

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

Área de concentração: Projeto do Produto Mecânico

**ESTUDO E AVALIAÇÃO DE UM
SEPARADOR DE AGREGADOS MINERAIS
POR HIDROCICLONAGEM**

NAELCIO GOMES DE CARVALHO

**Campina Grande - Paraíba
Maio de 1996**

NAELCIO GOMES DE CARVALHO

**ESTUDO E AVALIAÇÃO DE UM
SEPARADOR DE AGREGADOS MINERAIS
POR HIDROCIKLONAGEM**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre.

Campina Grande
Universidade Federal da Paraíba
1996



C331e Carvalho, Naelcio Gomes de
Estudo e avaliacao de um separador de agregados minerais
por hidrociclizacao / Naelcio Gomes de Carvalho. - Campina
Grande, 1996.
Paginacao irregular. : il.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Mecanica) -
Universidade Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e
Tecnologia.


1. Agregados Minerais - 2. Hidrociclizacao de Agregados
Minerais - 3. Dissertacao I. Oliveira, Natanael Victor, Dr.
II. Universidade Federal da Paraiba - Campina Grande (PB)
III. Titulo

CDU 666.96.022.32-032(043)

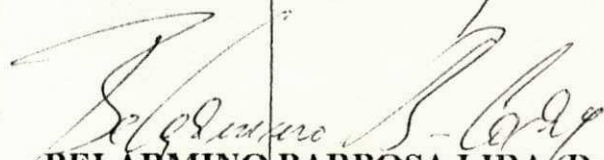
**ESTUDO E AVALIAÇÃO DE UM SEPARADOR DE AGREGADOS
MINERAIS POR HIDROCICLONAGEM**

NAELCIO GOMES DE CARVALHO

**DISSERTAÇÃO APROVADA COM DISTINÇÃO EM 21 DE MAIO DE
1996**



**NATANAEL VICTOR DE OLIVEIRA (Dr.)
ORIENTADOR**



**BELARMINO BARBOSA LIRA (Dr.)
MEMBRO**



**LUIZ RENATO DE ARAÚJO PONTES (Dr.)
MEMBRO**



JULIO GOLDFARB (TIT.M.Sc.)

**CAMPINA GRANDE - PB
MAIO DE 1996**

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, pela minha formação, aos meus irmãos pelo incentivo e ajuda, a minha esposa Karina e meu filho Ádrian, e a todos os amigos que de forma direta ou indireta contribuíram para que este trabalho pudesse ser concluído; minha gratidão.

AGRADECIMENTOS

Ao criador e a criação, por nos dá os percalços da vida espiritual e material para nosso desenvolvimento intelectual e moral.

A Universidade Federal da Paraíba, ao Departamento de Engenharia Mecânica e ao Departamento de Mineração e Geologia, pelo apoio recebido.

Ao Professor Dr. Natanael Victor de Oliveira, Coordenador do curso de pós-graduação e Orientador na área de Projetos Mecânicos do (DEM)..

Ao Professor Dr. Belarmino Barbosa Lira, Orientador na área de Processamento Mineral do (DMG).

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa e auxílio.

Aos colegas de curso (CPGEM) e funcionários, pela solidariedade, pelas críticas necessárias, presteza, incentivos e amizade durante a realização deste trabalho.

Em especial aos Professores, Técnicos e Funcionários dos Departamentos de: Departamento de Engenharia Mecânica, Departamento de Mineração e Geologia e Departamento de Agrícola, pelo espírito de cooperação, e ensinamentos básicos, no decorrer deste trabalho, na condução do experimento laboratorial e montagem.

Ao amigo Roberto do (DEM), pela digitação e impressão dos exemplares deste trabalho; aos técnicos do (DEAg): Wilson e Nelson pela confecção do rotor

, Enfim, a todos que de forma direta ou indireta não mediram esforços para que este trabalho atingisse seu objetivo.

RESUMO

Apresenta-se neste trabalho uma metodologia para separação de agregados mine-rais por hidrociclonagem. As equações utilizadas foram de Lynch e Rao, para os cálculos das constantes e testes envolvidos no processo de separação hidromecânica. As variáveis de controle utilizadas foram: porcentagem de sólidos na polpa (água/areia), geometria do equipamento, pressão e vazão. No procedimento experimental tais parâmetros foram monitorados e adequados às características técnicas e construtivas do protótipo proposto (ciclone), para obtenção de uma areia artificial classificada e sem impurezas. O material utilizado no experimento foi o pó granítico, que passou por uma classificação granulométrica, balanço de massas para os fluxos de "feed pipe", "overflow" e "underflow", otimizando-se as curvas de partição (D_{50}). Neste contexto obteve-se um produto final com o objetivo de garantir uma (areia artificial) de boa qualidade, que poderá substituir com vantagens a areia natural em diversos segmentos de nosso parque tecnológico.

ABSTRACT

It appears that research in classification fine size particles using hydrocyclones is the accepted method used in the mineral processing industry. This work used this technique to classify fine particle products from the crush plant in the civil engineering, as well as the method to construct a hydrocyclone using (steel plate) in the installation. The ore used is granite (feldspar, mica and silica, among others).

The parameters of the hydrocyclone model developed by Lynch and Rao were defined using. The variables used to adjust operating conditions during these laboratory tests were: percent solids in the pipe (water / sand), design (geometry of the cyclone), pressure and outlet (water).

As a result, the classification proposed in this work is to obtain a powder granite (artificial sand) to be used in various segments of our technological park.

SIMBOLOGIA UTILIZADA

<i>A</i>	Aceleração ($m.s^{-2}$)
\hat{A}	Ângulo
<i>A'</i>	Área (m^2)
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Acum.	Acumulado
Alim	Alimentação (g)
AMT	Altura Manométrica Total (m)
APLSd	Altura de Perda de Líquido de Sucção Disponível (m)
APLS	Altura de Perda de Líquido de Sucção (m)
atm	Pressão atmosférica
BR	Brasil
<i>C</i>	Coefficiente de polidez
<i>c</i>	Parâmetro de ajuste de eficiência - Lynch-Rao
<i>C</i>	Partição da água
C.E.	Comprimento equivalente (m)
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CB	Comitê Brasileiro
CCT	Centro de Ciências e Tecnologia
CEMI	Curso de Especialização de Manutenção Industrial
Cm	Centímetro
CMT	Custo mínimo total
CONT.	Contato
CPGEM	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
CV	Cavalo vapor
<i>D</i>	Diâmetro (m)
<i>D</i>	Diâmetro nominal (mm)
<i>d</i>	Parâmetro de ajuste de eficiência - Lynch-Rao
<i>d</i>	Raio da esfera (mm)

$D_{(S,R)}$	Vazão aparente dos diâmetros de sucção e/ou recalque ($m^3 \cdot h^{-1}$)
D_0	Diâmetro interno do vortex (mm)
D_{50}	Diâmetro de corte em 50% do material
D_{50c}	Diâmetro mediano de corte de partição corrigido em 50% do material
D_{95}	Diâmetro de corte em 95% do material
D_C	Diâmetro interno do ciclone (mm)
DEAg	Departamento de Engenharia Agrícola
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
DI	Diâmetro do "inlet" da Equação de ajuste de Lynch-Rao (mm)
DL	Comprimento do cilindro da Equação de ajuste de Lynch-Rao (mm)
DMG	Departamento de Mineração e Geologia
D_n	Diâmetro nominal da tubulação (m)
D_{OF}	Diâmetro do vortex quando overflow
D_R	Diâmetro de linha de recalque (m)
Dr.	Doutor
D_S	Diâmetro de linha de sucção (m)
DS	Diâmetro do spigot da Equação de ajuste de Lynch-Rao (mm)
D_{UF}	Diâmetro do spigot quando underflow
DV	Diâmetro do vortex da Equação de ajuste de Lynch-Rao (mm)
DVF	Diâmetro do vortex finder (mm)
e	Exponencial
E	Rugosidade absoluta
E/D	Rugosidade relativa
EB	Especificação Brasileira
f	Coefficiente de fricção ($m \cdot 100m^{-1}$)
F^*	Parâmetro de ajuste
f^*	Perda de carga - Hazen-Willians ($m \cdot m^{-1}$)
f'	Coefficiente de atrito para perda de carga contínua
f_1	Coefficiente de atrito
F_c	Força centrífuga
F_d	Força de arrasto
FL	Parâmetro de ajuste
FPS	Percentual de sólido em peso na alimentação

FPW	Percentual de água em peso na alimentação.
g	Aceleração da gravidade ($9,81\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
g	Gramas
g^*	Percentual passante de uma distribuição granulométrica
G.P.M.	Galão por minuto ($1\text{GPM} = 0,227\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)
g'	Curva padrão de partição corrigida
H	Altura (m)
h	Hora (s)
h'	Rendimento estipulado
H_b	Altura estática da bomba (m)
H_c	Diferença de cota entre o nível de descarga e abastecimento (m)
h_d	Perda de carga ao longo da linha ($\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$)
H_f	Perda de carga contínua ao longo da tubulação ($\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$)
H_{fL}	Perda de carga localizada para alargamento brusco ($\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$)
h_g	Altura geométrica (m)
HP	House Power
$h_{p(S,R)}$	Altura de perda de sucção e/ou recalque (m)
h_{PR}	Altura de perda de recalque (m)
h_{PS}	Altura de perda de sucção (m)
H_r	Altura estática de recalque (m)
h_r	Perda de carga no recalque (m)
H_s	Altura estática de sucção (m)
h_s	Perda de carga na sucção ($\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$)
H_t	Altura total (m.c.p.)
h_v	Perda de volume ($\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$)
I	Diâmetro do inlet da Equação de Lynch-Rao
IL	Inlet - Entrada
J	Perda de carga unitária ($\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$)
K	Coefficiente característico para acessórios de tubulações
k	Constante ou coeficiente tabelado
K	Constante tabelada (instalação)
K	Constante
K	Curtose

k_l	Coefficiente variável (Bresse)
K_Q	Constante da Equação de ajuste de Lynch-Rao
K_d	Constante da Equação de ajuste - Lynch-Rao ($K_d^* \cdot (K_Q)^{0,44} \cdot g^{0,22}$)
Kg	Quilograma
Kgf	Quilograma força
Km	Quilômetro
K_v	Constante da Equação de ajuste - Lynch-Rao ($K_v^* \cdot (K_Q)^{0,62} \cdot g^{0,31}$)
K_w	Constante da Equação de ajuste - Lynch-Rao ($K_w^* \cdot (K_Q)^{1,06} \cdot g^{0,55}$)
L	Comprimento (m)
L	Comprimento do corpo cilindro vertical (mm)
L_t	Comprimento total de tubulação (m)
l	Litro
LEID	Laboratório de Engenharia, Irrigação e Drenagem
Liq.	Líquido
\bar{M}	Média
M. Liq.	Massa líquida
LMG	Laboratório de Mineração e Geologia
Log.	Logarítmico
L_R	Linha de recalque (m)
L_S	Linha de sucção (m)
LTF	Laboratório de Térmica e Fluidos
m	Metro
m.c.a.	Metro de coluna de água
m.c.p.	Metro de coluna de polpa
MCE	Método de custo equivalente
MG	Média gráfica
mm	Milímetro
n	Abcissa
n'	Ordenada
NBR'	Norma Brasileira
n_s	Velocidade de rotação do Motor-bomba (RPM)
OF	Overflow - Fluxo de material fino
P	Perda ($m \cdot m^{-1}$)

p	Pressão (Kgf.cm ⁻²)
P	Pressão de alimentação da Equação de Lynch-Rao (Kpa)
P_1	Variável de ajuste
Part.	Partição
P_C	Partição corrigida (m.m ⁻¹)
P_c	Potência consumida (CV)
PF	Peneira de fundo (mesh)
Pol.	Polegadas
Prof.	Professor
Psi	Unidade de medida de pressão
PVC	Policloreto de vinila
q	Vazão para as Equações de ajuste de Lynch-Rao (m ³ .h ⁻¹)
Q	Vazão (m ³ .s ⁻¹)
Q	Vazão aparente de polpa (l/min);
Q_u	Fluxo volumétrico do produto do underflow (m ³ .s ⁻¹)
R	Raio (mm)
r	Raio pequeno (mm)
R.A.	Retido acumulado
Re	Número de Reynolds
Ret.	Retido
R_f	Partição de água (m.m ⁻¹)
RPM	Rotação por minuto
R_s	Rotação da bomba centrífuga (RPM)
S	Diâmetro do spigot da Equação de Lynch-Rao (mm)
s	Segundo
SK	Grau de assimetria
Sol.	Sólido
Spigot	Diâmetro de saída do material grosso (cm)
t	Função de tempo (dt)
T	Temperatura (°C)
t	Tempo
T Máx.	Tamanho máxima
T .Mín.	Tamanho mínimo

TAB.	Tabela
UF	Underflow - Fluxo do material grosso
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
V	Diâmetro do vortex da Equação de Lynch-Rao (mm)
<i>V</i>	Velocidade
<i>v</i>	Viscosidade cinemática (m ² .s ⁻¹)
V	Volts
V _(S,R)	Velocidade de sucção e/ou recalque (m.s ⁻¹)
V ₁	Primeiro volume parcial do reservatório (m ³)
V ₂	Segundo volume parcial do reservatório (m ³)
V _c	Velocidade: terminal, crítica ou máxima de separação (m.s ⁻¹)
V _e	Velocidade de escoamento (m.s ⁻¹)
VEL.	Velocidade
VF	Diâmetro do vortex finder (mm);
V _m	Velocidade média de escoamento (m.s ⁻¹)
Vol.	Volume
V _R	Velocidade de recalque (m.s ⁻¹)
V _S	Velocidade de sucção (m.s ⁻¹)
V _t	Valor crítico
VT	Volume total (m)
W	Constante
WF	Vazão de água na alimentação (m.s ⁻¹)
WOF	Vazão de água no overflow (m.s ⁻¹)
x	Constante para curva padrão de partição
X	Uma malha qualquer (mesh)
y	Peso específico da água (Kgf.m ⁻³)
#	Mesh - Malha granulométrica
%	Porcentagem
π	Constante - 3,14
∂	Densidade da alimentação (g.cm ⁻³)
γ	Densidade do sólido (Kgf.m ⁻¹)
σ	Desvio padrão
∅	Diâmetro

ϕ	Diâmetro probabilístico das partículas
μ	Micron
β	Parâmetro de ajuste - Lynch-Rao
δ	Viscosidade do fluido
α	Volume da fração de sólidos na alimentação (m^3)
γ'	Densidade do líquido ($Kgf.m^{-3}$)
α'	Variável descritiva da forma da curva de partição
ΔH	Perda de carga do sistema ($m.m^{-1}$)
ϕ_r	Diâmetro da linha de recalque no circuito (m)
ϕ_{RT}	Diâmetro do rotor (mm)
ϕ_s	Diâmetro da linha de sucção no circuito (m)
ϕ_{ST}	Diâmetro do spigot (mm)
ϕ_{VF}	Diâmetro do vortex finder (mm)
\leq	Menor e/ou igual
\geq	Maior e/ou igual
$^{\circ}C$	Graus centígrados

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - Desenho ilustrativo de dois grupos de partículas em meio fluido.....	1-2
FIGURA 1.2 - Diagrama de distribuição em função de dois tamanhos de partículas em forma de curvas acumulativas.....	1-3
FIGURA 1.3 - Circuito convencional de britagem para produção de areia granítica ..	1-8
FIGURA 2.1 - Corte e configuração esquemática de um ciclone típico.....	2-4
FIGURA 2.2 - Fluxo interno no hidrociclone.....	2-15
FIGURA 2.3 - Formas e configurações geométricas de ciclones.....	2-17
FIGURA 2.4 - Distribuição do material no hidrociclone (Renner e Cohen, 1978)	2-20
FIGURA 2.5 - Trajetória das partículas no interior do ciclone a - Componentes: tangencial, vertical e radial b - Componentes: descendentes e ascendentes.....	2-28
FIGURA 2.6 - Forças atuantes no Hidrociclone (Lilge, 1963).....	2-29
FIGURA 2.7 - Detalhamento do movimento circular das forças atuantes.....	2-30
FIGURA 2.8 - Regimes laminar, b-Regime turbulento.....	2-36
FIGURA.2.9 - Comportamento da rugosidade absoluta e relativa da tubulação.....	2-37
FIGURA 2.10- Perda de carga num alargamento brusco de seção localizada.....	2-42
FIGURA 3.1 - Corpo principal do ciclone típico.....	3-49
FIGURA 3.2 - Circuito fechado de hidrociclonagem.....	3-50
FIGURA 3.3 - Corte cotado do reservatório ou caixa de recepção.....	3-50
FIGURA 4.1 - Rotor semi-aberto (confeccionado).....	4-59
FIGURA 5.1 - kit de ciclones “AKW”.....	5-72
FIGURA 6.1 - Circuito do ciclone AKW.....	6-82
FIGURA 6.2 - Circuito do ciclone Típico.....	6-82

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 2.1 - Monograma de Hazen - Williams	2-35
GRÁFICO 2.2 - Rugosidade relativa	2-38
GRÁFICO 2.3 - Ábaco de Moody	2-39
GRÁFICO 2.4 - Cálculo de perdas de carga localizada em função do diâmetro (ABNT).....	2-40
GRÁFICO 2.5 - Cálculo da velocidade crítica pelo parâmetro FL.....	2-42
GRÁFICO 2.6 - Coeficiente de fricção (A. Chaumers).....	2-45
GRÁFICO 2.7 - Correção de perda de carga para polpa (A. Chaumers).....	2-45
GRÁFICO 5.1 - Comportamento gráfico da análise granulométrica do (Ensaio 1) ...	5-66
GRÁFICO 5.2 - Comportamento gráfico da análise granulométrica do (Ensaio 2) ...	5-67
GRÁFICO 5.3 - Comportamento gráfico da análise granulométrica do (Ensaio 3) ...	5-68
GRÁFICO 5.4 - Comportamento gráfico da análise granulométrica do (Ensaio 4) ...	5-69
GRÁFICO 5.5 - Conversão gráfica da probabilidade aritmética (Ensaio 3 e 4).....	5-70
GRÁFICO 5.6 - Comportamento gráfico da análise granulométrica do (Ensaio 5) ...	5-73
GRÁFICO 5.7 - Conversão gráfica da probabilidade aritmética (Ensaio 5)	5-74
GRÁFICO 5.8 - Comportamento gráfico da análise granulométrica do (Ensaio 9) ...	5-77
GRÁFICO 5.9 - Comportamento gráfico da curva de partição (Ensaio 9).....	5-78

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1	Valores do coeficiente de polidez C de tubulações.....	2-34
TABELA 2.2	Rugosidade absoluta.....	2-39
TABELA 2.3	Velocidades econômicas de fluidos para tubulações.....	2-41
TABELA 2.4	Valores do coeficiente de (K)	2-43
TABELA 2.5	Comprimentos equivalentes de acessórios para tubulações.....	2-44
TABELA 2.6	Comprimento equivalente de perda de carga localizada (A. Chaumers).....	2-46
TABELA 3.1	Escala de Mohs (grau de dureza de 1. A 10.).....	3-48
TABELA 3.2	Cálculo dos diâmetros das tubulações de sucção e recalque.....	3-52
TABELA 3.3	Perdas de carga equivalente em função dos diâmetros de recalque e sucção.....	3-53
TABELA 3.4	Peso específico da água em função da temperatura.....	3-54
TABELA 3.5	Pressão de vapor d'água em função da temperatura.....	3-55
TABELA 3.6	Pressão atmosférica em função da altitude.....	3-55
TABELA 5.1	Análise granulométrica preliminar para estudo comportamental (Ensaio 1).....	5-66
TABELA 5.2	Análise granulométrica preliminar para estudo comportamental (Ensaio 2).....	5-67
TABELA 5.3	Análise granulométrica preliminar para estudo comportamental (Ensaio 3).....	5-68
TABELA 5.4	Análise granulométrica preliminar para estudo comportamental (Ensaio 4).....	5-69
TABELA 5.5	Conversão probabilística das partículas (Ensaio 3 e 4).....	5-70

TABELA 5.6	Resultados experimentais dos produtos de overflow e underflow (Ensaio 4).....	5-71
TABELA 5.7	Ciclonagem do material (Ensaio 4)	5-72
TABELA 5.8	Análise granulométrica para estudo comportamental (Ensaio 5).....	5-73
TABELA 5.9	Conversão probabilística das partículas (Ensaio 5).....	5-74
TABELA 5.10	Análise granulométrica para estudo comportamental (Ensaio 6).....	5-75
TABELA 5.11	Análise granulométrica para estudo comportamental (Ensaio 7).....	5-76
TABELA 5.12	Análise granulométrica para estudo comportamental (Ensaio 8).....	5-76
TABELA 5.13	Análise granulométrica para estudo comportamental (Ensaio 9).....	5-77
TABELA 5.14	Parâmetros das equações de (Lynch e Rao)	5-79
TABELA 5.15	Parâmetros das equações de ajustes (Lynch e Rao).....	5-80

ÍNDICE

CAPÍTULO 1	1-1
CONSIDERAÇÕES GERAIS	1-1
1.1. - Introdução	1-1
1.2. - Fundamentos Teóricos	1-2
1.3. - Objetivos Gerais e Específicos	1-3
1.3.1. -Objetivos gerais	1-3
1.3.2. -Objetivo específico	1-4
1.4. - Formação do material (pedologia).....	1-5
1.5. - Análise das alternativas usuais para a produção de areia artificial granítica.....	1-7
1.5.1. - Descrição de alguns equipamentos usuais nos processos para produção e classificação de areia artificial, a partir de circuitos de britagem.....	1-9
1.5.1.1. - Britagem.....	1-9
1.5.1.2. - Moagem.....	1-9
1.5.1.3. - Lavagem e classificação	1-10
CAPÍTULO 2	2-11
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E EXPLANAÇÃO DE ALGUNS ASPECTOS TEÓRICOS E PRÁTICOS	2-11
2.1 - Introdução	2-11
2.2 - Apresentação e concepção do equipamento.....	2-14
2.2.1 - Descrição.....	2-14
2.2.2 - Áreas de aplicações dos hidrociclones.....	2-16
2.2.3 - Princípios teóricos e funcionais	2-19
2.2.4 - Distribuição granulométrica	2-22
2.2.5 - Modelo de Lynch e Rao para hidrociclones.....	2-24
2.2.6 - Curva de partição	2-25
2.2.6.1 - D_{50} corrigido.....	2-26
2.2.6.2 - Relação pressão-vazão	2-26
2.2.6.3 - Partição da água.....	2-27
2.3. - Considerações sobre as variáveis de processo.....	2-31

2.3.1. - Percentagem de sólido na polpa de alimentação	2-31
2.3.2. - Diâmetro do “vortex”	2-31
2.3.3. - Diâmetro do “spigot”	2-31
2.3.4. - Diâmetro do “inlet ”	2-32
2.3.5 - Diâmetro do corpo cilíndrico principal	2-32
2.3.6. - Taxa de alimentação da polpa	2-32
2.3.7. - Densidade dos sólidos.....	2-33
2.3.8. - Densidade do líquido	2-33
2.4. - Formas e fórmulas para o dimensionamento de uma bomba centrífuga.....	2-33
CAPÍTULO 3	3-48
MATERIAIS E MÉTODOS	3-48
3.1. - Material	3-48
3.1.1 - Propriedades físico-químicas do material amostral.....	3-48
3.2 - Método utilizado.....	3-49
3.3. - Especificações técnicas do sistema	3-49
3.3.1. - Detalhamento e corte do ciclone típico.....	3-49
3.3.2.- Características construtivas do circuito	3-50
3.3.3.- Cotas do reservatório (caixa de recepção).....	3-50
3.4. - Considerações gerais para cálculos das tubulações	3-51
3.4.1 - Considerações para os cálculos das tubulações do circuito de linha	3-51
3.4.2. - Cálculos dos diâmetros das tubulações de recalque e sucção	3-52
3.4.3. - Cálculo para altura manométrica total (AMT)	3-53
3.4.4. - Cálculo da potência consumida pelo motor-bomba.....	3-53
3.4.5 - Cálculo da altura positiva do líquido de sucção (APLS)	3-54
3.4.6. - Cálculo da rotação específica da bomba	3-56
CAPÍTULO 4	4-57
DESENVOLVIMENTO E SUGESTÕES.....	4-57
4.1. - Introdução	4-57
4.2. - Análise estrutural	4-57
4.3. - Construção e montagem.....	4-58
4.3.1. - Confeção do rotor.....	4-58
4.3.1.1. - Alterações realizadas no rotor.....	4-59
4.3.2. - Montagem do circuito de hidrociclonagem.....	4-60

4.4. - Otimização do sistema de hidrociclonagem	4-60
4.4.1 -Acionamento do circuito	4-62
4.5. - Componentes e fases.....	4-62
4.6 - Testes de operação	4-64
4.6.1 - Conclusão dos testes de operação	4-64
CAPÍTULO 5	5-65
RESULTADOS E DISCURSÕES	5-65
5.1 - Introdução	5-65
5.2. - Ensaio de laboratório para o kit AKW e o ciclone típico).....	5-66
5.3. - Probabilidade aritmética da granulometria	5-70
5.4. - Conjunto de equações de (Lynch e Rao)	5-78
5.4.1. - Sugestões para ajustes das equações de Lynch e Rao	5-80
CAPÍTULO 6	6-81
CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	6-81
6.1.- Conclusões	6-81
6.2. - Sugestões para trabalhos futuros.....	6-83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	R-84
APÊNDICE A - Conversão de diâmetros de partículas minerais para estudo probabilístico	A-88
APÊNDICE B - Tabela para cálculo de perdas de carga em tubulações	A-90
APÊNDICE C - Especificações técnicas do jogo de ciclone AKW	A-92
APÊNDICE D - Instruções para instalação e manutenção de bombas centrífugas.....	A-94
APÊNDICE E - Tabela de conversão	A-99

CAPÍTULO 1

CONSIDERAÇÕES GERAIS

1.1. - Introdução

Os equipamentos utilizados para o beneficiamento e classificação de agregados minerais, quer seja a seco ou a úmido, são em geral de grandes portes. Dentre estes podemos citar: Britadores Girosféricos, Rebritadores de Hidrofinos, Moinhos de Barras, Calibradores, Tanques Desaguadores, Classificadores Helicoidais. Comumente eles estão sujeitos a problemas operacionais, devido as suas grandes proporções, necessitando ainda de subsistemas para funcionamento. Aliado a estes problemas, segue ainda a questão da necessidade de uma manutenção adequada e contínua e mão de obra especializada, causando assim um elevado custo operacional.

Estes sistemas operam comumente com cargas elevadas, e daí surgem problemas de vibrações, que podem ser atribuídos normalmente aos desbalanceamentos e desalinhamentos. Geralmente apontados nas etapas de transporte, instalação e montagem, entre outras, que quando somados tornam-se fatores expressivos, e conseqüentemente responsáveis por desgastes prematuros, fadiga, ruídos e tensões dinâmicas, causando falhas no sistema, comprometendo a eficiência do circuito e ocasionando quebra na produção.

Em função dos problemas anteriormente citados, optou-se pelo processo de separação por hidrociclonagem, com os cuidados que exigem as operações unitárias em tratamento de minérios, por ser um equipamento simples, não exigindo sub-sistemas complexos.

A partir dos testes realizados, verificou-se uma nova possibilidade de aplicação industrial para o ciclone, ou seja: na separação e classificação do pó-granítico, para obtenção de areia artificial, método esse não encontrado na literatura pertinente.

1.2. - Fundamentos Teóricos

Em geral o processo de separação de agregados minerais ideal, é aquele que explora todas ou a maior parte das propriedades do mineral, embora saiba-se que na prática o que ocorre são imposições de limites naturais e tecnológicos, oriundos das variações das partículas no tocante ao tamanho, forma, densidade, propriedades superficiais, entre outras, podendo ser necessário o uso de métodos combinados e/ou diferentes processos de separações. Assim por exemplo uma só partícula poderá conter mais de uma fase (ou mais de um mineral), fendas, cavidades e água intersticial. Estendendo-se o conceito acima para um determinado conjunto de partículas ou grupos, considerando-se as mesmas características e/ou propriedades, e ainda variabilidade de tamanhos (com densidade diferindo entre si), certamente o que poderá ocorrer é uma separação do agregado mineral incompleta, podendo-se ter na mesma liberação dois ou mais grupos de partículas distintos entre si. Na Figura.1.1, apresenta-se uma configuração esquemática de dois grupos de partículas de agregados minerais.

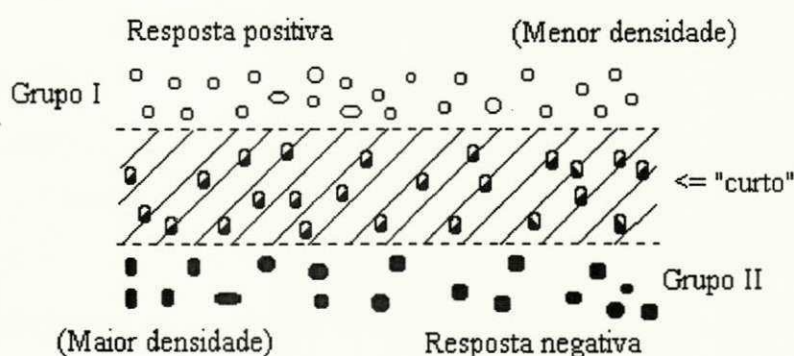


FIGURA 1.1 - Desenho ilustrativo de dois grupos de partículas em meio fluido.

Neste trabalho a alimentação poderá ser considerada como um grupo de partículas sólidas, que subdivide-se em dois outros, pois na distribuição dos tamanhos, as partículas produzidas por um processo de redução qualquer de tamanho, tem como pré-requisito um diâmetro médio em uma quantidade produzida, e sendo assim, as propriedades que poderão ser exploradas, com o propósito de separação, valerão tanto individualmente para cada partícula como para o grupo a que ela pertença, podendo-se obter um “valor crítico” que determine a “resposta” no equipamento escolhido e/ou projetado (hidrociclone).

De acordo com (KELLY, 1982), o grupo de partículas de respostas positivas, observado na Figura 1.1, apresenta normalmente um valor médio das propriedades exploradas. Isto ocorre em função da variação da granulometria, podendo se atribuir para tal fato, as mudanças nas propriedades de cada partícula a partir de um certo tamanho e/ou grupo. Raciocínio análogo para o grupo de respostas negativas.

Apresenta-se na Figura 1.2, um diagrama de distribuição normal, em função do tamanho de dois grupos de partículas, em forma de frequência acumulativa. Para melhor compreensão do comportamento do grupo amostral, em um processo de separação mecânica, mostra-se no ponto de interseção dos grupos I e II, a região de curto circuitoagem, ou seja, onde não ocorre a separação desejada.

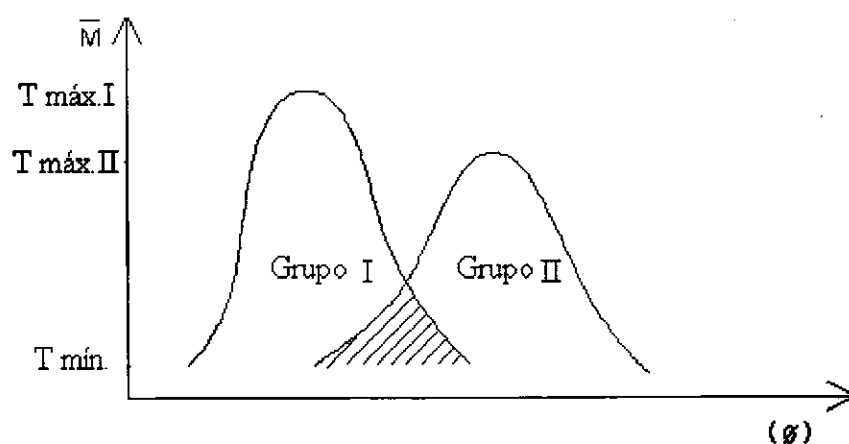


FIGURA 1.2 - Diagrama de distribuição em função de dois tamanhos de partículas em forma de curvas acumulativas.

1.3. - Objetivos Gerais e Específicos

1.3.1. - objetivos gerais

Neste trabalho de pesquisa, hora projetando-se, hora avaliando-se, na busca de explicações plausíveis e resultados comprobatórios, para o método de separação de agregados minerais por hidrociclonação. Nos basearemos na variação da natureza do minério escolhido com suas propriedades específicas. Procurando justificar um modelo matemático sem restrições e limitações de aplicações. Observando-se cuidadosamente o procedimento experimental com o devido controle de suas variáveis, bem como o ajuste

dos parâmetros envolvidos, necessários aos testes laboratoriais. Em linhas gerais, trabalharemos, utilizando o modelo matemático de Lynch e Rao, correlacionando diretamente os parâmetros necessários ao mesmo, tais como: percentual de sólido na alimentação, controle da pressão, definição da geometria do ciclone e controle da vazão. Desta forma, utilizaremos o balanço granulométrico de massa e os cálculos das curvas de “partição”, para se atingir a separação esperada.

Optou-se pelo modelo teórico de A. J. Lynch posteriormente ajustado por T. C. Rao, pelo mesmo considerar detalhadamente que parte da alimentação não sofre separação e também por suas equações poderem ser utilizadas nos cálculos das curvas de partições sem restrições, podendo se chegar a separação mecânica desejada. E ainda por não ter sido experimentado para tal finalidade, ou seja com este tipo de material (pó granítico), tentando-se assim abrir precedente para um nova pesquisa nesta área de estudo.

1.3.2. - objetivo específico

Uma aplicação prática segundo Francis Robert Nugent da REDIMIX-SP.; é a utilização da areia artificial granítica em substituição a areia natural, na fabricação do concreto (de alta qualidade), sendo já algum tempo alvo de estudo comprovado e uma alternativa viável e vantajosa para as indústrias afins, principalmente nos grandes centros urbanos, onde a escassez da areia natural já é notória. Tal uso é uma realidade técnica posta em prática a quase quatro décadas no Brasil; que ainda traz polêmicas por falta de estudos mais aprofundados. Pode-se conferir a aplicação da areia granítica na composição do concreto aqui no Brasil com o (SINDIPEDRAS-SP).

Portanto o estudo proposto neste trabalho, poderá contribuir para apressar a viabilização da substituição generalizada da areia natural pela areia artificial (granítica), dependendo não só do ponto de vista “normativo”, que precisa ser revisto, pois já esta superado neste sentido. Mais também ressaltar a importância dos finos abaixo de 100#(mesh) na composição granulométrica da areia artificial em quantidade superior, se comparado a areia natural; questionando e contestando a especificação (EB-4/CB-2 ABNT-NBR19000), que limita o uso de material pulverulento a uma média de (5 a 7%), quando proveniente de rocha britada.

O conceito formulado segundo (EDWARDS, 1918), sobre a área de superfície do agregado, tem sido usado como maneira de dosar o concreto, tratando os finos entre (100 e 200#). Postula (POWERS, 1965), que ainda há muita dúvida a respeito da área superficial dos grãos pulverulentos, “não se pode dizer que a área superficial específica dos grãos, é avaliada corretamente sob o ponto de vista dos efeitos combinados do tamanho médio da partícula e forma característica da mesma. A dúvida não pode ser esclarecida até que se tenha em mãos uma medida infalível de área superficial.”

Ultimamente tem-se discutido muito a respeito do material que passa na peneira de (200#); em particular pode-se conferir no artigo publicado (Concrete international design and construction - 1981), que diz “...quando usada uma quantidade adequada de aditivos minerais (passante na peneira de 200#) a fim de corrigir deficiências de granulometria, tais aditivos não requer aumento do conteúdo da água, não afetando a retração e a absorção, e ainda, o pó mineral pode diminuir a exudação e segregação, além de aumentar a resistência do concreto, simplesmente pelo preenchimento de finos faltosos no agregado mineral. Entretanto a forma dos grãos e a finura satisfatória são os pré-requisitos indispensáveis”.

Outro ponto importante, diz respeito sob a disponibilidade das reservas naturais que comprometem-se a cada dia, chamando a atenção dos órgãos de proteção ambiental, quanto aos problemas causados pela extração predatória e agressão ao meio ambiente, com conseqüências cada vez mais agravantes, não cabendo agora maior detalhamento deste assunto devido a sua complexidade e dimensão.

1.4. - Formação do material (pedologia)

Do ponto de vista da mecânica dos solos, encontram-se nas “areias” todos os materiais decompostos ou em fase de decomposição, preexistentes na crosta terrestre, que variam em propriedades físicas e químicas, quando aliados aos fatores de formação pedogênica (tipo de rocha-mãe, água, topografia, clima), dão suporte para utilização em obras de engenharia, Indústria química e Metalúrgica.

Pode ser definido como rocha; o agregado mineral compactado e duro que oferece resistência ao corte, ou seja, é um material abrasivo e geralmente requer o uso de explosivos para o seu aproveitamento. Porém a decomposição pela ação das intempéries da natureza transforma a “rocha mãe” em solo “areia”, o processo de formação geológica leva milhares de anos, dividindo-se em vários estágios de decomposição, físico-químico, tais como: expansão e contração térmica, alteração química, ..., e tais fatores somados formam os grãos de areia, porém não podendo esquecer que são recursos exauríveis, pelo menos em termos de viabilidade econômica.

Em nosso caso de estudo (pó granítico) formado da rocha-mãe granito (constituído basicamente de quartzo, feldspatos, micas, plagioclásios, etc.). Sofrem a desagregação e transformação dos minerais em (areias e/ou argilas), dependem basicamente de sua composição química. Se não vejamos:

Os feldspatos que são os silicatos duplos de alumínio, potássio, sódio, cálcio, ..., são decompostos facilmente por agentes acidulantes, que atuam na rocha sã, atacadas estas decompõem-se. Tais agentes de decomposição são: (oxidação, ácidos orgânicos, gás carbônico, etc.) que alteram e desmancham a rocha sã, soltando os cristais de quartzo que nada mais é que óxido de silício (inatacáveis pelos agentes comuns), que por sua vez formam os grãos de areia e pedregulhos em função da forma e/ou tamanho, que geralmente são encontrados depositados nos leitos dos rios depois de longos processos de transportes feitos pela natureza. Os feldspatos decompostos dão origem a argila e aos sais solúveis, que no curso da natureza comumente seguem para o mar, algumas micas que são silicatos hidratados de alumínio, magnésio, ..., também formam argilas, já outras mais resistentes formam solos micáceos, e mediante o somatório de tantos fragmentos temos o solo residual granítico, tornando-se cada dia mais escasso em termos de reservas econômicas, devido ao sempre crescente consumo industrial.

Com o conhecimento parcial de tão elaborado processo da natureza, e sabendo-se que as reservas naturais são exauríveis, o homem inteligentemente lança mão do conhecimento atual armazenado, produzindo em questões de minutos o que a natureza levou milhares de anos.

Desagregando-se a rocha sã, com recursos tecnológicos e explorando suas propriedades, extraíndo dentre outros, o pó do granito britado, de larga aplicação em obras de engenharia e quando devidamente “tratado” tem vasta aplicação no parque industrial metalúrgico, químico e similares.

↘ Na escala granulométrica internacional e pela (ABNT) a identificação de agregado está entre os diâmetros médios de 2,0mm a 0.002mm e em tal faixa granulométrica recebe o nome de areia (com tendência de grãos arredondados).

1.5. - Análise das alternativas usuais para a produção de areia artificial granítica

A partir de circuitos de britagens convencionais conhecidos no Brasil, compostos geralmente com equipamentos das linhas: Telsmith (Barber-Greene), Allis-Chalmers (FAÇO), Rexnord (Nordberg Industria), será feita uma explanação sucinta sobre o assunto.

O processo de fabricação de areia artificial, será descrito de forma a facilitar a compreensão, com auxílio de fluxograma explicativo. O processo pode ser descrito em etapas. A primeira pode ser chamada de Britagem, sendo a responsável pela desagregação e redução do mineral, tornando-o viável sob o ponto de vista econômico, comumente utiliza-se nesta fase Britadores e/ou Rebritadores. Uma segunda etapa pode ser considerada a Moagem, acionada quando se deseja partículas finíssimas. Na etapa seguinte entra a Calibragem, que seleciona o material em função da forma e/ou tamanho das partículas, para tal, há no mercado diversos tipos de peneiras, para as mais variadas aplicações. E finalizando encontramos a Lavagem e Classificação, da qual ainda pode-se usar Peneiras à úmido, porém comumente usa-se: Lavadores de Rosca, Tanques Classificadores, entre outros. Relembrando que tais equipamentos são aplicados para grandes desempenhos, causando por vezes problemas de entupimentos de calhas, contaminações, etc., nos mais diversos tipos de circuitos, tornando-se muitas vezes inviáveis para as pequenas e médias mineradoras, devido aos seus altos custos de operação e manutenção.

Para melhor compreensão da produção de areia artificial (pó-granítico), em circuitos convencionais de britagem, apresentamos na Figura 1.3, uma representação esquemática de funcionamento de um circuito industrial.

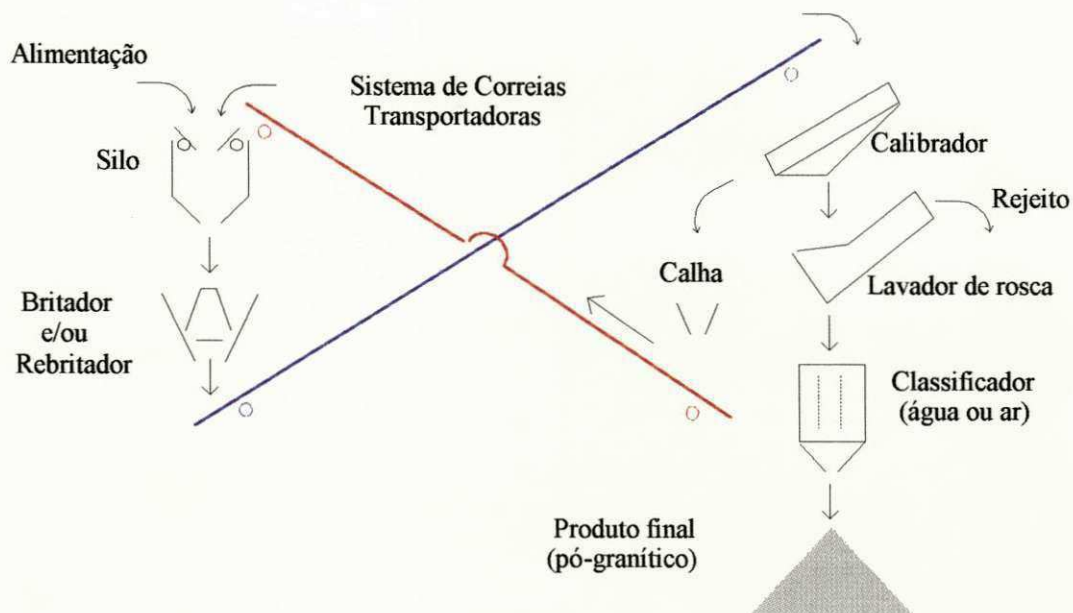


FIGURA 1 3 - Circuito convencional de britagem para produção de areia granítica

Na tentativa de solucionar tais problemas, entre outros, aponta-se a ciclonagem nesta dissertação como uma alternativa de fácil aplicação industrial, oferecendo separação e classificação ao mesmo tempo a baixo custo. O uso do "Ciclone" para a recuperação de areia artificial fina, mostrou-se eficiente e rápido, principalmente no que diz respeito ao material pulverulento, que é um dos alvos da finalidade deste trabalho. O ciclone, pode separar partículas finas das grossas, mediante corte preestabelecido e controlado através das curvas de partição. Obteve-se bons resultados na recuperação da areia fina na faixa de (20 a 200#), trazendo as seguintes vantagens: o uso da água como meio desagregador e separador, possibilitando o uso de uma só bomba centrífuga para vários ciclones, controle das velocidades de fluxos, versatilidade nas vazões, consequentemente variabilidade na capacidade de produção, com uma alimentação feita de material tido como subproduto nas pedreiras e por fim oferece a otimização nestes tipos de circuitos industriais.

1.5.1. - Descrição de alguns equipamentos usuais nos processos para produção e classificação de areia artificial, a partir de circuitos de britagem.

1.5.1.1. - Britagem

- **Britador Giro esférico.** Este modelo comumente pode substituir com vantagem os moinhos de barras ou bolas, oferecendo maior capacidade produtiva a um menor custo. Produz um material muito fino, na faixa 100% abaixo de 4#. Homogeneiza e distribui o produto na câmara de britagem pelo método de “afogamento” controlado. A trituração dar-se por esforços compressivos e cizalhantes entre partículas, agindo umas contra as outras. A alimentação recomendada está entre (3/16 a 1 pol.). O resultado é uma areia artificial com tendência ao “formato cúbico”.
- **Os rebritadores “hydrofine”** São projetados para a produção de finos (areia artificial) oferecendo propriedades consideradas superiores as da areia natural. Como também na preparação da alimentação dos moinhos de barras ou de bolas. Os hydrofine versam em quatro tamanhos básicos, (de 36 a 84 pol.), com capacidades variáveis.

1.5.1.2. - Moagem

Existe no mercado moinhos disponíveis em dois modelos, um convencional, cobrindo as potências de (75 a 2000HP.); e outro modelo sobre pneus, com potência menor de (20 a 200 HP.), de custo reduzido e fácil instalação.

- **Moinho de barras de descarga central.** Possui tamanhos variados, a alimentação está entre (3/4 pol. e 4 #) para material de média dureza, a granulometria de saída está com aproximadamente 95% de material passante em 4#, e pode operar a úmido ou a seco, mediante algumas restrições na produção.
- **Moinho de bola.** São de tamanhos variáveis e utilizados para moagem de materiais finos e pulverulentos. As bolas do meio moedor podem ser de sílex, para evitar contaminações. Podem ser apresentados nos tipos: Cilíndricos utilizado para a faixa de 3pol. a 65#; Cônicos utilizados na faixa de 65 a 150# e Tubulares utilizados em faixas menores que 200#.

1.5.1.3. - Lavagem e classificação

- **Lavagem na peneira;** É feita com a aplicação de jatos de água dirigidos sob pressão, formando uma cortina de água sobre o material a ser classificado, removendo partículas intemperizadas, argila e impurezas coladas ao material a ser selecionado e classificado.
- **Lavadores de rosca;** São empregados na lavagem final. Obtém-se com a injeção de água sob pressão e com movimentação do material através da rosca. O tamanho das partículas a serem eliminadas são reguladas pela vazão da água. O desaguamento é feito mediante a inclinação ao longo do comprimento da caixa, o movimento da rosca visa pressionar os grãos e a saída d'água, e o dreno lateral equilibra a quantidade de água no fluxo do material.
- **Tanque desaguador e classificador;** É composto de canaletas dos lados para drenagem do excesso de água, que juntamente com o material ingressa no tanque. Com o material mais grosso depositando-se no fundo do tanque em primeiro lugar, e o fino permanecendo em suspensão por mais tempo, depositando-se em seguida num ponto mais adiante da alimentação. As impurezas de baixa densidade fluirão com a água para fora do tanque por válvulas de descargas localizadas no fundo do tanque, fazendo o controle da areia acumulada, classificando a parte desejada e dando um rejeito a parte indesejável.
- **Tanques classificadores;** São exclusivamente destinados para ajuste de faixas granulométricas . Tem formato retangular multicelular, com alimentação de polpa num dos extremos. O fluxo faz a decantação ao longo do tanque, sendo a distância do ponto de alimentação ao de deposição inversamente proporcional ao diâmetro das partículas sólidas. A descarga é feita por válvulas de comando hidráulico colocado no fundo do tanque.
- **Classificador helicoidal;** É indicado na classificação, para atender especificações mais exigentes. É auxiliado pelo tanque de decantação e caixa de alimentação. O transbordamento (overflow), é feito dos lados do tanque, possuindo mecanismo separador de rosca girante que trabalha em baixa rotação e provido de válvula de descarga.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E EXPLANAÇÃO DE ALGUNS ASPECTOS TEÓRICOS E PRÁTICOS

2.1 - Introdução

Nestas últimas décadas, tem sido notória a dedicação dos estudiosos e pesquisadores, mais precisamente do Dutch State Mines Department segundo (CHAVES, 1991), instituto Holandês responsável pelo desenvolvimento do equipamento separador de agregados minerais (ciclone), que hoje em dia dá uma das melhores performances na classificação de “finos”, existem muitos fabricantes no mercado mundial, com uma gama de modelos e características variadas, para as mais diversas aplicações. Existindo ainda os de materiais cerâmicos e sintéticos, sendo estes últimos os mais utilizados.

A busca de um modelo matemático aperfeiçoado, que seja genericamente aceitável e de aplicação universal para este tipo de equipamento é contínua; a maioria dos modelos existentes (Tarr, Yoshioka, Hotta, Plitt, Lynch e Rao) são empíricos, e seus efeitos por vezes expressam-se de formas contraditórias, achando-se a explicação para tal, em parte devido a variação das propriedades peculiares de cada mineral. Procurando minimizar tais fatos, a solução adotada por muitos pesquisadores e adotada neste trabalho, foi a utilização do modelo fenomenológico, onde relaciona-se as propriedades do mineral com as características construtivas do ciclone. Deste modo, possibilita-se um melhor ajuste e resultados mais adequados, com a vantagem de um maior controle dos dados e variáveis no processo de análise experimental. Dentre os modelos matemáticos mais usuais e conhecidos (Plitt, Lynch e Rao), optou-se pelo modelo de Lynch e Rao, por ele considerar que parte da alimentação sofre uma curto circuitagem (bay pass), e sabendo que as equações do mesmo se prestam para os cálculo dos parâmetros e ajustes das constantes, podendo ainda oferecer boa flexibilidade nas aplicações.

No sistema de separação e classificação mineral a úmido por hidrociclonagem, as características necessárias que as partículas devem possuir são: densidade elevada, boa dureza, boa resistência a oxidação entre outras; o agregado mineral escolhido para o experimento atende tais requisitos. Para tal método de separação, o interesse maior dar-se na classificação baseada na variação de tamanho e/ou composição. O método adotado para este trabalho baseia-se na variação de tamanho.

Nos fundamentos da separação por tamanho, as partículas descarregadas por meio do fluxo líquido para fora do equipamento, podem ser tidas segundo (LYNCH, 1977) como: Selecionadas; quando a separação se dá mais em função do tamanho e pouco pela forma e Classificadas; quando esta se dá pela diferença de tamanho, forma e densidade, sendo aproveitadas as propriedades conjuntas que afetam o movimento do fluido no meio separador de classificação hidráulica.

Afirma Lynch que, o estudo dos movimentos das partículas em meio fluido, considera-se a separação de um determinado grupo de partículas, diferindo os tamanhos entre si, formas e peso específico, em frações de natureza mais ou menos homogêneas, estando o fluido em repouso ou movimento. Neste caso a separação ocorre em função das diferentes velocidades de viagens das partículas. A força gravitacional influencia determinado "grupo", que experimenta resistência na queda e podendo atingir velocidade terminal (crítica), quando a resistência torna-se igual ao efetivo peso de cada partícula.

No caso de tendência a forma esférica, é dada pela Equação:

$$V_c = \frac{4\pi}{3n'} \cdot \delta^{(n-2)} \cdot \frac{(\gamma - \gamma')}{\gamma'^{(n-1)}} \cdot g \cdot R^{(3-n)} \quad (2.1)$$

A partir da Equação 2.1, pode-se considerar em casos especiais as populares leis de: Stokes e Newton.

Pela lei de Stokes, quando: $n=1$ e $n'=6$ e aplica-se para pequenos sólidos (quartzo esférico acima de 0,005cm de raio) em queda d'água de regime sob-laminar ou em condições viscosas de fluxo onde as velocidades de viagens são baixas, tem-se que:

$$V_c = \frac{4\pi}{3n'} \cdot \frac{(\gamma - \gamma') \cdot g \cdot R^2}{\gamma} \quad (2.2)$$

Pela lei de Newton, quando: $n=2$ e $n' = [(\pi/2) \cdot Q]$ (quartzo esférico com raio de tamanho grande, 0,25cm), aplica-se para queda d'água, onde as velocidades são altas e o fluxo é turbulento, podendo ser dada pela Equação:

$$V_c = \left[\frac{4\pi}{3n'} \cdot g \cdot \frac{(\gamma - \gamma') \cdot R}{\gamma'} \right]^{1/2} \quad (2.3)$$

As linhas de fluxo das partículas, estão limitadas as condições do número de Reynolds, se o fluxo for cheio ($Re < 1,0$) e se turbulento ($Re > 2000$), onde o resultado da Equação (2.4) caracteriza a natureza do tipo de fluxo, dado por:

$$\left(\frac{V_c \cdot R \cdot \gamma'}{\gamma} \right) \cdot Re \quad (2.4)$$

As aplicações destas equações em processos minerais que envolvem regimes de fluxos intermediários, entre o laminar e o turbulento, ainda não estão bem desenvolvidas. Na prática estes fatores devem ser muito bem definidos, sabendo-se que os regimes encontrados são bem complexos, assim essas equações são geralmente insuficientes para a análise de modelos de processos industriais. Consequentemente faz-se necessário "aproximações" dos modelos utilizados. Porém sob condições ideais de regimes de fluxos, as equações (2.1 a 2.3) podem prever o movimento de partículas em meio fluido, não deixando de levar-se em conta os fatores de: Irregularidade nas formas das partículas, interferência na queda pela presença de outras partículas e os choques nas paredes do equipamento, que também interferem no controle e ajuste das variáveis.

As diferentes condições de entrada das partículas dentro de alguma fração de classificação, dar-se devido principalmente:

- Propriedades físicas das partículas tais como; o tamanho, a forma e densidade (peso específico)
- Propriedades físicas do fluido, tais como; densidade, sólidos contidos e consistência ou viscosidade.

- A geometria e as variáveis operacionais do equipamento, dentro do qual a separação será executada.

Através de uma manipulação experimental adequada e cuidadosa das propriedades citadas anteriormente, os efeitos de um podem ser minimizados devido aos efeitos do outro, ou seja, utilizando-se as propriedades dominantes do mineral a ser classificado.

2.2 - Apresentação e concepção do equipamento

O projeto e dimensionamento correto do hidrociclone nos permite dentro das características construtivas e cinemáticas, a alternativa de aliarmos o efeito hidráulico ao efeito físico, podendo assim aplicar recursos tecnológicos, e auxiliar as funções de separação com operações unitárias, e estabelecer assim para tal efeito empírico, o cálculo apropriado para classificação do agregado mineral, selecionando-o e/ou classificando-o ao mesmo tempo. Do ponto de vista Mecânico, o que se pode dizer é que há uma transformação da energia potencial do fluxo da alimentação, que é injetada no ciclone sob pressão, em energia cinética, dando o movimento circular desejado as partículas, resultando em dois fluxos de polpa (ascendente e descendente).

2.2.1 - Descrição

Os detalhes da Figura 2.1 a seguir, mostra em corte transversal, os aspectos do corpo principal do hidrociclone típico.

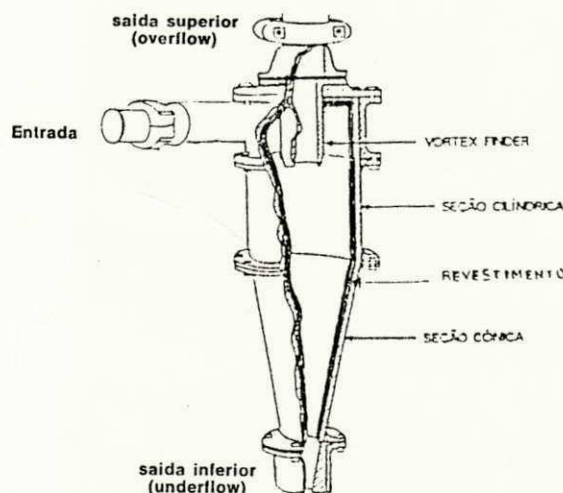


FIGURA 2.1 - Corte e configuração esquemática de um ciclone típico.

A alimentação entra tangencialmente pelo (inlet), sendo que as partículas grosseiras são postas para fora da parte interna do cilindro pelo (spigot), saindo pelo orifício do fundo do cilindro cônico, acoplado ao cilindro vertical por meio de abraçadeira. E as partículas finas são removidas pela corrente de polpa, indo para cima, e saindo pelo (vortex), conforme a Figura 2.2 a seguir.

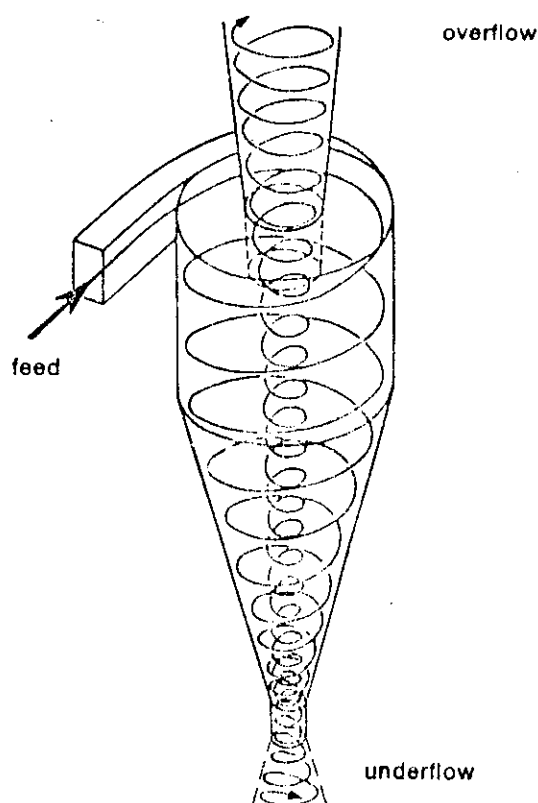


FIGURA 2.2 - Fluxo interno no hidrociclone

A partir do orifício de alimentação (inlet), por onde a polpa a ser separada é injetada sob pressão, próximo ao topo da parte cilíndrica vertical, tem-se um movimento circular em volta do (vortex finder) que é um dos orifícios de descarga das partículas finas (overflow), encaixado na extremidade superior da parte cilíndrica vertical, onde pode ser visto como um tubo introduzido, cujo o eixo geométrico coincide com o eixo geométrico do ciclone

O (spigot) é o orifício de descarga das partículas grosseiras (underflow) e está situado no final da parte cônica, com o centro geométrico também coincidindo com o eixo geométrico do ciclone.

O ciclone é um equipamento sem partes móveis, estacionário, que requer subsistemas e um projeto de “linha” para seu funcionamento. Faz parte do conjunto uma caixa de alimentação (reservatório), onde o material (polpa) é succionado por uma bomba centrífuga, e injetado sob pressão pelo (inlet) onde a pressão pode ser medida com um manômetro localizado antes da entrada do mesmo ou na “linha”, e controlada por um registro, podendo o circuito funcionar aberto e/ou fechado. Quando fechado diminui as perdas, recirculando o material do reservatório.

2.2.2 - Áreas de aplicações dos hidrociclones

Cada vez mais, a aplicação dos hidrociclones é comum nos circuitos de moagem, e bastante usual no tratamento de minérios para separação de finos, podendo se obter “cortes” abaixo de 20 mesh e até 2 micrometros.

A separação pode ser feita em um único estágio, mas em situações onde se deseje separações mais precisas, deve-se utilizar dois ou mais estágios. O interesse em aplicar mais de um estágio, atribui-se ao fato de que comumente há ineficiência na separação em um só estágio, pois se for garantido um produto de overflow isento de partículas grosseiras (com mais de 90% abaixo de um tamanho referido de corte), porém levando um produto de underflow contaminado de finos, assim haverá perdas e queda da eficiência, daí a escolha de mais estágios para recuperação de tais polpas.

Existem vários modelos matemáticos atualmente em condições que permitem o cálculo aproximado dos ciclones, mas é sempre aconselhável a realização de ensaios empíricos, quando possível em circuito fechado, para uma melhor avaliação dos resultados pretendidos, pois assim, quando for instalado o circuito definitivo, se terá condições de ajuste mais rápido dos parâmetros operacionais.

Para ilustrar e exemplificar a geometria dos ciclones e algumas aplicações em tipos de classificações, apresentamos na Figura 2.3, três tipos de ciclones com as respectivas aplicações e configurações geométricas.

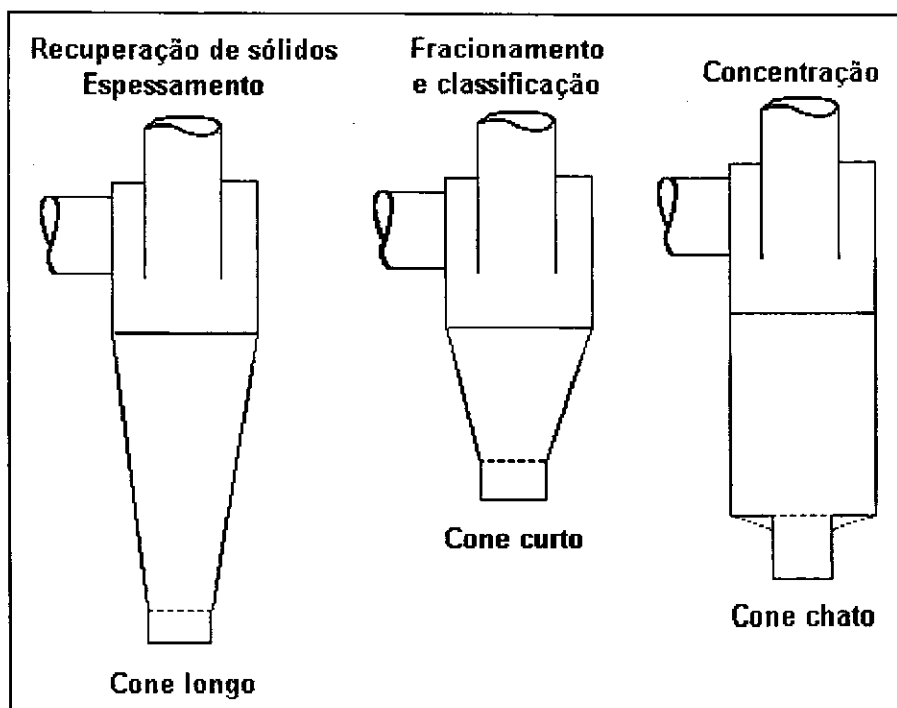


FIGURA 2.3 - Formas e configurações geométricas de ciclones.

Como principais aplicações dos hidrociclones podemos citar algumas, segundo (TRAWINSK, 1976);

Deslamagem; tem por finalidade eliminar partículas mais finas, para melhorar o produto para tratamentos como: flotação, separação magnética a úmido, filtração, etc.

Espessamento; destina-se a eliminar a maior parte da água de uma suspensão, para a obtenção de sólidos sem água. O objetivo de tal, é a recuperação de todos os sólidos, conseqüentemente classificando a fase líquida. Não sendo possível neste caso o uso de agentes floclantes para favorecer a sedimentação. Na prática a recuperação de “massa” é limitada, dando como resultado um (Overflow.) turvo em decorrência da deslamagem ocorrida no ciclone.

Processos de Moagem; podendo ser a úmido em circuitos fechados ou abertos, usualmente utilizam-se os hidrociclones como classificadores de materiais sólidos em suspensão. Emprega-se para cada caso particular, o posicionamento correto do equipamento, podendo ser antes e/ou após ao moinho, dependendo do tipo de circuito e suas necessidades próprias.

Classificação Seletiva; é quando a separação de uma dada alimentação não é homogênea nos seus componentes minerais, podendo-se tomar como base para classificação, as diferenças de peso específico, forma das partículas, tensão superficial, solubilidade, dentre outras propriedades, podendo ocorrer em alguns casos, que a mesma diferença de tamanho de partícula permita uma separação mecânica.

Recuperação dos Sólidos; é obtida através de equipamentos de lavagem, e espessamento (secagem), podendo prevenir a perda de uma parte da fração fina do produto. A recuperação destas frações finas em: espirais (log washers), peneiras vibratórias, e centrífugas de desague, podendo dar aos hidrociclones aplicações bastante interessantes no que diz respeito a recuperação destas partículas sólidas.

Fracionamento; pode ser tido como a separação em duas frações para um tratamento que pode anteceder diferentes processos. Basicamente é o fracionamento de um concentrado de determinado minério, que destacam as partículas finas no overflow e as grossas no underflow. Pode-se dizer que basicamente o presente trabalho utiliza o hidrociclone com esta finalidade.

Préconcentração; é quando existe grande diferença de peso específico entre os componentes minerais; em processo de concentração por gravidade ou concentração centrífuga em meio líquido "leve". O aspecto dos ciclones para tais aplicações diferem dos tipos (standard). Os seus cilindros são mais compridos e seus ângulos são mais obtusos para melhor eficiência. No presente trabalho, foi observado que as "micas" possuíam a tendência de adesão as bolhas de ar produzidas pela pressão da bomba (centrífuga), devido em parte, ao material "graxoso" desprendido da (gaxeta), funcionar como agente floculante no sistema.

Recuperação de Líquido; é quando se deseja recuperar a água do processo, que é um problema para algumas lavagens, como por exemplo: (carvão em pedra) principalmente quando os espessadores existentes no processo estão com sobrecarga. Usualmente instalam-se os hidrociclones em circuito paralelo para controles de limites de teor de sólidos da água reciclada.

Lavagem em Contracorrente; neste caso, a eliminação de ácidos aderentes de lixiviação ou de partículas finas, pode-se conseguir, mediante diluição e espessamento alternados em estágios múltiplos de ciclones. Sendo requerido um certo número de lavagens e quantidade suficiente de água para diluição em cada estágio. Mediante a lavagem em contracorrente, pode-se conseguir alta eficiência, introduzindo a água limpa, uma vez no último estágio dos ciclones. Se comparado ao processo no qual a água limpa é introduzida várias vezes, o efeito da lavagem é pouco eficiente, mas considerando a quantidade de água limpa acrescida no sistema a contracorrente, este pode ser tido como mais eficaz.

2.2.3 - Princípios teóricos e funcionais

Segundo (RENNER e COHEN, 1978), a classificação não ocorre em todo o volume interno do ciclone, mas sim em quatro regiões distintas:

- A primeira região (A), encontra-se na parte superior da porção cilíndrica, estando cheia de partículas não classificadas.
- A segunda região (B), encontra-se oscilando na maior parte do cone, contém material grosseiro já classificado que aguarda a ocasião de ser descarregado pelo spigot.
- A terceira região (C), encontra-se ao redor do vortex finder, contém material completamente classificado que aguarda a ocasião de ser descarregado pelo mesmo.
- A quarta região (D) o torbice, encontra-se um pouco abaixo do orifício de entrada do vortex finder e é a única região onde deve efetivamente ocorrer a classificação do material envolvido no processo de separação.

A Figura a seguir ilustra bem a forma de classificação seletiva das partículas.

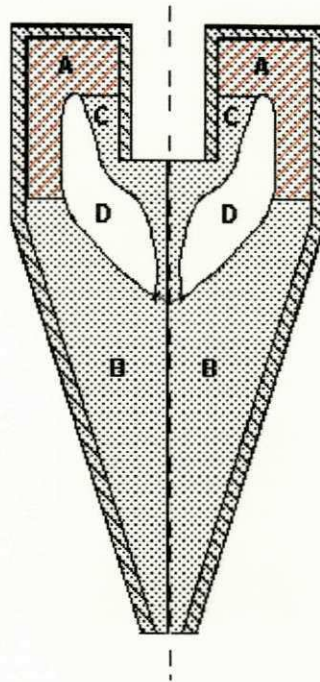


FIGURA 2.4 - Distribuição do material no hidrociclone (Renner e Cohen, 1978)

Um fenômeno importante que ocorre dentro do ciclone é a elutriação do underflow pelo fluxo ascendente. Ao descarregar pelo spigot, as partículas que se dirigem para o underflow têm que atravessar o orifício por onde o ar é aspirado para dentro do ciclone. Havendo então a chance das partículas mais finas que tenham sido aprisionadas por partículas mais grosseiras e empurradas em direção ao underflow, se soltarem, e se dirigirem ao overflow. Da mesma forma partículas muito finas que foram arrastadas pela água tem aí uma última chance de retomarem o caminho correto. Alguns equipamentos tiram partido deste fenômeno para produzirem um underflow mais limpo e isento de partículas finas, eles têm um reservatório “grit box” debaixo do spigot, onde as partículas ficam um certo tempo sendo elutriadas e onde as partículas finas que por ventura tenham sido arrastadas podem se desprender e seguir o rumo do overflow.

As variáveis de operação e/ou as propriedades do minério em classificação afetam cada um desses mecanismos, resultando no hidrociclone as seguintes condições segundo (CHAVES, 1991):

- A presença de grande quantidade de “lama”, afetará a viscosidade da polpa, conseqüentemente causando dificuldade para as partículas sedimentarem-se no campo centrífugo; o corte tende a aumentar.
- A diminuição da percentagem de sólido na polpa, tenderá a diminuir também a viscosidade da mesma, facilitando a sedimentação das partículas e diminuindo conseqüentemente o tamanho de corte.
- O aumento da pressão de alimentação, aumenta o campo centrífugo, resultando em parte na diminuição do tamanho de corte.
- O aumento do diâmetro do vortex finder facilitará o escoamento por esse orifício, em consequência, aumenta a facilidade do overflow arrastar as partículas finas, aumentando portanto, o diâmetro de corte.
- Partículas de densidade mais elevada sofrerão separação em diâmetros menores que as partículas de densidade inferior, em função do efeito maior do campo centrífugo sobre elas.
- Partículas muito finas são indiferentes à ação do campo centrífugo, tendo comportamento governado pela partição da água entre os diferentes tamanhos. Em outras palavras, elas são arrastadas pelas partículas maiores. Em cada um dos produtos, e a sua partição será afetada pelo fluxo de maior força.
- O aumento do diâmetro do spigot atua no sentido contrário ao do aumento do diâmetro do vortex finder, causando portanto o efeito oposto, isto é, diminuindo o diâmetro de corte. Já a diminuição do diâmetro do spigot não atua dessa mesma maneira em toda a sua extensão. As partículas grosseiras, são pesadas demais para poderem ser arrastadas pelo overflow e por isso podem sair pelo spigot, diminuindo-se o diâmetro do spigot dificulta-se a saída da polpa por esse orifício. Como as partículas pesadas só podem sair por aí, o que deixa de sair é a água, que passa a ser encaminhada para o overflow.

2.2.4 - Distribuição granulométrica

O tratamento de minérios trabalha com populações de partículas. Cada uma dessas partículas tem o seu tamanho próprio, mas se consideradas em conjunto elas podem ser caracterizadas por faixas e tamanho, definidos por um limite superior e inferior. A maneira como a massa das partículas contidas em cada uma dessas faixas se interrelacionam, é que define a distribuição granulométrica de um dado material.

Desde há muito tempo, tem-se tentado estabelecer leis estatísticas para representar as distribuições granulométricas usuais de produtos diversos, em operações de cominuição e/ou de classificação. Em alguns casos isto tem sido feito com razoável sucesso, como por exemplo, com produtos de britagem, onde os fabricantes de tais equipamentos apresentam em seus catálogos e manuais, distribuições granulométricas bastantes confiáveis para os seus produtos.

Qualquer distribuição característica de uma dada população que obedeça uma lei estatística pode ser representada por dois números: uma medida de valor central e uma medida de dispersão. No caso conhecido de todos, na distribuição de Gauss, a medida de valor central é a média e a medida de dispersão, a variância ou desvio padrão.

No caso das distribuições granulométricas o parâmetro de maior interesse é o valor central, considerado como sendo um tamanho que, de alguma forma, caracterize bem o processo de interesse.

O uso dos D_{95} e D_{50} , para avaliar a classificação, é tradicional em tratamento de minérios, sendo o D_{95} na prática, mais usado em circuito de moagem, que é a operação onde mais frequentemente ciclones e outros classificadores intervêm quando é crítico o controle de tamanhos. A prática industrial de um controle nesses casos consiste em tomar uma amostra do "overflow" do aparelho classificador e rapidamente fazer uma análise granulométrica. A malha onde 5% da massa fica retida (ou correspondentemente, pela qual passam 95%) é a malha onde, por convenção, está ocorrendo a classificação. É um procedimento ativo, rápido e preciso, que permite, se necessário, que o próprio operador possa tomar imediatamente as providências necessárias para corrigir a operação.

As tentativas para encontrar uma lei generalizada, capaz de expressar todas essas distribuições datam de Gates, quando o mesmo descobriu a aplicabilidade de uma lei exponencial em vários números de casos. Esta lei foi posteriormente aprimorada e generalizada por (GAUDIN, 1939) e por (SCHUNMANN, 1960), até chegar a forma:

$$g^* = (x/k)^w \quad (2.5)$$

(ROSIN e RAMMIER, 1933) identificaram a lei que leva o seu nome e que é aplicável a carvão em todas as faixas de tamanho e a produtos de moagem de outros materiais, abaixo de 1mm. Essa lei se exprime segundo:

$$g^* = 1 - e^{(-kx)^w} \quad (2.6)$$

A tentativa de utilizar a distribuição normal para representar distribuições granulométricas não apresentou bons resultados em alguns casos. A distribuição log-normal, é aquela em que não obstante os seus parâmetros de medidas não obedecem à lei normal, onde seus logaritmos a seguem, mostrando-se inadequada em um certo número de casos.

Na distribuição normal: o percentual passante em g^* é dado por:

$$g^* = \int_{-\infty}^d \frac{1}{\sqrt{2} p_1} e^{-t^2} \cdot dt \quad (2.7)$$

Na distribuição log-normal: o percentual passante em g^* é dado por:

$$g^* = \int_{-\infty}^{\log d} \frac{1}{\sqrt{2} p_1} e^{-t^2} \cdot dt \quad (2.8)$$

onde;

$$t = \frac{\log D - \log D50}{\gamma} \quad (2.9)$$

Na prática, a verificação da forma de uma distribuição qualquer pode ser feita mediante o uso de papéis especiais, em que a escala de ordenação e a anamorfose de uma das funções acima descritas; podendo ser a escala das abcissas, linear ou logarítmica de acordo com a conveniência. No trabalho, tais verificações foram feitas inicialmente no modelo probabilístico de Rosin-Kammier, log-normal e linear, mais para efeito de padronização e de apresentação, utilizou-se programas de computador disponível no (DEM).

2.2.5 - Modelo de Lynch e Rao para hidrociclones

O tratamento de (LYNCH e RAO, 1977) introduz na curva de partição de (YOSHIOKA e HOTTA, 1955) e o conceito de curto circuitagem. A explicação para isto foi dada por (KELSALL, 1953), independentemente da ação do campo centrífugo e dos mecanismos de classificação que ocorrem dentro do ciclone. Uma parcela dos sólidos presentes, em todos os tamanhos de partículas, é arrastada pela fração da água alimentada que vai para o underflow, e descarregada pelo spigot. Kelsall postulou que as partículas da alimentação se repartem entre os dois produtos em função dos mecanismos de classificação e também em decorrência do arraste pelo fluxo da água ou aderidas a outras partículas criando um (by pass) curto-circuitagem.

A grande maioria das partículas “curto-circuitadas” são partículas finas arrastadas pelo fluxo de água que se dirige para o underflow. Para as partículas finas alimentadas, a partição entre o underflow e overflow será a mesma da água. Isto é, partículas finas em suspensão na água não reagem à classificação, ou seja, elas acompanham a água na qual estão em suspensão.

É possível corrigir na configuração da curva de partição real a deformação devida a curto-circuitagem das partículas finas. A curva de partição assim corrigida volta a passar pela origem e, se colocada como abcissas D/D_{50} , ela é invariante com as condições de operação e dimensões do ciclone. Resulta a “reduced corrected efficiency curve”, onde Paulo Abib chamou de curva padrão de partição corrigida.

O modelo de Lynch e Rao serve também para prever o comportamento da alimentação dentro de um ciclone classificador, mas não se limita só a isso, pois correlaciona as variáveis de operação da separação esperada, e as definidas como variáveis de projeto ou geometria do ciclone nos diâmetros dos: vortex finder, do spigot e do inlet na entrada de alimentação. São definidos como variáveis de operação: vazão, percentagem de sólidos na alimentação e distribuição de tamanho na alimentação. O modelo consiste numa série de equações que descrevem: relação entre a vazão do ciclone e a pressão de alimentação, curva padrão de partição, vazão de água e D_{50c} (diâmetro mediano de partição, corrigido)

2.2.6 - Curva de partição

Admite-se que o fluxo de partículas sólidas descarregadas no underflow de um ciclone é constituído de dois fluxos independentes:

- Fluxo das partículas grosseiras que sofreram classificação.
- Fluxo de partículas de todos os tamanhos que foram curto-circuitadas, isto é, que não sofreram classificação.

Admitido-se que o segundo fluxo é proporcional para cada classe granulométrica na partição da água, será possível corrigir a curva de partição obtida pela Equação:

$$P_c = \frac{P_t - R_f}{100 - R_f} \cdot 100 \quad (2.10)$$

A curva de partição assim corrigida, apresentada em função de D/D_{50} é a “curva padrão de partição corrigida”, segundo Lynch e Rao:

- Independente do diâmetro do ciclone, dos diâmetros de saída e das condições operacionais.
- A curva padrão de partição corrigida, determinada para um dado minério num ciclone pequeno pode ser usada para (scale-up) e pode ser definida pela Equação:

$$g' = \frac{e^{\alpha' D/D_{50}} - 1}{e^{\alpha' (D/D_{50})^x} + e^{\alpha' D/D_{50}} - 2} \quad (2.11)$$

Sendo α' uma variável que descreve a forma da curva, que segundo (CHAVES - 1991), deve-se adotar um valor (≥ 4), para não comprometer a eficiência da curva.

Portanto, a Equação (2.11) descreve a separação das partículas efetivamente classificadas. Para adicionar a estas, as partículas curto-circuitadas, basta adicionar, de cada classe granulométrica, uma fração igual a partição de água.

2.2.6.1 - D_{50} corrigido

O modelo de Lynch e Rao fornece a seguinte Equação:

$$\text{Log } D_{50c} = 0,0173 \text{ FPS} - 0,0695 \text{ } \varnothing\text{ST} + 0,0130 \text{ } \varnothing\text{VF} + 0,000048 \text{ } Q + K \quad (2.12)$$

Os autores mencionam que D_{50c} é diretamente proporcional à pressão de alimentação, mas a Equação não explica isso. Mencionam também ser diretamente proporcional ao diâmetro do vortex finder, inversamente proporcional ao diâmetro do spigot, e inversamente proporcional à vazão de água no overflow.

A Equação 2.12 tem uso restrito e não serve para (scale-up). Os autores apresentam outras equações de forma semelhante para aplicação em condições específicas. Segundo Lynch, deve-se usar os seguintes procedimentos para scale-up:

- Executar os ensaios usando ciclones pequenos e minério de distribuição granulométrica bem próxima da esperada para a aplicação que se tem em vista. Obter uma série de valores de D_{50c} .
- Assegurar-se que, durante os ensaios, o underflow esteja escoando livremente através do spigot, com descarga tipo “spray”, que caracteriza um bom regime de classificação.

Derivando-se a Equação 2.12, ela será adequada para o scale-up no caso específico em estudo, se forem mantidas as relações aproximadas entre, (vortex finder, inlet e spigot) em seus diâmetros no ciclone.

2.2.6.2 - Relação pressão-vazão

Segundo Lynch e Rao essas variáveis são correlacionadas pela seguinte Equação:

$$Q = K \cdot \varnothing\text{VF} \cdot \sqrt{P} \cdot (\text{FPW}) \quad (2.13)$$

Onde (K) é constante para uma dada instalação, variando o orifício de alimentação, ela já não vale mais. Esta Equação mostra que: O diâmetro do spigot tem efeito desprezível sobre a vazão e esta é diretamente proporcional ao diâmetro do vortex finder e diretamente proporcional a raiz quadrada da pressão de alimentação.

Quando a classificação granulométrica da alimentação é mantida constante, os autores recomendam usar a Equação:

$$Q = K \cdot (\varnothing VF)^{0,73} \cdot (\varnothing IL)^{0,86} \cdot P^{0,95} \quad (2.14)$$

2.2.6.3 - Partição da água

Existe uma relação linear entre a água que entra com a alimentação e a que sai pelo overflow. A variável de controle nestas circunstâncias é o diâmetro do spigot,

$$WOF = 1,07 \cdot WF - 3,94 \cdot (\varnothing ST) + K \quad (2.15)$$

O parâmetro de interesse não é WOF, mas sim a partição de água, dada por:

$$Rf = (WF - WOF) / WF \quad (2.16)$$

que permitirá calcular o by-pass.

As forças que atuam no interior do ciclone, observadas na Figura 2.5 pode ser divididas em três componentes: vertical, horizontal e radial. Na Figura 2.5 a, pode-se observar a partícula e suas componentes radiais, com suas respectivas forças centrífuga e de arrasto. Ao analisarmos próximo a parede cilíndrica do corpo principal, certifica-se que a velocidade da polpa tem sempre uma componente descendente. A medida que a(s) partícula(s) se afasta da parede decresce até tomarem sentido contrário tornando-se ascendente. Supondo agora uma superfície fictícia em concordância com a linha do centro geométrico do ciclone como é mostrada na Figura 2.5 b, pela superfície tracejada entre as componentes descendentes e ascendentes, tem-se que a velocidade da polpa representada pela linha tracejada, descreve uma região de velocidade nula.

Geralmente forma-se no centro do hidrociclone um núcleo de ar que é aspirado pelo spigot, que é responsável por tal superfície fictícia de arrasto ou "manto". Para facilitar a compreensão, continuaremos analisando a trajetória de uma partícula dentro do ciclone, que servirá para exemplificar o comportamento da média das partículas, desprezando-se no entanto, os choques na parede cilíndrica e das partículas entre si.

Supondo uma partícula com as propriedades características, solta em um ponto qualquer como mostra a Figura 2.5 a, observa-se o efeito de arrasto da polpa segundo as componentes de sua velocidade de transporte em meio fluido cujas componentes podem ser divididas em: tangencial, vertical e radial.

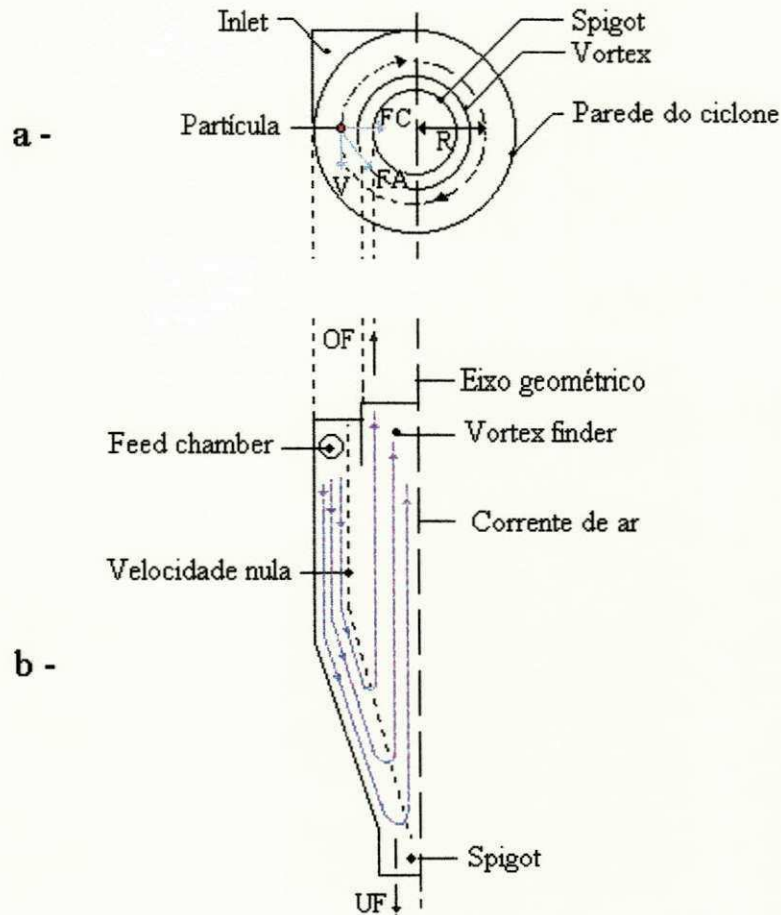


FIGURA 2.5 - Trajetória das partículas no interior do ciclone
 a - Componentes: tangencial, vertical e radial
 b - Componentes: descendentes e ascendentes

Na componente tangencial a partícula não oferece resistência ao movimento, acompanhando a polpa, e girando com ela ao redor do eixo geométrico do ciclone.

Na componente vertical o giro se dá paralelo ao eixo geométrico do ciclone existindo ali uma única força que pode agir em sentido contrário ou reforçar o arrasto, esta é gravitacional, porém a força de arrasto da polpa, é bem maior que o peso da partícula geralmente, de forma que a partícula tende a acompanhar a polpa, invertendo o seu sentido de movimento, podendo ser observado na Figura 2.5 b.

Na componente radial supondo a partícula girando em torno do eixo geométrico do ciclone a uma distância de raio “R” visto na Figura 2.5a; a partícula sofrerá uma aceleração em direção ao centro e esta será dada por:

$$A = \frac{V^2}{R} \quad (2.17)$$

Então para que a rotação seja mantida com raio “R” a partícula sofrerá a ação de uma força centrífuga igual a:

$$F_c = (\gamma - \gamma')A \quad (2.18)$$

Podemos observar segundo (LILGE, 1963), que esta força deve ser favorecida pela componente radial da polpa. Se a força de arrasto “ F_d ”, for menor que a força centrífuga “ F_c ”, a partícula tenderá a aumentar o raio “R” para sofrer deslocamento descendente e acabará por sedimentar-se na parede do ciclone, onde a componente vertical descende, e se descarregará no orifício do (spigot); se de outra forma “ F_d ” for maior que “ F_c ” a partícula será arrastada para o centro onde a componente vertical é ascendente e a descarga será feita pelo (vortex). Assim, as partículas maiores que constituem o (underflow) serão descarregadas pelo (spigot) e as partículas menores que constituem o (overflow) serão descarregadas pelo (vortex). A Figura 2.6, ilustra a atuação das forças internas, com suas respectivas componentes no interior do hidrociclone.

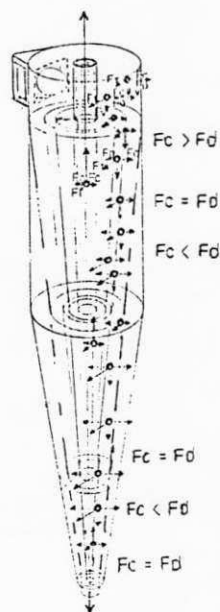


FIGURA 2.6 - Forças atuantes no Hidrociclone (Lilge, 1963).

Na prática, tal separação dificilmente ocorre, assim sendo, o que poderá ocorrer é que, as partículas muito finas não se submeterão a esse mecanismo, sendo arrastadas pela água para o (underflow) ou para o (overflow) de forma proporcional a vazão da água, dependendo conseqüentemente da densidade da mesma. Pois, sabendo-se que nem todas as partículas tem as mesmas condições, tais como: posição de entrada, peso, forma, densidade, constituição física, etc., logo elas não serão submetidas aos mesmos valores das componentes de velocidade da polpa.

Para se ter um controle mais preciso na separação, é preciso se verificar o comportamento das partículas, sendo possível após o conhecimento do “balanço de massa”, e utilização da “curva de partição”, que dá uma idéia mais precisa do “Tamanho de Corte” (D_{50}), pretendido.

Para maior detalhamento dos princípios funcionais, consideremos que a polpa injetada tangencialmente sob pressão pelo (inlet), visto na Figura 2.7, expande-se criando um movimento circular em volta do (vortex finder) indo em direção à parte cônica, ao mesmo tempo que deve se aproximar do eixo central imaginário, para ser expelida pelas forças atuantes no interior do cilindro, a altura do injetor, depois que a polpa dá a volta completa, encontra a corrente de polpa “nova” que continua alimentando o ciclone, ocasionando assim, uma certa turbulência, que poderá ser minimizada usando-se um (inlet) com a saída para o interior do corpo cilíndrico (feed chamber), com conformação geométrica “retangular”, deixando a polpa injetada ficar o mais próximo possível da parede interna da parte cilíndrica, dando condição a força centrípeta atuar, vencendo a gravidade e a força de arrasto, com mais facilidade.

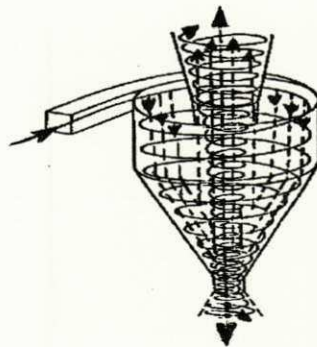


FIGURA 2.7 - Detalhamento do movimento circular das forças atuantes

2.3. - Considerações sobre as variáveis de processo

Consideraremos algumas das variáveis mais importantes no processo de classificação em meio fluido, procurando descrever de forma sucinta os principais pontos de observações que sejam relevantes ao presente trabalho.

2.3.1. - Percentagem de sólido na polpa de alimentação

É uma das variáveis que mais afeta a fração volumétrica no hidrociclone, alterando a viscosidade do fluido. Quando a percentagem do material sólido é aumentada, conseqüentemente aumenta a força de arrasto da polpa, provocando mudanças na densidade aparente.

2.3.2. - Diâmetro do “vortex”

O diâmetro do vortex determina o “tamanho do volume” de separação. Os valores mais usuais do diâmetro do vortex estão compreendidos entre 25 e 40% do diâmetro interno da parte cilíndrica vertical do ciclone. Quando se deseja um valor pequeno para o diâmetro de corte (D_{50}), que seja uma relação D_c/D_o menor que 25%, aconselha-se atuar nas outras variáveis, e se o corte já estiver no limite, então é preciso escolher um ciclone pequeno, ou seja de diâmetro inferior ao que se está usando. Já se o caso requerer um corte para material grosseiro, com uma relação maior que 40%, utiliza-se um ciclone de diâmetro maior.

Os estudos até hoje mostram que se o diâmetro do (vortex finder) (D_o) for muito grande em relação ao diâmetro do ciclone (parte cilíndrica vertical), isto gera uma turbulência dentro do ciclone, mais precisamente próximo ao topo da parte cilíndrica, onde se encontra o (vortex finder), causando assim uma “curto-circuitagem” de material que sai no (overflow) e, conseqüentemente maior desgaste do corpo cilíndrico do ciclone.

2.3.3. - Diâmetro do “spigot”

Usualmente não é comum utilizar-se desta variável para o controle da separação, por motivo de outros efeitos poderem causar “curto” no material a ser separado, lançando-o para o (underflow). De qualquer maneira já ficou registrado empiricamente que se

o (spigot) for muito aberto, o que indica uma partição grande de água para o (underflow), poderá resultar em uma partição real pouco precisa, por outro lado, se a curva de partição real estiver boa para uma separação grosseira, então estará indicando pouca contaminação das partículas grossas no produto de (overflow). Se o (spigot) estiver muito fechado, o produto do (overflow) certamente estará bastante contaminado de partículas grossas saindo pelo (vortex), podendo se explicar isto, em função do orifício do (spigot) está obstruindo tal passagem devido ao excesso de partículas sobrecarregando a descarga neste orifício. Pode-se concluir que uma situação mediana seja a mais adequada, em que o orifício do (spigot) tenha um diâmetro de saída com área suficiente para deixar escoar o percentual desejado de sólido, com o produto do (underflow) tendo uma alta percentagem de sólidos e pouca contaminação de partículas finas.

2.3.4. - Diâmetro do “inlet ”

Aumentando-se a área do “inlet” , maior será a possibilidade de aumentar o “tamanho do corte”, afirmando-se com base em resultados empíricos, que a saída para o interior do corpo cilíndrico vertical, a (feed chamber), possuindo a “forma retangular”, concorre para um melhor corte, diminuindo a turbulência na área de separação.

2.3.5 - Diâmetro do corpo cilíndrico principal

A prática mostra que o diâmetro interno do corpo cilíndrico do ciclone é um parâmetro geométrico de efeito prático muito importante, pois tem influência sobre o tamanho da classificação, apesar de que em alguns casos, se afirma que o “tamanho da separação”, aumente com o aumento do diâmetro interno. Sabendo-se que tal diâmetro é um dos responsáveis pela capacidade da vazão que o equipamento suporta. No caso de insuficiência para a vazão desejada, aconselha-se o uso de vários ciclones em paralelo, e para tal faz-se necessário que a distribuição seja feita de forma radial, ou seja com o (Manifold), popularmente conhecido como “aranha”.

2.3.6. - Taxa de alimentação da polpa

Está relacionada diretamente com a pressão de injeção, considerando-se a descarga livre do (underflow), para uma maior pressão implicará em uma maior vazão da

polpa de alimentação e conseqüentemente menor “tamanho de separação”, podendo ser responsabilizado por isto à maior turbulência da polpa com vazões maiores, e em parte, pelo arremesso à parede do ciclone das partículas maiores, devido a força centrífuga, causando um deslocamento descendente e choques entre si, devido a rugosidade da parede interna do ciclone.

2.3.7. - Densidade dos sólidos

Para melhor controle da variável densidade de suspensão, é necessário verificar a influência da relação entre os diâmetros dos orifícios: inferior e superior D_{UF}/D_{OF} (diâmetro do “spigot”/diâmetro do “vortex”), para uma certa densidade de suspensão na alimentação. A densidade na região do orifício inferior de saída (spigot) é maior que a densidade na região do orifício superior de saída (vortex). Estabelecendo-se a relação (D_{UF} / D_{OF}) e suas respectivas vazões, pode-se calcular experimentalmente a influência da densidade correspondente a suspensão das partículas, dentro de uma faixa granulométrica estabelecida, para uma dada pressão e geometria do ciclone. Em nossos testes consideramos uma densidade média, entre a maior e menor densidade registrada no agregado mineral amostral.

2.3.8. - Densidade do líquido

Tal efeito sobre a separação, tende a concentrar as partículas pesadas no underflow, e conseqüentemente as mais leves no overflow. Se a densidade da fase líquida for maior que a de um determinado grupo de partículas, elas tenderão a sair no overflow, independente dos seus tamanhos, para os ciclones que operam em “meio denso”, causando uma estratificação centrífuga para o underflow por densidade. No experimento utilizou-se a água limpa como meio fluido.

2.4. - Formas e fórmulas para o dimensionamento de uma bomba centrífuga.

A perda de carga pode ser calculada pela fórmula de Hazen-Williams, dada por:

$$f^* = 10,45 (Q/C)^{1,852} \cdot (L/D)^{4,87} \quad (2.19)$$

O Coeficiente de Polidez(C) das paredes internas de tubulações é dado a seguir pela Tabela 2.1.

TABELA 2.1

Valores do coeficiente de polidez C de tubulações

MATERIAIS	VALOR DE " C "
Aço corrugado (chapa ondulada)	60
Aço com juntas "luk-bar" novas	130
Aço galvanizado (novo e em uso)	125
Aço rebitado novo	110
Aço rebitado em uso	85
Aço soldado novo	120
Aço soldado em uso	90
Aço soldado com revestimento especial novo em uso	130
Chumbo	130
Cimento amianto	140
Cobre	130
Concreto bem acabado	130
Concreto acabamento comum	120
Ferro fundido novo	130
Ferro fundido em uso	90
Ferro fundido revestido de cimento	130
Grês cerâmico vidrado (manilha)	110
Latão	130
Madeira em aduelas	120
Tijolos (condutos bem executados)	100
Vidro	140
Plástico	140

FONTE: Centro de treinamento (Bombas KING)

Pela fórmula de Hazen-Williams para a equação da continuidade, para o cálculo de V e de Q utiliza-se respectivamente as Equações:

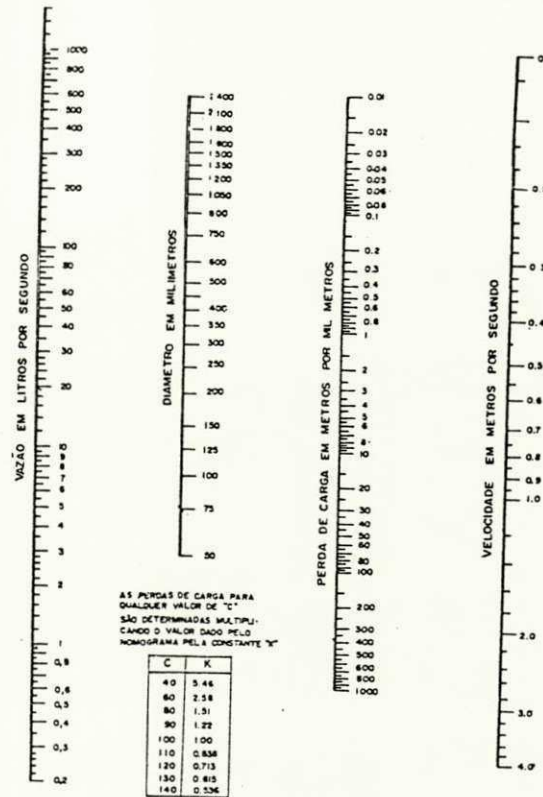
$$V = 0,3555 \cdot C \cdot D^{0,63} \cdot J^{0,54} \quad (2.20)$$

$$Q = 0,2785 \cdot C \cdot D^{0,63} \cdot J^{0,54} \quad (2.21)$$

Lembrando ainda que a escolha inadequada do coeficiente de polidez C , reduzirá muito a precisão do cálculo, uma vez que este está em função do tempo de vida útil da tubulação. Podemos ainda empregar o Gráfico 2.1 Monograma de Hazen-Williams, cal-

culado para $C \leq 100$, que corresponde em média a um período de serviço compreendido entre quinze e vinte anos. Neste monograma as perdas de carga para valores quaisquer do coeficiente de polidez, são determinados multiplicando-se o valor dado pela constante "K" Tabelada em função do coeficiente de polidez.

Monograma da fórmula de Hazen-Williams



FONTE.: Eng. J. A. Martins)
GRÁFICO 2.1 Monograma de Hazen - Williams

Uma outra forma de calcular as perdas de carga contínua ao longo de qualquer trecho da tubulação, pode ser feita utilizando-se a expressão geral formulada por Darcy-Weissbach, ou seja:

$$H_f = f' (L V_c^2 / 2gD) \quad (2.22)$$

A partir da equação da continuidade temos ainda que:

$$Q = Vol. \cdot A' \quad (2.23)$$

A velocidade média de escoamento aplicada em condutos circulares, pode ser obtida pela Equação:

$$V_m = \frac{4 \cdot Q}{t D^2} \quad (2.24)$$

Para determinação correta do coeficiente de atrito (f') deve-se, considerar o regime de fluxo "laminar ou turbulento" Figura 2.8, conforme descrição a seguir:

- Regime laminar - É dito laminar quando todos os filetes líquido do escoamento estão paralelos entre si, e as velocidades em cada ponto são invariáveis em direção e grandeza.
- Regime turbulento - É dito turbulento quando as partículas movem-se em todas as direções, com velocidades variáveis em direção e grandeza de um ponto para outro e no mesmo ponto de um instante para outro.



FIGURA 2.8 a-Regimes laminar, b-Regime turbulento

Para se saber o tipo de regime, se laminar ou turbulento, é necessário saber o número de Reynolds que o caracteriza, podendo ser definido através da equação:

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (2.25)$$

Neste caso, adota-se para o escoamento segundo o critério adotado pelo manual de bombas KING, ($Re < 2000$) para fluxo laminar e ($Re > 4000$) para fluxo turbulento.

Normalmente na prática, quando o regime é laminar para casos de velocidades de escoamento muito baixas, o coeficiente de atrito (f') pode ser dado diretamente por:

$$f' = 64/Re \quad (2.26)$$

Para o regime turbulento, o coeficiente de atrito (f') pode ser determinado pela Equação de Blasius, em que:

$$f' = 0,316 \cdot Re \quad (2.27)$$

Quando o número de Reynolds encontra-se na faixa de transição entre (2000 e 4000), pode-se constatar que este fator não é considerado como motivo de preocupação por muitos pesquisadores, devido ao fato de que na prática, o regime de escoamento é normalmente turbulento, e ainda levando-se em conta que “Re” é adimensional, seu valor numérico será o mesmo, para as mesmas circunstâncias, independente do sistema de unidades adotado, desde que o sistema seja homogêneo. Resaltando que, o regime só será laminar quando a velocidade de escoamento é muito baixa e/ou para fluidos muito viscosos.

Então quando o escoamento for turbulento e o número de Reynolds for maior que 4000, poderemos usar a fórmula de Moody, lembrando que (f'), além de ser função do fluxo de escoamento, depende também da rugosidade relativa da tubulação, conforme pode ser visto na Figura 2.9, onde “E” é igual a rugosidade absoluta, “D” é igual a diâmetro nominal e “E/D” é igual a rugosidade relativa.

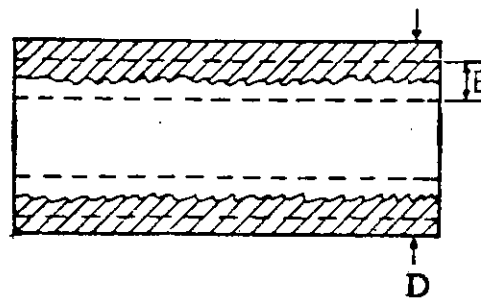
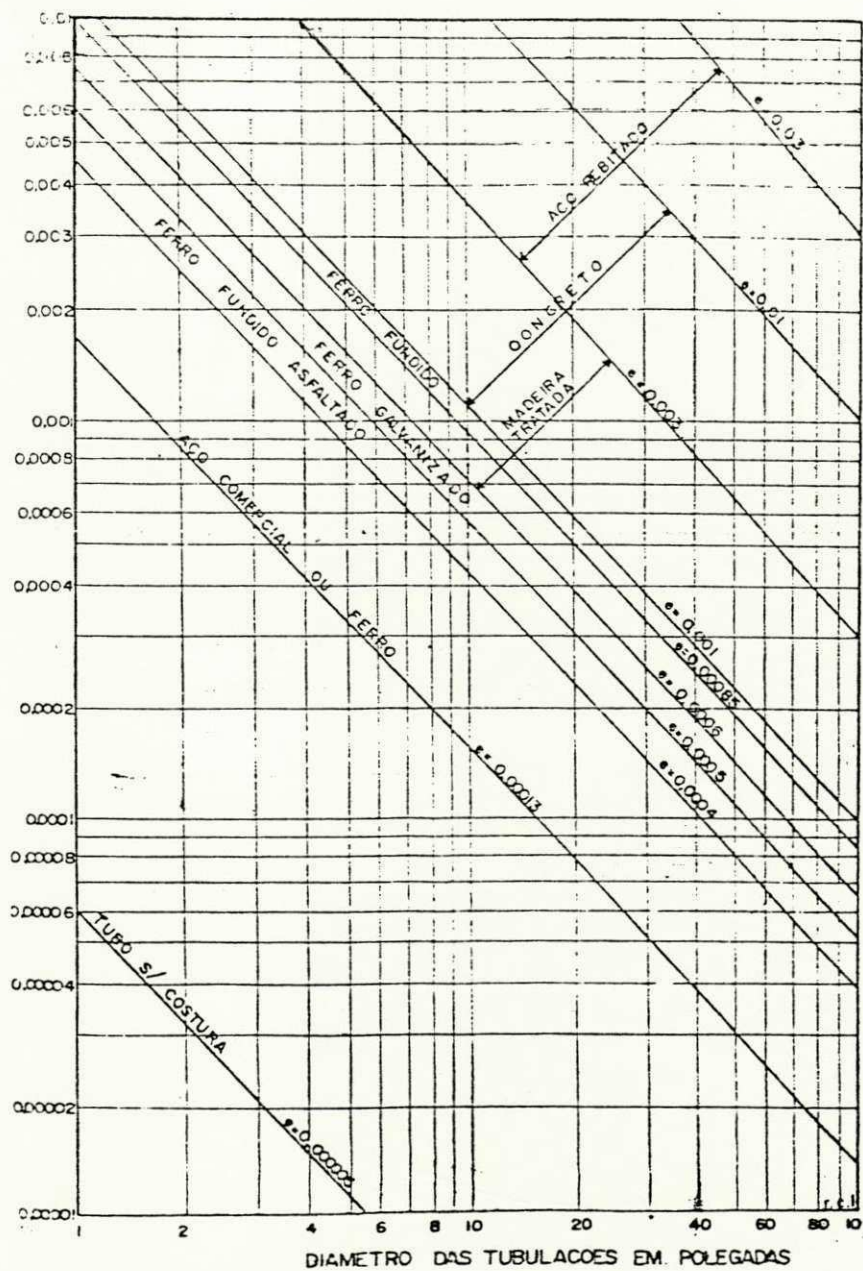


FIGURA.2.9 - Comportamento da rugosidade absoluta e relativa da tubulação.

A “rugosidade relativa” pode ser obtida diretamente do Ábaco 1, Gráfico 2.2, ou dos valores da “rugosidade absoluta” dados pela Tabela 2.2.

ABACO 1

Rugosidade relativa



FONTE: Centro de treinamento (Bombas KING)
GRÁFICO 2.2 - Rugosidade relativa

TABELA 2.2

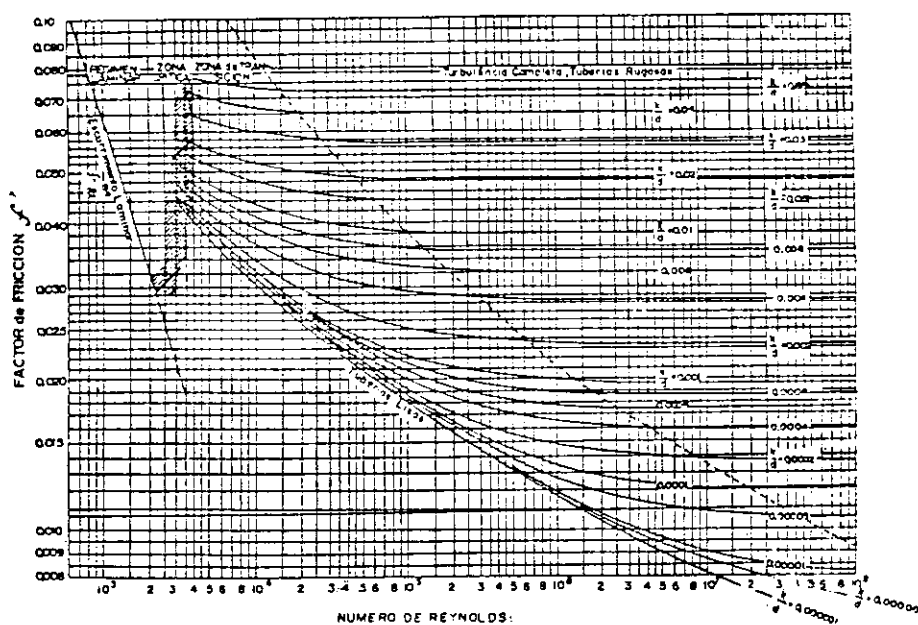
Rugosidade absoluta

MATERIAIS	VALOR DE "K" (mm)
Aço comercial	0,046
Aço galvanizado	0,15
Aço laminado novo	0,0015
Aço rebitado	0,04
Aço soldado liso	0,10
Cimento alisado	0,3 a 0,8
Cobre ou vidro	0,0015
Concreto centrifugado	0,07
Ferro fundido asfaltado	0,04
Ferro fundido novo	0,26 a 1,0

FONTE: Centro de treinamento (Bombas KING)

O coeficiente de atrito (f') é dado pelo Ábaco de Moody, no Gráfico 2.3.

ÁBACO 2



FONTE: Centro de treinamento (bomba KING)

GRÁFICO 2.3 - Ábaco de Moody

Pelo teorema da continuidade, sabemos que uma mesma vazão pode ser transportada em tubulações com diâmetros diferentes, variando a velocidade de escoamento do fluido. A determinação de tal diâmetro está implicitamente ligada ao aspecto econômico ou seja, a disponibilidade de investimento na instalação e os custos operacionais do sistema.

Baseado no critério do Custo Mínimo Total (CMT), veremos algumas fórmulas que permitirão o cálculo do diâmetro (econômico) recomendado para uma instalação.

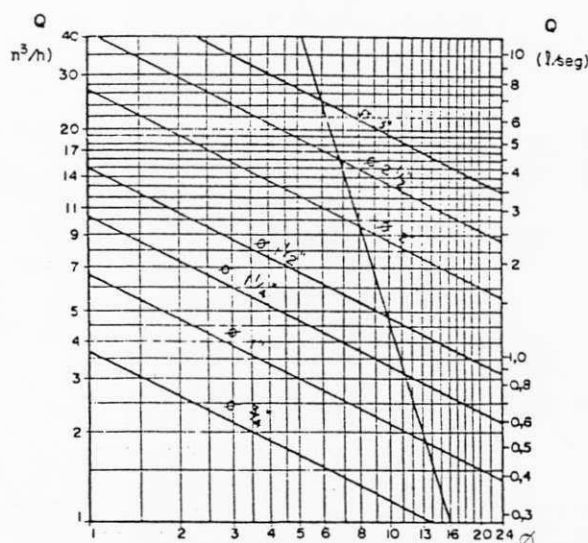
A fórmula de Bresse fornece o diâmetro da linha de recalque (D_R). Para o diâmetro da linha de sucção (D_s), adota-se o diâmetro "comercial" imediatamente superior ao de recalque, fornecido pelo(s) fabricante(s). A Equação de Bresse é dada por:

$$D_R = K_1 \sqrt{Q} \quad (2.28)$$

A fórmula adotada pela ABNT, fornece o diâmetro da linha de recalque para funcionamento intermitente e é dada pela Equação:

$$D_R = 0,586 \cdot T^{1/4} \quad (2.29)$$

Sua aplicação é facilitada usando-se o Gráfico 2.4. Para a sucção adotar o critério anterior, ou seja a escolha do diâmetro imediatamente acima do especificado no recalque.



FONTE: Centro de teinamento (bomba KING)

GRÁFICO 2.4 - Cálculo de perdas de carga localizada em função do diâmetro (ABNT)

A partir da equação da continuidade, podemos chegar ao cálculo da vazão aparente pela Equação:

$$D_{(S,R)} = 1,128 \sqrt{\frac{Q}{V_{(S,R)}}} \quad (2.30)$$

onde:

($V_S \leq 1,5$ a $2,0$ m/s e $V_R \leq 2,5$ a $3,0$ m/s) limites empíricos para os diâmetros que obedecem o critério do CMT, ou ainda pela Tabela 2.3.

TABELA 2.3

Velocidades econômicas de fluidos para tubulações

FLUIDOS		Velocidade (m/s)
	Redes em cidades	1,0 a 3,0
	Redes em instalações industriais	2,0 a 4,0
	Alimentação de caldeiras	4,0 a 8,0
Água:	Sucção de bombas	1,0 a 2,5
	Recalque de bombas	0,6 a 2,4
	Conduitos forçados em Usinas Hidroelétricas	1,5 a 4,5
	Canalização predial	\leq a 4,0
Óleo	Sucção de bombas	1,0 a 2,0
	Recalque de bombas	1,5 a 2,5
	Fluxo por gravidade	0,7 a 1,8
Ar	Comprimido	15,0 a 20,0

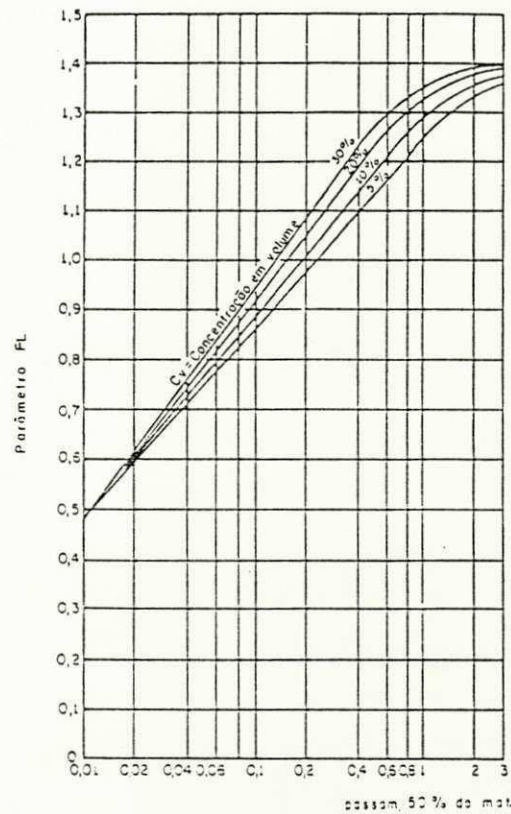
FONTE: Centro de treinamento (Bombas KING)

Quanto a velocidade (crítica) econômica calculada por Durand, temos:

$$V_c = FL \sqrt{2 \cdot g \cdot D \cdot \frac{\gamma - \gamma'}{\gamma'}} \quad (2.31)$$

onde, FL é o parâmetro de ajuste fornecido pelo Gráfico a seguir.

O Gráfico 2.5, apresenta os valores de abertura da peneira, para uma granulometria passante de 50% do material.



FONTE: Centro de treinamento (Bombas KING)
GRÁFICO 2.5 - Cálculo da velocidade crítica pelo parâmetro FL

Pelo método direto do teorema de borda, afirma-se que a perda de carga ocorrida em um fluxo de alargamento brusco, como mostra a Figura 2.10, pode ser medida pela altura cinética correspondente a velocidade perdida do fluxo.

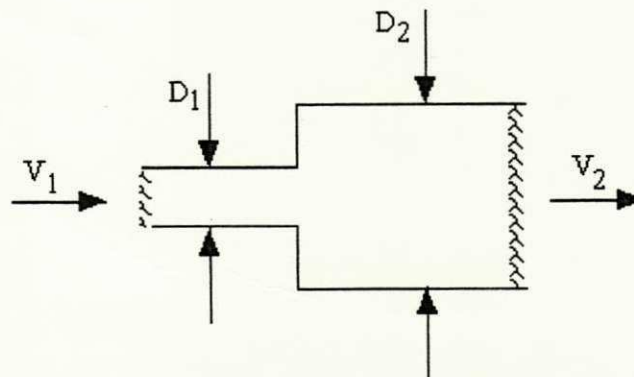


FIGURA 2.10 - Perda de carga num alargamento brusco de seção localizada

A perda de carga localizada numa seção de alargamento brusco, pode ser expressa pela seguinte Equação:

$$H_{f_L} = \frac{(V_1)^2 - (V_2)^2}{2g} \quad (2.32)$$

Na prática, é usual determinar a perda de carga localizada, com uso generalizado para todos os tipos de conexões e/ou acessórios pela Equação do tipo:

$$H_{f_L} = K \frac{V_m^2}{2g} \quad (2.33)$$

Sendo **K** o coeficiente característico para acessórios, encontrado na Tabela 2.4.

TABELA 2.4

Valores do coeficiente de (K)

TIPOS DE PEÇAS	K	TIPOS DE PEÇAS	K
Ampliação gradual	0,30*	Junção	0,40
Bocais	2,75	Medidor venturi	2,50**
Comporta aberta	1,00	Redução gradual	0,45**
Controlador de vazão	2,50	Registro de ângulo aberto	5,00
Cotovelo de 90°	0,90	Registro de gaveta aberta	0,20
Cotovelo de 45°	0,40	Registro de globo aberto	10,00
Crivo	0,75	Saída de canalização	1,00
Curva de 90°	0,40	Tê de passagem direta	0,60
Curva de 45°	0,20	Tê de saída lateral	1,30
Entrada normal	0,50	Tê de saída bilateral	1,80
Entrada de borda	1,00	Válvula de pé	1,75
Pequena Derivação	0,03	Válvula de retenção	2,50

* Com base na velocidade maior (seção menor), ** Relativo a velocidade na canalização
 FONTE: Centro de treinamento (Bombas KING)

No método do comprimento equivalente (MCE), as perdas por atrito e localizadas ao longo de uma tubulação, são grandezas homogêneas com dimensões lineares, sendo estabelecidas entre ambas uma equivalência de singularidade por comprimento, tal que, a perda de carga fique em condições idênticas de escoamento.

Através do desenvolvimento das Equações 2.32 e 2.33, obtém-se o comprimento equivalente dos acessórios pela Equação:

$$L = \frac{K}{f} \cdot D \quad (2.34)$$

onde os valores de (K/f) ou do próprio comprimento equivalente dos acessórios, podem ser encontrados na Tabela 2.5, por tipos de peças, em função do diâmetro.

TABELA 2.5

Comprimentos equivalentes de acessórios para tubulações

TIPOS DE PEÇAS	C. E. (K/f)	TIPOS DE PEÇAS	C. E. (K/f)
Ampliação gradual	12	Registro de ângulo aberto	170
Cotovelo de 90°	45	Registro de gaveta aberto	8
Cotovelo de 45°	20	Registro de globo aberto	350
Curva de 90°	30	Saída de canalização	35
Curva de 45°	15	Tê de passagem direta	20
Entrada normal	17	Tê de saída lateral	50
Entrada de borda	35	Tê de saída bilateral	65
Junção	30	Válvula de pé de crivo	250
Redução gradual	6	Válvula de retenção	100

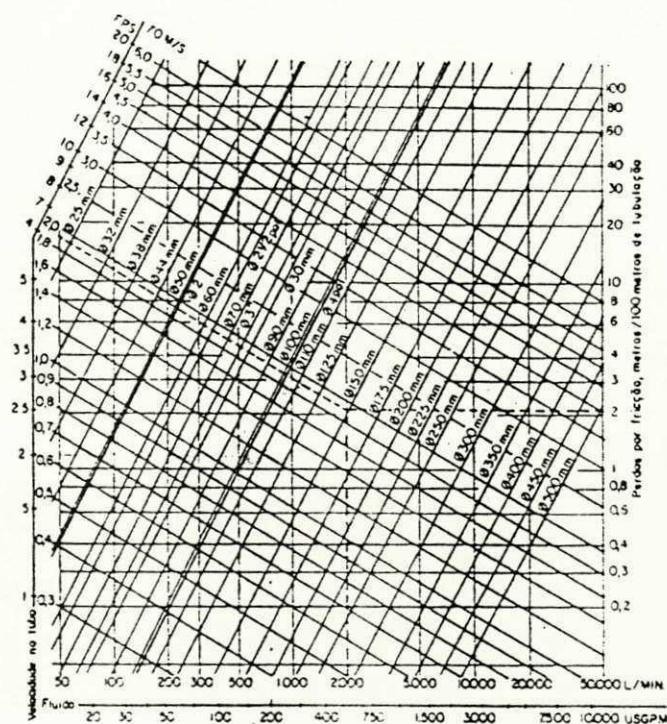
FONTE: Centro de treinamento (Bombas KING)

A perda de carga calculada por Hazen-Williams, pela fricção, é dada como:

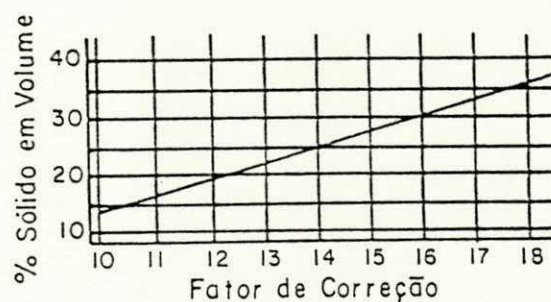
$$\Delta H = (0,2083) \cdot \left(\frac{L}{f} \right)^{1,85} \cdot \left(\frac{Q}{D} \right)^{4,8655} \quad (2.35)$$

O valor de ΔH pode ser encontrado no Gráfico 2.6. Para o bombeamento de polpa, Allis Chaumers recomenda corrigir a perda de carga teórica calculada, usando o Gráfico.2.7, que é expresso em metros de coluna de polpa (m.c.p.), para o cálculo de perda de carga, deve-se utilizar o comprimento equivalente da tubulação considerando-se as perdas localizadas, sendo assim utiliza-se os valores da Tabela 2.6.

Os Gráficos a seguir apresentam os coeficientes de fricção, e correção de perdas de carga respectivamente.



FONTE: Centro de treinamento (Bombas KING)
GRÁFICO 2.6 - Coeficiente de fricção (A. Chaumers)



FONTE: Centro de treinamento (Bombas KING)
GRÁFICO 2.7 - Correção de perda de carga para polpa (A. Chaumers)

TABELA 2.6

Comprimento equivalente de perda de carga localizada (A. Chaumers)

Acessórios	Diâmetro da tubulação (Pol)											
	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	24
Curva regular 90°	4,4	5,9	7,3	8,9	12	14	17	18	21	23	25	30
Curva 90° r. longo	3,4	4,2	5,0	5,7	7,0	8,0	9,0	9,4	10	11	12	14
Curva regular 45°	2,6	3,5	4,5	5,6	7,7	9,0	11	13	15	16	18	22
Tê passagem reta	2,2	2,8	3,3	3,8	4,7	5,2	6,0	6,4	7,2	7,6	8,2	9,6
Tê saída lateral	9,4	12	15	18	24	30	34	37	43	47	52	62
Curva 180° regular	4,4	5,9	7,3	8,9	12	14	17	18	21	23	25	30
Curva 180° r. longo	3,4	4,2	5,0	5,7	7,0	8,0	9,0	9,4	10	11	12	14
Válvulo globo	94	120	150	190	260	310	390	—	—	—	—	—
Válvula de gaveta	2,8	2,9	3,1	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
Válvula angular	28	38	50	63	90	120	140	160	190	210	240	300
Válvula retentora	27	38	50	63	90	120	140	—	—	—	—	—
Bocal tipo fino	0,67	0,95	1,3	1,6	2,3	2,9	3,5	4,0	4,7	5,3	6,1	7,6
Bocal quadrado	6,7	9,5	13	16	23	29	35	40	47	53	61	76
Tubo reentrante	13	19	25	32	45	58	70	80	95	110	120	150

FONTE: Centro de treinamento (Bombas KING)

O cálculo da altura manométrica total, pode ser feito a partir da altura que a bomba centrífuga tem que vencer (altura total ou estática) no sistema, onde a energia mecânica é transformada em hidráulica, e pode ser expressa através da Equação:

$$AMT = H_s + H_r + (h_s + h_r + h_d) \quad (2.36)$$

A (AMT) ainda pode ser calculada, aplicando-se o teorema de Bernouilli, ou seja:

$$H_t = H_c + \frac{V^2}{2g} + p + \Delta H \quad (2.37)$$

Para efeito de cálculo do reservatório (caixa de recepção), utilizou-se as fórmulas do (Randbook - Telsmith), ou seja, para a área utilizou-se a Equação:

$$A' = \frac{\pi d^2}{4} \quad (2.38)$$

Para o cálculo do volume total do reservatório ou caixa de recepção, seguindo a mesma Fonte, utilizou-se as seguintes Equações:

$$VT = (V_1 + V_2) \quad (2.39)$$

onde, os volumes parciais do reservatório, podem ser obtidos respectivamente por:

$$V_1 = \pi R^2 H \quad (2.40)$$

e

$$V_2 = \frac{1}{3} \pi H \left[(R+r)^2 - R \cdot r \right] \quad (2.41)$$

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. - Material

3.1.1 - Propriedades físico-químicas do material amostral

- Tipo: Rocha granítica ígnea intrusiva
- Peso: 1,6ton/m³
- Peso específico: 2,63
- Resistência compactação: 1750kg/cm³
- Absorção: 30%
- Teste de forma cúbica: b/a > 05 e c/a > 05
- Resistência: 9
- "Los Angeles": 41,5
- "Deval": 4,7
- Densidade (granito britado): 1,52 a 1,60
- Dureza: de dura a muito dura, 6 a 7 (MOHS)

TABELA 3.1

Escala de Mohs (grau de dureza de 1. A 10.)

DUREZA	MINERAL	DESCRIÇÃO
1.	Talco	Facilmente triturado com os dedos
2.	Gipsita	Facilmente riscado com a unha
3.	Calcita e Mica	Difícilmente riscado com a unha
4.	Fluorita	Facilmente riscado com canivete
5.	Apatita e Homblenda	Riscável com canivete
6.	Feldspato	Difícilmente riscado com canivete
7.	Quartzo	Risca vidro, riscável com aço temperado
8.	Topázio	Risca vidro, riscável com berilo (água marinha)
9.	Corundum	Risca vidro, riscável com diamante
10.	Diamante	Risca vidro

FONTE: Telesmith (Mohs scale of hardness) - 1976

3.2 - Método utilizado

A metodologia usada nos ensaios do presente trabalho, descreve uma classificação de areia artificial por hidrociclonagem, envolvendo uma situação real em circuito fechado. O modelo experimental adotado é o fenomenológico e seus parâmetros relacionados com as características geométricas do ciclone; a partir dos resultados obtidos de amostragem pré-selecionada granulometricamente, com estudo comportamental estatístico e ajuste de balanço de massas para o agregado nos os fluxos de entrada e saídas do ciclone, numa condição operacional descritiva, que consistiu em separar uma população amostral em duas outras, relacionando os parâmetros do agregado mineral e de suas variáveis, a geometria do equipamento separador.

Foram realizados ensaios experimentais em forma de testes laboratoriais, com o devido controle das condições adversas das operações unitárias. Os resultados receberam análise comparativa e posterior discussões, prevendo-se a performance e a aplicação do equipamento para separação desejada, depois de feitos os ajustes necessários ao “corte” pretendido.

3.3. - Especificações técnicas do sistema

3.3.1 - Detalhamento e corte do ciclone típico

A Figura 3.1 apresenta em detalhes o corte transversal do corpo principal do ciclone típico utilizado neste trabalho.

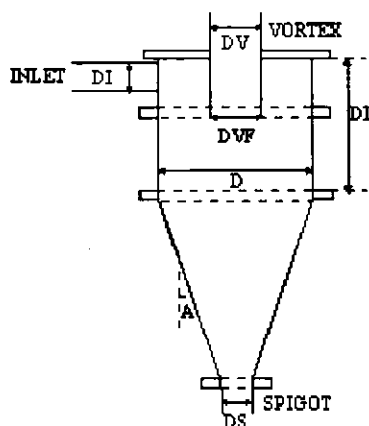


FIGURA 3.1 - Corpo principal do ciclone típico

3.3.2.- Características construtivas do circuito

A seguir apresentamos o modelo esquemático do circuito (fechado) utilizado para os experimentos realizados em laboratório, composto do corpo principal e seus subsistemas.

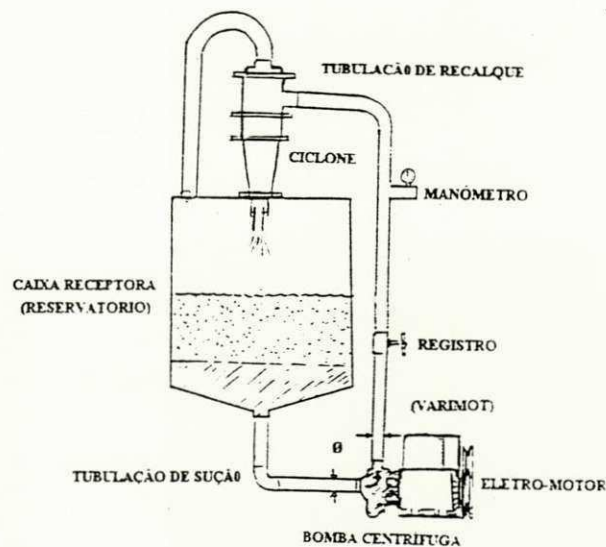


FIGURA 3.2 - Circuito fechado de hidrociclonagem

3.3.3.- Cotas do reservatório (caixa de recepção)

A Figura 3.3 apresenta o corte do reservatório com suas respectivas cotas, segundo formas de (Handbook - Telismith).

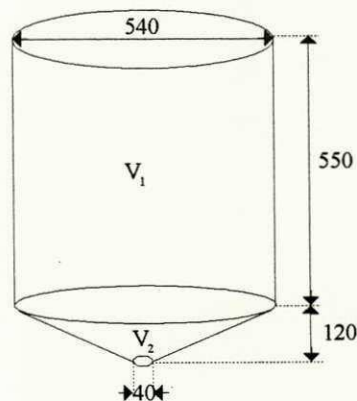


FIGURA 3.3 - Corte cotado do reservatório ou caixa de recepção

3.4. - Considerações gerais para cálculos das tubulações

Na maioria dos casos, a polpa apresenta característica heterogênea, com as partículas sólidas transportadas em suspensão, mantidas pela turbulência do fluxo. Assim para que a polpa tenha “velocidade máxima” (terminal ou crítica) de separação constante, sendo maior que aquela na qual começaria a haver sedimentação das partículas grosseiras (mais pesadas) pela ação da força gravitacional; dependerá da consideração de vários fatores, os quais os mais importantes são: o tamanho das partículas, a curva de distribuição granulométrica das mesmas, o percentual de finos menor que 200 mesh, forma das partículas, concentração de sólidos e nesta etapa o mais importante é considerar o cálculo dos diâmetros das tubulações.

A partir dos numerosos estudos já realizados pelos pesquisadores da área de recursos hídricos, com resultados emitidos em forma de equações, Tabelas e Gráficos, pode-se com o auxílio destes, efetuar “projetos de linhas“ em tubulações hidráulicas.

Recomenda-se que o projeto de linha seja feito de acordo com os diâmetros das tubulações disponíveis no mercado, de forma a se obter uma velocidade mínima de transporte de polpa, para o cálculo dos diâmetros “econômicos” das tubulações, não esquecendo-se de adotar uma margem de segurança, podendo-se para tal adotar-se o diâmetro imediatamente acima do calculado, prevendo a possibilidade de ocorrer variações consideráveis na quantidade de carga de polpa circulante no circuito.

3.4.1 - Considerações para os cálculos das tubulações do circuito de linha

No nosso caso, inicialmente foram feitos ajustes de dimensionamento, para a bomba centrífuga e circuito de linha, já instalada no (LMG), levando-se em conta a utilização da polpa (areia artificial mais água limpa) como material amostral. A capacidade volumétrica máxima instalada no projeto de linha é de 12litros, enquanto a projetada para o volume do reservatório é de 100 litros, o que nos levou a considerar um erro de “projeto”, não deixa de ser uma falha no que diz respeito as vazões estipulados inicialmente para atender o circuito do (DMG). O arranjo físico da instalação (circuito de linha e bomba), encontram-se na Figura 3.2.

3.4.2. - Cálculos dos diâmetros das tubulações de recalque e sucção

Para melhor compreensão dos cálculos dos diâmetros das tubulações, os parâmetros de cálculos bem como os dados obtidos a partir destes, foram expressos na forma de Tabela.

O dimensionamento dos diâmetros de recalque e sucção, inicia-se pelo cálculo da vazão aparente, que pode ser dado na seguinte Equação:

$$Q = V_{ol}/T \quad (3.1)$$

A partir da Equação da continuidade, adotou-se os valores de ($V_s = 2.0\text{m/s}$ e $V_r = 3.0\text{m/s}$) para o cálculo da vazão, obtendo-se os dados apresentados na Tabela 3.2.

De posse dos dados da tabela 3.2, foram feitas projeções para os volumes, estipulando-se, as vazões e respectivos diâmetros de sucção e recalque, determinando-se assim as perdas de carga equivalentes.

TABELA 3.2

Cálculo dos diâmetros das tubulações de sucção e recalque

Volume estipulado $V \times 10^3(\text{ml})$	Vazão aparente $Q (\text{m}^3/\text{s})$	Ø Sucção (Pol.)		Ø Recalque (Pol.)	
		obtido	disponível	obtido	disponível
*12	0,003	1,71	2	1,40	1 ½
22	0,006	2,43	2 ½	1,98	2
42	0,011	3,29	3 ½	2,68	3
62	0,017	4,09	4	3,34	3 ½
100	0,027	5,15	5	4,21	4 ½

*Capacidade instalada no laboratório (DMG)

TABELA 3.3

Perdas de carga equivalente em função dos diâmetros de recalque e sucção

Discriminação	Ø Recalque *	Ø Sucção *	Total (m)
1 curva 90° raio médio	1,4	—	—
1 lance (tubos)	0,34	1,35	—
2 curvas 45° com rosca	—	0,4(x2)	—
1 registro de gaveta aberto	—	0,4	—
1 Tê passagem direta	—	0,9	—
Comprimento total	1,74	3,45	5,19m

$L_t = L_s + L_r + P = 5,19m$ * (Ø Sucção = 2,0Pol. e Ø Recalque = 1,5Pol.)

NOTA: Para obtenção dos dados desta Tabela utilizou-se o (APÊNDICE B).

A perda de sucção e recalque pode ser dada pela equação:

$$h_{p(S,R)} = J \times L \quad (3.2)$$

ou ainda na forma:

$$h_{p(S,R)} = J \cdot L + (Q^2/2g) \cdot K \quad (3.3)$$

Podendo-se concluir que no nosso caso, a Perda de carga total é desprezível, ou seja, de valor insignificante para ser considerado como erro amostral.

3.4.3. - Cálculo para altura manométrica total (AMT)

No caso da altura manométrica total, ou chamada por alguns de altura geométrica total, o cálculo pôde ser efetuado pela equação:

$$AMT = h_g + (h_{ps} + h_{pr}) \quad (3.4)$$

3.4.4. - Cálculo da potência consumida pelo motor-bomba

Para o caso da potência consumida, com o peso específico da água obtido através da Tabela 3.3, utilizou-se a equação:

$$P_c = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_t}{75h} \quad (3.5)$$

TABELA 3.4

Peso específico da água em função da temperatura

Temperatura (°C)	Peso específico (kgf/m ³)	Temperatura (°C)	Peso específico (kgf/m ³)
0	999,87	36	993,72
2	999,97	38	992,99
4	1000,00	40	992,24
6	999,97	42	991,47
8	999,88	44	990,66
10	999,73	46	989,82
12	999,53	48	988,96
14	999,27	50	988,10
16	998,97	55	985,70
18	998,62	60	983,20
20	998,23	65	980,60
22	997,80	70	977,80
24	997,32	75	974,90
26	996,81	80	971,80
28	996,26	85	968,70
30	995,67	90	965,40
32	995,05	95	961,90
34	994,40	100	958,40

FONTE: Apostila do CEMI

3.4.5 - Cálculo da altura positiva do líquido de sucção (APLS)

Para o cálculo da altura positiva do líquido de sucção disponível (Equação 3.6), é recomendável que a bomba trabalhe escorvada.

$$APLSd = Hb - (hs + hps + hv) \quad (3.6)$$

Os valores da temperatura e da tensão de vapor, podem ser encontrados nos dados da Tabela 3.5.

TABELA 3.5

Pressão de vapor d'água em função da temperatura

Temperatura (°C)	Tensão de vapor (kg/cm ²)
15	0,0174
20	0,0238
25	0,0322
30	0,0429
35	0,0572
40	0,0750
45	0,0974
50	0,1255
55	0,1602
60	0,2028
65	0,2547
70	0,3175
75	0,3929
80	0,4828
85	0,5988
90	0,7149
95	0,8620
100	1,0333

FONTE: Apostila do CEMI

TABELA 3.6

Pressão atmosférica em função da altitude

Altitude (m)	m.c.a. equivalente a pressão atm.
0	10,33
300	9,96
600	9,59
900	9,22
1200	8,88
1500	8,54
1800	8,20
2100	7,89
2400	7,58
2700	7,31
3000	7,03

FONTE: Apostila do CEMI

3.4.6. - Cálculo da rotação específica da bomba

O cálculo da rotação da bomba pode ser definido segundo o manual Bombas KING, pela seguinte equação:

$$R_s = \frac{3,65 n_s \sqrt{Q}}{(H)^{3/4}} \quad (3.7)$$

Conclui-se que para $n_s > 500$ (velocidade real), segundo a metodologia adotada pela KING a bomba será de fluxo axial, aplicando-se para grandes vazões e pequena altura geométrica. A escolha de uma bomba é feita em função dos tipos de flange, rotor, e diâmetro nominal de capacidade. Alguns fabricantes oferecem manuais de especificações técnicas em forma de Tabelas e gráficos, na maioria dos casos; bastando entrar com os valores da vazão, altura manométrica e tipo de material requerido, para se obter o tipo e modelo da bomba desejada, para tipos de serviços convencionais. No caso da escolha de uma bomba para trabalhar com polpas abrasivas (pó-granítico), a literatura é muito escassa, não se tendo ainda estudos bem definidos a este respeito.

CAPÍTULO 4

DESENVOLVIMENTO E SUGESTÕES

4.1. - Introdução

O circuito de hidrociclonagem usado na fase inicial, sofreu um processo de ajustes e modificações durante os testes experimentais, visando a otimização do sistema como um todo; as modificações feitas buscaram melhorar o rendimento operacional, adequando a parte de dimensionamento e cálculos aos resultados empíricos, chegando-se assim ao modelo atual, que finaliza os ensaios.

Os diversos testes com bombas centrífugas de diferentes marcas e potências feitos na fase precedente aos ensaios experimentais, não serão detalhados, devido as mesmas se constituírem basicamente das mesmas peças e componentes, só com ligeiras modificações de um fabricante para outro. Foi dado prioridade descritiva mais detalhada a fase final do projeto com o ciclone típico, da qual obteve-se êxito.

4.2. - Análise estrutural

O circuito final de hidrociclonagem tem caixa de recepção e bomba acoplada ao eletromotor por meio de sistemas de polias com correias, foi idealizado para atender inicialmente ao arranjo físico do (DMG). Considerou-se as alterações estruturais sofridas como imprescindíveis a ordenação das fases subsequentes do projeto, para se poder variar as aplicações de cargas (percentual de sólido, vazões, dentre outras variáveis), que diferenciam dos cálculos iniciais devido as imposições tecnológicas do agregado mineral escolhido. Ressalta-se ainda a falta de recursos financeiros necessários para melhor desenvolvimento do projeto em uma versão mais otimizada, sendo assim, utilizou-se partes já existentes do circuito e projeto de linha do (LMG).

4.3. - Construção e montagem

4.3.1. - Confeção do rotor

A confecção do rotor semi-aberto foi feita na oficina mecânica do setor de mecanização agrícola (LEID) Laboratório de Engenharia, Irrigação e Drenagem do (DEAg) Departamento de Engenharia Agrícola do Campus II. Tal escolha deu-se devido a presença de pessoal técnico qualificado e especializado em recursos hídricos mecanizados, com experiência comprovada neste tipo de serviço.

A confecção propriamente dita, deu-se a partir de materiais recicláveis (sucata) pré-selecionados. O modelo escolhido foi selecionado do manual KING (bombas hidráulicas). Optou-se por um modelo que pudesse atender as necessidades impostas na fase experimental pela polpa utilizada e devido ao “projeto de linha” disponível.

A construção do rotor obedeceu as seguintes fase:

- Seleção e avaliação do estado do material reciclável (sucata);
- Torneamento do disco, com conformação e ajustes;
- Traçagem, cortes e dobragem a frio da pás diretrizes;
- Fixação das pás no disco pelo processo de Solda elétrica;
- Acabamento final.

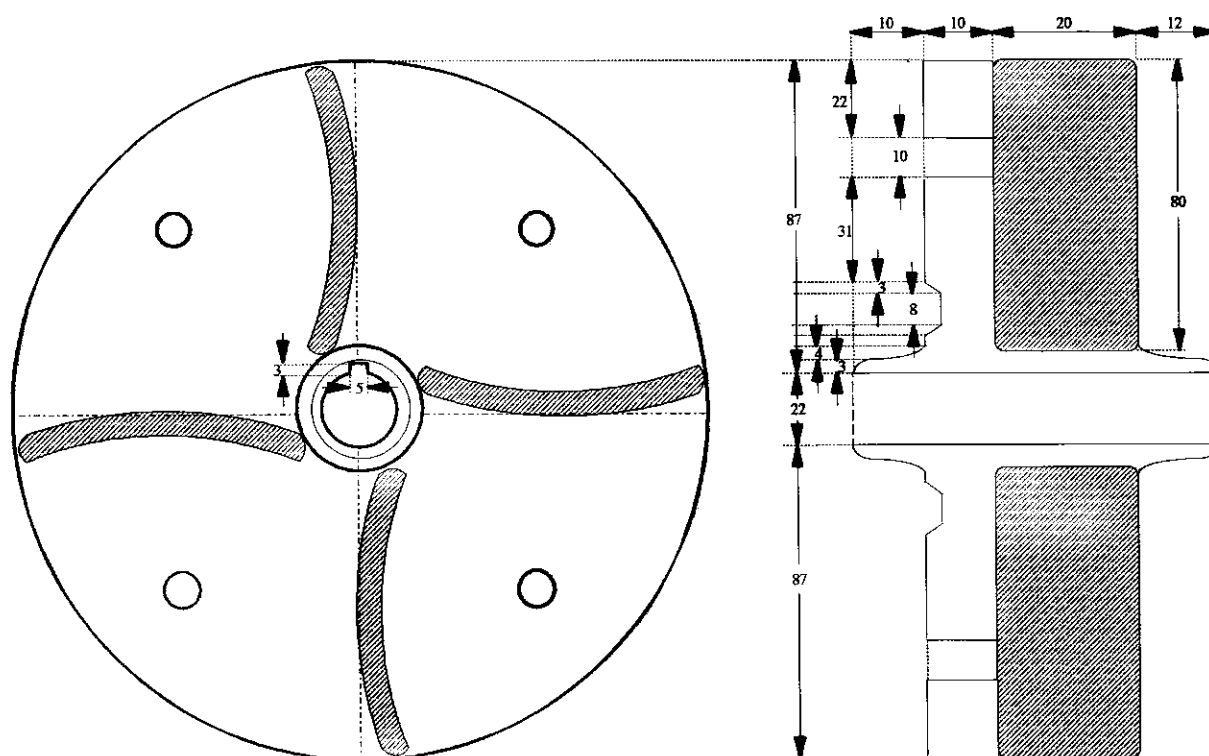
Ressaltando que as dimensões adotadas para a confecção do novo rotor foram feitas conforme as medidas do rotor original (N/366), sofrendo posterior ajustes dimensionais e geométricos necessários.

Os materiais usados na confecção do rotor, foram: disco e barra de Aço ABNT /1020, devido a sua resistência, fácil conformabilidade e relativo baixo custo comparados a outros com as mesmas propriedades. Após ter sido usinado o disco, as pás (barras) foram fixadas ao mesmo pelo processo de solda elétrica, com eletrodos do tipo (AWS EGO13/0.0032).

4.3.1.1. - Alterações realizadas no rotor:

Foi efetuado modificações no rotor original, diminuindo-se o diâmetro do rotor original de raio de 115mm, para 98mm, conseguindo-se assim reduzir a área de trituração do material (polpa) na câmara da bomba devido ao aumento do espaço interno entre a carcaça e o rotor.

Foi feito quatro furos com diâmetros de 10mm, em forma de cruz, entre as pás do disco, na tentativa de balanceamento e redução de peso conforme Figura 4.1.



Projeto: Estudo e avaliação de um separador de agregados minerais			DATA: 1996
Número de ordem	Discriminação	Quantidade	Cota: mm
01	Rotor semi-aberto	01	Esc: 1 : 2

FIGURA 4.1 - Rotor semi-aberto (confeccionado)

4.3.2. - Montagem do circuito de hidrociclonagem

O circuito disponível do (DMG), foi adaptado no laboratório de Térmica e Fluidos do Departamento de Engenharia Mecânica (LTF/DEM), o qual cedeu a bomba centrífuga, o eletromotor e o variador de velocidade, para realização dos Ensaio.

A bomba centrífuga utilizada foi da marca KING - MOD. 373 / MOD. ME / 1287.5 / Ø RT 230 / SERIE 1619/11 /ANO 87; acoplada a um eletromotor: WEG (TRIFÁSICO) MOD. 180M / 30CV / 1760RPM ; por sua vez acoplado a um variador de velocidade (eletromagnético): VARIMOT TIPO VAF -D40 / SÉRIE 86.06.22698N / FAIXA VEL. 0-1600 / 30CV / 380V / 60 HZ / TIPO CONT. IA-05.

A escolha de tais equipamentos super dimensionados, deu-se unicamente pela disponibilidade destes no laboratório do DEM. A troca do rotor original do tipo (fechado), por um modelo (semi-aberto), foi feita por ser este mais adequado na utilização em polpa abrasiva; justificando-se tal escolha, para inibir o possível desgaste prematuro na câmara da bomba, além de entupimentos no circuito. No (APÊNDICE D), encontram-se as instruções de instalação e manutenção para o motor bomba

4.4. - Otimização do sistema de hidrociclonagem

Para construção do ciclone típico, aconselha-se o uso de chapa zincada de 0.5mm de espessura; justificando-se a escolha devido a boa maleabilidade e resistência a corrosão, e facilitar a confecção dos orifícios de embocadura e descargas do material. Os parafusos podem ser de aço especial, cabeça sextavada, rosca fina medindo 25 x 13mm, para melhor fixação das partes: cilíndrica vertical e cilíndrica cônica. Os tubos utilizados para confecção dos: Inlet e Vortex finder, devem ser galvanizados para evitar desgastes prematuros e assegurar uma maior durabilidade no sistema.

Se o material disponível para confecção não for zincado ou galvanizado, adota-se o revestimento de borracha feito posterior a confecção, nas partes internas do ciclone, para se conseguir a diminuição dos desgastes quanto a corrosão e diminuir o atrito das partículas nas paredes internas do ciclone.

Lembrando que existem ciclones sintéticos disponíveis no mercado com tamanhos e formas variadas, a baixo custo, bastando para tal consultar as tabelas dos fabricantes. O jogo AKW utilizado na fase inicial deste experimento foi do tipo (polimérico).

Recomenda-se que o projeto de linha se faça em função da melhor condução possível para o fluido (polpa), de forma que deve-se observar alguns detalhes na otimização do sistema:

- Os tubos de recalque e sucção não devem ultrapassar o comprimento de 6m entre a caixa de recepção e o ciclone
- Deve-se evitar ao máximo o excesso de curvas, conexões, engates, etc., para não se acentuar as perdas e comprometer a eficiência do circuito.
- Aconselha-se o uso de registro de gaveta, e que o mesmo esteja a uma certa distância do manômetro, para minimizar erros de leitura.
- O manômetro deve ser glicerinado, pois assim diminui a oscilação do ponteiro, podendo-se fazer uma leitura de maior precisão.

A caixa de recepção ou reservatório de polpa, confeccionada de material de chapa de aço ABNT 1020 de 1/8Pol., de forma cilíndrica, medindo 1,80m de perímetro por 0,85 de altura, com capacidade aproximada para 100litros. A costura da caixa foi feita com solda elétrica (AWS EGO13 / 0,0032 bitola). É aconselhável para confecção da “caixa”, o uso de chapa zincada e/ou utilizar posterior banho de borracha, para evitar desgaste e contaminações no material a ser separado.

Foram utilizadas inicialmente abraçadeiras de sustentação do tipo comum nas partes cilíndricas de acoplamento do corpo principal do ciclone, e posteriormente substituídas pelo modelo (J 63) com dois parafusos, conseguindo-se assim minimizar os vazamentos e/ou respingos consideravelmente, dando maior segurança ao conjunto.

Uma vez definido o circuito, o mesmo deve trabalhar pelo menos 40 minutos, para atingir o regime de trabalho, ou seja, conseguir a homogeneização do material para se alcançar resultados confiáveis nas medições.

4.4.1 - Acionamento do circuito

O circuito utilizado neste trabalho, foi acionado por um conjunto (Eletromotor - Varimot) do tipo (VAF - D4-30CV), capaz de fornecer em seu eixo 1750RPM. O sistema de transmissão foi feito por polias e correias de acionamento do tipo (V), fornecendo no eixo da bomba 2100RPM, medidas a partir de um Tacômetro de ponto.

4.5. - Componentes e fases

• Fase 1-componentes

- Ciclone (AKW \varnothing 40mm), de poliuretano, das séries: (RWK-cônico), 86, 87, 88 e 89; 810 e 820. E (RWB-plano), 82, 83 e 84, com a seguinte geometria: (\varnothing do VF - 5/8, 1/2, 3/8 e 1/4Pol.); (\varnothing do ST - 3/8, 5/16, 1/4 e 3/16Pol.); (\varnothing do IL - 5/8Pol.).
- Volume utilizado na caixa receptora 10, 12, 15, 20, 50 e 100litros;
- Percentual de sólido utilizado 10, 20 e 30% do volume de fluido;
- Pressão utilizada 0,5, 1,0, 1,5, até 4,5Kgf/cm²;
- Vazão adotada 3,3litros/seg.;
- Diâmetro de sucção 2Pol. e diâmetro de recalque 1 ½ Pol.;
- Manômetro convencional, escala 0 a 7Kgf/cm².

• Descrição de peças e acessórios

- Dois lances de tubos galvanizados;
- Uma curva de 90° de raio médio com rosca;
- Duas curvas de 45° com rosca;
- Um registro de gaveta aberto, de pequeno porte 1 / 2Pol.;
- Um "Tê" passagem direta;
- Um lance de mangueira plástica "cristal", de 1 / 2Pol.;
- Comprimento total dos lances 5,20m;
- Potência do eletromotor 1CV;

- **Fase-2 componentes**

- Ciclone (TÍPICO Ø 100mm), de chapa de aço, revestido com borracha, com a seguinte geometria: (Ø do VF-35mm); (Ø do ST-20mm); (Ø do IL-35mm);
- Volume utilizado na caixa receptora inicialmente 100litros, posteriormente 50litros;
- Percentual de sólido, inicialmente 10%, posteriormente 5% do volume de fluido;
- Pressão utilizada 1,0 a 2,0Kgf/cm²;
- Vazão adotada 15,3litros/seg;
- Diâmetro de sucção 2Pol. e diâmetro de recalque 1 ½ Pol.;
- Manômetro glicerinado, escala 0 a 7Kgf/cm²;

- **Descrição de peças e acessórios**

- Um lance de tubo de PVC 2Pol.;
- Um lance de mangueira plástica espiroflex de alta pressão, 2Pol.;
- Uma curva de 90° com rosca;
- Uma redução de 2 para 1 ½ Pol.;
- Um registro de gaveta aberto 2Pol.;
- Um Tê de passagem direta 1 ½ Pol.;
- Um tubo adaptador para o manômetro acoplado ao "Tê";
- Comprimento total dos lances de tubos 3.50m;
- Potência do eletromotor 30CV;

4.6 - Testes de operação

Os teste realizados na fase 1, com o KIT de laboratório (AKW Ø 40mm), cujas especificações técnicas encontram-se no (APÊNDICE C), não mostraram resultados satisfatório de "corte de partição", devido em parte, ao diâmetro do cilindro vertical não atender as necessidades de separação imposta pelo material (pó granítico), impossibilitando as forças internas do ciclone atuarem na separação das partículas e também devido a pequena vazão oferecida pelo conjunto, em função da capacidade de linha instalada. No Capítulo 5, será apresentado de forma detalhada os testes operacionais que obtiveram êxitos nos resultados

4.6.1. - Conclusão dos testes de operação

Durante a fase de testes, foi observado que as “micas” ou seja, a concentração de feldspatos de frações finas, possuíam a tendência de agregar-se nas bolhas de ar, formadas em parte, devido ao material “graxoso” desprendido pela gaxeta no circuito. Tal questão foi levantada na fase experimental.

Desta forma fica em aberto, a possibilidades de estudos para uma análise mais criteriosa a este respeito em trabalhos futuros e a sugestão para uma nova aplicação do ciclone em “pré-concentração”.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCURSÕES

5.1 - Introdução

Utilizou-se inicialmente um ciclone do tipo (AKW), operando em circuito fechado. A amostra foi coletada de uma correia transportadora, na Pedraç Pedreira Queimadas BR-104 Km 61. A amostra foi pré selecionada (granulométricamente) em função dos diâmetros do ciclone, (AKW) e posteriormente do ciclone (típico). A granulometria do material inicialmente utilizada para os testes está abaixo de (2362 microns). A análise granulométrica final do material testado, está na faixa de 20 a 200 mesh, que seguramente é uma boa faixa para se trabalhar com ciclonagem. A alimentação do ciclone foi feita com material granítico e o meio fluido (água limpa).

Os resultados amostrais, foram obtidos a partir dos parâmetros: (vazão, percentagem de sólidos, pressão e geometria do ciclone), e foram adequados visando a obtenção de valores mais confiáveis na tentativa de satisfazer as equações de Lynch e Rao.

Às condições operacionais adotadas para tal experimento, foram adequadas em função da geometria do ciclone e das variáveis operacionais de processos do mesmo, cujos resultados descrevem os valores observados e ajustados em formas de tabelas e gráficos.

No delineamento experimental, os dados estudados sofreram análises estatísticas, (média gráfica, desvio padrão, grau de assimetria e curtose) obedecendo-se o modelo geoestatístico para tratamento de minérios, obtendo-se a tendência dos grãos e o seu comportamento gráfico.

5.2. - Ensaio de laboratório para o kit AKW e o ciclone típico)

TABELA 5.1

Análise granulométrica preliminar para estudo comportamental (Ensaio 1)

Peneiras #(mesh)	Peso da amostra (g)	(%) Retido	(%) Acumulado	(%) Passante
8	89,0	17,8	17,8	82,2
12	32,0	6,4	24,2	75,8
16	17,0	3,4	27,6	72,4
20	23,0	4,6	32,2	67,8
35	38,0	7,6	39,8	60,2
50	46,0	9,2	49,0	51,0
70	40,0	8,0	57,0	43,0
100	72,0	14,4	71,4	28,6
140	39,0	7,8	79,2	20,8
-140	104,0	20,8	100,0	0,0
Total	500	100	—	—

DATA/HORA: 24/03/1995 - 8:40h

Descrição: Peso total da amostra (500g), mistura do agregado mineral (pó granítico), quarteado, não lavado e peneirado (Série ABNT)

O Gráfico a seguir apresenta o balanço de massas para cada fração retida nas suas respectivas peneiras, utilizando-se os dados do Ensaio 1

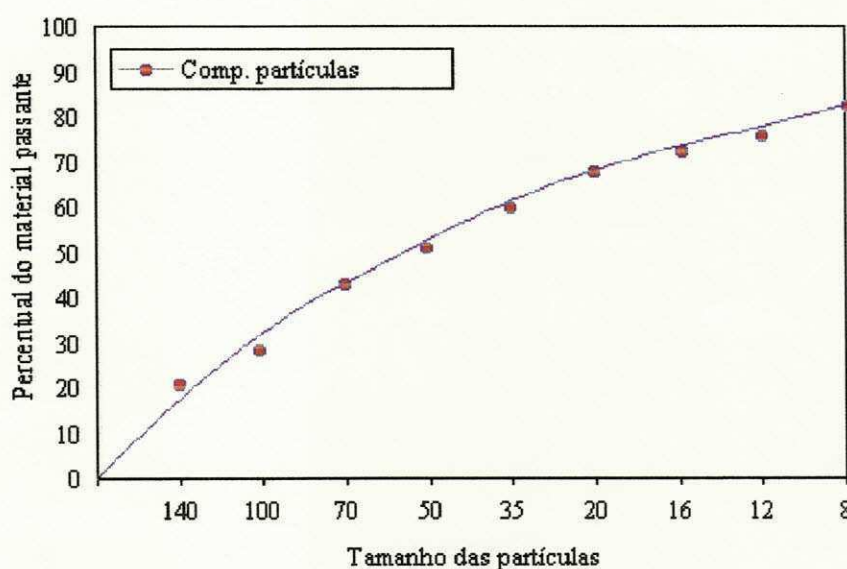


GRÁFICO 5.1 - Comportamento gráfico da análise granulométrica do (Ensaio 1)

TABELA 5.2

Análise granulométrica preliminar para estudo comportamental (Ensaio 2)

Peneiras #(mesh)	Peso da amostra (g)	(%) Retido	(%) Acumulado	(%) Passante
8	—	—	—	100,0
10	174,0	28,33	28,33	71,67
14	34,0	5,53	33,86	66,14
20	26,0	4,23	38,09	61,91
32	21,0	3,42	41,51	58,49
48	41,0	6,67	48,18	51,81
65	55,0	8,95	57,13	42,86
100	46,0	7,49	64,62	35,37
150	95,0	15,47	80,09	19,91
200	56,0	9,12	89,21	10,78
270	43,0	7,00	96,21	3,78
325	19,0	3,00	99,21	0,79
-325	4,0	0,65	99,86	0,14
Total	614,0	99,86	—	—

DATA/HORA: 25/04/1995 - 9:00h

Descrição: Peso total da amostra (614g), mistura do agregado mineral (pó-granítico), quarteado, lavado e seco e peneirado (Série Tyler)

O Gráfico a seguir apresenta o balanço de massas para cada fração retida nas suas respectivas peneiras, utilizando-se os dados do Ensaio 2

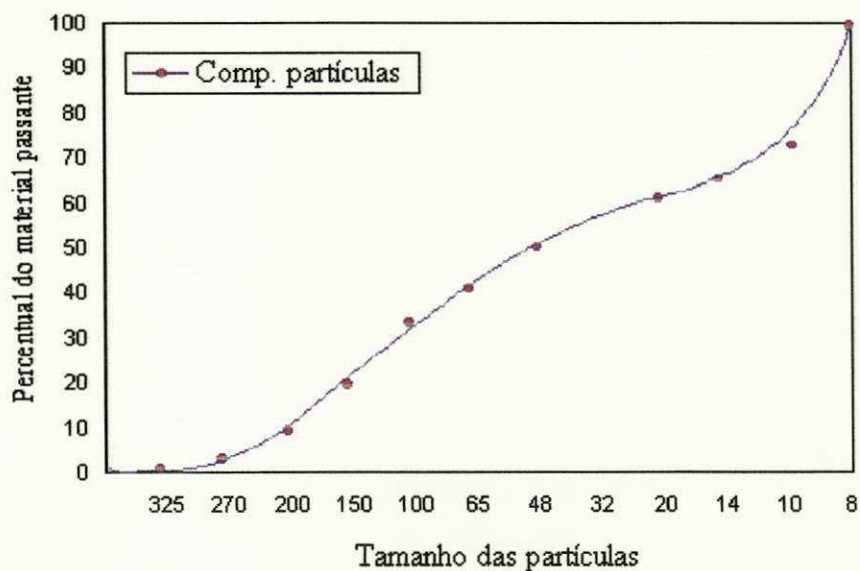


GRÁFICO 5.2 - Comportamento gráfico da análise granulométrica do (Ensaio 2)

TABELA 5.3

Análise granulométrica preliminar para estudo comportamental (Ensaio 3)

Peneiras #(mesh)	Peso da amostra (g)	(%) Retido	(%) Acumulado	(%) Passante
8	56,5	7,73	7,73	92,26
14	125,5	17,17	24,90	75,09
20	65,3	8,93	33,83	66,16
32	94,7	12,95	46,79	53,20
48	105,0	14,36	61,15	38,84
100	146,2	20,00	81,15	18,84
200	72,0	9,85	91,01	8,98
325	31,0	4,24	95,25	4,74
-325	34,7	4,74	99,99	—
Total	730,9	99,99	—	—

DATA/HORA: 08/05/1995 - 10:00h

Descrição: Peso total da amostra (730,9g), mistura do agregado mineral (pó-granítico), não quarteado, lavado e seco e peneirado (Série Tyler)

O Gráfico a seguir apresenta o balanço de massas para cada fração retida nas suas respectivas peneiras, com resultados expressos em percentagem, utilizando-se os dados do Ensaio 3.

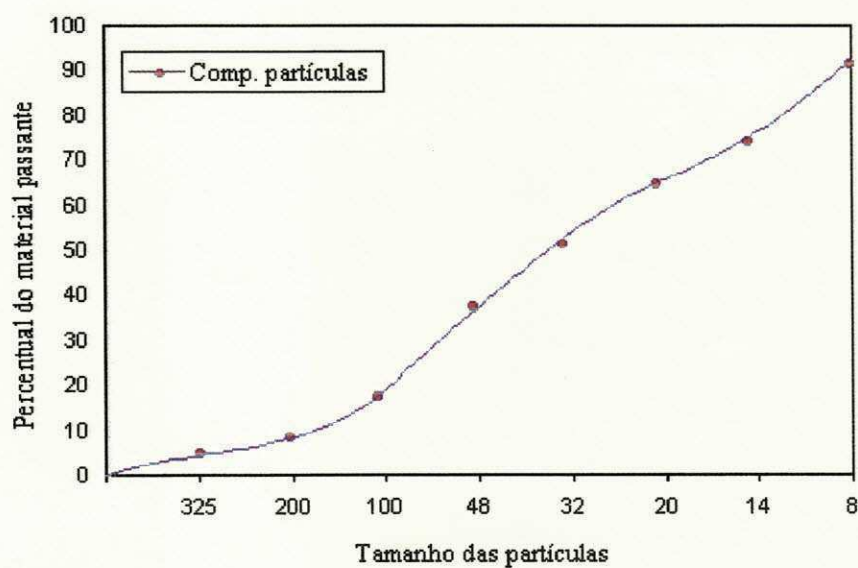


GRÁFICO 5.3 - Comportamento gráfico da análise granulométrica do (Ensaio 3)

TABELA 5.4

Análise granulométrica preliminar para estudo comportamental (Ensaio 4)

Peneiras #(mesh)	Peso da amostra (g)	(%) Retido	(%) Acumulado	(%) Passante
8	—	—	—	100
14	199,9	13,03	13,03	86,97
20	130,4	8,50	21,53	78,47
32	274,0	17,86	39,39	60,61
48	350,4	22,84	62,23	37,77
100	294,9	19,22	81,45	18,55
200	175,2	11,42	92,87	7,13
325	78,0	5,08	97,95	2,05
-325	31,0	2,01	99,96	0,04
Total	1.533.8	99,96	—	—

DATA/HORA: 23/06/1995 - 10:00h

Descrição: Peso total da amostra (1.533.8g), mistura do agregado mineral (pó granítico), quarteado, não lavado e seco e peneirado (Série Tyler)

O Gráfico a seguir apresenta o balanço de massas para cada fração retida nas suas respectivas peneiras, com resultados expressos em percentagem, utilizando-se os dados do Ensaio 4

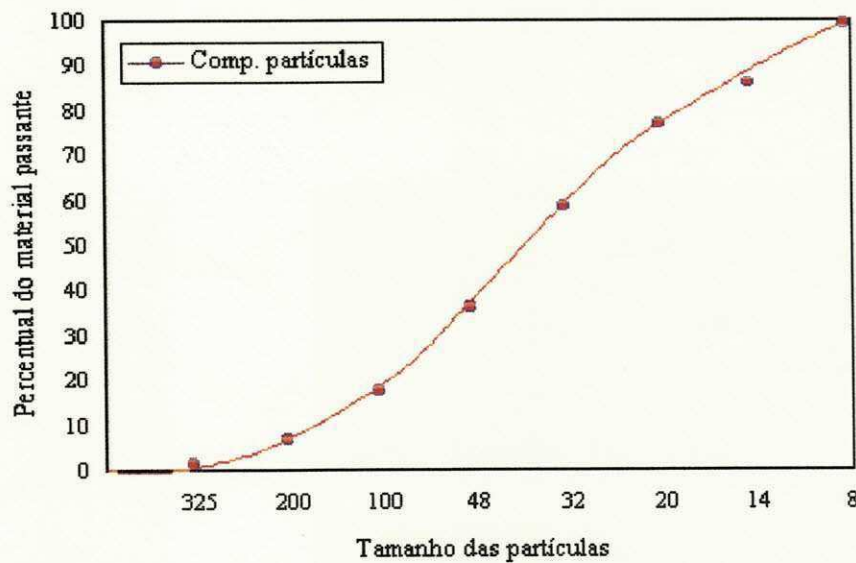


GRÁFICO 5.4 - Comportamento gráfico da análise granulométrica do (Ensaio 4)

5.3. - Probabilidade aritmética da granulometria

TABELA 5.5

Conversão probabilística das partículas (Ensaio 3 e 4)

Microns	ϕ das partículas			TAB. 5.3	TAB. 5.4
	#(mesh)	(mm)	(y)	%R. A.	% R. A.
2362	8	2,380	-1,25	7,73	—
1168	14	1,190	-0,25	24,90	13,03
833	20	0,840	+0,25	33,83	21,53
602	32	0,500	+1,00	46,79	39,39
295	48	0,297	+1,75	61,15	62,23
147	100	0,149	+2,75	81,15	81,45
74	200	0,074	+3,75	91,01	92,87
44	325	0,044	+4,50	95,25	97,95
-44	—	—	—	99,99	99,96

FONTE: Journal of sedimentary petrology inman, D.L., 1952, jour. sed. pet. v.22, N°3.

O Gráfico a seguir mostra o comportamento probabilístico dos Ensaio 3 e 4

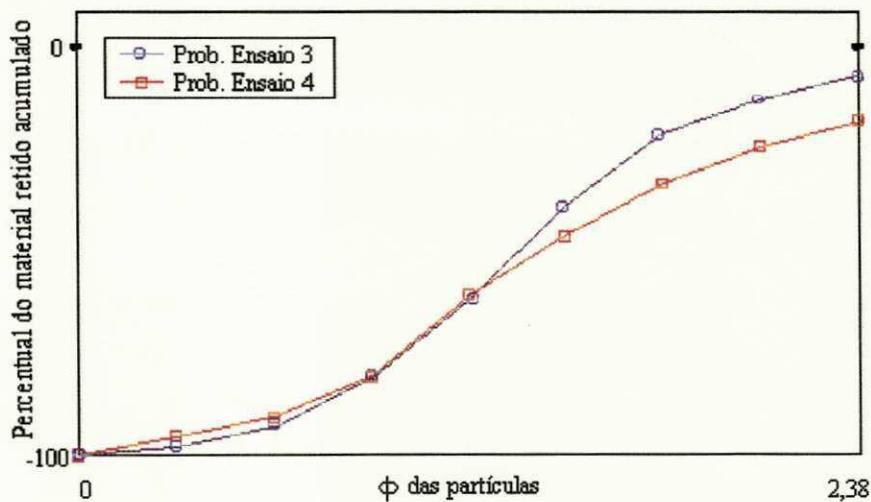


GRÁFICO 5.5 - Conversão gráfica da probabilidade aritmética (Ensaio 3 e 4)

De acordo com o comportamento do estudo estatístico realizado na amostra do Ensaio 4, a partir do gráfico de conversão probabilística do APÊNDICE A, obteve-se o seguinte resultado:

– Média gráfica

$$MG = \frac{y_{16} + y_{50} + y_{84}}{3} = 1,5 \phi$$

– Desvio Padrão

$$\sigma = \frac{y_{84} - y_{16}}{4} + \frac{y_{95} - y_5}{6,6} = 1,7405 \phi.$$

Se $\sigma < 0,35 \phi$ (grãos uniformes), se $\sigma > 0,35 \phi$ (grãos disformes)

– Grau de assimetria

$$SK = \frac{y_{16} + y_{84} - 2y_{50}}{2(y_{84} - y_{16})} + \frac{y_5 + y_{95} - 2y_{50}}{2(y_{95} - y_5)} = 0,0083 \phi$$

Se ($SK < 0,9$) o comportamento da curva é platicurtica tendendo a normal

– Curtose

$$K = \frac{y_{95} - y_5}{2,44(y_{75} - y_{25})} = 0,8354 \phi$$

Se ($K < 3$) curva leptocurtica tendendo a simetria.

A seguir encontram-se tabelados os dados obtidos a partir da análise granulométrica do Ensaio 4, para efeito de cálculo da curva de partição.

TABELA 5.6

Resultados experimentais dos produtos de overflow e underflow (Ensaio 4)

Descrição	Alimentação	Overflow	Underflow
Quantidade de sólidos (g)	1.533,8	1	31
Volume de água (ml)	60.000	1000	1000
Taxa de sólidos (%)	2,48	0,0016	0,0503
Vazão volumétrica mássica (m ³ /seg.)	0,017	—	—

TABELA 5.7

Ciclonagem do material (Ensaio 4)

#(mesh)	Microns (μ)	(%)Alimentação	(%)Overflow	(%)Underflow
8	2362	—	—	—
14	1168	13,03	—	9,67
20	833	8,50	—	19,35
32	602	17,86	—	29,03
48	295	22,84	—	12,90
100	147	19,22	—	6,45
200	74	11,42	—	9,67
325	44	5,08	—	6,45
-325	44	2,01	1	6,45

DATA/HORA: 29/06/1995 - 10:00h

Descrição: O hidrociclone operou em circuito fechado com a seguinte geometria: diâmetro do vortex 5/8", diâmetro do spigot 1/4", pressão 16lbf/pol², densidade do material sólido (1,52 a 1,60g/cm³, densidade do fluido 0,9956kg/m³, peso da amostra (1533,8g), sem corte de partição. (Para o Kit AKW)

A seguir figura explicativa do Kit "AKW", para ensaios de laboratórios.

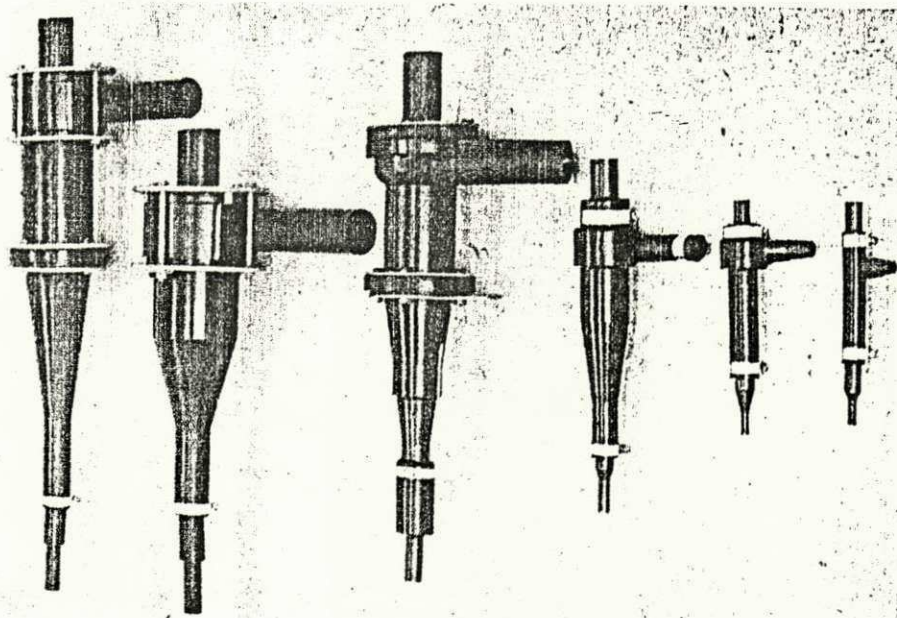


FIGURA 5.1 - Kit de ciclones "AKW"

TABELA 5.8

Análise granulométrica para estudo comportamental (Ensaio 5)

Peneiras #(mesh)	Peso da amostra (g)	(%) Retido	(%) Acumulado	(%) Passante
10	—	—	—	100
20	190,0	19,0	19,0	81,0
32	167,0	16,7	35,7	64,3
48	214,0	21,4	57,1	42,9
100	271,0	27,1	84,2	15,8
200	119,0	11,9	96,1	3,9
-200	39,0	3,90	100,0	0,0
Total	1.000	100,0	—	—

DATA/HORA: 06/07/1995 - 10:00h

Descrição: Peso do material sólido (1.000g), mistura do agregado mineral (pó granítico), quarteado, não lavado e seco e peneirado (Série Tyler)

O Gráfico a seguir apresenta o balanço de massas para cada fração retida nas suas respectivas peneiras, com resultados expressos em percentagem, utilizando-se os dados do Ensaio 5.

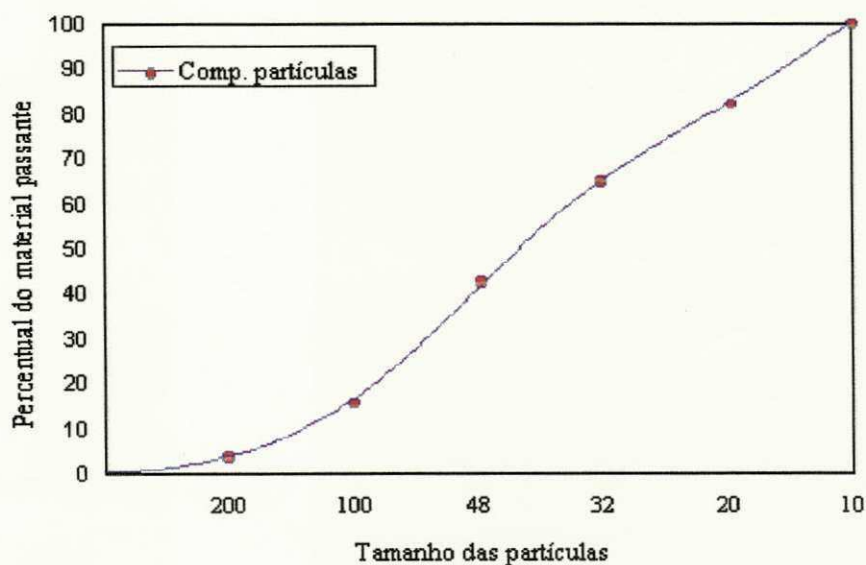


GRÁFICO 5.6 - Comportamento gráfico da análise granulométrica do (Ensaio 5)

TABELA 5.9

Conversão probabilística das partículas (Ensaio 5)

ϕ das partículas				TAB. 5.8
Microns	#(mesh)	(mm)	(y)	%R. A.
1964	10	1,680	-0,75	—
833	20	0,840	+0,25	19,0
602	32	0,500	+1,00	35,7
295	48	0,297	+1,75	57,1
147	100	0,149	+2,75	84,2
74	200	0,074	+3,75	96,1
—	-200	—	—	100,0

FONTE: Journal of Sedimentary Petrology Inman, D.L., 1952, jour. sed. pet. v.22, N°3.

O Gráfico a seguir mostra o comportamento probabilístico dos Ensaio 5

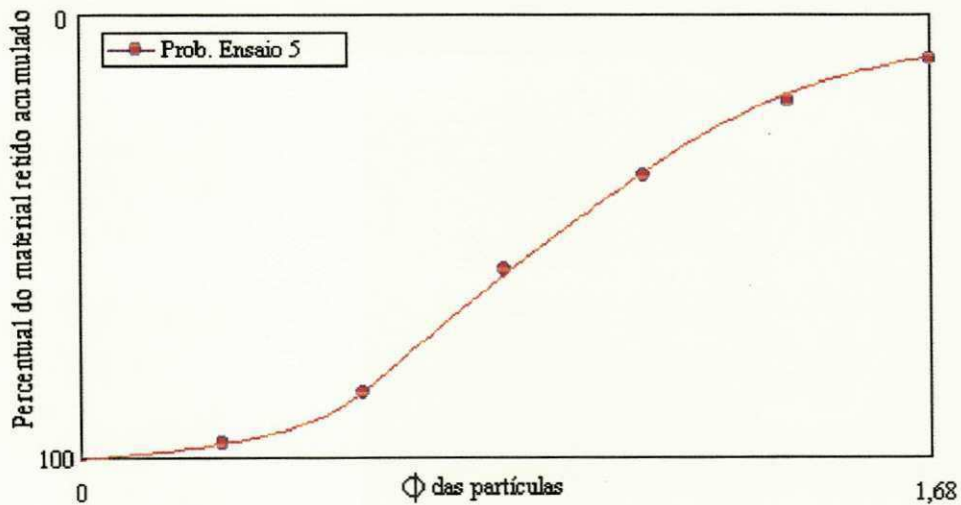


GRÁFICO 5.7 - Conversão gráfica da probabilidade aritmética (Ensaio 5)

De acordo com o comportamento do estudo estatístico realizado nas amostras do Ensaio 5, obteve-se como resultado o seguinte:

– Média gráfica

$$MG = 1,15\phi$$

– Desvio Padrão

$$\sigma = 1,54\phi$$

Se $\sigma < 0,35\phi$ (grãos uniformes), se $\sigma > 0,35\phi$ (grãos disformes)

– Grau de assimetria

$$SK = 0,18\phi$$

Se ($SK < 0,9$) o comportamento da curva é platicurtica tendendo a normal

– Curtose

$$K = 0,6305\phi$$

Se ($K < 3$) curva leptocurtica tendendo a simetria.

TABELA 5.10

Análise granulométrica para estudo comportamental (Ensaio 6)

Peneiras #(mesh)	Alim (g)	(%) Ret.	(%) Acum.	(%) Pas.	UF (g)	UF (%)	OF (g)	OF (%)	Part. (g)
8	—	—	—	100	—	—	—	—	—
10	572,0	12,48	12,48	87,52	1,0	—	0,5	—	—
14	329,0	7,18	19,66	80,34	3,0	—	2,0	—	—
20	196,0	4,27	23,93	76,07	12,0	—	6,0	—	—
32	660,0	14,41	38,34	61,66	72,0	—	33,0	—	—
48	856,0	18,68	57,02	42,98	61,0	—	32,0	—	—
100	1184,0	25,85	82,87	17,13	45,0	—	40,0	—	—
200	516,0	11,26	94,13	5,87	10,0	—	18,0	—	—
-200	267,0	5,82	99,95	0,05	2,0	—	6,0	—	—
Total	4580,0	—	—	—	118	—	64,0	—	—
% vol. sól.	4,58	—	—	—	—	2,57	—	1,39	—
Vol. liq. (l)	100	—	—	—	—	—	—	—	—
P. (kgf/cm ²)	0,8	—	—	—	—	—	—	—	—
M. liq. (ml)	—	—	—	—	—	—	—	—	—

DATA/HORA: 26/01/1996 - 10:00h

(SEM CORTE DE PARTIÇÃO)

Descrição: O hidrociclone (típico), operou em circuito fechado com a seguinte geometria: diâmetro do inlet (3,5cm) diâmetro do vortex (3,5cm), diâmetro do spigot (2,0cm)", pressão (0,2; 0,4; 0,6 e 0,8kgf/cm²), densidade do material sólido (1,52 a 1,60g/cm³), densidade do fluido (0,9956kg/m³), peso da amostra (4580g) e o volume do reservatório (100litros).

TABELA 5.11

Análise granulométrica para estudo comportamental (Ensaio 7)

Peneiras #(mesh)	Alim (g)	(%) Ret.	(%) Acum.	(%) Pas.	UF (g)	UF (%)	OF (g)	OF (%)	Part. (g)
8	—	—	—	100	—	—	—	—	—
10	570,0	13,45	13,45	86,55	—	—	—	—	—
14	324,0	7,64	21,09	78,91	2	—	1	—	—
20	178,0	4,20	25,29	74,71	9	—	3	—	—
32	555,0	13,10	38,39	61,61	44	—	25	—	—
48	763,0	18,01	56,39	43,61	39	—	30	—	—
100	1099,0	25,94	81,79	18,21	48	—	39	—	—
200	488,0	11,52	93,31	6,69	20	—	12	—	—
-200	259,0	6,11	99,42	0,58	5	—	4	—	—
Total	4236,0	—	—	—	167	—	114	—	—
% vol. sól.	4,23	—	—	—	—	3,94	—	2,69	—
Vol. líq. (l)	100	—	—	—	—	—	—	—	—
P. (kgf/cm ²)	1,0	—	—	—	—	—	—	—	—
M. líq. (ml)	—	—	—	—	—	—	—	—	—

DATA/HORA: 26/01/1996 - 10:00h

(SEM CORTE DE PARTIÇÃO)

Descrição: O hidrociclone (típico), operou em circuito fechado com a seguinte geometria: diâmetro do vortex (3,5cm), diâmetro do spigot (2,0cm), pressão (0,6; 0,8 e 1,0kgf/cm²), densidade do material sólido (1,52 a 1,60g/cm³), densidade do fluido (0,9956kg/m³), peso da amostra (4236,0g) e o volume do reservatório (100litros).

TABELA 5.12

Análise granulométrica para estudo comportamental (Ensaio 8)

Peneiras #(mesh)	Alim (g)	(%) Ret.	(%) Acum.	(%) Pas.	UF (g)	UF (%)	OF (g)	OF (%)	Part. (g)
8	—	—	—	100	—	—	—	—	—
10	573,0	11,77	11,77	88,23	1	—	—	—	—
14	334,0	6,86	18,63	81,37	2	—	3	—	—
20	210,0	4,31	22,94	77,06	10	—	4	—	—
32	732,0	15,04	37,98	62,02	55	—	17	—	—
48	923,0	18,97	56,95	43,05	47	—	20	—	—
100	1268,0	26,06	83,01	16,99	56	—	28	—	—
200	545,0	11,20	94,21	5,79	16	—	13	—	—
-200	280,0	5,75	99,96	0,04	5	—	8	—	—
Total	4.865,0	—	—	—	192	—	93	—	—
% vol. Sól.	4,86	—	—	—	—	3,90	—	1,91	—
Vol. líq. (l)	100	—	—	—	—	—	—	—	—
P. (kgf/cm ²)	1,0	—	—	—	—	—	—	—	—
M. líq. (ml)	3.295,3	—	—	—	130	—	63	—	—

DATA/HORA: 27/01/1996 - 10:00h

(SEM CORTE DE PARTIÇÃO)

Descrição: O hidrociclone (típico), operou em circuito fechado com a seguinte geometria: diâmetro do vortex (2,5cm), diâmetro do spigot (2,0cm), pressão (0,6; 0,8 e 1,0kgf/cm²), densidade do material sólido (1,52 a 1,60g/cm³), densidade do fluido (0,9956kg/m³), peso da amostra (4865,0g) e o volume do reservatório (100litros).

TABELA 5.13

Análise granulométrica para estudo comportamental (Ensaio 9)

Peneiras #(mesh)	Alim (g)	(%) Ret.	(%) Acum.	(%) Pas.	UF (g)	UF (%)	OF (g)	OF (%)	Part. (%)
20	—	—	—	100	—	—	—	—	0,0
32	148,0	19,55	19,55	80,45	16,0	4,54	—	—	10,81
48	260,0	34,34	53,89	46,11	82,0	23,29	1,0	2,94	31,53
100	255,0	33,68	87,57	12,43	165,0	46,87	6,0	17,64	64,70
200	80,0	10,56	98,13	1,87	76,0	21,59	20,0	58,82	95,00
-200	14,0	1,84	99,97	0,03	13,0	3,69	7,0	20,58	92,00
Total	757,0	99,97	—	—	352,0	—	34,0	—	—
% vol. Sól.	1,49	—	—	—	0,70	—	0,07	—	—
Vol. líq. (l)	50	—	—	—	—	—	—	—	—
P. (kgf/cm ²)	1,5	—	—	—	—	—	—	—	—
M. líq. (ml)	512,55	—	—	—	283,3	—	23,0	—	—

DATA/HORA: 29/01/1996 - 10:00h

Descrição: O hidrociclone (típico), operou em circuito fechado com a seguinte geometria: diâmetro do vortex (2,5cm), diâmetro do spigot (1,5cm), pressão (de 1,0 a 1,5kgf/cm²), densidade do material sólido (1,52 a 1,60g/cm³), densidade do fluido (0,9956kg/m³), peso da amostra (757,0g) e o volume do reservatório é de (50litros).

O Gráfico a seguir apresenta o balanço de massas para cada fração retida nas suas respectivas peneiras, com resultados expressos em percentagem, utilizando-se os dados do Ensaio 9.

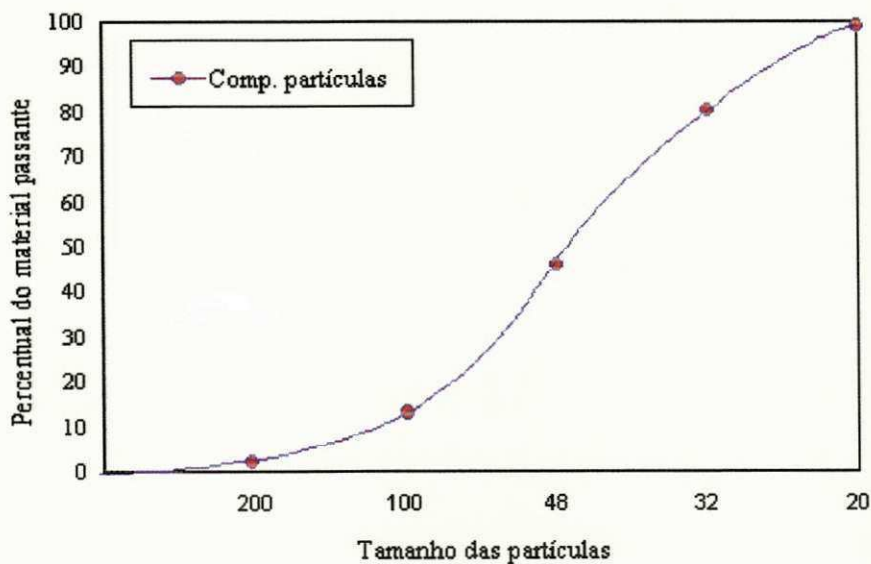


GRÁFICO 5.8 - Comportamento gráfico da análise granulométrica do (Ensaio 9)

O Gráfico a seguir apresenta o comportamento da curva de partição evidenciando as tendências das partículas, que vão para os UF e OF nas respectivas faixas com diâmetro de corte de 58# (0,359mm), utilizando-se os dados do Ensaio 9.

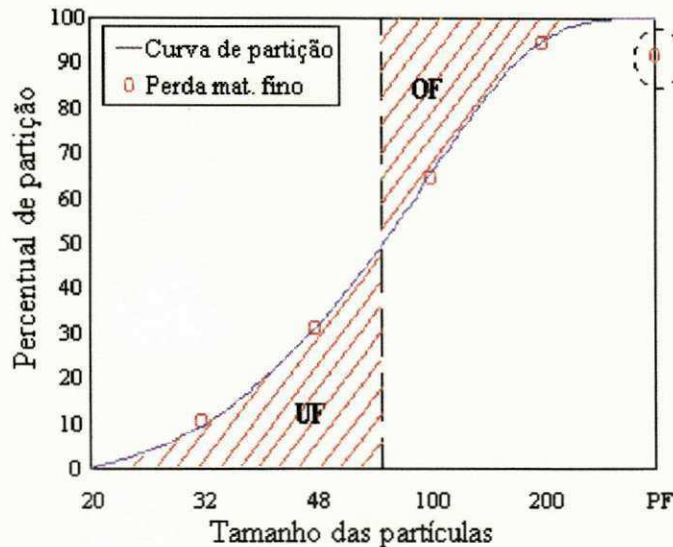


GRÁFICO 5.9 - Comportamento gráfico da curva de partição (Ensaio 9)

Na fase final de testes, verificou-se que a bomba apresentou elevado índice de vibração, a medida que se aumentava a pressão no circuito, comprometendo os dados de leitura e ocasionando desgaste pré-maturo da gaxeta, ocasionando a perda de material fino (< 200#), em aproximadamente 250g / 50litros de polpa, justificando-se tal afirmativa no ponto "PF", do Gráfico 5.9.

5.4. - Conjunto de equações de (Lynch e Rao)

O desenvolvimento do conjunto de equações de (Lynch e Rao), descrevem os parâmetros de mudança da curva de eficiência em função da geometria do ciclone e da alimentação ou seja, das variáveis de processo.

De acordo com (LIRA-1994), as Equações apresentadas na Tabela 5.14, possuem constantes empíricas próprias e podem ter aplicações particulares para cada caso que se faça necessário.

TABELA 5.14

Parâmetros das equações de (Lynch e Rao)

Constantes	Operação	Ajuste	Geometria	Correção
$P^{-0,5} = K_Q$	$\cdot \partial^{-0,5} Q^{-1}$	$\cdot V^{0,6}$	$\cdot I^{0,45} \cdot L^{0,2} \cdot \hat{A}^{-0,1}$	$\cdot D^{-0,15}$
$d = K_d D$	$\cdot \beta^{0,93} \cdot \gamma^{-0,22}$	$\cdot V^{0,52} \cdot S^{-0,47}$	$\cdot I^{-0,5} \cdot L^{0,2} \cdot \hat{A}^{0,15}$	$\cdot D^{-0,65}$
$1-c = K_w$	$\cdot \beta^{0,26} \cdot \gamma^{-0,53}$	$\cdot V^{-1,19} \cdot S^{2,39}$	$\cdot I^{-0,5} \cdot L^{0,22} \cdot \hat{A}^{-0,24}$	
$Q_u/Q = K_v$	$\cdot \gamma^{-0,31}$	$\cdot V^{-0,94} \cdot S^{1,83}$	$\cdot I^{-0,25} \cdot L^{0,22} \cdot \hat{A}^{-0,24}$	
$\beta = \alpha/(1-\alpha)^3$				
$\gamma = p/(\hat{\rho}g D)$				

Os dados utilizados para cálculos das constantes usadas nas equações de Lynch e Rao, da Tabela 5.14, encontram-se descritos a seguir:

$$\begin{array}{lll} \alpha = 0,0102 & \hat{\rho} = 1,56\text{g/cm}^3 & P = 7,0\text{psi} \\ Q = 14,09\text{m}^3/\text{s} & Q_u = 7,04\text{m}^3/\text{s} & D = 0,1016\text{m} \\ V/D = 0,25\text{m} & S/D = 0,15\text{m} & \hat{A} = 15^\circ \\ I/D = 0,34\text{m} & L/D = 2,06\text{m} & g = 9,81\text{m/s}^2 \end{array}$$

Resultado dos cálculo das constantes usadas nas equações da Tabela 5.14

$$\begin{array}{lll} K_Q = 16,53 \times 10^{-1} & K_d = 40,30 \times 10^{-8} & K_w = 14,83 \times 10^2 \\ K_v = 52,12 \times 10^{-7} & \beta = 10,30 \times 10^{-3} & \gamma = 31,07 \times 10^2 \\ \alpha = 10,10 \times 10^{-3} & c = 44,90 \times 10^{-3} & d = 0,000359\text{m} \end{array}$$

5.4.1. - Sugestões para ajustes nas equações de Lynch e Rao

Tais parâmetros podem ser ajustados, para obter-se novas constantes correspondentes para uma determinada aplicação. Uma vez determinadas estas constantes, podemos calcular qualquer uma das variáveis relacionadas nas mesmas, isto é, simular novas condições e prever a performance do equipamento com a possibilidade de uma nova extensão aplicativa, sendo chamado neste caso de equações de ajustes de parâmetros.

No desenvolvimento do novo conjunto de equações, descrevem-se novos parâmetros de mudança para a curva de eficiência, em função da geometria do ciclone e da alimentação; no caso dos valores (c) e (d), estes predizem a curva de eficiência, que juntamente com os outros valores dão os cálculos das novas constantes requeridas nas Equações de ajustes.

TABELA 5.15

Parâmetros das equações de ajustes (Lynch e Rao)

Constantes	Operação	Ajuste	Geometria	Correção
$P^{-0,5} = K_Q$	$\cdot \partial^{-0,5} \cdot q^{-1}$	$\cdot DV^{0,6}$	$\cdot DI^{0,45} \cdot DL^{0,2} \cdot \hat{A}^{-0,1}$	$\cdot D^{-0,15}$
$d = K_d *$	$\cdot \beta^{0,93} \cdot q^{-0,44}$	$\cdot DV^{0,784} \cdot DS^{-0,47}$	$\cdot DI^{-0,302} \cdot DL^{0,288} \cdot \hat{A}^{0,15}$	$\cdot D^{0,504}$
$1-c = K_w *$	$\cdot \beta^{0,26} \cdot q^{-1,06}$	$\cdot DV^{-0,554} \cdot DS^{2,39}$	$\cdot DI^{-0,023} \cdot DL^{0,432} \cdot \hat{A}^{-0,346}$	$\cdot D^{0,371}$
$Q_u/Q = K_v *$	$\cdot q^{-0,62}$	$\cdot DV^{-0,94} \cdot DS^{1,83}$	$\cdot DI^{-0,029} \cdot DL^{0,344} \cdot \hat{A}^{-0,302}$	$\cdot D^{0,217}$
$\beta = \alpha/(1-\alpha)^3$				
$q = Q/D^2$				

$$K_Q = \text{constante}, \quad K_d * = K_d \cdot (k_Q)^{0,44} \cdot g^{0,22}, \quad K_w * = K_w \cdot (K_Q)^{1,06} \cdot g^{0,55}, \quad K_v * = K_v \cdot (K_Q)^{0,62} \cdot g^{0,31}$$

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1. - Conclusões

Podemos concluir neste trabalho, que o diâmetro da porção cilíndrica vertical do corpo principal do ciclone, tornou-se o parâmetro geométrico de efeito prático mais importante, pois foi responsável pelo comando do diâmetro de classificação final de corte, e também responsável pela variação da capacidade volumétrica (vazão). Sem esquecer também, que foi o parâmetro referencial para escolha dos diâmetros finais dos: votex, vortex finder e spigot, porém em menor escala.

Analisando as diversas etapas do presente estudo, podemos concluir que a ciclonação pode substituir com vantagens os procedimentos convencionais de seleção e classificação de areia artificial, sendo a mesma perfeitamente viável na substituição da areia natural.

O ciclone sob o ponto de vista técnico, apresenta vantagens por ser um equipamento simples, de fácil manuseio e operação, necessitando apenas de uma bomba centrífuga para acioná-lo, oferecendo uma boa eficiência na classificação de agregados minerais.

O uso do ciclone mostrou-se adequado, eficiente e rápido, para a recuperação de areia artificial, principalmente quando se tratando de material pulverulento.

Sob o ponto de vista econômico, a utilização do sistema de hidrociclonação é mais viável que os similares (para este tipo de serviço), por oferecer um menor custo global, e por poder utilizar como matéria prima o subproduto dos circuitos de britagem (pó-granítico), tido como rejeito industrial. A Figura 6.1 e 6.2, Ilustram os circuitos de hidrociclonação.

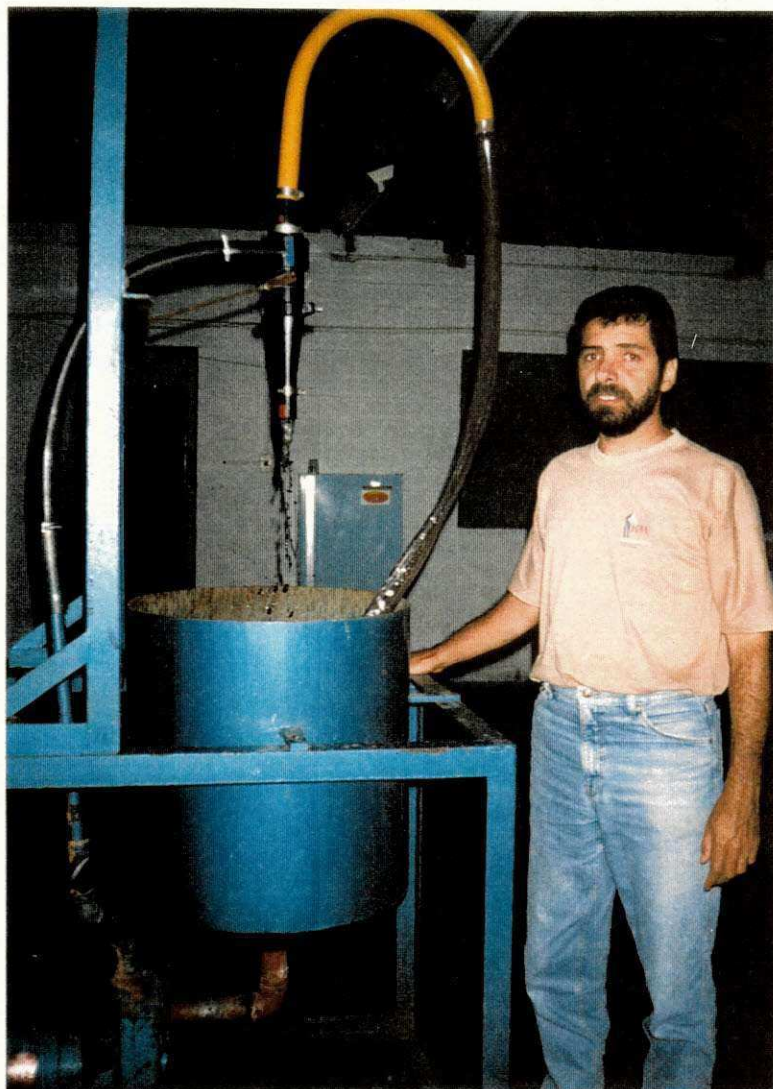


Figura 6.1
Circuito do ciclone AKW



Figura 6.2
Circuito do ciclone Típico

Do ponto de vista ambiental, este método não provoca degradação ao meio ambiente, podendo contribuir significativamente para amenizar os efeitos causados pelos processos convencionais de extração e classificação usuais.

6.2. - Sugestões para trabalhos futuros

Para obter-se uma maior segurança nos resultados experimentais, sugere-se o uso de vários ciclones, ou seja, a construção de um distribuidor (manifold), que possa proporcionar maior versatilidade ao circuito.

Sugere-se que se use, sensores de nível (máximo e/ou mínimo) na caixa de recepção, para evitar entradas de bolhas de ar nas tubulações, que causam problemas de cavitação.

Sugere-se o emprego de um circuito de maior porte (capacidade), para que se possa trabalhar com vazões mais elevadas, podendo assim comprovar e confrontar resultados obtidos e esperados, buscando a viabilização de sua aplicação em circuitos industriais.

Uma sugestão para uma nova aplicação do ciclone em circuito fechado, pode ser a utilização do mesmo na pré-concentração de feldspatos a partir do pó-granítico, utilizando-se um agente flocculante para criar uma nova superfície aderente de tensão nas bolhas de ar.

Desta forma finalizamos este trabalho, sugerindo que se dê continuidade aos ensaios realizados, na busca de uma melhor performance para os parâmetros adotados no circuito utilizando, fazendo-se simulações com as “equações de ajustes” de Lynch e Rao, buscando a possibilidade de uma maior extensão de aplicações práticas em tal linha de pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 01 - ARTIGO TÉCNICO - Hydrocyclones AKW, Circular-texto, S/N.
- 02 - ALVAREZ, O. E. "*Manutenção Planejada*", Circular-texto, (CEMI) - Campina Grande-PB, 1995.
- 03 - APOSTILA TÉCNICA - "*Fragmentação e Separação de Partículas Sólidas por Tamanho*", texto - Élcio Coelho, 7(40-55).
- 04 - APOSTILA - "*Desenvolvimento de um Protótipo*", Joaquim O. Pereira, (108 p.).
- 05 - ARTHUR G. MCKEE & COMPANY - W. G. Eng. Divison, Bulletin Tecnic - M 99000 (*Design Models - Net Cyclone Systems*), San Francisco - USA.
- 06 - BERALDO, J. L., "*Moagem de Minérios em Moinhos Tubulares*", PRO-MINÉRIO, SEI CCT - Editora E. Blücher LTDA - SP., c. 5(65-106),.
- 07 - BOLETIM TÉCNICO - NORDBERG INDUSTRIAL LTDA, Circular texto, S/N.
- 08 - BOLETIM TÉCNICO, Seminário sobre arreira de brita, SINDIPEDRAS -(Sindicato da Industria de Extração de Pedreiras do Estado de São Paulo), S/N, (52 p.).
- 09 - BULETIN TECHNICAL - Procedures for Selecting, AKW Hydrocyclones, S/N.
- 10 - BOMBAS HIDRÁULICAS - Centro de treinamento KING, Eng. L. F. Araújo, Ind. Met. Castro Alves S/A., (175 p.), S/N.
- 11 - BRASSARD, M., Qualidade - Ferramentas para uma melhoria contínua -Estatística, Editora Qualitymark, - RJ, p. 17-23, p.36-50, 1994.
- 12 - CHAVES, A. P ., "*Introdução ao Tratamento de Minérios*" - *Ciclonagem e Classificação*, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Minas / PMI 211 / 421 (Circular-11 Texto), Março - 1991.
- 13 - COHEN et al., "*The Residence Time of Mineral Particles in Hydrocyclones*", tran. IMM - 1966.

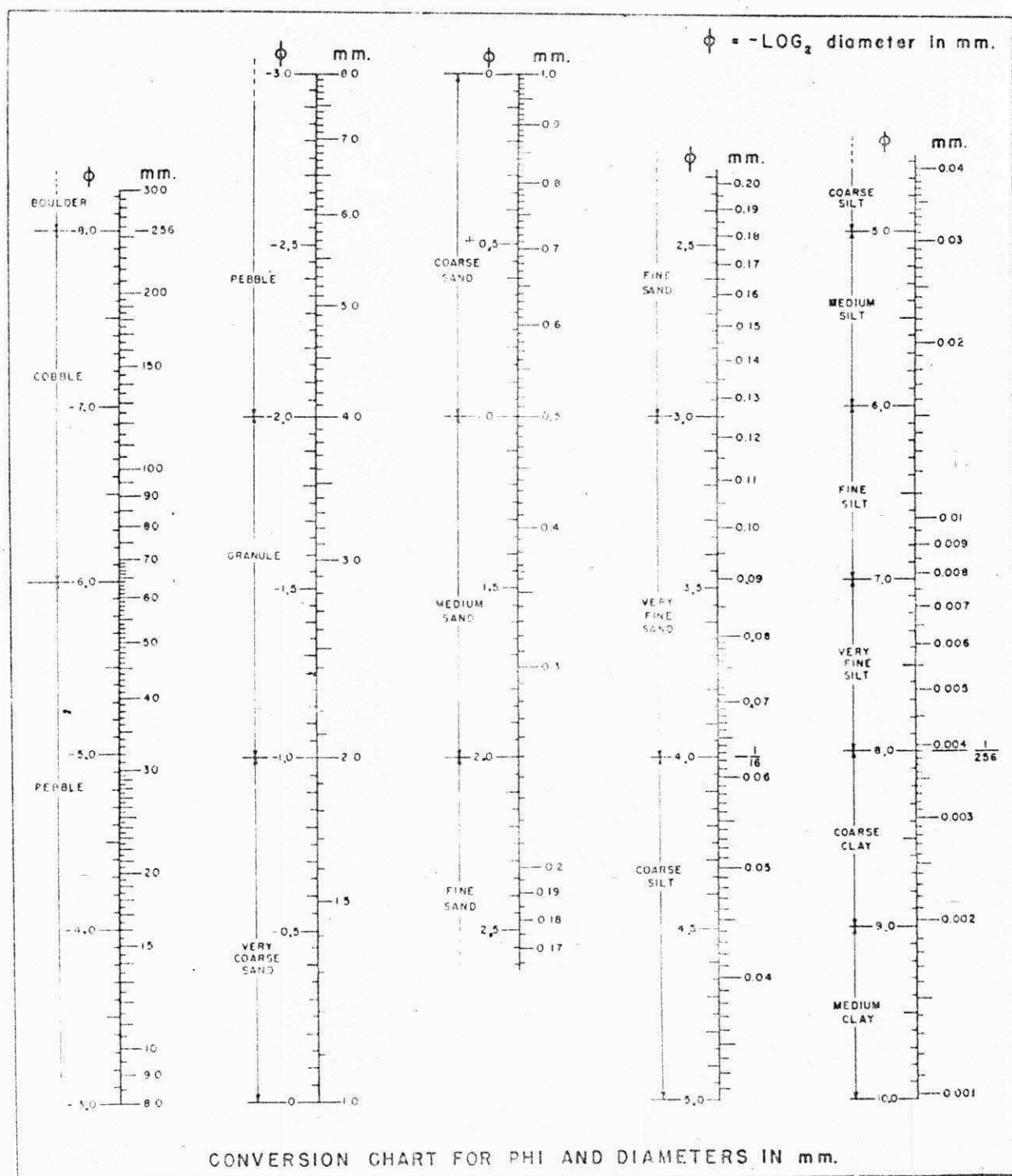
- 14 - CYCLONE BULLETIN (21 - 113), Krebs Engineers, 1205, Chrysler Drive, Menlo Park, Califórnia - 94025.
- 15 - FOUST, A. S. et al. - "*Principles of Unit Operations*", 2nd Ed. - Wiley, New York, 1980.
- 16 - GAUDIN A. M. "*Principles of Mineral Dressing*", New Delhi: McGraw-Hill, c. 8:165-201, c. 9:202-230, c. 20:480-502, 1971.
- 17 - GOMES, J. I. A., & Carriss, R.C.C., "*Aplicação da Simulação de Hidrociclones em Circuitos de Moagens*", Tecnologia Mineral, nº 35, CETEM-DNPM-CPRM. Brasília, (12 p.), 1985.
- 18 - JOURNAL OF SEDIMENTARY PETROLOGY INMAN, D. L., 1952, Jour. Sed. Pet (Conversion Chart For (PHI) and Diameters In (mm); V. 22, nº 3., 1952.
- 19 - KELLY, E. G. & SPOTTISWOOD. "*Introduction to mineral processing*", New York, John Wiley, c.2(21-45), c.3(46-61), c.10(199-231), 1982.
- 20 - KELSALL, D. F., "*A Further Study of the Hydraulic Cyclone*", Chem. Eng. Sci., v. 2, p. 254 -273, 1953.
- 21 - KELSALL, D. F., "*A Study Motion of Solid Particles in a Hydraulic Cyclone*", Trans. Ind. Chem. Eng., 30: p. 87-104, 1952.
- 22 - LASALVIA, V. R. et al. - Hidrociclones - Bulletin Tecnic Dorr. Olivers do Brasil, S/N., 1986.
- 23 - LILGE, E. O., "*Hydrocyclone Fundamentals*" Tans. Inst. Min. Metal, 71:285-337, 1972.
- 24 - LINCH, A. J. & RAO, R. C., "*Modeling and Scale-up of Hydrocyclones Classifiers in*" International Mineral Processing, Congress - 2: pp. 245-269, Cagliari, Proceedings, 1975.
- 25 - LIRA, B. B., (Departamento. de Eng. de Minas - UFPB) Notas de aulas - Texto: Modelamento Matemático dos Hidrociclones, (6 p.), 1994.

- 26 - LYNCH, A. J., "*A Mineral Crushing and Grinding Circuits*" Their Simulation, Otmization, Desingn and Control, Editora Elsevier Scientific P. C., Amsterdam - Oxford, New York, c.5 (87-104), c. 6 (105-136), 1977.
- 27 - MANUAL (FAÇO) - Allis Chalmers - Bombas Centrífugas para Lamas Abrasivas FÁBRICA DE AÇO PAULISTA S/A - São Paulo, INF. TÉC. N° 43.
- 28 - PARADA, M.; "*Influencia de Las Variables de Diseño en el Funcionamiento de un Hidrociclón*", Efecto de la Inyección de Água, Apresentado no II Symposium de Molienda, da ARMCO Chile; 1977.
- 29 - PERRY, R. H. and Chilton, C. W. (Eds.), "*Chemical Engineers Handbook*" 5th Ed. McGraw - Hill 1973.
- 30 - PLITT, L. R., A Mathematical Model of the Hydrocyclone Classifier, CIM Bulletin; December, 1976.
- 31 - PLITT, L. R., The Analysis of Solid-Solid Separations in Classifiers CIM Bulletin, 64, p. 42-47, April, 1971.
- 32 - PROVENZA, F., "Projetista de Máquinas", PRO-TEC, São Paulo, (4 -92, 93), 1985.
- 33 - POWERS, T. C. - "*The properties of fresh concrete*", Circ. texto, 1968.
- 34 - POWERS, T. C. - "*Topics in concrete Technology*", Bulletin 174. Portland Ciment Association, Research and Development Laboratories, 1965.
- 35 - RETAMAL, L. L. G. & OLAD, E., Avaliação da performance de Ciclone, VI Encontro Nac. Trat. De Min. Hidromet., Paulo Abib Eng. BOLETIM TÉCNICO, (10 p.), S/N.
- 36 - RENNER, V. G., & COHEN, H. E., "*Measurement and interpretation of Size Distribution of Particles Within a Hydrocyclone*", Trans. IMM - (c. 87:139-145), june, 1978.
- 37 - ROSSIN, P. & RAMMLER, E., "*The Laws et Governing the Finesses of Powdered Coal*", J. Inst. Fuel., (7:29-36), 1934.

- 38 - YOSHIOKA, N. & HOTTA, Y., "*Liquid Cyclone as A Hydraulic Classifier*", Chem. Eng. Jpn, 19:632-640, 1955.
- 39 - TRATAMENTO DE MINÉRIOS, Ed. - A. Benvindo da Luz, CETEM / CNPq - RJ, c. 5(209-251), 1995.
- 40 - TAGGART, A. F., "*Handbook of Mineral Dressing*", Ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1950
- 41 - TRAWINSKI, H., "*Revista Mineração Metalurgia*", Teoria, Aplicações e Emprego Prático dos Hidrociclones, Artes Gráficas Editora Ltda., Separata da Ed. N° 394, Janeiro, (16 p.), 1978.
- 42 - TELSMITH MINERAL PROCESSING, (Handbook) Division Barber - Greene Company - Milwaukee-WI, USA., pp. (5-174), 1976.
- 43 - SCHUHMANN, R., "*Energy Input and Size Distribution in Comminution*", trans. A.I.M.E., 217:22-25, 1960.

APÊNDICE A

CONVERSÃO DE DIÂMETROS DE PARTÍCULAS MINERAIS PARA ESTUDO PROBABILÍSTICO



APÊNDICE B

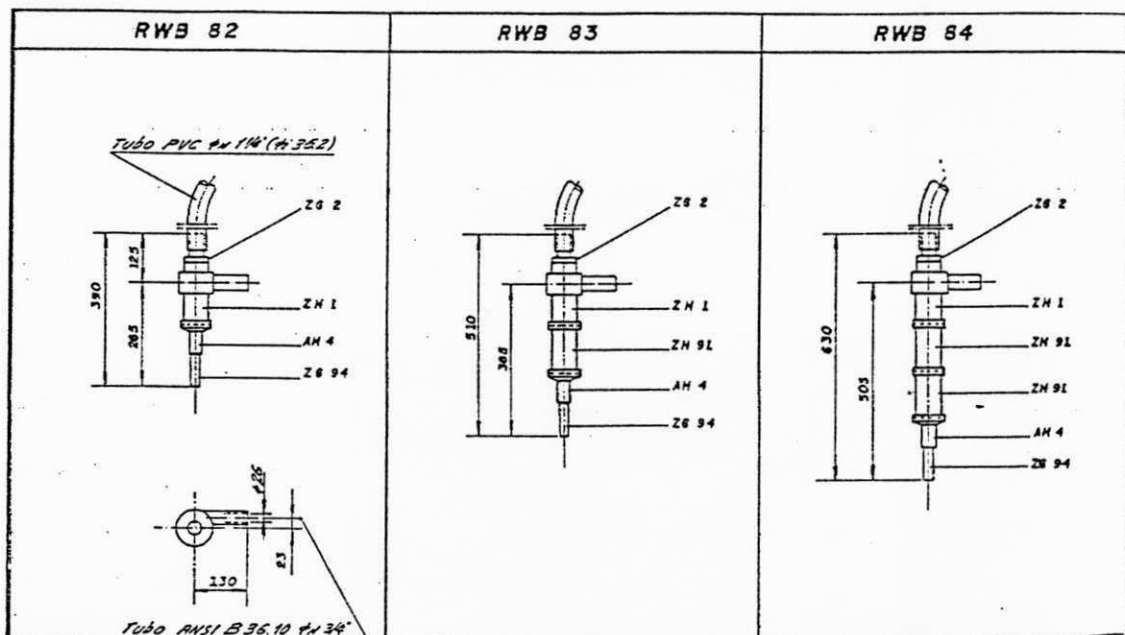
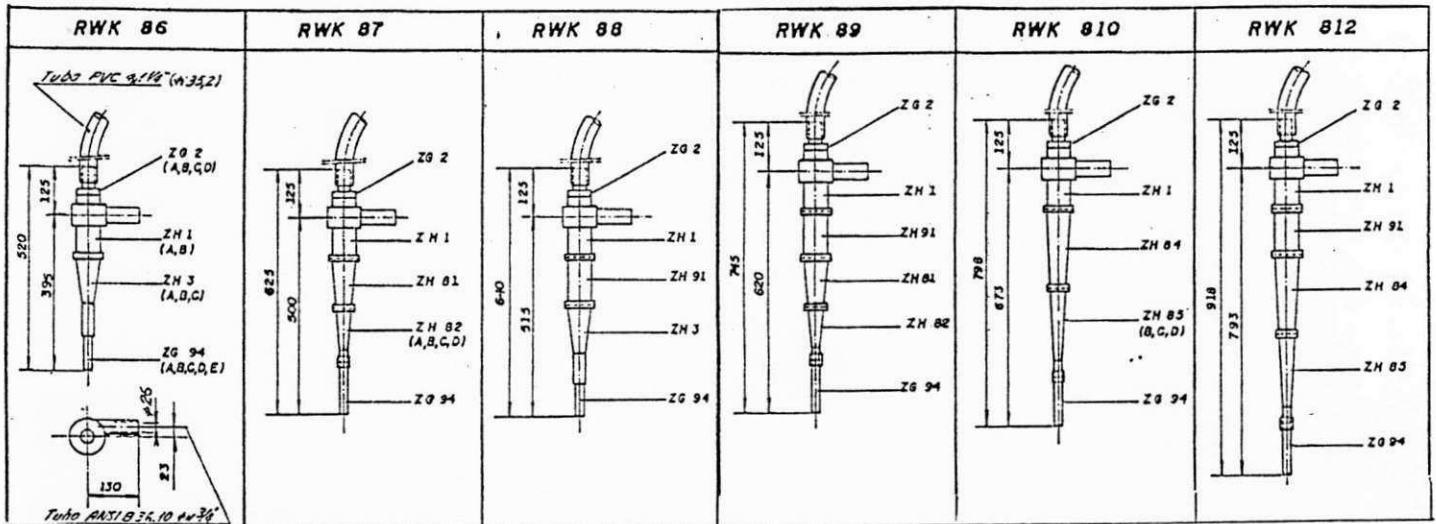
TABELA PARA CÁLCULO DE PERDAS DE CARGA EM TUBULAÇÕES

DIÂMETRO D	TUBULAÇÃO																		
	CURVA 90° RAIO LONGO	CURVA 90° RAIO MÉDIO	CURVA 90° RAIO CURTO	CURVA 45° C/ FLANGE	CURVA 90° R/D-1/2	CURVA 45° C/ ROSCA	ENTRADA NORMAL	ENTRADA DE BORDA	REGISTRO DE GAVETA ABERTO	REGISTRO DE GLOBO ABERTO	REGISTRO DE ÂNGULO ABERTO	TÊ PASSAGEM DIRETA	TÊ SAÍDA DE LADO	TÊ SAÍDA BILATERAL	VÁLVULA DE PÊ E CRIVO	SAÍDA DA CANALIZAÇÃO	VÁLVULA DE RETENÇÃO TIPO LEVE	VÁLVULA DE RETENÇÃO TIPO PESADO	
mm.	pol.	mm.	pol.	mm.	pol.	mm.	pol.	mm.	pol.	mm.	pol.	mm.	pol.	mm.	pol.	mm.	pol.	mm.	pol.
13	1/2	0,3	0,4	0,5	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	4,9	2,5	0,3	1,0	1,0	3,6	0,4	1,1	1,6	
19	3/4	0,4	0,5	0,7	0,3	0,2	0,2	0,5	0,1	6,7	3,6	0,4	1,4	1,4	5,6	0,5	1,5	2,4	
25	1	0,5	0,7	0,8	0,3	0,3	0,3	0,7	0,2	8,2	4,5	0,5	1,7	1,7	7,3	0,7	2,1	3,2	
32	1 1/4	0,7	0,9	1,1	0,4	0,4	0,4	0,9	0,2	11,3	5,6	0,7	2,3	2,3	10,0	0,9	1,7	4,0	
38	1 1/2	0,9	1,1	1,3	0,5	0,5	0,5	1,0	0,3	13,4	6,7	0,9	2,8	2,8	11,6	1,0	3,2	4,5	
50	2	1,1	1,4	1,7	0,6	0,6	0,7	1,5	0,4	17,4	8,5	1,1	3,5	3,5	14,0	1,5	4,2	6,4	
63	2 1/2	1,3	1,7	2,0	0,8	1,0	0,9	1,9	0,4	21,0	10,0	1,3	4,3	4,3	17,0	1,9	5,2	8,1	
75	3	1,6	2,1	2,5	1,2	1,0	1,3	2,2	0,5	26,0	13,0	1,6	5,2	5,2	20,0	2,2	6,3	9,7	
100	4	2,1	2,8	3,4	1,5	1,3	1,6	3,2	0,7	34,0	17,0	2,1	6,7	6,7	23,0	3,2	6,4	12,9	
125	5	2,7	3,7	4,2	1,9	1,6	2,1	4,0	0,9	43,0	21,0	2,7	8,4	8,4	30,0	4,0	10,4	16,1	
150	6	3,4	4,3	4,9	2,3	1,9	2,5	5,0	1,1	51,0	26,0	3,4	10,0	10,0	39,0	5,0	12,5	19,3	
200	8	4,3	5,5	6,4	3,0	2,4	3,3	6,0	1,4	67,0	34,0	4,3	13,0	13,0	52,0	6,0	16,0	25,0	
250	10	5,5	6,7	7,9	3,8	3,0	4,1	7,5	1,7	85,0	43,0	5,5	16,0	16,0	65,0	7,5	20,0	32,0	
300	12	6,1	7,9	9,5	4,6	3,6	4,8	9,0	2,1	102,0	51,0	6,1	19,0	19,0	78,0	9,0	24,0	38,0	
350	14	7,3	9,5	10,5	5,3	4,4	5,6	11,0	2,4	120,0	60,0	7,3	22,0	22,0	90,0	11,0	28,0	45,0	

APÊNDICE C

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO JOGO DE CICLONE AKW

Séries RWK e RWB (80)-D 40 mm / AKW.



APÊNDICE D

INSTRUÇÕES PARA INSTALAÇÃO E MANUTENÇÃO DE BOMBAS CENTRÍFUGAS

INSPEÇÃO DE MOTORES E EQUIPAMENTOS (ELÉTRICOS)

Para assegurar o funcionamento contínuo das máquinas e equipamentos elétricos, bem como reduzir sua depreciação e custos de manutenção, é fundamental realizar periodicamente inspeções nas instalações do sistema elétrico, para isto, o setor de manutenção planejará e estabelecerá a rotina de inspeção a fim de satisfazer às exigências individuais de cada circuito industrial.

O funcionamento contínuo e seguro dos equipamentos depende muito da minuciosidade de cada inspeção, da adequada conservação das máquinas e mão de obra qualificada, assim como do pronto atendimento às ocorrências de falhas e suas reparações.

O setor de manutenção deverá manter em seus arquivos: normas técnicas sobre especificações, ensaios, simbologia e terminologia dos equipamentos utilizados no circuito; catálogos, boletins informativos e manuais de instruções de máquinas e equipamentos; plantas, esquemas, diagramas e memoriais descritivos atualizados, de todo o sistema da planta; ficha de manutenção individual para cada equipamento; boletins de inspeção e manutenção sempre atualizados.

É conveniente analisar cuidadosamente cada falha, anotando as possíveis causas e tomar de imediato as providências necessárias para evitar novos inconvenientes. Geralmente, a falta de limpeza e o excesso de umidade são os fatores que mais contribuem para produzir as falhas de origem elétrica.

Os problemas envolvidos na inspeção e manutenção dependem das condições de operação dos equipamentos e até certo ponto, de seu estado ou seja tempo de vida útil. Se desde o início do seu funcionamento for dada a necessária atenção a conservação, reduz-se bastante os problemas e as falhas. Um sistema moderno bem atendido resultará o mais econômico sobre todos os pontos de vista. Baseado nos documentos dos arquivos acima citados, deve-se preparar um plano de inspeção de rotina que cubra todo o circuito, começando pela fonte de alimentação e passando por cada dispositivo.

INSTRUÇÕES PARA INSTALAÇÃO DA BOMBA CENTRÍFUGA

Recomenda-se procurar sempre um profissional credenciado para tal serviço. A escolha da localização do conjunto motor-bomba deve ser, de preferência próxima ao reservatório e com escorva, (evitando tubulações longas acima de seis metros e linhas curvas), possuir fácil acesso, (o que facilitará as inspeções periódicas e de manutenção), e boa ventilação, (para refrigeração do conjunto).

Os principais cuidados que se deve tomar na instalação de uma bomba são: não usar conexões excêntricas, cotovelos, curvas, etc.. na linha, (para evitar perdas de cargas e bolhas de ar), evitar a instalação do registro muito próximo a saída da bomba, (para não se alterar a vazão e a pressão da mesma), verificar o alinhamento do conjunto, (acoplamento da luva elástica, e/ou correias quando for o caso), verificar se o conjunto motor e bomba estão girando livremente, (para evitar danos no conjunto), bem como verificar toda a parte de lubrificação, do motor e da bomba. Após estes cuidados e antes de acionar o conjunto, certificar-se de que a bomba está escorvada. A seguir apresenta-se um quadro com as falhas e possíveis causas

QUADRO DE DIAGNÓSTICO DE POSSÍVEIS FALHAS

POSSÍVEIS FALHAS	POSSÍVEIS CAUSAS DE FALHAS
A bomba não recalca a água	1-2-3-4-6-11-14-16-17-22-23
Vazão de descarga insuficiente	2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-14-17-20-22-23-29-30-31
Pressão desenvolvida insuficiente	5-14-15-17-20-22-29-30-31
Perda da escova depois da Partida	2-3-5-6-7-9-11-12-13
A bomba requer potência excessiva	15-16-17-18-19-20-23-24-26-27-29-33-34
Vazamento em excesso na gaxeta	13-24-26-28-32-33-34-35-36-37-38-39
Desgaste prematuro da gaxeta	12-13-24-26-28-32-33-34-35-36-37-38-39
A bomba vibra ou faz ruídos	2-3-4-9-10-11-21-23-24-26-27-28-30-35-36-40-41-42-43-44-45-46
Os rolamentos têm vida curta	24-26-27-28-35-36-40-41-42-43-44-45-46
A bomba aquece e trava	1-4-21-22-24-27-28-35-36-40

DESCRIÇÃO DO QUADRO DE DIAGNÓSTICO DE POSSÍVEIS FALHAS

- 01 - A bomba não está escovada
- 02 - A bomba ou o tubo de sucção não estão carregados de água
- 03 - Elevação de sucção
- 04 - Margem insuficiente entre a pressão de sucção e vapor
- 05 - Quantidade excessiva de ar no líquido
- 06 - Bolha de ar na linha de sucção
- 07 - Entrada de ar na linha de sucção
- 08 - Entrada de ar na bomba pé gaxeta
- 09 - Válvula de pé muito pequena
- 10 - Válvula de pé parcialmente aberta
- 11 - Submergência insuficiente do tubo de sucção
- 12 - Tubulação do selo d'água obstruída
- 13 - Anel do distribuidor incorretamente colocado na gaxeta
- 14 - Velocidade muito baixa
- 15 - velocidade muito alta
- 16 - Direção de rotação invertida
- 17 - Carga do sistema maior que a do projeto
- 18 - Carga do sistema menor que a do projeto
- 19 - Peso específico do líquido diferente do projeto
- 20 - Viscosidade do líquido diferente do projeto
- 21 - Operação em vazão muito baixa
- 22 - Operação inadequada da bomba
- 23 - Corpo estranho no rotor
- 24 - Desalinhamento
- 25 - Base frouxa
- 26 - Eixo da bomba empenado
- 27 - Parte giratória roçando na estacionária
- 28 - Rolamentos gastos
- 29 - Anéis desgastados
- 30 - Rotor danificado
- 31 - Junta da carcaça defeituosa, provocando vazamento interno
- 32 - Eixo ou bucha gastos ou riscado na região da gaxeta
- 33 - Gaxeta colocada incorretamente
- 34 - Tipo de gaxeta incorreta para as condições de operação
- 35 - Eixo descentrado devido a rolamentos gastos
- 36 - Rotor desbalanceado causando vibração
- 37 - Falta de água para refrigeração da gaxeta
- 38 - Folga entre o eixo e a gaxeta, forçando o interior da bomba
- 39 - Impureza no líquido do selo hidráulico, riscando o eixo ou bucha
- 40 - Empuxo causado por uma falha mecânica
- 41 - Excesso de lubrificante na caixa de rolamentos ou falta de resfriamento
- 42 - Falta de lubrificação
- 43 - Montagem incorreta dos rolamentos na pista
- 44 - Impureza nos rolamentos
- 45 - Oxidação devido a entrada de água na caixa de rolamento
- 46 - Resfriamento da água elevado causando ar na caixa

APÊNDICE E

TABELA DE CONVERSÃO

UNIDADES		MULTIPLIQUE POR →	UNIDADES	
		← DIVIDA POR		
VAZÃO	LITROS POR SEGUNDO (L/S)	3,60	Metros cúbicos p/hora	VAZÃO
		0,001	Metros cúbic. p/segundo	
		951,12	Galões por hora	
		15,85	Galões por minuto	
		2,12	Pes cúbicos p/minuto	
		127,11	Pes cúbicos p/hora	
	METROS CÚBICOS POR HORA (M³/H)	16,67	Litros por minuto	
		1000	Litros por hora	
		4,403	Galões por minuto	
		264,18	Galões por hora	
		0,59	Pes cubicos p/minuto	
		35,3147	Pes cubicos p/hora	
PRESSÃO	LIBRAS POR POLEGADA QUADRADA (PSI)	0,703	Metros de coluna de água	PRESSÃO
		2,31	Pes de coluna de água	
		0,0703	Quilograma força por centímetro quadrado	
		51,72	Milímetros de mercúrio	
		0,06803	Atmosferas	
		0,06896	BAR	
	METROS DE COLUNA DE ÁGUA (MCA)	0,1	Quilograma força por centímetro quadrado	
		3,28	Pe de coluna de água	
		73,56	Milímetros de mercúrio	
		0,0968	Atmosferas	
		0,09813	BAR	
VOLUME	LITRO (L)	0,2642	Galões Americanos	VOLUME
		0,001	Metros cubicos	
		0,03531	Pes cúbicos	
	METRO CÚBICO (M³)	264,20	Galões americanos	
		35,31	Pes cubicos	
COMPRI- MENTO	POLEGADAS (")	25,4	Milímetros	COMPRI- MENTO
		2,54	Centímetros	
		0,0254	Metros	
		0,08328	Pes	
	MILÍMETROS (mm)	0,003281	Pês	
		10	Centímetros	
P E S O	QUILOGRAMAS (Kg)	2,205	Libras	P E S O
		35,27	Onças	
	LIBRAS (LBS)	16,00	Onças	
POTENCIA	CAVALO VAPOR (CV)	0,9863	Horse Power	POTENCIA
		0,763	Kilowatts	
VELOCIDADE	METROS POR SEGUN- DO (M/S)	3,281	Pês por segundo	VELO- CIDADE
		196,80	Pês por minuto	
		3,60	Quilometro por hora	