

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA

**“AJUSTE DE MODELOS E PREVISÃO DO DESEMPENHO DE
HIDROCICLONES NA CLASSIFICAÇÃO DE PARTÍCULAS”**

CASSANDRA LUCIA QUEIROZ DA SILVA

Campina Grande - Paraíba
Fevereiro de 2006

**“AJUSTE DE MODELOS E PREVISÃO DO DESEMPENHO DE
HIDROCICLONES NA CLASSIFICAÇÃO DE PARTÍCULAS”**

Cassandra Lucia Queiroz da Silva

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Área de concentração: Operações e Processos

Orientadores: Prof. Dr. José Jailson Nicácio Alves

Prof. Dr. Luís Gonzaga Sales Vasconcelos

**Campina Grande - Paraíba
Fevereiro de 2006**



S586a Silva, Cassandra Lúcia Queiroz da.
"Ajuste de modelos e previsão do desempenho de hidrociclones na classificação de partículas" / Cassandra Lúcia Queiroz da Silva. - Campina Grande, 2006.
104 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2006.
"Orientação: Prof. Dr. José Jailson Nicácio Alves, Prof. Dr. Luís Gonzaga Sales Vasconcelos".
Referências.

1. Química Operacional - Hidrociclones - Separação de Partículas. 2. Indústria de Beneficiamento de Minérios. 3. Hidrociclones - Modelos - Classificação de Partículas. 4. Dissertação - Engenharia Química. I. Alves, José Jailson Nicácio. II. Vasconcelos, Luís Gonzaga Sales. III. Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande (PB). IV. Título CDU 542:621.928.3(043)

“AJUSTE DE MODELOS E PREVISÃO DO DESEMPENHO DE HIDROCICLONES NA CLASSIFICAÇÃO DE PARTÍCULAS”

Cassandra Lucia Queiroz da Silva

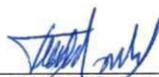
Esta dissertação foi julgada para a obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA

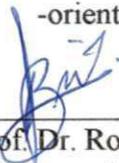
Especialidade Engenharia de Operações e Processos e aprovada em sua forma final pelo
programa de Pós-Graduação em Engenharia Química no dia 20 de Fevereiro de 2006.



Prof. Dr. José Jailson Nicácio Alves
-orientador-



Prof. Dr. Luis Gonzaga Sales Vasconcelos
-orientador-



Prof. Dr. Romildo Brito
-examinador-

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Everaldo Silvino dos Santos
-examinador-

*Dedico esta conquista a minha
amada mãe Vera por todo amor, apoio e compreensão.*

Agradecimentos

A Deus e a todos os anjos por tudo que tem me dado e por estarem sempre ao meu lado acalmando meu coração e iluminando o meu caminho.

A minha adorada mãe dona Vera pelo seu apoio e amor incondicional, que mesmo longe fisicamente soube me confortar e dar o carinho de mãe necessário para apaziguar o coração de um filho, minha eterna gratidão.

Aos meus orientadores, professor José Jailson e professor Luís Gonzaga, agradeço muito por toda orientação. Pelas inúmeras vezes que os procurei para discutir resultados, ouvir sugestões de passos subseqüentes a serem tomados, por toda compreensão e atenção a mim concedida. Aprendi muito com vocês!

Ao professor Romildo Brito por todo incentivo e “puxadas de orelhas” necessárias. Muito obrigada pela força e por acreditar no meu potencial.

Ao meu orientador da Alumar, Engenheiro Wlademir Penna, fico extremamente agradecida pela sua orientação em todos os momentos da dissertação, onde forneceu todo suporte necessário para realização desse trabalho, mesmo com tantos afazeres e tantas viagens nacionais e internacionais sempre muito atencioso, paciente e compreensivo. Minha eterna gratidão por tamanha contribuição para o meu aprendizado e desenvolvimento como pessoa.

Ao Engenheiro Júlio Diniz e ao RH da Alumar por ter me dado a oportunidade de participar desse convênio Empresa-Universidade.

Ao meu amigo e companheiro de sala Renato Diniz, por todo apoio, ajuda, compreensão e amizade.

A todo o departamento técnico de processo e em especial a equipe de testes de hidrociclones: Verinha e Jorge. Agradeço todo o trabalho, dedicação, união e disposição de vocês para realizarmos os testes da melhor forma possível. Sem vocês esse trabalho não seria o mesmo. Eternos agradecimentos.

A toda equipe operacional representada por Tarcizo e Ferreira, que contribuíram de forma direta para a minha vivência de área, sempre disponibilizando atenção e mão-de-obra para os infundáveis testes, debaixo de sol ou chuva. Vocês tiveram um papel muito importante. Aprendi muito com vocês, os meus sinceros agradecimentos.

A toda equipe do laboratório representada por Luís Eduardo Frota, agradeço toda atenção, colaboração e contribuição sua e de toda equipe nas análises das amostras, onde muitas vezes mesmo muito atarefado nunca negou informações e conhecimentos, colaborando com uma parte muito importante dessa dissertação.

Aos fornecedores de hidrociclones Krebs Engineers e AKW pelo fornecimento dos hidrociclones de testes e por toda informação concedida.

Aos meus eternos amigos e companheiros do prédio 001R onde representarei pela pessoa de Dona Isabel (Dona Beloca). Agradeço todos os favores, atenção, paciência com minhas chatices e brincadeiras, a todos os apelidos que ganhei e também por todos os *cafezinhos, bolinhos, biscoitinhos* e etc., que foram de fundamental importância para o convívio social durante o tempo que passei como “estagiária Consultora”.

A minha amiga-irmã pernambucana e professora de inglês Odlá Albuquerque, pessoa essa que tive oportunidade de conhecer assim que cheguei a São Luís, agradeço pelo carinho, atenção, dedicação e confiança. Minha eterna amiga, o meu muito obrigada pela sua amizade sincera.

Aos meus amigos e companheiros de apartamento: Adêvid, Andréa, Eveline e Gláucio, fico grata pelo tempo de convívio como uma grande família, onde eu representava a figura materna. Obrigada pela confiança e por todo carinho.

Aos meus grandes amigos e amigas: Victor, Karina Bottaro, Aline, François, Sinderley, Semião, Arlete, Lucélia e Jaciara, agradeço o carinho com que me trataram e acolheram, as brincadeiras, as inúmeras cachaças da vida e todo o companheirismo. Aos inúmeros amigos que conquistei na minha estadia em São Luís do Maranhão, onde representarei por Vinicius, Milena e Marcelo. obrigada por toda atenção e consideração.

Aos meus grandes amigos de graduação e mestrado Marta e Rodrigo. Agradeço pelas inúmeras noites acordadas fazendo trabalho do mestrado e estudando para as provas, sem contar todo o companheirismo e amizade ao longo dessa caminhada.

Aos meus amigos Karina de Sousa, Fabiano e Clédson que mesmo longe fisicamente me ajudaram e me apoiaram na realização desse sonho.

A todos que fazem o LENP, agradeço toda força e incentivo.

A todos os professores do mestrado pela contribuição de conhecimento.

Aos funcionários Maricé e a Eranildo por toda boa vontade e ajuda para comigo.

Ao Consórcio de Alumínio do Maranhão – Alumar por todo o apoio financeiro concedido na realização desse mestrado.

A todos os integrantes da banca examinadora por aceitarem o convite de participação.

RESUMO

A indústria de beneficiamento de minérios têm evoluído como uma atividade econômica básica, cada vez mais eficiente, segura e ambientalmente correta. Numerosos são os equipamentos utilizados nas usinas de beneficiamento de minérios e dentre estes equipamentos encontram-se os hidrociclones. Os hidrociclones surgiram como uma alternativa eficiente e econômica na separação de partículas por serem baratos, não possuírem partes móveis, baixo custo de manutenção, simplicidade de operação e por requererem um pequeno espaço para instalação. A principal proposta desse trabalho é o estudo de um modelo adequado e de fácil manuseio para a separação de hidrato obtendo uma classificação de partículas conforme as especificações exigidas na indústria. Foram utilizadas três configurações de hidrociclones, nomeados de hidrociclone I, II e III respectivamente, disponíveis na indústria para classificação de hidrato. Foram feitos 8 ensaios, conduzidos em planta industrial, onde o material particulado utilizado foi uma pasta composta de licor cáustico e cristais de hidrato. Para quantificar o desempenho do hidrociclone em cada experimento foi necessário medir pressão no duto da alimentação, vazão no duto da alimentação e do *underflow*, concentração na alimentação e no *underflow*, além da obtenção da distribuição granulométrica na alimentação e no *underflow*. Para a previsão da eficiência foram escolhidos três modelos: PLITT (1976), LEITH E LICHT (1972) e SANTANA (2001). Também foi proposta uma correlação para o cálculo do diâmetro de corte e do módulo de distribuição que facilita a estimativa da eficiência sugerido por Plitt. Foi feita a previsão da distribuição do *underflow* através do método numérico de diferenças finitas atrasadas. Todas as simulações foram feitas e desenvolvidas no *software Microsoft Excel*. Os resultados obtidos mostraram que o modelo sugerido por Plitt teve um ajuste aceitável, onde foi observada para o hidrociclone II uma eficiência de até 61% . As correlações auxiliaram de forma satisfatória a previsão da eficiência do hidrociclone. Ficou evidenciado que houve um bom ajuste dos dados experimentais da curva de distribuição granulométrica do *underflow* com a curva prevista.

ABSTRACT

The industry of ore improvement has evolved as a basic economical activity, each more efficient, insurance and ambiently correct. Numerous they are the equipments used at the plants of ore improvement in which most of them are hydrocyclone. The hydrocyclones appeared as an efficient and economic alternative in the separation of particles for be cheap, without mobile parts, low maintenance cost, operation simplicity and need a small space for installation. The main proposal of this work is the study of an appropriate model of easy handling for the separation of hydrate obtaining a classification of particles as the specifications demanded in the industry. Three configurations of the hydrocyclones were used, nominated of hydrocyclone I, II and III respectively, available in the industry for classification of hydrate. They were made 8 run, led in industrial plant, where the material used was a paste composed of caustic liqueur and crystals of hydrate. To quantify the performance of hydrocyclone in each experiment it was necessary to measure the pressure in the duct of the feeding, the flow in the duct of the feeding and underflow, concentration in the feeding and underflow, beyond the attainment of the grain sized distribution in the feeding and underflow. For estimate the efficiency three models has been chosen: PLITT(1976), LEITH and LICHT (1972) and SANTANA (2001). The simulations were developed in Microsoft Excel software with creation of macros in VBA. The results showed that the model suggested by Plitt had an acceptable fit, where was observed for hydrocyclone II an efficiency of up to 61%. The correlations aided in a satisfactory way the estimate the efficiency of the hydrocyclone. It evidenced that there was a good adjustment of the experimental data of the curve of grain sized distribution of the underflow with the foreseen curve.

SUMÁRIO

<i>Lista de figuras</i>	<i>i</i>
<i>Lista de tabelas</i>	<i>iii</i>
<i>lista de símbolos</i>	<i>iv</i>
<i>Introdução</i>	<i>1</i>
MOTIVAÇÃO PELO TEMA	3
CAPÍTULO I	4
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
<i>1.1 Começo de tudo: o alumínio e o Processo Bayer</i>	<i>4</i>
<i>1.2 Ciclone : Um princípio da natureza no processo separador de partículas</i>	<i>8</i>
<i>1.2.1 Descrição geral</i>	<i>10</i>
<i>1.2.2 Princípios de operação</i>	<i>11</i>
<i>1.3 Modalidades de ciclones</i>	<i>13</i>
<i>1.4 Parâmetros</i>	<i>16</i>
<i>1.4.1 Parâmetros geométricos (design do ciclone)</i>	<i>16</i>
<i>1.4.2. Parâmetros físicos e operacionais</i>	<i>18</i>
<i>1.5 Diâmetro de corte</i>	<i>20</i>
<i>1.6 Desempenho de separação</i>	<i>24</i>
<i>1.6.1 Eficiência total</i>	<i>24</i>
<i>1.6.2 Eficiência total reduzida</i>	<i>26</i>
<i>1.6.3 Eficiência granulométrica</i>	<i>27</i>
<i>1.6.4 Eficiência granulométrica reduzida</i>	<i>28</i>
<i>1.7 Grupos adimensionais importantes no estudo de hidrociclone</i>	<i>28</i>
CAPÍTULO II	33
2 MODELOS MATEMÁTICOS PARA HIDROCICLONES	33
<i>2.1 Princípios da modelagem</i>	<i>33</i>
<i>2.2 Modelos empíricos</i>	<i>33</i>
CAPÍTULO III	44
3 Metodologia	44

<i>3.1 Configuração do hidrociclone.....</i>	<i>44</i>
<i>3.2 Procedimento experimental.....</i>	<i>45</i>
<i>3.3 Estudo dos modelos.....</i>	<i>52</i>
<i>3.3.1 Modelo Plitt.....</i>	<i>53</i>
<i>3.3.2 Modelo Leith e Licht.....</i>	<i>55</i>
<i>3.3.3 Modelo Santana.....</i>	<i>57</i>
<i>3.4 Modelo desenvolvido.....</i>	<i>57</i>
CAPÍTULO IV.....	59
4 Resultados e Discussão.....	59
<i>4.1 Desempenho de separação.....</i>	<i>59</i>
<i>4.1.1 Eficiência granulométrica.....</i>	<i>59</i>
<i>4.1.2 Eficiência total.....</i>	<i>63</i>
<i>4.2 Comparativo dos dados experimentais com modelos estudados.....</i>	<i>64</i>
<i>4.3 Análise do modelo desenvolvido.....</i>	<i>71</i>
<i>4.3.1 Correlação envolvendo a concentração.....</i>	<i>71</i>
<i>4.3.2 Correlação envolvendo a razão de líquido.....</i>	<i>76</i>
<i>4.3.3 Eficiência total a partir das correlações.....</i>	<i>82</i>
<i>4.4 Previsão da distribuição do underflow.....</i>	<i>84</i>
CAPÍTULO V.....	89
5 CONCLUSÕES.....	89
ANEXO A.....	91
ANEXO B.....	93
ANEXO C.....	95
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - (da esquerda para direita) Bauxita, Alumina, Lingotes de alumínio.....	5
Figura 2 - Fluxograma do Processo Bayer.....	6
Figura 3 - Foto da área da Precipitação	7
Figura 4 - Circuito básico da precipitação	8
Figura 5 - Elementos constituintes de um ciclone	10
Figura 6 - Movimento rotacional do hidrociclone	11
Figura 7 - Movimentação de partículas no hidrociclone	12
Figura 8 - Arranjo linear de bateria de hidrociclones (a) e (b)	14
Figura 9 - Arranjo circular de baterias de hidrociclones (a) e (b).....	15
Figura 10 - Esquema simplificado do hidrociclone	25
Figura 11 - Gráfico do coeficiente de arraste versus número de Reynolds para partículas esféricas	30
Figura 12 - Dimensões do ciclone	44
Figura 13 - (da esquerda para direita) Amostra do licor cáustico e amostra do material a ser classificado.....	46
Figura 14 - Tela do software de monitoramento Uniformance Visual PHD	47
Figura 15 - Bateria de hidrociclones da área 45 (a) e (b).....	48
Figura 16 - Painel de controle instalado na área de testes dos hidrociclones II e III...	49
Figura 17 - Hidrociclones usados nos testes da expansão	50
Figura 18 - Área dos hidrociclones de testes da expansão.....	51
Figura 19 - Equipamento utilizado na análise granulométrica: Malvern.....	52
Figura 20 - Gráfico da eficiência granulométrica em função do diâmetro de partícula para os ensaios realizados com o hidrociclone I	62
Figura 21 - Gráfico da eficiência granulométrica em função do diâmetro de partícula para os ensaios realizados com os hidrociclones II e III	63
Figura 22 - Gráfico comparativo da eficiência total e os ensaios experimentais.....	64
Figura 23 - Comparativo das eficiências granulométricas obtida experimentalmente, pelo modelo de Plitt e por Leith e Licht para o ensaio A.....	65
Figura 24 - Comparativo das eficiências granulométricas obtida experimentalmente, pelo modelo de Plitt e por Leith e Licht para o ensaio B.....	66
Figura 25 - Comparativo das eficiências granulométricas obtida experimentalmente, pelo modelo de Plitt e por Leith e Licht para o ensaio C	66
Figura 26 - Comparativo das eficiências granulométricas obtida experimentalmente, pelo modelo de Plitt e por Leith e Licht para o ensaio D.....	67
Figura 27 - Comparativo das eficiências granulométricas obtida experimentalmente, pelo modelo de Plitt e por Leith e Licht para o ensaio E	67
Figura 28 - Comparativo das eficiências granulométricas obtida experimentalmente, pelo modelo de Plitt e por Leith e Licht para o ensaio F	68
Figura 29 - Comparativo das eficiências granulométricas obtida experimentalmente, pelo modelo de Plitt e por Leith e Licht para o ensaio G.....	69
Figura 30 - Comparativo das eficiências granulométricas obtida experimentalmente, pelo modelo de Plitt e por Leith e Licht para o ensaio H.....	69
Figura 31 - Gráfico comparativo da eficiência total experimental e os modelos de PLITT (1976), LEITH e LICHT (1972) e SANTANA (2001)	70
Figura 32 - Gráfico comparativo da eficiência granulométrica experimental e prevista segundo correlações envolvendo a concentração em função do diâmetro para o ensaio A.....	73

Figura 33 - Gráfico comparativo da eficiência granulométrica experimental e prevista segundo correlações envolvendo a concentração em função do diâmetro para o ensaio B	73
Figura 34 - Gráfico comparativo da eficiência granulométrica experimental e prevista segundo correlações envolvendo a concentração em função do diâmetro para o ensaio C	74
Figura 35 - Gráfico comparativo da eficiência granulométrica experimental e prevista segundo correlações envolvendo a concentração em função do diâmetro para o ensaio D	74
Figura 36 - Gráfico comparativo da eficiência granulométrica experimental e prevista segundo correlações envolvendo a concentração em função do diâmetro para o ensaio E	75
Figura 37 - Gráfico comparativo da eficiência granulométrica experimental e prevista segundo correlações envolvendo a concentração em função do diâmetro para o ensaio F	75
Figura 38 - Eficiência granulométrica experimental e prevista segundo correlações envolvendo a razão de líquido em função do diâmetro para o ensaio A	77
Figura 39 - Eficiência granulométrica experimental e prevista segundo correlações envolvendo a razão de líquido em função do diâmetro para o ensaio B	78
Figura 40 - Eficiência granulométrica experimental e prevista segundo correlações envolvendo a razão de líquido em função do diâmetro para o ensaio C	78
Figura 41 - Eficiência granulométrica experimental e prevista segundo correlações envolvendo a razão de líquido em função do diâmetro para o ensaio D	79
Figura 42 - Eficiência granulométrica experimental e prevista segundo correlações envolvendo a razão de líquido em função do diâmetro para o ensaio E	79
Figura 43 - Eficiência granulométrica experimental e prevista segundo correlações envolvendo a razão de líquido em função do diâmetro para o ensaio F	80
Figura 44 - Comparativo da eficiência total dos ensaios realizados experimentalmente e prevista segundo correlações	83
Figura 45 - Fração de underflow para o ensaio A em função do diâmetro de partícula	85
Figura 46 - Fração de underflow para o ensaio B em função do diâmetro de partícula	86
Figura 47 - Fração de underflow para o ensaio C em função do diâmetro de partícula	86
Figura 48 - Fração de underflow para o ensaio D em função do diâmetro de partícula	87
Figura 49 - Fração de underflow para o ensaio E em função do diâmetro de partícula	87
Figura 50 - Fração de underflow para o ensaio F em função do diâmetro de partícula	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Constante k e n das equações sugeridas por MEDRONHO (1992).....	32
Tabela 2 - Dimensões dos hidrociclones.....	45
Tabela 3 - Dados experimentais médios para hidrociclone I.....	59
Tabela 4 - Dados experimentais médios para hidrociclone II e III.....	60
Tabela 5 - Eficiência granulométrica para o hidrociclone I.....	60
Tabela 6 - Eficiência granulométrica para o hidrociclone II e III.....	61
Tabela 7 - Constantes m e d das Equações 87 e 88.....	72
Tabela 8 - Dados das simulações mantendo a concentração da alimentação em 300 g/l e variando a vazão da alimentação.....	81
Tabela 9 - Dados das simulações mantendo a concentração da alimentação em 550 g/l e variando a vazão da alimentação.....	82
Tabela 10 - Eficiência total experimental e prevista através das correlações.....	82

LISTA DE SIMBOLOS

a	Altura da secção de entrada do ciclone
b	Largura da secção de entrada do ciclone
A	Área projetada da partícula
A_e	Área de entrada tangencial do ciclone
C₁	Fator de correção para a porcentagem de sólidos
C₂	Fator de correção para a pressão
C₃	Fator de correção para densidade de sólidos
C_D	Coefficiente de atrito
C_f	Concentração da alimentação
C_{Vf}	Porcentagem volumétrica de sólidos na alimentação
C_{Vu}	Porcentagem volumétrica de sólidos no <i>underflow</i>
C_{y50}	Constante da equação 52
C_w	Concentração mássica
d_i	Tamanho de diâmetro de partícula da classe i
d_{mp}	Diâmetro médio de partícula
d_n	Diâmetro do núcleo central
d'	Diâmetro característico da distribuição
d₅₀	Diâmetro de corte
D_c	Diâmetro do ciclone
D_e	Diâmetro da entrada tangencial do ciclone
D_o	Diâmetro do <i>overflow</i>
D_u	Diâmetro do <i>underflow</i>
E_G	Eficiência granulométrica
E_{GR}	Eficiência granulométrica reduzida
E_{Oai}	Eficiência em termos do recovery real do <i>underflow</i>
E_T	Eficiência total
E_{TR}	Eficiência total reduzida
Eu	Número de Euler
F_D	Força de atrito
g	Aceleração da gravidade
G	Fator de configuração geométrica
h	Comprimento da parte cilíndrica
H	Altura total do ciclone
k₁	Constante da equação 33
k₂	Constante da equação 34
k₃	Constante da equação 35
K	Constante relacionada a geometria do ciclone
K_a	Parâmetro geométrico
K_b	Parâmetro geométrico
K_c	Parâmetro geométrico
K_{D0}	Constante da equação 61
K_{D1}	Constante da equação 60
K_{ep}	Constante experimental do sistema
K_{Q0}	Constante da equação 63
K_{Q1}	Constante da equação 62
K_{V1}	Constante da equação 65
K_{w1}	Constante da equação 64

K_1	Constante da equação 13
K_2	Constante da equação 13
K'	Constante da equação 57
ℓ	Comprimento de reentrância do tubo de saída do diluído
l	Comprimento natural do vórtice
L	Comprimento do tubo interno
L_c	Comprimento da secção cilíndrica
L'	Comprimento do ciclone
m	Modulo de distribuição
n'	Constante hidrodinâmica
n	Constante da equação 49
n_1	Constante da equação 33
n_2	Constante da equação 33
n_3	Constante da equação 34
n_4	Constante da equação 34
n_5	Constante da equação 35
n_6	Constante da equação 35
P	Pressão na alimentação do ciclone
Q_f	Vazão volumétrica na alimentação
Q_o	Vazão volumétrica no <i>overflow</i>
Q_u	Vazão volumétrica no <i>underflow</i>
Re	Número de Reynolds
Rep	Número de Reynolds para partícula
R_f	Recovery do líquido do <i>underflow</i>
R_L	Razão de líquido
R_v	Recovery volumétrica de alimentação de lama para o <i>underflow</i>
St_{50}	Número de Stokes
T	Temperatura
v	Velocidade relativa
V_{Hl}	Volume abaixo do duto de saída
V_{nl}	Volume do comprimento natural do vórtice
V_S	Volume anular desde o duto de saída até o meio do duto de entrada
W_f	Vazão mássica de sólidos da alimentação
W_o	Vazão mássica de sólidos do <i>overflow</i>
W_u	Vazão mássica de sólidos do <i>underflow</i>
X_f	Fração mássica das partículas menores que um dado diâmetro d na alimentação
X_i	Fração mássica na classe granulométrica i
X_o	Fração mássica das partículas menores que um dado diâmetro d no <i>overflow</i>
X_u	Fração mássica das partículas menores que um dado diâmetro d no <i>underflow</i>
α	Parâmetro de agudez da distribuição
β	Ângulo cônico do ciclone
λ	Termo de correção
μ_f	Viscosidade do fluido
ρ	Densidade de sólidos
ρ_l	Densidade de líquidos
ρ_p	Densidade da partícula
τ	Tempo de relaxação
τ_m	Tempo de relaxação médio
v_i	Velocidade da alimentação

u_z Velocidade axial

INTRODUÇÃO

Desde longa data, o homem depende de minerais para sua sobrevivência e é imprescindível que, um dia, possamos prescindir da exploração desses recursos. O Brasil possui extensão e diversidade geológica que o habilita a produzir toda a ampla gama de minerais e garante grandes posições de destaque para a indústria mineral brasileira no mercado mundial, e com o passar dos anos a indústria de beneficiamento de minérios têm evoluído como uma atividade econômica básica, cada vez mais eficiente, segura e ambientalmente correta.

Segundo as NRM (Normas Reguladoras de Mineração) entende-se por beneficiamento de minérios ao tratamento visando preparar granulometricamente, concentrar ou purificar minérios por métodos físicos ou químicos sem alteração da constituição química dos minerais. (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2002). Em muitos processos dessas usinas de beneficiamento sempre ocorre um momento onde o processo de separação de partículas é um dos fatores mais importantes para o sucesso contínuo do processo de produção.

O processo de separação de partículas tem sido fonte inspiradora de diversos trabalhos de estudiosos, onde é visado uma separação de partícula com altas eficiências, qualidade e que seja economicamente viável.

Numerosos são os equipamentos utilizados nas usinas de beneficiamento de minérios e dentre estes equipamentos encontram-se os hidrociclones.

Durante muitos anos, os hidrociclones ou ciclones, foram utilizados com muito sucesso na classificação das partículas sólidas contidas em um líquido. As aplicações variam desde a separação das partículas conforme o tamanho, em aplicações de moagem em circuito fechado, até a eliminação de resíduos abrasivos. Surgiram como uma alternativa eficiente e econômica na separação de partículas por serem baratos, não possuírem partes móveis, baixo custo de manutenção, simplicidade de operação e por requererem um pequeno espaço para instalação.

Os hidrociclones convencionais são equipamentos simples e não possuem nenhum tipo de componente interno. Geralmente são muito utilizados na indústria química em processos de separação e classificação de materiais sólidos. São formados

de um corpo cilíndrico e outro cônico que funcionam baseados na força centrífuga exercida pela pressão de alimentação nos ciclones. A força centrífuga gera um redemoinho (*vortex*) dentro do ciclone que favorece a saída de uma material mais denso em seu concentrado (*underflow*¹) e no seu diluído um material menos denso e mais fino (*overflow*²).

Uma das oportunidades na área de ciclonagem é a possibilidade de desenvolvimento de um modelo matemático, no qual possa prever o comportamento da eficiência de separação das partículas de hidrato. A utilização desse modelo permitirá um melhor controle de transferência e condição de controle de qualidade do hidróxido de alumínio no que se refere a granulometria, visto que ocorrerá uma maior estabilidade da carga e perfil granulométrico da semente.

Com o propósito de melhorar a separação dessas partículas, esse estudo propõe o estudo de um modelo específico para o hidrociclone utilizado na separação de hidrato, a fim de gerar um melhor controle no funcionamento do mesmo e uma maior eficiência de separação de partículas.

¹ *Underflow* é o termo designado a corrente que flui pela parte inferior do equipamento.

² *Overflow* é termo que se dá a corrente que flui pela parte superior do equipamento.

MOTIVAÇÃO PELO TEMA

Com o aumento da capacidade de produção da Área da Precipitação da Alumar, o sistema de operação de primários não foi suficiente para manter a estabilidade da classificação e captar o volume de material produzido e transferi-lo para a área da Calcinação. Logo para que os ciclones funcionem com sua real finalidade é necessário manter uma densidade de *underflow* em torno de 1000 g/l e com uma eficiência granulométrica acima de 98% na faixa de 44 µm, obtendo uma recuperação de massa em torno de 50%.

Apesar dos hidrociclones serem equipamentos simples e de grande utilização na indústria de processamento mineral observa-se que vários estudos têm sido realizados no âmbito de aperfeiçoamento do projeto e da análise de desempenho. Porém, ainda não se tem observado um estudo específico de modelo para separação de uma pasta de hidrato. A pasta de hidrato é constituída por uma mistura sólido-líquido de óxido de alumínio hidratado ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) e licor de soda cáustica.

A principal proposta desse trabalho é o estudo de um modelo adequado e de fácil manuseio para a separação de hidrato obtendo uma separação de partículas conforme as especificações exigidas na indústria, utilizando a configuração atual do hidrociclone utilizado na planta industrial com a finalidade de obter uma maior estabilidade da classificação granulométrica.

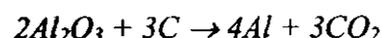
CAPÍTULO I

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

1.1 Começo de tudo: o alumínio e o Processo Bayer.

O alumínio é, em potencial, o metal mais abundante do mundo. Cerca de 8,05% da crosta sólida da Terra são constituídos por este metal. O Brasil possui grandes suprimentos de materiais contendo alumínio, mas os processos de extração do alumínio metálico destes compostos ainda não são econômicos. A crescente aceitação deste material nas mais diversas aplicações justifica plenamente a constante duplicação da produção de alumínio, desde a Segunda Guerra mundial. Acredita-se que o alumínio tenha sido formado através de sucessivas colisões de átomos de hidrogênio em altas temperaturas e altas pressões durante o nascimento do sistema solar. Em 1808, Humphrey Davy provou a existência do alumínio, dando-lhe este nome (ALCOA, 2005).

Para a obtenção do alumínio metálico é utilizado industrialmente o Processo Hall-Heroult, em que ocorre a redução eletrolítica da alumina pura (Al_2O_3) num banho de criolita fundida, conforme mostrado na equação abaixo:



A alumina, por sua vez, é obtida a partir do minério de bauxita, conforme Figura 1, um mineral que possui umidade, sílica, ferro, alumina disponível e diversos compostos orgânicos.



Figura 1 - (da esquerda para direita) Bauxita, Alumina, Lingotes de alumínio

Fonte: Associação Brasileira de Alumínio - <http://www.abalco.org.br>

A bauxita, jazida que dá nome ao minério de alumínio, herdou o nome da região de *Les Baux*, situada no sul da França, onde foi identificada pela primeira vez pelo químico francês P. Berthier, em 1821. O termo é genérico, referindo-se a uma mistura de minerais ricos em óxidos de alumínio hidratados. Os principais constituintes deste material são a gibsita, $\gamma\text{-Al}(\text{OH})_3$, e os polimorfos bohemita, $\gamma\text{-AlO}(\text{OH})$, e diaspório, $\alpha\text{-AlO}(\text{OH})_3$, sendo que as proporções das três formas variam dependendo da localização geográfica do minério. As bauxitas geologicamente mais novas possuem alto conteúdo de gibsita, e são as que apresentam maior interesse comercial, uma vez que seu processo de extração é o mais econômico (RODRIGUES, 2003; CONSTANTINO, 2002).

A alumina é um pó branco fino, seco com a consistência semelhante a uma areia fina. Grande parte de sua produção, cerca de 90%, é destinada à obtenção de alumínio metálico, apesar de possuir uma vasta aplicabilidade nos mais variados graus de pureza e composição. Exemplos de sua aplicação é o uso como abrasivo, material refratário, cerâmica, corantes, massa de polimento, tintas, indústria de vidros, pinturas metálicas entre outros (ANDRADE, 2000).

Sua versatilidade está muito relacionada a suas propriedades mineralógicas e físico-químicas, a sua resistência a elevadas temperaturas e variações térmicas, e a suas dimensões e formas. Em virtude da atividade catalítica e do alto poder de adsorção que esses materiais apresentam, há por eles um grande interesse científico e comercial.

Para a extração da alumina utiliza-se o Processo Bayer, que é um processo hidrometalúrgico, sendo o método utilizado para separar a gibsita das demais

fechamento do circuito de moagem na planta de processamento de minérios. (BERALDO, 1987).

Conceitualmente, classificação é a separação de uma população original (“alimentação”), em duas outras populações, que se diferem pela distribuição relativa dos tamanhos das partículas que as compõem. Elas se dividem em partículas grossa, composta predominantemente pelas partículas correspondentes às maiores dimensões presentes na alimentação, e partículas finas, que contém predominantemente as partículas de menores dimensões presentes na alimentação.

O ciclone, em geral, é um equipamento usado para a classificação de partículas sólidas em uma suspensão em meio líquido, denominada polpa (BELTRÃO, 2004). Foram originalmente desenhados para promover a separação de sólidos-líquidos (CASTILHO e MEDRONHO, 2000) porém atualmente eles têm sido usados para a separação sólido-sólido (KLIMA e KIM, 1998), líquido-líquido (SMYTH e THEW, 1996) e gás-líquido (MARTI, 1996).

Segundo BERALDO (1987), a grande preferência dada a esse equipamento no uso industrial é devida à série de vantagens que ele apresenta, tais como: capacidade elevada em relação ao seu volume e à área ocupada, isso os tem tornado um equipamento de grande utilização em instalações de moagem; controle operacional relativamente simples; elevada disponibilidade, pois sempre existem unidades em *stand-by* devido ao baixo preço e pequeno espaço ocupado; a alta eficiência de operação e apresentam baixo custo do ponto de vista operacional e investimento.

Por outro lado, apresentam algumas desvantagens consideráveis, como por exemplo: não apresentam efeito regulador para minimizar oscilações operacionais de curto período na alimentação devido ao seu pequeno volume, dependendo do tipo de minério o custo de manutenção pode ser relativamente elevado, especialmente com relação à bomba de alimentação, pode ocorrer uma sobrecarga do *apex* e partículas grossas podem ser rejeitadas para o diluído, também conhecidas como *overflow*, por essas razões geralmente demandam uma instalação do controle mais sofisticada. (BERALDO, 1987).

Empregam-se o uso de ciclones de maneira diversificada abrangendo as indústrias químicas, metalúrgicas, têxteis, petroquímicas, alimentícia, bioengenharia, etc. Suas principais aplicações referem-se a desulfurização de gases industriais,

processamento mineral, classificação de sólidos, deslamagem⁵ de finos de carvão, elutriação⁶ de finos, desaguamento, recuperação de matérias sólidas, espessamento, clarificação parcial e total, classificação, concentração de minérios, recuperação e purificação de líquidos. (AMBERGER KAOLINWERKE GMBH, 1979).

1.2.1 Descrição geral

Os hidrociclones convencionais são equipamentos simples e não possuem nenhum tipo de componente interno. São constituídos de um corpo cilíndrico e outro cônico que utilizam a força centrífuga exercida pela pressão de alimentação para separar as partículas conforme suas massas. Na parte superior do corpo cilíndrico existe uma entrada tangencial para a suspensão de alimentação e um tubo para a saída da suspensão diluída. No que se refere à parte inferior há um orifício de saída da suspensão concentrada, conforme observado na Figura 5.

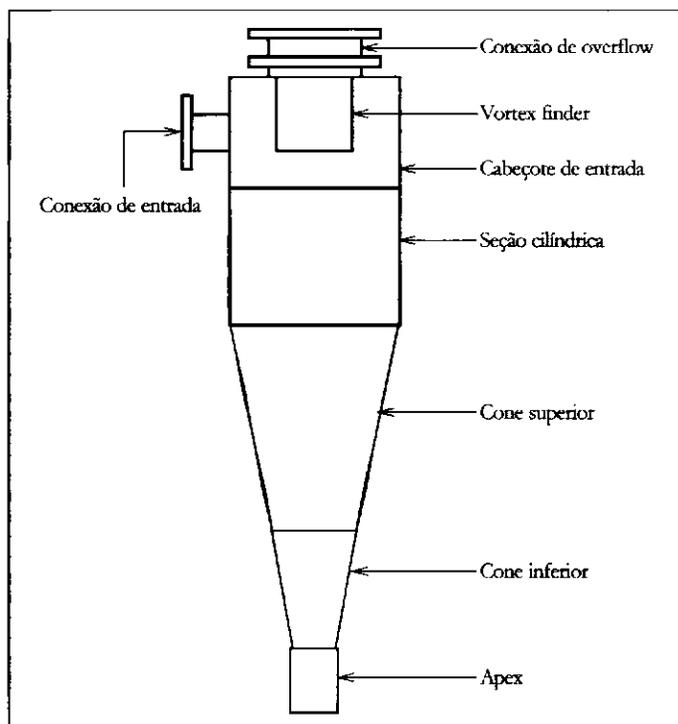


Figura 5 - Elementos constituintes de um ciclone

⁵ Deslamagem é a separação de lama ou de outros finos do produto.

⁶ Elutriação é o fenômeno de arraste de partículas finas contidas na carga.

Um ciclone nada mais é que um dispositivo que utiliza a força centrífuga para separar partículas sólidas conforme suas massas. A força centrífuga gera um vórtice (redemoinho) dentro do ciclone que favorece a saída de um material mais denso em seu concentrado e um material menos denso e mais fino no seu diluído. O hidrociclone atua como um classificador porque os materiais a serem classificados, que são diferentes em tamanho, forma ou densidade, divide-se em duas correntes: diluída (*overflow*) e concentrada (*underflow*) (SOUZA et. al., 2002). Apesar dos princípios de operação serem os mesmos utilizados pelas centrífugas, os hidrociclones não apresentam partes móveis, requerendo baixo custo de instalação e manutenção, além de serem de simples operação.

1.2.2 Princípios de operação

Durante a operação, a polpa de alimentação, que consiste em uma mistura de sólidos e líquido, é injetada tangencialmente sob pressão, com velocidade suficiente para criar um vórtice (*vortex*), o que leva o fluido a entrar num movimento rotacional (espiralado) descendente, conforme Figura 6. A suspensão alimentadora forma um *vortex* primário ao longo das paredes cilíndricas e a cônicas. As partículas são arremessadas para as paredes do hidrociclone por ação da força centrífuga gerada no *vortex* e assim continuam o movimento espiralado em direção ao ápice do cone.

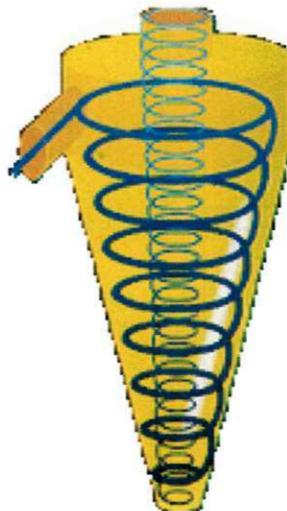


Figura 6 - Movimento rotacional do hidrociclone

No estrangulamento do cone, somente uma parte do fluxo é descarregada através do *apex*. Esse fluxo é composto pelas partículas mais grossas ou, em alguns casos, por todas as substâncias sólidas.

No centro do ciclone, forma-se um vórtice de baixa pressão (*vortex secundário*) que aspira o ar pelo *apex*, criando uma corrente que arrasta a maior parte do líquido juntamente com as partículas finas remanescentes (*overflow*). Essa corrente é descarregada por um tubo central na parte superior do ciclone (*vortex finder*).

Uma partícula colocada em um ponto qualquer do hidrociclone estará simultaneamente sob efeito de uma força centrífuga e de uma força de arraste, sendo esta última devida ao fluxo que se dirige ao *vortex finder*.

Para as partículas grossas, a força centrífuga supera a de arraste, o que levará tais partículas à parede do hidrociclone, seguindo pela corrente que se dirige ao *apex*. Para as partículas finas, a força de arraste supera a força centrífuga, o que as leva em direção ao *vortex finder*, conforme Figura 7 (PINHEIRO, 2000).

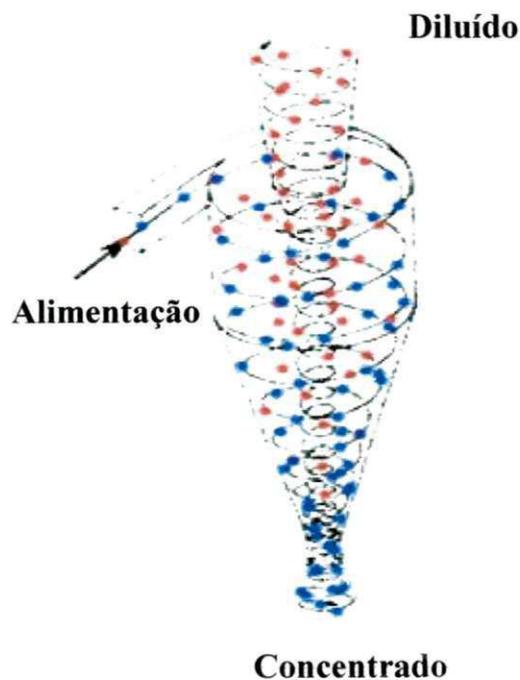


Figura 7 - Movimentação de partículas no hidrociclone

No caso de hidrociclones de grande diâmetro operando com baixa pressão, a posição em que este equipamento se encontra adquire importância. As correntes que saem pelo *apex* (concentrado ou *underflow*) e *vortex* (diluído ou *overflow*) devem descarregar aproximadamente à mesma altura, à pressão atmosférica, pois, caso contrário, pode haver alteração na performance do hidrociclone.

Em suma, de um único fluxo de entrada é obtido dois produtos distintos, um composto de partículas mais grossas e/ou de maior peso específico, contendo ainda pequena porcentagem do líquido alimentado, e outro composto de partículas mais finas e/ou de menor densidade, contendo a grande maioria do líquido presente na alimentação. (BELTRÃO, 2004)

A taxa de separação do hidrociclone depende da distribuição granulométrica, da forma das partículas, da viscosidade da polpa e, principalmente, do peso específico e da concentração de sólidos da polpa na alimentação. (ARTEBURN, 1976)

1.3 Modalidades de ciclones

Os ciclones mais comumente usados são de um dos seguintes tipos:

- Cilíndrico, curto, com cone alongado;
- Cilíndrico, alongado e parte inferior cônica ;
- Cônico;
- Cilindros e cones alternados;
- Cilíndrico ou tangencial;
- Ciclone com ventilador;
- Ciclones múltiplos.

Os ciclones para partículas finas têm diâmetros menores e maiores comprimentos que os destinados a partículas relativamente grandes, a fim de possibilitar um número maior de rotações do ar no interior do ciclone, antes de atingir a boca de saída.

Segundo MACINTYRE (1990) se mais de dois ciclones são requeridos em operação paralela, estes devem ser dispostos em configuração radial, em torno de um distribuidor de alimentação central, para assegurar uma uniforme distribuição do fluxo para cada ciclone. O fluxo é dividido pelos numerosos tubos, o que permite que estes

possam ter diâmetros pequenos. A velocidade, também sendo reduzida, proporciona pequeno valor para perda de carga.

Neste arranjo, denominado “bateria de ciclones”, são tipicamente instaladas as calhas de coleta de *underflow* e *overflow*.

A alimentação de diversos ciclones em arranjo linear pode ocasionar uma distribuição de fluxo desigual, priorizando os últimos, que poderão receber maior vazão que os primeiros, conforme mostram as Figuras 8 e 9.

Um projeto de bateria bem elaborado é um elemento importante para o sucesso da operação de instalações de múltiplos ciclones. As Figuras 8 e 9 mostram a disposição de uma bateria de hidrociclones.

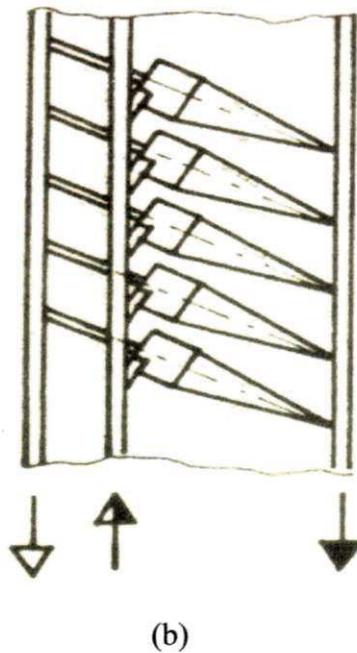
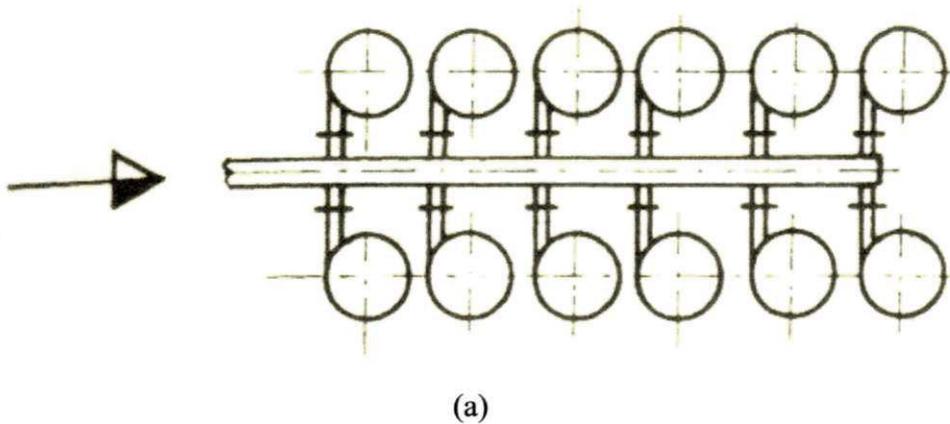
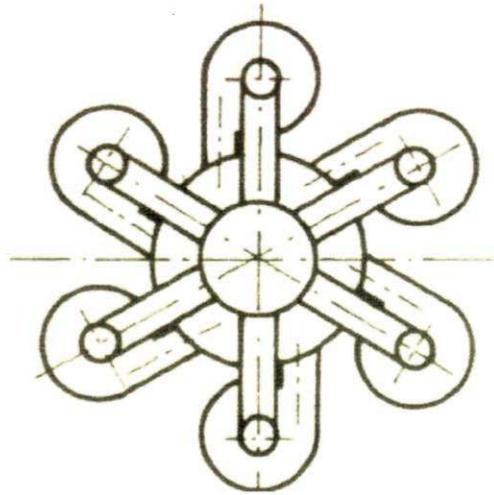
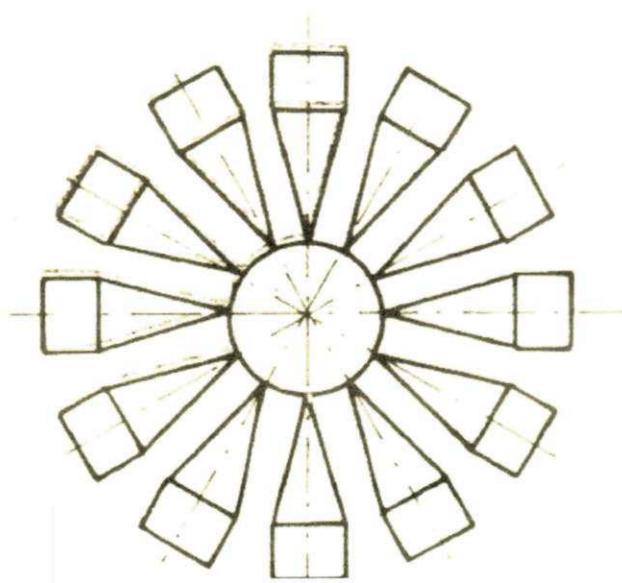


Figura 8 - Arranjo linear de bateria de hidrociclones (a) e (b)



(a)



(b)

Figura 9 - Arranjo circular de baterias de hidrociclones (a) e (b)

1.4 Parâmetros.

Os principais requisitos para uma operação eficiente dos ciclones, são:

- Condições constantes na alimentação tais como: vazão, pressão e densidade de sólidos da alimentação;
- Forma de descarga do concentrado (*underflow*);

Existem dois conjuntos de parâmetros que influenciam no desempenho dos ciclones: parâmetros operacionais e parâmetros que se referem à geometria do hidrociclone.

1.4.1 Parâmetros geométricos (*design do ciclone*).

Os elementos geométricos dos hidrociclones são as variáveis mais diversificadas, pois para cada finalidade e modelo existe uma grande disponibilidade de possíveis combinações de montagem.

Observa-se que qualquer alteração pode afetar sensivelmente o ponto do diâmetro de corte (d_{50}). Os parâmetros que mais ocasionam alterações no desempenho são:

- a) Diâmetro do hidrociclone (D_c);
- b) Diâmetro de *vortex-finder*;
- c) Área da abertura de entrada;
- d) Diâmetro do *Apex*;
- e) Ângulo do cone.

a) Diâmetro do hidrociclone (D_c).

É o elemento mais importante, pois define a capacidade e o diâmetro de corte dos hidrociclones. São fabricados hidrociclones em diversos tamanhos, variando em torno de 10 a 1200 mm. Os ciclones maiores tendem a separar um tamanho de partícula maior, devido às forças de aceleração que são mais reduzidas nos ciclones de maior diâmetro. Aumentando o diâmetro, aumenta a capacidade do hidrociclone e o

diâmetro de corte (BERALDO, 1987). Assim, para as mesmas condições de alimentação da polpa, ciclones menores tendem a recuperar mais sólidos para o concentrado que ciclones maiores (ARTEBURN, 1976).

b) Diâmetro de *vortex-finder*

A função do *vortex* é controlar o fluxo que sai do ciclone, bem como a separação que o ciclone consegue executar. O *vortex* deve estender-se até abaixo da entrada de alimentação, o que impede o reingresso do material diretamente no fluxo superior. O diâmetro do *vortex* é medido em relação ao interior e é normalmente 40% do diâmetro do ciclone.

Para um hidrociclone de diâmetro fixo, pode-se variar o diâmetro do *vortex-finder* para regular a capacidade e o diâmetro de corte dentro de um certo intervalo. O *vortex-finder* deve ter altura suficiente para que a extremidade alcance um ponto inferior à abertura de entrada, também para minimizar a possibilidade de ocorrência de curto-circuito. Aumentando o diâmetro do *vortex-finder*, ocorre o aumento da capacidade e do diâmetro de corte. Logo essa variável tem um grande efeito no desempenho do ciclone, pois quanto menor o seu diâmetro mais fina é a separação e menor a capacidade do ciclone. (BERALDO, 1987; PERRY & CHILTON, 1986; ARTEBURN, 1976).

c) Área da abertura de entrada

A área de abertura de entrada determina a velocidade tangencial da alimentação, sendo assim um dos importantes fatores que afetam o processo de classificação. Cada tamanho de hidrociclone, definido por seu diâmetro, pode ser fabricado com diferentes áreas de abertura de entrada para melhor adequá-los às exigências quanto à capacidade e quanto à classificação. Para áreas de entrada maiores, ocorre o aumento da capacidade do hidrociclone e do seu diâmetro de corte. Em estudo feito por BERALDO (1987), acredita-se que a abertura de entrada retangular venha a ter melhor desempenho que a abertura de entrada circular.

d) Diâmetro do *Apex*

A extremidade inferior da seção do cone é chamada de *apex*. Uma vez que esta área apresenta concentração mais elevada de sólidos, ela sofre normalmente um desgaste maior. O diâmetro do revestimento do *apex* é, geralmente, a maior variável

de conveniência para ajuste e pode ser considerada como variável crítica após a instalação do ciclone, tendo maior efeito na densidade do *underflow*. Em geral, uma redução em seu diâmetro, aumentará a densidade do *underflow* e melhorará a eficiência da classificação. De forma geral, o *apex* deve ter $\frac{1}{4}$ do diâmetro do *vortex* e deve ter diâmetro ajustado para permitir a necessária capacidade de descarga de sólidos, sem que haja diluição desnecessária do *underflow*.

e) Ângulo do cone

A ação do ângulo do cone é forçar a passagem das partículas para o interior do ciclone e propiciar a obtenção de um *underflow* mais limpo. Ângulo de cone pequeno tende a decrescer o diâmetro de corte, podendo piorar a eficiência do hidrociclone; logo a granulometria torna-se mais fina. Com o aumento do ângulo do cone, têm-se efeitos inversos (BELTRÃO, 2004; BERALDO, 1987).

1.4.2. Parâmetros físicos e operacionais.

Alguns parâmetros físicos e operacionais devem ser observados com mais cautela na operação de hidrociclones, tais como:

- a) Pressão
- b) Vazão
- c) Concentração de sólidos na alimentação
- d) Distribuição granulométrica das partículas na alimentação

a) Pressão

A pressão requerida para a operação varia de acordo com o tamanho do ciclone e a aplicação desejada. A queda de pressão é a energia necessária em um ciclone, para a execução de uma separação desejada. Genericamente, quanto mais alta a pressão, mais fina a separação (diminui o d_{50}) e menor o “*by-pass*” (porcentagem de líquido no *underflow*, em relação à quantidade de líquido na alimentação).

b) Vazão dos hidrociclones.

As principais variáveis que influenciam na vazão do hidrociclone são: diâmetros do hidrociclone, do *vortex* e do *apex*, área do orifício de entrada, pressão da

alimentação, porcentagem de sólidos, altura do *vortex finder*, viscosidade da polpa, etc.

Têm sido propostas diversas expressões matemáticas para o cálculo da vazão do hidrociclone em função das variáveis operacionais julgadas mais importantes. Cada uma apresenta validade restrita a certas aplicações referentes a tipos de hidrociclones e de materiais.

PLITT (1976) desenvolveu uma expressão geral pelo tratamento matemático de um número bastante expressivo de resultados industriais e de laboratório, chegando à expressão:

$$P = 1,88 \frac{Q^{1,78} \exp(0,0055C_v)}{D_c^{0,37} D_e^{0,94} h^{0,28} (D_u^2 + D_o^2)^{0,87}} \quad (1)$$

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

onde D_c (cm), D_u (cm), D_i (cm), h (cm), Q_f (l/min), P (KPa), C_{vf} (%)

c) Concentração de sólidos na alimentação

Usualmente, a concentração de sólidos é expressa em peso. Esta variável tem efeito significativo no tamanho de separação, pois as altas concentrações de sólidos na alimentação produzem grossos e fluxos de *underflow* concentrados.

Altas densidades de alimentação inibem a migração de partículas pela lama, onde engrossa a separação e reduz a eficiência. A alimentação de uma lama diluída aumenta a separação do ciclone. Os hidrociclones podem ser operados com alimentações entre 40-65% de sólidos.

d) Distribuição granulométrica das partículas na alimentação

A distribuição granulométrica atua em parceria com a concentração de sólidos e quanto maior o tamanho das partículas na alimentação, maior a recuperação de sólidos para o *underflow*.

1.5 Diâmetro de corte.

Diâmetro de corte é definido como sendo um diâmetro de partícula que de certa forma representa o poder de separação do hidrociclone, quanto menor este diâmetro melhor projetado foi o hidrociclone.

Uma referência comum de separação entre sólidos finos e grossos é o d50, às vezes chamado de ponto de corte. O d50 é o diâmetro das partículas em que 50% da quantidade total saem pelo *underflow*. As partículas com tamanho maior que o d50 têm uma probabilidade progressivamente maior que 50% de saírem pelo *underflow*.

A expressão de d50 em função das diversas variáveis operacionais tem sido determinada empiricamente por diversos pesquisadores. BRADLEY (1965) sugeriu uma forma em que calcula o d50 para ciclones de mesma geometria e fluxo laminar, conforme Equação 3.

$$d_{50} = k \left[\frac{D_c^3 \mu_f}{Q_f (\rho_s - \rho_l)} \right]^n \quad (3)$$

Onde:

D_c – diâmetro do ciclone;

μ_f – viscosidade do fluido;

Q_f – fluxo da alimentação;

ρ_s – densidade de sólidos;

ρ_l – densidade de líquido;

n - constante hidrodinâmica (para fluxo laminar $n=0,5$);

k – constante relacionada com a geometria do ciclone.

Plitt (1976) desenvolveu uma expressão para d_{50} da seguinte forma:

$$d_{50} = \frac{15,3 D_c^{0,46} A_e^{0,3} D_o^{1,21} \exp(0,063 C_{vf})}{D_u^{0,71} h^{0,38} Q_f^{0,45} (\rho_s - \rho_l)^{0,5}} \quad (4)$$

em que:

D_c, D_o, D_u, h em cm

A_e em cm^2

C_{vf} porcentagem de sólidos em volume

Q_f vazão em m^3/h

ρ_l e ρ_s densidade do líquido e sólido, em g/cm^3

Avançando em seus estudos PLITT (1976) desenvolveu outra equação para o diâmetro de corte sem considerar o efeito do tamanho da partícula da alimentação.

$$d_{50} = \frac{50,5 \cdot D_c^{0,46} \cdot D_i^{0,6} \cdot D_o^{1,21} \exp(0,08C_{vf})}{D_u^{0,71} \cdot h^{0,38} \cdot Q_f^{0,45} \cdot (\rho_s - \rho_l)^{0,5}} \quad (5)$$

em que: d_{50} (μm); D_c , D_o , D_u , h (cm); Q (l/m); C_v (%); ρ e ρ_s (g/cm^3).

PLITT (1976) enfatiza que a análise do efeito do tamanho da partícula da alimentação não é significativa e para situações normais pode ser negligenciado. Ele também comenta que a equação acima mostra a tendência desta partícula gerar finos, aumentando o tamanho do d_{50} .

ARTERBURN (1976) estabeleceu para o hidrociclone padrão, o diâmetro de corte aproximado de acordo com a expressão:

$$d_{50}(\text{básico}) = 2,84 D_c^{0,66} \quad (6)$$

Onde: D_c – diâmetro do ciclone em cm.

Para a definição do d_{50} (aplicado), ele recomenda considerar as correções para porcentagem de sólidos em volume e pressão de densidade de sólidos, de acordo com a expressão:

$$d_{50}(\text{aplicado}) = d_{50}(\text{básico}) \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \quad (7)$$

em que:

C_1 – fator de correção para a porcentagem de sólidos em volume, dado aproximadamente por:

$$C_1 = \left(\frac{53}{53 - C_{vf}} \right)^{1,43} \quad (8)$$

C_2 – fator de correção dado para a pressão, dado por:

$$C_2 = 3,27 \Delta P^{(-0,28)} \quad (9)$$

C_3 – fator de correção para a densidade do sólido, dado por:

$$C_3 = \left(\frac{1,65}{\rho_s - \rho_l} \right)^{0,5} \quad (10)$$

Segundo BERALDO (1987), a expressão proposta por ARTERBURN (1976), pode ser corrigida usando os expoentes de PLITT arredondados.

$$d_{50} = d_{50}(\text{aplicado}) \left(\frac{D_o}{0,4.D_c} \right)^{0,8} \left(\frac{A_e}{0,07.D_c^2} \right)^{0,2} \left(\frac{D_i}{0,17.D_c} \right)^{-0,7} \quad (11)$$

O cálculo do d_{50} por esta expressão é também aproximado, visto que o diâmetro de corte do ciclone depende de outras variáveis não consideradas na fórmula e que tem efeitos muito importantes, em especial a forma das partículas e a distribuição granulométrica do minério na alimentação. Para uma determinação de d_{50} na forma mais precisa seria necessária a execução de testes especiais, em que se determinaria uma constante, K_d , para ser aplicada à fórmula acima, no lugar de 2,84 da expressão de Arterburn.

YOSHIOKA e HOTTA (1955) apresentaram uma equação semi-empírica baseada no conceito de órbita de equilíbrio:

$$d_{50} = 0,2 D_c^{0,1} D_i^{0,6} D_o^{0,8} \left[\frac{\mu_f}{Q_f (\rho_s - \rho_l)} \right]^{0,5} \quad (12)$$

em que,

0,2 – constante determinada experimentalmente, adimensional; e

d_{50} (m), Q_f (m^3/s), D_c (m), D_i (m), D_o (m), μ_f (kg/m.s), ρ_l (kg/m^3) e ρ_s (kg/m^3).

SVAROVSKY (1990) propôs a seguinte equação para o cálculo do diâmetro de corte:

$$\frac{d_{50}}{D_c} = K_1 \left[\frac{\mu_f D_c}{Q_f (\rho_s - \rho_l)} \right]^{0,5} (1 - R_L)^{0,5} e^{(K_2 C_f)} \quad (13)$$

em que,

K_1 e K_2 – constantes.

Em trabalho posterior com hidrociclone de 125 mm de diâmetro, utilizando carbonato de cálcio na alimentação, com concentrações volumétricas que variaram de 0,3% a 30%, SVAROVSKY (1990 apud Soccol, 2003) obtiveram os valores de $K_1=0,034$ e $K_2=3,10$.

PEÇANHA & MASSARANI (1980) em trabalho de avaliação de hidrociclone, com o objetivo de tornar a equação de estimativa do diâmetro de corte, válida para alimentação concentrada de partículas não esféricas, sugeriram:

$$\frac{d_{50}}{D_c} = K_1 \left[\frac{\mu_f D_c}{Q_f (\rho_s - \rho_l)} \right]^{0,5} e^{(K_2 C_f)} \quad (14)$$

e obtiveram valores de $K_1=0,056$ e $K_2=4,0$, para suspensões de carvão, fluorapatita e barita, nas concentrações de 5% a 10% em peso, em hidrociclones com diâmetros de 51 mm a 102 mm.

TRAWINSKI (1969;1977), em trabalho desenvolvido, propôs uma equação para o diâmetro de corte na forma:

$$d_{50} = \left[\frac{9}{2\pi} \frac{\mu_f \rho_l Q_f}{(\rho_s - \rho_l) P} \frac{D_c}{D_o (L - \ell)} \right]^{0,5} \quad (15)$$

MASSARANI (1997) relatou uma equação do diâmetro de corte (d_{50}) que depende de um parâmetro K onde está ligado a configuração do ciclone, das propriedades físicas do sistema (μ , ρ_l e ρ_s) e da taxa do fluxo da alimentação (Q_f), conforme equação abaixo.

$$\frac{d_{50}}{D_c} = K \left[\frac{\mu_f D_c}{Q_f (\rho_s - \rho_l)} \right]^{0,5} g(C_{vf}) \quad (16)$$

onde a função $g(C_{vf})$ corrige o efeito da concentração no diâmetro de corte. Para experimentos com altas suspensões diluídas $g(C_{vf})$ é aproximadamente igual a 1.

1.6 Desempenho de separação

Na operação de hidrociclones, quando a suspensão de alimentação é introduzida no interior do mesmo, operando em regime permanente, uma fração do líquido junto com as partículas de maior velocidade terminal é descarregada, por meio do orifício de saída do concentrado. O restante do líquido com as partículas de menor velocidade terminal é descarregado, por meio do tubo de saída da suspensão diluída (SILVA, 1989). Sabe-se que mesmo que o hidrociclone não esteja separando, devido à ação centrífuga, uma certa quantidade de sólidos é removida no concentrado, numa razão igual à razão de líquido R_L . Isto acontece porque o hidrociclone age também como um divisor do escoamento, tal como uma conexão T em tubulações. (Soccol, 2003).

A razão de líquido pode ser definida utilizando-se a Equação 17.

$$R_L = \frac{Q_u(1 - C_{v_u})}{Q_f(1 - C_{v_f})} \quad (17)$$

Em que,

Q_u – vazão da suspensão concentrada, L/s;

Q_f – vazão da suspensão de alimentação, L/s;

C_{v_u} – concentração volumétrica da suspensão concentrada, L/L e

C_{v_f} – concentração volumétrica da alimentação, L/L.

1.6.1 Eficiência total

Seja a Figura 10 a representação de um esquema simplificado de um hidrociclone, e considerando que Q é a vazão da suspensão, X é a fração mássica das

partículas menores que um dado diâmetro d e W_s é a vazão mássica de sólidos na alimentação e aplicando o balanço de massa global considerando que não haja acúmulo temos:

$$W_f = W_o + W_u \quad (18)$$

em que,

W_f – vazão mássica de sólidos na alimentação, kg/s;

W_o – vazão mássica de sólidos no diluído, kg/s; e

W_u – vazão mássica de sólidos no concentrado, kg/s.

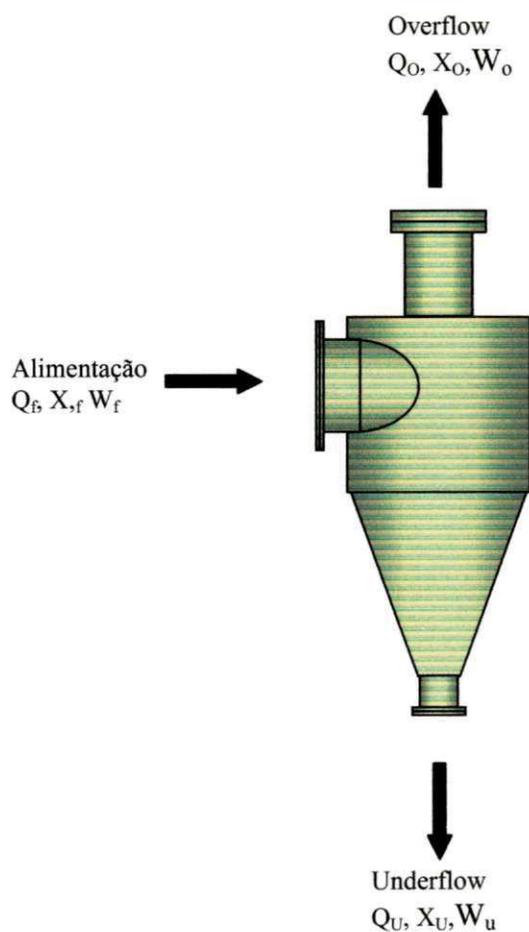


Figura 10 - Esquema simplificado do hidrociclone

O mesmo balanço pode ser feito para partículas menores que um determinado diâmetro “ d ” presentes na alimentação, considerando que não há modificação do tamanho das mesmas no interior do hidrociclone. (SOCCOL, 2003).

$$W_f X_f = W_o X_o + W_u X_u \quad (19)$$

ou seja,

$$X_f = \frac{W_o}{W_f} X_o + \frac{W_u}{W_f} X_u \quad (20)$$

em que,

X – fração mássica das partículas menores que um dado diâmetro d na alimentação, adimensional;

X_o – fração mássica das partículas menores que um dado diâmetro d no diluído, adimensional;

X_u – fração mássica das partículas menores que um dado diâmetro d no concentrado,

adimensional;

A eficiência total de separação do hidrociclone, também conhecido como *mass recovery*, é definida como sendo a razão entre a massa total de sólidos coletados no concentrado e a massa total de sólidos na alimentação.

$$E_T = \frac{W_u}{W_f} \quad (21)$$

em que,

E_T – eficiência total, adimensional.

1.6.2 Eficiência total reduzida

No cálculo da eficiência total são considerados todos os sólidos existentes no concentrado, inclusive aqueles que não foram separados devido à ação centrífuga. O efeito T verificado no hidrociclone garante uma eficiência mínima de separação. Sendo assim, a contribuição do “fluxo morto” (parte do líquido alimentado que é enviado ao concentrado) deve ser subtraída, obtendo-se assim, o verdadeiro desempenho de separação do hidrociclone. Várias expressões têm sido sugeridas

levando em conta a correção da eficiência devido ao efeito T, dentre elas a mais utilizada é a eficiência total reduzida, sugerida por KELSALL (1953).

$$E_{TR} = \frac{E_T - R_L}{1 - R_L} \quad (22)$$

em que,

E_{TR} – eficiência total reduzida, adimensional.

1.6.3 Eficiência granulométrica

A eficiência granulométrica pode ser definida, como sendo a razão entre as vazões mássicas de sólidos no concentrado e na alimentação, só que neste caso para um determinado diâmetro d de partículas. Sua definição é semelhante à da eficiência total, exceto pelo fato de que seu valor corresponde a um único tamanho de partícula, sendo também conhecida como eficiência individual ou eficiência por tamanho. Entretanto, a vazão mássica para um determinado diâmetro, é dada pelo produto da vazão mássica de sólidos na corrente em questão pela correspondente fração dX/dd , assim:

$$E_G = \frac{Ws_u \frac{dX_u}{dd}}{Ws \frac{dX_f}{dd}} \quad (23)$$

substituindo a equação acima, têm-se:

$$E_G = E_T \frac{dX_u}{dX_f} \quad (24)$$

que na forma integral resulta,

$$E_T = \int_0^1 E_G dX_f \quad (25)$$

em que,

E_G – eficiência granulométrica, adimensional.

A equação de “ E_G ” permite a determinação da eficiência granulométrica do hidrociclone, por meio do conhecimento da sua eficiência global e da distribuição granulométrica das correntes de alimentação e do concentrado. Os resultados são usualmente analisados por intermédio da curva de eficiência granulométrica, proporcional pelo hidrociclone.

1.6.4 Eficiência granulométrica reduzida

Como na operação do hidrociclone sempre há uma eficiência mínima, igual a razão de líquido, tendo em vista o que já foi discutido a respeito do efeito T, a eficiência granulométrica reduzida E_{GR} poderá ser obtida da mesma forma que a eficiência total reduzida:

$$E_{GR} = \frac{E_G - R_L}{1 - R_L} \quad (26)$$

em que,

E_{GR} – eficiência granulométrica reduzida, adimensional.

A eficiência de separação que se pode esperar para uma certa dimensão da partícula, enquanto qualquer poeira ou névoa que se encontra é constituída praticamente por partículas numa faixa de dimensões. Por isso, a eficiência de coleta global é um somatório da eficiência de coleta de partículas de cada dimensão, cada qual ponderada de acordo com a fração do total da população que se tem esta dimensão (PERRY & CHILTON, 1986).

1.7 Grupos adimensionais importantes no estudo de hidrociclone

A interação partícula-fluido é obviamente o coração do processo de separação. A separação é prevista para partículas inerciais, em que o número de Stokes, parâmetro inercial adimensional, é um dos grupos adimensionais mais importantes e precisos para a descrição da performance de hidrociclones e *scale-up* (SVAROVSKY,1984).

Em concentrações abaixo de 0,5% do volume, as partículas individuais são representadas pela média, o que não é a representação verdadeira para o movimento feito no fluido. A magnitude da força pode ser facilmente expressa mas a força de atrito é mais difícil de estabilizar. Convencionalmente a força de atrito F_D pode ser obtida de acordo com Newton:

$$F_D = C_D A \frac{\rho_f u^2}{2} \quad (27)$$

onde: u – a velocidade relativa ente o fluido e a partícula

ρ_f - densidade do fluido

A – área projetada da partícula (na direção do momento da partícula)

C_D – coeficiente de atrito.

Para partículas grossas e de movimento rápido, a força de atrito é a maioria das vezes prevista para a inércia do fluido e C_D é constante. Partículas finas se movem mais devagar e a força de atrito é afetada pelas forças viscosas; o coeficiente de atrito é então dependente do número de Reynolds Re_p que caracteriza o fluxo ao redor das partículas, é definido como:

$$Re_p = \frac{ux\rho}{\mu_f} \quad (28)$$

Onde: μ_f - viscosidade do liquido

x – diâmetro de partícula.

A partícula não precisa ser necessariamente esférica e sabendo que para partículas irregulares o x é preferencialmente determinado por sedimentação ou métodos de elutriação para medição de tamanhos de partículas onde é representada pelo diâmetro equivalente da esfera que tem velocidade semelhante a da partícula real.

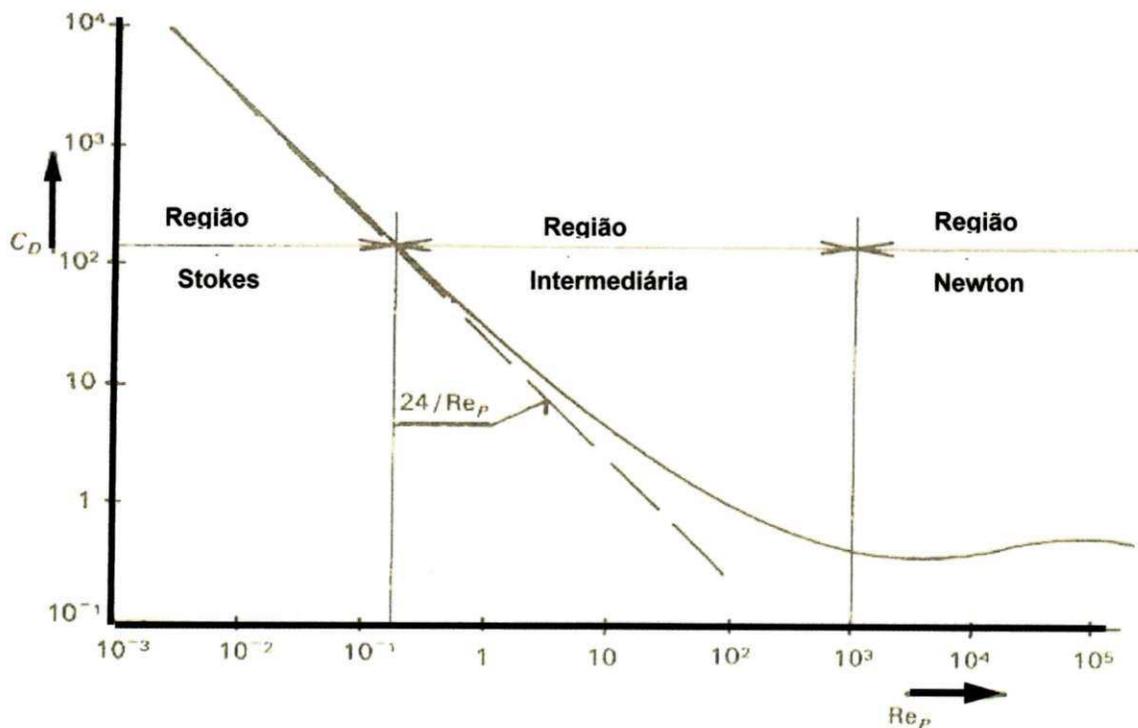


Figura 11 - Gráfico do coeficiente de arraste versus número de Reynolds para partículas esféricas

Fonte: SVAROVSKY (1984).

A Figura 11 mostra o comportamento do coeficiente de atrito C_D em relação ao número de Reynolds para partículas esféricas rígidas em escala log-log. Para números de Reynolds pequenos, o fluxo é caracterizado como laminar e prevalece a força viscosa, logo C_D pode ser determinado teoricamente pela equação de Navier-Stokes e a solução é tida como baixo Stokes:

$$F_D = 3\pi\mu vx \quad (29)$$

Esta é uma aproximação que se torna correta com o incremento Re_p . O limite superior depende da validação do erro que pode ser aceito: geralmente o limite de cota para a região de Stokes é $Re_p = 0,2$ e este é baseado no ajuste final da velocidade.

SILVA (1989) cita que os números adimensionais de importância no estudo de hidrociclone são três: o número de Stokes Stk_{50} , o número de Euler Eu e o número de Reynolds Re .

SVAROVSKY (1984) comenta que para a determinação dos números adimensionais, em caso de suspensões diluídas, destacam-se como variáveis importantes: o diâmetro do hidrociclone, a queda de pressão entre as correntes de alimentação e do diluído ΔP , velocidade de alimentação baseada na secção cilíndrica do hidrociclone, viscosidade do fluido, densidade do fluido, diferença entre as densidades do sólido e do fluido e o diâmetro de corte reduzido d_{50} .

O número de Stokes apresenta importância no *scale-up* de hidrociclones e pode ser calculado utilizando a equação abaixo:

$$Stk_{50} = \frac{(\rho_s - \rho_l)v_c(d_{50})^2}{18\mu_f D_c} \quad (30)$$

O número de Reynolds expressa a relação das forças viscosas e as forças inerciais, e pode ser calculado conforme Equação 31 abaixo:

$$Re = \frac{D_c v_c \rho}{\mu_f} \quad (31)$$

O número de Euler relaciona a queda de pressão no ciclone e a energia cinética por unidade de volume da alimentação, e pode ser calculado conforme equação 32 abaixo:

$$Eu = \frac{2(\Delta P)}{\rho v_c^2} \quad (32)$$

em que,

Stk_{50} , Eu , Re são adimensionais;

ΔP - queda de pressão entre as correntes de alimentação e diluído, Pa;

v_c - velocidade de alimentação baseada na secção cilíndrica, m/s;

d_{50} - diâmetro de corte reduzido;

μ_f - viscosidade do fluido, kg/ms;

ρ_s - densidade do sólido, kg/m³;

ρ_l - densidade do líquido, kg/m³.

Outros dois parâmetros adimensionais que afetam o desempenho de ciclones, são a razão de líquido R_L e a concentração volumétrica de alimentação C_V . MEDRONHO (1984) desenvolveu um modelo composto pelas Equações 33, 34 e 35, onde descreve a operação de hidrociclones geometricamente semelhantes, quando utilizados na separação de sólido-líquido.

$$Stk_{50}Eu = k_1 \left[\ln \left(\frac{1}{R_L} \right) \right]^{n_1} e^{(n_2 C_V)} \quad (33)$$

$$Eu = k_2 Re^{n_3} e^{(n_4 C_V)} \quad (34)$$

$$R_L = k_3 \left(\frac{D_u}{D_c} \right)^{n_5} Eu^{n_6} \quad (35)$$

CASTILHO & MEDRONHO (2000) apresentam os valores das constantes k e n presentes nas Equações 33, 34 e 35, para os hidrociclones de Bradley e Rietema, os quais constam na tabela 01. Segundo os autores, os fabricantes de hidrociclones fornecem um limitado alcance de diâmetros. Um hidrociclone feito sob encomenda com determinado tamanho e com aberturas de diferentes tamanhos e intercambiáveis está apto a cobrir uma grande faixa de diâmetros de corte e de vazão. Para tanto, se faz necessário o conhecimento exato da forma como as variáveis geométricas afetam o desempenho do equipamento.

Tabela 1 - Constante k e n das equações sugeridas por MEDRONHO (1992)

Constantes	Hidrociclone	
	Bradley	Rietema
k_1	0,0550	0,0474
k_2	258,0	371,5
k_3	$1,21 \cdot 10^6$	1218
n_1	0,66	0,74
n_2	12,0	9,0
n_3	0,37	0,12
n_4	0	-2,12
n_5	2,63	4,75
n_6	-1,12	-0,3

Fonte: Antunes & Medronho (1992)

CAPÍTULO II

2 MODELOS MATEMÁTICOS PARA HIDROCICLONES

2.1 Princípios da modelagem

O termo “modelo matemático”, tem um significado sensitivo, pois apesar de ser um termo simplista, pode-se afirmar que é a representação física da realidade na forma de um conjunto de equações consistentes.

Tipicamente, modelos matemáticos predizem as saídas características em termos das variáveis de entrada. A facilidade dessa aplicação é da utilidade de alguns modelos com a dependência de escolha das características para a predição de fatores ou variáveis que serão assumidas para simular processos físicos, como também suposições e até mesmo aproximações utilizadas nas variáveis na estrutura matemática.

Tendo em vista as limitações do uso da teoria, modelos simplificados são obtidos através de observações específicas da característica da performance de cada tipo de ciclone.

2.2 Modelos empíricos.

Modelos matemáticos de classificadores granulométricos têm sido empregado com fervor no mundo industrial. No decorrer dos anos tem sido observado que modelos empíricos robustos podem ser decodificados facilmente em simuladores de processos ou planilhas eletrônicas, onde estes se tornam à base principal da simulação de processo e otimização. (SALCUDEAN *et al.*, 2003) A literatura sobre hidrociclones apresenta alguns modelos empíricos para a curva de eficiência granulométrica.

NAGESWARARAO *et al.* (2004) afirma que o progresso que está sendo feito na fundamentação da modelagem de hidrociclones usando soluções básicas de

equações de fluxo de fluido é de grande relevância, pois essas equações são utilizadas por softwares comerciais onde tende a estabelecer resultados convenientes e relacionados com a otimização do design do hidrociclone. (CHAKRABORTI & MILLER 1992; RAJAMANI & MILIN, 1992; CONCHA *et al.*, 1996; DYAKOWSKI & WILLIAMS, 1997; SLACK *et al.*, 2000; BRENNAN *et al.*, 2003).

Tais modelos baseiam-se, via de regra, na descrição da curva de partição de sólidos, expurgada do *bypass* (perpasso, ou curto-circuito), isto é, após a subtração do material particulado erroneamente direcionado aos dois fluxos de produtos. Isso porque pode haver o arraste, tanto de finos pela parcela de líquido que se reporta ao *underflow*, quanto de grossos para o *overflow* (fluxo de finos, ou “lamas”) (SALCUDEAN *et al.*, 2003).

Como seria de se esperar, o *bypass* de grossos para o *overflow*, é menor que aquele de finos para o *underflow*, e de modo geral, é considerado desprezível. (LUZ, 2005).

Dos dois modelos consagrados, o modelo de Plitt utiliza uma curva de distribuição corrigida, segundo uma distribuição de Rosin-Rammler, expressa por (PLITT, 1976), (BERALDO, 1987) e (CARRISSO e CORREIA, 2002):

$$X_{ic} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{d_i}{d'}\right)^m\right] = 1 - \exp\left[-\ln(2)\left(\frac{d_i}{d_{50c}}\right)^m\right] \quad (36)$$

Onde:

X_{ic} – fração do material na classe granulométrica i efetivamente reportado ao fluxo de sólidos pelo processo classificatório;

d_i – tamanho (diâmetro) da classe i [m].

d' – tamanho característico da distribuição (fator de escala) [m];

d_{50c} – tamanho nominal de corte (d50 “corrigido”) [m].

m – parâmetro de agudez (ou módulo da distribuição).

O tamanho característico da distribuição (d') refere-se ao tamanho no qual 63,21% do material se reportam ao *underflow*. Segundo LUZ (2005) o diâmetro de corte (“corrigido”, para o qual $X_{ic} = 50\%$), quando expresso em μm , pode ser previsto pelas dimensões e operações operacionais do ciclone, no modelo de Plitt por:

$$d_{50c} = \frac{52,45 D_c^{0,46} D_i^{0,6} D_o^{1,21} \exp[0,063 C_{vf}] }{D_u^{0,71} h^{0,38} Q_v^{0,45} \sqrt{(\rho_s - \rho_f)}} \quad (37)$$

Onde:

D_c – diâmetro efetivo (interno) do ciclone [cm];

D_o – diâmetro efetivo (interno) do *overflow* [cm];

D_u – diâmetro efetivo (interno) do *underflow* [cm];

D_i – diâmetro equivalente de injeção [cm];

C_{vf} – concentração volumétrica de sólidos na alimentação [%];

h – altura livre do ciclone [cm];

Q_v – vazão volumétrica da alimentação [l/min];

ρ_s – massa específica das partículas [t/m³];

ρ_f – massa específica do fluido [t/m³].

LUZ (2005) afirma que o diâmetro de corte real (d_{50}), leva em conta o *bypass*. Comumente adota-se que tal curto-circuito, em todas as classes granulométricas, é proporcional à partição de fluido (líquido). Nesse caso, a partição real será expressa pela Equação 38. Para o diâmetro de corte real (d_{50}), tendo-se a partição fracional de fluido (R_f) para o *underflow*, pode ser obtida fazendo $Y_i=0,5$ e substituindo Y_{ic} pela Equação 36. Dessa forma, obtêm-se a Equação 39. Os valores de R_f para hidrociclones em tratamento de minerais ficam tipicamente entre 0,15 e 0,35.

$$X_i = (1 - R_f) \cdot X_{ic} + R_f \quad (38)$$

$$d_{50} = \left[-1,4427 \times \ln \left(\frac{0,5}{1 - R_f} \right) \right]^{\frac{1}{m}} \cdot d_{50c} \quad (39)$$

O modelo semi-empírico desenvolvido por PLITT (1976), onde utiliza para o cálculo do d_{50} a Equação 37, foi baseado em um largo experimento. O parâmetro de agudez, “m”, também dito módulo da distribuição, pode ser previsto segundo a Equação 40.

$$m = 1,08 \cdot \exp \left[0,58 - 1,58 \cdot \left(\frac{S}{S+1} \right) \right] \left[\frac{D_c^2 \cdot h}{Q_v} \right]^{0,15} \quad (40)$$

O parâmetro S é a relação entre a vazão volumétrica de polpa no *underflow* e de polpa no *overflow*, a qual é dada por:

$$S = \frac{1,9 \left(\frac{D_u}{D_o} \right)^{3,31} h^{0,54} (D_u^2 + D_o^2)^{0,36} \exp[0,0054 C_{vf}]}{H^{0,24} D_c^{1,11}} \quad (41)$$

Onde :

H - pressão de operação em metro de coluna de polpa [m].

LYNCH & RAO (1968) e LYNCH (1977) desenvolveram um modelo que requer a determinação de constantes que devem ser experimentalmente avaliadas para cada aplicação específica. Uma equação geral para o d_{50} é da forma:

$$\log d_{50} = K1 \cdot D_o - K2 \cdot D_u + K3 \cdot D_i + K4 \cdot C_{vf} - K5 \cdot Q_f + K6 \quad (42)$$

LYNCH & RAO (1975) desenvolveram um modelo mais específico para hidrociclones com diâmetros de 102 mm, 152 mm, 254 mm e 381 mm conforme mostrado nas Equações 43, 44, 45 e 46 abaixo:

$$\log d_{50} = 0,0400 D_o - 0,0576 D_u + 0,0366 D_i + 0,0299 C_{vf} - 0,0001 Q_f \quad (43)$$

$$Q_f = 6 D_o^{0,73} \cdot D_i^{0,86} \cdot \Delta P^{0,42} \quad (44)$$

$$R_L = 193 \frac{D_u}{W_f} - \frac{271,6}{W_f} - 1,61 \quad (45)$$

$$X_{ic} = \frac{\exp \left[\alpha \left(\frac{D_i}{d_{50c}} \right) \right] - 1}{\exp \left[\alpha \left(\frac{D_i}{d_{50c}} \right) \right] + \exp[\alpha] - 2} \quad (46)$$

Onde,

C_w – concentração da alimentação em peso (%);

Q – vazão volumétrica (L/min);

ΔP - queda de pressão, medida na entrada do ciclone (KPa);

W_f – vazão mássica da suspensão na alimentação (t/h);

α - parâmetro de agudez da distribuição logística; e

d_{50c} (μm), D_c (cm), D_o (cm), D_u (cm) e D_i (cm).

PLITT (1976) afirma que α e m pode ser aproximado pela equação:

$$\alpha = 1,54m - 0,47 \quad (47)$$

BRADLEY (1965) ajustou uma equação que relaciona eficiência granulométrica reduzida versus d/d_{50} para os dados obtidos por YOSHIOKA e HOTTA (1955), que trabalharam com um hidrociclone de 150 mm de diâmetro e com suspensões de argila a 1,5% e 2% em peso.

$$E_{GR} = 1 - e^{\left[-\left(\frac{d}{d_{50}} - 0,115\right)^3\right]} \quad (48)$$

PLITT (1971) propôs uma equação do tipo Rosin-Ramler-Bennet e trabalhando com hidrociclones de diferentes configurações e suspensão de sílica, obteve uma equação para o cálculo do parâmetro n da Equação 49.

$$E_{GR} = 1 - e^{\left[-0,639\left(\frac{d}{d_{50}}\right)^n\right]} \quad (49)$$

$$n = 2,959 \left[\frac{D_c^2 (L - \ell)}{Q_f} \right]^{0,15} e^{(-1,58R_L)} \quad (50)$$

em que,

D_c – diâmetro do hidrociclone em m;

L – comprimento do hidrociclone em m;

ℓ - comprimento da reentrância do tubo de saída do diluído, m; e

Q – vazão da suspensão de alimentação, m^3/s .

Segundo PLITT (1976), valores de n superiores a 3 são indicativos de uma separação com bom poder de classificação, ao passo que, valores inferiores a 2 têm uma representação de classificação relativamente ruim.

COELHO & MEDRONHO (1994) citam que para hidrociclones, o valor de n é igual a 2,9.

RIETMA (1961d) propôs o modelo do tempo de residência e assume que dada partícula será separada, quando o seu tempo de residência, no interior do ciclone, for maior ou igual ao tempo necessário para a mesma movimentar-se radialmente, do ponto de entrada até a parede. São consideradas as seguintes hipóteses:

- a) a influência da turbulência na separação é desprezível;
- b) a lei de Stokes é válida;
- c) não ocorre sedimentação;
- d) as partículas estão distribuídas homogeneamente no tubo de alimentação.

Em outro trabalho, RIETMA (1961c) expressou a velocidade radial v_r em termos do tamanho da partícula, da viscosidade e da força centrífuga como mostra a Equação 51.

$$\frac{\Delta P(\rho_s - \rho_l)}{\mu_f \rho Q_f} L d_{50}^2 = \frac{36 v_z D_c}{\pi v_i D_i} \quad (51)$$

em que,

v_z – velocidade axial, m/s;

v_i – velocidade de alimentação, m/s; e

ΔP (m).

RIETMA (1961c) afirma que acima de um determinado valor do número de Reynolds (Re) mínimo, a razão entre as velocidades axial e de alimentação é constante. Chegou-se a conclusão que, o lado direito da Equação 51 é constante para um mesmo hidrociclone. O autor denominou esta constante de Cy_{50} e sua correlação final é:

$$d_{50} = \left[Cy_{50} \frac{\mu_f \rho_l Q_f}{\Delta P (\rho_s - \rho_l) L} \right]^{0,5} \quad (52)$$

Em termos do produto de $Stk_{50}Eu$ a Equação 52 torna-se:

$$Stk_{50} Eu = \frac{\pi}{36} Cy_{50} \frac{D_c}{L} \quad (53)$$

Para hidrociclone com as relações ótimas sugeridas por RIETMA (1961d), Cy_{50} é igual a 3,5 e o produto $Stk_{50}Eu$ da Equação 53 é constante, para um mesmo grupo de hidrociclones, com as mesmas proporções geométricas.

MEDRONHO (1984) verificou que o produto $Stk_{50}Eu$ não era constante para um mesmo grupo de hidrociclones mas, que era uma função da razão de líquido e da concentração da alimentação resultando a Equação 54:

$$Stk_{50} Eu = k_1 \left[\ln \left(\frac{1}{R_L} \right) \right]^{n_1} e^{(n_2 C_{vf})} \quad (54)$$

TRAWINSKI (1969; 1977), em trabalho desenvolvido, propôs um modelo que pode ser considerado como uma outra versão do modelo de tempo de residência. Em analogia com a sedimentação gravitacional no regime de Stokes, concluiu que:

$$d_{50} = \left[\frac{9}{2\pi} \frac{\mu_f \rho_l Q_f}{(\rho_s - \rho_l) \Delta P} \frac{D_c}{D_o (L - \ell)} \right]^{0,5} \quad (55)$$

Para o produto $Stk_{50}Eu$:

$$Stk_{50} Eu = \frac{1}{8} \frac{D_c}{D_o} \frac{D_c}{(L - \ell)} \quad (56)$$

O autor propôs também uma correlação entre vazão e a queda de pressão conforme Equação 57, sendo K uma constante adimensional. Para pequenos hidrociclones $K= 0,22$ e para hidrociclones grandes $K= 0,39$

$$Eu = \frac{1}{8} \left[\frac{\pi D_c D_c}{K D_i D_o} \right]^2 \quad (57)$$

em que,

D_i – diâmetro do tubo de alimentação, m;

D_o – diâmetro do tubo de saída do diluído, m;

K – constante;

ΔP (Pa).

Em um de seus estudos, NAGESWARARAO (1999a) comenta pesquisas feitas na Austrália, que levaram ao desenvolvimento da seguinte correlação empírica entre o parâmetro α e as variáveis dimensionais e operacionais do hidrociclone.

$$\alpha = \frac{K_{ep} \left(\frac{D_o}{D_c} \right)^{1,046} \beta^{0,429} \left(\frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_p} \right)^{2,182}}{D_c^{0,148} Re^{0,107} \left(\frac{D_b}{D_c} \right)^{0,161} \left(\frac{\eta_p}{\eta_f} \right)^{0,854} \exp \left[0,094 \left(\frac{\theta}{180^\circ} \right) \right]} \quad (58)$$

Onde:

K_{ep} - constante experimental do sistema.

Re - número de Reynolds na entrada do hidrociclone.

β - ângulo cônico do hidrociclone [°].

θ - ângulo entre o eixo longitudinal do hidrociclone e a vertical [°].

η_p – viscosidade da polpa [Pa.s].

η_f – viscosidade do fluido [Pa.s].

ρ_p – massa específica da polpa (suspensão) [t/m³].

LUZ (2005) em ampla pesquisa desenvolveu uma equação para α com intuito de obter uma aderência estatística em relação à nuvem de pontos “experimentais”. Foram testados diversos valores para o d_{50c} , e a Equação 59 revelou excelente precisão os quais são atrelados por fenômenos complexos, mas que se podem resumir

a seguinte afirmação: “ partículas grossas tem maior probabilidade de se reportarem ao produto grosso”.

$$\alpha = 34,555 \exp\left[-\frac{3,9}{m^{0,5984}}\right] \quad (59)$$

NAGESWARARAO (1999b) desenvolveu um modelo onde posteriormente foi revisado por LYNCH & MORRELL (1992) e feita algumas modificações por NAGESWARARAO (2004) para ciclones com geometria da Krebs com diâmetros entre 102-381mm. O conjunto de Equações 60-65 foram obtidas através da análise dimensional com os expoentes estimados para materiais ricos em calcário.

$$\frac{d50_c}{D_c} = K_{D1} \left(\frac{D_o}{D_c}\right)^{0,52} \left(\frac{D_u}{D_c}\right)^{-0,47} \lambda^{0,93} \left(\frac{P}{\rho_p g D_c}\right)^{-0,22} \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{-0,5} \left(\frac{L_c}{D_c}\right)^{0,2} \theta^{0,15} \quad (60)$$

$$K_{D1} = K_{D0} D_c^{-0,65} \quad (61)$$

$$Q_f = K_{Q1} D_c^2 \left(\frac{P}{\rho_p}\right)^{0,5} \left(\frac{D_o}{D_c}\right)^{0,68} \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{0,45} \theta^{-0,1} \left(\frac{L_c}{D_c}\right)^{0,2} \quad (62)$$

$$K_{Q1} = K_{Q0} D_c^{-0,1} \quad (63)$$

$$R_f = K_{w1} \left(\frac{D_o}{D_c}\right)^{-1,19} \left(\frac{D_u}{D_c}\right)^{2,40} \left(\frac{P}{\rho_p g D_c}\right)^{-0,53} \lambda^{0,27} \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{-0,50} \theta^{-0,24} \left(\frac{L_c}{D_c}\right)^{0,22} \quad (64)$$

$$R_v = K_{v1} \left(\frac{D_o}{D_c}\right)^{-0,19} \left(\frac{D_u}{D_c}\right)^{1,83} \left(\frac{P}{\rho_p g D_c}\right)^{-0,31} \lambda^{0,27} \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{-0,25} \theta^{-0,24} \left(\frac{L_c}{D_c}\right)^{0,22} \quad (65)$$

Onde:

L_c – altura da seção cilíndrica [m].

θ - ângulo do cone [°].

P – pressão da alimentação [KPa].

ρ_p – densidade da lama [t/m^3].

g – aceleração da gravidade [$9,81 m/s^2$].

Q_f – vazão [m^3/h].

R_f – *recovery* do líquido do *underflow* [%].

R_v – *recovery* volumétrica de alimentação de lama para o *underflow*. [%]

K – constante a ser estimada.

λ - termo de correção

C_v – fração volumétrica de sólidos na alimentação da lama.

O modelo assumiu uma estrutura explícita onde o resultado é dependente da característica do equipamento e do material a ser trabalhado. Este modelo foi desenvolvido com a concepção de quebra de paradigma e uma nova vertente de modelagem de ciclones. O termo adimensional ($P/\rho_p g D_c$) é essencialmente a representação do produto entre os números de Euler e Froude, representando o efeito da força centrífuga no ciclone. NARAYANAN (1985) estendeu esse trabalho para o desenvolvimento de funções específicas para moinhos.

O termo λ utilizado para correção foi sugerido por STEINOUR (1944) com a seguinte configuração:

$$\lambda = \frac{C_v}{(1 - C_v)^3} \quad (66)$$

CASTRO (1990) verificou que a Equação 66 pode ser usada no modelo sugerido por NAGESWARARAO (2004), mas apresentou alguns problemas com relação a valores baixos de C_v , tornando-se uma forma simplificada. O autor sugeriu uma equação baseada na equação de STEINOUR (1944) com a inserção de algumas constantes, onde foram obtidos bons valores para toda a faixa abrangente de C_v , conforme Equação 67:

$$\lambda = \frac{10^{1,82C_v}}{8,05(1 - C_v)^2} \quad (67)$$

Em análise da curva de eficiência reduzida para o circuito de comunicação NAGESWARARAO (1999b) concluiu que uma excelente aproximação é considerar que a curva de eficiência reduzida varia com a geometria do ciclone.

A eficiência expressa em termos do *recovery* real do *overflow* para o circuito de comunicação pode ser expressa pela Equação 68. (NAPIER-MUNN *et al.*, 1999).

$$E_{oa_i} = C \left[\frac{e^\alpha - 1}{e^{\alpha d_i / d_{50c}} + e^\alpha - 2} \right] \quad (68)$$

Onde:

C – parte de líquido que segue para o *overflow*.

CAPÍTULO III

3 Metodologia

3.1 Configuração do hidrociclone

Foram utilizados para o experimento o hidrociclone usado diariamente na planta, denominado de hidrociclone I, e duas configurações de hidrociclones que se encontravam disponíveis para testes do projeto de Expansão da área da Precipitação, denominados de hidrociclones II e III.

A Figura 12 mostra de forma geral as dimensões de maior importância para a modelagem de hidrociclones.

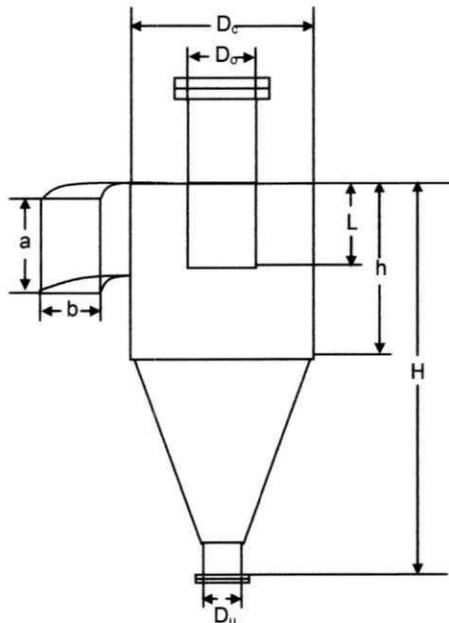


Figura 12 - Dimensões do ciclone

O hidrociclone atualmente utilizado na planta é constituído de poliuretano fornecido pela Netzsch AKW Equipamentos e Processos, modelo RWT 4118, cujas dimensões são apresentadas na a Tabela 02. Já os hidrociclones utilizados nos testes da expansão foram fornecidos pela Krebs Engineers modelos Gmax10-3139 e Gmax15-3117, ambos com configurações diferentes, conforme Tabela 02.

Tabela 2 - Dimensões dos hidrociclones

Dimensão		Hidrociclone I (in)	Hidrociclone II (in)	Hidrociclone III (in)
Diâmetro do ciclone	Dc	8,00	10,00	15,00
Diâmetro do duto de saída do topo	Do	2,50	2,50	4,50
Diâmetro do duto de saída do pó	Du	2,00	1,75	2,75
Comprimento do tubo interno	L	6,58	16,96	20,38
Comprimento da parte cilíndrica	h	28,46	24,96	28,38
Altura total do ciclone	H	38,58	62,76	79,34
Altura da secção de entrada	a	3,00	4,00	6,00
Largura da secção de entrada	b	12,50	8,50	13,50

3.2 Procedimento experimental

Os ensaios foram conduzidos utilizando-se como material particulado uma pasta composta de licor cáustico e cristais de alumina (na forma de hidrato) precipitada no licor, utilizados na área da precipitação da refinaria da Alumar – MA, conforme Figura 13. O licor cáustico e o hidrato apresentam densidade respectivamente em torno de 1310 e 2420 kg/m³ e uma viscosidade de 15,3 kg/m.h.



Figura 13 - (da esquerda para direita) Amostra do licor cáustico e amostra do material a ser classificado

Para o hidrociclone I, foram efetuadas medidas de vazão e de concentração nas correntes de alimentação e *underflow*. A pressão da alimentação foi medida com o auxílio de um manômetro instalado no duto de alimentação. Os dados foram obtidos on-line através do *software* de monitoramento *Uniformance Visual PHD*, conforme Figura 14, onde as vazões eram medidas através de fluxímetros e as concentrações através de densitômetros.

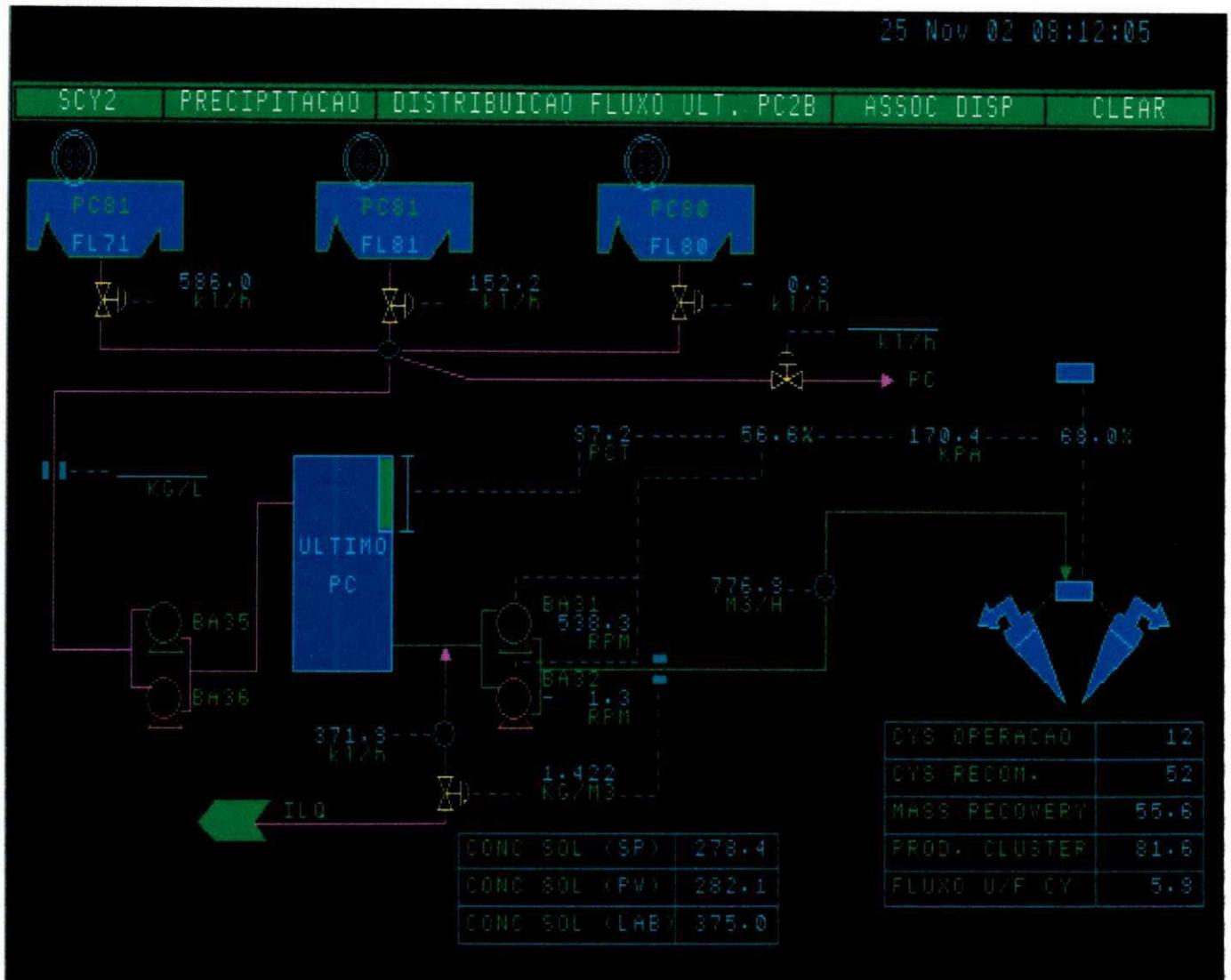
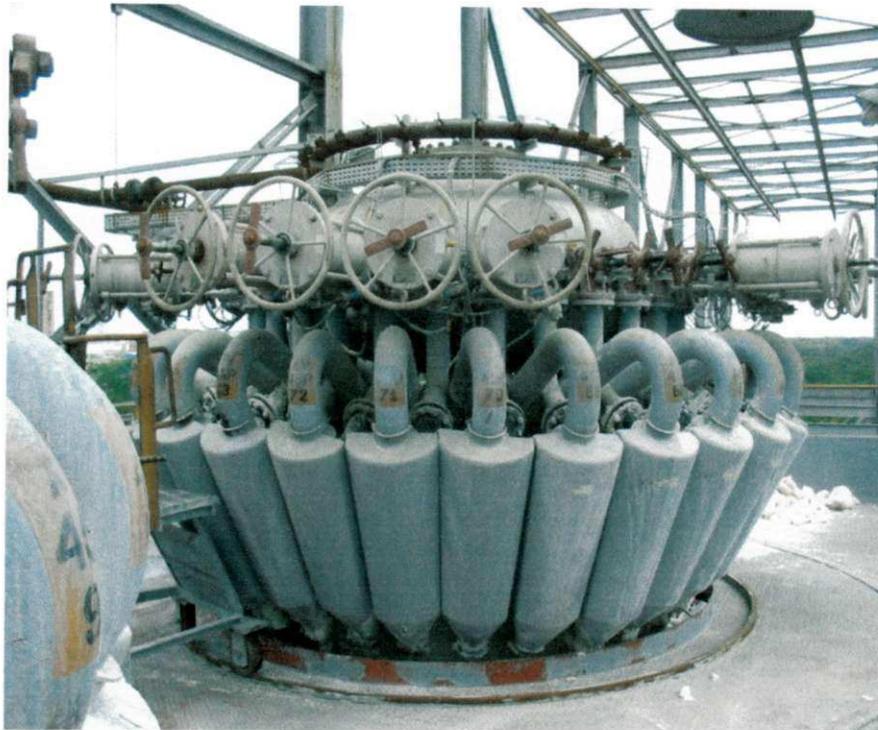
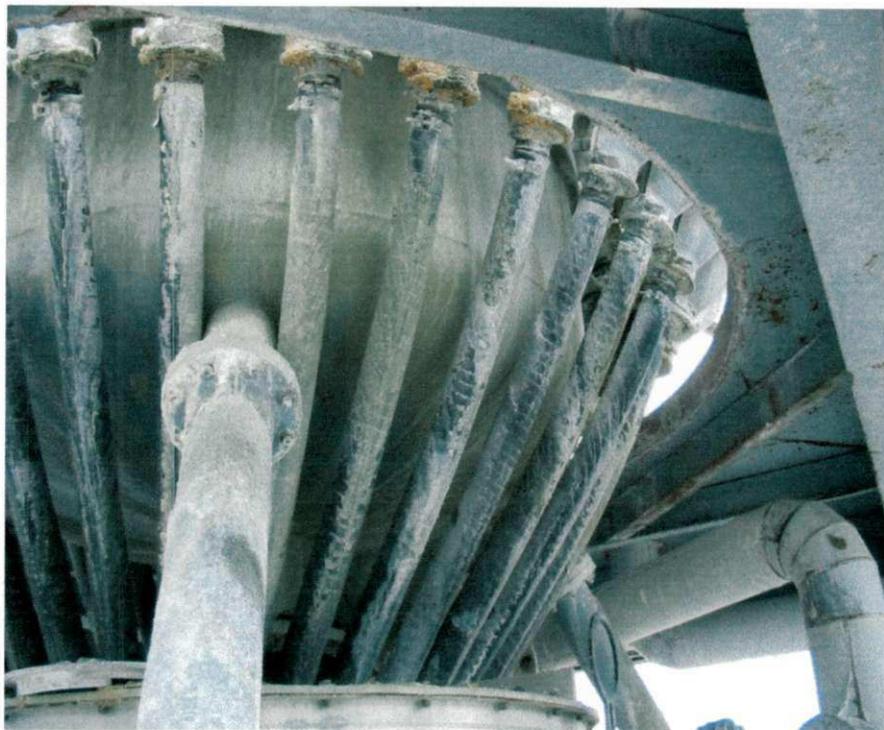


Figura 14 - Tela do software de monitoramento Uniformance Visual PHD

A fim de gerar um melhor conhecimento do sistema de separação de partículas, observa-se nas Figuras 15(a) e 15(b) uma ilustração da atual bateria de hidrociclones utilizados na área da Precipitação. A disposição da bateria de ciclones é na forma circular onde se tem um distribuidor de fluxo.



(a)



(b)

Figura 15 - Bateria de hidrociclones da área 45 (a) e (b)

Para os hidrociclones II e III, basicamente existia um reservatório de suspensão ligado a uma bomba centrífuga onde era responsável pela alimentação do

hidrociclone. Dentro do reservatório era observado um sistema de agitação mecânica onde sua função era manter a suspensão dentro do tanque homogeneizada. A corrente de descarga do *underflow* era direcionada ao reservatório que alimentava o hidrociclone, enquanto que a corrente de *overflow* era direcionada ao reservatório de classificação secundária, onde retornava ao processo. O painel de controle instalado na área, conforme Figura 16, fornecia dados referentes à pressão de alimentação, a vazão de entrada, bem como a concentração de entrada da pasta. Esses dados eram anotados na hora da coleta das amostras das três correntes.



Figura 16 - Painel de controle instalado na área de testes dos hidrociclones II e III

A medição da vazão do *underflow* dos hidrociclones II e III foram feitas através da coleta da pasta da corrente de *underflow* em um tanque de volume conhecido (500 litros), onde foi feito a tomada de tempo com o auxílio de um cronômetro. Para obtenção de dados médios foram feitas réplicas das tomadas de tempos. A partir dessa medição calculou-se a vazão de *underflow* para a determinada configuração de teste.

As Figuras 17 e 18 ilustram a bancada de testes dos hidrociclones II e III.

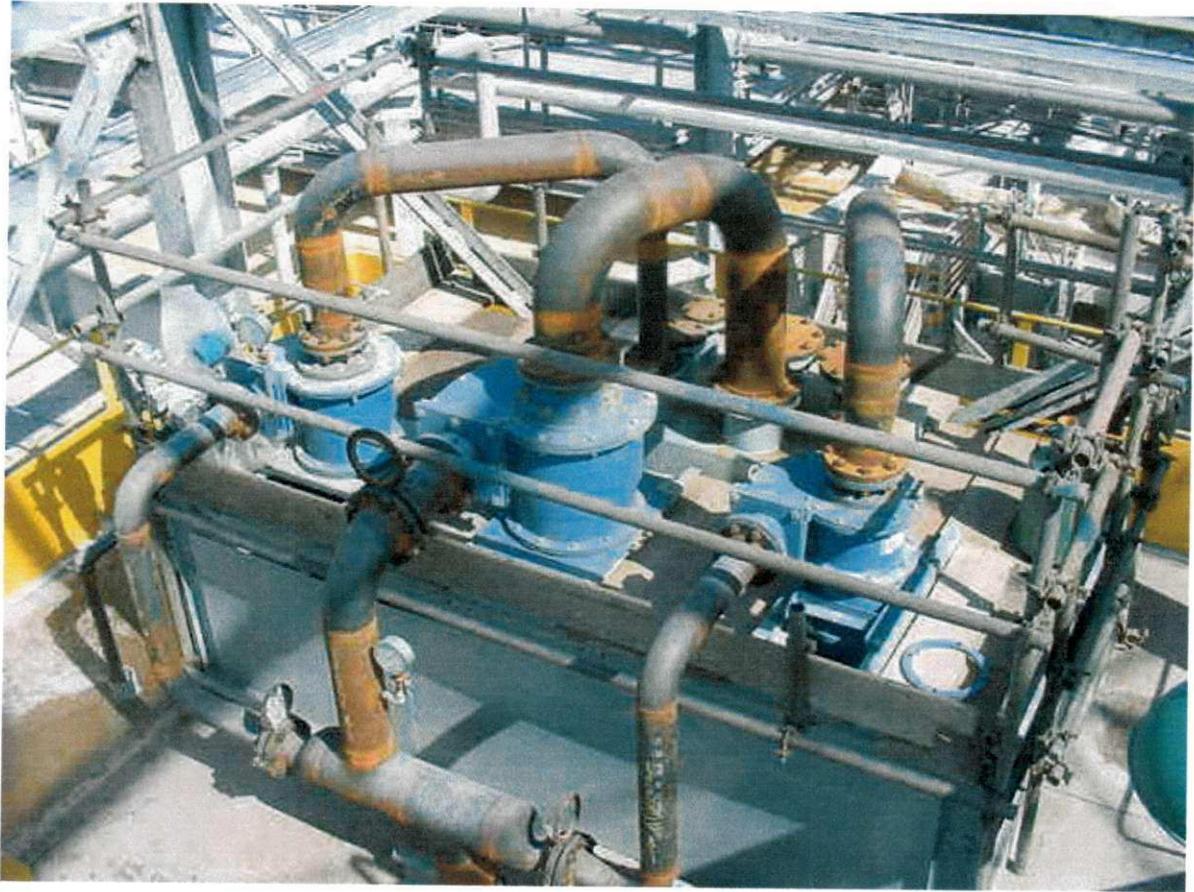


Figura 17 - Hidrociclones usados nos testes da expansão



Figura 18 - Área dos hidrociclones de testes da expansão

Para quantificar o desempenho do hidrociclone em cada experimento foi necessário medir as seguintes variáveis: pressão no duto da alimentação, vazão no duto da alimentação e do *underflow*, concentração na alimentação e no *underflow* e distribuição granulométrica na alimentação e no *underflow*.

Apesar do densitômetro quantificar a concentração da alimentação, também foi medida em laboratório, através da técnica gravimétrica, as concentrações da corrente de alimentação, do *underflow* e do *overflow*.

A análise granulométrica foi feita através do método de difractometria laser, onde baseia-se no princípio de que o ângulo de difração é inversamente proporcional à dimensão da partícula. O equipamento utilizado foi o Malvern, modelo Mastersizer, conforme Figura 19. O resultado obtido representa a fração cumulativa, em massa, menor que certo diâmetro d .

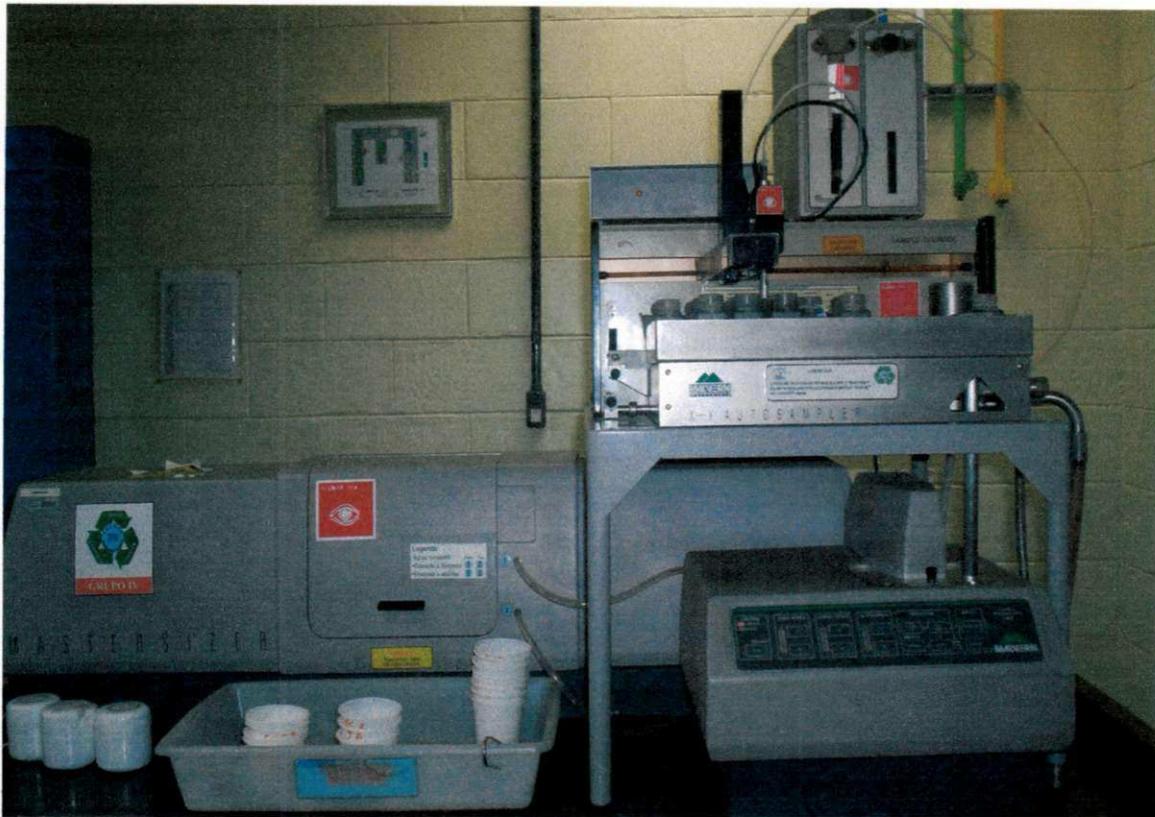


Figura 19 - Equipamento utilizado na análise granulométrica: Malvern

Todas as curvas de distribuição granulométrica se ajustaram adequadamente ao modelo de Rosin-Rammler-Bennet (RRB) (SCHEID & MASSARANI,200), que é dado pela equação 69:

$$X_i = 1 - \exp\left[-\left(\frac{d_i}{d'}\right)^m\right] \quad (69)$$

3.3 Estudo dos modelos.

Como foi abordado no capítulo 2, observa-se que vários modelos têm sido desenvolvidos para a previsão do desempenho de hidrociclones. Nesse estudo foram escolhidos três modelos para a previsão do desempenho de separação da pasta de hidrato. O critério de escolha desses modelos foi exatamente à facilidade de ser decodificado em um *software* usual e de fácil acessibilidade, como por exemplo, o *Microsoft Excel*, uma consistência das equações que compõem o modelo, a adequação

desses modelos em desempenho de partículas diferentes da pasta de hidrato, como também a utilização de parâmetros de fácil acesso envolvendo a geometria do ciclone e alguns parâmetros operacionais.

Os três modelos escolhidos foram:

- modelo consagrado por PLITT (1976);
- modelo segundo LEITH e LICHT (1972);
- modelo segundo SANTANA (2001).

Todas as simulações foram desenvolvidas no *software Microsoft Excel* E por que o Excel? O Excel é um aplicativo do tipo planilha completa que permite analisar, organizar, interpretar e apresentar dados de modo rápido e fácil, além de ser um dos *softwares* que possui ampla disponibilidade a qualquer usuário e apresenta ferramentas eficazes para aplicações científicas, técnicas e de engenharia.

3.3.1 Modelo Plitt.

LUZ (2005) afirma que dos modelos consagrados, o modelo de Plitt utiliza uma curva de partição expurgada, segundo uma distribuição de Rosin-Rammler, expressa por PLITT (1976), conforme Equação 70:

$$E_G = 1 - \exp \left[-\ln(2) \left(\frac{d_i}{d_{50}} \right)^m \right] \quad (70)$$

Onde: E_G – eficiência granulométrica.

d_i - é o tamanho da classe i [μm].

d_{50} – tamanho nominal de corte [μm].

m – módulo da distribuição ou parâmetro de agudez.

A Equação 70, encontra-se na sua forma original sem a linearização, logo é necessário que ocorra a linearização da mesma. Aplicando o logaritmo neperiano na Equação 70 têm-se

$$\ln(-\ln(1 - E_G)) = \ln(\ln(2) \left(\frac{d_i}{d_{50}} \right)^m)$$

$$\ln(-\ln(1 - E_G)) = \ln(\ln(2)) + \ln\left(\frac{d_i}{d_{50}}\right)^m$$

$$\ln(-\ln(1 - E_G)) = \ln(\ln(2)) + m \cdot \ln\left(\frac{d_i}{d_{50}}\right)$$

$$\ln(-\ln(1 - E_G)) = \ln(\ln(2)) + m \cdot \ln(d_i) - m \cdot \ln(d_{50})$$

$$\ln(-\ln(1 - E_G)) = \ln(\ln(2)) - m \cdot \ln(d_{50}) + m \cdot \ln(d_i) \quad (71)$$

Logo é obtido uma equação do tipo: $Y=A+Bx$.

Onde :

$$Y = \ln(-\ln(1 - E_G))$$

$$A = \ln(\ln(2)) - m \cdot \ln(d_{50})$$

$$B = m$$

Obtêm-se graficamente os parâmetros A e B, também conhecidos como coeficiente linear e angular, respectivamente. Com esses coeficientes em mãos pode-se obter os parâmetros desconhecidos da Equação 70. O m será o próprio coeficiente angular e o d_{50} será dado por:

$$d_{50} = \exp\left(\frac{\ln(\ln(2)) - A}{m}\right) \quad (72)$$

3.3.2 Modelo Leith e Licht

O modelo segundo LEITH e LICHT (1972) citado por SANTANA (2001), mostra que a eficiência de coleta de um hidrociclone pode ser expressa pela Equação 73.

$$E_G = 1 - \exp \left\{ -2 \left[\frac{G \tau_i Q}{D_c^3} (n+1) \right]^{\frac{1}{2(n+1)}} \right\} \quad (73)$$

Esse modelo relaciona variáveis operacionais e a geometria do ciclone. Os efeitos da configuração do ciclone são considerados através do fator G, conforme Equação 74.

$$G = \frac{8K_c}{K_a^2 K_b^2} \quad (74)$$

Onde:

$$K_a = \frac{a}{D_c} \quad (75)$$

$$K_b = \frac{b}{D_c} \quad (76)$$

$$K_c = \frac{(2V_s + V^*)}{2D_c^3} \quad (77)$$

V^* poderá ser V_{nl} ou V_H , dependendo da relação do comprimento natural do vórtice, l , com $(H-L)$.

O volume anular desde o duto de saída até o meio do duto de entrada, V_s é dado por:

$$V_s = \frac{\left[\pi \left(L - \frac{a}{2} \right) (D_c^2 - D_o^2) \right]}{4} \quad (78)$$

O comprimento natural do vórtice, l , é dado por:

$$l = 2,3D_o \left(\frac{D_c^2}{ab} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (79)$$

Para $l < (H-L)$ calcula-se V_{nl} , o volume da região correspondente ao comprimento natural do vórtice, excluindo o núcleo:

$$V_{nl} = \frac{\pi D_c^2}{4} (h-L) + \left(\frac{\pi D_c^2}{4} \right) \left(\frac{l+L-h}{3} \right) \left(1 + \frac{d_n}{D_c} + \frac{d_n^2}{D_c^2} \right) - \frac{\pi D_o^2 l}{4} \quad (80)$$

Onde d_n é o diâmetro do núcleo central, conforme Equação 81.

$$d_n = D_c - (D_c - D_u) \left[\frac{(L+l-h)}{H-h} \right] \quad (81)$$

Para $l > (H-L)$ calcula-se V_H , o volume abaixo do duto de saída de gás, excluindo o núcleo:

$$V_H = \frac{\pi D_c^2}{4} (h-L) + \left(\frac{\pi D_c^2}{4} \right) \left(\frac{H-h}{3} \right) \left(1 + \frac{D_u}{D_c} + \frac{D_u^2}{D_c^2} \right) - \frac{\pi D_o^2 (H-L)}{4} \quad (82)$$

Q é a vazão de entrada e τ_i é chamado de tempo de relaxação dado para cada diâmetro de partícula, conforme Equação 83:

$$\tau_i = \frac{\rho_p d_i^2}{18\mu} \quad (83)$$

O fator n é calculado como função do diâmetro do ciclone (ft) e da temperatura (°F), é chamado de expoente de *vortex*.

$$n = 1 - \left[1 - \frac{(12D_c)^{0,14}}{2,5} \right] \left[\frac{T + 460}{530} \right]^{0,3} \quad (84)$$

3.3.3 Modelo Santana

Santana (2001) propõe uma correlação empírica para a eficiência global em função do fator de configuração G, baseado na forma geral da equação de LEITH e LICHT (1972), assim a Equação 85 expressa o novo modelo:

$$E_G = 1 - \exp \left\{ - \left[\frac{\phi G^{-1} \tau_m Q^{2,82}}{D_c^3} (n+1) \right]^{\frac{1}{2(n+1)}} \right\} \quad (85)$$

onde: $\tau_m = \frac{\rho_p d_m^2}{18\mu}$ (86)

$\phi = 1,594 \cdot 10^8$ (dimensões no S.I.)

3.4 Modelo desenvolvido

Diante de tantos modelos sentiu-se a necessidade de desenvolver um modelo específico para o hidrociclone utilizado na planta operacional. Para o desenvolvimento desse estudo foi utilizado o modelo de Plitt, conforme Equação 70, onde foi proposta o cálculo dos parâmetros m e d50 através de correlações onde fossem envolvidos variáveis operacionais que tinham forte influência no cálculo do desempenho do hidrociclone. As correlações foram estimadas através da análise de regressão múltipla.

$$E_G = 1 - \exp \left[- \ln(2) \left(\frac{d_i}{d_{50}} \right)^m \right] \quad (70)$$

O objetivo da regressão múltipla é determinar as relações entre uma variável dependente (Y) e um conjunto de variáveis independentes (X1, X2, ..., Xn),

assumindo que esta relação tem natureza linear. Através do método de mínimos quadrados, é produzida uma equação que prevê valores de Y, sob certos valores das variáveis independentes:

$$Y = A + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_nX_n$$

A análise tem como objetivo determinar o valor de A (interseção) e os vários valores de B (coeficientes de regressão). (TABACHNICK e FIDELL, 2001)

As variáveis operacionais envolvidas foram da alimentação do ciclone: vazão, concentração e a distribuição granulométrica.

CAPÍTULO IV

4 Resultados e Discussão

4.1 Desempenho de separação

Com o intuito de averiguar o desempenho dos hidrociclones na separação de hidrato, cujas especificações dos hidrociclones testados foram ilustrados no capítulo 3, foram efetuados estudos sobre a eficiência granulométrica e eficiência total, para em um segundo momento comparar a eficiência obtida experimentalmente com a encontrada pelos modelos em estudo.

4.1.1 Eficiência granulométrica

As Tabelas 03 e 04 apresentam os dados experimentais médios colhidos em planta para os hidrociclones I, II e III. Para o hidrociclone I a concentração da alimentação variou entre 324 g/l a 410 g/l, enquanto que, para o hidrociclone II e III foram mantidas concentrações mais elevadas em torno de 600 g/l, pois esses hidrociclones apresentam maiores capacidades. Já para a pressão de alimentação o hidrociclone I variou entre 169,6 KPa a 179,6 KPa, sendo que para hidrociclone II e III mantendo-se a pressão em 160 KPa, apresentando uma maior estabilidade.

Tabela 3 - Dados experimentais médios para hidrociclone I

Teste	P (KPa)	C _f (g/l)	C _v (g/l)	Q _r (m ³ /h)	Q _u (m ³ /h)	W _r (t/h)	W _u (t/h)
A	169,6	410	935	64,4	26,4	26,4	14,5
B	169,6	424	956	66,7	15,4	28,3	14,7
C	179,6	345	908	68	14,6	23,4	13,3
D	173,7	324	914	60,1	9,1	19	8,4
E	177,6	366	953	62,8	9,4	23	8,9
F	179,2	333	927	63	8,5	21	7,8

Tabela 4 - Dados experimentais médios para hidrociclone II e III

Teste	P (KPa)	C _f (g/l)	C _u (g/l)	Q _f (m ³ /h)	Q _u (m ³ /h)	W _f (t/h)	W _u (t/h)
G	160	589	1032	60,3	23,2	35,6	24,0
H	160	604	1041	133,0	38,2	80,4	39,7

A análise da eficiência granulométrica é feita com o intuito de averiguar quanto de cada tamanho individual de partícula o hidrociclone consegue separar. Foi a partir dos resultados das análises granulométricas do *underflow* e da alimentação, conforme anexo A, que se determinou para cada hidrociclone a eficiência granulométrica ou eficiência individual de coleta, segundo rege a Equação 24. A faixa de distribuição granulométrica para o *underflow* variou entre 91 a 98%, onde foi considerado dentro das especificações trabalhada na indústria. As Tabelas 05 e 06 explicitam os dados da eficiência granulométrica para os hidrociclones I, II e III.

Tabela 5 - Eficiência granulométrica para o hidrociclone I

Diâmetro das partículas (Micra)	Eficiência Hidrociclone I					
	A(%)	B(%)	C(%)	D(%)	E(%)	F(%)
20	10,1	10,4	20,7	18,8	15,1	9,5
44	33,3	32,0	41,4	34,3	27,8	24,4
76	48,6	45,1	55,2	45,8	35,8	33,9
92	64,8	61,8	66,9	55,4	45,1	44,1
124	75,5	74,6	74,6	63,6	50,1	50,8

Tabela 6 - Eficiência granulométrica para o hidrociclone II e III

Diâmetro das partículas (Micra)	Eficiência Hidrociclone II	Eficiência Hidrociclone III
	G (%)	H (%)
20	23,9	24,9
44	51,1	33,2
76	59,6	43,7
92	68,0	56,4
124	74,4	66,9

Observa-se que nos ensaios A e B o hidrociclone possui mesma pressão de alimentação e concentrações diferentes, o que nos evidencia afirmar que para uma mesma configuração geométrica, pressões iguais e concentrações diferentes a eficiência de coleta individual é maior em concentrações menores, donde se observa um maior teor de partículas grossas. Analisando com mais vigor a eficiência de coleta para os ensaios A e B, nota-se que o ensaio A possui maior eficiência de coleta individual que o ensaio B, atingindo um desempenho individual de 75,5% para partículas de 124 μ m. Para partículas de 44 μ m observa-se que o maior desempenho foi para o ensaio C, tendo uma eficiência de 41,4%.

Tomando como base de análise os ensaios G e H nota-se que mesmo sendo feito um ensaio para um hidrociclone de maior capacidade, o maior desempenho se deu para o ensaio G, onde tínhamos um hidrociclone de menor capacidade. O ensaio G apresentou desempenho de coleta bem superior aos do ensaio H, chegando a um patamar de 74,4% para partículas de 124 μ m e de 51,1% para partículas de 44 μ m. O ensaio H apresenta uma alta concentração de sólidos com predominância de partículas menores que 44 μ m. Logo o maior desempenho alcançado em 44 μ m foi para o ensaio G, onde se tinha uma vazão de alimentação em torno de 60 m³/h.

As figuras 20 e 21 mostram o comportamento da eficiência granulométrica em cada ensaio feito com o hidrociclone I, II e III. Observa-se que tanto para hidrociclone I como para os hidrociclones II e III a curva de eficiência segue um comportamento

semelhante, onde à medida que o de diâmetro partícula aumenta é observado um crescimento na eficiência granulométrica. Esse comportamento é decorrente da característica do material alimentado no hidrociclone, onde foi observado maior desempenho nas partículas de maiores diâmetros.

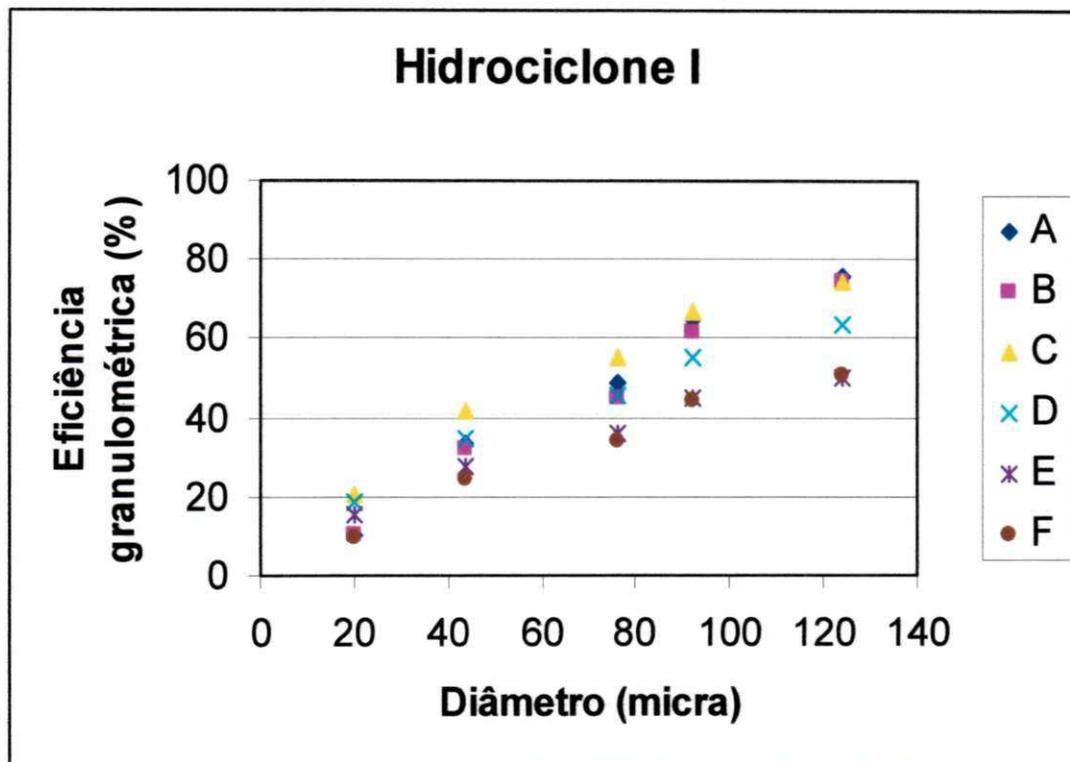


Figura 20 - Gráfico da eficiência granulométrica em função do diâmetro de partícula para os ensaios realizados com o hidrociclone I

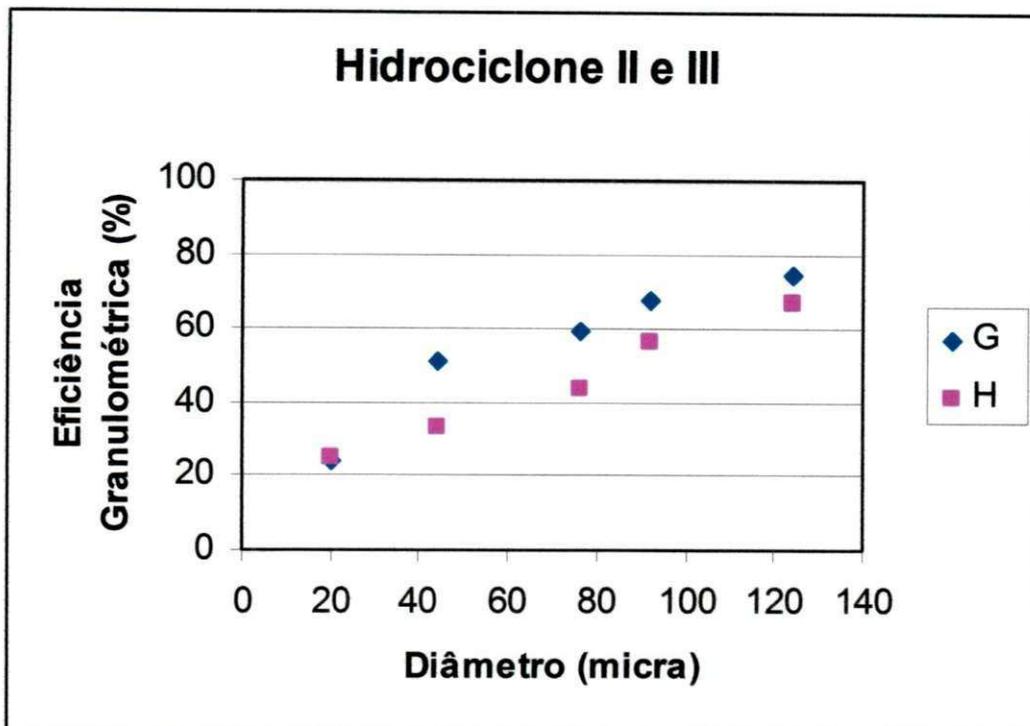


Figura 21 - Gráfico da eficiência granulométrica em função do diâmetro de partícula para os ensaios realizados com os hidrociclones II e III

4.1.2 Eficiência total

A eficiência total expressa o poder de separação total do hidrociclone, logo podemos calcular o desempenho do hidrociclone através da Equação 21 ou através da Equação 25. Uma vez que já foi calculado o desempenho de coleta individual foi utilizada a Equação 25 para o cálculo da eficiência total.

A Figura 22 apresenta de forma sucinta a eficiência total para todos os testes realizados. Para os ensaios de A a F hidrociclone com mesma configuração geométrica, observa-se um maior desempenho para o ensaio C, chegando a uma eficiência total em torno de 56%. Analisando os ensaios A e B é observado que apesar de ter configuração operacional parecida o ensaio A teve desempenho total em torno de 54%. Mais uma vez se evidencia a possibilidade de concentrações menores se ter um melhor desempenho.

A fim de verificar a dependência de separação com a configuração geométrica do hidrociclone foi observado que no ensaio G obteve-se um melhor desempenho de separação, em torno de 61%, enquanto que o ensaio H foi de 48%.

VALENTE *et al.* (1999) afirma que os hidrociclones cilíndricos apresentam melhores desempenhos como classificadores de partículas nos casos em que se utilizam orifícios menores de *underflow* e maiores diâmetros da parte cilíndrica. Essa afirmação também pode ser comprovada com os resultados obtidos nesse presente estudo, o que mostra que o hidrociclone II possui melhor desempenho de separação.

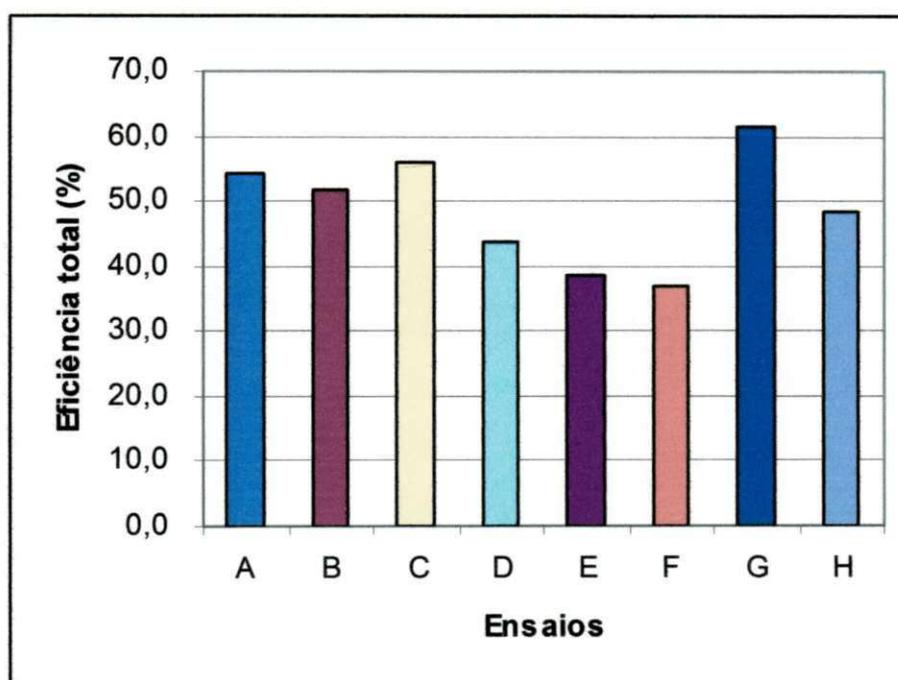


Figura 22 - Gráfico comparativo da eficiência total e os ensaios experimentais

4.2 Comparativo dos dados experimentais com modelos estudados.

Uma vez proposto para o estudo dos modelos de PLITT (1976) e LEITH e LICHT (1972), foram feitos comparativos da eficiência obtida experimentalmente com os valores estimados pelos modelos.

A eficiência granulométrica do hidrociclone I e os valores estimados pelos modelos de PLITT (1976) e LEITH e LICHT (1972) são ilustrados nas Figura 23 a 28. Observa-se por meio de análise dos mesmos que os dados experimentais e os valores

estimados pelos modelos seguem uma tendência comportamental semelhante. Os valores dos parâmetros do modelo de PLITT (1976), m e d_{50} , encontram-se no anexo B.

Nota-se que para todos os ensaios realizados com o hidrociclone I o modelo sugerido por PLITT (1976) adequou-se muito bem na previsão da eficiência granulométrica, com desvios médios em torno de 5%. Analisando os valores estimados pelo modelo sugerido por e LEITH e LICHT (1972) pode-se observar que a previsão de desempenho de coleta individual foi superestimada para todos os ensaios feitos com o hidrociclone I, com erro médio de 30% para partículas de $44\mu\text{m}$, exceto para o ensaio C onde os valores estimados se aproximaram dos valores experimentais e apresentaram desvios médios de 8%. Averigua-se que os maiores desvios foram para os ensaios E e F, onde apresentaram erros médios de até 68% para partículas de $20\mu\text{m}$.

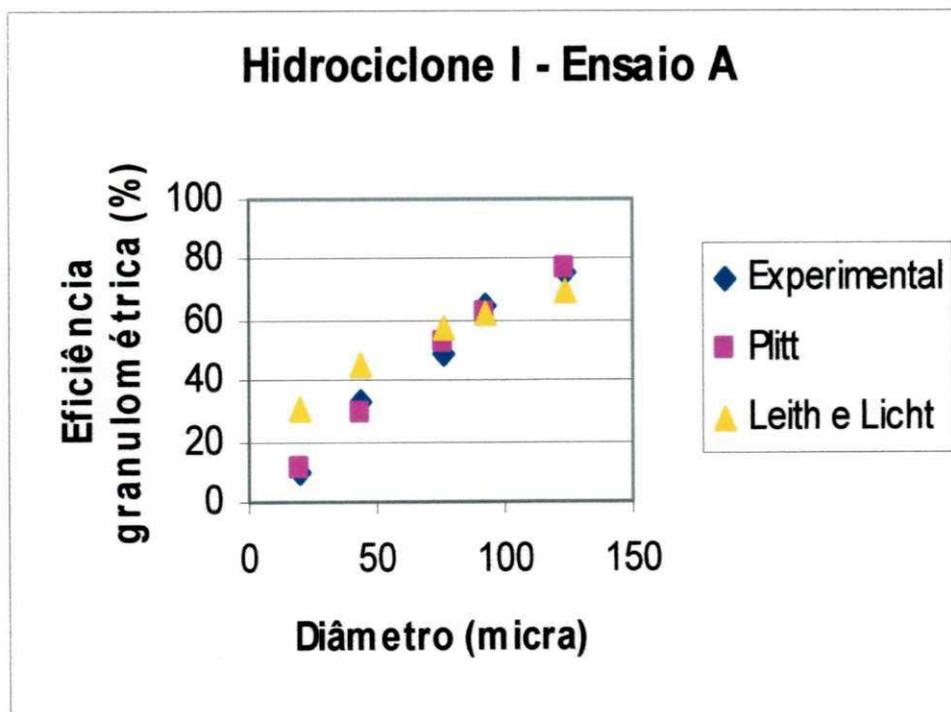


Figura 23 - Comparativo das eficiências granulométricas obtida experimentalmente, pelo modelo de Plitt e por Leith e Licht para o ensaio A

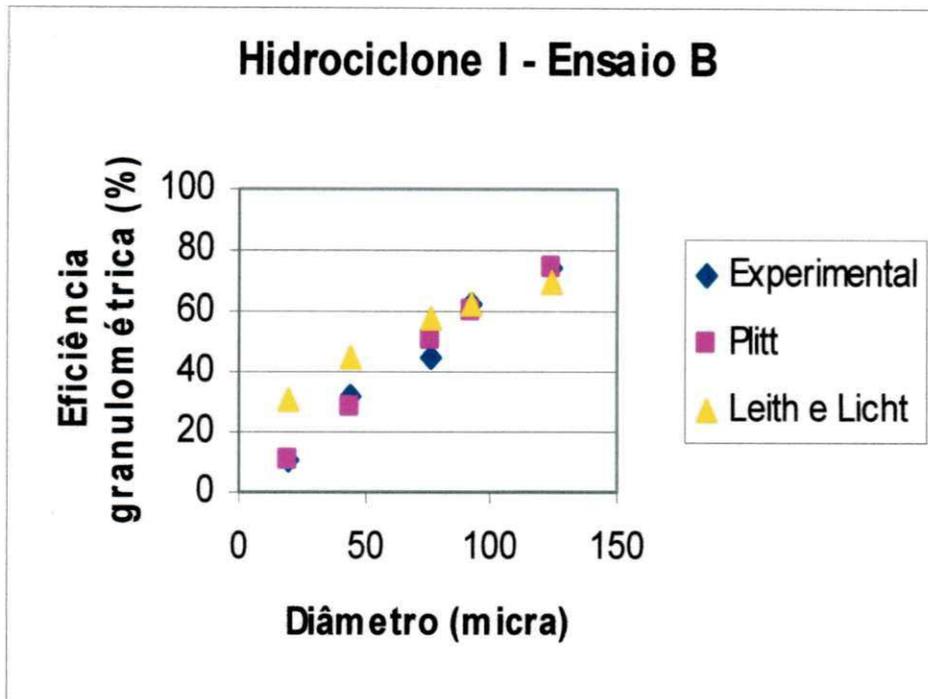


Figura 24 - Comparativo das eficiências granulométricas obtida experimentalmente, pelo modelo de Plitt e por Leith e Licht para o ensaio B

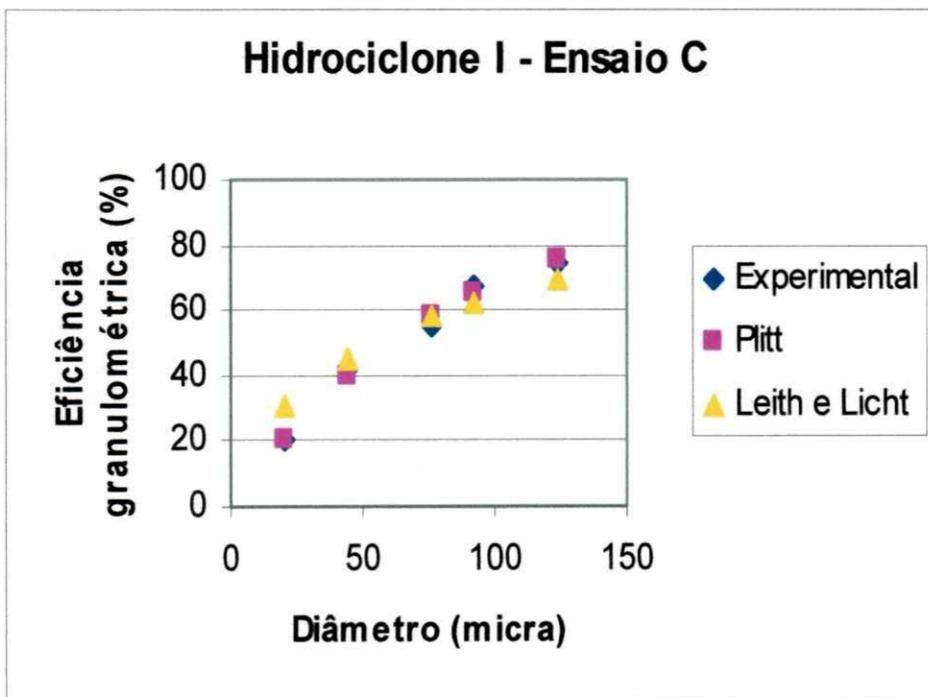


Figura 25 - Comparativo das eficiências granulométricas obtida experimentalmente, pelo modelo de Plitt e por Leith e Licht para o ensaio C

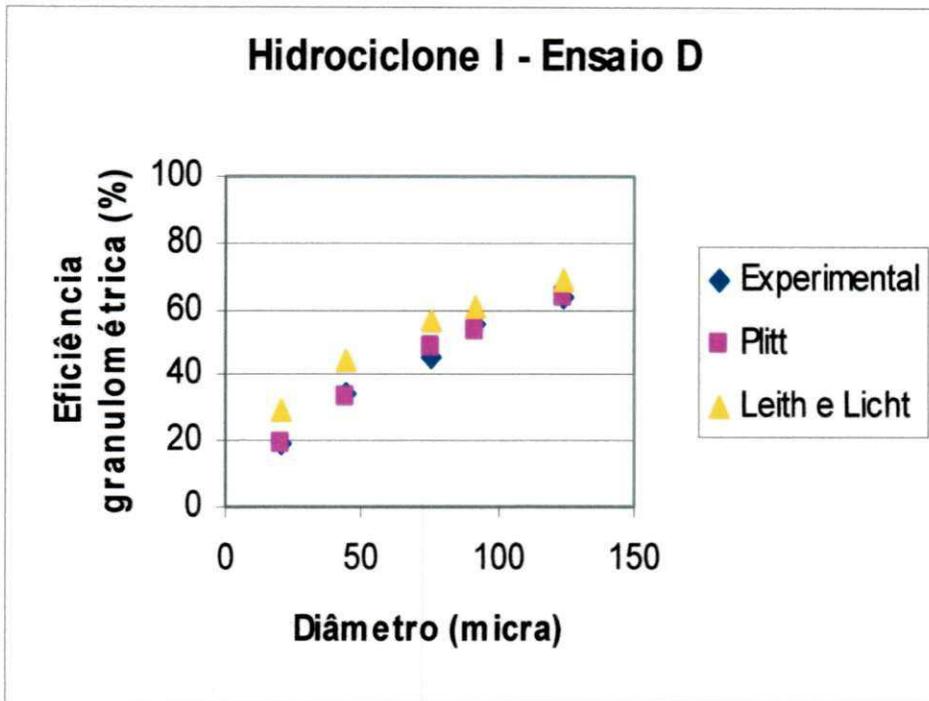


Figura 26 - Comparativo das eficiências granulométricas obtida experimentalmente, pelo modelo de Plitt e por Leith e Licht para o ensaio D

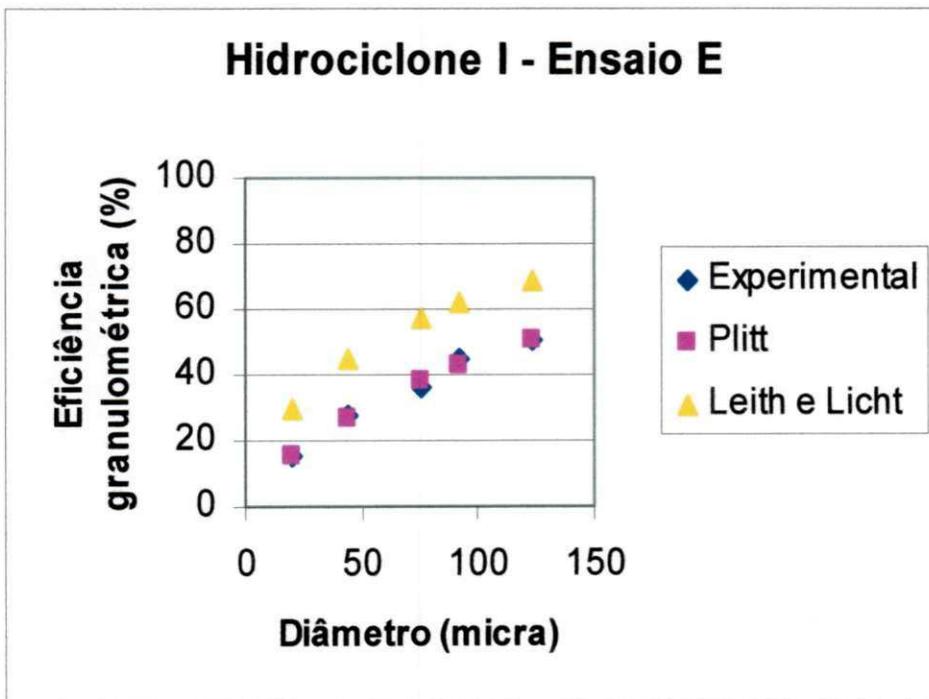


Figura 27 - Comparativo das eficiências granulométricas obtida experimentalmente, pelo modelo de Plitt e por Leith e Licht para o ensaio E

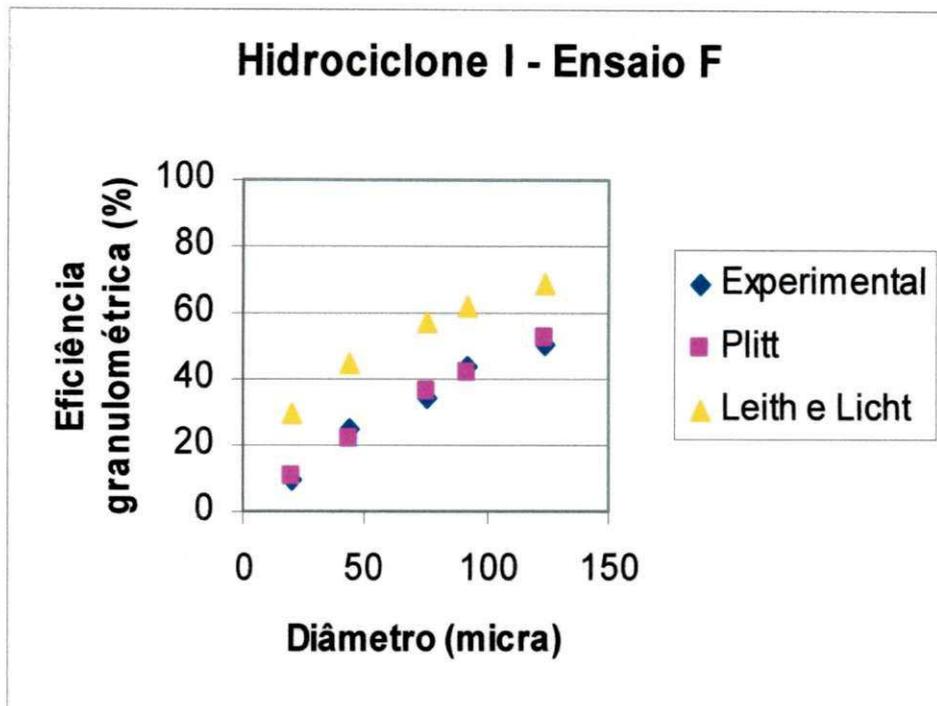


Figura 28 - Comparativo das eficiências granulométricas obtida experimentalmente, pelo modelo de Plitt e por Leith e Licht para o ensaio F

Partindo para a análise dos ensaios G e H, que se refere aos hidrociclones II e II, as Figuras 29 e 30 mostram o comportamento desses hidrociclones perante aos modelos estudados. Observa-se que para hidrociclone II, ou ensaio G, o modelo de PLITT (1976) e LEITH e LICHT (1972) adequou-se de forma satisfatória aos dados experimentais, obtendo erro médio de 2% no desempenho de partículas de 44 μm . Já na análise dos dados obtidos para o ensaio H verifica-se que o modelo de PLITT (1976) ajustou-se melhor aos dados, apresentando erro médio de 1% para desempenho de partículas de 92 μm . O modelo sugerido por LEITH e LICHT (1972) subestimou a previsão da eficiência granulométrica para o ensaio H chegando em alguns casos obter erros médios de até 22%.

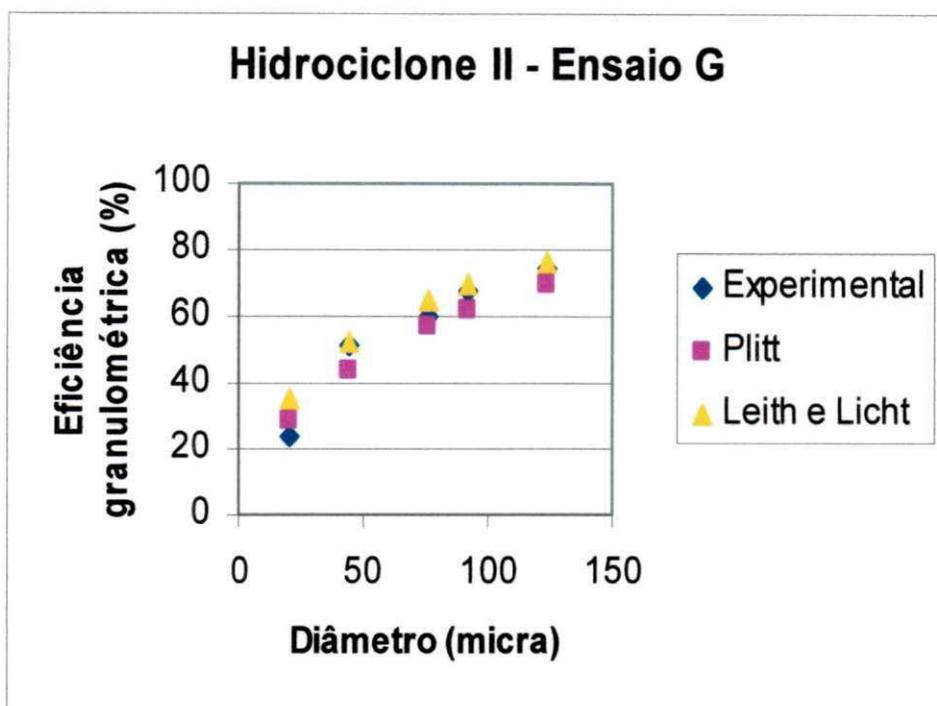


Figura 29 - Comparativo das eficiências granulométricas obtida experimentalmente, pelo modelo de Plitt e por Leith e Licht para o ensaio G

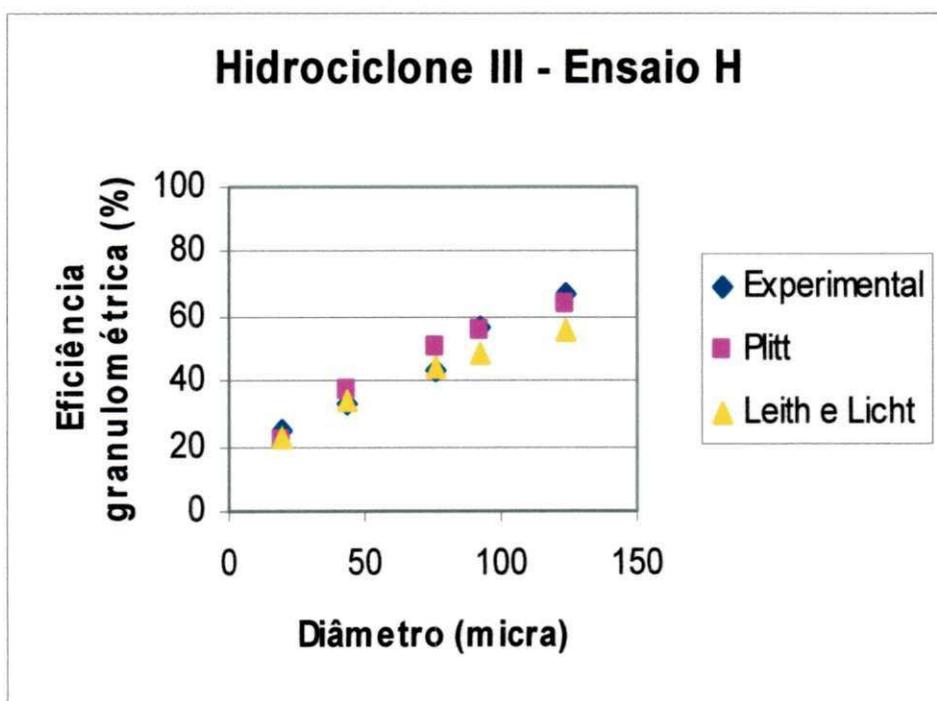


Figura 30 - Comparativo das eficiências granulométricas obtida experimentalmente, pelo modelo de Plitt e por Leith e Licht para o ensaio H

Em se tratando da eficiência total, a Figura 31 ilustra um comparativo do desempenho total dos ensaios com os dados estimados pelos modelos de PLITT (1976), LEITH e LICHT (1972) e SANTANA (2001). Graficamente é percebido que para os ensaios A, B, C, D, E, F e H o modelo proposto por PLITT (1976) teve uma adequação bastante razoável, prevendo desempenho de até 56% para o ensaio C. Os modelos de LEITH e LICHT (1972) e SANTANA (2001) teve melhor adequação ao ensaio C, onde apresentaram desvios médios em torno de 0,5% e 11% respectivamente. Para os ensaios E e F esses modelos superestimaram a previsão de desempenho. Já para o ensaio G o modelo de SANTANA (2001) subestimou a eficiência, chegando a gerar um desvio médio superior a 200%. Deve-se destacar que os ensaios A e B apresentaram concentrações da alimentação superiores aos dos ensaios C, D, E e F. O modelo de LEITH e LICHT (1972) subestimou o desempenho para o ensaio H e superestimou para o ensaio G.

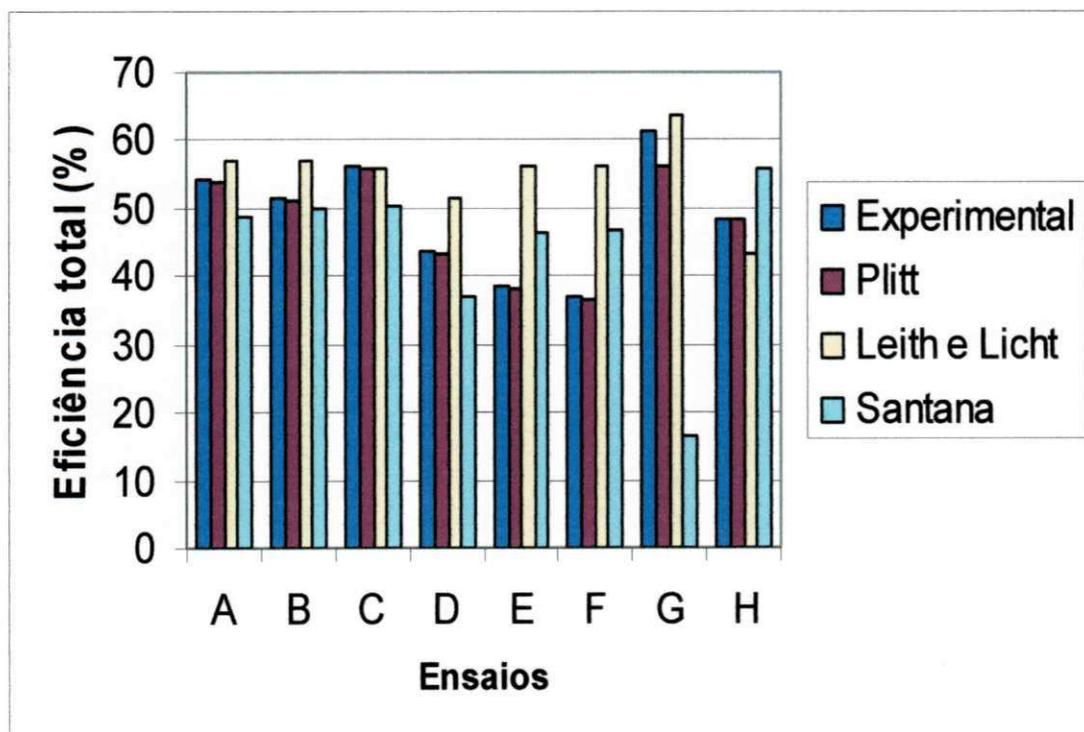


Figura 31 - Gráfico comparativo da eficiência total experimental e os modelos de PLITT (1976), LEITH e LICHT (1972) e SANTANA (2001)

Com o intuito de averiguar a consistência dos modelos estudados verificou-se que o modelo de PLITT (1976) apresenta um ajuste satisfatório com relação à previsão do desempenho de hidrociclones na separação de partículas de hidrato, onde se era esperado, pois curvas ajustadas são mais precisas que correlações desenvolvidas. Comportamento semelhante foi observado por VALENTE *et al.* (1999) ao estudar o desempenho de hidrociclones de fundo chato.

Observa-se que os modelos para o cálculo do desempenho de hidrociclones têm forte alicerce empírico. Os modelos propostos LEITH e LICHT (1972) e SANTANA (2001) não fugiram a regra do empirismo. E por esses modelos assumirem parâmetros empíricos, tais como o fator G e o ϕ , é necessário que seja feito um estudo de impacto dos parâmetros que compõem esses modelos, bem como sua calibração para a obtenção de uma equação mais confiável.

4.3 Análise do modelo desenvolvido

Conforme mencionado no capítulo 3 o modelo desenvolvido foi baseado no modelo de Plitt, onde foi proposto o cálculo dos parâmetros m e d_{50} através de correlações. Foram obtidos dois tipos de correlações envolvendo variáveis da alimentação tais como: vazão, distribuição granulométrica, concentração e razão de líquido.

4.3.1 Correlação envolvendo a concentração.

Partindo do princípio que os parâmetros físicos e operacionais tais como: a vazão de alimentação, a concentração de sólidos na alimentação e a distribuição granulométrica das partículas na alimentação, apresentam influência significativa no desempenho do hidrociclone e sabendo que na planta industrial se tem à facilidade de medição e controle desses parâmetros foi desenvolvida uma correlação para a obtenção de m e d_{50} envolvendo essas variáveis, conforme Equação 87 e 88. Os valores das constantes presentes nas equações 87 e 88 estão dispostos na Tabela 07.

$$m = m_0 + m_1.Q_f + m_2.d_{mp} + m_3.C_f \quad (87)$$

$$d_{50} = d_0 + d_1.Q_f + d_2.d_{mp} + d_3.C_f \quad (88)$$

Tabela 7 - Constantes m e d das Equações 87 e 88.

Constantes	Valor
m ₀	-1,25544
m ₁	0,00832
m ₂	0,00226
m ₃	0,00442
d ₀	170,00452
d ₁	-6,37692
d ₂	5,5037
d ₃	-0,2915

As figuras 32 a 37 mostram o comportamento da eficiência granulométrica prevista com o auxílio das correlações e a eficiência granulométrica experimental. Observa-se através das Figuras 32 a 37 que a correlação para m e d₅₀ auxilia satisfatoriamente estimativa da eficiência granulométrica para as variáveis na faixa estudada. Os pontos apresentam desvios em torno de 0,26 e 32 %.. Verifica-se que os ensaios C, D, E e F apresentam melhor concordância da correlação proposta com os dados experimentais.

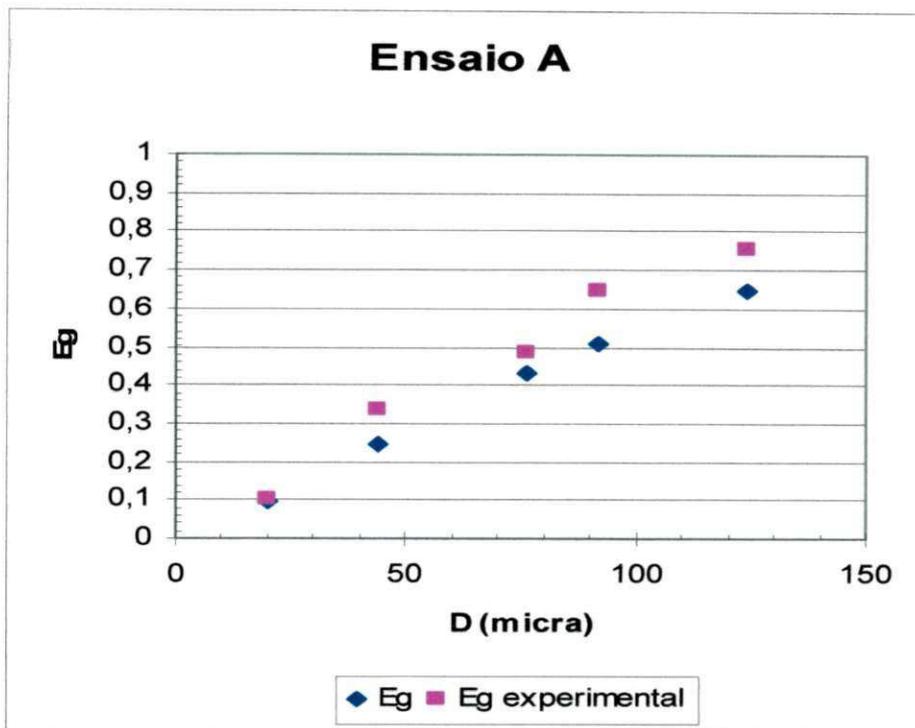


Figura 32 - Gráfico comparativo da eficiência granulométrica experimental e prevista segundo correlações envolvendo a concentração em função do diâmetro para o ensaio A

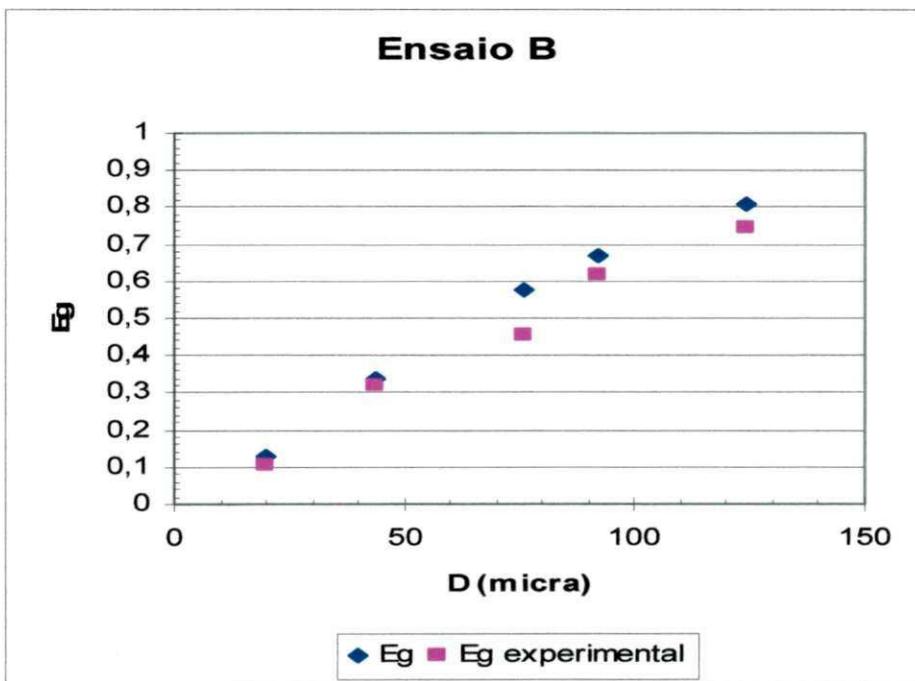


Figura 33 - Gráfico comparativo da eficiência granulométrica experimental e prevista segundo correlações envolvendo a concentração em função do diâmetro para o ensaio B

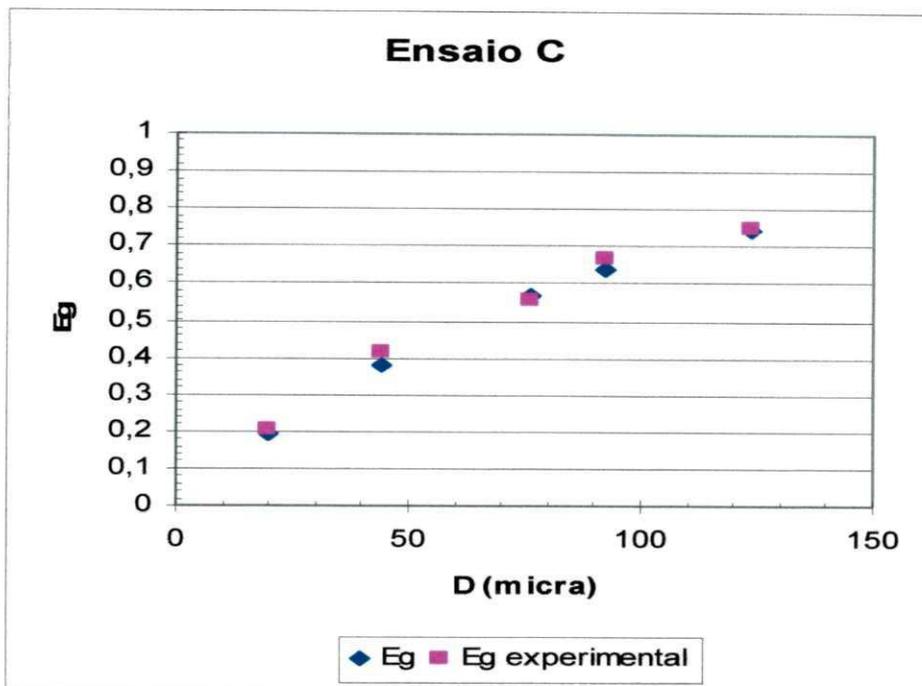


Figura 34 - Gráfico comparativo da eficiência granulométrica experimental e prevista segundo correlações envolvendo a concentração em função do diâmetro para o ensaio C

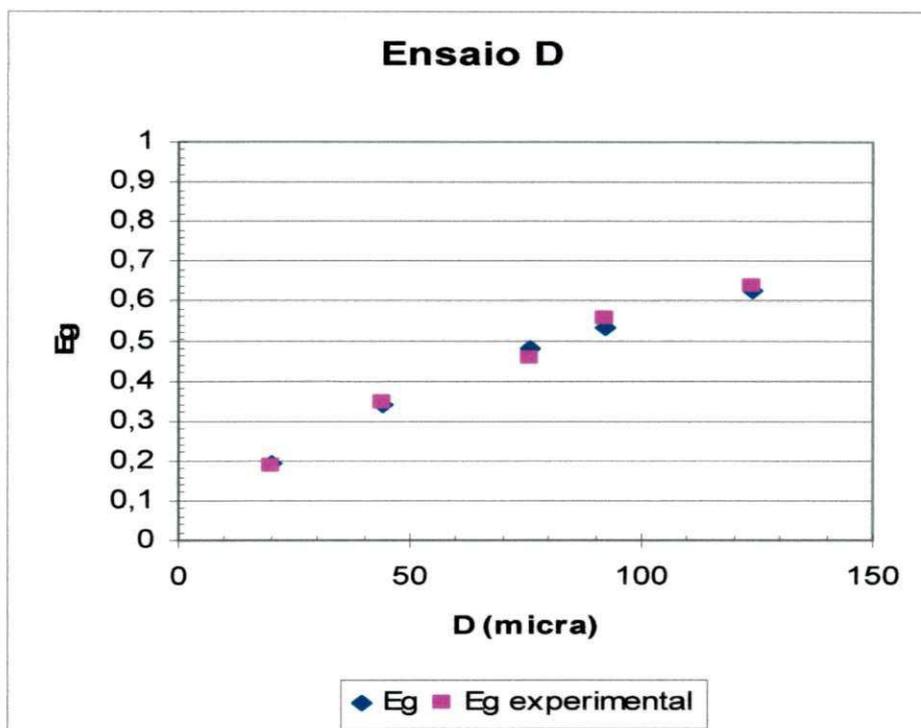


Figura 35 - Gráfico comparativo da eficiência granulométrica experimental e prevista segundo correlações envolvendo a concentração em função do diâmetro para o ensaio D

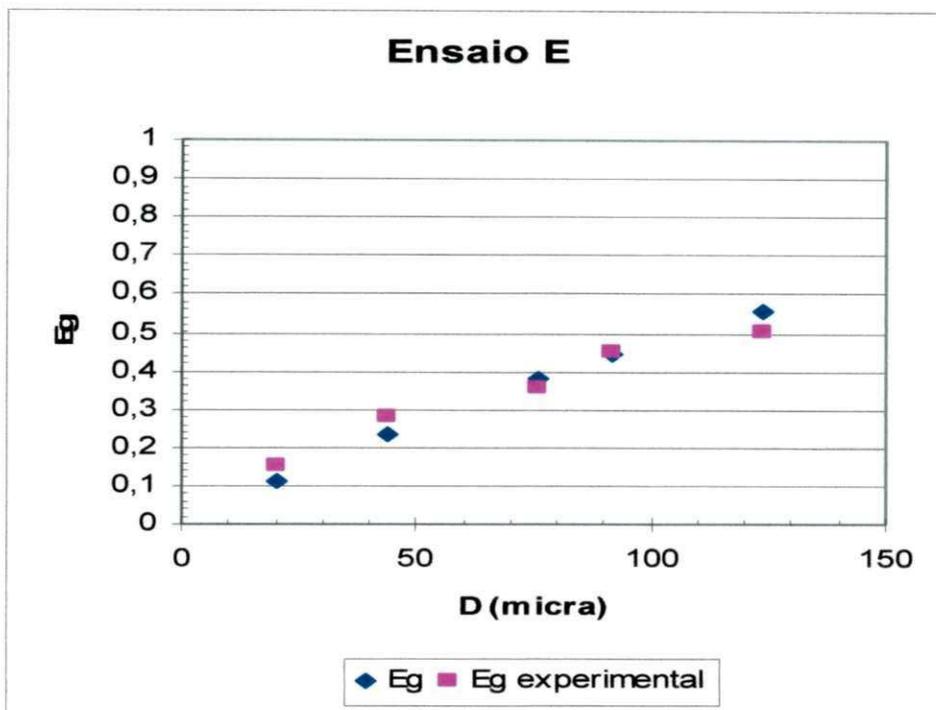


Figura 36 - Gráfico comparativo da eficiência granulométrica experimental e prevista segundo correlações envolvendo a concentração em função do diâmetro para o ensaio E

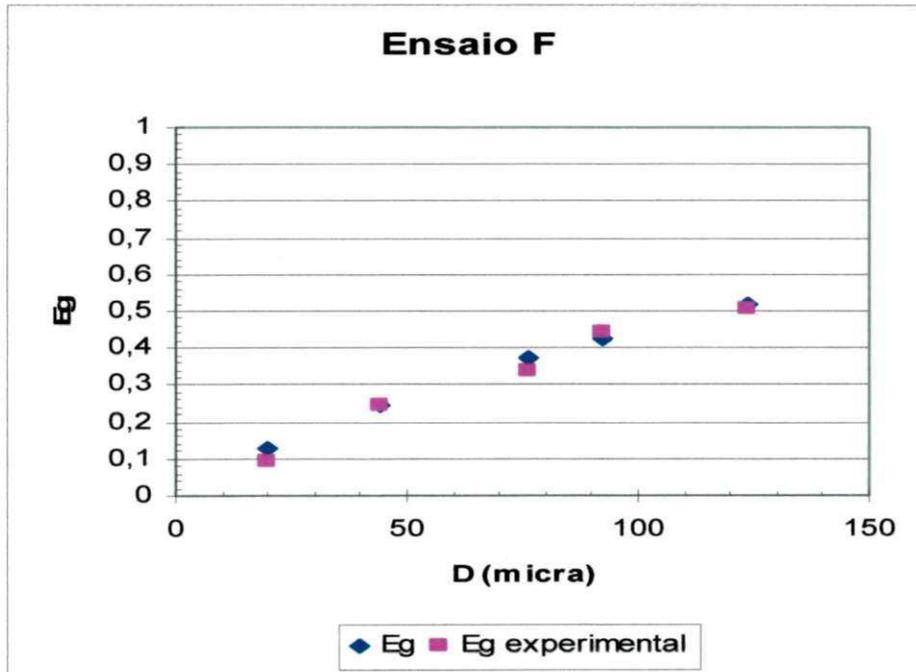


Figura 37 - Gráfico comparativo da eficiência granulométrica experimental e prevista segundo correlações envolvendo a concentração em função do diâmetro para o ensaio F

4.3.2 Correlação envolvendo a razão de líquido

Uma vez desenvolvida uma correlação simples e satisfatória para previsão da eficiência do hidrociclone buscou-se estender o uso das equações obtidas incluindo o efeito da razão de líquido (R_l), pois esta variável relaciona à correção do efeito da divisão de corrente. Para que isto se tornasse possível foi necessário desenvolver outra correlação para a obtenção de uma equação para o cálculo da razão de líquido, uma vez que sabe-se que a mesma é uma função da vazão de alimentação e da vazão do *underflow*.

SOCCOL (2000) afirma em seu trabalho que mesmo que o hidrociclone não esteja separando, devido a força centrífuga, uma certa quantidade de sólidos é removida no concentrado em uma razão igual a razão de líquido, pois o mesmo age como um divisor de escoamento, também conhecido como efeito T.

SCHEID e MASSARANI (2000) afirmam que uma função para a razão de líquido pode ser determinada a partir da variação do diâmetro do *underflow* do hidrociclone para diferentes condições operacionais. Uma vez que isso não foi possível, optou-se pela análise de parâmetros - vazão da alimentação, concentração e diâmetro médio das partículas - para a obtenção de uma equação que representasse de forma satisfatória a razão de líquido. Através da regressão múltipla foi obtida a equação 89, onde representa uma forma de previsão da R_l .

$$R_l = -0,28174 + 0,00697.Q_f - 0,00346.d_{mp} + 0,000659546.C_f \quad (89)$$

De posse da razão de líquido, vazão da alimentação, diâmetro médio de partículas e da concentração na alimentação foi feito uma regressão múltipla para obtenção de duas equações, conforme Equação 90 e 91, que proporcionarão o auxílio nos cálculos das variáveis m e d_{50} , onde facilitará o cálculo da eficiência granulométrica desenvolvida por Plitt .

$$m = 0,63056 - 0,03838.Q_f + 0,0254.d_{mp} + 4,05848.10^{-7}.C_f + 6,69422.R_l \quad (90)$$

$$d_{50} = -57,58519 - 0,74656.Q_f + 2,71082.d_{mp} + 0,2412.C_f - 807,81234.R_l \quad (91)$$

Com a determinação de m e d_{50} foi feito o cálculo da eficiência granulométrica para as condições já mencionadas no capítulo 3. As Figuras 38 a 43 apresentam um comparativo entre a eficiência granulométrica experimental e a prevista. É notório e vale ressaltar que os dados da eficiência granulométrica experimental e a prevista seguem a mesma tendência de comportamento, na maioria dos ensaios também é observada uma diferença mínima entre os pontos. Ainda comparando as tendências de cada ensaio, observa-se que o ensaio A apresenta maiores desvios.

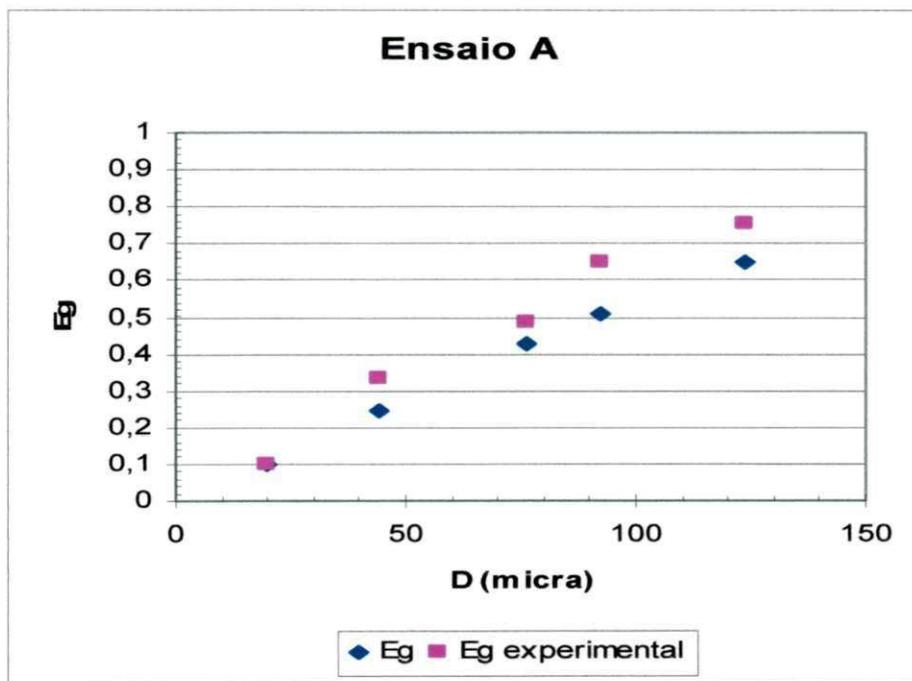


Figura 38 - Eficiência granulométrica experimental e prevista segundo correlações envolvendo a razão de líquido em função do diâmetro para o ensaio A

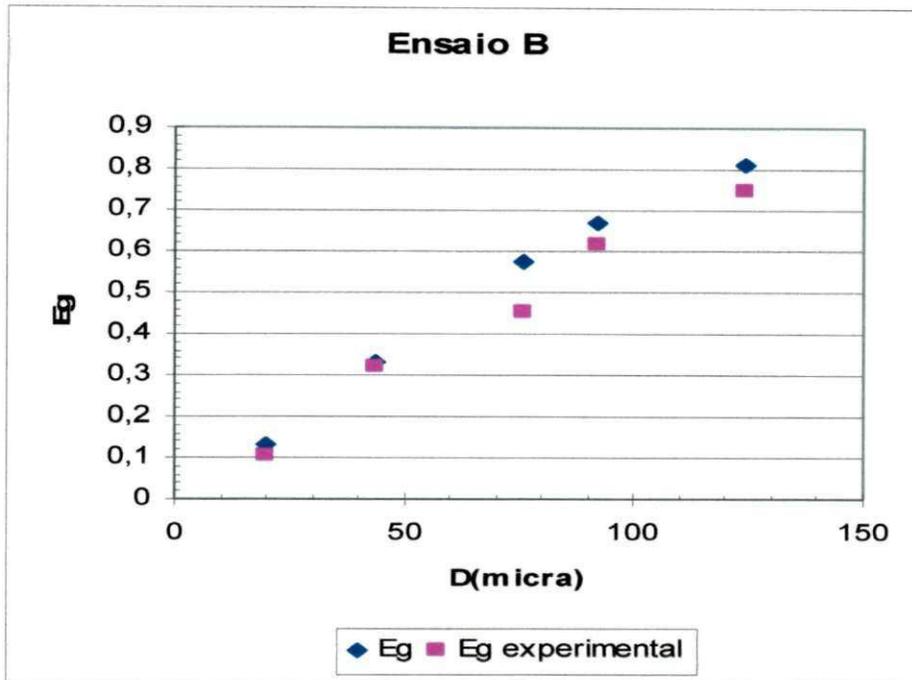


Figura 39 - Eficiência granulométrica experimental e prevista segundo correlações envolvendo a razão de líquido em função do diâmetro para o ensaio B

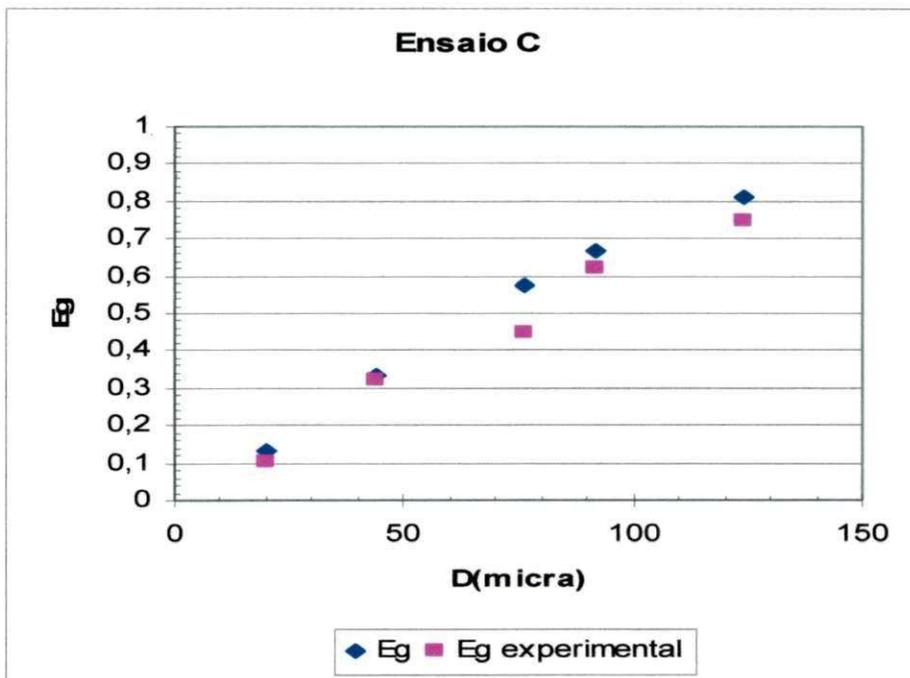


Figura 40 - Eficiência granulométrica experimental e prevista segundo correlações envolvendo a razão de líquido em função do diâmetro para o ensaio C

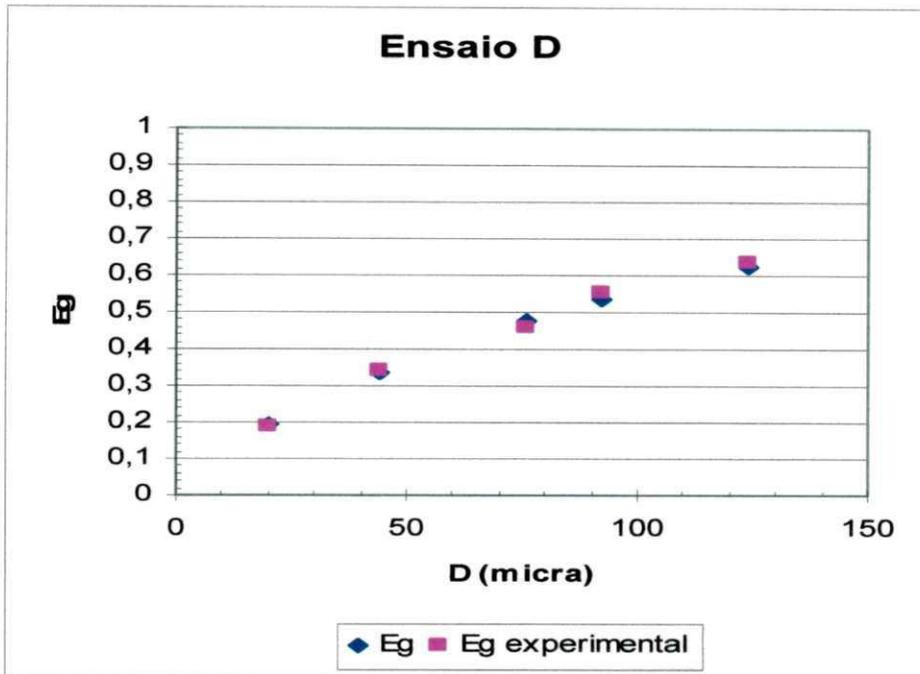


Figura 41 - Eficiência granulométrica experimental e prevista segundo correlações envolvendo a razão de líquido em função do diâmetro para o ensaio D

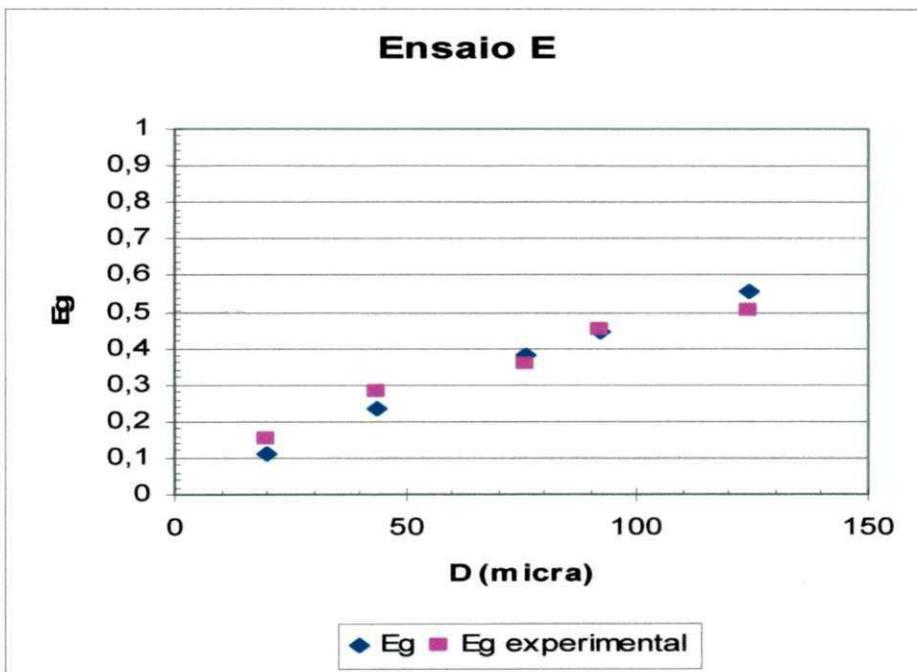


Figura 42 - Eficiência granulométrica experimental e prevista segundo correlações envolvendo a razão de líquido em função do diâmetro para o ensaio E

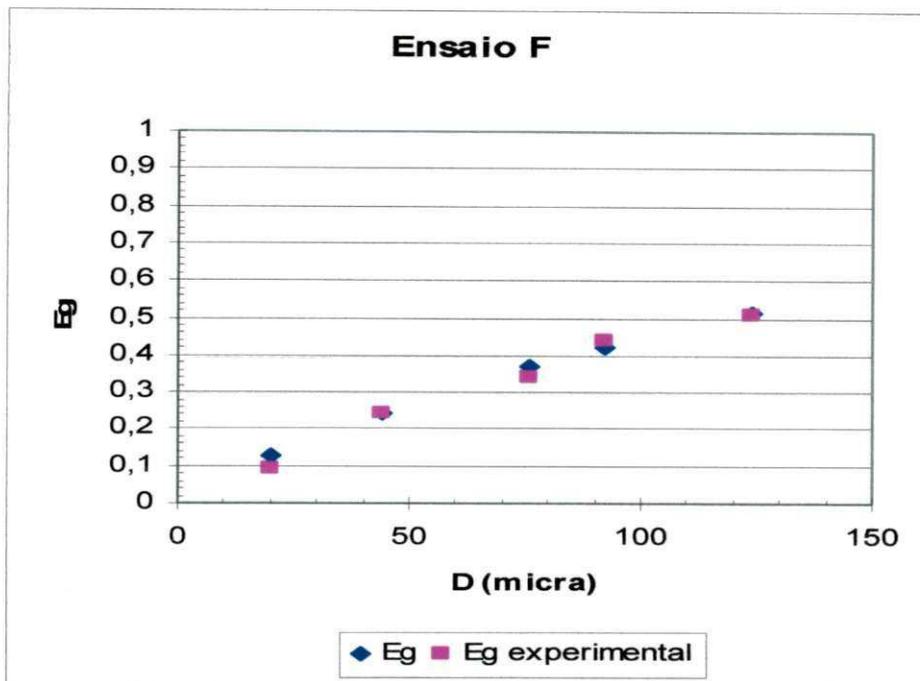


Figura 43 - Eficiência granulométrica experimental e prevista segundo correlações envolvendo a razão de líquido em função do diâmetro para o ensaio F

Uma vez incluso a razão de líquido nas correlações que auxiliam o cálculo da eficiência, foi certificado que houve um bom ajuste dos pontos experimentais à correlação.

Para toda correlação existe um limite de funcionamento coerente com um significado físico bastante consistente. Assim, sabendo que a razão de líquido varia entre zero e 1, que o d_{50} sempre será um número positivo e a eficiência total estará sempre entre 0 e 100% , e que o hidrociclone tem uma capacidade de pressão a ser suportada para que não ocorra nenhum dano ao meio e ao equipamento, mantendo um bom funcionamento, assim pode-se obter os limites da correlação de acordo com as simulações dos dados.

A vazão Q_f deve atingir um valor mínimo de $60 \text{ m}^3/\text{h}$ para que ocorra o processo de separação no hidrociclone com sucesso, onde caracteriza uma pressão de alimentação em torno de 170 KPa. Algumas simulações foram feitas variando a vazão da alimentação com a concentração de entrada e considerando a distribuição granulométrica da alimentação constante. Em seguidas foram feitas simulações variando a concentração da

alimentação com a vazão da alimentação e a distribuição granulométrica da alimentação constante. Considerando concentrações constantes quanto maior a vazão maior será a eficiência total e a razão de líquido. Da mesma forma para vazão de entrada constante quanto maior a concentração da alimentação maior será a eficiência total. A vazão da alimentação, Q_f , e a concentração da alimentação, C_f , apresentam resultados com consistência física para:

$$Q_f - 60 \leq Q_f \leq 70 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$C_f - 300 \leq C_f \leq 500 \text{ g/l}$$

As tabelas 08 e 09 apresentam alguns resultados obtidos a partir de simulações feita na planilha desenvolvida no *Microsoft Excel*. Segundo os resultados obtidos na Tabela 08 para concentrações de entrada em torno de 300 g/l e vazões acima de 82 m³/h não se tem um valor, observa-se uma obtenção de d_{50} menor que 0, segundo a correlação, o que fisicamente representa uma inconsistência, já que diâmetro de partícula não pode ser expresso por um número negativo. Vazões acima de 70 m³/h implica em diâmetros de corte (d_{50}) pequenos, caracterizando um maior aparecimento de partículas finas no *underflow* e R_l superior a 0,15. No caso em que ocorre concentração da alimentação em torno de 550 g/l e vazão superior a 71 m³/h, conforme observado na Tabela 09, ocorre limitação da correlação caracterizada pelo aparecimento de um valor negativo para o diâmetro de corte.

Tabela 8 - Dados das simulações mantendo a concentração da alimentação em 300 g/l e variando a vazão da alimentação

Q_f (m ³ /h)	C_f (g/l)	R_l	d_{50} (μm)	X_u previsto em 44 μm (%)	E_t (%)
60	300	0,053	146,30	97,5	34,7
70	300	0,123	82,53	97,6	47,5
80	300	0,193	18,76	96,5	87,8
82	300	0,207	6,008	94,7	97,9
83	300	0,214	-0,36	-	-

Tabela 9 - Dados das simulações mantendo a concentração da alimentação em 550 g/l e variando a vazão da alimentação

Q_f (m ³ /h)	C_f (g/l)	R_l	d_{50} (μ m)	X_u previsto em 44 μ m (%)	E_t (%)
60	550	0,218	73,40	99,3	54,0
70	550	0,28	9,63	94,4	98,5
71	550	0,295	3,258	94,0	98,9
72	550	0,302	-3,11	-	-
80	550	0,35	-54,13	-	-

4.3.3 Eficiência total a partir das correlações.

Sabendo que as correlações propostas auxiliam de forma satisfatória no cálculo da eficiência granulométrica e que a partir desse cálculo pode-se obter a eficiência total do hidrociclone, não se mediu esforços e foi calculado a eficiência total para os ensaios de A a F. O cálculo do desempenho global se deu através da Equação 25. A Tabela 10 e a Figura 44 explicitam os resultados obtidos do cálculo da eficiência total. Observa-se que as eficiências previstas pelas correlações são bem semelhantes. Ocorreu uma maior discrepância no ensaio A, onde o desvio foi em torno de 18%. Já para os demais ensaios foi feita a previsão da eficiência total com bastante consistência, chegando a desvios entre 0,5 e 6%.

Tabela 10 - Eficiência total experimental e prevista através das correlações

Ensaio	Experimental	Correlação C_f	Correlação R_l
A	54,47	44,62	44,56
B	51,27	57,54	57,41
C	56,09	54,46	54,35
D	43,7	43,26	43,23
E	38,63	38,86	38,83
F	37,12	37,58	37,58

Os ensaios D, E e F foram os que apresentaram maior precisão na previsão da eficiência global, onde se observa com bastante clareza na Figura 44.

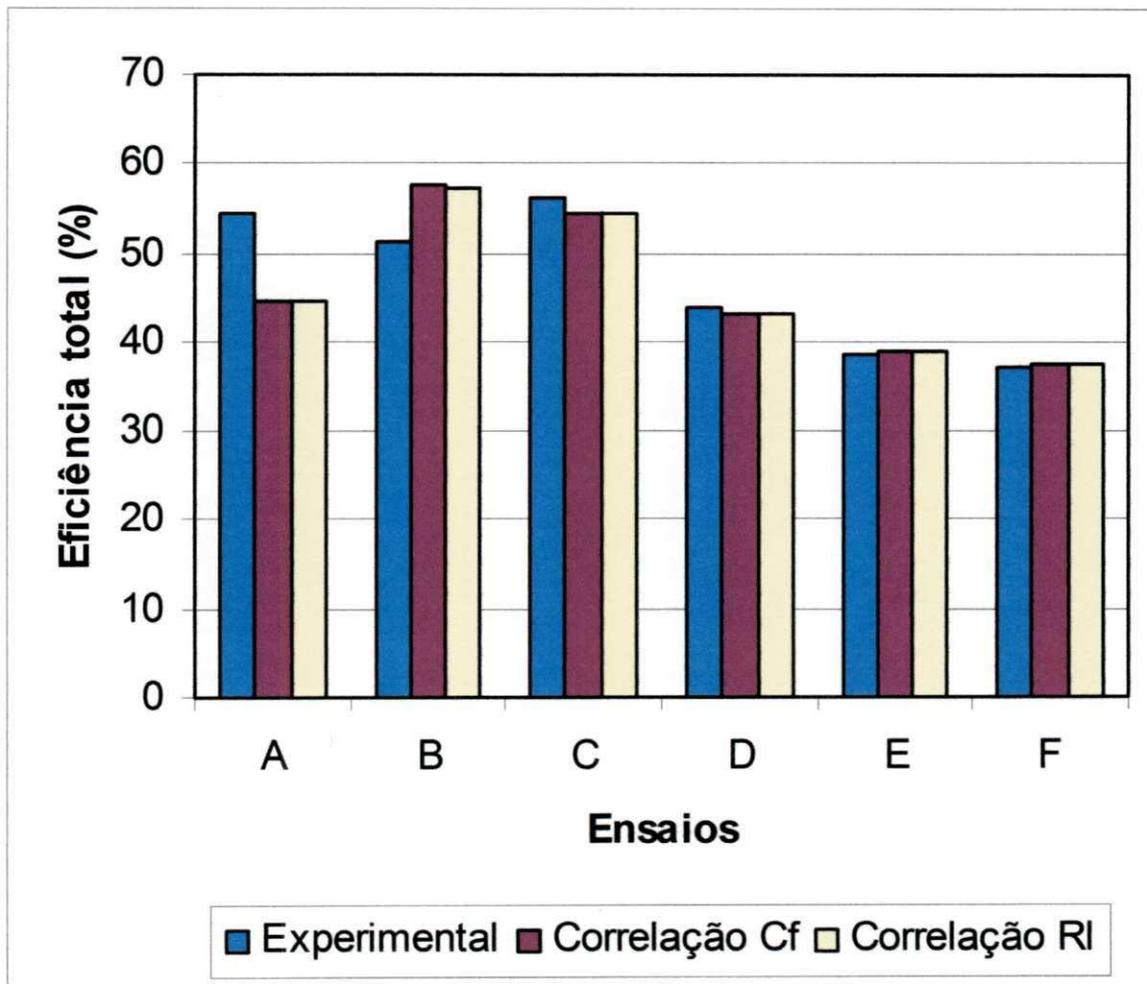


Figura 44 - Comparativo da eficiência total dos ensaios realizados experimentalmente e prevista segundo correlações

4.4 Previsão da distribuição do *underflow*.

A possibilidade da previsão da distribuição granulométrica do *underflow* a partir da distribuição da alimentação proporciona mais uma forma de controle do processo de separação possibilitando o alcance da condição alvo desejada. Para a previsão da distribuição do *underflow* foi necessária a utilização da distribuição granulométrica da alimentação, os canais dos diâmetros de partícula (que variaram: 20, 44, 76, 92 e 124 μm), a eficiência granulométrica e a eficiência total. Uma vez com esses dados em mãos, foi utilizada como base a Equação 92 para o cálculo dos pontos da curva de *underflow*.

$$E_G = E_T \cdot \frac{dX_u}{dX_f}$$

Rearranjando temos:

$$dX_u = \frac{E_G}{E_T} dX_f \quad (92)$$

No cálculo diferencial a definição de derivada é dada por:

$$\left. \frac{df(x)}{dx} \right|_{x_0} = f'(x_0) = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} \quad (93)$$

Foi utilizado esse método de primeira ordem para discretizar a equação de determinação dos pontos da curva de *underflow*, onde utiliza-se informações anteriores para o cálculo da aproximação. Sabendo que para partículas menores que 20 μm o percentual de *underflow* tende para zero e que para partículas muito grossas o percentual de *underflow* tende para 1, pode-se utilizar a diferença centrada nos pontos próximos a esses extremos. No ponto $D_i=20$ foi utilizado a diferença finita centrada, onde possibilitou uma melhor aproximação desse ponto tendo em vista que havia o conhecimento das condições de contorno do problema.

Ao analisar as Figuras 45 a 50, nota-se que a discretização estimou aproximações dos pontos de *underflow* de forma bastante satisfatória. No anexo B observa-se os valores pontos estimados pela discretização.

No anexo C observa-se um esboço da planilha desenvolvida no *Microsoft Excel*, onde apresenta todas as entradas e saídas de dados bem como o gráfico da previsão da distribuição do *underflow*.

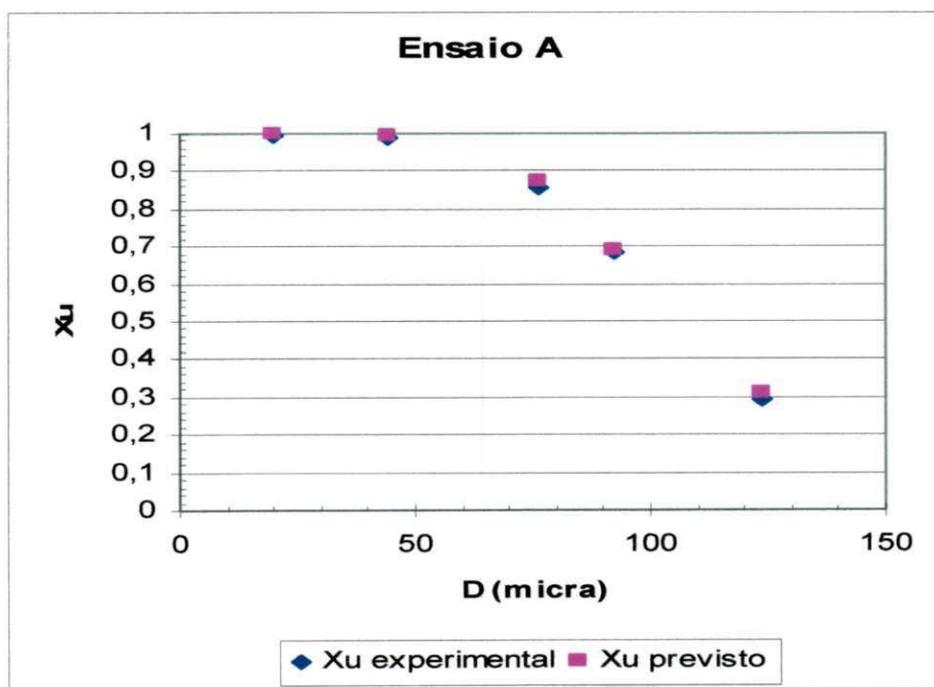


Figura 45 - Fração de *underflow* para o ensaio A em função do diâmetro de partícula

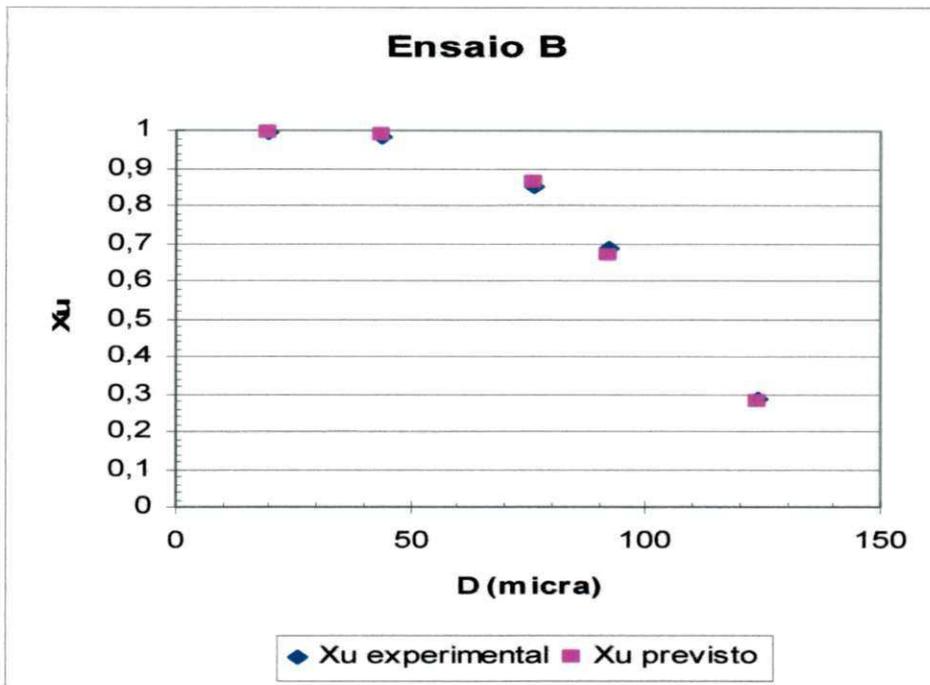


Figura 46 - Fração de underflow para o ensaio B em função do diâmetro de partícula

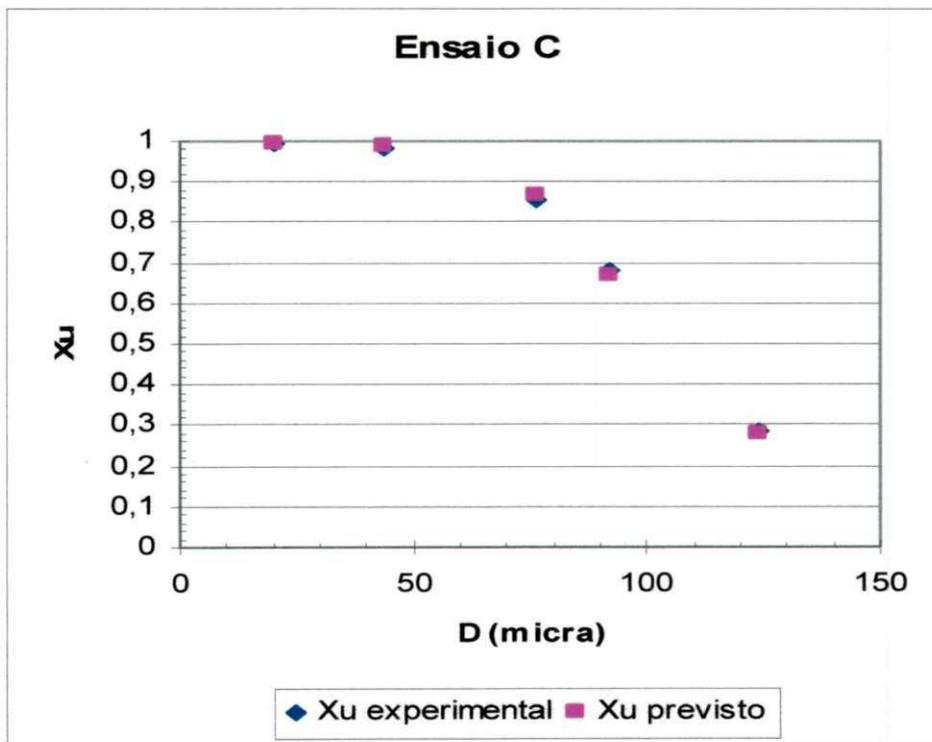


Figura 47 - Fração de underflow para o ensaio C em função do diâmetro de partícula

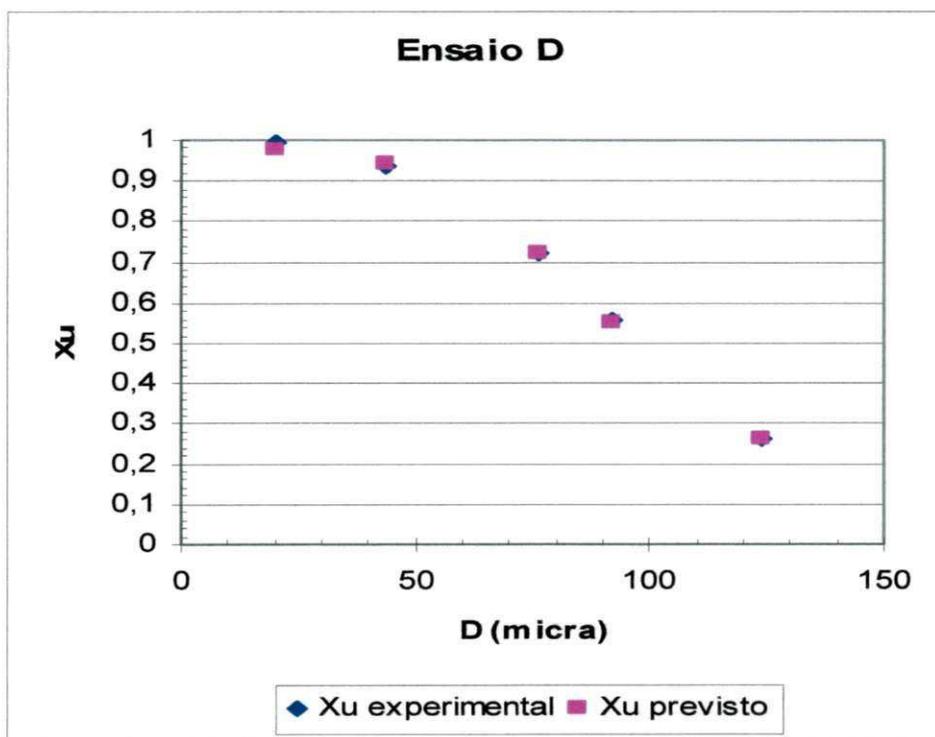


Figura 48 - Fração de underflow para o ensaio D em função do diâmetro de partícula

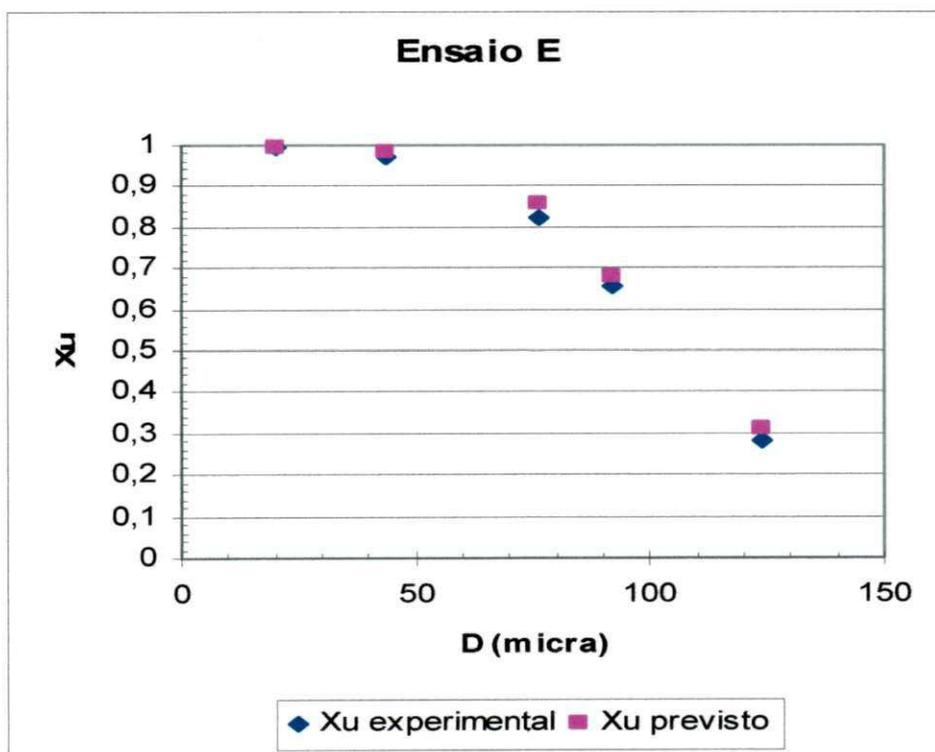


Figura 49 - Fração de underflow para o ensaio E em função do diâmetro de partícula

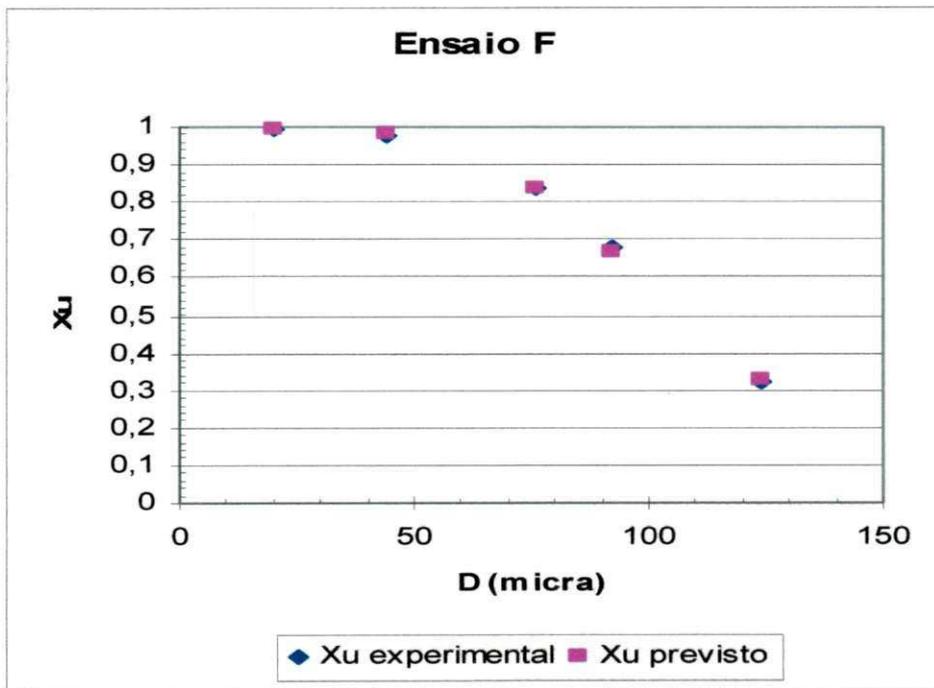


Figura 50 - Fração de underflow para o ensaio F em função do diâmetro de partícula

CAPÍTULO V

5 CONCLUSÕES

Tendo como base os resultados obtidos na faixa operacional deste trabalho e para as configurações de hidrociclones propostas, é possível concluir que, a faixa de distribuição granulométrica para o *underflow* variou entre 91 a 98%, onde foi considerado dentro das especificações pretendidas para o início do estudo.

No caso da eficiência granulométrica observou-se que para partículas de 124 μm o ensaio A possui maior desempenho, chegando a 75,5%. Para partículas de 44 μm o maior desempenho se deu para o ensaio G.

A curva de eficiência granulométrica para os hidrociclones I, II e III apresentou um comportamento semelhante, onde à medida que o diâmetro de partícula aumenta foi observado um ganho no desempenho.

No caso da eficiência total para hidrociclones de mesma configuração, ensaios de A a F, o ensaio C mostrou maior eficiência. Analisando as três configurações de hidrociclones observou-se que o hidrociclone II apresentou melhor separação, uma eficiência de 61%.

A comparação entre os resultados experimentais e os obtidos pelos modelos indicam erros aceitáveis. O modelo sugerido por PLITT (1976) foi o que obteve melhor ajuste. O modelo de SANTANA (2001) subestimou a eficiência para o ensaio G, gerando um desvio médio superior a 200%. O modelo de LEITH e LICHT (1972) teve uma melhor adequação ao ensaio C.

As correlações para o cálculo de m , d_{50} e R_1 obtidas através de regressão múltipla auxiliam de forma satisfatória no cálculo da eficiência granulométrica e total. Comparando com os dados experimentais as correlações apresentaram desvios entre 0,5% e 6 % na estimativa na eficiência total.

O cálculo feito através da aplicação da definição de derivada para estimar os pontos da curva de *underflow* foram de excelente precisão, onde pode ser utilizada de forma confiável para a previsão do *underflow* do hidrociclone.

ANEXO A

ANEXO A

Resultados da análise granulométrica do hidrato na alimentação, concentrado e diluído para o hidrociclone I, II e III.

Hidrociclone I

Teste	A			B			C		
	X(%)	X _U (%)	X _O (%)	X(%)	X _U (%)	X _O (%)	X(%)	X _U (%)	X _O (%)
124	21,2	29,2	13,3	19,8	28,4	12,5	20,3	26,8	11,4
92	54,5	68,6	40,5	53,4	68,3	41,1	49,1	60,9	33,8
76	73,9	85,8	60,9	72,9	85,2	62,5	67,2	78,6	52,3
44	95,1	98,7	90,1	94,5	98,5	91,1	91,9	96,7	85,8
20	98,9	99,4	98,4	99	99,4	98,5	98,8	99,2	98,3
12	99,9	100	99,5	99,7	100	99,5	99,5	99,7	99,4

Hidrociclone I

Teste	D			E			F		
	X(%)	X _U (%)	X _O (%)	X(%)	X _U (%)	X _O (%)	X(%)	X _U (%)	X _O (%)
124	17,9	26,7	7,4	21,9	25,7	9,1	23,6	32,1	13,6
92	41,1	56,7	23	53,9	61,4	31,9	54	68	37,8
76	56,2	72,6	37,1	71,9	79,6	52	71,2	83,6	55,9
44	84,1	93,8	72,9	93	97	85,8	93	97,8	86,3
20	98,3	99,2	96,3	98,9	99,2	97,7	98,9	99,3	98,3
12	99,3	99,7	98,9	99,6	99,8	99,3	99,5	99,9	99,4

Hidrociclone II e III.

Teste	G			H		
	X(%)	X _U (%)	X _O (%)	X(%)	X _U (%)	X _O (%)
124	34,8	40,1	26,9	27,7	39,3	19,8
92	72,7	79,9	63,3	54,1	69,7	45,0
76	86,7	91,7	79,2	67,1	80,9	59,5
44	95,6	97,9	92,0	82,9	91,5	79,5
20	97,6	99,0	95,8	95,8	98,0	95,8

ANEXO B

ANEXO B

Pontos da curva de *underflow* estimados pela aproximação numérica.

Diâmetro (micra)	Xu Ensaio A	Xu Ensaio B	Xu Ensaio C	Xu Ensaio D	Xu Ensaio E	Xu Ensaio F
124	0,3082	0,2786	0,2777	0,2628	0,3125	0,3247
92	0,6894	0,6695	0,6142	0,5542	0,6788	0,6683
76	0,8759	0,8641	0,8022	0,7235	0,8555	0,8382
44	0,9917	0,9898	0,9753	0,9394	0,9834	0,9801
20	0,9973	0,9962	0,9902	0,9743	0,9935	0,9923

Valores dos parâmetros m e D_{50} para equação de PLITT (1976)

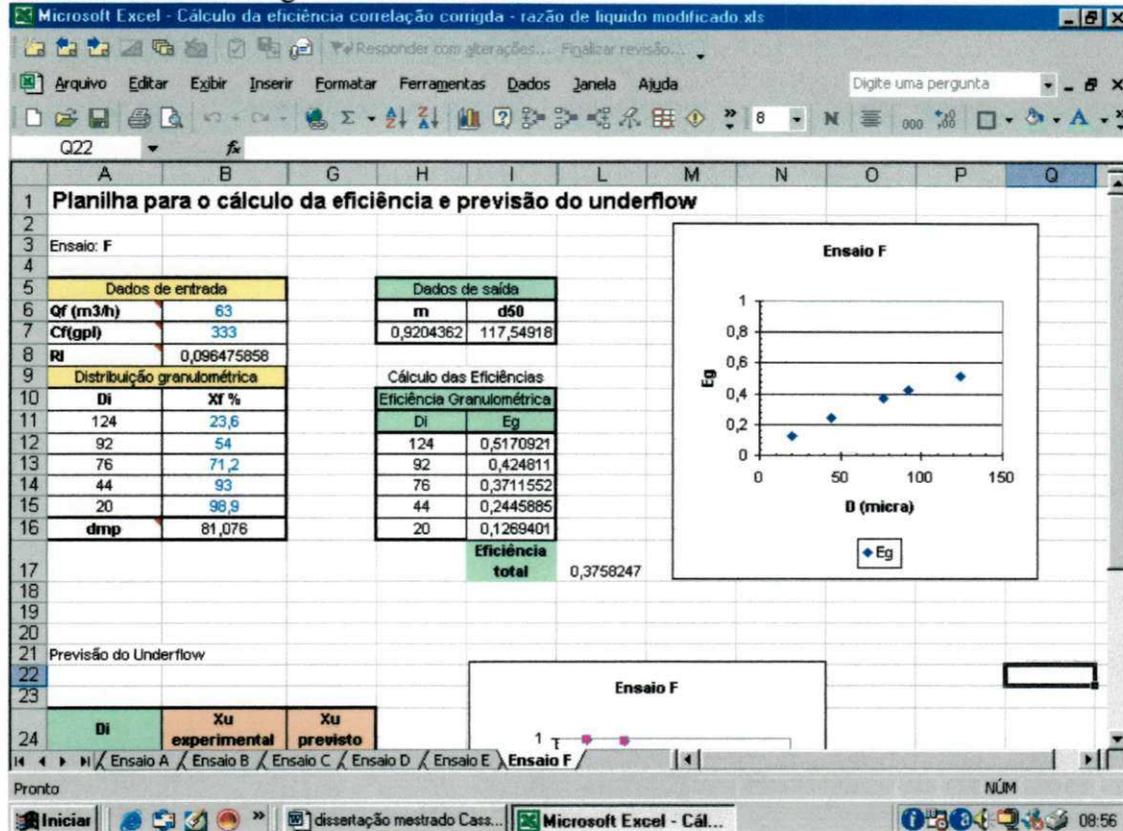
ENSAIO	m	D_{50}
A	1,4014	72,286
B	1,3537	75,272
C	0,9799	60,548
D	0,8621	80,712
E	0,7920	120,606
F	1,0726	115,051
G	0,6930	57,193
H	0,7762	74,688

ANEXO C

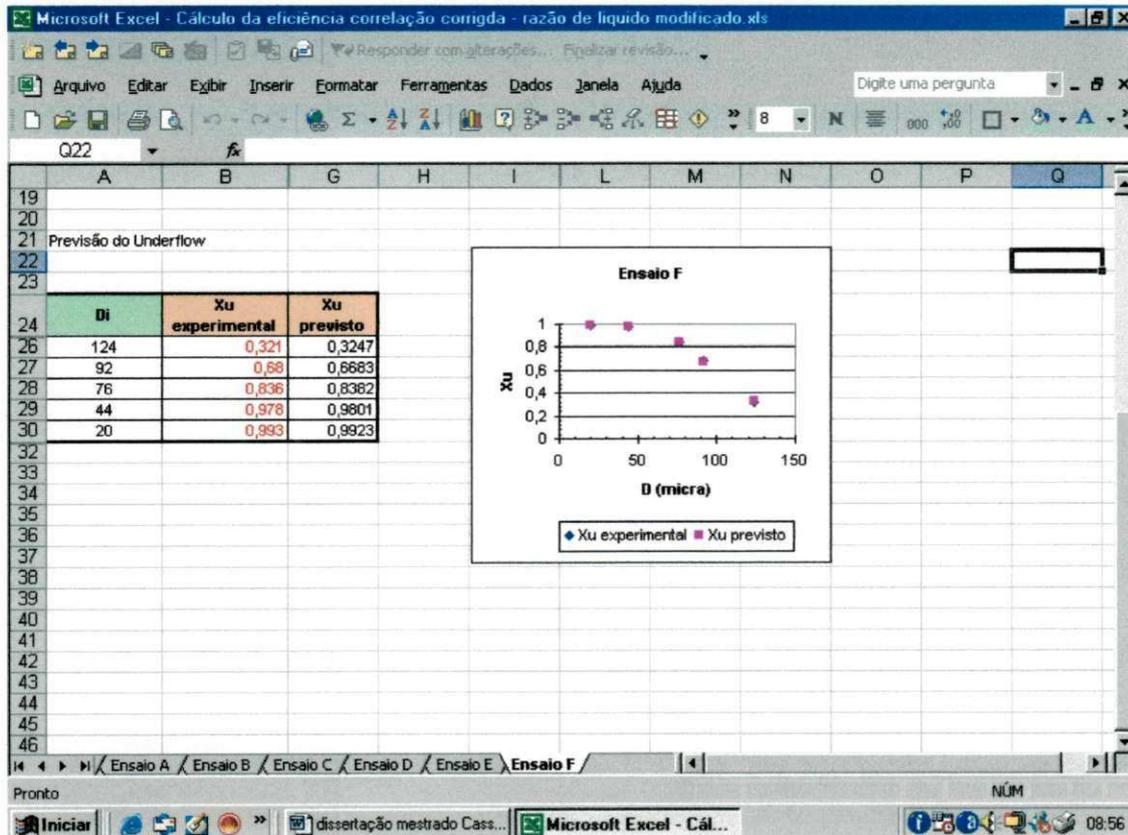
ANEXO C

Planilhas desenvolvidas no *Microsoft Excel*.

Cálculo da eficiência granulométrica e total.



Previsão distribuição granulométrica do *underflow* a partir da distribuição granulométrica da alimentação.



REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALCOA. O Alumínio – História do alumínio. Alcoa do Brasil. Disponível em URL: < http://www.alcoa.com/brazil/pt/info_page/about_history_alum.asp> . Acesso em 20 de outubro de 2004.

AMBERGER KAOLINWERKE GMBH . **Hidrociclones no tratamento de matéria prima e processamento químico**. p. 19, jan. 1979.

ANDRADE, Humberto Oliveira. **Processo de Produção na Refinaria da Alumar**. 2002, 72 f. Relatório Departamento Técnico Refinaria, ALUMAR, São Luís, 2000.

ANTUNES, M.; MEDRONHO, R. A. **Bradley hidrociclones: design and performance analysis**. *IN*: International Conference on hidrociclones, 4., Southampton, 1992. *Hydrocyclones: analysis and applications*. Dordrecht: Kluwer Academic, 1992. p.3-13.

ARTEBURN, R. A. **The Sizing of Hydrocyclones**. Krebs Engineers, Menlo Park, CA, 1976.

BELTRÃO, Francisco. **Instalação, operação e manutenção**. Krebs Engineers LTDA São Paulo, 2004. Disponível em: fbeltrao@krebs.com . Acessado em: 05 de maio de 2005.

BERALDO, José Luiz. **Moagem de minérios em moinhos tubulares**. São Paulo: Pró-Minério/Edgard Blucher, 1987.

BRADLEY, D. **The hydrocyclone**. Londres: Pergamon Press, 1965. 330p.

BRENNAN, M. S., SUBRAMANIAN, V., RONG, R. X., LYMAN, G. J., HOTMAHAM, P. N., NAPIER-MUNN, T. J., 2003. **A new understanding of the cyclone separator**. *IN*: XXII International Mineral Processing Congress, Cape Town, oct.

CARRISSO, R. C., CORREIA, J. G. C. **Classificação**. *IN*: LUZ, A. B. et al (ed.). Tratamento de minérios (3ª ed). Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2002.

CASTRO, O. **Pulp rheology effects for hydrocyclone models**, m. Sc. Thesis, University of Queensland (JKMRC), Brisbane, Australia. 1990.

CASTILHO, Leda dos Reis; MEDRONHO, Ricardo de Andrade. A simple procedure for design and performance prediction of Bradley and Rietma hydrocyclones. **Minerals Engineering**, v.13, n.2, p. 183 – 191, 2000.

CHAKRABORTI, N. , MILLER, J. D., 1992. Fluid flow in hydrocyclones – a critical review. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy**. Review 11, p.211-244.

COELHO, M.A.Z.; MEDRONHO, R. A. **Equações para o projeto e performance de hidrociclones**. *IN*: Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, 22., Florianópolis, 1994. Anais. Florianópolis: UFSC, 1994. p. 273-280.

CONCHA, F., BARRIENTOS, A., MUNOZ, A. L., BUSTAMANTE, O., CASTRO, O., 1996. **A phenomenological model of a hydrocyclone**. In: CLAXTON, D.; SVAROVSKY, L.; THEW, M.T. (Eds.), proceedings – Hydrocyclones'96, Cambridge (Mech. Eng. Pubs, London), p.63-82.

CONSTANTINO, Vera R ; Leopoldo et al . Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático. **Quím. Nova.**, São Paulo, v. 25, n. 3, 2002. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422002000300024&lng=pt&nrm=iso> . Acesso em 22 de Outubro de 2003.

DYAKOWSKI, T., WILLIAMS, R. A., 1997. **Hydrocyclone flow modeling – a continuous research challenge**. In: Williams, R. A. (Ed.), Proceedings of Richard

Mozley Symposium. “ Innovation in Physical Separation Technologies”, Falmuth, June 1997, Memorial volume, (IMM), Ch. 5, p. 61-76.

KELSALL, D. F. A further study of the hydraulic cyclone. **Chemical Engineering Science**, v.2, n.2, p.254-272, 1953.

KLIMA, Mark S.; KIM, Byung H. Dense-medium separation of heavy-metal particles from soil using a wide-angle hydrocyclone. **Journal of Environmental Science and Health**, v.33, p.1325-1340,1998.

LEITH, D. ; LICHT, W. **The Collection Efficiency for Cyclone Type Particle Collectors – A new Theoretical Approach**. *IN*: AIChE Symposium Series, v.68, n.126,p.196-206.

LUZ, José Aurélio Medeiros da. Conversibilidade entre distribuições probabilísticas usadas em modelos de hidrociclones. **Rem: Rev. Esc. Minas.**, Ouro Preto, v. 58, n. 1, 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672005000100015&lng=en&nrm=iso> . Acessado em 27 de outubro de 2005.

LYNCH, A.J.; RAO, T.C. Studies in the operating characteristics of hydrocyclones classifiers. **Indian journal of Technology**. V.6, p. 106-114, April 1968.

LYNCH, A.J.; RAO, T.C. **Modelling and scale-up of hydrocyclone classifiers** . *IN*: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 11., Cagliari, 1975. Proceedings, Cagliari: Universita di Cagliari, 1975. p.245-269.

LYNCH, A.J. **Mineral crushing and grinding circuits – their simulation, optimization, design and control**. Elsevier, 1977.

LYNCH, A.J., MORRELL, S., 1992. **The understanding of comminution and classification and its practical application in plant design and optimization.** *IN:* Kawatra, (Ed.), *Comminution: Theory and Practice.* AIME, p. 405-426.

MACINTYRE, A.J. **Ventilação Industrial e controle da poluição.** Rio de Janeiro, 1990 p.306-316.

MARTI, S. **Analysis of gas carry-under in gas-liquid cylindrical cyclones.** *IN:* CLAXTON, D.; SVAROVSKY, L.; THEW, M.T. (Ed). *Hydrocyclones.* London: London & Bury Saint Edmunds, 1996. p.399-421.

MASSARINI, Giulio. **Fluidodinâmica em sistemas particulados.** Editora UFRJ, Rio de Janeiro, 1997.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Normas Reguladoras de Mineração – NRM Beneficiamento. Portaria nº 12, de 22 de Janeiro de 2002. Disponível em: <http://www.dnpm-pe.gov.br/Legisla/nrm_18.htm>. Acesso em 04 de Janeiro de 2006.

NAGESWARARAO, K. Normalisation of the efficiency curves of hydrocyclones classifiers. **Minerals Engineering** 12 (1), p.107-118, 1999a.

NAGESWARARAO, K. Reduced efficiency curves industrial hydrocyclones – an analysis for plant practice. **Minerals Engineering** 12(5), p.517-544, 1999b.

NAGESWARARAO, K.; WISEMAN, D. M.; NAPIER-MUNN, T. J. Two empirical hydrocyclone models revisited. **Minerals Engineering.** v.17, p.671-687, 2004.

NAPIER-MUNN, T. J., MORRELL, S., MORRISON, R. D., KOJOVIC, T. **Mineral Comminution Circuits – Their Operations and Optimisation.** JKMRC Monograph Series, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, University of Queensland. p.273-330, 1999.

NARAYANAN, S.S. **Development of laboratory single particle breakage technique and its application to ball mill modeling and scale-up.** Ph.D. thesis, University of Queensland (JKMRC), Brisbane, Australia, 1985.

PEÇANHA, R P.; MASSARANI, G. **Avaliação do desempenho de hidrociclones.** *Revista Brasileira de Tecnologia*, v.11, n.4, p.289-299,1980.

PERRY, R. H.; CHILTON, C. H. **Manual de Engenharia Química**, (5ª Ed.) Rio de Janeiro, p.20.79-20.83, 1986.

PIMENTEL, Marcos Eduardo Costa. Normas da ABNT: Estrutura de Apresentação do Trabalho. In: PCD Pesquisa, 2001. Disponível em: <<http://www.pcdpesquisa.com.br>>. Acesso em 04 de Junho de 2002.

PINHEIRO, Ricardo. **Hidrociclones.** *IV: Apresentação de seminário Departamento Técnico Refinaria ALUMAR.* São Luís. p. 01-36, 2000.

PLITT, L.R. **The analysis of solid-solid separations in classifiers.** *CI Bulletin* 64 (708), p.42-47., 1971.

PLITT, L.R. **A mathematical model of the hydrocyclone classifiers.** *Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum Bulletin*, v. 69, p.114-123, 1976.

RAJAMANI, R. K., Milin, L., 1992. **Fluid-flow model of the hydrocyclone for concentrated slurry classification.** *IN SVAROVSKY, L., THEW, M.T. (Eds.), Hydrocyclones-Analysis and Applications (Kluwer), p. 95-108 (proceedings of 4th International Conference on Hydrocyclones, Southampton, September 1992, BHR Group).*

RIETMA, K. Performance and Design of hydrocyclones I: general considerations. *Chemical Engineering Science*, v.15, n.3/4, p. 298-302,1961a.

RIETMA, K. Performance and design of hydrocyclones III: separating power of the hydrocyclone. **Chemical Engineering Science**, v.15, n.3/4, p. 310-319, 1961c.

RIETMA, K. Performance and design of hydrocyclones IV: design of hydrocyclone. **Chemical Engineering Science**, v.15, n.3/4, p. 320-325, 1961d.

RODRIGUES, Débora. Pedrosa. **Estudo do Processo Bayer**. 2003, 25 f. Relatório Departamento Técnico Refinaria, Alumar, São Luís, 2003.

SALCUDEAN, M.; GARTSHORE, I.; STATIE, E. C. Test hydrocyclones before they are built: Modeling and simulating hydrocyclone behavior can significantly lessen uncertainties. **Chemical Engineering**. p. 66-71, 2003.

SANTANA, J. D. A. M., ARNOSTI JR., S.; COURY, J. R. **Influência de características geométricas no desempenho de ciclones**. Anais do XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química. 2001.

SANTANA, F. S. **Balço de massa e balanço de finos da precipitação da Alumar**. Relatório Departamento Técnico Refinaria. Alumar. São Luís. 2002.

SCHEID, C. L., MASSARANI, G. **Separação sólido-fluid não-newtoniano em hidroccilones**. Rio de Janeiro, 2000. 29p. Série Tecnologia Mineral,76.

SILVA, Mônica Antunes Pereira da. **Hidroccilones de Bradley: dimensionamento e análise de desempenho**. Rio de Janeiro, 1989. 81p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Coordenação de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1989.

SLACK, M. D., PRASSAD, R. O., BAKKER, A., BOYSAN, F., 2000. Advances in cyclone modeling using unstructured grids. **Transactions of Institution of Chemical Engineers**. V-78, p.1098-1104.

SMYTH, I.C.; THEW, M. T. **A study of the effect of dissolved gas on the operation of liquid-liquid hydrocyclones.** *IN*: CLAXTON, D.; SVAROVSKY, L.; THEW, M. T. (Ed.). *Hydrocyclones*. London: London & Bury Saint Edmunds, 1996. p.357-368.

SOCCOL, Olívio José. **Construção e avaliação de hidrocilone para pré-filtragem da água de irrigação.** Piracicaba, 2003. 89p. Tese (doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ/USP, São Paulo, 2003.

SOUZA, F. J. et al. Analysis of the influence of the filtering medium on the behaviour of the filtering hydrocyclones. *Powder Technology*, v.117, n.3, p. 259-267, 2000.

STEINOUR, H.H. The rate of sedimentation. *Industrial and Engineering Chemistry* v.36, p.618-624, 1944.

STUBBS, M. **Aluminium and alumina**, *IN*: A. Wright (Ed.), *Australian Commodities*, Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics, Canberra, Australia, v. 4 n.1, p.47, 1997.

SVAROVSKY, Ladislav. **Hydrocyclones**. London: Technomic, 1984.

SVAROVSKY, Ladislav. **Solid-liquid separation**. 3.ed. London: Butterworths, 1990.

TABACHNICK, B. G. , FIDELL, L. S. **Using Multivariate Statistics**. HarperCollins Publishers Inc., New York, New York. Cap 5 e 8. 2001.

TRAWINSKI, H. F. **Hydrocyclones**. *In*: PURCHAS, D.B. *Solid-Liquid Separation Equipment Scale-up*. Croydon: Upland Press, 1977. cap7, p.241-287.

TRAWINSKI, H.F. **Practical aspects of the desing and industrial applications of the hydrocyclones: part I**. *Filtration and Separation*, v.6, p.371-367, 1969.

VALENTE, M. ; PAI NETO, E. D. ; CARDOSO, V. L. ; DAMASCENO, J. J. R. .
Avaliação do desempenho de hidrociclones de fundo chato. *IN:* VI Jornada de Engenharia Química UFU/UFMG, 1999, Uberlândia. Anais da VI JORNEQ. Uberlândia : Universidade Federal de Uberlândia, 1999. v. 1. p. 116-119.

WERTHER, Joachim. Guidance to the experiment Hydrocyclone : Pratical exercise in particle technology. Technical University Hamburg-Harburg Chemical Engineering I. Germany, 1984. Mimeografado.

YOSHIOKA, N.; HOTTA, Y. Liquid cyclone as a hydraulic classifier. **Chemical Engineering** . Japan, v.19, p.632-641,1955.