 10	Raramente alcançada

Fonte: Napier-Munn (1996) *apud* Foggiatto (2009)

Dessa forma foi feito o balanço de massa da hidrociclonagem:

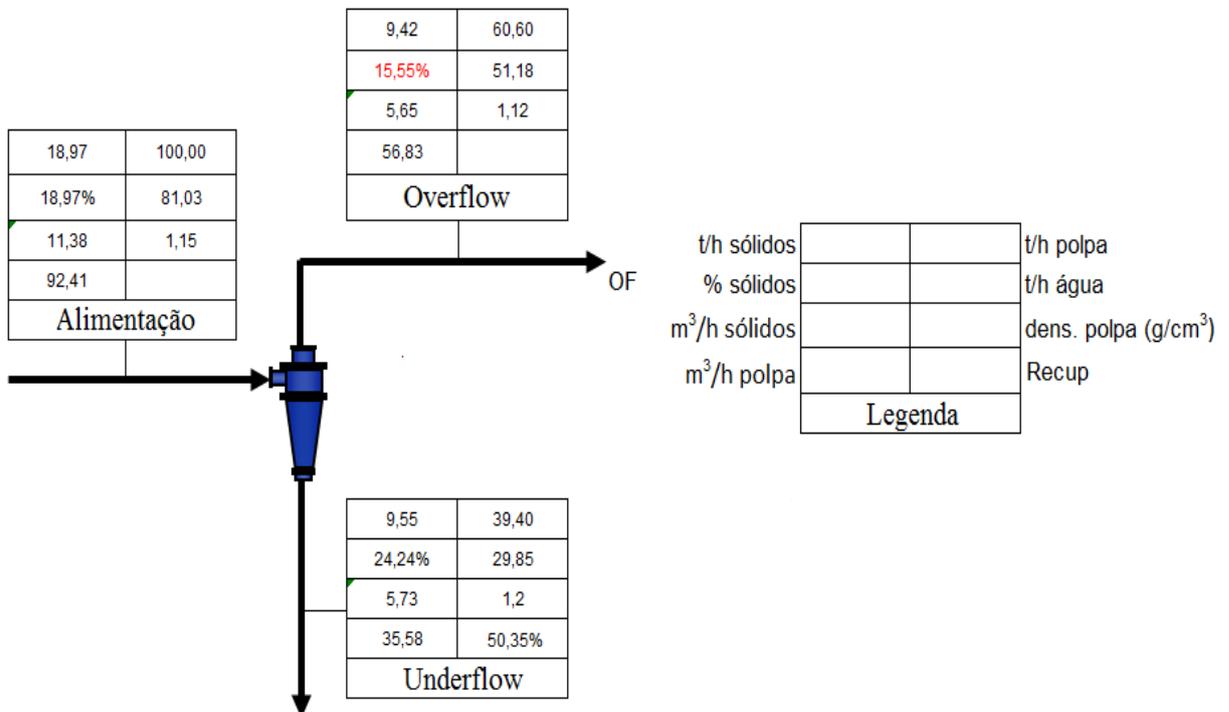


Figura 22: Balanço de massa.

5.4 MODELAGEM E SIMULAÇÃO

O valor encontrado para o parâmetro “m” experimental foi de 1,27. A relação entre as vazões volumétricas do underflow e overflow foi 0,499, a partição volumétrica para o underflow foi de 0,332. O $d_{50\text{Plitt}}$ (0,120 mm) foi encontrado através da equação (6) e o $d_{50\text{exp}}$ (0,151 mm) através da análise granulométrica. Para o ajuste da função, encontrou-se um fator através de ajuste linear, cujo valor encontrado foi de 1,247 (número adimensional), encontrado através da relação $d_{50\text{exp}}/d_{50\text{Plitt}}$ de forma que: $d_{50\text{corrigido}} = 0,151$ mm.

De acordo com esses valores foi possível a determinação da partição de Plitt na faixa granulométrica considerada, de acordo com a tabela 2:

Tabela 2: Partição de Plitt.

Malhas (microns)	Partição de Plitt
2000	100,00
1000	100,00
500	99,89
250	83,76
150	49,68
106	29,85
75	16,76
63	12,33
45	6,70
37	4,66
-37	0,96

Através da análise granulométrica calcula-se o passante acumulado da alimentação, overflow e underflow. A partição experimental será a percentagem de cada fração granulométrica a se dirigir ao underflow. Devido ao efeito da curto-circuitagem, esta curva não passa pela origem. Para corrigir este efeito deve-se calcular o by-pass, que considera que parte de cada fração se dirigirá ao underflow, carregado pela água. A partição corrigida é calculada conforme a equação (1):

Tabela 3: Partição experimental

Malha (microns)	Pass. Acumulado (%)			Partição	By- pass	Partição corrigida
	Alim.	Under	Over			
2000	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00
1000	98,77	97,84	100,00	99,98	3,32	99,97
500	96,46	93,80	100,00	99,97	6,24	99,96
250	88,21	79,79	99,39	96,82	22,27	94,96
150	75,93	65,11	90,31	68,22	33,14	49,68
106	44,76	36,03	56,36	53,21	84,14	25,92
75	26,98	20,65	35,38	49,34	48,01	19,79
63	14,51	10,39	19,98	46,92	33,64	15,96
45	4,27	2,95	6,02	41,43	27,65	7,27
37	1,25	0,86	1,78	39,65	8,14	4,45
-37	0,00	0,00	0,00	38,92	3,39	3,29

Plotando os valores da partição real (figura 23) percebe-se o efeito da curto-circuitagem. Devido este efeito a curva de partição não intercepta o eixo x, uma vez que os finos são carreados pela água para o underflow.

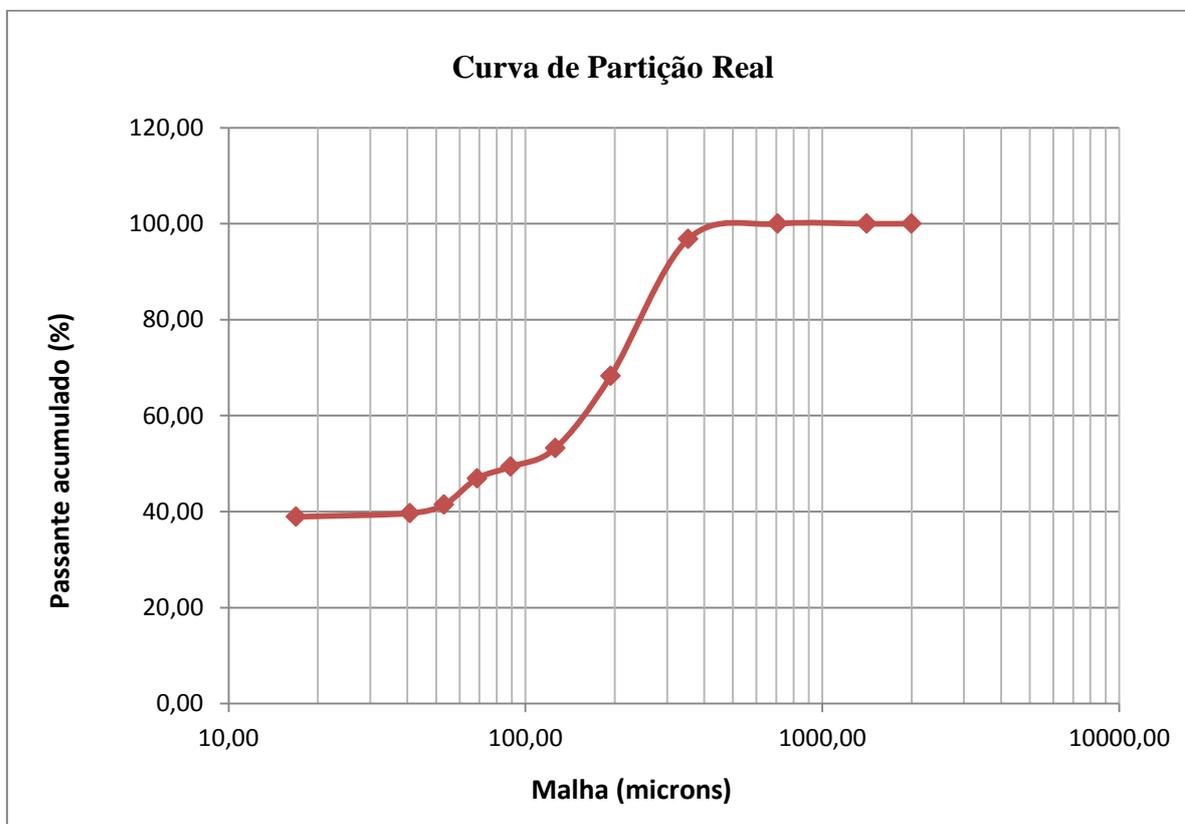


Figura 23: Curva de partição real.

Plotando a curva de partição de Plitt e a curva de partição corrigida, e colocando-se d/d_{50} no eixo do X, teremos a curva padrão de partição, que é invariante a geometria do equipamento e as condições operacionais (figura 24). Portanto esta curva é função apenas do material utilizado nos ensaios, no caso o minério detrítico de manganês.

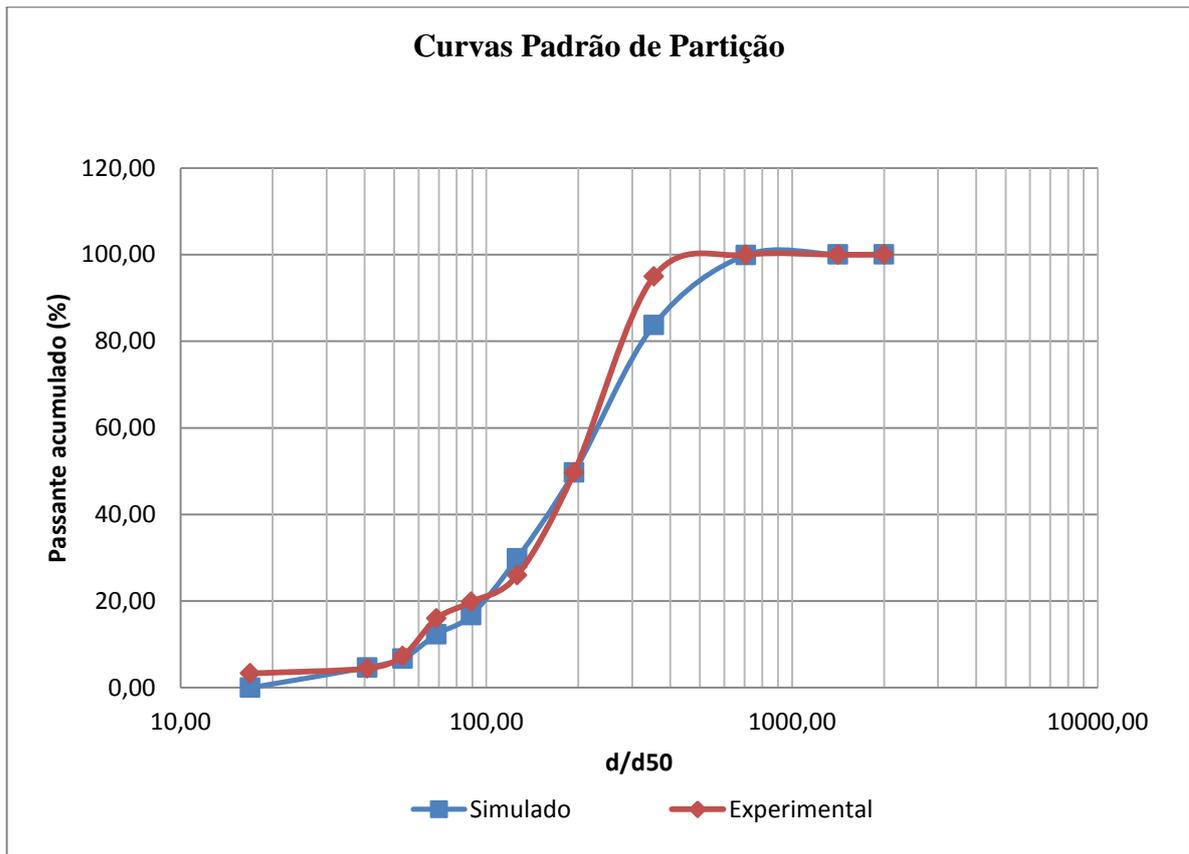


Figura 24: Curva padrão de partição simulada e experimental (partição corrigida).

Como pode ser observado na figura 23, conseguiu-se um bom ajuste da curva simulada, através do modelo de Plitt, à curva de partição experimental.

6 CONCLUSÃO

Após o trabalho de revisão de bibliografia, trabalho experimental e análise técnica, observou-se que a modelagem e simulação aparece como uma importante alternativa na otimização de processos, economizando tempo e reduzindo custos. A grande maioria das operações unitárias pode ser simulada, para tanto há inúmeros softwares no mercado e, principalmente, as planilhas eletrônicas.

Analisando a planilha de horas disponíveis e horas trabalhadas por equipamento da usina, concluiu-se que a hidrociclonagem de 4" desta usina possui uma baixíssima utilização, ocasionada por constantes obstruções e quebra das telas da peneira desaguadora para qual o fluxo do underflow é direcionado. Acredita-se que as obstruções são ocasionadas pelo alto valor do topsize da alimentação, principalmente quando se trabalha com pelito tabular, que devido sua característica laminar acaba se direcionando ao overflow do classificador quando a polpa está muito viscosa, a uma alta taxa de produção e/ou com a espiral rotacionando a uma maior velocidade. A constante quebra das telas da peneira desaguadora pode ser justificada pela grande partição de água, o que gera um peso muito grande sobre as telas.

Constatou-se que o equipamento está funcionando com uma eficiência muito baixa, uma vez que o valor "m" está menor que 2.

A partir as análises, encontrou-se: $d_{50} = 0,15$ mm e $d_{95} = 0,201$ mm. Para que o valor do d_{95} seja próximo a 0,15 mm, segundo o modelo, deve-se aumentar o comprimento da seção cilíndrica do hidrociclone, de 40 cm para 60 cm, uma que necessita-se reduzir o diâmetro de corte de 0,201 mm para 0,15 mm e conforme mostra a literatura, porções cilíndricas maiores favorecem a esta redução. Outra modificação sugerida pelo modelo é diminuição da percentagem de sólidos da alimentação, que deve ser regulada a 10%. Isto se deve pelas constantes obstruções ocasionadas pela alimentação de polpas com alta percentagem de sólidos.

Novos ensaios, a fim de calibrar o modelo, seriam necessários para confirmar sua exatidão. No entanto, por problemas de logística da mina em Parauapebas até a UFPA em Marabá, não foi possível a realização de novos ensaios.

Acredita-se que os resultados adquiridos representam, com uma margem de erro dentro do aceitável, a pesar da amostragem ter sido realizada diretamente do classificador

espiral, a hidrociclonagem da usina. No entanto, para a comprovação e validação do modelo, sugere-se que as modificações propostas pelo modelo adotado sejam feitas e novas amostragens e ensaios em escala piloto sejam realizados. Sugere-se ainda que os ensaios sejam realizados com todas as litologias, principalmente utilizando pelito tabular.

REFERÊNCIAS

- Arruda, E.B; Koboldt, C.A.; Damasceno, J.J.R.; Barrozo, M.A.S. **Estudo do comportamento de um hidrociclone filtrante de geometria Krebs**. Faculdade de Engenharia Química. Uberlândia-MG. 2001.
- Atkins, P. e Jones, L. **Princípios de Química: Questionando a vida moderna e o meio ambiente**. Porto Alegre-RS. Bookman, 2001.
- Beraldo, J.L. **Moagem de minérios em moinhos tubulares**. São Paulo, Editora Edgard Blucher, 1987.
- Bernadelli, A.L. **Jazida de manganês do Azul**. In: SBG, Simpósio de Geologia da Amazônia, 1, Belém, Anexo Anais, 47-60. 1982
- Bernadelli, A.L. e Beisiegel. **Geologia econômica da jazida do manganês do Azul**. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, Recife-PE. 1978.
- Carriso, R.C.C; Correira, J.C.G. **Classificação e peneiramento**. Rio de Janeiro-RJ. Centro de Tecnologia Mineral. 2004.
- Chaves, A.P. **Teoria e Prática de Tratamento de Minérios**. Signus Editora, 3ª edição. São Paulo-SP, 2006.
- Costa, L.P.; Rosière, C.A.; Lobato, L.M. **Caracterização das Seqüências Metavulcanossedimentares da Porção Leste da Província Mineral Carajás (PA)**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte-MG. 2007.
- Da Costa, M.L.; Fernandez, O.J.C.; Requelme, M.E.R. **Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia. Capítulo V: O depósito de manganês do Azul, Carajás: Estratigrafia, mineralogia, geoquímica e evolução geológica**. 2006.
- Dardenne, M.A.; Schobbenhaus C. **Metalogênese do Brasil**. Editora Universidade de Brasília. Pág. 392. 2001.
- DNPM (2004). **Departamento Nacional de Produção Mineral**. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriadocumento/sumariomineral2004/MANGANES%20004.pdf>>. Acessado em: 01/07/2010.
- DNPM (2009). Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral de 2009**. Disponível em: <https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=4544>. Acessado em: 13/10/2010.
- Drucker, J.B.; Beltrão, F.S.; Storolli, F.A. **Como obter o máximo em eficiência e separação?**. Revista Brasil Mineral, nº 201. Dezembro, 2001.
- Foggiatto, B. **Previsão do desempenho do circuito de moagem de Carajás**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo – SP. 2009.

King, R.P. **Modeling and simulation of mineral processing systems**. Department of Metallurgical Engineering, University of Utah, USA. Salt Lake City-USA. Butterworth-Heinemann, 2001.

Luz, A.B. **Tratamento de Minérios**. Centro de Tecnologia Mineral-CETEM. Rio de Janeiro-RJ. 2004.

Luz, A.B. e Lins, F. **Rochas e Minerais Industriais**. Centro de Tecnologia Mineral-CETEM. Rio de Janeiro-RJ. 2008.

Massarani, G.; Scheid, C. M. **Separação Sólido-Fluido Não-Newtoniano em Hidrociclones**. Centro de Tecnologia Mineral-CETEM. Rio de Janeiro-RJ. 2000.

Napier-Munn, T. J. **Mineral comminution circuits: their operation and optimisation**. Indooroopilly: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, 1996.

Roriz, E.R.R. **Reciclagem do manganês na forma de dióxido de manganês eletrolítico**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. São Paulo-SP. 2010.

Sampaio, J.A. **Manganês – Mina do Azul - Carajás/CVRD**. Usina de Beneficiamento de Minérios do Brasil. Centro de Tecnologia Mineral-CETEM. Rio de Janeiro-RJ. 2002.

Sampaio, J.A.; França, S.C.A.; Braga, P.F.A. **Tratamento de Minérios, Práticas Laboratoriais**. Centro de Tecnologia Mineral-CETEM. Rio de Janeiro-RJ. 2007.

Souza, C.S.; Costa, A.F.U.; Costa, R.T.; Daniel, P.H. **Locação de poços de rebaixamento de nível d'água utilizando geologia e o método geofísico imageamento elétrico bidimensional da Mina de Manganês do Azul – Província Mineral de Carajás-PA**. XIV Encontro Nacional de Perfuradores de Poços. 2006.

Valadão, G.E.; Araujo, A.C. **Introdução ao tratamento de minérios**. Belo Horizonte-MG, Editora UFMG. 2007.

Vale SA. **Apresentação do Negócio Manganês aos visitantes do projeto**. Gerência de Operações da Mina de Manganês do Azul - GAMZN. 2008.

Vale SA. **Características litológicas dos minérios na Mina de Manganês do Azul**. Gerência de Operações da Mina de Manganês do Azul - GAMZN. 2009.

Vale SA. **Vídeo de apresentação do projeto Manganês do Azul**. Gerência de Operações da Mina de Manganês do Azul - GAMZN. 2010.

Vieira, J.M.A. **Parametrização do indicador operacional do processo de escrubagem da usina de beneficiamento da mina de manganês do azul**. Programa de Pós-graduação em Sistemas Míneros-Metalúrgicos. 2008.