



**UFOP**

Universidade Federal  
de Ouro Preto

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA MINERAL

**ENGENHARIA  
MINERAL**



ALMA MATER IN  
MINERALIA BRASILIENSIS

**CARACTERIZAÇÃO DOS HIDROCICLONES UTILIZADOS NAS ETAPAS DE  
CLASSIFICAÇÃO DOS CONCENTRADORES I E II DA SAMARCO MINERAÇÃO**

José Pedro da Silva

**Ouro Preto**

**Novembro de 2014**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MINERAL

**CARACTERIZAÇÃO DOS HIDROCICLONES UTILIZADOS NAS ETAPAS DE  
CLASSIFICAÇÃO DOS CONCENTRADORES I E II DA SAMARCO MINERAÇÃO**

José Pedro da Silva

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mineral.

Área de concentração: Tratamento de minérios

**Orientador: Prof. Dr. CARLOS ALBERTO PEREIRA**

**Ouro Preto**

**Novembro de 2014**

S586c Silva, José Pedro da.  
Caracterização dos hidrociclones utilizados nas etapas de  
classificação dos concentradores I e II da Samarco Mineração  
[manuscrito] / José Pedro da Silva. - 2014.  
88f.: il.: color; grafs; tabs; mapas.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Pereira.  
Coorientador: Dr. Joaquim Donizetti Donda.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro  
Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de  
Minas. em Engenharia Mineral.  
Área de Concentração: Tratamento Mineral.

1. Hidrociclone. 2. Determinação de tamanho de partícula.  
I. Pereira, Carlos Alberto. II. Donda, Joaquim Donizetti.  
III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 622.7.06

José Pedro da Silva

**“CARACTERIZAÇÃO DOS HIDROCICLONES UTILIZADOS NAS  
ETAPAS DE CLASSIFICAÇÃO DOS CONCENTRADORES I E II DA  
SAMARCO MINERAÇÃO”**

**AUTOR: JOSÉ PEDRO DA SILVA**

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 12 de dezembro de 2014, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



- 
- Prof. Dr. Carlos Alberto Pereira (Orientador) – UFOP



- 
- Dr. Joaquim Donizetti Donda (Coorientador) – VALE



- 
- Dr.ª. Andréia Bicalho Henriques (Membro) – UFMG



- 
- Prof. Dr. Diego Luiz Nunes Ventrella (Membro) – UFOP

**DEDICATÓRIA**

*Aos meus pais Jaime Silva e Terezinha D. Silva,  
às minhas irmãs Maria Aparecida, Isânia e Arlete e  
à minha esposa Maria José Costa da Silva.*

## AGRADECIMENTOS

À Deus, pela vida saudável.

Ao meu orientador Prof. PhD. Carlos Alberto Pereira que, além do conhecimento transmitido, muito me incentivou para elaboração deste trabalho. Sua postura amigável e acessível facilitou muito o desenvolvimento da pesquisa. Agradeço também pelas incansáveis iniciativas na organização das etapas do curso desde as atividades acadêmicas, passando pela elaboração da dissertação, publicação de artigos e, finalmente, a conclusão.

Ao meu co-orientador, tutor e amigo PhD. Joaquim Donizetti Donda, a quem dedicarei sempre o meu respeito e minha admiração por prestar importantes contribuições à comunidade científica. Muito grato por compartilhar comigo muitos dos seus ensinamentos, pelo profissionalismo e dedicação em me orientar na realização desse trabalho. Também pelas palavras de incentivo e pelas conquistas realizadas.

Agradecimento especial à jovem graduanda de engenharia de minas Isabela Stopa, pela importante contribuição durante todas as etapas da pesquisa. Sua disponibilidade durante as amostragens, análises, interpretação dos dados e elaboração da dissertação foi fundamental para esta realização. Certamente, o futuro reserva o sucesso para você!

Aos meus pais, Jaime Silva e Terezinha Donata Silva pelos valores ensinados e por ter me proporcionado uma base educacional sólida.

Às minhas irmãs, Cidinha, Isânia e Arlete, por torcerem fielmente pelas minhas vitórias.

À minha esposa, Maria José Costa, pelo amor incondicional e imensurável.

Ao diretor de implementação de projetos na Samarco, Maury de Souza Junior, pela disponibilização de recursos para realização do trabalho além das várias demonstrações de atenção, apoio, confiança e amizade.

Aos meus gestores, anterior Carlos Magno e atual Reuber Koury pelo incentivo, compreensão, apoio e amizade.

Aos gerentes de produção da Samarco, Ivan Santos e João Pedro pela oportunidade de expansão da parceria da Samarco com a Universidade Federal de Ouro Preto através da cessão de amostras e patrocínio de eventos.

Aos colegas da Samarco pela torcida, em especial, aos engenheiros Andreia Rosa, Duilio Carvalho cuja convivência e exemplo muito me incentivou.

Aos técnicos de processo Jaqueline Miranda e Leonidas Junior pela dedicação na realização do fechamento de balanço de massa via BilMat.

À equipe do laboratório de Controle de Processos representado por Alan Castro, Fernando César, Gabriel Gonzaga, George Augusto, Jefferson Bhering, Jonathan de Oliveira, Márcio Cruz, Pedro Mendes, Tiago, Túlio e Vanderson Eney, pessoas fundamentais na realização das amostragens, tratamento das amostras e análises sempre com muita presteza.

À Samarco Mineração S.A pelo incentivo ao desenvolvimento, oportunidade e suporte dentro do programa de pós-graduação para seus empregados.

À SGS GeoSol Laboratório Ltda representado pelo técnicos Alexandre Silva e Pyterson Armond, pelas amostragens, tratamento das amostras e análises físicas.

Aos professores José Aurélio, Rosa Malena e demais professores do programa de pós-graduação pelo conhecimento, sugestões e disponibilidade durante o curso.

À MSc. Alaine Imbellone pela complementação e parceria no desenvolvimento de trabalhos acadêmicos os quais muito me acrescentaram conhecimento.

À jovem engenheira metalúrgica Franciele Nogueira pelo grande conhecimento disponibilizado durante a elaboração dos artigos e dissertação.

Aos colegas Felipe Milhomem, Douglas Magalhães, Michael Juno pela amizade e companheiríssimo, momentos de estudo e de confraternização.

À Universidade Federal de Ouro Preto, no seguimento do PPGEM – Programa de Pós Graduação da Escola de Minas.

Aos meus amigos Sr. Mário Meynard, Maria de Lourdes (Dedé), Denilson Rodrigues, Rosaly Battisti pelas demonstrações de interesse pela minha realização.

## RESUMO

O hidrociclone é um equipamento amplamente utilizado em indústrias minero-metalúrgicas na classificação mineral. A exigência de um maior conhecimento da eficiência tecnológica da classificação por ciclones e a escassez de pesquisas sobre o assunto, impulsionaram a realização desse trabalho que investigou, avaliou e caracterizou a operação unitária de classificação utilizando os hidrociclones das diversas etapas do processo de concentração do minério de ferro itabirítico da Samarco Mineração S/A. Essas etapas visam a produção de um *pellet feed* dentro das especificações granulométrica e químicas exigidas pelos processos subsequentes, quais sejam, transporte via mineroduto, filtragem e pelotização. Para tal foram coletadas amostras nos pontos de alimentação, *underflow* e *overflow* dos ciclones primário, raspador, limpador, deslamador e secundário dos Concentradores I e II da Samarco. Utilizando a granulometria e as porcentagens de sólidos como dados de entrada, os resultados foram obtidos a partir do modelo de Lynch & Wills para a calibração da curva de partição, o qual se mostrou um bom ajuste. Os parâmetros avaliados foram: o *by-pass* (BP), o fator de eficiência ( $I$ ), a relação  $\frac{d_{95}}{d_{50}}$ , o parâmetro de alfa de Lynch & Rao ( $\alpha$ ) e o parâmetro de Plitt ( $m$ ). De uma forma generalizada os hidrociclones GMAX mostraram um melhor desempenho, tendo em vista um *by-pass* menor e melhor eficiência. Hidrociclones de mesmo diâmetro e diferentes fabricantes, operando em situações semelhantes obtiveram os mesmos valores de  $\alpha$ .

**Palavras-chave:** Curvas de partição. Modelo Lynch & Wills. Parâmetros de eficiência. Efeito do parâmetro alfa ( $\alpha$ ).



## ABSTRACT

The hydrocyclone is among the existing hydraulic classifiers, an equipment widely used in the mining and metallurgical industries in mineral classification. The demand for greater technology knowledge of the classification by hydrocyclones and the scarcity of research on the subject driven the realization of this work which investigated, evaluated and characterized the unitary classification operation using the hydrocyclones of the various stages of the process of concentration of itabiritic iron ore of Samarco Mining S / A. These steps are for the production of a pellet feed within the chemical and particle size specification required by the subsequent processes, namely, transport via pipeline, filtering and pelletizing. For that, samples were collected at points of feed, *overflow* and *underflow* of the primary, secondary, rougher, desliming and cleaner cyclones of the Samarco concentrators I and II. Using like input data the granulometry analysis of the product and solids percents, the results were obtained using the method of Lynch&Wills for the calibration of the partition curve, which proved to be a good method. The evaluated parameters were: bypass (BP), the efficiency factor ( $I$ ), the relationship  $\frac{d_{95}}{d_{50}}$ , the Lynch & Rao's parameter alpha ( $\alpha$ ) and the Plitt's parameter ( $m$ ). In a generalized way the GMAX cyclones showed a better performance, with a view to lower *by-pass* and better efficiency. Hidrocyclones of the same diameter and different manufacturers operating in similar situations had the same value of  $\alpha$ .

**Keywords:** Partition curves. Model Lynch & Wills. Efficiency parameters. Efect of the parameter alpha ( $\alpha$ ).

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>19</b>
<b>1.1 Justificativa e relevância.....</b>	<b>20</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>21</b>
<b>2.1 Objetivo geral .....</b>	<b>21</b>
<b>2.2 Objetivos específicos .....</b>	<b>21</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>22</b>
<b>3.1 Minério de ferro .....</b>	<b>22</b>
<b>3.2 Áreas de ocorrência.....</b>	<b>23</b>
<b>3.3 Panorama econômico .....</b>	<b>24</b>
<b>3.4 Classificação.....</b>	<b>25</b>
<b>3.5 Hidrociclones (ou somente ciclone).....</b>	<b>26</b>
<b>3.6 Eficiência dos ciclones.....</b>	<b>30</b>
<b>3.7 Modelagem matemática para ciclones.....</b>	<b>34</b>
<b>3.7.1 Modelo de Lynch &amp; Rao .....</b>	<b>35</b>
<b>3.7.2 Modelo de Plitt .....</b>	<b>37</b>
<b>3.8 Parâmetro alfa (<math>\alpha</math>) de Lynch &amp; Rao .....</b>	<b>40</b>
<b>3.9 Parâmetro <math>m</math> de Plitt .....</b>	<b>42</b>
<b>3.10 Processo Samarco Mineração S/A .....</b>	<b>44</b>
<b>3.10.1 Planta de Beneficiamento .....</b>	<b>45</b>

3.10.1.1	Concentrador I .....	46
3.10.1.2	Concentrador II.....	51
4.	METODOLOGIA .....	55
4.1	Amostragem.....	56
4.2	Preparação da amostra .....	59
4.3	Caracterização tecnológica do minério .....	59
4.3.1	Porcentagem de sólidos .....	60
4.3.2	Análise Granulométrica.....	60
5.	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	68
5.1	Caracterização do CII-RASP-GMAX15.....	68
5.1.1	Análise granulométrica .....	68
5.1.2	Porcentagens de sólidos.....	69
5.1.3	Balanço de massas .....	69
5.1.4	Cálculo das partições para underflow .....	70
5.1.5	Cálculo do by-pass.....	71
5.1.6	Curvas de partição, partição corrigida, eficiência corrigida reduzida e parâmetro $d_{95}$ , $d_{75}$ , $d_{50}$ , $d_{50c}$ e $d_{25}$ .....	71
5.1.7	Cálculo da Eficiência ( $I$ ).....	73
5.1.8	Calculo do parâmetro alfa ( $\alpha$ ) .....	73
5.1.9	Cálculo do parâmetro $m$ .....	77
5.2	Parâmetros de eficiência dos ciclones do Concentrador I e II .....	78
5.2.1	By-pass.....	80

5.2.2	Relação $\frac{d_{95}}{d_{50}}$ .....	80
5.2.3	Fator I.....	81
5.2.4	Parâmetro $\alpha$ .....	82
5.2.5	Parâmetro m .....	82
6.	CONCLUSÕES.....	84
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	85

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 - Mapa do Quadrilátero Ferrífero indicando a localização da mina de Alegria localizada no complexo Mariana (Vale – arquivos internos).....	24
Figura 3.3 - Representação geral do funcionamento de um classificador (WILLS, 2006 adaptado) .....	26
Figura 3.4 – Desenhos ilustrativos das seções e/ou partes de um hidrociclone (WILLS, 2006 adaptada).....	28
Figura - 3.5 Forças atuantes no movimento de órbita da partícula (Wills, 2006 traduzida e adaptada).....	28
Figura 3.6 – Ilustração dos fluxos ocorrentes em um hidrociclone (MACHACA, 2010)....	29
Figura 3.7 – Representação da curva de partição indicando as áreas de ineficiência da curva.	31
Figura 3.8 – Curvas de partição típicas de um hidrociclone, real e corrigida, identificando o efeito do <i>by-pass</i> e os parâmetros $d_{50}$ e $d_{50c}$ (MACHACA, 2009 adaptada).....	34
Figura 3.9 - Curva de eficiência corrigida reduzida.....	40
Figura 3.10 – curvas de eficiência corrigida reduzida para um dado mineral e ciclones de diferentes diâmetros (traduzida).....	41
Figura 3.11 – Influência do alfa nas curvas de partição e a indicação de seu crescimento.	42
Figura 3.12 – Fluxograma das operações de pré-moagem e moagem primária (Samarco- arquivos internos). .....	47
Figura 3.13 – Fluxograma da etapa de deslamagem (Samarco- arquivos internos). .....	48
Figura 3.14 – Fluxograma do circuito dos moinhos secundários MS04, MS05 e MS06 (Samarco- arquivos internos).....	49
Figura 3.15 – Fluxograma do circuito da segunda etapa de moagem secundária (Samarco- arquivos internos).....	50

Figura 3.16– Fluxograma do circuito dos moinhos primário do Concentrador II (Samarco – arquivos internos).....	51
Figura 3.17 – Fluxograma do circuito de deslamagem em três estágios do Concentrado II (Samarco – arquivos internos). .....	53
Figura 3.18 – Fluxograma do circuito de moagem segunda etapa (Samarco – arquivos internos). .....	54
Figura 4.1 - Etapas da metodologia usada na caracterização da amostra. ....	55
Figura 4.2 – Amostragem dos ciclones concentrador II. ....	56
Figura 4.3 – Homogeneização e quarteamento da amostra. ....	59
Figura 4.4 – Ro-Tap® utilizado para a agitação das peneiras / ensaio granulométrico utilizando as peneiras série Tayler/ Granulômetro a laser: Mastersizer.....	61
Figura 4.5 – Balanço de massas para um hidrociclone evidenciando as variáveis de entrada e saída. ....	62
Figura 5.1 – Curva de distribuição granulométrica para o CII-RASP-GMAX15 .....	69
Figura 5.2 – Balanço de massa para o ciclone CII-RASP-GMAX15.....	70
Figura 5.3 – curva de partição e curva de partição reduzida para o ciclone CII-RASP-GMAX15. .....	72
Figura 5.4 – curva eficiência reduzida corrigida para o ciclone CII-RASP-GMAX15.....	72
Figura 5.5 – Curva de eficiência reduzida corrigida obtida pelo método de Lynch & Wills juntamente com a curva de eficiência reduzida corrigida obtida pelo método Lynch & Rao com alfa igual a 2,2. ....	77

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 4.1 – Ciclones amostrados, modelo, suas funções do Concentrador I da Samarco e TAG para respectivas identificações.....	57
Tabela 4.2 – Ciclones amostrados, modelo, suas funções do Concentrador II da Samarco e TAG para respectivas identificações.....	58
Quadro 4.1 - Parâmetros geométricos e operacionais dos ciclones localizados nos concentradores I da Samarco Mineração S/A.....	63
Quadro 4.2 - Parâmetros geométricos e operacionais dos ciclones localizados nos Concentradores II da Samarco Mineração S/A.....	63
Tabela 4.3 – Modo como foram dispostas as partições corrigidas para cada alfa. ....	66
Quadro 5.1 – Distribuição granulométrica para o CII-RASP-GMAX15.....	68
Quadro 5.2 – Porcentagens de sólidos amostradas e corridas do ciclone CII-RASP-GMAX1569	
Quadro 5.4 – Parâmetro $d_{95}$ , $d_{75}$ , $d_{50}$ , $d_{50c}$ e $d_{25}$ do ciclone CII-RASP-GMAX15.....	73
Quadro 5.5 – Modo como foram dispostas as partições corrigidas para cada alfa ( $\alpha$ ). ....	74
Tabela 5.3 – Resultado dos parâmetros obtidos através da modelagem para os ciclones primários operando em circuito fechado com moinho de bolas.....	78
Tabela 5.4 – Resultado dos parâmetros obtidos através da modelagem para os ciclones raspadores operando no primeiro estágio de deslamagem.....	79
Tabela 5.5 – Resultado dos parâmetros obtidos através da modelagem para os ciclones limpadores operando no segundo estágio de deslamagem. ....	79
Tabela 5.6 – Resultado dos parâmetros obtidos através da modelagem para os ciclones deslamadores operando no terceiro estágio de deslamagem.....	79
Tabela 5.7 – Resultado dos parâmetros obtidos através da modelagem para os ciclones secundários operando no primeiro e segundo estágio da dupla classificação. ....	80

## LISTA DE SÍMBOLOS E NOTAÇÕES

*Símbolos latinos*

$A_c$  ângulo do ciclone em relação à posição vertical.

$a_i$  fração em massa da alimentação para uma classe de tamanho  $i$ .

$C_{vA}$  concentração volumétrica da alimentação.

$C_{pA}$  concentração da polpa de alimentação.

$C_{pv}$  percentagem de sólidos em volume.

$C_w$  percentagem de sólidos em massa.

$C_{vu}$  percentagem em volume no *underflow*.

$d_p$  tamanho de partícula.

$d_{50}$  tamanho ou diâmetro mediano da partição real.

$d_{50C}$  tamanho ou diâmetro mediano da partição corrigida.

$D_c$  diâmetro do ciclone.

$D_i$  diâmetro do inlet.

$D_o$  diâmetro do *vortex finder*.

$D_u$  diâmetro do *apex*.

$F_c$  força centrífuga.

$F_d$  força de resistência ou arraste.

$g$  aceleração da gravidade.

$h$  altura livre do ciclone.

$I$  imperfeição da curva de classificação.

$K$  índice de consistência do fluido,



$k_0...k_n$  parâmetros típicos para o sistema minério/ciclone.

$L$  comprimento total do ciclone.

$L_c$  comprimento da seção cilíndrica do ciclone.

$m$  parâmetro de qualidade da separação de Plitt.

$n$  índice do comportamento reológico do fluido.

$N$  constante da equação da velocidade tangencial.

$a_o$  fração de água no *overflow*.

$o_i$  fração de massa retida do *overflow* para uma classe de tamanhos  $i$ .

$P$  pressão da alimentação do ciclone.

$Q_v$  vazão volumétrica da alimentação da polpa.

$Q_a$  vazão de água na alimentação.

$Q_{au}$  vazão de água no produto *underflow*.

$R$  partição dos fluxos = vazão do *underflow*/vazão da alimentação.

$R_f$  recuperação de água para o *underflow*.

$R_v$  partição da polpa para o *underflow*.

$u_a$  fração de água no *underflow*.

$U_i$  partição de *underflow* para a fração granulométrica  $i$ .

$U_{ic}$  partição de *underflow* corrigida para a fração granulométrica  $i$ .

$v_i$  velocidade do inlet.

$v_p$  velocidade da polpa.

$v_s$  velocidade terminal de sedimentação.

$V$  velocidade relativa partícula/fluido.

*Símbolos gregos*

$\alpha$  parâmetro de eficiência da classificação.

$\beta$  recuperação dos sólidos para o *underflow*.

$\eta$  viscosidade do líquido.

$\eta_p$  viscosidade plástica.

$\rho_L$  densidade do líquido.

$\rho_s$  densidade do sólido.

## 1. INTRODUÇÃO

O necessário aumento da produção de concentrado de ferro implica em expansões das instalações de tratamento, reformulação de fluxogramas e/ou otimização dos processos. O crescimento da demanda faz com que concentradores sejam alimentados com materiais mais complexos e mais pobres, conseqüentemente mais difíceis de tratar.

O aproveitamento desses minérios requer métodos de tratamento mais elaborados o que implica em maiores custos operacionais e redução da margem de lucro das empresas. O investimento em pesquisa e o conseqüente desenvolvimento tecnológico mostram-se fundamentais para assegurar a competitividade das empresas mineradoras dedicadas à extração de minérios de ferro, abrindo perspectiva de aprimoramento dos processos e manutenção das características de seus produtos.

A Samarco Mineração S/A vem investindo fortemente em pesquisa e desenvolvimento, visando aperfeiçoar as rotas de processo estabelecida nas suas unidades de concentração no complexo de Germano, bem como suportar tecnicamente a seleção de tecnologias para projetos de expansão.

A operação de classificação por tamanho se faz presente em todas as rotas de processo indicadas para produção de *pellet feed* via moagem e flotação. Por se tratar de classificação de frações grosseiras e frações finas, os hidrociclones se tornaram a máquina de maior aplicação e vem sendo, nos últimos anos, aprimorados para obtenção de cortes mais precisos.

Os hidrociclones são responsáveis pela aplicação e adequação das características físicas do concentrado produzido (*pellet feed*) para transporte via mineroduto, filtragem através de filtros verticais a vácuo ou filtros prensa e pelotização utilizando discos, visto que o comportamento mineral nessas etapas é diretamente influenciável pelo tamanho das partículas tratadas.

Hidrociclones são classificadores hidráulicos que trabalham em famílias, ou seja, um conjunto de hidrociclones com geometrias semelhantes, entre elas o diâmetro da seção cilíndrica, que formam uma bateria com características de operações próprias (MELO, 2010).

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

É devido a essa ampla versatilidade associada a suas amplas faixas de classificação, que os hidrociclones são hoje utilizados nos mais variados setores industriais, principalmente no tratamento de minério.

Todos os classificadores, incluindo os hidrociclones, podem ter sua eficiência medida através de sua curva de partição, também conhecida como curva de Tromp. A curva de partição mostra a fração de partículas de um tamanho que será direcionada para a fração grosseira. Um formato estilo “S” é típico desses classificadores (KING, 2001).

Sabendo-se da importância desse assunto realizou-se esse trabalho com o intuito de aumentar o conhecimento da classificação por tamanho utilizando hidrociclones e orientar a Samarco Mineração S/A na tomada da decisão no sentido de aperfeiçoar o processo de beneficiamento de minérios itabiríticos pobres.

O trabalho proposto envolve estudos das características geométricas e operacionais dos hidrociclones aplicados nas várias etapas de classificação na moagem primária, deslamagem e moagem secundária da rota de processo de concentração do itabirito pobre das minas de Alegria.

### **1.1 Justificativa e relevância**

A relevância deste estudo está relacionada principalmente com o maior conhecimento da tecnologia de classificação por tamanho utilizando hidrociclones, uma vez que o comportamento mineral nas etapas seguintes é diretamente influenciável pelo tamanho das partículas tratadas. Esse estudo quantifica e qualifica a eficiência das operações de classificação por hidrociclones, possibilitando o aprimoramento das rotas de processo e suas tecnologias, propiciando um melhor aproveitamento das reservas minerais e qualidade dos produtos.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

O objetivo geral do trabalho foi avaliar e caracterizar os hidrociclones, ou somente ciclones, presentes nos circuitos de classificação das moagens e deslamagens dos Concentradores I e II da Samarco Mineração S/A.

### **2.2 Objetivos específicos**

- I. Caracterização das amostras para compreensão do comportamento do minério em estudo (análise granulométrica, % de sólidos);
- II. Análise das curvas de partições modeladas através do modelo Lynch & Wills;
- III. Avaliação do comportamento dos ciclones de diferentes diâmetros quantificando e qualificando a eficiência da operação.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esse capítulo apresenta uma revisão da literatura relacionada aos temas relevantes ao entendimento dessa pesquisa. Estão apresentados conceitos e trabalhos já realizados sobre o tema tratado no presente trabalho.

#### 3.1 Minério de ferro

O ferro é um metal macio, maleável, dúctil, densidade específica de 7,87 e número atômico 56. É o segundo metal mais abundante na crosta terrestre e é, comparativamente a outros metais, um fraco condutor de eletricidade (CRISTIE & BRATHWAITE, 1997).

Muito utilizados em indústrias, é raramente encontrado na sua forma nativa, exceto em alguns casos de basaltos e meteoritos. Geralmente é encontrado na natureza em forma de minério, rochas a partir das quais se obtém ferro metálico misturado com outros elementos químicos e impurezas. Seu aproveitamento econômico está relacionado com sua porcentagem de ferro em comparação a esses outros elementos presentes no minério (SAMPAIO & TAVARES, 2005).

Segundo Takehara (2004), o elemento ferro pode ser encontrado em seus principais minerais minérios que são: a hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  - 70% de ferro), magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$  - 72% de ferro), limonita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$  - 50% a 66% de ferro), e siderita ( $\text{FeCO}_3$  - 48% de ferro).

O minério de ferro é a matéria-prima básica para a produção de ferro e aço, fundamentais para as economias de todos os países industrializados.

Takehara (2004) ainda afirma que o minério de ferro é classificado de acordo com a sua mineralogia e textura, que foram geradas durante o processo de deformação e metamorfismo que afetaram a região de formação. As denominações dos minérios de ferro explorados comercialmente podem ser de vários tipos: hematitas puras, itabiritos, *blue dust* e canga.

O itabirito pode ser definido como uma formação ferrífera de fácies óxido, composto por bandas alternadas e metamorfizadas, das quais as bandas de *chert* ou de *jaspe* originais foram recristalizadas como quartzo granular e o ferro está presente como hematita, magnetita ou martita. O teor de ferro nesse tipo de rocha varia entre 30 e 60% (DORR & BARBOSA, 1963).

Rosière et al. (1991), classifica o itabirito de acordo com sua composição, dividindo-os em três grupos principais:

1. Itabirito comum - constituído de bandas ricas em SiO<sub>2</sub> e óxido de ferro;
2. Itabirito dolomítico – composto de bandas ricas em carbonatos e óxidos de Fe;
3. Itabirito anfibolítico - compostos de bandas com anfibólios e óxido de Fe.

Existem, ainda, os itabiritos manganíferos e filíticos que são tipos subordinados, encontrados ocasionalmente nas interfaces entre os carbonatos estratigraficamente superior, e os filitos inferiores.

Segundo Mendes (2011), as formações ferríferas que possuem apenas quartzo (sílica) e hematita como constituintes principais, denominados itabiritos comuns, constituem os maiores depósitos de ferro no quadrilátero ferrífero, mais especificamente na mina de Alegria – Mariana, MG.

### **3.2 Áreas de ocorrência**

Conforme o U.S. Geological Survey e a Conferencia das Nações Unidas para o Comércio e Desenvolvimento (UNCTAC), o Brasil é o segundo maior produtor de minério de ferro, considerando extração e teor.

Segundo Roberto (2010), as grandes reservas de minério de ferro estão concentradas em Minas Gerais no Quadrilátero Ferrífero, Pará na Serra dos Carajás, e Mato Grosso do Sul em Urucum.

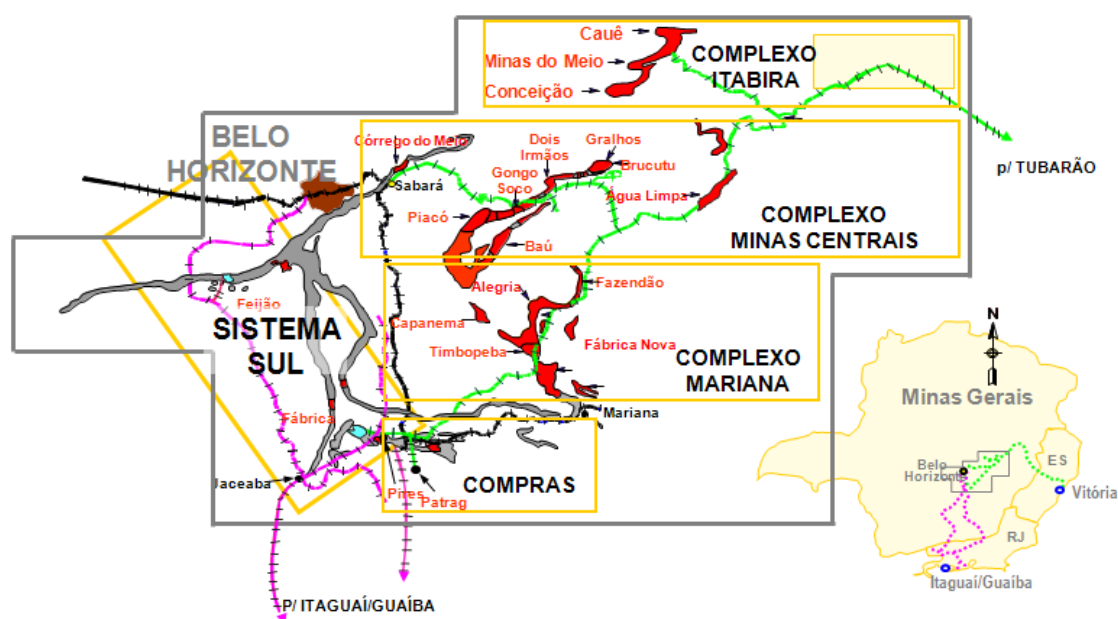
O quadrilátero Ferrífero está localizado na porção central do estado de Minas Gerais e é alvo de estudos constantes, uma vez que detêm depósitos expressivos de ferro, manganês, ouro, topázio imperial, bauxita e também por suas características geológicas (RESENDE, 2009).

Ocupa um espaço de aproximadamente 7.000 km<sup>2</sup> estendendo-se de Ouro Preto à Belo Horizonte em uma forma geométrica semelhante a um quadrado. É a continuação sul da Serra do Espinhaço. Existem três tipos de rochas metassedimentares supracrustais que podem ser encontradas no embasamento cristalino do quadrilátero, mas destacam-se principalmente metassedimentos pelíticos e quartzosos, depositados acima do cinturão verde Rio das Velhas por uma discordância angular (ROESER, 2010).

O quadrilátero ferrífero se dividem em supergrupo arqueano Rio das Velhas, supergrupo proterozóico Minas e o grupo proterozóico Itacolomy. Já o supergrupo Minas é composto por quatro grupos: Caraças, Itabira, Piracicaba e Sabará.

Roeser (2010), ainda afirma que dentre os grupos pertencentes, em relação a significado econômico o destaque é o grupo de Itabira que contem o minério de ferro, denominados itabiritos, e também conhecidos como *banded Iron Formations (BIF's)*, minérios bandeados do tipo lago superior.

A Mina de Alegria pertencente ao complexo Mariana está situada na porção sudeste do quadrilátero Ferrífero, próximo à cidade de Mariana, a aproximadamente 110 km a leste de Belo Horizonte, de Latitude: 20° 10' (Sul) e Longitude: 43° 30' (Oeste) segundo dados da Infomine Brasil, conforme ilustrado na Figura 3.1.



**Figura 3.1** - Mapa do Quadrilátero Ferrífero indicando a localização da mina de Alegria localizada no complexo Mariana (Vale – arquivos internos).

Entre 1977 a 1992, a Samarco Mineração S/A realizou suas explorações na mina de Germano, que possuía um minério bastante particular e homogêneo com relação a friabilidade e composição. Após a exaustão da mina de Germano, a Samarco passou a explorar a mina de Alegria, na suas porções norte, centro e sul. Essas áreas apresentam uma grande diversidade de minérios no que tange o teor de ferro, compacidade e principalmente a aspectos mineralógicos.

### 3.3 Panorama econômico

Dentre os bens minerais que mais se destacam nesse cenário está o minério de ferro, fruto da grande escala de produção e consumo de bens manufaturados, principalmente aqueles que dependem do aço.



Dados disponibilizados na Revista Indústria da Mineração (2012) mostram que em 2011 foram produzidas cerca de 400 milhões de toneladas de minério de ferro no Brasil, quantidade 25% maior do que registrada em 2010.

Estudos do Banco Credit Suisse mostram que ainda há um déficit mundial de mais de 90 milhões de toneladas de Minério de Ferro e que, embora o minério de ferro brasileiro contenha alto teor de ferro, as reservas não poderão suprir a demanda de produção existente.

Segundo dados do IBRAM (2012) a atividade mineral será responsável pelo maior investimento do setor privado no país no período de 2012 a 2016, com aportes de US\$ 75 bilhões. Destes, US\$ 40 bilhões serão destinados à lavra e beneficiamento do minério de ferro. Para dar suporte a essa expansão da siderurgia nacional, assim como atender ao crescente mercado externo, as mineradoras brasileiras têm um ambicioso plano de investimentos.

As maiores empresas produtoras no Brasil são a Vale S.A. (84,52%), CSN (5,45%), Samarco (6,29%) e Usiminas (1,71%).

### 3.4 Classificação

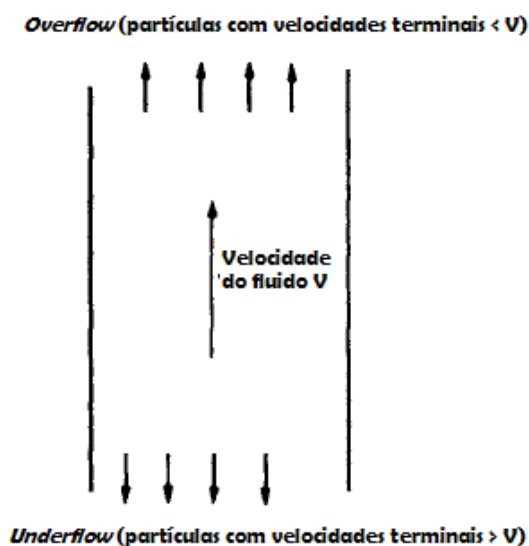
A classificação é uma das mais importantes operações unitárias do beneficiamento mineral. Consiste em separar uma população inicial de partículas com base na diferença da sua distribuição relativa de tamanho (MACHACA, 2010).

Uma partícula sólida em queda livre no vácuo, tem sua velocidade aumentada indefinidamente independente das propriedades físicas dessa partícula. Já em meio viscoso como, por exemplo, a água e o ar, existe uma resistência, que sofrida pela partícula, faz com que haja um aumento da velocidade. Quando ocorre o equilíbrio onde a resistência gravitacional se iguala com as forças exercidas pelo fluido a partícula atinge sua velocidade terminal e passa a cair em uma velocidade constante (WILLS, 2006).

Classificadores são essencialmente colunas separadoras onde o fluido ascende com uma aceleração nula. A velocidade terminal das partículas que alimentam essas colunas de separação é o determinante para que essas ascendam ou descendam (MELO, 2010).

Como produtos dessa coluna existem o *overflow* e o *underflow*. *Overflow* é o nome que se dá ao conjunto de partículas que possuem uma velocidade terminal menor que a velocidade do fluido, geralmente são partículas mais finas que ascendem na coluna de separação. Já *underflow* é o

conjunto que abrange a outra fração da alimentação na qual as partículas possuem velocidades terminais maiores que a velocidade do fluido e descendem na coluna de separação. A Figura 3.3 ilustra essa classificação.



**Figura 3.3** - Representação geral do funcionamento de um classificador (WILLS, 2006 adaptado)

Segundo estudos de Wills (2006) a separação sólido-sólido, em faixas de tamanhos distintos, tem uma influência significativa no desempenho da moagem e deslamagem.

A escolha do equipamento empregado na classificação de cada material se dá de acordo com os parâmetros operacionais juntamente com as características físicas das partículas que se deseja classificar (DELBONE, 1983).

Melo (2010), divide os classificadores em grupos de acordo com o mecanismo de funcionamento, os quais podem ser mecânico, não mecânico, gravitacional e centrífugo. Além disso, afirma que a água é o fluido mais utilizado na operação e o ciclone de funcionamento centrífugo o equipamento mais empregado na classificação mineral.

### 3.5 Hidrociclones (ou somente ciclone)

O primeiro ciclone foi patenteado em 1891 e sua utilização industrial foi consolidada apenas após a segunda guerra mundial em indústrias minerais (KAIPRECH *et al.*, 2005).

Segundo Kaiprech et al. (2005), a grande aplicabilidade dos ciclones está principalmente direcionada à indústria de extração e processamento mineral, compreendendo tanto a separação sólido-líquido quanto a separação de partículas por diferença de tamanho ou massa específica.

A introdução massiva de ciclones em circuitos de moagens e classificação se deu, de fato, nas décadas de 1960 a 1980 (SILVA, 1989).

Processos de moagem em circuito fechado e deslamagem se destacam pelo uso de ciclones como principal equipamento de classificação nos dias atuais. (SAMPAIO *et al.*, 2007).

A boa aceitação industrial dos ciclones se dá por esses equipamentos apresentarem vantagens de custo e manutenção, estrutura compacta, ausência de peças móveis e alta capacidade em volume (BARBER et al., 1980).

Beraldo (1987) aponta como desvantagem o alto custo de manutenção com bombas dependendo do tipo de minério. Tal desvantagem vem sendo superada a partir da utilização de bombas com características construtivas modernas utilizando revestimentos de materiais polímeros, cerâmicos ou ligas metálicas especiais com elevada vida útil.

De acordo com Carrisso (2004), um ciclone típico é constituído por uma seção cilíndrica de diâmetro  $D_c$  acoplada a um cone invertido. A seção cilíndrica possui uma entrada tangencial denominada *inlet* de diâmetro  $D_i$  por onde é injetada a alimentação a uma dada pressão e, umas das saídas do material localizadas no topo na parte central, denominado *vortex finder*, de diâmetro  $D_o$ , pela qual é descarregado o produto fino da classificação (*overflow*). Já a parte cônica possui em seu vértice a outra saída, denominado *ápex*, com um diâmetro  $D_u$ , através da qual é descarregado o produto grosseiro (*underflow*). Na Figura 3.4 é possível ver os constituintes de um ciclone.

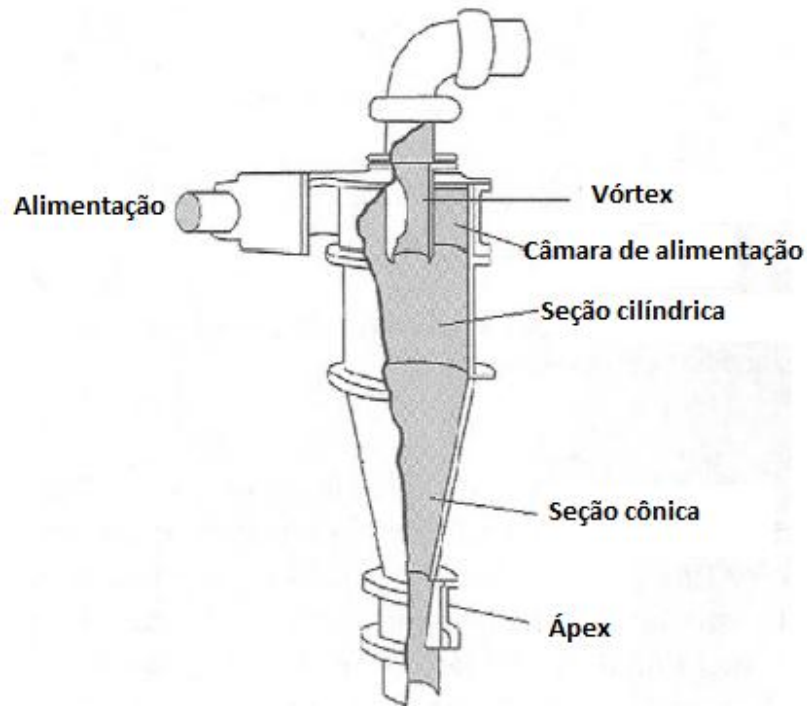


Figura 3.4 – Desenhos ilustrativos das seções e/ou partes de um hidrociclone (WILLS, 2006 adaptada).

O princípio de funcionamento do ciclone baseia-se na sedimentação centrífuga. Entrando na câmara, a polpa adquire um movimento de rotação por meio da aceleração centrífuga.

Segundo Wills (2006), as forças atuantes no processo são a força centrífuga e a força de arraste, radialmente opostas, geradas pelo próprio fluxo da polpa e ilustradas pela Figura 3.5.

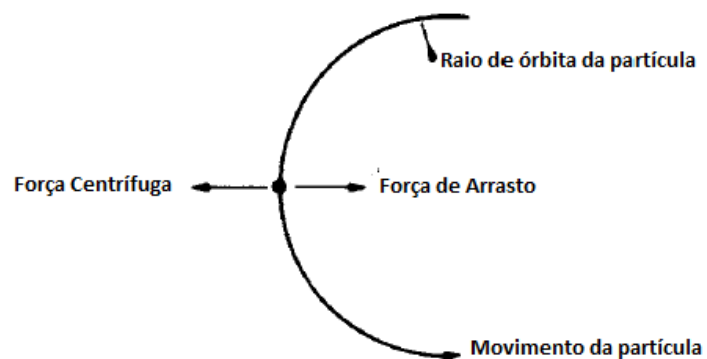


Figura - 3.5 Forças atuantes no movimento de órbita da partícula (Wills, 2006 traduzida e adaptada).

A força centrífuga acelera as partículas em suspensão e arremessa as partículas maiores em direção à parede classificando as partículas de acordo com tamanho, forma e densidade.

Estudos de Machaca (2010) mostram que quase na totalidade das aplicações de um ciclone na mineração, o equipamento é alimentado por um material em forma de polpa que entra sob pressão através do *inlet*.

Esta entrada pode ser feita tangencialmente ou em voluta (helicoidalmente), apresentando os ciclones com entrada em voluta maior capacidade e melhor *performance*.

A polpa escoa pelo ciclone através de uma combinação de dois fluxos helicoidais: um fluxo descendente e um fluxo ascendente.

Segundo Machaca (2010), o fluxo descendente que rege em direção ao *ápex* é formado, em sua grande maioria, por partículas grosseiras. Devido ao *ápex* possuir uma pequena abertura apenas uma parte é descarregada, assim o fluxo restante forma um vórtice ascendente interno, que possibilita a saída das partículas mais finas pelo *vortex*. Esse processo está esquematicamente ilustrado na figura 3.6.

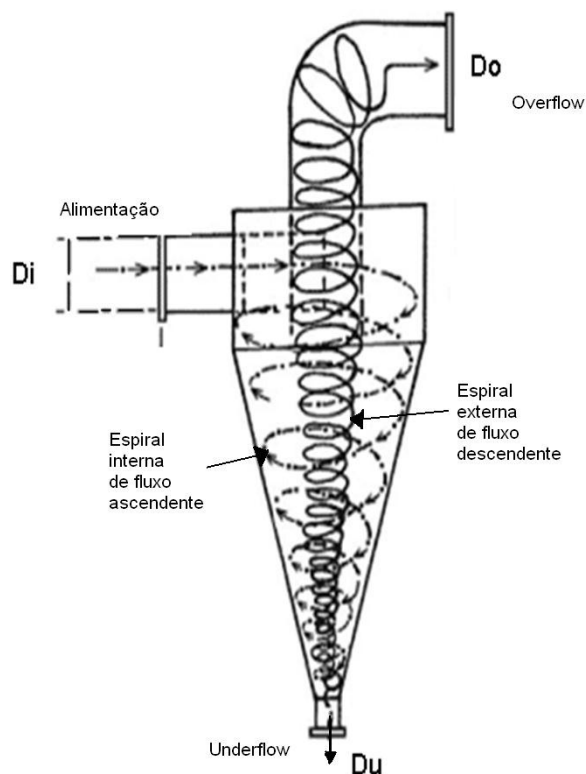


Figura 3.6 – Ilustração dos fluxos ocorrentes em um hidrociclone (MACHACA, 2010).

Segundo Kelly e Spottiswood (1982), uma interferência direta nesses fluxos é o curto circuito que faz com que partículas sejam descarregadas no *vortex* sem nenhuma classificação.

A ocorrência desse curto circuito em maior ou menor quantidade afeta diretamente a eficiência do ciclone. Esse efeito, também conhecido como *by-pass*, será mais bem explicado, a seguir, no tópico eficiência dos ciclones.

Uma observação feita por Beraldo (1987) é a não obrigatoriedade de o *vortex* estar voltado para cima e o ápex estar voltado para baixo; o desempenho do ciclone é o mesmo independente da sua posição. Isso acontece, pois geralmente a aceleração da gravidade é pequena em relação à aceleração centrífuga.

Ciclones de grande diâmetro operando com baixas pressões, porém, são exceções já que nesses a posição de montagem adquire importância. Ambas as correntes, *underflow*, pelo ápex e *overflow* pelo *vortex*, devem descarregar aproximadamente à mesma altura, à pressão atmosférica pois, caso contrário, pode haver alteração na *performance* do mesmo.

Além disso, o diâmetro da partícula deve ser observado para se definir a posição do ciclone. Ciclone utilizado para partículas de grande diâmetro deve operar na posição vertical com o ápex voltado para baixo sob pena de influenciar no desempenho do corte.

### **3.6 Eficiência dos ciclones**

Segundo Medronho (1988), tanto as propriedades geométricas do ciclone, as propriedades físicas do sólido e do fluido bem como as condições de operação são fatores de influência nas condições de eficiência de um ciclone.

O classificador recebe o material e tem a finalidade de separá-lo em dois produtos. Intuitivamente, um classificador 100% eficiente separaria toda a fração acima de uma malha desejada como *underflow* e todo o restante como *overflow*.

Segundo King (2001), nenhum classificador opera perfeitamente e não divide uma população de partículas em duas frações de tamanhos particulares e bem definidos, ou seja, algumas partículas de granulometria superior à malha especificada vão para o *overflow*, assim como partículas finas são incorporadas ao *underflow*.

Ainda de acordo com King (2001), todos os classificadores possuem uma função distribuição que caracteriza a eficiência de separação em qualquer tamanho através de uma curva de partição.

A curva de partição (também conhecida como curva de distribuição, de desempenho, de eficiência e de Tromp) representa a eficácia do ciclone em termos de separação por tamanho. O formato de “S” da curva é típico de todos classificadores industriais.

Essas curvas permitem a determinação da percentagem de massa da alimentação, contida em cada classe de tamanhos, que é direcionada para um dos produtos: *underflow* ou *overflow* (MACHACA, 2010).

Um exemplo esquemático da curva de partição esta ilustrada na Figura 3.7.

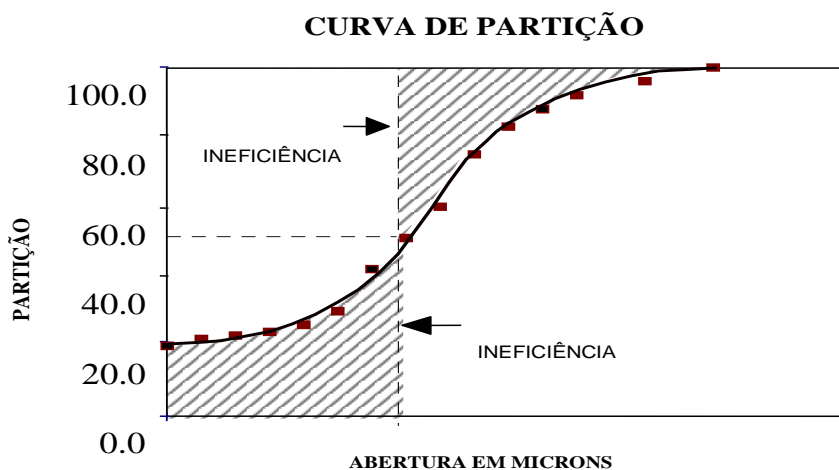


Figura 3.7 – Representação da curva de partição indicando as áreas de ineficiência da curva.

Para se determinar a curva de partição de um classificador, faz-se um balanço de material na separação efetuada para cada faixa granulométrica. A curva de partição é traçada, plotando-se para cada classe granulométrica, a porcentagem que reporta aos grossos do ciclone em função do diâmetro médio da referida classe. Considera-se como diâmetro médio a média geométrica dos limites da classe granulométrica (BERALDO, 1987).

A curva de partição é definida por parâmetros. Destaca-se o  $d_{50}$  que corresponde ao diâmetro o qual a ordenada da curva corresponde a 50%, isso significa que as partículas com esse diâmetro distribuem-se metade para cada produto. Os parâmetros  $d_{25}$ ,  $d_{75}$  e  $d_{95}$  também são importantes, pois

a combinação entre eles determinam fatores de eficiência como, por exemplo, a relação  $\frac{d_{95}}{d_{50}}$  que varia entre 1,5 a 2,5 para circuito aberto e acima de 2,5 para circuito fechado.

Observa-se, ainda, que a curva de partição real apresenta uma “inclinação” indicando que algumas partículas de granulometria superior ao  $d_{50}$  vão para o *overflow*, assim como partículas de granulometria inferior ao  $d_{50}$  são incorporadas ao *underflow*. Este fenômeno indica a imperfeição do corte inerente ao processo de classificação por ciclones. Para obter o grau de imperfeição do corte pode-se determinar a área compreendida entre a curva de partição e a reta vertical passando por  $d_{50}$  como indicado na Figura 3.7. Mais usualmente o fator de eficiência ( $I$ ) é definido pela fórmula 3.1.

$$I = \frac{d_{75} - d_{25}}{2 * d_{50}} \quad (3.1)$$

Pode-se verificar que o fator de eficiência ( $I$ ) representa o coeficiente angular médio da curva entre os limites de 25% a 75%. Quanto maior esse coeficiente, evidentemente menos eficiente será a classificação, por outras palavras, quanto mais próximo de zero for valor de  $I$ , melhor a eficiência do processo (TERRA, 1983).

O processo de classificação que age no ciclone e em outros tipos de classificador é constituído por dois componentes, um referente às forças efetivamente atuantes na classificação e outro às partículas arrastadas pela água. Isso significa que o processo de classificação propriamente dito separa os sólidos grossos de uma polpa contendo as frações finas, o que corresponderia assim à fase fluida no processo.

Esta fase carrearia para o *underflow* as partículas em suspensão na água. O processo de classificação global é, então, condicionado pela atuação das forças de classificação (classificação propriamente dita) e pela partição da água, o que é feito usualmente, considerando-se que uma parte da alimentação proporcional à partição de água passa direto para o *underflow*, constituindo o chamado efeito de curto circuito ou *by-pass*.

Segundo Machaca (2010), o *by-pass* é um fenômeno que foi estudado por diversos autores, entre eles Kelsal (1953), que determinou uma relação entre o *by-pass* e as frações de água, afirmando que o *by-pass* é diretamente proporcional à fração de água alimentada que é reportado ao *underflow* ( $Rf$ ), definida pela equação 3.2.

$$Rf = \frac{Q_{au}}{Q_{aa}} \quad (3.2)$$



Onde :

$Q_{aa}$  = vazão de água na alimentação ( $m^3/h$ ), e

$Q_{au}$  = vazão de água no produto *underflow* ( $m^3/h$ ).

Lynch e Rao (1975) propõe o cálculo do *by-pass* através da fórmula 3.3.

$$Bypass = \left( \frac{U_i}{S_u} - U_i \right) S_o \quad (3.3)$$

Onde:

$U_i$  = Partição para o *underflow*,

$S_u$  = Percentagem de sólidos no *underflow*,

$S_o$  = Percentagem de sólidos no *overflow*.

Segundo Delboni (1989), devido o efeito *by-pass*, onde a água carrega finos ao *underflow*, é usual construir a denominada curva de partição corrigida ( $U_{ic}$ ), em que a correção é feita excluindo a fração de partículas existentes no *underflow* que tenham sido arrastadas pela água. Para tal, considera-se que uma parte da alimentação, proporcional à recuperação de massa no *underflow*, passa diretamente (curto-circuito) para o *underflow*.

Na curva de partição corrigida, a partição para o *underflow* tende a zero e o  $d_{50c}$  corresponde ao diâmetro das partículas cuja partição para o *underflow* é de 50% na curva de partição corrigida, como mostrado na Figura 3.8.

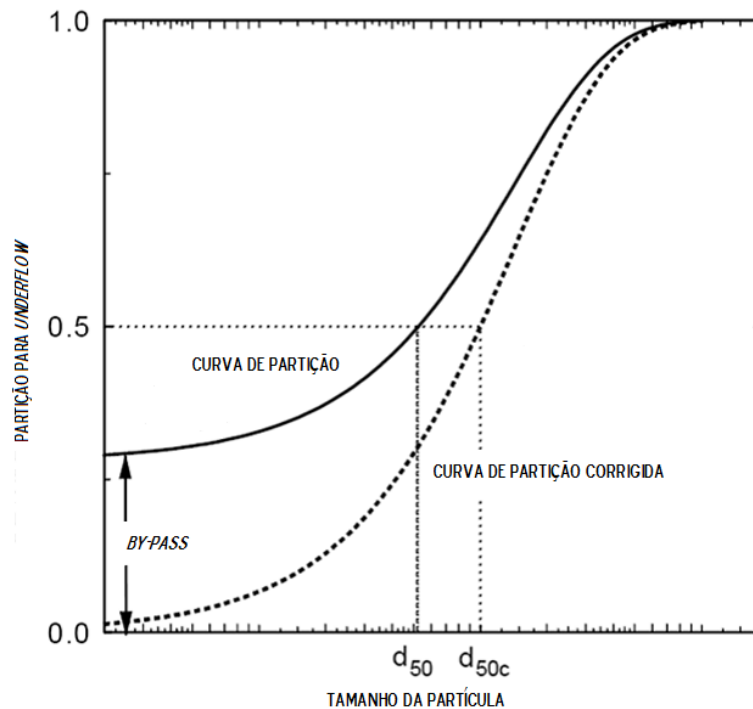


Figura 3.8 – Curvas de partição típicas de um hidrociclone, real e corrigida, identificando o efeito do *by-pass* e os parâmetros  $d_{50}$  e  $d_{50c}$  (MACHACA, 2009 adaptada).

### 3.7 Modelagem matemática para ciclones

Segundo Nageswararao (2004), modelos matemáticos tem a finalidade de prever características de saídas à partir das variáveis de entrada, ou seja, o sucesso da aplicação de modelos matemáticos depende de boas escolhas baseadas nas características previstas que podem afetar o processo.

As aplicações dos modelos matemáticos em ciclones são listadas por Delbone (1989) e se resumem em:

- 1- **Análise de processos:** o processo em ciclones pode ser classificado de forma clara e rápida através de um modelo que correlacione variáveis de operação submetidas a parâmetros que representem a qualidade desse processo. Geralmente são necessários dois ou três parâmetros e os modelos de Plitt, Lynch & Rao estão incluídos nessa categoria.
- 2- **Simulação:** é possível simular a performance de um hidrociclone quando se modifica as variáveis diretas do processo com o objetivo de prever as condições de operação do equipamento que possam atender alguma necessidade de caráter técnico e/ou econômico. Os modelos arquitetados à partir das teorias de Plitt são, com certeza, os de maiores destaques em simulação.

- 3- Projeto: projetar ciclones é uma técnica e para tal, os modelos matemáticos proporcionam correlacionar as variáveis independentes envolvidas como, por exemplo, a geometria dos orifícios com índices de desempenho do processo.
- 4- Controle de processo “on-line”: com objetivo de maximizar o desempenho do hidrociclone, usa-se modelos matemáticos que sejam capazes de correlacionar índices de performance e conjunto de dados operacionais. A maioria das aplicações existe para controle de diâmetro de corte da operação.

Estudos de Machaca (2010) classificam os atuais modelos em fenomenológicos, empíricos e semi-empíricos de acordo com a origem dos dados tratados (experimentais, teóricos ou a combinação de ambos).

Delbone (1989) define como modelo fenomenológico aqueles que se caracterizam pela descrição do processo em termos de taxas médias de mudanças de variáveis de controle, já os modelos empíricos partem de dados operacionais levantados experimentalmente podendo ser em bancada, plantas piloto ou mesmo em escala industrial. Esses dados reunidos geram correlações possibilitando associar parâmetros de desempenho do processo às variáveis operacionais.

Alves (2006) destaca Lynch e Plitt como líderes dos dois grupos de desenvolvimento na área de modelamento matemático empírico de classificação com ciclones. À partir desses, surgiram outros modelos que se mostram de grande influência.

### 3.7.1 Modelo de Lynch & Rao

Lynch (1977) propôs um modelo empírico composto por quatro correlações básicas, sendo elas a equação da vazão, o tamanho do corte corrigido ( $d_{50c}$ ), a geometria dos ciclones e porcentagem de sólidos na alimentação.

O  $d_{50c}$  é equacionado em 3.3 e a partição da água para o *underflow* em 3.4.

$$\log_{10}d_{50c} = K_1D_o - K_2D_u + K_3D_i + K_4C_w - K_5Q_f + K_6 \quad (3.3)$$

$$R_f = K_8 \frac{D_u}{Q_f} - \frac{K_9}{Q_f} + K_{10} \quad (3.4)$$

sendo:

$$Q_f = K_7D_o^{0,73}D_i^{0,86}P^{0,42} \quad (3.5)$$

Onde:

$d_{50c}$  = tamanho mediano de partição corrigida (mm);

$D_0$  = diâmetro do *vortex finder* (cm);

$D_u$  = diâmetro do *apex* (cm);

$D_i$  = diâmetro do *inlet* (cm);

$C_w$  = percentagem de sólidos em massa da alimentação (%);

$Q_f$  = vazão de água na alimentação (t/h);

$R_f$  = partição da água para o *underflow*;

$P$  = pressão da alimentação (kPa);

$K_1 \dots K_n$  = parâmetro típicos para o sistema minério/ciclone;

Segundo Machaca (2010), os testes para a formulação desse modelo foram realizados em ciclones do tipo Krebs e isso implica que a aplicação desse modelo em ciclones de geometrias diferentes pode não gerar uma previsão confiável.

E, de forma similar, Machaca (2010), diz que os valores das constantes foram derivados para o quartzo e o calcário com uma determinada distribuição de tamanhos de partícula. Portanto, para a utilização desse modelo para outros tipos de materiais, faz-se necessária uma correção da densidade pela equação 3.6.

$$\frac{(d_{50c})_a}{(d_{50c})_b} = \left[ \frac{(\rho_s)_b - \rho_L}{(\rho_s)_a - \rho_L} \right]^{0,5} \quad (3.6)$$

Sendo  $(\rho_s)_a$  e  $(\rho_s)_b$  a densidade dos minerais *a* e *b* respectivamente e  $\rho_L$  densidade do líquido.

### 3.7.2 Modelo de Plitt

Assim como Lynch, Plitt (Plitt, 1976) propôs um conjunto de quatro correlações básicas, porém incluindo um número maior de variáveis em cada uma delas.

As variáveis se dividem em dependentes e independentes:

#### Variáveis dependentes:

$Q_v$  = vazão volumétrica de polpa na alimentação (L/min);

$d_{50c}$  = Tamanho de corte;

$m$  = Parâmetro de desenho e classificação;

Razão entre as vazões volumétricas da polpa no *underflow* e no *overflow*.

#### Variáveis independentes:

$D_c$  = Diâmetros do ciclone;

$D_o$  = diâmetro do *vortex finder*;

$D_u$  = diâmetro do *apex*;

$D_i$  = diâmetro do *inlet*;

$h$  = altura livre do *vortex*;

Correlações entre eles ( $D_u^2 + D_o^2$ ) e ( $D_u/D_o$ );

Segundo Machaca (2010), o modelo de Plitt na sua forma atual é revisada por Flintoff *et al.* (1987) e apresenta as seguintes equações para o desempenho do hidrociclone:

$$d_{50c} = K_1 \frac{39,7 D_c^{0,46} D_i^{0,6} D_o^{1,21} \eta^{0,5} \exp^{0,063 C_v^p}}{D_u^{0,71} h^{0,38} Q_v^{0,45} \left( \frac{\rho_s - 1}{1,6} \right)^n} \quad (3.7)$$

$$P = K_2 \frac{1,88Q_v^{1,8} \exp^{0,0055C_v^p}}{D_c^{0,37} D_i^{0,94} h^{0,28} (D_u^2 + D_o^2)^{0,87}} \quad (3.8)$$

$$S = K_3 \frac{18,62\rho_p^{0,24} \left(\frac{D_u}{D_o}\right)^{3,31} h^{0,54} (D_u^2 + D_o^2)^{0,36} \exp^{0,0054C_v^p}}{D_c^{1,11} P^{0,24}} \quad (3.9)$$

$$m = K_4 1,94 \left(\frac{D_c^2 h}{Q_v}\right)^{0,15} \exp\left(\frac{-1,58S}{1-S}\right) \quad (3.10)$$

Onde:

$D_c$  = diâmetro do ciclone (cm);

$\eta$  = viscosidade do líquido (cP);

$C_v^p$  = percentagem de sólidos por volume na alimentação (%);

$h$  = altura livre do ciclone (cm);

$n$  = expoente hidrodinâmico, a ser estimado a partir dos dados (valores padrões para os regimes laminar = 0,5 e turbulento = 1);

$\rho_s$  = densidade do minério ( $\text{g/cm}^3$ );

$\rho_p$  = densidade da polpa ( $\text{g/cm}^3$ );

$S$  = razão entre as vazões volumétricas da polpa no *underflow* e no *overflow*;

$m$  = parâmetro de nitidez da separação.

Segundo Silva et al (2012), o modelo de Plitt é o modelo mais utilizado para o cálculo do diâmetro de corte corrigido de ciclones ( $d_{50c}$ ).

A maior limitação em certeza do modelo de Plitt está relacionada com o cálculo da razão entre as vazões volumétricas da polpa no *underflow* e *overflow* ( $S$ ) e como essa razão é necessária para cálculo de outras variáveis como na recuperação de água no *underflow* ( $R_f$ ) a propagação do erro é significativo e inevitável (KING, 2001).

Outra limitação é a quantidade de variáveis operacionais necessárias para a execução do modelo, que muitas vezes não são simples e práticas de serem obtidas.

### 3.7.3 Outros modelos

Existem outros modelos para calibração da curva de ciclones. Estes se baseiam em dados experimentais dos modelos de Lynch & Rao e Plitt, com algumas modificações como variações geométrica dos ciclones e principalmente variação na forma de cálculo do  $d_{50c}$ .

Podemos citar: Modelo de Nageswararao, Modelo de Vallebuona, Modelo de Asomah, Modelo de Tavares.

### 3.7.4 Desvantagens dos modelos de ciclones

Modelos matemáticos propostos na literatura para aplicações em ciclones são apenas aproximações da realidade física e por isso possuem limitações, o que quer dizer que erros de dados medidos são incluídos no modelo e conseqüentemente na previsão gerada por tal.

Machaca (2010) cita algumas características limitantes para modelos fenomenológicos de ciclones, como por exemplo, a maioria terem sido desenvolvidos à partir de fluidos Newtonianos e não de polpas (que são encontradas quase que na totalidade de usinas de tratamento mineral). Além disso, apesar de esses modelos levarem em consideração o movimento físico da partícula no meio líquido, eles não preveem o impacto no desempenho do ciclone e aplicações em indústrias minerais.

Já no caso dos modelos empíricos, Kraipech et al. (2006) diz que uma das limitações é a capacidade desses modelos só permitirem previsões razoavelmente precisas se os ensaios forem realizados dentro dos limites experimentais usados para determinação dos parâmetros das equações utilizadas em tais modelos.

Segundo Chaves (2002), outra desvantagem dos modelos empíricos é que eles não são muito sujeitos à extrapolação como, por exemplo, diâmetro pequeno de ciclones, polpa apresentando grande quantidade de finos, características muito variáveis (densidades diferentes como é o caso dos itabiritos, diferenças de formas como exemplo partículas tabloides de caulinita ou de mica e variação das características reológica do minério).

### 3.8 Parâmetro alfa ( $\alpha$ ) de Lynch & Rao

Segundo Delboni (1989), houveram muitas tentativas principalmente dos autores Lynch & Rao e Plitt em obter parâmetros que generalizassem os modelos matemáticos de operações em ciclones.

A técnica de Yoshioka & Hotta (1955), foi a mais conveniente e propunha a criação de uma curva padrão de partição denominada curva de partição corrigida reduzida onde se plota nas abcissas o quociente entre as classes granulométricas ( $d_i$ ) e tamanho do corte corrigido ( $d_{50c}$ ) e nas ordenadas as partições para o *underflow*.

A curva de eficiência corrigida reduzida, como mostra a Figura 3.9, é a mais adequada para avaliar a performance do ciclone e como material responde a esse processo.

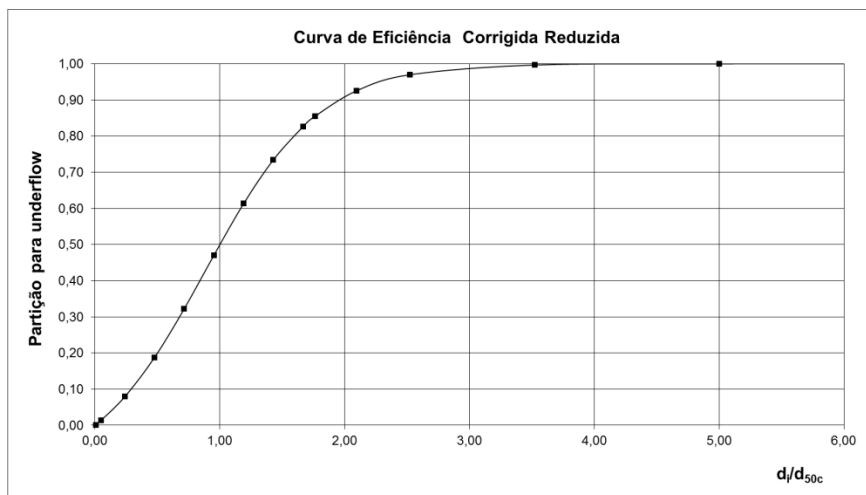


Figura 3.9 - Curva de eficiência corrigida reduzida

Posteriormente Lynch & Rao (1965) apresentaram a equação 3.11, desenvolvida por Whiten, que defini a curva de eficiência corrigida reduzida.

$$U_{ic} = \frac{\exp^{\alpha x_i - 1}}{\exp^{\alpha x_i} + \exp^{\alpha - 2}} \quad (3.11)$$

sendo:

$$X_i = \frac{d_i}{d_{50c}} \quad (3.12)$$

Onde:



$U_i$  = partição reduzida;

$\alpha$  = parâmetro de eficiência da separação.

$d_i$  = tamanho médio da partícula (mm);

$d_{50c}$  = tamanho mediano de partição corrigida (mm);

Essa equação indica uma peculiaridade: a curva de eficiência corrigida reduzida é independente das dimensões do ciclone e das condições operacionais para uma dada alimentação, ou seja, para ciclones de diferentes tamanhos e geometria semelhante, a curva de eficiência corrigida reduzida seria igual, sendo função apenas do material. A Figura 3.10 mostra essa relação.

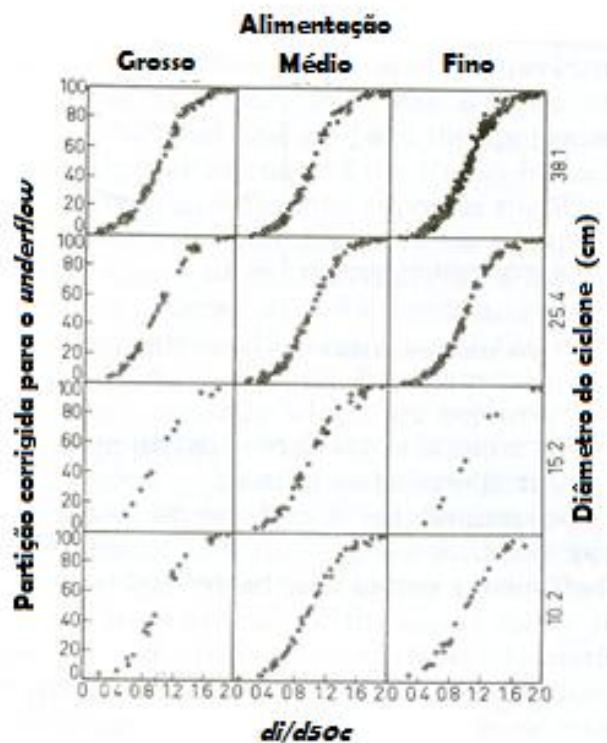


Figura 3.10 – curvas de eficiência corrigida reduzida para um dado mineral e ciclones de diferentes diâmetros (traduzida).

Observa-se na Equação 3.11 a introdução do parâmetro alfa ( $\alpha$ ) o qual influencia diretamente no perfil da curva.

Segundo Delboni (1989), o parâmetro  $\alpha$  representa a variabilidade do processo ficando a função exclusivamente dependente das características do material, ou seja, do minério frente ao processo é uma característica do material. Quanto maior o valor de alfa, maior a nitidez de corte. Na Figura 3.11 é possível notar o sentido de crescimento anti-horário do parâmetro  $\alpha$  e a sua influencia na curva de eficiência corrigida reduzida.

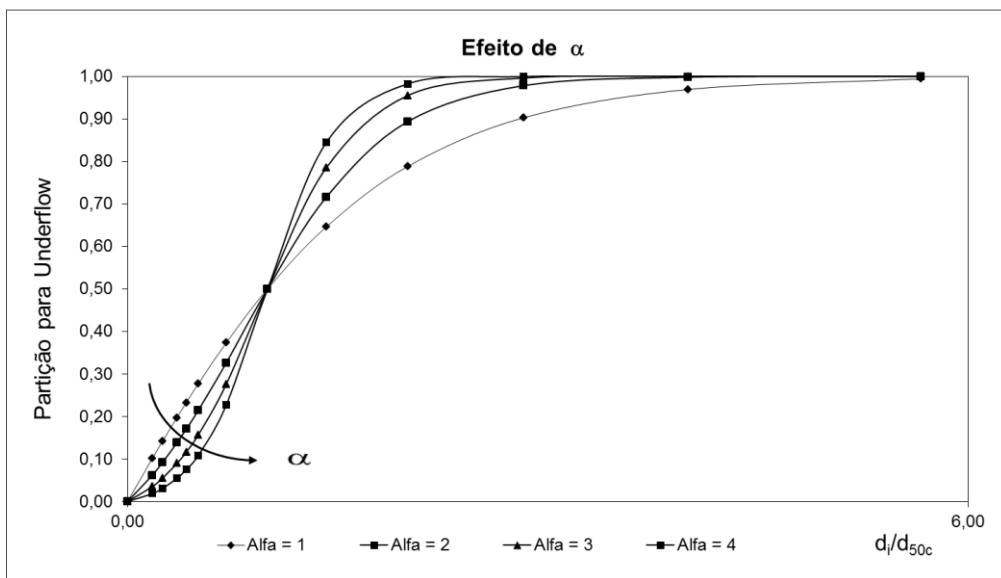


Figura 3.11 – Influência do alfa nas curvas de partição e a indicação de seu crescimento.

De acordo com os estudos de Beraldo (1987), o valor mais comum de alfa é 4. Valores inferiores indicam uma diminuição da eficiência de classificação.

Estudos de Tarr (1985) mostram que para ciclones em um estágio, o alfa, geralmente, possui valores entre 3 e 4. Já ciclones com a lavagem, o alfa passa para um intervalo entre 5 e 6 e para circuito fechado de moagem alfa tem um valor próximo de 2,5.

### 3.9 Parâmetro $m$ de Plitt

Em um trabalho desenvolvido, Plitt (1976) relacionou a performance de ciclones com as variáveis operacionais, e identificou uma expressão que correlacionasse a partição para *underflow* com um parâmetro  $m$ . O parâmetro  $m$  é uma indicação da eficiência da separação. Valores acima de 3 indica uma alta eficiência na separação, enquanto valores inferiores a 2 indica uma baixa eficiência.

Usualmente ciclones possuem valores para  $m$  entre 1,5 à 3,0. E para operações de classificação em curto de moagem  $m$  possui um valor próximo de 2,0.

Diferente do parâmetro alfa de Lynch & Rao, que independe das variáveis de operação, o modelo de Plitt estabelece que  $m$  é dependente dessas variáveis e pode ser determinado pela Expressão 3.12:

$$m = 1,8 \exp[0,58 - 1,58 R_v] \left( \frac{D_c^2 h}{Q} \right)^{0,15} \quad (3.12)$$

Sendo:

$$R_v = \frac{Q_u}{Q} \quad (3.13)$$

Onde:

$m$  = parâmetro de nitidez de separação;

$D_c$  = Diâmetro do ciclone (cm);

$h$  = altura livre do ciclone (cm);

$Q_u$  = vazão do *underflow* (l/min);

$Q$  = vazão da alimentação (l/min);

A vazão do *underflow* ( $Q_u$ ) é função do diâmetro do ápex. Portanto, o efeito desse diâmetro é importante no valor de  $m$  (CHAVES, 1996).

A desvantagem desse modelo deve-se ao fato da restrição do conhecimento de todas as variáveis necessárias. No ponto de vista de Chaves (1996), o modelo de Plitt, por ser totalmente generalizado, perde um pouco da confiabilidade.

Segundo Plitt (1976), existe uma relação entre o parâmetro alfa de Lynch & Rao e o parâmetro  $m$  regida pela equação 3.14.

$$\alpha = 1,45m - 0,45 \quad (3.14)$$

E, segundo Chaves (1996), o modelo de Lynch & Rao, por ter o parâmetro alfa acertável de acordo com as condições específicas do circuito em que se está trabalhando, permite um melhor ajuste às condições experimentais que o parâmetro  $m$  de Plitt. Concluindo que o modelo de Lynch e Rao exerce vantagens quando trabalhamos com plantas de beneficiamento em operação e o modelo de Plitt é mais indicado na fase de projeto quando os parâmetros experimentais ainda não estão disponíveis.

### **3.10 Processo Samarco Mineração S/A**

A SAMARCO é uma joint venture, em operação desde 1977, cujo controle acionário está igualmente dividido entre a Companhia Vale e BHP Billiton. A empresa se dedica à lavra mineral, beneficiamento, pelotização e exportação de pelota de minério de ferro. Essencialmente toda a produção da companhia é exportada para siderúrgicas de 25 países das Américas, Ásia, África, Europa e Oriente Médio. É a empresa de mineração pioneira no Brasil na concentração de itabirito por flotação. Até então, o minério itabirítico não era explotado devido ao baixo teor de ferro e a granulometria muito fina.

Atualmente, a Samarco tem capacidade nominal produtiva de 31,5 milhões de toneladas de concentrado de minério de ferro por ano sendo que 13,5 milhões de toneladas são produzidas pelo Concentrador I, 8,5 milhões de toneladas pelo Concentrador II e 9,5 milhões de toneladas no Concentrador III. Esses concentradores estão instalados na unidade de Germano, localizada nas cidades de Mariana e Ouro Preto, em Minas Gerais. A Samarco também possui quatro usinas de pelotização instaladas na unidade de Ubu, no município de Anchieta, no Espírito Santo.

As duas unidades industriais são interligadas por três minerodutos, com 400 quilômetros de extensão cada, que transportam a polpa de minério de ferro entre os dois estados passando por 25 municípios. A Samarco é a pioneira nesse tipo de transporte. Conta, ainda, com um terminal marítimo próprio, localizado em Ubu (ES), por onde escoa toda a produção. Possui também escritórios de vendas, em Belo Horizonte (MG), em Amsterdam (Holanda) e Hong Kong (China).

Além disso, possui uma usina hidrelétrica em Muniz Freire (ES) e participa do consórcio da usina hidrelétrica de Guilman-Amorim, em Antônio Dias e Nova Era (MG).

Em 1991, com a exaustão da mina do Germano, a Samarco passou a lavar minério da mina de Alegria; este minério apresentou-se mais hidratado, mais compacto e com cinética de flotação mais lenta o que exigiu uma readequação da rota de processo com a inserção de uma instalação de

britagem, mais uma etapa de deslamagem e mais uma etapa de flotação empregando colunas de flotação. Esta última registrou o pioneirismo da flotação de minério itabáritico em colunas.

Em 1997, a Samarco passou pelo seu primeiro ciclo de expansão. Nesta oportunidade foram instalados mais dois moinhos de bolas pré-primários além da adequação do volume de flotação. Em Ubu foi instalada a segunda unidade de pelotização.

Em 2008, a Samarco realizou o Projeto Terceira Pelotização – P3P, configurando seu terceiro ciclo de expansão. O P3P consistiu da instalação do Concentrador II com capacidade para a produção de 8,5 milhões de toneladas de concentrado de minério de ferro, um novo mineroduto e a terceira unidade de pelotização em Ubu.

Recentemente, em 2014, a Samarco iniciou a operação do Projeto Quarta Pelotização – P4P, fechando seu quarto ciclo de expansão. O P4P consistiu da instalação do Concentrador III com capacidade produtiva de 9,5 milhões de toneladas de concentrado de minério de ferro, um novo mineroduto com capacidade de transporte de 20 milhões de toneladas de concentrado e a quarta unidade de pelotização com o maior forno de pelotização do mundo em Ubu.

O concentrado destina-se a produção de pelotas para o mercado siderúrgico de redução por alto forno ou redução direta. A empresa também comercializa o minério na forma de *pellet feed*. As pelotas representam, aproximadamente, 90,0% dos produtos comercializados pela Samarco que ocupa hoje a segunda posição no mercado transoceânico deste produto.

### **3.10.1 Planta de Beneficiamento**

Esse tópico explica o processo da planta de beneficiamento do Concentrador I e II da Samarco Mineração S/A de forma ilustrada e detalhada com destaque para os ciclones utilizados em cada etapa de classificação e deslamagem.

### 3.10.1.1 Concentrador I

O minério *ROM* é direcionado ao peneiramento. O retido em 12,5 mm é direcionado para a britagem. O minério britado retorna para o peneiramento constituindo a carga circulante. O material passante em 12,5 mm forma uma pilha de regularização da alimentação da moagem pré-primária. Esta pilha tem o formato alongado formada com auxílio de um *tripper car*. A partir desta pilha, o minério é retirado por alimentadores rotativos e conduzido para os moinhos pré-primários através de correias transportadoras.

Com a função de reduzir a granulometria do minério proveniente da britagem, a moagem pré-primária é realizada a úmido em duas linhas, ou seja, dois moinhos de bolas. Esses moinhos operam em circuito aberto.

Também realizada a úmido, a moagem primária opera em quatro linhas, um moinho de bolas por linha e, cada um desses moinhos operando em circuito fechado com uma bateria de ciclones KREBS de 26" (660 mm) de diâmetro, denominados ciclones primários. O *underflow* dos ciclones primários retorna aos moinhos, enquanto o *overflow* é o produto final da moagem primária, e é direcionado para o circuito de deslamagem.

Os moinhos pré-primários e primários são equipados com *trommel* na descarga cujo *oversize* de ambos é direcionado para os moinhos pré-primários.

A Figura 3.12 mostra o fluxograma das etapas de moagem pré-primária e moagem primária do Concentrador I da Samarco Mineração S/A indicando a posição onde o ciclone é empregado para fechamento de circuito na moagem primária.

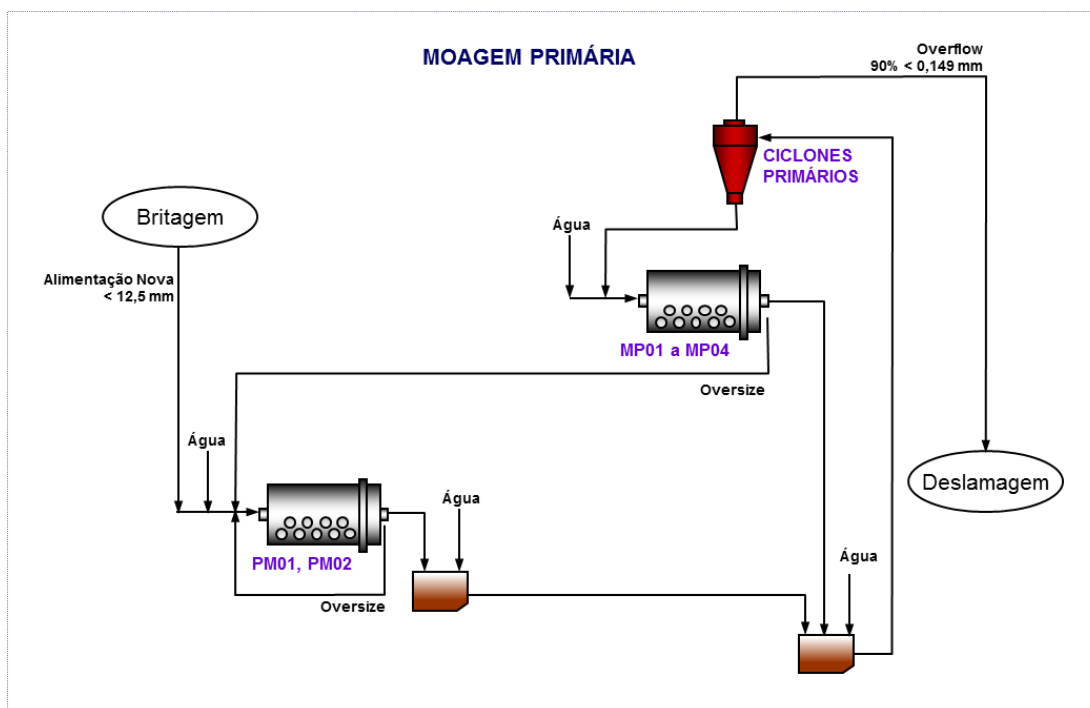


Figura 3.12 – Fluxograma das operações de pré-moagem e moagem primária (Samarco-arquivos internos).

A etapa seguinte, denominada deslamagem, consiste na retirada de finos (partículas menores que  $10,0\ \mu\text{m}$ ) provenientes da moagem. Essa etapa possui três estágios caracterizados por diferentes ciclones. O *overflow* dos ciclones primários segue para os ciclones raspadores. O *underflow* dos ciclones raspadores alimenta os ciclones limpadores e *overflow* alimenta os ciclones deslamadores. Os ciclones raspadores são KREBS de 15" (381 mm) de diâmetro (03 linhas) e GMAX de 15" (381 mm) de diâmetro (01 linha).

O *underflow* dos ciclones limpadores alimenta por gravidade a etapa de flotação e seu *overflow* é direcionado para a caixa de alimentação dos ciclones primários para o controle de nível como uma forma de otimização do uso da água de processo no circuito. No caso de haver excedente, este será direcionado para os espessadores de lama. Os ciclones limpadores são KREBS de 10" (254 mm) de diâmetro.

Nos ciclones deslamadores, último estágio de deslamagem, o *underflow* segue para o circuito de finos, enquanto o *overflow* segue para os espessadores de lama. Os ciclones deslamadores são AKW de 4" (102 mm) de diâmetro.

A Figura 3.13 apresenta o fluxograma da etapa de deslamagem em três estágios do Concentrador I empregando ciclones. Este concentrador entrou em operação em 1977 e utiliza uma geração passada

de ciclones a qual será amostrada para avaliação da sua eficiência. Os ciclones raspadores vêm sendo substituídos por ciclones de geração moderna, denominado GMAX, com novo perfil geométrico.

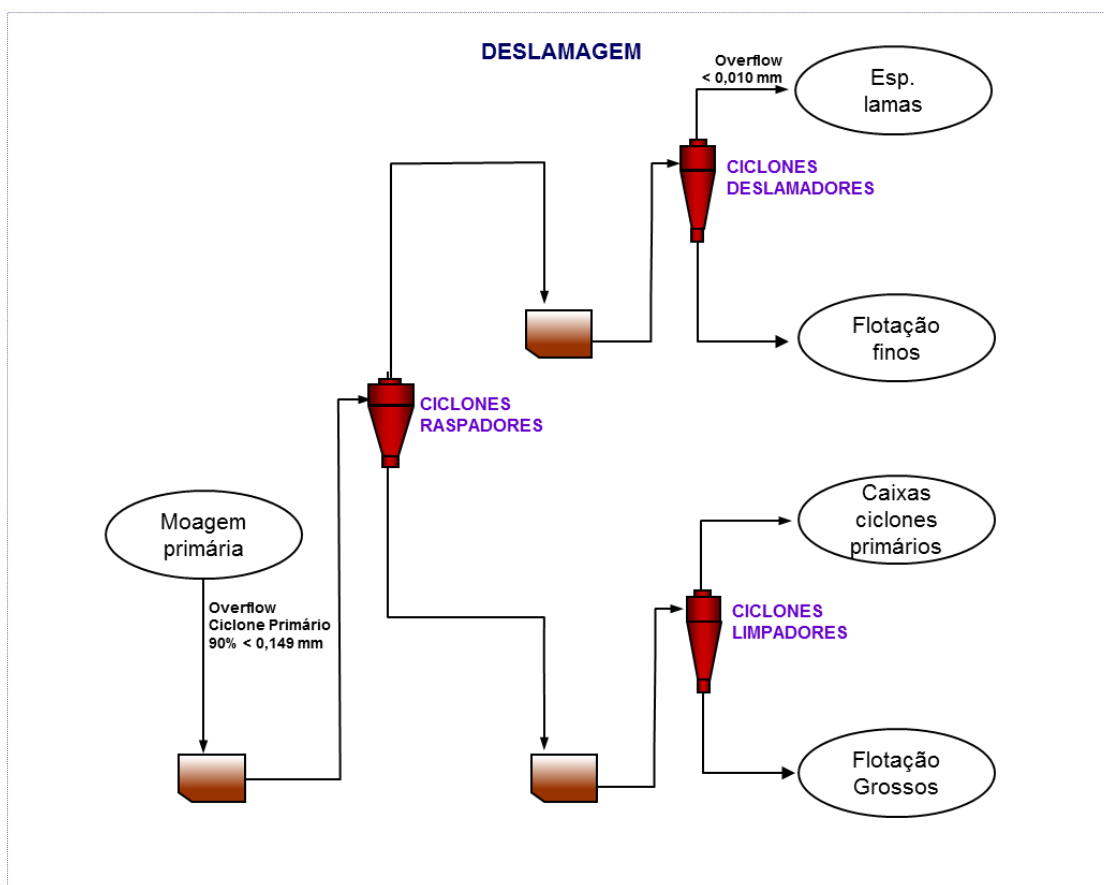


Figura 3.13 – Fluxograma da etapa de deslamagem (Samarco- arquivos internos).

Antes da flotação propriamente, o minério permanece por aproximadamente 5 minutos em tanques condicionadores a fim de promover a máxima adsorção dos reagentes de flotação. A partir do condicionamento, o minério segue para a etapa de flotação de grossos realizada em células de flotação convencional ou flotação de finos realizadas em colunas de flotação. Nesta duas etapas ocorre a primeira separação entre o minério de ferro e a ganga (sílica). O concentrado da flotação de grossos e flotação de finos seguem para a moagem secundária que é realizada em duas etapas.

Antes da primeira etapa de moagem secundária, constituído por três moinhos de bolas operando em circuito aberto. O concentrado da flotação convencional juntamente com o concentrado da flotação de finos é classificado em ciclones secundários KREBS de 10" (254 mm) de diâmetro. O *underflow* deste ciclone alimenta os moinhos. O *overflow* alimenta a etapa seguinte de flotação de limpeza



realizada em colunas de flotação. A descarga do moinho também alimenta a flotação de limpeza o que caracteriza a operação do moinho em circuito aberto.

A Figura 3.14 apresenta o fluxograma do circuito da primeira etapa da moagem secundária do Concentrador I onde os moinhos secundários MS04, MS05 e MS06 operam com ciclones secundários em circuito aberto.

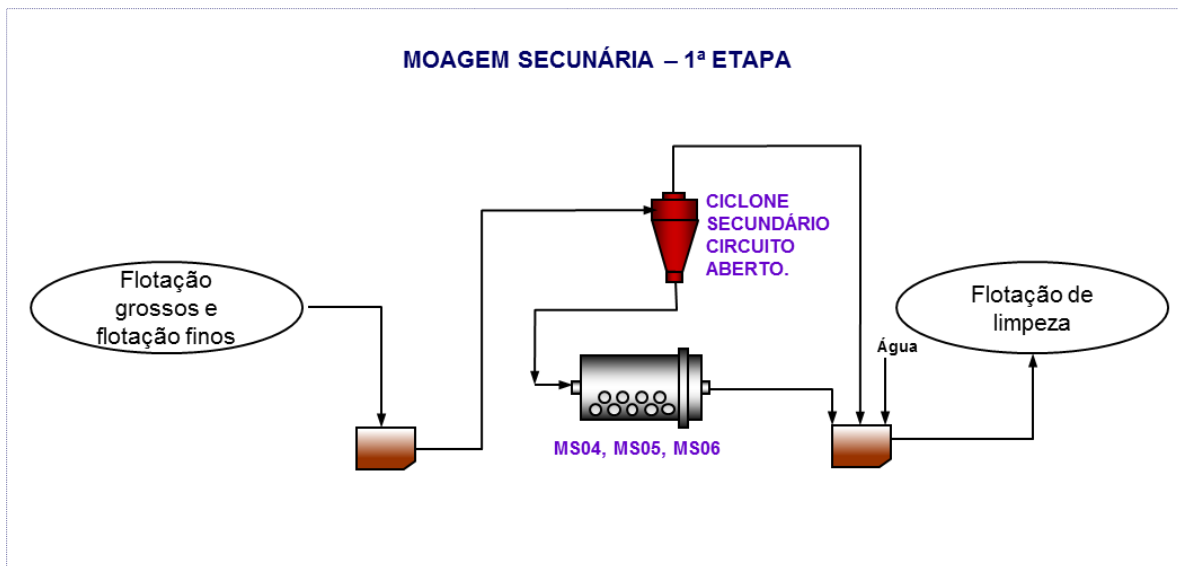


Figura 3.14 – Fluxograma do circuito dos moinhos secundários MS04, MS05 e MS06 (Samarco- arquivos internos).

A flotação em colunas promove a segunda separação entre minério e ganga. Nesta etapa é realizada a denominada “limpeza” do concentrado da flotação convencional remóido, ou seja, é feito o ajuste para a obtenção da especificação final de sílica no produto. Ajustada a especificação de sílica, ainda é necessário adequar a granulometria para o processo de transporte por mineroduto e processo de pelotamento em disco na unidade de Ubu. Portanto, o concentrado passa pela segunda etapa moagem secundária com dupla classificação com o mesmo moinho.

Inicialmente, o concentrado alimenta três baterias de ciclones KREBS 10" (254 mm) de diâmetro os quais constituem o primeiro estágio da dupla classificação. O *overflow* do primeiro estágio é produto final, sendo direcionado para os espessadores de concentrado. O *underflow* desses ciclones é direcionado para o segundo estágio da moagem secundária.

A moagem secundária conta com três moinhos de bolas operando em circuito fechado com os ciclones do segundo estágio da dupla classificação. O produto da descarga do moinho alimenta três baterias de ciclones secundários cujo *underflow* retorna na alimentação dos moinhos caracterizando um circuito fechado. Os ciclones do segundo estágio são KREBS de 10" (254 mm) de diâmetro. O *overflow* desses ciclones é produto final e segue para os espessadores de concentrado.

Na Figura 3.15 está representado o fluxograma do circuito da segunda etapa de moagem secundária do Concentrador I onde os moinhos operam em circuito fechado com dupla classificação utilizando ciclones.

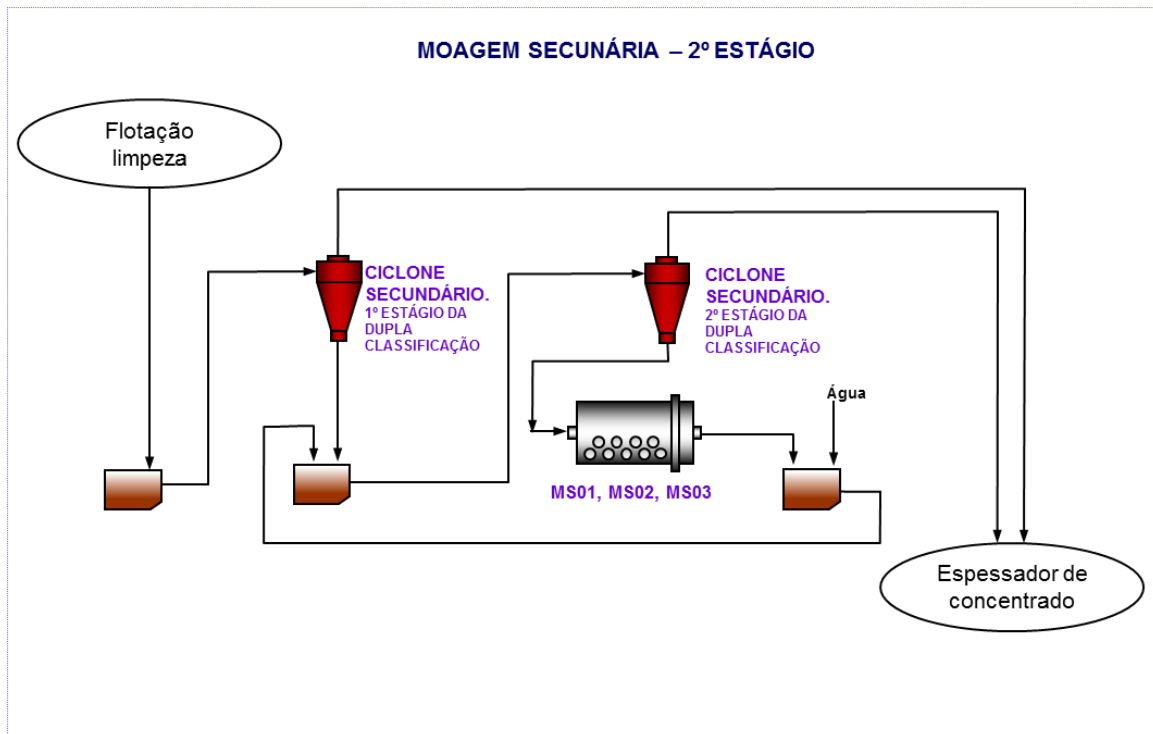


Figura 3.15 – Fluxograma do circuito da segunda etapa de moagem secundária (Samarco-arquivos internos).

### 3.10.1.2 Concentrador II

O minério *ROM* é direcionado ao peneiramento. O retido em 12,5 mm é direcionado para a britagem. O minério britado retorna para o peneiramento constituindo a carga circulante. O material passante em 12,5 mm forma uma pilha cônica de regularização da moagem primária. A partir desta pilha, o minério é retirado por alimentadores de placas e conduzido para os moinhos primários através de correias transportadoras.

A etapa de moagem primária é realizada utilizando moinhos de bolas operando em circuito fechado com ciclones primários GMAX 26" (660 mm) de diâmetro. O *underflow* dos ciclones retorna para a alimentação dos moinhos e o *overflow* é produto final da moagem e alimenta a deslamagem.

O fluxograma da etapa de moagem primária do Concentrador II da Samarco Mineração S/A indicando a posição onde o ciclone é empregado para fechamento de circuito pode ser visualizado na Figura 3.16.

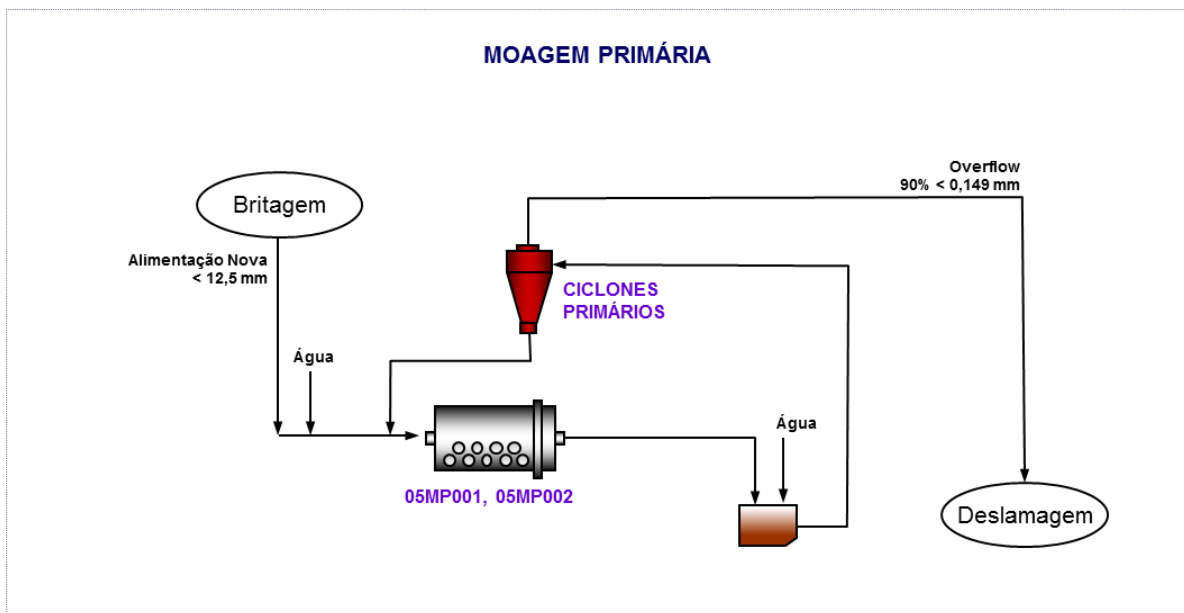


Figura 3.16– Fluxograma do circuito dos moinhos primário do Concentrador II (Samarco – arquivos internos).

A deslamagem é realizada em três etapas: uma primeira etapa classificatória denominada ciclones raspadores usando ciclones GMAX de 15" (381 mm) de diâmetros, uma segunda etapa denominada limpadores utilizando ciclones de GMAX 10" (254 mm) e a terceira etapa denominada ciclones deslamadores utilizando ciclones GMAX 4" (102 mm).

O *underflow* dos raspadores alimenta os ciclones limpadores e o *overflow* alimenta os ciclones deslamadores. O *underflow* dos ciclones limpadores alimenta por gravidade os tanques de condicionamento da flotação de grossos realizada em tanque de flotação de grande volume. O *overflow* é direcionado para a caixa de alimentação dos ciclones primários para o controle de nível como uma forma de otimização do uso da água de processo no circuito. No caso de haver excedente, este será direcionado para os espessadores de lama. Nos ciclones deslamadores, o *underflow* segue para o circuito de flotação de finos realizada em colunas de flotação, enquanto o *overflow* segue para os espessadores de lama.

O fluxograma da etapa de deslamagem em três estágios do Concentrador II empregando ciclones pode ser visualizado na Figura 3.17. Este concentrador entrou em operação em 2008 e já utiliza uma geração moderna de ciclones com nova configuração geométrica.

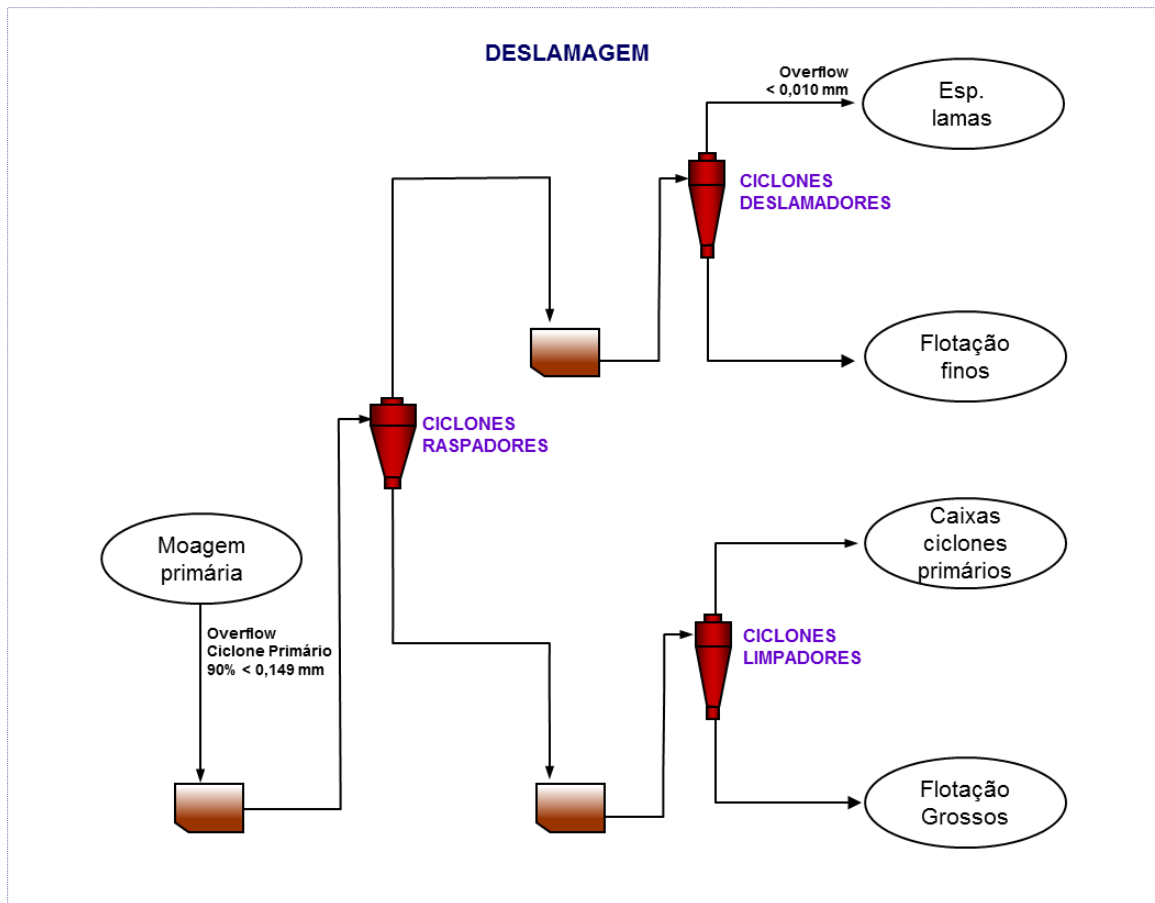


Figura 3.17 – Fluxograma do circuito de deslamagem em três estágios do Concentrado II (Samarco – arquivos internos).

A partir do condicionador de grossos, o minério alimenta as células de flotação de grande volume. Similarmente, a partir do condicionador de finos, o minério alimenta as colunas de flotação. Ambas etapas promovem a primeira separação entre o minério de ferro e a ganga.

Os produtos da flotação de grossos e finos seguem para a moagem secundária a qual adequa a granulometria do concentrado para as etapas subsequentes, quais sejam: flotação de limpeza em colunas, transporte por mineroduto e pelletização em discos.

No Concentrador II, a etapa da moagem secundária é realizada em uma única etapa que consiste em dois moinhos operando em paralelo, com circuito fechado com dupla classificação. É feita a primeira classificação em circuito aberto e a segunda etapa do circuito é fechado no mesmo moinho.

Inicialmente o concentrado alimenta os ciclones secundários do primeiro estágio da dupla classificação. O *underflow* desta etapa retorna na alimentação do moinho. O *overflow* do primeiro estágio é direcionado para a caixa de descarga do moinho e, juntamente com o produto do moinho, alimenta o segundo estágio da dupla classificação. O *underflow* desta etapa retorna na alimentação do moinho. O *overflow* é produto final sendo direcionado para o espessador de concentrado. Os ciclones secundários do primeiro e segundo estágios da dupla classificação são GMAX de 10" (254 mm) de diâmetro.

A Figura 3.18 está representada o fluxograma do circuito da moagem secundária do Concentrador II onde os moinhos operam em circuito fechado com dupla classificação utilizando ciclones.

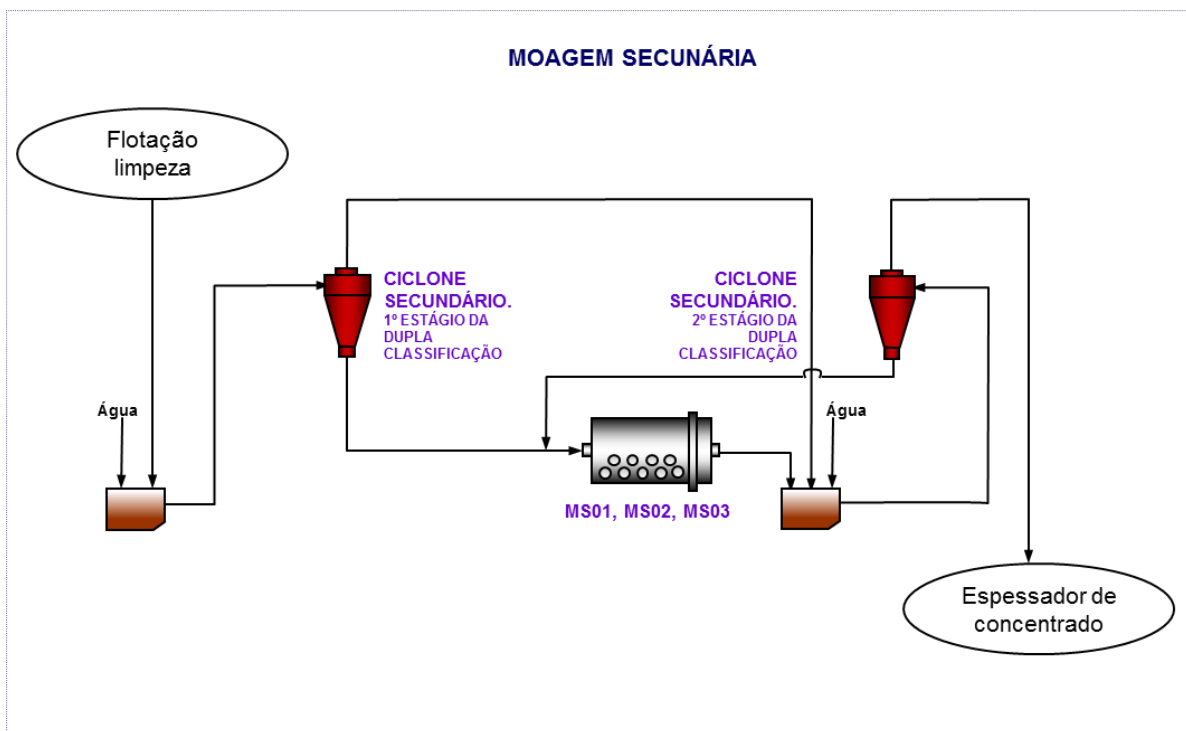


Figura 3.18 – Fluxograma do circuito de moagem segunda etapa (Samarco – arquivos internos).

#### 4. METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os experimentos necessários na caracterização dos ciclones das etapas de classificação da Samarco Mineração SA. Os procedimentos experimentais incluíram amostragens, preparação e caracterização das amostras e tratamento dos dados. As amostragens foram realizadas nos Concentradores I e II da Samarco – Unidade de Germano, Mariana, MG. As análises foram realizadas nos Laboratórios de Controle de Processo (LCP) e Químico em Germano - Samarco, segundo o fluxograma ilustrado pela Figura 4.1.

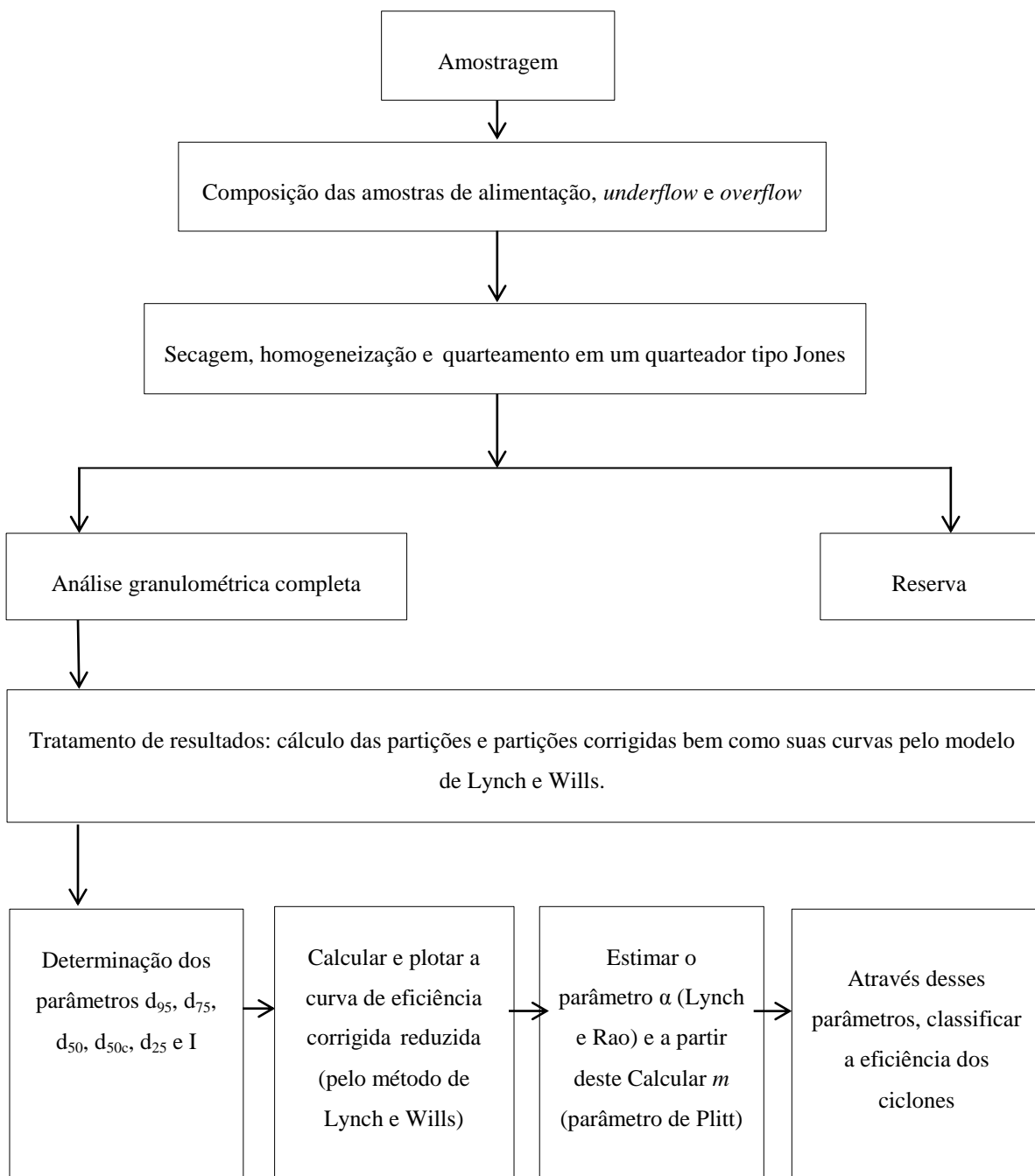


Figura 4.1 - Etapas da metodologia usada na caracterização da amostra.

#### 4.1 Amostragem

A coleta do material foi realizada pela equipe de profissionais do Laboratório de Controle de Processo da Samarco de acordo com os procedimentos internos. Foram coletadas amostras em 13 baterias de ciclones dos Concentradores I e II da unidade de Germano da Samarco Mineração S/A. De cada ciclone foram amostradas alimentação, *underflow* e *overflow* resultando em 39 amostras.

A amostragem de cada bateria durou cerca 1,5 horas, com coleta de incrementos em intervalos de 10 em 10 minutos. A Figura 4.2 ilustra a amostragem.



Figura 4.2 – Amostragem dos ciclones concentrador II.

Os ciclones amostrados, suas funções na rota de produção dos concentradores e sua identificação (TAG) estão descritos nas Tabelas 4.1 e 4.2.



Tabela 4.1 – Ciclones amostrados, modelo, suas funções do Concentrador I da Samarco e TAG para respectivas identificações.

Amostra	Ciclone	Modelo		Função	TAG
1	Ciclone primário	Ciclone 26"	KREBS	Fechamento do circuito com moinho primário	CI-PRIM-KREBS26
2	Ciclone raspador	Ciclone 15"	KREBS	Primeiro estágio (raspador) da deslamagem	CI-RASP-KREBS15
3	Ciclone raspador	Ciclone 15"	GMAX	Primeiro estágio (raspador) da deslamagem	CI-RASP-GMAX15
4	Ciclone limpador	Ciclone 10"	KREBS	Segundo estágio (limpador) da deslamagem	CI-LIMP-KREBS10
5	Ciclone deslamador	Ciclone AKW 4"		Terceiro estágio (deslamador) da deslamagem	CI-DESL-AKW04
6	Ciclone secundário circuito aberto	Ciclone 10"	KREBS	Circuito aberto da primeira etapa da moagem secundária	CI-SEC-KREBS10- CIRC. ABERTO
7	Ciclone secundário circuito fechado	Ciclone 10"	KREBS	Segundo estágio do circuito fechado com dupla classificação da moagem secundária	CI-SEC-KREBS10- CIRC. FECHADO- 1°EST

Tabela 4.2 – Ciclones amostrados, modelo, suas funções do Concentrador II da Samarco e TAG para respectivas identificações.

<b>Amostra</b>	<b>Ciclone</b>	<b>Modelo</b>	<b>Função</b>	<b>TAG</b>
8	Ciclone primário	Ciclone 26"	GMAX Fechamento do circuito com moinho primário	CII-PRIM-GMAX26
9	Ciclone raspador	Ciclone 15"	GMAX Primeiro estágio (raspador) da deslamagem	CII-RASP-GMAX15
10	Ciclone limpador	Ciclone 10"	GMAX Segundo estágio (limpador) da deslamagem	CII-LIMP-GMAX10
11	Ciclone deslamador	Ciclone GMAX 4"	Terceiro estágio (deslamador) da deslamagem	CII-DESL-GMAX4
12	Ciclone secundário (circuito fechado)	Ciclone 10"	GMAX Primeiro estágio do circuito fechado com dupla classificação da moagem secundária	CII-SEC-GMAX10-CIRC. FECHADO-1°EST
13	Ciclone secundário circuito fechado	Ciclone 10"	GMAX Segundo estágio do circuito fechado com dupla classificação da moagem secundária	CII-SEC-GMAX10-CIRC. FECHADO-2°EST

## 4.2 Preparação da amostra

Após a amostragem é necessário um preparo para que essas amostras possam ser analisadas de forma coerente por métodos físico-químicos.

A preparação da amostra consistiu-se basicamente da homogeneização da polpa, secagem, desagregação, homogeneização e quarteamento de forma a obter alíquotas representativas para a etapa de caracterização.

A primeira etapa da preparação das amostras consistiu-se na homogeneização da polpa, acondicionada em recipientes de campo, e retirada de aproximadamente 250 ml para a realização da porcentagem de sólidos.

Após procedimento de pesagem e filtragem da polpa, o material, então, foi colocado em uma estufa à temperatura de 100 °C por aproximadamente 2 horas para a secagem completa. Em seguida foi feita a homogeneização por tombamento manual sobre lona plástica até a completa homogeneização dos constituintes da amostra.

Por fim, foi feito o quarteamento com o emprego do quarteado Jones. Essa operação foi realizada sucessivas vezes até a formação de amostras de aproximadamente 100 g utilizadas nos ensaios de granulometria. Este procedimento está ilustrado pela Figura 4.3.



Figura 4.3 – Homogeneização e quarteamento da amostra.

## 4.3 Caracterização tecnológica do minério

A caracterização tecnológica do minério envolve várias técnicas, integradas, para obtenção de informações e conhecimentos de forma detalhada das amostras analisadas. O procedimento adotado

para tal caracterização é padronizado e estão descritos no Manual de Segurança, Operação e Meio Ambiente do Laboratório de Controle de Processo da Samarco.

#### 4.3.1 Porcentagem de sólidos

Utilizando a alíquota de aproximadamente 250 ml de cada amostra retirada após a homogeneização da polpa, obtivemos a porcentagem de sólido de cada uma das 39 amostras utilizadas no atual trabalho, seguindo os passos:

- i. Pesar a polpa utilizando uma balança com a precisão de duas casas decimais;
- ii. Pesar a alíquota depois de seca em estufa utilizando a mesma balança;
- iii. Calcular a porcentagem de sólido presente em cada amostra utilizando a equação 4.1.

$$\% \text{ de sólidos} = \frac{\text{massa de sólidos}}{\text{massa de polpa}} \quad (4.1)$$

#### 4.3.2 Análise Granulométrica

As análises granulométricas das alíquotas representativas das amostras de alimentação, *overflow* e *underflow* foram realizadas utilizando peneiramento combinado e granulômetro a laser.

Após o preparo da amostra e obtenção da alíquota, realizou-se a deslamagem do material utilizando a peneira de 37  $\mu\text{m}$ , de tal forma que todo o material passante foi armazenado para a análise granulométrica a laser.

O material retido na peneira de 37  $\mu\text{m}$  teve a granulometria realizada por peneiramento a seco. Essa etapa do peneiramento compreendeu as classes granulométricas entre 4.750  $\mu\text{m}$  e 37 $\mu\text{m}$ , segundo a série Tyler. Foi utilizado um conjunto de peneiras acopladas a um vibrador mecânico do tipo Ro-Tap® durante 15 minutos.

O material que passou por todas as peneiras e ficou no fundo, juntamente com o material deslamado no início do processo granulométrico foram analisados no granulômetro a laser, modelo *Mastersizer* e marca *Malvern Instruments*. O *Mastersizer* opera com um ultrassom de frequência 2.500 rpm, com taxa de oscuração de aproximadamente 22% e com adição do dispersante Hexametáfosfato. O Hexametáfosfato foi preparado a uma solução 0,05% p/v e seu ph corrigido para 10,5 com soda cáustica (NaOH). O granulômetro à laser utiliza um feixe de luz colimado que incide sobre as partículas dispersas em meio líquido. Por meio de teorias de difração e métodos matemáticos

estima-se o tamanho das partículas e suas frequências em cada classe. As classes reportadas são: 35  $\mu\text{m}$ , 30  $\mu\text{m}$ , 25  $\mu\text{m}$ , 15  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$  e 1  $\mu\text{m}$ .

Os materiais retidos em cada peneira foram pesados e anotados. Já no granulômetro a laser o resultado é o percentual retido em cada classe e é fornecido diretamente por um software próprio do equipamento. Este procedimento está ilustrado pela Figura 4.4.



Figura 4.4 – Ro-Tap® utilizado para a agitação das peneiras / ensaio granulométrico utilizando as peneiras série Taylor/ Granulômetro a laser: Mastersizer.

Utilizando em software gráfico (EXCEL 7.0) e dados obtidos nas análises, as três curvas granulométricas de cada ciclone (alimentação, *overflow* e *underflow*) foram plotadas num mesmo gráfico.

### 4.3 Balanço de Massas

Um balanço de massas da etapa de classificação foi realizado com o intuito de avaliar a coerência dos dados da amostragem. Como dado de entrada foram utilizadas as porcentagens de sólidos determinadas e a densidade de sólido. A taxa de alimentação inicial foi definida como sendo 100 t/h.

A Figura 4.5 ilustra o balanço.

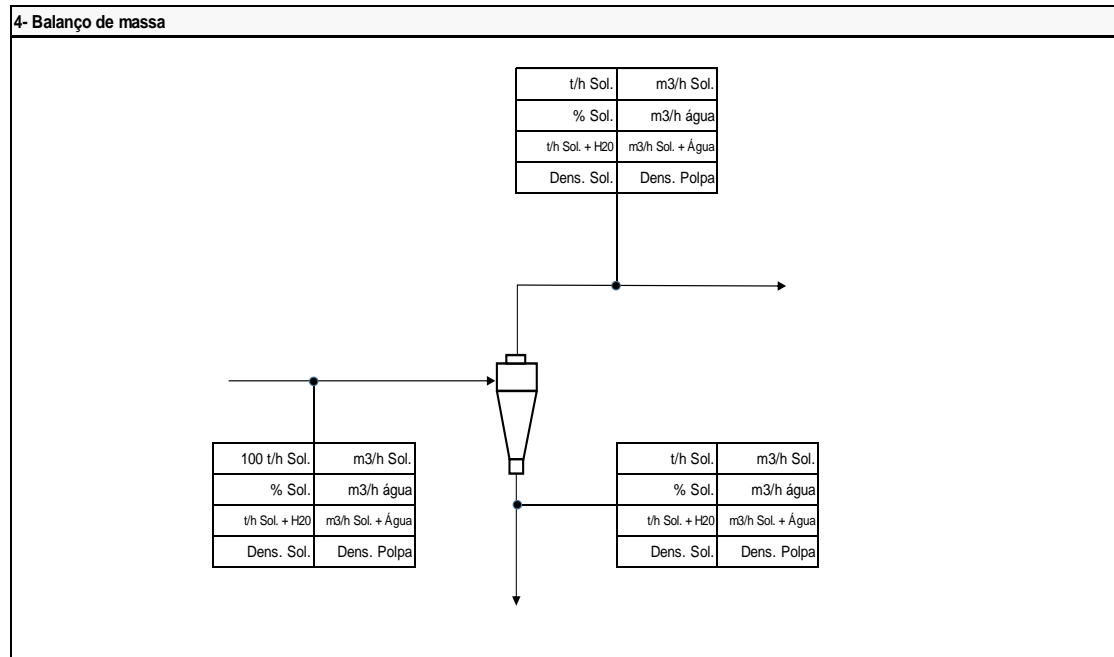


Figura 4.5 – Balanço de massas para um hidrociclone evidenciando as variáveis de entrada e saída.

#### 4.4 Registro das características construtivas e operacionais dos ciclones

Os parâmetros dos ciclones foram obtidos através de dados do fabricante e dados coletados na área. Nos Quadros 4.1 e 4.2 estão dispostas as características geométricas e operacionais dos ciclones dos Concentradores I e II da Samarco respectivamente.

Quadro 4.1 - Parâmetros geométricos e operacionais dos ciclones localizados nos concentradores I da Samarco Mineração S/A.

<b>TAG/ Parâmetros</b>	Diâmetro de ápex (pol.)	Diâmetro de Vortex (pol.)	Comp. seção cônica (pol.)	Área do inlet (pol.)	Ângulo cônico(°)	pressão (psi)
CI-PRIM-KREBS26	4,50	10,00	57,87	60,00	20,00	13,00
CI-RASP-KREBS15	2,50	4,50	22,84	11,00	20,00	25,00
CI-RASP-GMAX15	2,50	4,50	22,84	11,00	20,00	25,00
CI-LIMP-KREBS10	1,75	2,50	22,84	7,80	20,00	25,00
CI-DESL-AKW04	0,50	1,60	15,94	1,50	11,25	30,00
CI-SEC-KREBS10-CIRC. ABERTO	2,00	4,50	22,84	11,00	20,00	27,00
CI-SEC-KREBS10-CIRC. FECHADO-1°EST	2,00	4,50	22,84	11,00	20,00	27,00

Quadro 4.2 - Parâmetros geométricos e operacionais dos ciclones localizados nos Concentradores II da Samarco Mineração S/A.

<b>TAG/ Parâmetros</b>	Diâmetro de ápex (pol.)	Diâmetro de Vortex (pol.)	Comp. seção cônica (pol.)	Área do inlet (pol.)	Ângulo cônico(°)	pressão (psi)
CII-PRIM-GMAX26	5,00	12,00	57,87	60,00	20,00	13,00
CII-RASP-GMAX15	2,50	4,50	30,32	15,00	11,25	25,00
CII-LIMP-GMAX10	1,50	3,00	34,25	8,40	11,25	28,00
CII-DESL-GMAX4	0,50	1,60	30,32	1,50	11,25	40,00
CII-SEC-GMAX10-CIRC. FECHADO-1°EST	2,00	4,50	22,84	15,00	20,00	26,00
CII-SEC-GMAX10-CIRC. FECHADO-2°EST	2,00	4,50	22,84	15,00	20,00	26,00

#### 4.5 Modelagem matemática para cálculo das curvas de partição de ciclones

O modelo matemático de Lynch & Wills para calibração de curvas de partição constitui-se em um instrumento útil e prático para a avaliação do desempenho de ciclones.

A sistemática de cálculo consiste em dados de entrada e parâmetros facilmente levantados durante as operações, cálculo das partições para *underflow* ( $U_i$ ), construção da curva de partição e

posteriormente seu ajuste o qual possibilita a análise da eficiência dos ciclones através dos parâmetros  $d_{25}, d_{50}, d_{50c}, d_{75}, d_{95}, I$ , e principalmente  $\alpha$  e  $m$ .

#### 4.5.1 Curva de partição

Seja  $U_i$  a fração em massa de partículas de tamanho  $d_i$  que se dirige para o *underflow*. A curva de partição foi obtida plotando-se o  $U_i$  em função de  $d_i$ .

#### 4.5.2 By-pass

O *by-pass* (BP) foi calculado a partir da equação 4.2:

$$BP = \left( \frac{U_i}{S_u} - U_i \right) S_o \quad (4.2)$$

#### 4.5.3 Curva de partição Corrigida

Os valores de  $U_i$  são corrigidos descontando o *by-pass* através da equação 4.3 obtendo os valores da partição para o *underflow* corrigidas  $U_{ic}$ .

$$U_{ic} = \frac{U_i - BP}{100 - BP} \quad (4.3)$$

A curva de partição corrigida é obtida plotando-se o  $U_{ic}$  em função de  $d_i$ .

#### 4.5.4 Curva de eficiência reduzida corrigida

A curva de eficiência reduzida corrigida é obtida plotando-se o  $U_{ic}$  em função da razão  $\frac{d_i}{d_{50c}}$ .

#### 4.6 Parâmetros $d_{95}, d_{75}, d_{50}, d_{50c}$ e $d_{25}$

Os valores de  $d_{95}, d_{75}, d_{50}$  e  $d_{25}$  foram obtidos graficamente através da análise da curva de partição. Os valores de  $d_{50c}$  foram determinados graficamente a partir das curvas de partição corrigida.

#### 4.7 Índice de eficiência ( $I$ )

O índice de eficiência foi obtido através da relação entre  $d_{75}, d_{25}$  e  $d_{50}$  segundo a equação 4.4.

$$I = \frac{d_{75} - d_{25}}{2d_{50}} \quad (4.4)$$



#### 4.8 Determinação do parâmetro $\alpha$

O parâmetro  $\alpha$  característico de cada hidrociclone foi estimado a partir da comparação entre a partição corrigida calculada pelo método de Lynch & Wills para tal ciclone e a partição corrigida calculada à partir da equação Lynch & Rao com alfas teóricos seguindo os passos:

- i. Calculou-se a partição  $U_{ic}$  através da equação de 4.4 de Lynch & Rao variando alfa de 1 a 4 em intervalos de 0,1 e fixando os valores de  $d_i$  e  $d_{50c}$  para cada  $i$  obtidos previamente para cada ciclone.

$$U_{ic} = \frac{\exp^{\alpha x_i} - 1}{\exp^{\alpha x_i} + \exp^{\alpha - 2}} \quad (4.4)$$

Esses valores foram dispostos em uma tabela no molde da Tabela 4.3.

**Tabela 4.3** – Modo como foram dispostas as partições corrigidas para cada alfa.

	$\alpha = 1,0$	$\alpha = 1,1$	...	$\alpha = 3,9$	$\alpha = 4,0$
$x_1 = \frac{d_1}{d_{50c}}$	$U_{1 \text{ Lynch e Rao,}}$ $\alpha = 1,0$	$U_{1 \text{ Lynch e Rao,}}$ $\alpha = 1,1$	...	$U_{1 \text{ Lynch e Rao,}}$ $\alpha = 3,9$	$U_{1 \text{ Lynch e Rao,}}$ $\alpha = 4,0$
$x_2 = \frac{d_2}{d_{50c}}$	$U_{2 \text{ Lynch e Rao,}}$ $\alpha = 1,0$	$U_{2 \text{ Lynch e Rao,}}$ $\alpha = 1,1$	...	$U_{2 \text{ Lynch e Rao,}}$ $\alpha = 3,9$	$U_{2 \text{ Lynch e Rao,}}$ $\alpha = 4,0$
...	...	...	...	...	...
$x_{i-1} = \frac{d_{i-1}}{d_{50c}}$	$U_{i-1 \text{ Lynch e Rao,}}$ $\alpha = 1,0$	$U_{i-1 \text{ Lynch e Rao,}}$ $\alpha = 1,1$	...	$U_{i-1 \text{ Lynch e Rao,}}$ $\alpha = 3,9$	$U_{i-1 \text{ Lynch e Rao,}}$ $\alpha = 4,0$
$x_i = \frac{d_i}{d_{50c}}$	$U_{i \text{ Lynch e Rao,}}$ $\alpha = 1,0$	$U_{i \text{ Lynch e Rao,}}$ $\alpha = 1,1$	...	$U_{i \text{ Lynch e Rao,}}$ $\alpha = 3,9$	$U_{i \text{ Lynch e Rao,}}$ $\alpha = 4,0$

- ii. Os valores de  $U_{ic}$  previamente calculado pelo método de Lynch&Wills e  $U_{ic}$  calculado pelo método de Lynch&Rao foram comparados dividindo um pelo outro e assumindo que quanto mais próximas essas fossem, mais próxima seria esse quociente de 1. Com esses dados criou-se uma planilha.
- iii. Como método auxiliar de análise do resultado dessa comparação, foi aplicado sobre a planilha, um recurso de formatação condicional disponível no software EXCEL 7.0 que destaca os resultados entre  $1 \pm 0,3$ .
- iv. O valor de alfa teórico correspondente à maior sequência destacada indica o valor de alfa que mais se aproxima do alfa real característico do ciclone.
- v. Plotou-se a curva de eficiência reduzida corrigida obtida pelo método de Lynch&Wills juntamente com a curva de eficiência reduzida corrigida obtida pelo método Lynch&Rao (aquela com a maior sequência destacada na tabela de comparação), com o intuito de

verificar a aderência das curvas. Desta forma, confirma-se o alfa real característico do ciclone.

Esse estudo detalhado foi realizado para os 13 ciclones dos diferentes estágios dos Concentradores I e II da Samarco Mineração S/A.

Além disso, para os ciclones primário presente nos Concentradores I e II, verificou-se a influencia da forma de apresentação da granulometria no método fazendo duas variações:

- i. Utilizando como método de ajuste o Software BilMat, que ajusta a granulometria pelas porcentagens de sólidos e balanço de massa.
- ii. Utilizando apenas o peneiramento combinado adicionando a peneira de 500 e 600# da série de Tayler e excluindo a análise pelo granulômetro a laser Mastersizer.

#### **4.9 Determinação do parâmetro m**

O parâmetro m de Plitt foi calculado através de sua relação com o parâmetro  $\alpha$  pela equação 4.5.

$$\alpha = 1,45m - 0,45 \quad (4.5)$$

## 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais da caracterização das amostras seguidos pela modelagem matemática segundo o método de Lynch&Wills. Os resultados serão discutidos considerando a literatura referente à caracterização de ciclones já realizada por outros pesquisadores citadas na revisão bibliográfica.

### 5.1 Caracterização do CII-RASP-GMAX15.

Será apresentado o resultado da caracterização da etapa de classificação denominada raspadores no Concentrador II da Samarco, empregando ciclones GMAX de 15" - CII-RASP-GMAX15.

#### 5.1.1 Análise granulométrica

O resultado da análise granulométrica está disposto no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 – Distribuição granulométrica para o CII-RASP-GMAX15.

Caracterização do Ciclone Raspador - Primeiro Estágio da Deslamagem - CII-RASP-GMAX15										
Análise Granulométrica										
Ponto		Alimentação			Overflow			Underflow		
Malha		% Retida Simples	% Retida Acumulado	% Passante	% Retida Simples	% Retida Acumulado	% Passante	% Retida Simples	% Retida Acumulado	% Passante
Tyler	Micrômetro									
35	420	0,28	0,28	99,72				0,51	0,51	99,49
48	297	0,76	1,05	98,95				0,95	1,46	98,54
65	210	3,61	4,65	95,35				4,72	6,18	93,82
100	149	9,30	13,96	86,04	0,01	0,01	99,99	10,95	17,13	82,87
150	105	10,32	24,28	75,72	0,01	0,02	99,98	13,11	30,23	69,77
200	74	12,08	36,36	63,64	0,07	0,09	99,91	15,24	45,48	54,52
270	53	11,58	47,94	52,06	0,91	0,99	99,01	13,89	59,37	40,63
325	44	5,45	53,39	46,61	1,53	2,52	97,48	6,00	65,37	34,63
400	37	5,15	58,54	41,46	2,41	4,93	95,07	5,83	71,20	28,80
L	35	3,85	62,39	37,61	1,83	6,77	93,23	2,15	73,35	26,65
A	30	4,75	67,13	32,87	7,52	14,29	85,71	7,46	80,81	19,19
S	25	7,92	75,06	24,94	14,19	28,48	71,52	9,54	90,35	9,65
E	20	9,31	84,37	15,63	20,10	48,59	51,41	6,74	97,09	2,91
R	15	8,02	92,39	7,61	22,23	70,82	29,18	2,48	99,57	0,43
	10	4,92	97,31	2,69	17,93	88,74	11,26	0,40	99,97	0,03
	5	2,10	99,41	0,59	9,13	97,88	2,12	0,03	100,00	0,00
	1	0,56	99,97	0,03	2,11	99,99	0,01	0,00	100,00	0,00
	0,1	0,03	100,00	0,00	0,01	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00

Com esses dados, em seguida, plotou-se a curva de distribuição granulométrica do material ilustrada pela Figura 5.1.

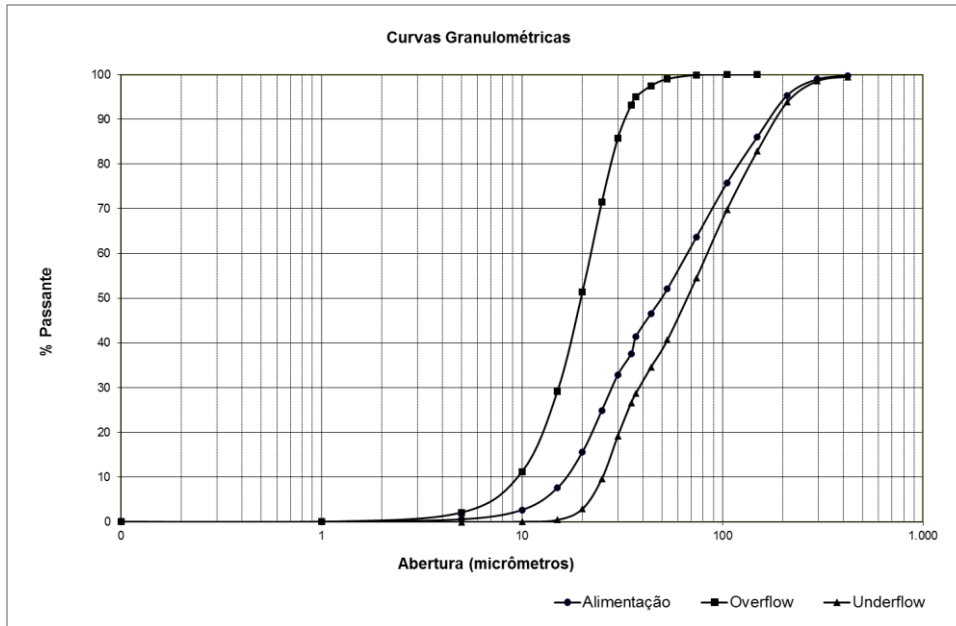


Figura 5.1 – Curva de distribuição granulométrica para o CII-RASP-GMAX15

### 5.1.2 Porcentagens de sólidos

As porcentagens de sólidos amostradas e corrigidas estão dispostas no Quadro 5.2.

Quadro 5.2 – Porcentagens de sólidos amostradas e corrigidas do ciclone CII-RASP-GMAX15

% de sólidos		
Ponto	% sólidos amostradas	% sólidos corrigidas
Alimentação	46,75	45,12
Overflow	17,34	17,39
Underflow	77,56	81,36

A análise granulométrica bem como as porcentagens de sólidos da amostra são os dados de entrada para o modelo matemático utilizado a seguir para a calibração da curva de partição e, por fim, a caracterização do ciclone ensaiado.

### 5.1.3 Balanço de massas

O balanço de massas está representado pela Figura 5.2.

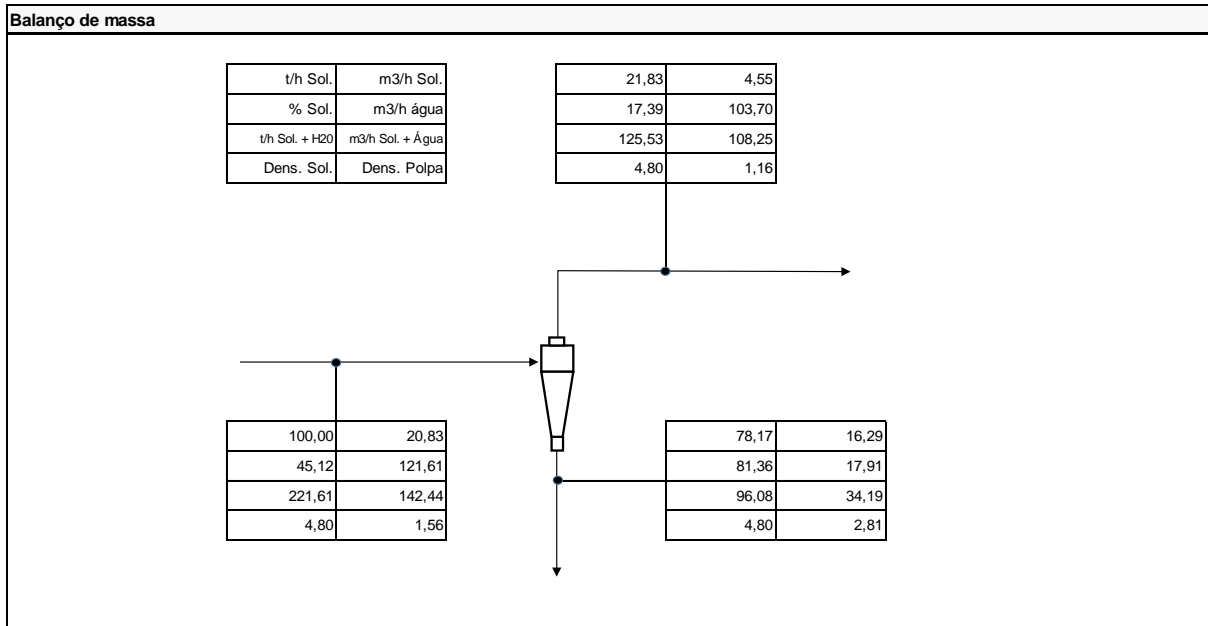


Figura 5.2 – Balço de massa para o ciclone CII-RASP-GMAX15.

#### 5.1.4 Cálculo das partições para underflow

As partições para *underflow*, calculadas a partir da granulometria, bem como a partição corrigida e a razão  $\frac{d_i}{d_{50c}}$  são necessários para calcular o *by-pass* do ciclone e plotar as curvas de partição, partição corrigida, eficiência corrigida reduzida. A partir das curvas, determinam-se graficamente os parâmetros  $d_{95}$ ,  $d_{75}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{50c}$ ,  $d_{25}$  e  $\alpha$ . Estes parâmetros são necessários para cálculo do  $I$  e  $m$ .

Os resultados do cálculo da partição bem como seu ajuste, ou seja, a partição corrigida e a razão  $\frac{d_i}{d_{50c}}$  estão no Quadro 5.3.

Quadro 5.3 – Partição  $U_i$ , partição corrigida  $U_{ic}$  e  $\frac{d_i}{d_{50c}}$ .

Cálculo da partição - Método Lynch&Wills:											
Malha		% Retida simples amostradas			Delta	% Retida simples corrigidas			Partição - $U_i$	Partição Corrigida - $U_{ic}$	$d_i/d_{50c}$
Tyler	Micrômetro	alimentação	over	under		alimentação	over	under			
35	420	0,28	0,00	0,51	-0,11	0,35	-0,02	0,46	100,00	100,00	20,00
48	297	0,76	0,00	0,95	0,02	0,75	0,00	0,96	100,00	100,00	14,14
65	210	3,61	0,00	4,72	-0,08	3,66	-0,01	4,68	100,00	100,00	10,00
100	149	9,30	0,01	10,95	0,74	8,86	0,11	11,30	100,00	100,00	7,10
150	105	10,32	0,01	13,11	0,07	10,28	0,02	13,14	99,96	99,96	5,00
200	74	12,08	0,07	15,24	0,15	11,99	0,09	15,31	99,84	99,81	3,52
270	53	11,58	0,91	13,89	0,52	11,27	0,98	14,14	98,11	97,78	2,52
325	44	5,45	1,53	6,00	0,43	5,19	1,58	6,20	93,34	92,19	2,10
400	37	5,15	2,41	5,83	0,06	5,11	2,42	5,86	89,67	87,88	1,76
L	35	3,85	1,83	2,15	1,77	2,78	2,07	2,98	83,77	80,96	1,67
A	30	4,75	7,52	7,46	-2,73	6,39	7,16	6,18	75,53	71,31	1,43
S	25	7,92	14,19	9,54	-2,63	9,51	13,85	8,30	68,21	62,73	1,19
E	20	9,31	20,10	6,74	-0,34	9,52	20,06	6,58	54,01	46,07	0,95
R	15	8,02	22,23	2,48	1,23	7,28	22,39	3,06	32,84	21,24	0,71
	10	4,92	17,93	0,40	0,69	4,50	18,02	0,73	26,00	13,22	0,48
	5	2,10	9,13	0,03	0,08	2,05	9,14	0,07	21,00	7,36	0,24
	1	0,56	2,11	0,00	0,10	0,50	2,12	0,05	16,00	1,49	0,05
	0,1	0,03	0,01	0,00	0,03	0,01	0,01	0,01	14,73	0,00	0,00

### 5.1.5 Cálculo do by-pass

O *by-pass* calculado para o ciclone CII-RASP-GMAX15 da Samarco foi 14,73%.

### 5.1.6 Curvas de partição, partição corrigida, eficiência corrigida reduzida e parâmetro $d_{95}$ , $d_{75}$ , $d_{50}$ , $d_{50c}$ e $d_{25}$

Com os dados dos Quadros 5.3 e 5.4 foi possível elaborar as curvas de partição, partição corrigida dispostas na Figura 5.2 e da curva de eficiência corrigida e reduzida Figura 5.3.

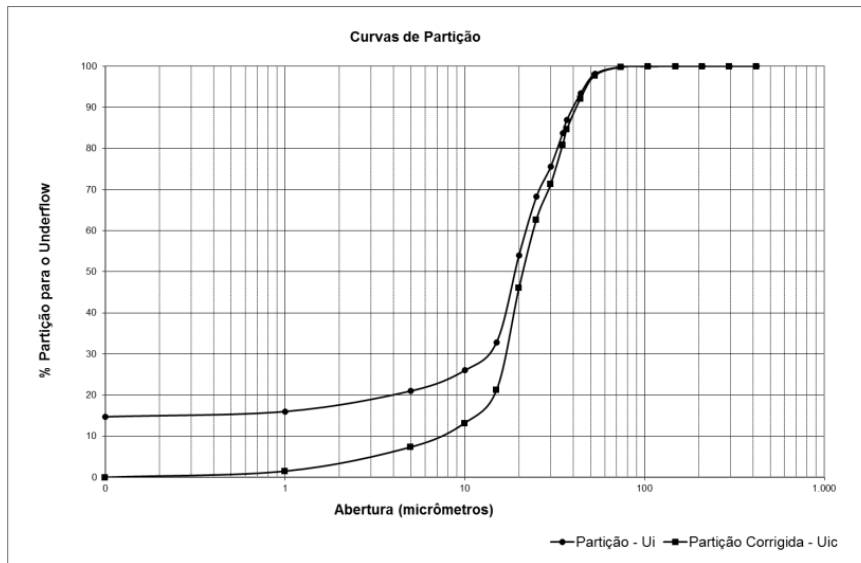


Figura 5.3 – curva de partição e curva de partição reduzida para o ciclone CII-RASP-GMAX15.

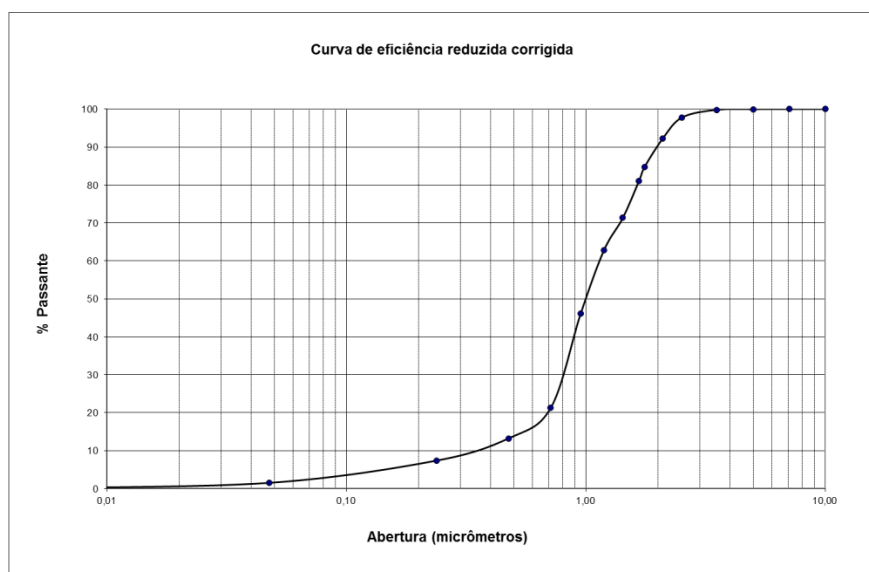


Figura 5.4 – curva eficiência reduzida corrigida para o ciclone CII-RASP-GMAX15.

As curvas possuem o formato típico de “S” esperado conforme King (2001). A partir da curva, foram feitas as leituras do  $d_{95}$ ,  $d_{75}$ ,  $d_{50}$  e  $d_{25}$  conforme exposto no Quadro 5.4. Já na curva de partição corrigida foi feita a leitura do  $d_{50c}$  conforme exposto, também, no Quadro 5.4.



Quadro 5.4 – Parâmetro  $d_{95}$ ,  $d_{75}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{50c}$  e  $d_{25}$  do ciclone CII-RASP-GMAX15.

Parâmetros $d_{25}$ , $d_{50}$ , $d_{50c}$ , $d_{75}$ , $d_{95}$	
d25	9,5
d50	19,0
d50c	21,0
d75	30,0
d95	47,0

### 5.1.7 Cálculo da Eficiência ( $I$ )

O cálculo do  $I$  foi obtido a partir dos diâmetros  $d_{75}$ ,  $d_{50}$  e  $d_{25}$ . A eficiência para ciclone CII-RASP-GMAX15 foi igual a 0,5.

Os valores da eficiência são tão melhores quanto mais próximos de zero e tão piores quanto mais próximo de 1. Desta forma a eficiência desse ciclone se encontra na média considerando dados industriais de acordo com esse parâmetro de análise.

### 5.1.8 Cálculo do parâmetro alfa ( $\alpha$ )

Seguindo o passo a passo citado na metodologia para esse parâmetro:

- i. Foi calculada a partição  $U_{ic}$  pela equação de Lynch & Rao variando alfa de 1 a 4 em intervalos de 0,1 e fixando a razão  $\frac{d_i}{d_{50c}}$  obtidos previamente. Os resultados para cada ciclone estão dispostos em uma tabela no molde do Quadro 5.5.



- ii. Foi realizada uma comparação dos valores de  $U_{ic}$  previamente calculado pelo método de Lynch & Wills e  $U_{ic}$  calculado pelo método de Lynch & Rao através do quociente entre eles. Os resultados estão dispostos no Quadro 5.6.

Quadro 5.6 – formatação condicional dos resultados do quociente entre  $U_{ic}$  de Lynch&Wills e  $U_{ic}$  de Lynch & Rao para o ciclone CII-RASP-GMAX15.

Relação $U_{ic}$ Lynch&Wills / $U_{ic}$ Lynch&Rao																				
Alfa= 1,5	Alfa= 1,6	Alfa= 1,7	Alfa= 1,8	Alfa= 1,9	Alfa= 2,0	Alfa= 2,1	Alfa= 2,2	Alfa= 2,3	Alfa= 2,4	Alfa= 2,5	Alfa= 2,6	Alfa= 2,7	Alfa= 2,8	Alfa= 2,9	Alfa= 3,0	Alfa= 3,1	Alfa= 3,2	Alfa= 3,3	Alfa= 3,4	Alfa= 3,5
1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,02	1,02	1,02	1,02
0,95	0,95	0,95	0,97	0,97	0,98	0,97	0,98	0,99	1,00	1,00	1,00	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,02	1,02	1,02	1,02
0,94	0,95	0,95	0,97	0,97	0,98	0,99	1,00	1,00	1,01	1,01	1,01	1,02	1,03	1,04	1,04	1,05	1,05	1,06	1,06	1,06
0,93	0,94	0,94	0,95	0,97	0,98	0,99	1,00	1,01	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,05	1,06	1,07	1,08	1,09	1,10	1,11
0,94	0,95	0,97	0,98	0,99	1,00	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08	1,09	1,09	1,10	1,11	1,12	1,12	1,13
0,96	0,97	0,98	0,99	1,00	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08	1,09	1,10	1,11	1,12	1,13	1,13	1,14	1,15
0,94	0,94	0,95	0,95	0,96	0,97	0,97	0,98	0,98	0,99	1,00	1,00	1,01	1,01	1,02	1,03	1,03	1,04	1,05	1,05	1,06
1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,02	1,02	1,02	1,02	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,00	1,00	0,99
1,67	1,65	1,63	1,61	1,58	1,56	1,54	1,52	1,49	1,47	1,45	1,42	1,40	1,38	1,35	1,33	1,31	1,28	1,26	1,24	1,22
1,74	1,70	1,65	1,60	1,55	1,51	1,46	1,42	1,37	1,33	1,28	1,24	1,20	1,16	1,12	1,08	1,04	1,00	0,96	0,93	0,89
1,49	1,43	1,36	1,30	1,24	1,18	1,13	1,07	1,02	0,97	0,92	0,87	0,83	0,79	0,74	0,70	0,67	0,63	0,59	0,56	0,53
1,39	1,31	1,24	1,16	1,10	1,03	0,97	0,91	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,61	0,57	0,53	0,50	0,46	0,43	0,40	0,38
Destacados resultados da relação $U_{ic}$ Lynch&Wills / $U_{ic}$ Lynch&Rao iguais a 1 mais ou menos 3%.																				

Esse Quadro realça os resultados iguais a  $1 \pm 3\%$  indicando a tendência do alfa, ou seja, ainda de acordo com o Quadro 5.6 o alfa para o ciclone CII-RASP-GMAX15 é aproximadamente 2,2.

Para análise de veracidade desse método plotou-se a curva real sob o efeito do alfa e a curva teórica para alfa igual a 2,2 como mostra a Figura 5.5.

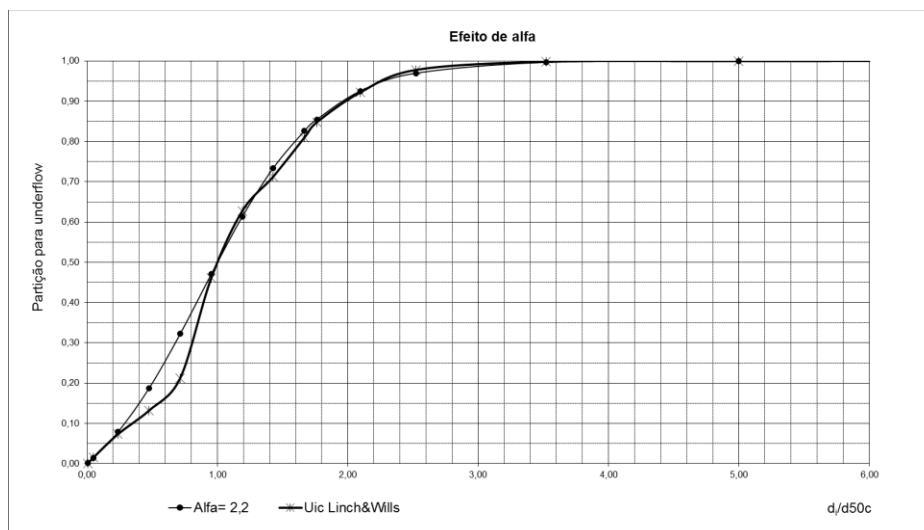


Figura 5.5 – Curva de eficiência reduzida corrigida obtida pelo método de Lynch & Wills juntamente com a curva de eficiência reduzida corrigida obtida pelo método Lynch & Rao com alfa igual a 2,2.

A análise, tanto da curva quanto do Quadro, tendem a esse valor de alfa (2,2) para o ciclone CII-RASP-GMAX15.

Segundo Beraldo (1987) os valores esperados para ciclones operando em estágio único, é entre 3 e 4. Valores abaixo indica uma diminuição da eficiência da classificação. O valor obtido para o ciclone CII-RASP-GMAX15 foi 2,2, o qual indicaria uma baixa eficiência desta classificação. Entretanto, os valores indicados pelo Beraldo podem não refletir a realidade da escala industrial, na qual foram realizadas as amostragens para esta análise.

### 5.1.9 Cálculo do parâmetro $m$

O parâmetro  $m$  foi calculado pela sua relação com alfa e para o ciclone CII-RASP-GMAX15 foi igual à 1,83.

De acordo com Plitt (1976), valores maiores que 2,0 indicam boa nitidez da classificação. O resultado obtido para esta amostragem foi de 1,83. Tendo em vista dados industriais considera-se

pelo parâmetro  $m$  de Plitt que a nitidez desta classificação encontra-se em um patamar com margem para melhorar.

Seguindo o mesmo nível de detalhe apresentado para o ciclone CII-RASP-GMAX15, foram realizados os estudos e cálculos para os 13 ciclones dos diferentes estágios dos Concentradores I e II da Samarco. Os resultados estão disponíveis nos anexos deste trabalho.

## 5.2 Parâmetros de eficiência dos ciclones do Concentrador I e II

Os resultados obtidos por esse estudo para os diferentes ciclones e as variações de dados de entrada estão nas Tabelas 5.3 a 5.7.

Tabela 5.3 – Resultado dos parâmetros obtidos através da modelagem para os ciclones primários operando em circuito fechado com moinho de bolas.

<b>Amostra</b>	<b>TAG</b>	<b>Comentários</b>	<b>Bypass (%)</b>	<b>d<sub>50</sub></b>	<b>d<sub>50c</sub></b>	<b><math>\frac{d_{95}}{d_{50}}</math></b>	<b>I</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b>m</b>
<b>1A</b>	CI-PRIM-KREBS26	An. granulométrica sem ajuste BilMat. Amostra C I, L2.	38,35	39,0	78,0	5,3	-	1,3	1,21
<b>1B</b>	CI-PRIM-KREBS26	An. granulométrica ajustada no BilMat. Amostra C I, L2.	29,38	45,0	69,0	6,3	-	1,2	1,14
<b>8A</b>	CII-PRIM-GMAX 26	An. granulométrica sem ajuste BilMat. Amostra C II, L2.	10,38	90,0	102,0	3,0	0,7	1,5	1,34
<b>8B</b>	CII-PRIM-GMAX 26	An. gran. peneiras 500 e 600 #; sem gran. laser. Amostra C II, L1.	22,14	95,0	105,0	2,9	0,6	1,4	1,28

Tabela 5.4 – Resultado dos parâmetros obtidos através da modelagem para os ciclones raspadores operando no primeiro estágio de deslamagem.

<b>Amostra</b>	<b>TAG</b>	<b>Comentários</b>	<b>Bypass (%)</b>	<b>d50</b>	<b>d50c</b>	$\frac{d_{95}}{d_{50}}$	<b>I</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b>m</b>
2	CI-RASP-KREBS15	Amostra C I, L3.	24,7	20,5	23,5	2,5	0,7	1,8	1,6
3	CI-RASP-GMAX15	Amostra C I, L1.	17,3	17,0	18,7	2,4	0,7	1,8	1,6
9	CII-RASP-GMAX15	Amostra C II, L2.	14,7	19,0	21,0	2,5	0,5	2,1	1,8

Tabela 5.5 – Resultado dos parâmetros obtidos através da modelagem para os ciclones limpadores operando no segundo estágio de deslamagem.

<b>Amostra</b>	<b>TAG</b>	<b>Comentários</b>	<b>Bypass (%)</b>	<b>d50</b>	<b>d50c</b>	$\frac{d_{95}}{d_{50}}$	<b>I</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b>m</b>
4	CI-LIMP-KREBS10	Amostra C I, L3.	9,75	13,0	15,7	1,8	0,5	3,2	2,5
10	CII-LIMP-GMAX10	Amostra C II, L2.	14,06	12,0	14,7	1,8	0,6	3,2	2,5

Tabela 5.6 – Resultado dos parâmetros obtidos através da modelagem para os ciclones deslamadores operando no terceiro estágio de deslamagem.

<b>Amostra</b>	<b>TAG</b>	<b>Comentários</b>	<b>Bypass (%)</b>	<b>d50</b>	<b>d50c</b>	$\frac{d_{95}}{d_{50}}$	<b>I</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b>m</b>
5	CI-DESL-AKW4	Amostra C I, L3.	20,8	7,2	9,0	3,1	0,8	1,9	1,6
11	CII-DESL-GMAX4	Amostra C II, L1.	9,1	10,0	10,8	3,0	0,5	1,9	1,6

Tabela 5.7 – Resultado dos parâmetros obtidos através da modelagem para os ciclones secundários operando no primeiro e segundo estágio da dupla classificação.

Amostra	TAG	Comentários	Bypass (%)	d50	d50c	$\frac{d_{95}}{d_{50}}$	I	$\alpha$	m
6	CI-SEC-KREBS10	Circuito aberto. Amostra C I, L6.	13,1	18,0	19,5	2,5	0,4	2,0	1,7
12	CII-SEC-GMAX10	1º estágio da dupla classificação. Amostra C II, L1.	7,7	37,0	38,0	2,4	0,4	3,2	2,5
7	CI-SEC-KREBS10	1º estágio da dupla classificação. Amostra C I, Bat 30.	7,5	36,0	36,0	2,5	0,4	3,1	2,4
13	CII-SEC-GMAX10	2º estágio da dupla classificação. Amostra C II, L1.	12,7	36,0	37,0	2,9	0,4	1,8	1,6

### 5.2.1 By-pass

Em todas as etapas de ciclonagem observa-se o desempenho dos ciclones GMAX com menor *by-pass* comparado com o KREBS. Para os ciclones primários, o *by-pass* no ciclone GMAX é da ordem de 25% menor. Para os ciclones raspadores e limpadores, o *by-pass* no ciclone GMAX é da ordem de 30% menor. Os ciclones GMAX deslamadores e secundários geraram *by-pass* acima de 40% menor que os ciclones KREBS.

### 5.2.2 Relação $\frac{d_{95}}{d_{50}}$

A análise da relação  $\frac{d_{95}}{d_{50}}$  para os ciclones primários KREBS e GMAX instalados nos Concentradores I e II variou entre 2,9 a 6,3.

Para os ciclones raspadores, limpadores e secundários da marca KREBS e GMAX instalados nos Concentradores I e II, a relação  $\frac{d_{95}}{d_{50}}$  variou entre 1,8 a 2,5. Este valores estão coerente com Beraldo (1987) que indica a variação da relação  $\frac{d_{95}}{d_{50}}$  entre 1,5 a 2,5 para circuito aberto. Para o ciclones GMAX instalados no segundo estágio da dupla classificação na moagem secundária do



Concentrador II a relação  $\frac{d_{95}}{d_{50}}$  ficou em 2,9. Este ciclone opera com caráter de circuito fechado. Ainda segundo Beraldo (1987) a relação  $\frac{d_{95}}{d_{50}}$  varia acima de 2,5 para circuito fechado.

A relação  $\frac{d_{95}}{d_{50}}$  para os ciclones deslamadores KREBS e GMAX instalados nos Concentradores I e II variou entre 3,1 e 3,0. A literatura não referencia a relação  $\frac{d_{95}}{d_{50}}$  para este ponto do processo. Tal fato deve ser melhor investigado. Provavelmente ocorre em função da predominância de partículas super finas abaixo de 37  $\mu\text{m}$ .

### 5.2.3 Fator I

Para os ciclones primários KREBS do Concentrador I não foi possível calcular o *I* devido *by-pass* acima de 25% impossibilitando a leitura do  $d_{25}$ . O fator *I* para os ciclones primários GMAX do Concentrador II ficou igual a 0,65 em média. De acordo com Beraldo (1987), esta eficiência não é considerada boa, uma vez que este valor indica uma melhor eficiência quando mais próximo de zero.

A eficiência para os ciclones raspadores KREBS, limpadores KREBS instalados no Concentrador I tiveram eficiência de 0,7 e 0,6 respectivamente. A eficiência dos ciclones deslamadores AKW ficou em 0,8. No geral, pela referência, as eficiências não ficaram boas.

A eficiência dos ciclones raspadores GMAX instalados no Concentrador I ficou em 0,7 e os ciclones raspadores GMAX instalados no Concentrador II ficou em 0,5. Embora tenhamos as mesmas características geométricas destes ciclones, registra-se melhor eficiência para os ciclones raspadores do Concentrador II devido melhores condições operacionais deste concentrador.

A eficiência para os ciclones raspadores, limpadores, deslamadores, todos GMAX, instalados no Concentrador II tiveram sua eficiência variando entre 0,5 e 0,6, caracterizando melhor eficiência comparado com os ciclones KREBS do Concentrador I.

A eficiência dos ciclones secundários GMAX do primeiro e segundo estágio, fechado e aberto, ficou em 0,4. No geral esta eficiência é considerada boa segundo Beraldo (1987).

#### 5.2.4 Parâmetro $\alpha$

O parâmetro  $\alpha$  para os ciclones primários KREBS e GMAX variou entre 1,3 e 1,4. Observado o fato das amostragens terem sido realizadas em escala industrial, estes valores são considerados tecnicamente iguais.

Foram utilizadas duas técnicas diferentes para a análise granulométrica: uma utilizou o granulômetro *laser* e outra utilizou peneiras de 500 e 600#. O modelo matemático se mostrou pouco sensível a estas alternativas de análise, pois obteve o mesmo valor de  $\alpha$  nos dois casos.

O parâmetro  $\alpha$  para os ciclones raspadores KREBS e GMAX instalados no Concentrado I ficou igual em 1,8. O parâmetro  $\alpha$  para os ciclones limpadores KREBS e GMAX instalados no Concentrado I e II, respectivamente, ficou igual em 3,2. O parâmetro  $\alpha$  para os ciclones deslamadores KREBS e GMAX instalados no Concentrado I e II, respectivamente, ficou igual em 1,9. Estes resultados estão alinhados com os estudos de Lynch (1977) que diz que o  $\alpha$  é característica do material, ou seja, pequenas variações operacionais não influenciam.

Os ciclones raspadores GMAX instalados no Concentrador II ficou com  $\alpha$  igual a 2,1.

O parâmetro  $\alpha$  para os ciclones secundários em circuito aberto KREBS e GMAX instalados nos Concentradores I e II variou entre 1,8 e 2,0.

O parâmetro  $\alpha$  para os ciclones KREBS e GMAX instalados no Concentrado I e II operando no segundo estágio da dupla classificação variou entre 3,1 e 3,2.

#### 5.2.5 Parâmetro $m$

Parâmetro  $m$  Plitt indica a nitidez da classificação. Para os ciclones primários KREBS e GMAX instalados nos Concentradores I e II respectivamente, o  $m$  variou entre 1,2 a 1,4. Segundo Plitt (1976), esta faixa de valores para  $m$  determina um nitidez da classificação ruim.

Para os ciclones raspadores, deslamadores e secundários no 1º estágio da dupla classificação, todos os fabricantes, instalados nos Concentradores I e II, o  $m$  variou entre 1,6 a 1,8. Ainda de acordo com Plitt (1976), valores de  $m$  acima de 2,0, indica uma boa nitidez para a classificação. Neste caso temos uma razoável nitidez da classificação; ou seja, existe margem para melhorar.

Para os ciclones limpadores e secundários no 2º estágio da dupla classificação instalados nos Concentradores I e II, o  $m$  variou entre 2,4 a 2,5 independente do fabricante. Esses valores, de acordo com a literatura, determina uma boa nitidez da classificação.

## 6. CONCLUSÕES

O método matemático de Lynch & Wills para caracterização de operação de classificação em ciclones se mostrou eficiente, prático, e de fácil aplicação.

No geral, os ciclones GMAX se mostraram mais eficientes e com *by-pass* menor quando se compara as curvas de partição e partição corrigida e conseqüentemente os parâmetros de eficiência para esses ciclones.

Ciclones KREBS, AKW e GMAX operando em situações semelhantes obtiveram o mesmo valor de  $\alpha$ . Este resultado está alinhado com os estudos de Lynch (1977) que mostra o  $\alpha$  como característica do material frente ao processo, ou seja, as pequenas variações operacionais não influenciam.

Os parâmetros avaliados indicaram melhor eficiência de classificação no Concentrador II quando comparado com o Concentrador I. As condições operacionais do Concentrador II são mais favoráveis do que as do Concentrador I. Ciclones de mesmo fabricante e mesma configuração geométrica proporcionam melhor eficiência de corte no Concentrador II; certamente em função do circuito mais adequado e equipamentos mais modernos.

A metodologia de avaliação da classificação em ciclones desenvolvido neste trabalho se mostrou uma boa ferramenta para auxiliar em iniciativas que busquem a melhoria da eficiência da classificação principalmente no Concentrador I onde foram identificadas oportunidades de melhoria.

Os valores de  $\alpha$  encontrados na prática industrial da Samarco são inferiores àqueles mencionados na literatura, indicando que para minério de ferro o valor 4,0 é elevado, sobretudo na classificação do minério com alto percentual de quartzo.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, K. V., 2006, “**Otimização da carga moedora utilizando ferramentas de modelamento matemático e simulação de moagem.**”, UFMG, Belo Horizonte, Brasil.

BERALDO, J. L. “**Moagem de Minérios em Moinhos Tubulares**”. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 1987.

CARRISSO, R.C.C., CORREIA, J.C.G., 2004, “**Classificação e Peneiramento**”, In: *Luz, A. B.; Sampaio, J. S e Almeida, S. L. M. (Ed). Tratamento de Minérios. 4a ed.* CETEM, Rio de Janeiro, pp.197-237.

CHAVES, A.P., 1996, *Teoria e Prática do Tratamento de Minérios*. Editora Signus, v.1, pp. 235.

CRISTIE, F., BRATHWAITE, B., “**Mineral Commodity report 15 – iron**” New Zeland, Institute of Geological and Nuclear Science Ltd, 1997.

DORR II J. V. N., BARBOSA, A. L. M., 1963, “**Geology and ore depositsos Itabira District**”, Minas Gerais, Brazil. USGS Prof. Pap., 1963. 341-C: 1-108.

FLINTOFF, B. C.; PLITT, L. R.; TURAK, A. A. “**Cyclone modelling: a review of present technologies**”. *CIM Bulletin*, v. 80, n. 905, p. 39-50, 1987.

FRANCO, R. J.C. **Química Analítica Instrumental**. (Notas de Aula). 2005.

GOMES, M. A., **Caracterização do Rejeito de Minério de Ferro da Mina de Córrego do Feijão**. Ouro Preto. Dissertação de Mestrado. Pós Graduação em Engenharia Mineral. Universidade Federal de Ouro Preto, 2009.

IBRAM – **Instituto Brasileiro de Mineração**. Produção mineral brasileira – 2012. Disponível em: <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00001669.pdf>. Acessado em 15/10/2012.

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

KELLY, E.G., SPOTTISWOOD, D.J., 1982, *Introduction to Mineral Processing*, Wiley, New York.

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

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

LIMA, R. M. F.; LUZ. J.A. M. **Análise Granulométrica por técnicas que se baseiam na sedimentação gravitacional: Lei de Stokes**. Ouro Preto: Revista Escola de Minas, REM, 2001, v.54 n.2. Segundo trimestre.

LYNCH, A.J., 1979, “**Mineral Crushing and Grinding Circuits**”, Their Simulation Optimization, Design and Control, Elsevier, Amsterdam, pp. 340

MACHACA, Y. Y. C., 2010, “ **Modelagem matemática da classificação de polpa de fosfato de bauxita em hidrociclone**” PEMM – COPPE, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil.

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

MENDES, M. C. O., 2011, “**Microestruturas e texturas cristalográficas em policristais de hematita como indicadores da magnitude de formação no quadrilátero ferrífero.**”, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – MG, 2011.

NAGESWARARAO, K., 1978, *Further developments in the modelling and scale-up of industrial hydrocyclones*. Ph.D. Thesis, University of Queensland (JKMRC), Brisbane, Australia.

NAGESWARARAO, K., 1995, “**A generalised model for hydrocyclone classifiers**”, *Proceedings of Australasian Institute of Mining and Metallurgy*, pp. 21, Australia.

NAGESWARARAO, K., 2000, “**A critical analysis of fish-hook effect in hydrocyclone classifiers**”, *Chemical Engineering Journal*, v. 80 n. 1–3, pp.251–256.

PLITT, L.R., 1976, “**A mathematical model of the hydrocyclone classifier**”, *CIM Bulletin* v. 69, pp.114–123.

PLITT, L.R., CONIL, P., BROUSSAUD, P., 1990, “**An improved method of calculating the water spilt in hydrocyclones**”, *Minerals Engineering*, v. 3, pp. 533–535.

ROBERTO, J. B., 2010, “**Influência dos diversos tipos litológicos nas operações de concentração da instalação de beneficiamento em Brucutu**”. Universidade Federal de Belo Horizonte, Belo Horizonte - MG, Braisl.

ROESER, H. M., ROESER, P. A., 2010, “**O Quadrolátero Ferrífero – MG, Brasil: Aspectos sobre sua história, seus recursos minerais e problemas ambientais relacionados**”, *Genomos*, p33-37.

ROSIÉRE, C. A., CHEMALE, F. Jr., GUIMARÃES, M. L. V. **Um Modelo para a Evolução Microestrutural dos Minérios de Ferro do Quadrilátero Ferrífero. Parte 1 - Estruturas e recristalização**. *Genomos*, Belo Horizonte, v.1, p.65–84, 1991.

SAMPAIO, J. A., OLIVEIRA, G. P., SILVA, A. O., 2007, “**Ensaio de classificação em hidrociclones**”, CETEM, Rio de Janeiro, Brasil.

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

SILVA, M. A. P., 1989, “**Hidrociclones de Bradley: dimensionamento e análise de desempenho**”, dissertação de mestrado – Eng Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

SOUZA, F.J., VIEIRA, L.G.M., DAMASCENO, J.J.R., BARROZO, M.A.S., 2000, “**Analysis of the influence of the filtering medium on the behaviour of the filtering hydrocyclone**”, *Powder Technology*, v.107, pp. 259-267.

SVAROVSKY, L., 1990, *Hydrocyclones*. In: SVAROVSLY, L., ed., **Solid-Liquid Separation**, Butterworths & Co. Ltd., 3 th edition.

TAKEHARA, L., 2004, “**Caracterização geométrica dos principais minérios de ferro brasileiros – fração sinter feed**”, 419f, doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil.

TAVARES, L.M., SOUZA, L.L.G., LIMA, J.R.B., POSSA, M.V., 2002, “**Modeling classification in small diameter hydrocyclones under variable rheological conditions**”, *Minerals Engineering*, v.15, pp. 613–622.

TERRA, A., 1938, **Essay d’une théorie de la lavage. Révue de l’industrie Minérale**, v. 18, pp. 383-403.

WHITEN, W. J., 1972, “ **The simulation of crushing plants with models developed using multiplace splines regressions**”, 1n 10<sup>th</sup> int., p317- 32.

WILLS, B.A. **Froth Flotation. Mineral Processing Technology**, 6th edition, p. 258- 341,2006.