



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



EMANUEL AMORIM BUENO

SIMULAÇÃO DE HIDROCICLONES

OURO PRETO

2021

EMANUEL AMORIM BUENO

SIMULAÇÃO DE HIDROCICLONES

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado a Universidade Federal de Ouro Preto, como parte das exigências do curso de Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Kronemberger Alves

OURO PRETO

2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

B928s Bueno, Emanuel Amorim.
Simulação de hidrociclones. [manuscrito] / Emanuel Amorim Bueno. -
2021.
39 f.: il.: , gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Vladmir Kronemberger Alves.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Beneficiamento de minério. 2. Separadores (Máquinas). 3. Métodos de simulação. I. Alves, Vladmir Kronemberger. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.7.06

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Emanuel Amorim Bueno

Simulação de hidrociclones

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Minas

Aprovada em 23 de (abril) de 2021

Membros da banca

[Doutor] - Vladimir Kronemberger Alves - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
[Doutor] - Elton Destro - (Universidade Federal de Ouro Preto)
[Engenheiro de Minas] - Anderson Fillipe Nascimento Batalha - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Professor Doutor Vladimir Kronemberger Alves, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 18/05/2021



Documento assinado eletronicamente por **Vladimir Kronemberger Alves**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/05/2021, às 21:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0172569** e o código CRC **00EECD78**.

Dedico esse trabalho a minha avó Conceição (in memoriam), pelo incentivo e apoio constantes.

RESUMO

Dentro dos processos de classificação, o uso de hidrociclones se tornou algo indispensável, uma vez que sua grande versatilidade e aplicabilidade em amplas faixas granulométricas permite ótimos resultados até trabalhando com particulado muito fino, algo que seria inviável quando comparado com o uso de peneiramento. Mesmo com esses benefícios ainda existem muitas incógnitas a respeito dos hidrociclones, devido à grande complexidade dos processos que ocorrem em seu interior. Ao longo dos anos modelos empíricos foram propostos com o objetivo de tentar explicar os mecanismos de separação granular, sendo o mais conhecido o modelo de Plitt (1976). Com o avanço das pesquisas dentro dessa área um novo modelo empírico foi criado, o modelo de CIMM (SEPÚLVEDA et al, 1983), que teve grande influência do modelo de Plitt. Este trabalho tem como objetivo um estudo e adaptação, através do aplicativo Moly-Cop Tools™, do modelo do CIMM para calibragem de um modelo de simulação de ciclonagem.

Palavras-chave: Calibragem, CIMM, Hidrociclones, Modelo, Simulação.

ABSTRACT

Within the classification processes, the use of hydrocyclones has become indispensable, due to its great versatility and applicability in a wide granulometric range, it generates great results even when working with very thin particles, something that would be unfeasible when compared to the use of sieving. Even with these benefits, there are still many questions regarding hydrocyclones, due to the great complexity of the processes that take place inside them. Over the years empirical models have been proposed with the aim of trying to explain the granular separation mechanism, the most well-known being the Plitt's model (1976). With the research advancement in this area, a new empirical model was created, the CIMM's model (SEPÚLVEDA et al, 1983), which had great influence by Plitt's model. This work aims to study and adapt, through the Moly-Cop Tools™ application, the CIMM's model to calibrate a cyclone simulation model.

Keywords: Calibrate, CIMM, Hydrocyclone, Model, Simulation.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Design básico com fluxo simplificado de um hidrociclone (Adaptado: SVAROVSKY, 1984).	14
Figura 2 - Exemplo de Curva Granulométrica em papel semi-logarítmico.	16
Figura 3 - Curva de Eficiência de Hidrociclone (LUZ et al, 2010).	18
Figura 4 - Influência do aumento de α na curva padrão de partição (LUZ et al,2010).	20
Figura 5 - Relação entre Overflow e Underflow medido e simulado do Teste 1.	27
Figura 6 - Relação entre Overflow e Underflow medido e simulado do Teste 2.	27
Figura 7 - Relação entre Overflow e Underflow medido e simulado do Teste 3.	27
Figura 8 – Relação entre Overflow e Underflow medido e simulado do Teste 4.	28
Figura 9 - Relação entre Overflow e Underflow medido e simulado do Teste 5.	28
Figura 10 - Relação entre Overflow e Underflow medido e simulado do Teste 6.	28

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplo de distribuição granulométrica.....	15
Tabela 2 - Parâmetros do ciclone em cada teste.....	24
Tabela 3 - Resultado do balanço de massa do hidrociclone referente ao Teste 1.	25
Tabela 4 - Parâmetros de classificação ou constantes empíricas do material.	26
Tabela 5 - Porcentagem (em massa) de sólidos nos fluxos do hidrociclone.	29

SUMÁRIO

1. Introdução.....	11
2. Objetivo.....	12
2.1. Objetivo Principal	12
2.2. Objetivos Específicos.....	12
3. Revisão Bibliográfica	13
3.1. Conceitos Fundamentais.....	13
3.2. Distribuição Granulométrica	15
3.3. Modelos Empíricos de Classificação em Hidrociclones	16
3.3.1. Eficiência dos Hidrociclones.....	17
3.3.2. Modelo de Lynch	19
3.3.3. Modelo de Plitt.....	20
3.3.4. Modelo de CIMM.....	21
4. Metodologia	24
5. Resultados	26
5.1. Resultados das simulações de hidrociclones	26
6. Conclusão	30
Referência Bibliográficas	31
Apêndice A - Dados das Simulações do Modelo de Ciclonação.....	33

1. Introdução

Dentro das etapas do beneficiamento mineral, podemos citar processos de separação, que podem ter como finalidade a adequação de uma porcentagem de sólidos e/ou recuperação hídrica em polpas de minério quando se trata de uma separação sólido-líquido, como também podem fazer parte na classificação de diferentes faixas granulométricas numa separação sólido-sólido.

O Hidrociclone é um importante equipamento que podemos citar dentro dos processos de classificação, uma vez que ele possibilita grandes benefícios quando comparado a outros dispositivos de classificação, como por exemplo uma grande versatilidade e a possibilidade de trabalhar com faixas granulométricas mais complexas com material ultrafino, algo que já não seria possível por meio do peneiramento.

Na planta de beneficiamento esse equipamento não será utilizado de forma unitária, e sim em conjuntura com outros hidrociclones, pois como foi dito por Melo (2010), hidrociclones trabalham em famílias compostas por equipamentos com características geométricas semelhantes, afim de formar uma bateria com características únicas de operações.

O emprego de cada família geralmente é determinado de acordo com o poder de classificação necessário em cada etapa do processo, já que as proporções geométricas estão diretamente relacionadas com o desempenho do hidrociclone (SVAROVSKY, 1990).

A escolha adequada deste conjunto de hidrociclones implica em um dispêndio energético e monetário de proporções significativas e a escolha errada pode gerar resultados abaixo do que poderia ser considerado aceitável, o que causaria prejuízos ao empreendimento em que esses equipamentos estão sendo aplicados. Tendo em vista tais dificuldades, foi o que nos impulsionou a realizar este trabalho, uma vez que a tomada de decisões de como os hidrociclones serão implementados, na grande maioria dos casos, se baseia em testes “manuais”, o objetivo deste trabalho é determinar se através do modelamento matemático tais decisões podem ser tomadas com embasamento em simulações computacionais o que tornaria esse processo muito mais rápido e barato.

2. Objetivo

2.1. Objetivo Principal

- Calibrar um modelo de simulação que possa prever o comportamento de hidrociclones de maneira eficiente.

2.2. Objetivos Específicos

- Obtenção de Balanço de massa da ciclonagem;
- Obtenção de constantes de classificação;
- Simular um ciclone operado em diferentes condições operacionais e comparar os resultados com dados reais de operação em loop de ciclonagem.

3. Revisão Bibliográfica

Esse capítulo contém uma breve revisão da literatura relacionada aos temas relevantes para uma maior compreensão deste trabalho.

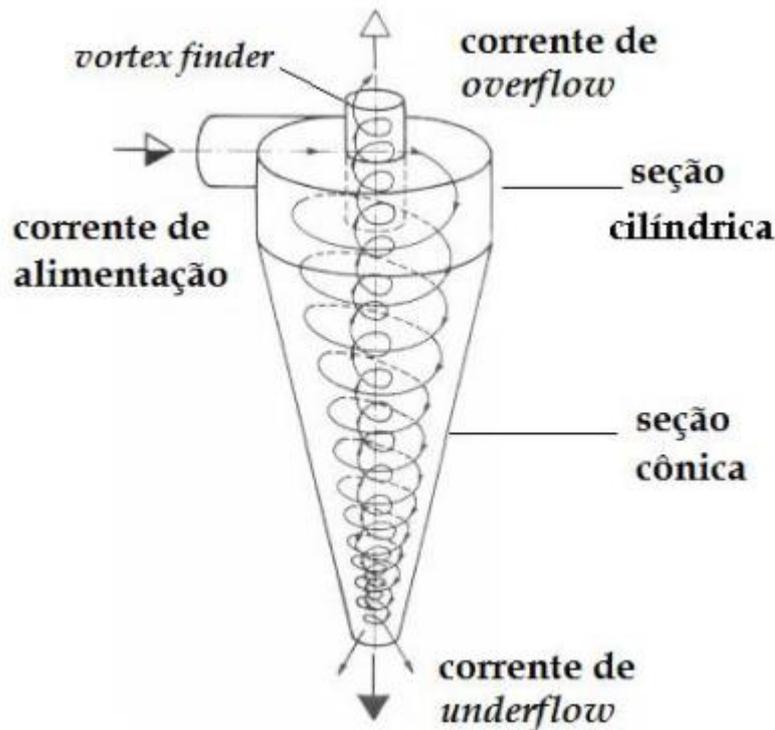
3.1. Conceitos Fundamentais

Dentro dos processos de tratamento mineral que englobam classificação e peneiramento, é possível afirmar que eles possuem um mesmo objetivo, que é a separação de um material em duas ou várias frações, que possuam granulometrias distintas (LUZ et al,2010).

No caso do peneiramento, a separação depende apenas do tamanho geométrico das partículas que compõe determinado material, já quando se fala em classificação, a separação é realizada tomando-se como base o conceito da velocidade em que os grãos atravessam um certo meio fluido, sendo a água o meio mais usado. Com o uso de um fluido para a classificação se torna possível classificar partículas ultrafinas, enquanto com o peneiramento isto seria inviável. O hidrociclone é um importante equipamento dentro dos processos de classificação mineral.

Embora a primeira patente de um hidrociclone seja datada de 1891, sua utilização industrial foi consolidada apenas após a segunda guerra mundial em indústrias minerais (KRAIPECH et al., 2005). Nos anos seguintes, milhares de hidrociclones foram instalados e hoje esses equipamentos são considerados padrões em muitas empresas. Trata-se de um equipamento versátil, de capacidade elevada e sem partes móveis. Os hidrociclones possuem vasta aplicação na área de processamento mineral. Dentre outras, podem ser citadas: circuitos fechados de moagem; deslamagem de minérios para a flotação; remoção de partículas menores que 10 μm , operação de desaguamento (SAMPAIO et al,2007). A Figura 1 representa o modelo de um hidrociclone típico.

Figura 1 - Design básico com fluxo simplificado de um hidrociclone (Adaptado: SVAROVSKY, 1984).



Os hidrociclones são alimentados com polpa de minério, sendo o resultado do processo dividido entre *underflow* e *overflow*. O *underflow* contém a maior parte das partículas grossas que foram alimentadas e o *overflow* engloba a maioria das partículas finas, que foram classificadas. O hidrociclone é composto de uma parte cilíndrica seguida de uma parte cônica que possui, em seu vértice, uma abertura, chamada *apex*, pela qual descarrega o *underflow*. A alimentação é introduzida tangencialmente à seção cilíndrica, em que há um tubo coaxial denominado *vortex finder*, pelo qual é descarregado o *overflow*. A energia potencial armazenada na polpa, em razão do bombeamento é transformada em energia cinética, e devido à geometria do hidrociclone, esta produz um movimento rotacional da polpa. As partículas com uma maior granulometria costumam a ocupar as regiões mais periféricas do cilindro e, conseqüentemente, do cone. As partículas de menor granulometria são deslocadas para a região central do hidrociclone. Desta forma, a região próxima à parede do hidrociclone é ocupada, preferencialmente, por polpa com predominância de partículas grossas e a região central, por polpa com predominância de partículas finas.

No centro do hidrociclone, na qual ocorre a mudança da seção cilíndrica para a cônica, o sentido do escoamento é invertido. Nessa seção cônica ocorre o estrangulamento no *apex* do cone, fazendo com que a maior parte do fluxo, com menor quantidade de partículas, seja

descarregado no orifício oposto, o *vortex finder*, de diâmetro relativamente maior que o do *apex*. Isto possibilita a classificação, uma vez que a polpa da região central, descarregada pelo overflow, possui uma maior concentração de partículas finas quando comparada àquela descarregada pelo *underflow*.

3.2. Distribuição Granulométrica

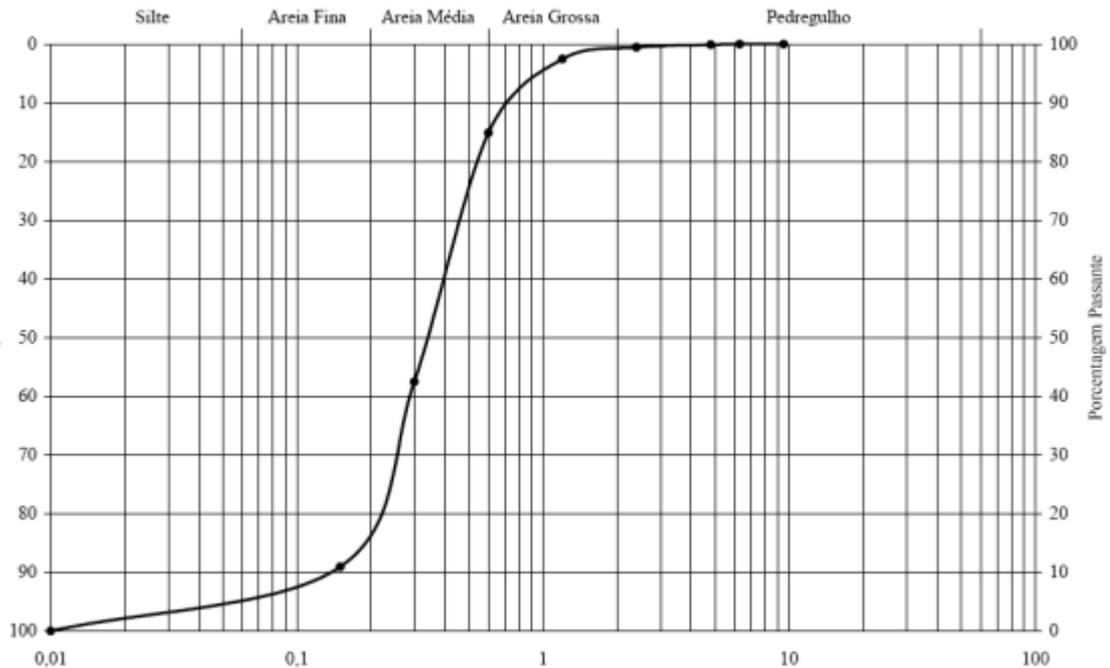
A “distribuição granulométrica” ou apenas “granulometria” mostra uma quantificação das partículas de uma amostra mineral em determinadas faixas de tamanho (ALVES, 2006).

As faixas de tamanho que compõe uma distribuição granulométrica são comumente determinadas por uma série de peneiras, distribuídas pelo tamanho decrescente de suas aberturas, pelas quais o material atravessa até ser retido caso encontre uma peneira com abertura menor do que seu diâmetro. Algumas informações importantes que podem ser retiradas deste processo são o d_{50} e o d_{80} que representam as aberturas das malhas que permitem a passagem de 50% e 80% do material analisado, respectivamente. Abaixo temos um exemplo de uma distribuição granulométrica na Tabela 1 juntamente com uma representação gráfica na Figura 2.

Tabela 1 - Exemplo de distribuição granulométrica

COMPOSIÇÃO GRANULOMETRICA - NBR 7217 - AREIA							
PENEIRAS		1ª DETERMINAÇÃO		2ª DETERMINAÇÃO		% Retida Média	% Retida Acumulada
nº	mm	Peso Retido (g)	% Retida	Peso Retido (g)	% Retida		
3/8"	9,5						
1/4"	6,3						
4	4,8	1,30	0,13	0,90	0,08	0,11	0,11
8	2,4	5,00	0,49	4,40	0,41	0,45	0,55
16	1,2	20,50	2,00	21,10	1,95	1,98	2,53
30	0,60	130,30	12,74	134,30	12,44	12,59	15,12
50	0,30	415,90	40,65	477,30	44,19	42,42	57,54
100	0,15	340,90	33,32	321,00	29,72	31,52	89,06
Fundo	0,01	109,20	10,67	121,00	11,20	10,94	100,00
TOTAL		1023,10	100,00	1080,00	100,00	100,00	164,91
Diâmetro Máximo: 1,2				Módulo de Finura: 1,65			

Figura 2 - Exemplo de Curva Granulométrica em papel semi-logarítimo.



3.3. Modelos Empíricos de Classificação em Hidrociclones

No momento de construção da planta de beneficiamento, os responsáveis pelas escolhas de quais e quantos hidrociclones irão ser usados têm que tomar suas escolhas de modo que a produtividade seja a melhor possível, para tal, a eficiência destes equipamentos, que é baseada primordialmente pelo comportamento do fluxo do hidrociclone, deve ser levada em consideração. Embora esse processo pareça ser simples e direto, o desacordo sobre qual a melhor ação a ser tomada para alcançar os melhores resultados na classificação impossibilita a criação de um modelo prático que possa ser usado de maneira mais usual. Sepúlveda (Sepúlveda, 1984) postula que:

“A ótima porcentagem de sólidos na alimentação dos ciclones, assim como a ótima carga circulante, são as que necessariamente resultem em operar com: a mínima porcentagem de sólidos no *overflow* dos ciclones; a máxima porcentagem de sólidos no *underflow* dos ciclones, operacionalmente factível de se implantar”.

Matematicamente, a relação entre variáveis está governada pela expressão (3.1)

$$\%S_{ALotm} = \frac{1 + CCotm}{\frac{CCotm}{\%S_{UFmax}} + \frac{1}{\%S_{OFmin}}} \quad (3.1)$$

em que:

$\%S_{ALotm}$ = porcentagem de sólidos em peso na alimentação do ciclone;

$\%S_{UFmax}$ = porcentagem de sólidos em peso no *underflow* do ciclone;

$\%S_{OFmin}$ = porcentagem de sólidos em peso no *overflow* do ciclone;

$CCotm$ = carga circulante, definida como a razão entre a tonelagem seca do *underflow* e *overflow* do classificador.

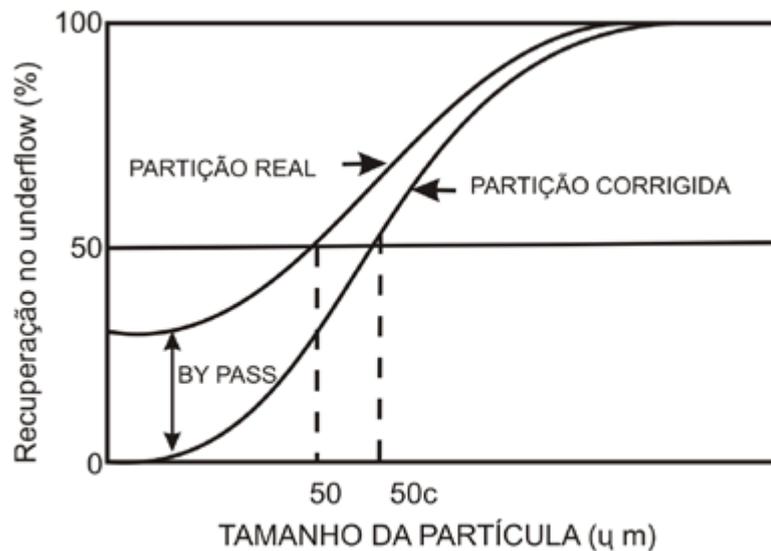
A primeira condição, referente à diluição do *overflow*, está limitada somente pela disponibilidade de água da instalação e dos requisitos dos processos subsequentes na cadeia operacional. A segunda condição, referente à diluição do *underflow*, é alcançada por meio de uma adequada geometria e do número de ciclones na bateria.

O hidrociclone é um importante dispositivo dentro dos tipos de classificadores e mecanismo de separação granular dentro do dele é complexo, uma vez que ele depende de características inerentes aos diversos tipos de modelo de hidrociclone e afim de tentar prever o comportamento desses mecanismos, foram propostos modelos matemáticos empíricos, dos quais podemos ressaltar o modelo de Plitt, Lynch e o mais recente modelo de CIMM, no qual esse estudo foi baseado, sendo que nesta revisão de literatura ainda serão apresentadas as características de cada modelo.

3.3.1. Eficiência dos Hidrociclones

Todos os classificadores, incluindo os hidrociclones, podem ter sua eficiência medida através de sua curva de partição. A curva de partição mostra a fração de partículas de um tamanho que será direcionada para a fração grosseira. Para esses classificadores, a curva tem tipicamente um formato de “S” (KING, 2001). Utilizando um material que tenha densidade uniforme se obtém uma separação que é inteiramente baseada nos tamanhos das partículas. Na Figura 3 está representada uma curva de Eficiência típica de um hidrociclone.

Figura 3 - Curva de Eficiência de Hidrociclone (LUZ et al, 2010).



No eixo das abscissas tem-se a granulometria das partículas e no das ordenadas, a porcentagem de material recuperado no *underflow*. Estes pontos representam a curva de eficiência real no qual o tamanho d_{50} corresponde a uma recuperação de 50% do material inicial da alimentação. Uma correção da curva que foi sugerida por Kelsall (1953) consiste que se R_f corresponde à fração de água da alimentação que se dirige ao *underflow* por meio do desvio (*bypass*), R_f por cento de todos os tamanhos de partículas são levadas para o *underflow*. Desta forma é possível encontrar a curva corrigida e o d_{50c} .

Os pontos das curvas são determinados pela fórmula (3.2):

$$Y_i = \frac{W_u M_u}{W_f M_f} \quad (3.2)$$

Em que:

i = classes de granulometria;

W_u, W_f = fração em peso de cada classe de tamanho no *underflow* e na alimentação, respectivamente;

M_u, M_f = vazão em peso do material seco no *underflow* e na alimentação, respectivamente.

O cálculo dos pontos corrigidos é determinado pela fórmula (3.3):

$$Y_{ic} = \frac{Y_i - R_f}{100 - R_f} \cdot 100 \quad (3.3)$$

sendo,

$$R_f = \frac{\frac{S}{1+S} - R_s \frac{\Phi}{100}}{1 - \frac{\Phi}{100}} \quad (3.4)$$

e,

$$R_s = \frac{M_u}{M_f} \quad (3.5)$$

em que,

S = razão entre as vazões volumétricas de polpa do *underflow* e do *overflow*;

Φ =percentagem de sólidos em volume;

3.3.2. Modelo de Lynch

O modelo proposto por Lynch et al (1965) mostra, através de vários testes realizados, que a curva de partição independe do tamanho do hidrociclone, do *vortex finder*, do *apex* e das condições operacionais. Desta forma, se torna possível prever os resultados de um hidrociclone de escala industrial a partir de testes de bancada.

Essa curva é definida pela equação:

$$Y_i = \frac{\exp(\alpha x_i) - 1}{\exp(\alpha x_1) + \exp(\alpha) - 2} \quad (3.6)$$

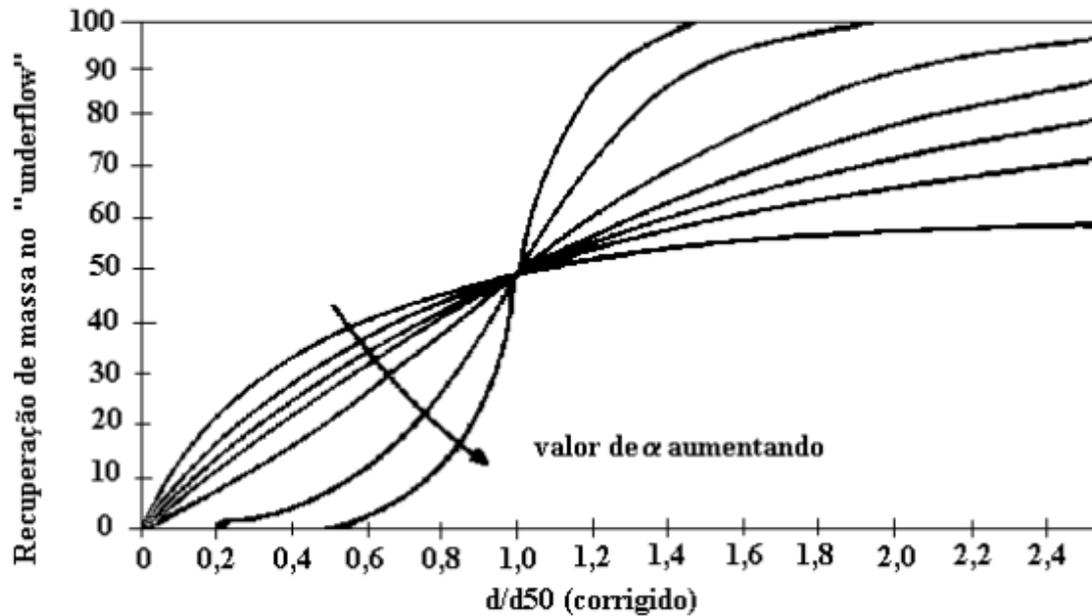
em que,

$x_i = d_i/d_{50c}$;

α = inclinação de curva de partição.

A influência de α está representada na Figura 4.

Figura 4 - Influência do aumento de α na curva padrão de partição (LUZ et al,2010).



3.3.3. Modelo de Plitt

Por meio de vários ensaios com hidrociclones, Plitt (1976) chegou a uma nova curva de partição que era definida pela equação:

$$Y_i = 1 - \exp[-0,693(d_i/d_{50c})^m] \quad (3.7)$$

em que,

m = fator que indica a eficiência de classificação.

sendo que m está relacionado com o parâmetro α de Lynch et al (1965) por meio da equação:

$$m = \frac{\alpha + 0,45}{1,45} \quad (3.8)$$

Através de suas pesquisas, Plitt também desenvolveu fórmulas que relacionam as dimensões dos hidrociclones com variáveis operacionais:

- Equação do d_{50c}

$$d_{50c} = \frac{39,7D_c^{0,46} D_i^{0,61} D_o^{1,21} u^{0,5} \exp(0,063\phi)}{D_u^{0,71} h^{0,38} Q^{0,45} [(\rho_s - \rho_l)/1,6]^k} \quad (3.9)$$

em que,

D_c = diâmetro do hidrociclone (m);

D_i = diâmetro ou diâmetro equivalente do duto de entrada (m);

D_o = diâmetro de *vortex finder* (m);

D_u = diâmetro do *apex* (m);

Φ = percentagem de sólidos (volume) na alimentação;

ρ_s, ρ_l = peso específico dos sólidos e da água (kg/m³);

h = altura livre; distância interna entre o *vortex finder* e o *apex* (m);

Q = vazão volumétrica da polpa na alimentação (l/seg);

De acordo com Silva et al (2012), o modelo de Plitt é o modelo mais utilizado para o cálculo do diâmetro de corte corrigido de ciclones (d50c).

- Equação do m

$$m = 1,94 \exp\left(-1,58 \cdot \frac{S}{1+S}\right) \left(D_c^2 \cdot \frac{h}{Q}\right)^{0,15} \quad (3.10)$$

em que,

S = razão entre as vazões volumétricas de polpa do *underflow* e do *overflow*;

- Equação da vazão volumétrica

$$Q = 0,7 D_c^{0,21} D_i^{0,53} (D_o^2 + D_u^2)^{0,49} h^{0,16} \exp(-0,0055\phi) P^{0,56} \quad (3.11)$$

em que,

P = pressão (KPa).

3.3.4. Modelo de CIMM

O modelo proposto pela equipe do CIMM (Centro de Investigación Minera y Metalúrgica) descrito por Sepúlveda et al (1983) é o modelo utilizado neste trabalho. Este modelo empírico foi construído a partir de 77 ensaios de classificação com hidrociclones de diferentes tamanhos e ele apresenta similaridades com o modelo de Plitt, a não ser pelas variáveis R_f (curto circuito de finos) e R_w (curto circuito de água), que no modelo de Plitt são idênticas, enquanto no modelo CIMM existem mais fatores relacionados a cada uma das duas variáveis.

- Equação da pressão da alimentação do hidrociclone

$$H = a_1 \frac{Q^{1,46} (-7,36\phi + 10,79\phi^2)}{(D_c)^{0,20} (h)^{0,15} (D_i)^{0,51} (D_o)^{1,65} (D_u)^{0,52}} \quad (3.12)$$

em que,

a_1 = constante empírica do material

D_c = diâmetro do hidrociclone (pol);

D_i = diâmetro ou diâmetro equivalente do duto de entrada (pol);

D_o = diâmetro de *vortex finder* (pol);

D_u = diâmetro do *apex* (pol);

Φ = percentagem de sólidos (volume) na alimentação;

h = altura livre; distância interna entre o *vortex finder* e o *apex* (pol);

Q = vazão volumétrica da polpa na alimentação (m^3/h);

- Equação do tamanho de corte corrigido:

$$d_{50c} = a_2 \frac{(D_c)^{0,4} (D_i)^{0,58} (D_o)^{1,91} \exp(11,12\phi)}{(D_u)^{0,8} (h)^{0,37} (Q)^{0,44} (\rho_s - 1)^{0,5}} \quad (3.13)$$

em que,

a_2 = constante empírica referente ao material;

ρ_s = peso específico do minério (g/cm^3).

- Equação da partição volumétrica da polpa:

$$S = a_3 \frac{h^{0,19} \left(\frac{D_u}{D_o}\right)^{2,64} \exp(-4,33\phi + 8,77\phi^2)}{H^{0,54} (D_c)^{0,38}} \quad (3.14)$$

em que,

a_3 = constante empírica do material.

Realizando estes cálculos é possível determinar a eficiência de classificação por fração granulométrica, definida por:

$$Y_i = R_f + (1 - R_f) Y_{ic}; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.15)$$

em que,

Y_{ic} = idem equação (3.7);

m = parâmetro de Plitt, definido por:

$$m = \exp(a_4 - 1,58R_v) \left[\frac{(D_c)^2 h}{Q}\right]^{0,15} \quad (3.16)$$

a_4 = constante empírica do material;

R_v = fração volumétrica de polpa recuperada no *underflow*:

$$R_v = \frac{S}{S + 1} \quad (3.17)$$

R_f = curto circuito dos finos do hidrociclone:

$$R_f = \lambda R_w \quad (3.18)$$

sendo que,

λ = constante empírica do material;

R_w = curto circuito da água no hidrociclone, definida por:

$$R_w = \frac{R_v - \phi R_{sc}}{1 - \phi[1 - \lambda(1 - R_{sc})]} \quad (3.19)$$

em que R_{sc} é a fração de sólidos a ser recuperado no *underflow* caso não houvesse curto circuito, que é definido por:

$$R_{sc} = \sum_{i=1}^n f_i Y_{ic} \quad (3.20)$$

Este modelo é muito similar ao proposto por Plitt (1976), e a rotina de cálculo dos parâmetros deve ser seguida conforme sua sugestão:

- 1). Definir os parâmetros a_1 , a_2 , a_3 , a_4 e λ a partir de ensaios de ciclonação.
- 2). Calcular a pressão de alimentação do hidrociclone (H) definido pela equação 3.12.
- 3). Calcular a partição de polpa (S) pela equação 3.14 e com este valor definir a fração volumétrica recuperada no *underflow* (R_v) pela equação 3.17.
- 4). Definir o parâmetro de Plitt (m) pela equação 3.16.
- 5). Calcular o d_{50c} pela equação 3.13.
- 6). Definir a eficiência de classificação corrigida (Y_{ic}) para cada fração granulométrica (equação 3.7).
- 7). Calcular o valor da fração de sólidos recuperada no *underflow* (R_{sc}) pela equação 3.20.
- 8). Definir o valor do curto-circuito de água (R_w) pela equação 3.19.
- 9). Calcular o curto-circuito de finos (R_f) pela equação 3.18.
- 10). Por fim, calcular a eficiência real de classificação por fração granulométrica (Y_i).

Neste trabalho o modelo de CIMM foi adaptado por meio do aplicativo Moly-Cop Tools™ para calibragem do modelo para posterior simulação.

4. Metodologia

Os dados iniciais que deram origem a este estudo são provenientes de teste de ciclonagem realizados pelo Prof Dr Vladimir Kronemberger Alves, orientador deste trabalho, utilizando uma amostra de Antracito. O material utilizado foi amostrado na descarga de um moinho de bola de escala industrial, posteriormente esse material foi submetido a testes de ciclonagem sob iferentes condições, variando: porcentagem de sólidos na alimentação; pressão; apex; vortex; e inlet, sendo o diâmetro a altura do ciclone constantes em todos os testes. Os parâmetros do ciclone em cada teste estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros do ciclone em cada teste.

Teste 1		Teste 2	
%Sol. Alimentação	41.84	%Sol. Alimentação	41.30
Pressão (psi)	34.84	Pressão (psi)	4.98
Diâmetro (pol)	6.00	Diâmetro (pol)	6.00
Altura (pol)	56.70	Altura (pol)	56.70
Inlet (pol)	1.61	Inlet (pol)	1.61
Vortex (pol)	2.36	Vortex (pol)	2.36
Apex (pol)	1.18	Apex (pol)	0.83
Teste 3		Teste 4	
%Sol. Alimentação	50.49	%Sol. Alimentação	61.13
Pressão (psi)	14.22	Pressão (psi)	5.69
Diâmetro (pol)	6.00	Diâmetro (pol)	6.00
Altura (pol)	56.70	Altura (pol)	56.70
Inlet (pol)	1.61	Inlet (pol)	1.61
Vortex (pol)	2.36	Vortex (pol)	2.36
Apex (pol)	1.18	Apex (pol)	1.18
Teste 5		Teste 6	
%Sol. Alimentação	40.29	%Sol. Alimentação	40.67
Pressão (psi)	22.75	Pressão (psi)	34.13
Diâmetro (pol)	6.00	Diâmetro (pol)	6.00
Altura (pol)	56.70	Altura (pol)	56.70
Inlet (pol)	1.61	Inlet (pol)	1.61
Vortex (pol)	2.36	Vortex (pol)	2.36
Apex (pol)	1.57	Apex (pol)	1.57

As simulações de ciclonagem foram realizadas por meio do aplicativo Moly-Cop Tools™, onde foi implementado o modelo de simulação do CIMM, descrito anteriormente, para que isso fosse possível foi necessário um balanço de massa, Tabela 3, que serviu de base para calibração do modelo e estimação dos parâmetros: a_1 , a_2 , a_3 , a_4 e λ .

Tabela 3 - Resultado do balanço de massa do hidrociclone referente ao Teste 1.

Number of Cyclones		1		Operating Conditions :			
Cyclone Dimensions, in :					Feed Flowrate, m ³ /hr	51.6	
Diameter	6.00				Pressure, psi	34.8	
Height	56.70				D50 (corr.), microns	167.3	
Inlet	1.61				Water By-Pass, %	19.5	
Vortex	2.36				Solids By-Pass, %	16.1	
Apex	1.18				Plitt's Parameter	0.74	
Ore Density, ton/m ³	1.85				Circulating Load, %	83	
Size Distributions, % Passing							
	Mesh	Opening	Mid-Size	Feed	U'flow	O'flow	
	1.05	63357	53276	100.00	100.00	100.00	
	0.742	44800	37672	100.00	100.00	100.00	
	0.525	31678	26638	100.00	100.00	100.00	
	0.371	22400	18836	100.00	100.00	100.00	
	3	15839	13319	100.00	100.00	100.00	
	4	11200	9418	100.00	100.00	100.00	
	6	7920	6660	100.00	100.00	100.00	
	8	5600	5185	100.00	100.00	100.00	
	10	4800	3394	99.00	97.80	100.00	
	14	2400	1549	97.29	94.04	100.00	
	20	1000	917	96.11	91.51	99.94	
	28	840	772	95.55	90.36	99.87	
	35	710	596	94.89	89.05	99.75	
	48	500	387	93.38	86.22	99.35	
	65	300	251	89.18	79.11	97.56	
	100	210	177	83.47	70.70	94.12	
	150	150	126	74.59	59.10	87.49	
	200	106	89	64.43	47.43	78.59	
	270	75	58	54.44	37.39	68.66	
	400	45	23	39.90	24.92	52.39	
	D80, microns			184.95	320.52	112.28	
	Ore, ton/hr			28.73	13.06	15.67	
	Water, m ³ /hr			36.11	7.03	29.07	
	Slurry, ton/hr			64.84	20.10	44.74	
	Slurry, m ³ /hr			51.64	14.10	37.54	
	Slurry Dens., ton/m ³			1.26	1.43	1.19	
	% Solids (by volume)			30.08	50.09	22.56	
	% Solids (by weight)			44.31	65.00	35.02	

Com a balanço de massa pronto, foi possível estimar os parâmetros de classificação do modelo de simulação o que nos permitiu realizar simulações utilizando o *software* Moly-Cop Tools™ e realizar as devidas comparações que iriam mostrar se o modelo calibrado está adequado para posteriores simulações.

5. Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados das simulações de ciclonação feitas a partir do cálculo dos parâmetros e da calibragem do modelo estudado.

5.1. Resultados das simulações de hidrociclones

Inicialmente, seguindo as diretrizes do modelo do CIMM, os parâmetros de classificação foram encontrados por meio do uso do aplicativo Moly-Cop Tools™, as constantes a_1 , a_2 , a_3 , a_4 e λ , utilizando uma amostra de Antracito, os mesmos estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros de classificação ou constantes empíricas do material.

CONSTANTES DE CLASSIFICAÇÃO	
a_1	11.378
a_2	10.498
a_3	33.765
a_4	-0.426
λ	0.828

Como dito anteriormente a calibragem do modelo foi feita a partir dos resultados obtidos com o Teste 1 de ciclonação da planta piloto. Com o modelo calibrado foram realizadas as simulações dos demais testes. As Figuras 5 até a 10 apresentam as comparações entre os resultados, de *overflow* e *underflow*, experimentais e os resultados encontrados através das simulações.

Figura 5 - Relação entre Overflow e Underflow medido e simulado do Teste 1.

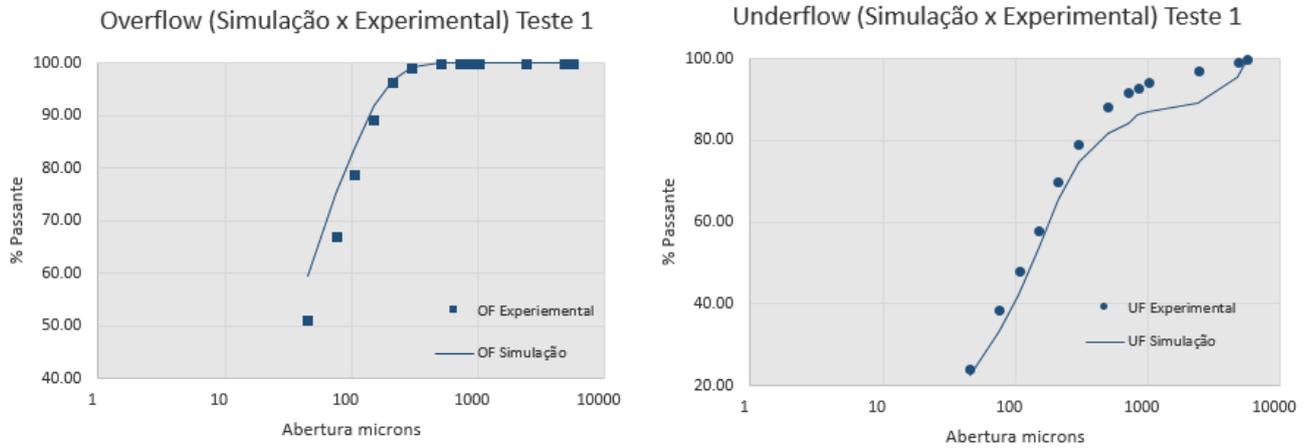


Figura 6 - Relação entre Overflow e Underflow medido e simulado do Teste 2.

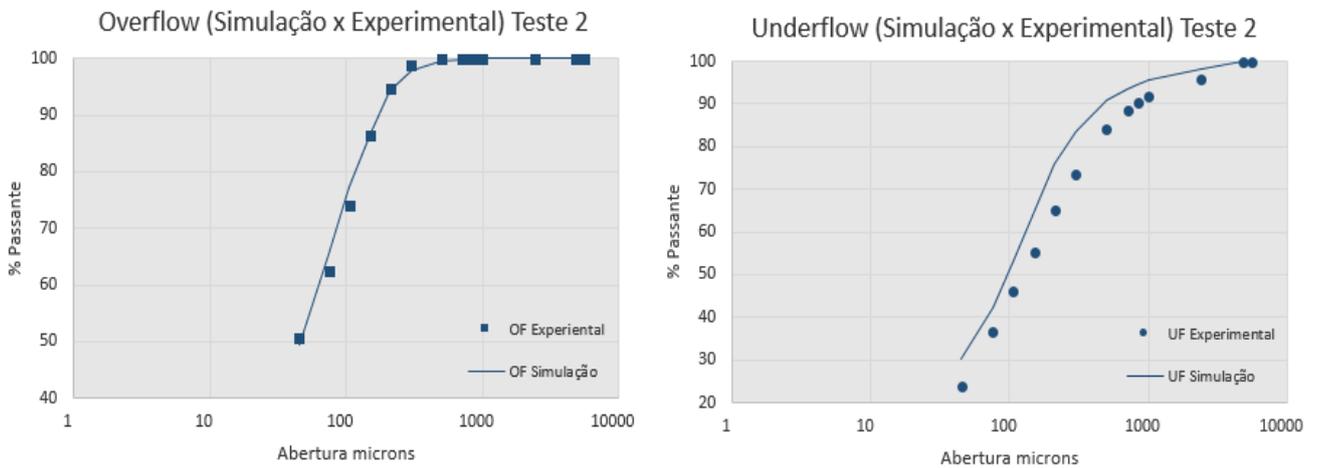


Figura 7 - Relação entre Overflow e Underflow medido e simulado do Teste 3.

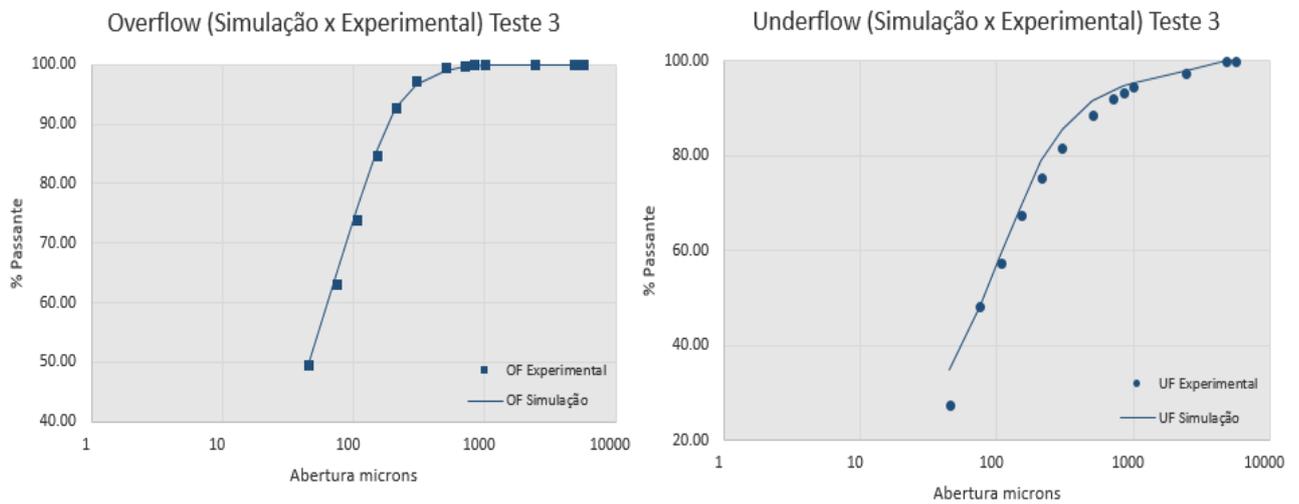


Figura 8 – Relação entre Overflow e Underflow medido e simulado do Teste 4.

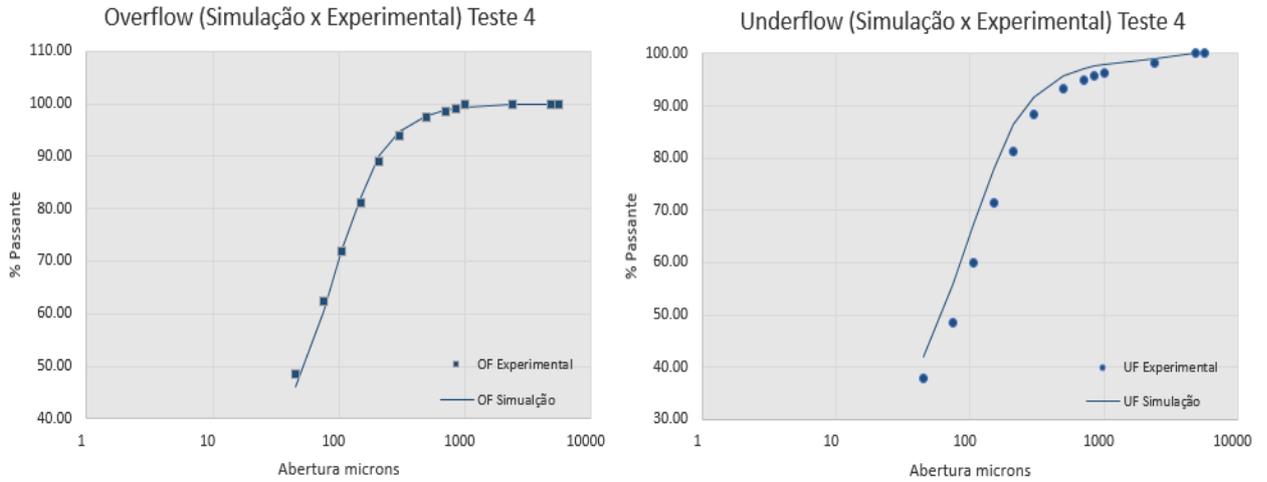


Figura 9 - Relação entre Overflow e Underflow medido e simulado do Teste 5.

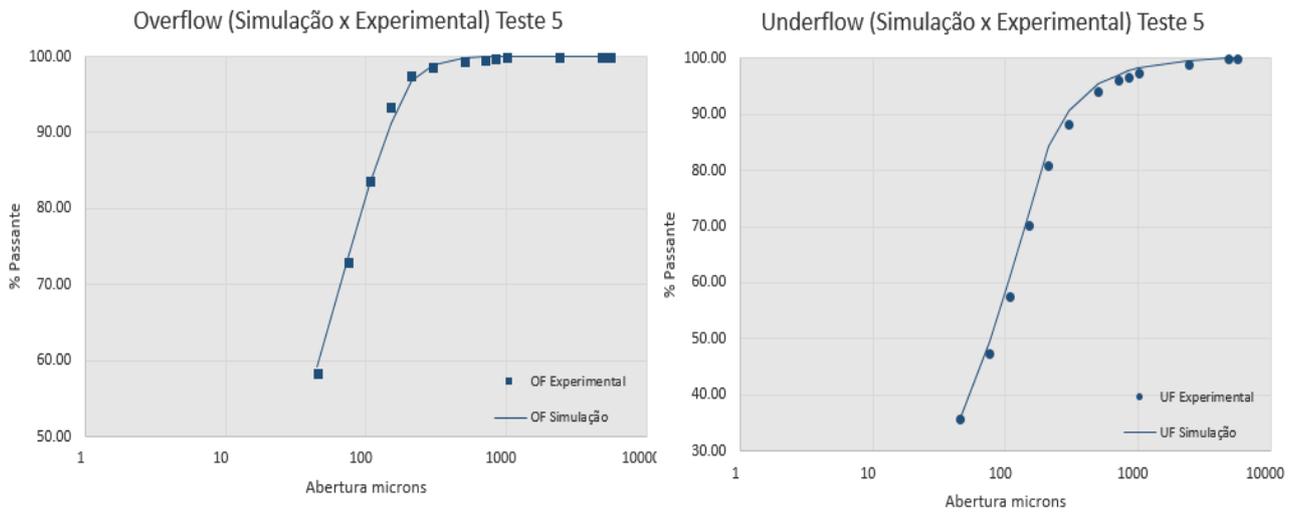
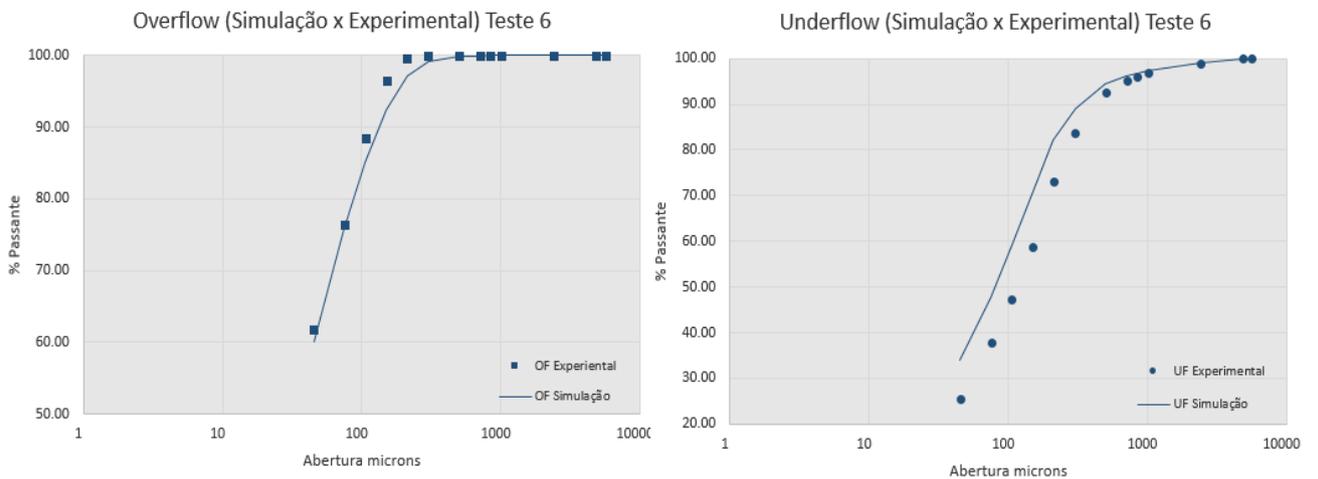


Figura 10 - Relação entre Overflow e Underflow medido e simulado do Teste 6.



Na Tabela 5 estão apresentadas as porcentagens (em massa) de sólidos em cada fluxo do hidrociclone, tanto na condição experimental quanto na simulada.

Tabela 5 - Porcentagem (em massa) de sólidos nos fluxos do hidrociclone.

Porcentagem de Sólidos em cada Fluxo (Alimentação, Underflow e Overflow)					
(Experimental x Simulação)					
Teste 1			Teste 2		
Fluxo	Experimental	Smulação	Fluxo	Experimental	Smulação
Alimentação	41.84	41.84	Alimentação	41.30	41.30
Underflow	68.02	69.20	Underflow	65.16	54.16
Overflow	32.89	29.55	Overflow	36.11	35.65
Teste 3			Teste 4		
Fluxo	Experimental	Smulação	Fluxo	Experimental	Smulação
Alimentação	50.49	50.49	Alimentação	61.13	61.13
Underflow	57.21	60.11	Underflow	60.66	64.89
Overflow	45.74	43.59	Overflow	61.42	55.20
Teste 5			Teste 6		
Fluxo	Experimental	Smulação	Fluxo	Experimental	Smulação
Alimentação	40.29	40.29	Alimentação	40.67	40.67
Underflow	47.52	53.38	Underflow	82.74	56.95
Overflow	36.02	25.94	Overflow	31.00	26.00

As informações apresentadas na Tabela 5 ajudam a corroborar com a acurácia do modelo calibrado, uma vez que mesmo os valores não sendo completamente idênticos, eles apresentam variações aceitáveis, o que nos remete ao que já foi comentado a respeito da complexidade do mecanismo de separação granular no interior dos hidrociclones.

6. Conclusão

Não há dúvidas de que hidrociclones se tornaram uma peça insubstituível dentro dos mecanismos de classificação e mais estudos ainda são necessários para que sua implementação continue a ser aperfeiçoada. A modelagem matemática, como a estudada neste trabalho, se apresenta como uma ferramenta importante dentro dos estudos sobre ciclonagem para uma aplicação ainda mais eficaz deste processo.

Os resultados das simulações conseguiram prever de maneira satisfatória o comportamento dos produtos do hidrociclone testado em planta piloto, o que indica a acurácia do modelo avaliado neste trabalho é adequada e é uma opção viável para ajudar no planejamento, dimensionamento e otimização de uma planta de beneficiamento.

Uma observação a ser lembrada, seria de que mesmo o modelo apresentando bons resultados para as condições usadas nesta pesquisa, ele não poderia ser utilizado de maneira direta em outras condições, sendo uma nova calibragem necessária para adequá-lo a um outro material.

Referência Bibliográficas

ALVES, V.K. **Otimização de carga moedora utilizando ferramentas de modelamento matemático e simulação de moagem.** Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

KELSALL, D.F. **A further study of hydraulic cyclone.** Chemical Engineering Science. vol. 2, p. 254-273, 1953.

KING, R.P., **Modelling and Simulation of Mineral Processing Systems,** Butterworth-Heinemann, Oxford. 2001.

KRAIPECH, W., WASKOWSKI, A., DYAKOWSKI, T., SUKSANGPANOMRUNG, A., **An investigation of the particle-fluid and particle-particle interactions on the flow within a hydrocyclone,** Chemical Engineers Japan, v. 111, 2005, pp. 189-197.

LUZ, A. B. da; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios.** 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 896 p.

LYNCH, A.J., RAO, T.C. **Dygital computer simulation of comminution systems -** Comm. Min. Metall. Cong., 8 Austrália, N.Z., Proceedings. 1965.

MELO, C. H. **Modelagem da classificação de minério de ferro em hidrociclones,** Escola Politécnica, Rio de Janeiro, Brasil, 2010.

PLITT, L.R. **A mathematical model of the hydrocyclone classifier,** CIM Bulletin v. 69, 1976.

SAMPAIO, J. A.; OLIVEIRA, G. P.; SILVA, A. O. **Ensaio de classificação em hidrociclone. IN: Tratamento de Minérios: práticas laboratoriais.** Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2007. p. 139-154.

SEPÚLVEDA, J.E., SOUYRIS, R., REYES, J. **Proyecto P1183,** CIMM, 1983.

SEPÚLVEDA, J.E., **Una “Cuarta Ley” para la Molienda / Clasificación.** IV Simposium sobre Molienda, ARMCO, Chile, p. 49, Noviembre., 1984.

SILVA, C. A., SILVA, E. M. S., MATOS, J. D. V., **Modelo empírico para cálculo do diâmetro de corte corrigido de hidrociclone**, TECNOL. METAL. MATER. MINAS, Sao Paulo, V9, n4, 2012, p302-308.

SVAROVSKY, L. **Hydrocyclone**, Holt, Rinehart & Winston, Eastbourne, UK, 1984.

SVAROVSKY, L., **Hydrocyclones**. In: SVAROVSKY, L., ed., Solid-Liquid Separation, Butterworths & Co. Ltd., 3ª edição, 1990.

Apêndice A - Dados das Simulações do Modelo de Ciclone

Moly-Cop Tools™						Sample N°	Teste 1
			CYCLOSIM				
			Hydrocyclone Simulator				
Remarks :		Teste 1					
Number of Cyclones :		1		Operating Conditions :			
Cyclone Dimensions, in :				Feed Flowrate, m3/hr		51.2	
Diameter		6.00		Pressure, psi		34.839	
Height		56.70		D50 (corr.), microns		118.9	
Inlet		1.61		Water By-Pass, %		16.4	
Vortex		2.36		Solids By-Pass, %		18.3	
Apex		1.18		Plitt's Parameter		0.99	
Ore Density, ton/m3		1.85		Circulating Load, %		105	
			Size Distributions, % Passing			Classifier Efficiency	
Mesh	Opening	Mid-Size	Feed	U'flow	O'flow	Actual	Corrected
1.05	63357	47706	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000
0.742	44800	53276	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000
0.525	31678	37672	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000
0.371	22400	26638	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000
3	15839	18836	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000
4	11200	13319	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000
6	7920	9418	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000
8	5600	6660	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000
10	4800	5185	97.66	95.44	100.00	1.000	1.000
14	2400	3394	94.39	89.06	100.00	1.000	1.000
20	1000	1549	93.28	86.90	100.00	1.000	1.000
28	840	917	92.87	86.11	100.00	0.995	0.994
35	710	772	91.94	84.30	99.98	0.990	0.988
48	500	596	90.66	81.86	99.90	0.973	0.967
65	300	387	86.68	74.80	99.18	0.911	0.891
100	210	251	80.73	65.42	96.83	0.808	0.765
150	150	177	72.37	53.88	91.83	0.708	0.642
200	106	126	62.44	42.11	83.84	0.608	0.520
270	75	89	53.74	33.37	75.18	0.515	0.406
400	45	58	40.60	22.61	59.52	0.420	0.289
-400	0	23				0.286	0.125
D80, microns			204	439	91.4		
Ore, ton/hr			26.5	13.6	12.9	Classifier Constants	
Water, m3/hr			36.9	6.1	30.8		
Slurry, ton/hr			63.4	19.6	43.7	a1	11.378
Slurry, m3/hr			51.2	13.4	37.8	a2	9.350
Slurry Dens., ton/m3			1.238	1.466	1.157	a3	32.730
% Solids (by volume)			28.0	54.8	18.5	a4	-0.153
% Solids (by weight)			41.8	69.2	29.6	λ	1.115

Moly-Cop Tools™						Sample N° 2	
			CYCLOSIM				
			Hydrocyclone Simulator				
Remarks :		Teste 2					
Number of Cyclones :			1			Operating Conditions :	
Cyclone Dimensions, in :						Feed Flowrate, m3/hr	11.8
	Diameter	6.00				Pressure, psi	4.977
	Height	56.70				D50 (corr.), microns	286.6
	Inlet	1.61				Water By-Pass, %	23.8
	Vortex	2.36				Solids By-Pass, %	26.6
	Apex	0.83				Plitt's Parameter	1.19
Ore Density, ton/m3		1.85				Circulating Load, %	67
			Size Distributions, % Passing			Classifier Efficiency	
Mesh	Opening	Mid-Size	Feed	U'flow	O'flow	Actual	Corrected
1.05	63357	47706	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000
0.742	44800	53276	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000
0.525	31678	37672	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000
0.371	22400	26638	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000
3	15839	18836	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000
4	11200	13319	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000
6	7920	9418	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000
8	5600	6660	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000
10	4800	5185	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000
14	2400	3394	99.34	98.35	100.00	1.000	1.000
20	1000	1549	98.26	95.67	99.99	0.996	0.994
28	840	917	97.78	94.52	99.96	0.953	0.937
35	710	772	97.36	93.56	99.90	0.923	0.895
48	500	596	96.04	90.72	99.59	0.859	0.809
65	300	387	92.14	83.64	97.82	0.727	0.629
100	210	251	86.86	75.81	94.24	0.594	0.447
150	150	177	77.86	64.49	86.80	0.504	0.324
200	106	126	67.67	53.42	77.18	0.435	0.230
270	75	89	56.21	42.47	65.38	0.382	0.159
400	45	58	41.75	30.25	49.43	0.338	0.099
-400	0	23				0.290	0.033
D80, microns			163	255	117.9		
Ore, ton/hr			6.0	2.4	3.6	Classifier Constants	
Water, m3/hr			8.6	2.0	6.5		
Slurry, ton/hr			14.6	4.5	10.1	a1	11.378
Slurry, m3/hr			11.8	3.3	8.5	a2	9.350
Slurry Dens., ton/m3			1.234	1.331	1.196	a3	32.730
% Solids (by volume)			27.6	39.0	23.0	a4	-0.153
% Solids (by weight)			41.3	54.2	35.7	λ	1.115

Moly-Cop Tools™						Sample N° 3	
			CYCLOSIM				
			Hydrocyclone Simulator				
Remarks :			Teste 3				
Number of Cyclones :			1		Operating Conditions :		
Cyclone Dimensions, in :					Feed Flowrate, m3/hr		27.9
Diameter			6.00		Pressure, psi		14.219
Height			56.70		D50 (corr.), microns		359.3
Inlet			1.61		Water By-Pass, %		33.7
Vortex			2.36		Solids By-Pass, %		37.5
Apex			1.18		Plitt's Parameter		0.88
Ore Density, ton/m3			1.85		Circulating Load, %		99
			Size Distributions, % Passing			Classifier Efficiency	
Mesh	Opening	Mid-Size	Feed	U'flow	O'flow	Actual	Corrected
1.05	63357	47706	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000
0.742	44800	53276	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000
0.525	31678	37672	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000
0.371	22400	26638	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000
3	15839	18836	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000
4	11200	13319	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000
6	7920	9418	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000
8	5600	6660	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000
10	4800	5185	100.00	100.00	100.00	1.000	0.999
14	2400	3394	98.93	97.85	99.99	0.996	0.993
20	1000	1549	97.62	95.36	99.86	0.949	0.918
28	840	917	97.26	94.73	99.77	0.871	0.793
35	710	772	96.67	93.73	99.57	0.839	0.742
48	500	596	95.36	91.65	99.02	0.788	0.660
65	300	387	91.19	85.77	96.55	0.702	0.523
100	210	251	85.83	79.06	92.54	0.623	0.397
150	150	177	77.38	69.38	85.30	0.570	0.311
200	106	126	67.62	59.05	76.10	0.526	0.242
270	75	89	56.85	48.43	65.18	0.490	0.185
400	45	58	42.08	34.87	49.22	0.457	0.131
-400	0	23				0.412	0.059
D80, microns			167	221	123.4		
Ore, ton/hr			18.3	9.1	9.2	Classifier Constants	
Water, m3/hr			18.0	6.0	11.9		
Slurry, ton/hr			36.3	15.2	21.1	a1	11.378
Slurry, m3/hr			27.9	11.0	16.9	a2	9.350
Slurry Dens., ton/m3			1.302	1.382	1.250	a3	32.730
% Solids (by volume)			35.5	44.9	29.5	a4	-0.153
% Solids (by weight)			50.5	60.1	43.6	λ	1.115

Moly-Cop Tools TM						Sample N° 4		
			CYCLOSIM					
			Hydrocyclone Simulator					
Remarks :		Teste 4						
Number of Cyclones :		1		Operating Conditions :				
Cyclone Dimensions, in :				Feed Flowrate, m3/hr		13.1		
	Diameter	6.00		Pressure, psi		5.689		
	Height	56.70		D50 (corr.), microns		1594.4		
	Inlet	1.61		Water By-Pass, %		55.2		
	Vortex	2.36		Solids By-Pass, %		61.5		
	Apex	1.18		Plitt's Parameter		0.71		
Ore Density, ton/m3		1.85		Circulating Load, %		185		
			Size Distributions, % Passing			Classifier Efficiency		
Mesh	Opening	Mid-Size	Feed	U'flow	O'flow	Actual	Corrected	
1.05	63357	47706	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000	
0.742	44800	53276	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000	
0.525	31678	37672	100.00	100.00	100.00	0.999	0.999	
0.371	22400	26638	100.00	100.00	100.00	0.998	0.994	
3	15839	18836	100.00	100.00	100.00	0.993	0.982	
4	11200	13319	100.00	100.00	100.00	0.983	0.957	
6	7920	9418	100.00	100.00	100.00	0.967	0.915	
8	5600	6660	100.00	100.00	100.00	0.944	0.854	
10	4800	5185	100.00	100.00	100.00	0.923	0.799	
14	2400	3394	99.35	99.12	99.78	0.883	0.695	
20	1000	1549	98.42	97.96	99.26	0.805	0.493	
28	840	917	98.06	97.55	99.02	0.759	0.373	
35	710	772	97.60	97.01	98.68	0.746	0.339	
48	500	596	96.42	95.69	97.77	0.727	0.291	
65	300	387	92.73	91.70	94.62	0.701	0.223	
100	210	251	87.68	86.41	90.03	0.680	0.169	
150	150	177	79.41	77.91	82.19	0.667	0.135	
200	106	126	69.03	67.41	72.04	0.657	0.107	
270	75	89	57.42	55.81	60.39	0.648	0.085	
400	45	58	43.46	42.05	46.07	0.640	0.063	
-400	0	23				0.628	0.033	
D80, microns			154	163	139.7			
Ore, ton/hr			11.1	7.2	3.9	Classifier Constants		
Water, m3/hr			7.1	3.9	3.2			
Slurry, ton/hr			18.2	11.1	7.1	a1	11.378	
Slurry, m3/hr			13.1	7.8	5.3	a2	9.350	
Slurry Dens., ton/m3			1.391	1.425	1.340	a3	32.730	
% Solids (by volume)			45.9	50.0	40.0	a4	-0.153	
% Solids (by weight)			61.1	64.9	55.2	λ	1.115	

Moly-Cop Tools™						Sample N° 5	
			CYCLOSIM				
			Hydrocyclone Simulator				
Remarks :			Teste 5				
Number of Cyclones :			1		Operating Conditions :		
Cyclone Dimensions, in :					Feed Flowrate, m3/hr		42.0
Diameter			6.00		Pressure, psi		22.752
Height			56.70		D50 (corr.), microns		89.6
Inlet			1.61		Water By-Pass, %		40.8
Vortex			2.36		Solids By-Pass, %		45.5
Apex			1.57		Plitt's Parameter		0.72
Ore Density, ton/m3			1.85		Circulating Load, %		225
			Size Distributions, % Passing			Classifier Efficiency	
Mesh	Opening	Mid-Size	Feed	U'flow	O'flow	Actual	Corrected
1.05	63357	47706	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000
0.742	44800	53276	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000
0.525	31678	37672	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000
0.371	22400	26638	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000
3	15839	18836	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000
4	11200	13319	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000
6	7920	9418	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000
8	5600	6660	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000
10	4800	5185	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000
14	2400	3394	99.65	99.49	100.00	1.000	1.000
20	1000	1549	98.78	98.24	99.99	0.997	0.995
28	840	917	98.37	97.65	99.97	0.986	0.974
35	710	772	97.96	97.08	99.95	0.979	0.961
48	500	596	96.85	95.54	99.81	0.963	0.932
65	300	387	93.18	90.64	98.91	0.924	0.861
100	210	251	88.22	84.40	96.84	0.872	0.765
150	150	177	78.37	72.68	91.19	0.824	0.677
200	106	126	67.41	60.41	83.17	0.775	0.587
270	75	89	57.08	49.58	73.99	0.727	0.499
400	45	58	43.15	36.06	59.13	0.672	0.399
-400	0	23				0.579	0.227
D80, microns			159	186	94.5		
Ore, ton/hr			20.8	14.4	6.4	Classifier Constants	
Water, m3/hr			30.8	12.6	18.2		
Slurry, ton/hr			51.6	27.0	24.6	a1	11.378
Slurry, m3/hr			42.0	20.3	21.7	a2	9.350
Slurry Dens., ton/m3			1.227	1.325	1.135	a3	32.730
% Solids (by volume)			26.7	38.2	15.9	a4	-0.153
% Solids (by weight)			40.3	53.4	25.9	λ	1.115

Moly-Cop Tools™						Sample N°		6	
			CYCLOSIM						
			Hydrocyclone Simulator						
Remarks :		Teste 6							
Number of Cyclones :		1		Operating Conditions :					
Cyclone Dimensions, in :				Feed Flowrate, m3/hr		55.6			
Diameter		6.00		Pressure, psi		34.128			
Height		56.70		D50 (corr.), microns		82.0			
Inlet		1.61		Water By-Pass, %		34.4			
Vortex		2.36		Solids By-Pass, %		38.3			
Apex		1.57		Plitt's Parameter		0.75			
Ore Density, ton/m3		1.85		Circulating Load, %		197			
			Size Distributions, % Passing			Classifier Efficiency			
Mesh	Opening	Mid-Size	Feed	U'flow	O'flow	Actual	Corrected		
1.05	63357	47706	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000		
0.742	44800	53276	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000		
0.525	31678	37672	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000		
0.371	22400	26638	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000		
3	15839	18836	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000		
4	11200	13319	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000		
6	7920	9418	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000		
8	5600	6660	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000		
10	4800	5185	100.00	100.00	100.00	1.000	1.000		
14	2400	3394	99.39	99.09	100.00	1.000	1.000		
20	1000	1549	98.30	97.44	100.00	0.999	0.998		
28	840	917	97.88	96.81	99.98	0.991	0.985		
35	710	772	97.45	96.18	99.96	0.985	0.975		
48	500	596	96.24	94.41	99.86	0.971	0.952		
65	300	387	92.42	89.04	99.09	0.932	0.890		
100	210	251	87.20	82.17	97.15	0.875	0.798		
150	150	177	78.17	71.00	92.32	0.820	0.709		
200	106	126	67.80	59.08	85.01	0.763	0.615		
270	75	89	57.25	47.87	75.75	0.705	0.522		
400	45	58	42.69	33.86	60.13	0.639	0.415		
-400	0	23				0.526	0.232		
D80, microns			161	197	88.3				
Ore, ton/hr			27.8	18.5	9.4	Classifier Constants			
Water, m3/hr			40.6	14.0	26.6				
Slurry, ton/hr			68.4	32.4	36.0	a1	11.378		
Slurry, m3/hr			55.6	23.9	31.7	a2	9.350		
Slurry Dens., ton/m3			1.230	1.354	1.136	a3	32.730		
% Solids (by volume)			27.0	41.7	16.0	a4	-0.153		
% Solids (by weight)			40.7	57.0	26.0	λ	1.115		

