UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA E DE MATERIAIS

CHRISTIANE RIBEIRO DA SILVA

DETERMINAÇÃO DE GRANULOMETRIA DE ROM E BRITAGEM POR ANÁLISE DE IMAGENS

Porto Alegre
2014

CHRISTIANE RIBEIRO DA SILVA

DETERMINAÇÃO DE GRANULOMETRIA DE ROM E BRITAGEM POR ANÁLISE DE IMAGENS

Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade Acadêmica

Orientador: Prof. Dr. Jair Carlos Koppe

Coorientador: Prof[a]. Dr[a]. Vládia Cristina Gonçalves de Souza

Porto Alegre

2014

CHRISTIANE RIBEIRO DA SILVA

A UTILIZAÇÃO DA AMOSTRAGEM POR ANÁLISE DE IMAGENS PARA FINS DE DETERMINAÇÃO DE CURVAS GRANULOMÉTRICAS DE ROM E NA BRITAGEM

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia em Tecnologia Mineral e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

_____

Orientador: Prof. Dr. Jair Carlos Koppe

_____

Coordenador do PPGEM: Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Aprovado em 29 de agosto de 2014.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Rafael Teixeira Rodrigues (PPGE3M/UFRGS)

Prof. Dr. Raul Oliveira Neto (UNIPAMPA)

Prof. Dr. Jorge Dariano Gavronski (DEMIN/UFRGS)

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

À minha querida família, em especial aos meus pais, pelo apoio incondicional e tão necessário apoio emocional;

Ao Prof. Dr. Jair Carlos Koppe, pela oportunidade de realizar esta pesquisa;

À Prof[a] Dr[a] Vládia Cristina Gonçalves de Souza, pela coorientação e auxílio e conhecimento ao trabalho realizado;

Aos membros da banca examinadora, pelo interesse e disponibilidade de participar além das contribuições ao trabalho;

Aos professores do DEMIN/UFRGS, pela oportunidade de aprendizado e, também, pela paciência, dedicação e disponibilidade;

Ao CNPQ pela provisão da bolsa de mestrado;

À Fundação Luiz Englert pelo auxílio financeiro na execução deste trabalho;

À VALE S.A. pela cooperação conjunta no desenvolvimento desta pesquisa, em especial aos funcionários do Setor de Qualidade (Periquito – Itabira/MG);

Aos meus amigos, pela compreensão diante de ausências e pelo apoio;

Aos colegas de curso pela amizade, compreensão e colaboração;

A todas as pessoas que, de alguma forma, auxiliaram na conclusão deste trabalho.

“Foi o tempo que dedicastes à tua rosa que fez
tua rosa tão importante"
(Antoine de Saint-Exupéry)

RESUMO

Curvas granulométricas de alimentação e produto em etapas de britagem permitem modelar e avaliar o desempenho dos equipamentos. Essa pesquisa foi baseada na determinação de curvas granulométricas tendo como ponto de partida estudos sobre conceitos de amostragem de Gy, Napier-Munn, Minnitt e Pittard, sendo que as amostragens para definição dessas curvas granulométricas utilizaram análises de imagens. A importância deste estudo está relacionada à necessidade de conhecer o minério que abastece a usina, pois nesse caso de estudo, com o aprofundamento da cava, este vem se tornando mais compacto e resistente. Um dos objetivos essenciais é utilizar a amostragem via análise de imagens como ferramenta para determinação da granulometria de ROM alimentado na britagem primária de uma planta e aplicar a técnica nas demais fases. Foram definidas duas metodologias, uma para amostragem do ROM encaminhado à britagem primária e outra para alimentação da britagem terciária. Inicialmente, na amostragem de ROM (itabiritos friáveis), foi identificada a bancada de trabalho para que uma carga desmontada (259t) fosse basculada. Houve segregação dos blocos maiores que 2,5cm para análise e mensuração por imagens e formação da pilha para quarteamento e peneiramento. Os dados foram tratados e analisados, gerando as curvas granulométricas. A metodologia para amostrar a granulometria da alimentação da britagem terciária (itabiritos friáveis e granulados) partiu da identificação do ponto de amostragem, seguida de filmagens e determinação das imagens a serem utilizadas, simulando um amostrador automático. Os dados foram analisados e tratados com auxílio estatístico para obtenção das curvas. As metodologias foram consideradas de grande valia pois forneceram dados de granulometria com reprodutibilidade, porém mostraram-se laboriosas. Com relação ao ROM, o protocolo amostral apresenta taxas de redução de massa elevadas. As curvas abrangem ampla faixa de tamanhos, indicando que, apesar das etapas de homogeneização e divisão, os erros de viés e precisão (relativa = ±1%) resultantes frente à massa do lote retrocalculado (259t) foram desprezíveis. Nas curvas de ROM, 65% do material está retido em APA, 4% está na faixa entre APA e APF e 5% está retido em 1m, mostrando que frente amostrada atende às especificações do equipamento. Com relação à britagem terciária, foram realizados dois testes. Cada imagem gerou uma curva e cada teste gerou quatro curvas que geraram uma curva média. A curva média foi comparada com a de projeto, sendo a curva de granulado a mais próxima. As maiores variações ocorreram nos maiores tamanhos, acima de 80mm para granulado e de 50mm para friável. Também, foi observada a mesma quantidade de

material entre APA e APF, porém 100% do material granulado alimentado nesta etapa estava retido em APF, indicando impactos nesta operação. As análises das curvas permite a identificação de um cenário sobre mudanças na granulometria do ROM para os próximos anos. As metodologias foram desenvolvidas para proceder no futuro com a análise de materiais mais resistentes e se tornam de grande valia, pois a tendência do material é se tornar cada vez mais compacto. Desta forma, os resultados defendem este tipo de amostragem como uma técnica viável e sugerem sua utilização para controle de produtividade em outros depósitos.

Palavras-chave: Amostragem. Granulometria. Britagem. Análise de imagens.

ABSTRACT

Feed size distribution curves in crushing stages allows modeling and predict performance of crushers. This research was based on particle size's distribution curves determination with start on studies about sampling theory from Gy, Napier-Munn, Minnitt e Pittard, however, the sampling was developed with image analysis techniques and not by conventional granulometry analysis (screening). The importance of this research is related to the necessity of knowing ore that feeds plant because, in this study, with increased pit ore is becoming stronger and resistant. One of the essential objective is to use sampling with image analysis techniques as a tool for determining ROM's particle size that feeds the first stage of crushing plant and apply that techniques in other stages. It was defined two methodologies, one was developed to sample in situ the ROM granulometry that feeds the first crushing stage and the other one was developed specially to knows the particle size (granulometry) that feeds the third crushing stage. Initially, on sampling ROM (friable itabirite), it was identified the workbench to dump a mass of 259t. Big blocks were segregated. In order to measure big blocks were applied image analysis techniques. Smaller material than 2.5cm was screened. Data were processed and analyzed, generating the size distribution curves. The methodology to sampling the third crushing stage (friable itabirite and compact itabirite) began with the sampling point identification followed by recordings and images determination simulating an automatic sampler. Data were processed and analyzed with statistical help to obtain curves. Both methodologies were considered valuable as they provided size distribution curves with reproducibility but were laborious. ROM granulometry that was evaluated has shown insignificant bias and reproducibility errors. The sampling protocol shows high reduction of mass rates. ROM curves shows that 65% of material is retained on APA, 4% is retained in size range between APA and APF and 5% is retained in 1m, showing that front sampled are attending the equipments specifications. With respect to tertiary crushing, two tests were performed. Each image generated one curve and each test generated four curves that generated a medium curve. The medium curve was compared with project curve and the compact curve was the curve that stays closer. The largest errors are, as expects, to blocks of larger size, more than 80mm for compact and 50mm for friable. Also was observed the same material quantity on APA and APF but 100% of compact itabirite was retained in APF, indicating impacts in this operation. The curves analysis allows the identification about changes in ROM's particle size for the coming years. The methodologies have been

developed to proceed in the future with the analysis of more resistant materials and become of great value, because the tendency of the material is becoming increasingly compact. Thus, the results defends this kind of sampling as a viable technique and suggest their use for control of productivity of other mineral deposits.

Keywords: Sampling. Granulometry. Crushing. Image analysis.

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Complexo minerador de Conceição – Itabira/MG. 17
Figura 2: Fluxograma completo da Britagem de Conceição. 17
Figura 3: Mapa de localização e Geologia das Minas de Itabira. 19
Figura 4: Mapa de localização do Quadrilátero Ferrífero na porção meridional do Cráton São Francisco. 20
Figura 5: Folha Itabira – Região de Itabira. 21
Figura 6: Mapa Geológico simplificado da região de Itabira destacando a área do Modelo de Conceição. 22
Figura 7: Fluxograma da etapa de britagem primária de Conceição. 23
Figura 8: Mataco presente na alimentação do circuito de britagem primária de itabirito 23
Figura 9: Formação das pilhas reguladoras 24
Figura 10: Fluxograma do Bloco III. 25
Figura 11: Etapas da análise estatística. 30
Figura 12: Fluxograma de classificação das variáveis. 31
Figura 13: Exemplo de histograma para análise de dados. 33
Figura 14: Relações presentes nas medidas de tendência central. 34
Figura 15: Relações entre precisão e acuracidade 37
Figura 16: Representação da extração de uma amostra 39
Figura 17: Erros associados à heterogeneidade do material 41
Figura 18: Erros sistemáticos 42
Figura 19: Erros de amostragem relacionados à variabilidade em pequena escala. 42
Figura 20: Basculamento do ROM de IF. 51
Figura 21: Segregação dos blocos maiores (BM1). 51
Figura 22: Obtenção de imagens dos BM1 segregados. 52
Figura 23: Abrindo uma imagem no Fiji. 52
Figura 24: Escalonamento da imagem de acordo com a bola alaranjada. 53
Figura 25: Mensuração de um bloco grande por Fiji. 53
Figura 26: Demarcação da pilha original. 54
Figura 27: Formação das quatro primeiras pilhas. 54
Figura 28: Homogeneização das duas pilhas diagonalmente opostas. 55
Figura 29: Esquema de divisão (*split*) da pilha original. 55
Figura 30: Fluxograma da amostragem de ROM. 56
Figura 31: Sequência de formação das fileiras de material passante em 25mm. 56
Figura 32: Esgotamento de uma pilha gêmea. 57
Figura 33: Escalonamento da imagem de acordo com a barra de referência. 58
Figura 34: Definição da *polyline* do BM2 a ser mensurado e seu resultado. 58
Figura 35: Fluxograma da usina e ponto de amostragem. 59
Figura 36: Inserindo uma imagem no Cad. 60
Figura 37: Definindo a escala de trabalho. 60
Figura 38: Protocolo de amostragem. 66
Figura 39: Curvas granulométricas finais para as duas pilhas gêmeas. 67
Figura 40: Definição das *polylines* dos 40 blocos das imagens do Teste 1 - Granulado (21.01.2014). 68
Figura 41: Definição das *polylines* dos 40 blocos das imagens do Teste 2 - Finos (04.02.2014). 69
Figura 42: Distribuição dos tamanhos das amostras do Teste 1. 78

Figura 43: Curvas de Distribuição Granulométrica de Alimentação da Britagem Terciária de cada amostragem realizada no Teste 1. 78
Figura 44: Distribuição dos tamanhos das amostras do Teste 2. 79
Figura 45: Curvas de Distribuição Granulométrica de Alimentação da Britagem Terciária de cada amostragem realizada no Teste 2. 80
Figura 46: Curvas de Distribuição Granulométrica da Alimentação da Etapa de Britagem Terciária - Retido Acumulado (%) na malha (mm) para teste granulados e finos, em escala logarítmica. 82
Figura 47: Intercalação de xisto verde em itabirito. 83
Figura 48: Itabirito estéril. 83
Figura 49: Pilha ROM com a presença de blocos de grande porte. 84
Figura 50: Evidência da presença de matacos no carregamento de equipamento para alimetação da britagem primária. 84
Figura 51: Fluxo esquemático do Projeto Itabiritos. 85
Figura 52: Composição da mina de Conceição. 85
Figura 53: Frentes de lavra utilizadas para alimentação da britagem em 21.01.14 (Teste 1). . 86
Figura 54: Mapeamento sequencial das frentes de bancada: ROM do teste de 21.01.14 - Bancada 1120(Hematita compacta + Itabirito compacto), Bancada 1015 (Hematita compacta + itabirito compacto + friável) e Bancada 850 (Itabirito semi-compacto + friável) respectivamente. 86
Figura 55: Litologias do complexo de Itabira. 87
Figura 56: Dados sobre produção (ROM, t/h, em verde) versus carga circulante (correia 3034, t/h, em azul) algumas horas antes da realização da amostragem. 89

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Unidades Estratigráficas da Região de Itabira.....21
Tabela 2: Faixas granulométricas analisadas na amostragem pós britagem terciária 26
Tabela 3: Resultados para os blocos maiores que 50cm (BM1).....62
Tabela 4: Resultados para os blocos menores que 40cm e maiores que 2,5cm (BM2).....62
Tabela 5: Resultados das análises granulométricas de laboratório em duplicatas: pilha "A" ..63
Tabela 6: Resultados das análises granulométricas de laboratório em duplicatas: pilha "B" ..63
Tabela 7: Resultados da composição da curva granulométrica final da pilha "A" 64
Tabela 8: Resultados da composição da curva granulométrica final da pilha "B".....65
Tabela 9**:** Resultados das massas retrocalculadas dos lotes (laboratório) 65
Tabela 10**:** Determinação da reprodutibilidade do método 66
Tabela 11**:**Resultado da mensuração dos blocos e definição da malha da Foto 1 do Teste 1 (granulado).....70
Tabela 12: Resultado da mensuração dos blocos e definição da malha da Foto 2 do Teste 1 (granulado).....71
Tabela 13: Resultado da mensuração dos blocos e definição da malha da Foto 3 do Teste 1 (granulado).....72
Tabela 14: Resultado da mensuração dos blocos e definição da malha da Foto 4 do Teste 1 (granulado).....73
Tabela 15: Resultado da mensuração dos blocos e definição da malha da Foto 1 do Teste 2 (finos) 74
Tabela 16: Resultado da mensuração dos blocos e definição da malha da Foto 2 do Teste 2 (finos) 75
Tabela 17: Resultado da mensuração dos blocos e definição da malha da Foto 3 do Teste 2 (finos) 76
Tabela 18: Resultado da mensuração dos blocos e definição da malha da Foto 4 do Teste 2 (finos) 77
Tabela 19: Resumo estatístico das curvas de distribuição granulométrica geradas no Teste 181
Tabela 20: Resumo estatístico das curvas de distribuição granulométrica geradas no Teste 281
Tabela 21 : Origem e o destino das frentes que alimentaram a usina em 21 de janeiro.....87

LISTA DE ABREVIATURAS

AL	Alimentadores
APA	Abertura de Posição aberta
APF	Abertura de posição fechada
BM1	Blocos maiores que 50 centímetros
BM2	Blocos com tamanhos entre 50 centímetros e 2,5 centímetros
ROM	Run of Mine
kg	quilograma
t	Tonelada
cm	Centímetro
mm	Milímetro
µm	Micrômetro
CV	Coeficiente de variação
σ^2	Variância
σ	Desvio padrão
x_i-x_m	Diferença entre cada valor de x e a média da população
x_m	Média aritmética
IF	Itabirito friável
IC	Itabirito compacto
+32mm	Retido em uma malha de 32 milímetros
-32mm	Passante em uma malha de 32 milímetros
TC	Correias transportadoras
SF	Sinter Feed
PF	Pellet Feed
QA	Quality assurance
QC	Quality control

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 15
1.1 OBJETIVOS 18
1.2 LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO 18
1.2.1 SÍNTESE DA GEOLOGIA REGIONAL E LOCAL 19
1.2.2 BRITAGEM PRIMÁRIA 22
1.2.3 BRITAGEM SECUNDÁRIA E TERCIÁRIA - BLOCO III 24
1.3 METODOLOGIA 26
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 28
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 29
2.1 ESTATÍSTICA 29
2.1.1 VARIÁVEL 30
2.1.2 ESTATÍSTICA UNIVARIADA 31
2.1.2.1 FREQUÊNCIAS 32
2.1.2.2 DISTRIBUIÇÃO DE FREQUENCIAS 32
2.1.2.3 MEDIDAS DESCRITIVAS 33
2.1.2.3.1 MEDIDAS DE TENDÊNCIA CENTRAL 33
2.1.2.4 MEDIDAS DE LOCALIZAÇÃO 35
2.1.2.5 MEDIDAS DE ESPALHAMENTO (DISPERSÃO) 35
2.1.2.6 MEDIDAS DE FORMA 36
2.2 ACURACIDADE E PRECISÃO DE UMA AMOSTRA 36
2.3 CONCEITOS DE AMOSTRAGEM 37
2.3.1 REPRESENTATIVIDADE DE UMA AMOSTRA 40
2.3.2 TIPOS DE AMOSTRAGEM 40
2.3.3 ERROS DE AMOSTRAGEM 41
2.3.3.1 ERROS ASSOCIADOS À HETEROGENEIDADE 42
2.3.3.2 ERRO FUNDAMENTAL DE AMOSTRAGEM 42
2.3.3.2.1 ERRO DE FLUTUAÇÃO DE HETEROGENEIDADE 42
2.3.3.2.2 ERRO DE SEGREGAÇÃO E GRUPAMENTO 43
2.3.3.3 ERROS SISTEMÁTICOS 43
2.3.3.3.1 ERROS DE MATERIALIZAÇÃO 43
2.3.3.3.2 ERROS DE PREPARAÇÃO 44

2.3.3.4 ERRO TOTAL DE AMOSTRAGEM 44
2.3.4 O CONCEITO DE HETEROGENEIDADE 44
2.4 GRANULOMETRIA 45
2.5 COMINUIÇÃO 45
2.5.1 BRITAGEM 46
2.5.1.1.1 BRITADORES GIRATÓRIOS E CÔNICOS 47
2.5.1.1.2 PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DE BRITADORES CÔNICOS E GIRATÓRIOS 47
2.6 ANÁLISE DE IMAGENS 48
3 METODOLOGIA 50
3.1 METODOLOGIA DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA PARA O ROM 50
3.2 METODOLOGIA PARA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO BLOCO III 58
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS 62
4.1 RESULTADOS DA METODOLOGIA DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA ROM 62
4.2 RESULTADOS DA METODOLOGIA DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO BLOCO III 67
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 90
5.1 CONCLUSÕES 90
5.2 TRABALHOS FUTUROS 93
6 REFERÊNCIAS 96

Capítulo 1

1 INTRODUÇÃO

Para que o minério metálico seja concentrado é necessário que os minerais presentes estejam liberados, o que ocorre por operações de redução de tamanho, denominadas processos de cominuição (britagem/moagem). Devido aos custos relacionados a perdas de produção que podem estar presentes nesta etapa como, por exemplo, energia incluindo moagem, presença finos no processo, entre outros, é necessário que a mesma seja otimizada.

Segundo Chaves & Peres (2003), cominuição é o conjunto de operações para reduzir o tamanho dos grãos dos minerais de interesse. Para isso é necessário executar de maneira adequada estas operações com principal objetivo de controlar o tamanho de liberação dos minerais de valor. Com isso, problemas nas etapas subsequentes de beneficiamento são evitados visto que, normalmente, a etapa de cominuição é seguida por um processo de classificação, que visa direcionar o material para o processo de concentração.

Circuitos de britagem e peneiramento de minérios são desenvolvidos com o objetivo de adequar a granulometria do minério de interesse, possibilitando sua liberação para posterior concentração. Diversas variáveis podem afetar a eficiência e a produtividade. Como exemplos de problemas operacionais podem ser citados: a presença de finos durante a segregação do minério quando acondicionados em pilhas e silos, o empolamento do material durante sua fragmentação e a presença de blocos maiores que o tamanho máximo suportado pelo britador, que acarreta no engargalamento da produção, dentre outros.

Para o caso específico do minério de ferro a ser abordado nesta pesquisa, o objetivo principal da etapa de cominuição é aumentar a produtividade, o que se dá com a redução de finos no processo. A geração de quantidades excessivas de finos pode acarretar diminuição na recuperação e aumento do consumo de reagentes. Por outro lado, materiais *in situ* de menor teor e tamanho de liberação, bem como mais grosseiros, podem levar a uma maior carga circulante. Ou seja, podem reduzir e/ou provocar paradas de produção e, também, aumento na manutenção corretiva dos equipamentos e de suas peças de desgaste.

Os equipamentos de britagem podem ter seu desempenho avaliado a partir da análise de suas curvas de distribuição granulométrica. A determinação da curva de alimentação de uma etapa específica de britagem indicará os tamanhos dos fragmentos que estão sendo

inseridos e sua relação com o produto final. De posse das curvas é possível identificar de maneira simples se a granulometria da amostra se mostra adequada, se é muito fina ou muito grossa ou, ainda, se esta pode estar deficiente em alguma faixa de tamanho de interesse presente na análise. Desta forma, torna-se possível avaliar se os equipamentos estão sub ou superestimados para determinada situação.

O desenvolvimento da pesquisa foi impulsionado pela identificação da ausência de amostradores automáticos na alimentação das etapas de britagem, ocasionando, consequentemente, um desconhecimento das faixas de tamanho do material alimentado. No entanto, devido ao fato das análises situarem-se em alimentações de britagem e, também, por envolver blocos de tamanhos que inviabilizariam a técnica convencional de análise de distribuição granulométrica (peneiramento), técnicas de análise de imagens foram utilizadas.

Seguindo os conceitos acima expostos, a pesquisa realizada foi baseada na utilização da amostragem via análise de imagens para fins de determinação de curvas granulométricas de alimentação das etapas de britagem de um complexo minerador. No trabalho está incluída a amostragem completa do minério ROM (*Run of Mine*), pós desmonte, encaminhado à etapa de britagem primária. Também faz parte da pesquisa a amostragem da alimentação da etapa de britagem terciária, integrante do Bloco III. Ambas as amostragens foram focadas nos impactos da utilização destes diferentes litotipos.

Atualmente, as normas internacionais de amostragem, especialmente no caso do ferro, estão baseadas na Teoria de Pierre Gy. A amostragem, segundo Gy (1982) é importante sob diversos aspectos, tanto para determinação de teores quanto para granulometria. Amostragem para definição da curva granulométrica sem controle de representatividade, viés e precisão, não é passível de ser validada, conforme teoria qualitativa e quantitativa de Gy (1957). Este trabalho aplica a teoria, no entanto as amostragens foram feitas com a utilização de análise de imagens e não por análise granulométrica convencional (peneiramento).

O presente trabalho foi desenvolvido na Mina de Conceição, pertencente à Vale S.A., que extrai e beneficia minério de ferro. De acordo com Almeida (2011, p.3), “os minérios extraídos nas minas pertencentes à Vale S.A. são constituídos basicamente de itabiritos e hematitas friáveis, compactos e uma porção intermediária denominada de semi compacto”. Com o aprofundamento da cava da mina, onde a metodologia foi aplicada, está previsto, para os próximos anos, um aumento considerável de itabiritos compactos frente aos friáveis. Os itabiritos compactos são mais resistentes à quebra. Ainda, a despeito de questões estruturais, geram grande quantidade de blocos maiores que um metro em geral, criando a necessidade de

adaptações nos circuitos de cominuição.

A Britagem de Conceição (Britagem Primaria e Bloco III) é responsável pela operação de cominuição (redução de tamanho do minério), onde as espécies disseminadas são liberadas. O Bloco III é constituído de britagem secundária, peneiramento e britagem terciária. Nesta etapa é obtido um material de tamanho apropriado e controlado para formação de pilhas ou alimentação direta para Usina.

A Figura 1 apresenta o complexo minerador de Conceição, indicando a localização das principais operações realizadas no mesmo. A Figura 2 apresenta o fluxograma completo da Britagem de Conceição.

Figura 1: Complexo minerador de Conceição – Itabira/MG.
Fonte: Vale S.A.

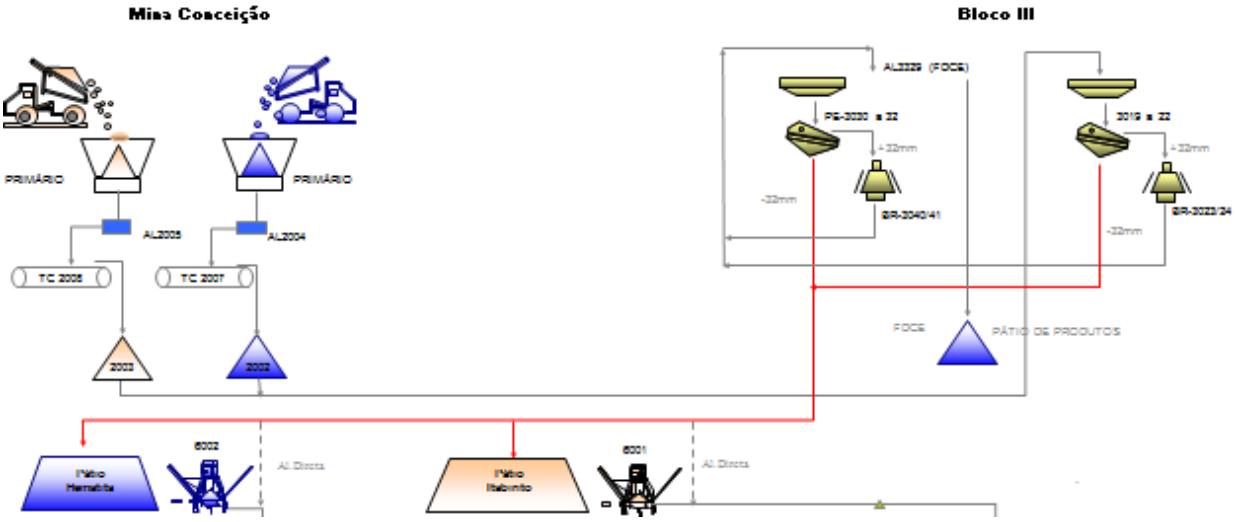

Figura 2: Fluxograma completo da Britagem de Conceição.
Fonte: Vale S.A.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste estudo é utilizar a técnica de amostragem via análise de imagens como ferramenta para determinação da granulometria de ROM alimentado na etapa de britagem primária de uma planta de beneficiamento e aplicar a técnica nas fases de britagem.

Secundariamente, também, é objetivo desta dissertação:

- Validar ambas as metodologias, apresentando e discutindo os resultados dos testes e das curvas granulométricas adquiridas.

- Analisar a influência da fragmentação na produtividade da planta de cominuição da Britagem de Conceição.

1.2 LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

As campanhas de amostragem via análise de imagens foram realizadas no Complexo Itabira, Mina de Conceição, localizada no município de Itabira, Estado de Minas Gerais. O Complexo Itabira, pertencente à Vale S.A., iniciou suas atividades em 1942 e localiza-se a 100 km de Belo Horizonte, capital mineira. É composto pelas Minas do Cauê, de Conceição e Minas do Meio (Chacrinha, Onça, Periquito e Dois Córregos). Em Itabira, a formação ferrífera integra o Quadrilátero Ferrífero, sendo considerada uma das maiores ocorrências de minério de ferro do mundo. A Figura 3 apresenta a localização de Itabira/MG no Quadrilátero Ferrífero bem como o complexo minerador de Itabira.

Existem dois tipos de minério de ferro nas Minas do Cauê e de Conceição: hematita (com mais de 63% de teor ferro) e itabirito (com cerca de 50% de teor ferro). Depois de beneficiado, o minério é estocado nos pátios de produtos e, em seguida, é embarcado nos vagões da Estrada de Ferro. A Usina de Conceição beneficia os minérios hematíticos e itabiríticos (ROM) da Mina de Conceição.

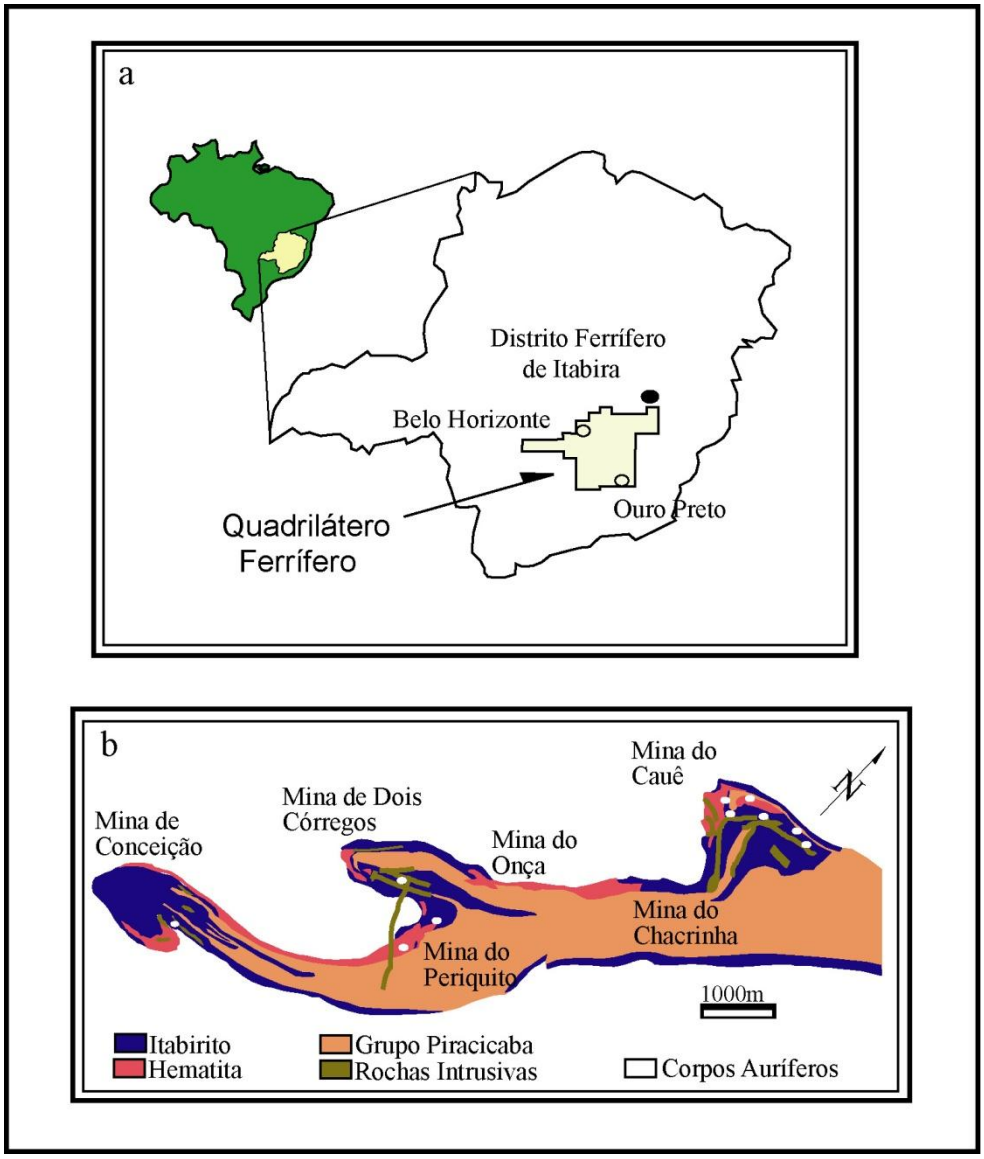

Figura 3: Mapa de localização e Geologia das Minas de Itabira.
Fonte: Vale S.A. (Geologia)

1.2.1 SÍNTESE DA GEOLOGIA REGIONAL E LOCAL

Do ponto de vista geotectônico, o Quadrilátero Ferrífero está inserido no ambiente da Província São Francisco conforme apresentado na Figura 4, o qual abriga em seus domínios jazidas de ferro e ouro dentre outros recursos minerais (Almeida, 2011).

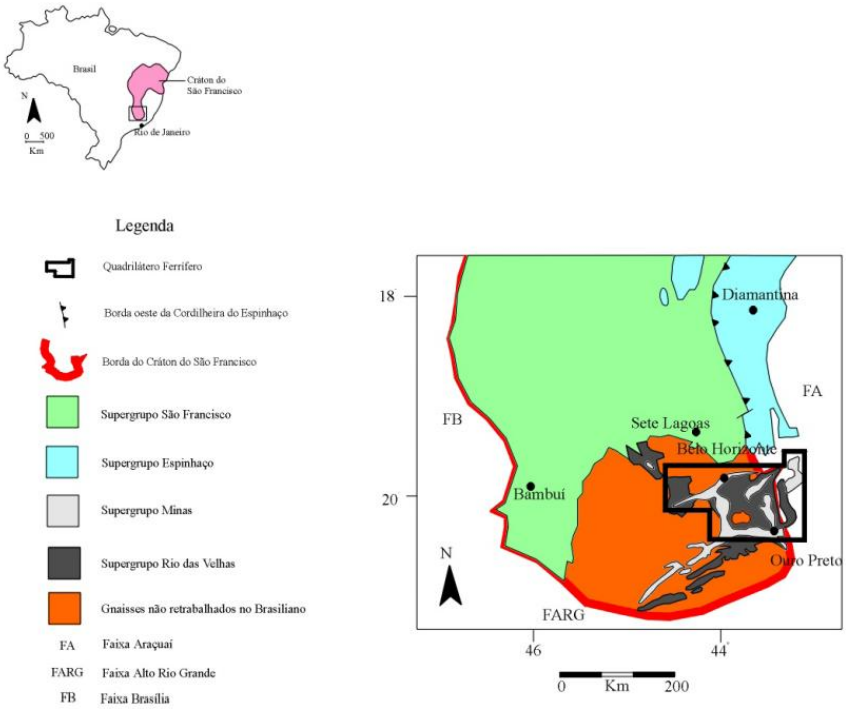

Figura 4: Mapa de localização do Quadrilátero Ferrífero na porção meridional do Cráton São Francisco.
Fonte: Almeida, 2011

Segundo Dorr (1969), a geologia do Quadrilátero Ferrífero é bastante complexa. As rochas apresentam-se dobradas, falhadas e foram metamorfizadas em graus variáveis. O Quadrilátero Ferrífero ocupa uma área de aproximadamente 7.000km² e é formado por rochas Arqueanas e Proterozóicas representadas pelo embasamento cristalino, destacando-se o Supergrupo Rio das Velhas, o Supergrupo Minas e o Grupo Itacolomi, conforme apresentado na Figura 5 e Tabela 1. Na Tabela 1 em vermelho está uma elipse mostrando as unidades que compõem a área desta pesquisa. Ainda, o Distrito Ferrífero de Itabira consiste em um sinclinal alongado no sentido NE-SW de aproximadamente 10 km de extensão que compreende as rochas dos Supergrupos Minas e Rio das Velhas (Figura 6).

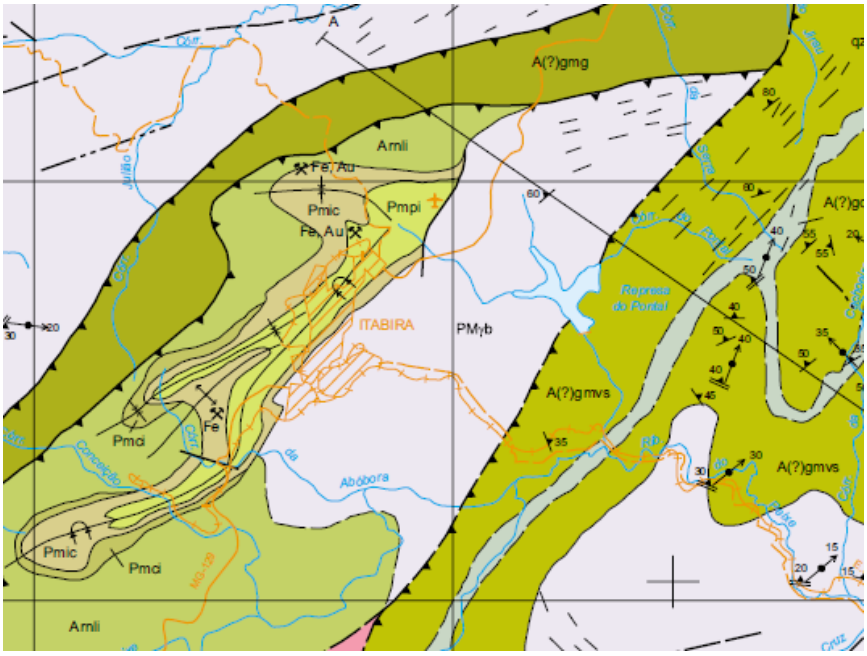

Figura 5: Folha Itabira – Região de Itabira.
Fonte: CPRM

Tabela 1: Unidades Estratigráficas da Região de Itabira

Província Geológica e/ou Estrutural	EON/Período		Nomenclatura Lito-estratigráfica		Simbologia		Geocronologia	Descrição dos litótipos
SÃO FRANCISCO	PROTEROZÓICO	PALEO/MESOPROTEROZÓICO	Suíte Borrachudos		PMYb	PMYb1	1,78 Ga	Metagranitos e metasienogranitos de filiação alcalina, tardi a pós-colisionais (sin-rifte) Yb = Augen gnaisses graníticos grosseiros Yb1 = Biotita granitos finos a orientados com pegmatitos associados
		PALEOPROTEROZÓICO	SUPERGRUPO MINAS	Grupo Piracicaba	Pmpi		> 2,18 Ga	Quartzitos, quartzitos conglomeráticos subordinados; quartzo muscovita; xistos; filitos; filitos grafitosos; quartzitos ferruginosos
				Formação Cauê	Pmic		> 2,42 Ga > 2,13 Ga	Itabiritos, itabiritos dolomíticos, itabiritos anfibolíticos, camadas delgadas de filitos e xistos, corpos de hematita
				Grupo Itabira Indiviso	Pmii		< 2,42 Ga	Itabiritos, itabiritos dolomíticos, itabiritos anfibolíticos, dolomitos, filitos dolomíticos e ferríferos, filitos, xistos e corpos de hematita
				Grupo Caraça Indiviso	Pmci		> 2,42 Ga	Quartzitos, quartzo-sericita xistos, lentes de filito, conglomerado polimítico com pirita e urânio, filitos, filito grafitoso e sericítico cinza prateado; filitos dolomíticos; metachierte, granada filito
	ARQUEANO	MESOARQUEANO	Complexo Guanhães		A(?)g			Metagrauvacas (A(?)gmg); anfibolitos (A(?)ganf); quartzitos (A(?)gq); quartzitos ferruginosos: formação ferrífera a hematita e magnetita (A(?)gff); quartzo-muscovita-cianita xistos (A(?)gci), anfibolito, xistos metapelíticos, gnaisses bandados, xistos máficos e ultramáficos, metagrauvacas (A(?)gmvs)

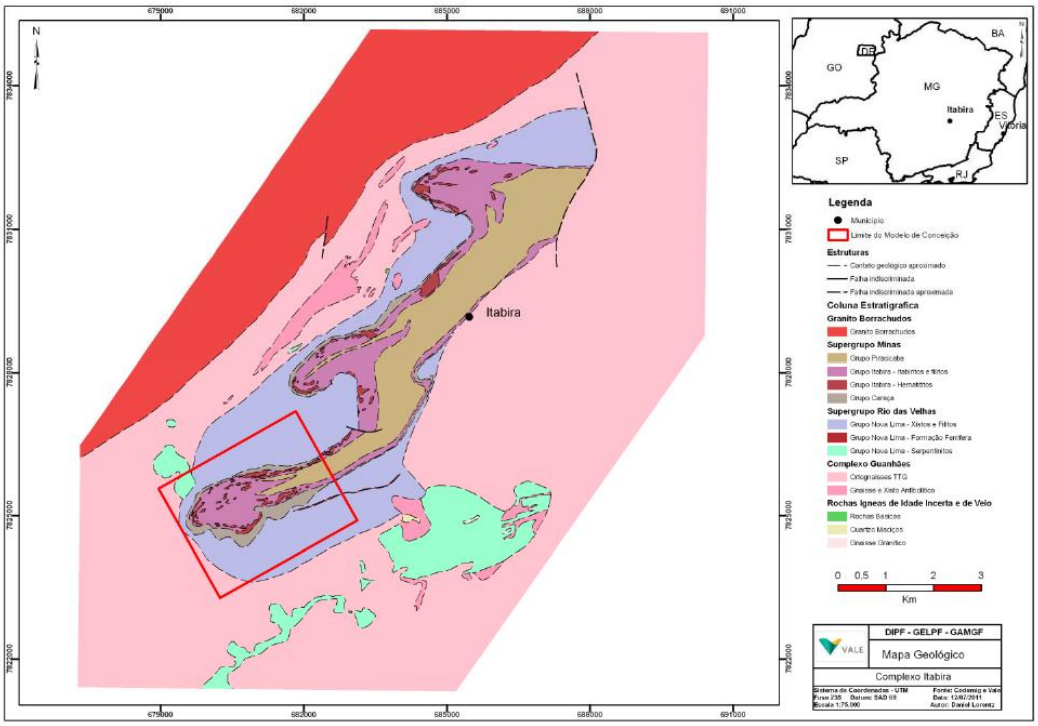

Figura 6: Mapa Geológico simplificado da região de Itabira destacando a área do Modelo de Conceição.
Fonte: Vale S.A. (Geologia)

1.2.2 BRITAGEM PRIMÁRIA

O ROM alimenta uma usina de britagem constituída por três estágios iniciais, podendo chegar a cinco. A britagem primária é a operação de cominuição do minério ROM oriundo da Mina de Conceição. Nesta unidade existem dois pontos de descarga de material, um para hematita e um para itabirito, sendo o ROM descarregado por caminhões fora de estrada com capacidade de, aproximadamente, 250t.

Os britadores primários são de grande porte do tipo giratório e operam em circuito aberto, sendo o de hematita de 54” x 74” (1372mm x 1880mm) e o de itabirito de 89” x 69” (2261mm x 1752mm). Ambos os britadores são da marca Allis Chalmers e possuem abertura na posição fechada (APF) de 5 ½”. Estas informações foram retiradas do manual de operações de conceição fornecido pela Vale. O circuito de britagem primária está apresentado na Figura 7.

Na etapa de britagem primária, os britadores giratórios garantem a redução de tamanho do minério via movimento excêntrico do eixo principal em relação à suas paredes, submetendo o material a esforços de compressão.

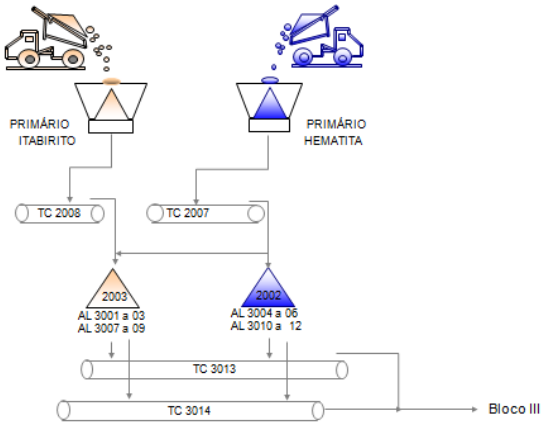

Figura 7: Fluxograma da etapa de britagem primária de Conceição.
Fonte: Vale S.A.

De acordo com o manual de operações da Vale, caso existam rochas de maior tamanho na alimentação há necessidade de utilização do rompedor de matacos. O tamanho máximo do minério itabirítico de alimentação é de 1,20m enquanto que o hematítico é de 1,10m. A Figura 8 mostra a presença de um mataco na alimentação do circuito de britagem primária de itabirito.

Figura 8: Mataco presente na alimentação do circuito de britagem primária de itabirito
Fonte: Fotografia tirada na Vale S.A.

O minério britado é direcionado a um silo de capacidade 410m³ e o conteúdo deste silo é retomado pelo alimentador de placas, que direciona o material às correias transportadoras, visando à formação das pilhas reguladoras (Figura 9). Somente após a britagem secundária e

terciária (Bloco III) é que ocorre a homogeneização do minério em pilhas separadas (uma para hematita outra para itabirito).

Figura 9: Formação das pilhas reguladoras
Fonte: Fotografia tirada na Vale S.A.

1.2.3 BRITAGEM SECUNDÁRIA E TERCIÁRIA - BLOCO III

O circuito de britagem secundária, peneiramento e britagem terciária, compõe o Bloco III da Britagem de Conceição. É responsável pela operação de cominuição, de onde se obtém o produto de tamanho apropriado e controlado para formação de pilhas ou alimentação direta para as posteriores etapas de concentração da usina. Este circuito é utilizado ora para a britagem de hematita ora para itabirito. Em qualquer uma das utilizações, o minério é proveniente das pilhas reguladoras e transportados ao circuito via correias transportadoras. A pilha reguladora possui doze (12) alimentadores vibratórios em paralelo, sendo seis (6) para hematita e seis (6) para itabirito.

Inicialmente o processo do Bloco III se dá com o transporte do material proveniente das pilhas reguladoras. O minério proveniente da pilha reguladora é retirado pelos alimentadores (ALs 3001 a 3012) e transportado via correias (TCs 3013 e 3014) até os silos 3081 e 3082. Dos silos o minério é retirado por alimentadores (ALs 3015 a 3018) e encaminhados às peneiras 3019 a 3022. A malha inferior das peneiras é de 32mm. O *undersize*, material de granulometria inferior a 32mm, segue para o pátio de homogeneização. O *oversize*, aquele acima de 32mm, é descarregado nos britadores 3023 e 3024 onde é feito o processo da

fragmentação. Os britadores secundários reduzem o tamanho do minério até 2”. A etapa de britagem secundária é composta de dois britadores marca Allis Chalmers 17” X 84”. Estas informações foram fornecidas pelo Setor de Britagem de Conceição.

O minério, após ter sido fragmentado pelos britadores secundários, é transportado por correia (TC 3025), sendo encaminhado ao silo 3084. Deste silo, o minério é retirado pelos alimentadores vibratórios (ALs 3026 a 3028) e alimentam as peneiras vibratórias, 3030 a 3033. O *undersize* destas peneiras é transportado (TCs 3045, 3046 e 3047) e segue para o pátio de homogeneização ou para alimentação direta da usina. Já o *oversize*, é transportado pela correia de carga circulante (TC 3034) e alimenta silo da britagem terciária. Os britadores terciários reduzem o tamanho do minério até 28mm.O minério fragmentado por estes britadores é descarregado na 3025, fechando o circuito no peneiramento.

A correia 3034 constitui a carga circulante provinda do peneiramento secundário e encaminha o material a um silo de armazenamento de capacidade de 1300 m³. Após, o material segue em direção à etapa de britagem terciária composta por três britadores terciários, sendo dois de marca Allis Chalmers 5”x84” (AL3036 alimenta o BR3040, AL3037 alimenta o BR3041) e um de marca Sandvik CH660 (AL3038 alimenta o BR3042). A britagem terciária brita somente a carga circulante, ou seja, somente o material que permaneceu maior que 32mm após o peneiramento secundário e que seguiu via correia 3034. Após a britagem terciária não há peneiramento, o material em sua totalidade é encaminhado à correia 3025 e passa novamente pelo processo secundário. A Figura 10 apresenta o fluxograma do Bloco III.

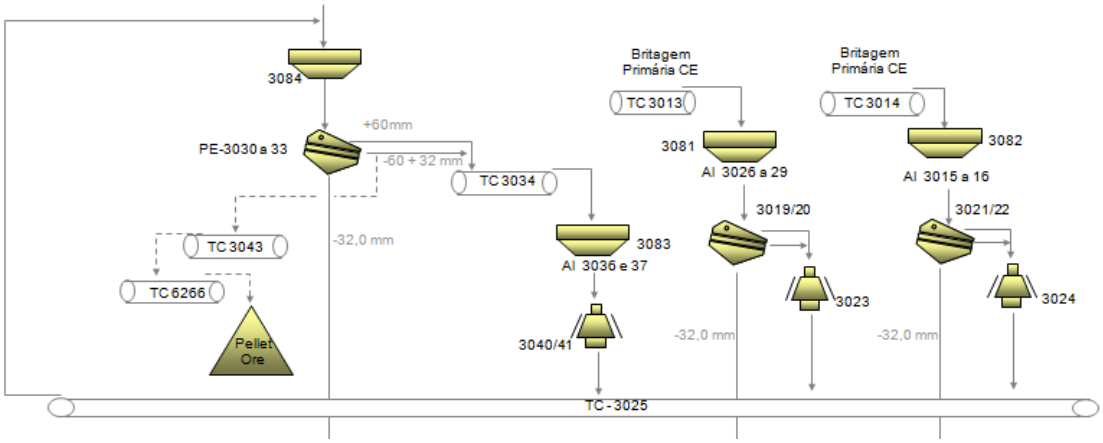

Figura 10: Fluxograma do Bloco III.
Fonte: Vale S.A.

A correia 3034 que constitui a carga circulante é considerada um ponto crítico presente no Bloco III. Dentre os possíveis problemas relacionados à carga circulante são citados: o aumento da mesma causando a redução da taxa de alimentação, ocorrência de reversão na alimentação dos britadores terciários (jogar para fora, permitindo retorno a operação), ocorrência de distúrbios nas formações das pilhas de homogeneização, sobrecargas em equipamentos e consequentemente redução da produção e, ainda, o aumento de custo em manutenções, redução da vida útil dos equipamentos. Desta forma, a correia 3034 foi um dos pontos de amostragem utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa.

Após a etapa de britagem terciária, quando se obtém o produto final da britagem, é feita uma amostragem. Trata-se do único amostrador presente na usina de Conceição. Esta amostragem ocorre com um amostrador automático tipo linear (facas) que realiza corte primário e secundário para redução de massa. O material amostrado é destinado ao laboratório da Vale, onde ocorre a análise dos seguintes elementos químicos: Fe, SiO_2, Mn, CaO, Al_2SO_3, Mg, Ti e P. As análises são realizadas em quatro faixas granulométricas conforme apresentado na Tabela 2. Não há programa de QA/QC implementado para as amostras do terciário, as quais são utilizadas para estimativa de controle das operações subsequentes. Essa hoje é feita com base nas amostras de trincheiras da geologia (único dado de granulometria de ROM disponível até hoje).

Tabela 2: Faixas granulométricas analisadas na amostragem pós britagem terciária

Faixa Granulométrica	**Ocorrência**
+8mm (SF)	Britagem quaternária + Rebritagem de Granulados
-8mm+1mm	Jigagem
-1mm+0,15mm	Grão médio de SiO_2 + parte de material que vai para barragem
-0,15mm (PF)	Grão médio de hematita > Flotação

1.3 METODOLOGIA

Para o atendimento dos objetivos propostos desta pesquisa foram utilizadas duas metodologias de trabalho: uma para análise granulométrica de ROM e uma para análise granulométrica do material fragmentado da britagem terciária.

Para a análise de ROM a metodologia segue as seguintes etapas:

Identificação da bancada de trabalho para análise de ROM (pós desmonte)

↓

Basculamento de uma carga da bancada desmontada em local previamente determinado

↓

Segregação dos blocos maiores para análise e mensuração via análise de imagens e formação da pilha para quarteamento e posterior peneiramento

↓

Análise e tratamentos dos dados obtidos (análise de imagens e peneiramento)

↓

Determinação das curvas granulométricas e seus resultados

Para a análise do material fragmentado da britagem terciária a metodologia segue as seguintes etapas:

Identificação do ponto de amostragem para imagens na correia transportadora 3034 (alimentação da britagem terciária - carga circulante) do Bloco III;

↓

Determinação dos intervalos de tempo de filmagem dos blocos de minério, o que seria equivalente aos tempos de corte de um amostrador automático por exemplo

↓

Análise e tratamento das imagens;

↓

Determinação das curvas granulométricas e seus resultados

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O capítulo 2 descreve os fundamentos teóricos utilizados como base para o desenvolvimento da metodologia de amostragem por análise de imagens em minério fragmentado. Neste capítulo serão abordados temas como a utilização de estatística para análise dos dados que compõem o banco de dados da amostragem e cominuição de minérios. Será abordado, também, conceitos sobre a Teoria da Amostragem de Gy, que está diretamente ligada à representatividade dos processos.

O capítulo 3 traz as metodologias desenvolvidas para amostragem por análise de imagens para a determinação das curvas granulométricas desejadas. Será abordado especificamente a metodologia utilizada para a análise do minério ROM, pós desmonte e, também, a metodologia utilizada para a análise minério fragmentado alimentado na etapa de britagem terciária (composição da carga circulante) do Bloco III. O capítulo apresenta a forma de aquisição dos dados de amostragem para posterior análise de resultados.

O capítulo 4 apresenta a análise e discussão dos resultados adquiridos durante o desenvolvimento desta pesquisa, apresentando as condições que influenciam na qualidade dos dados para análise de imagens, bem como as limitações presentes para o método.

O capítulo 5 conclui esta dissertação, defendendo a amostragem com a utilização de análise de imagens e, ainda, propondo que a utilização deste tipo de amostragem seja utilizada para fins de controle de produtividade em outras minas.

O capítulo 6 apresenta as referências utilizadas na elaboração desta pesquisa.

Capítulo 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo se dedica ao estudo dos fundamentos teóricos no qual está pesquisa foi embasada. Tem por finalidade apresentar os conceitos considerados fundamentais para a compreensão do estudo realizado.

2.1 ESTATÍSTICA

A Estatística, hoje, está presente em quase todas as atividades do homem. Com a utilização de análises a partir de dados organizados podemos, em muitos casos, fazer previsões, determinar tendências, auxiliar na tomada de decisões e, portanto, elaborar um planejamento com mais precisão. A estatística é constituída por um conjunto de métodos utilizados para a obtenção e análise de dados. São técnicas que permitem, de forma sistemática, organizar, descrever, analisar e interpretar dados oriundos de estudos ou experimentos, realizados em qualquer área do conhecimento.

De acordo com Correa (2003), é usual dividir a estatística em três grandes áreas, embora estas não sejam ramos isolados: Estatística Descritiva, Estatística Inferencial e Probabilidade. A estatística descritiva é a etapa inicial da análise estatística, utilizada para descrever e resumir os dados. É o conjunto de métodos para organização, apresentação e descrição de dados representativos do comportamento de uma variável, sem tirar quaisquer conclusões. A estatística inferencial consiste no processo de se obter informações sobre uma população a partir de resultados observados na amostra. Desta forma, com a utilização de técnicas inferenciais é possível, a partir da observação de uma parte, chegar a uma conclusão para o todo. Já a probabilidade trata-se de modelos matemáticos que explicam os fenômenos estudados pela estatística em condições normais de experimentação. A Figura 11 apresenta um fluxograma das etapas envolvidas na análise estatística.

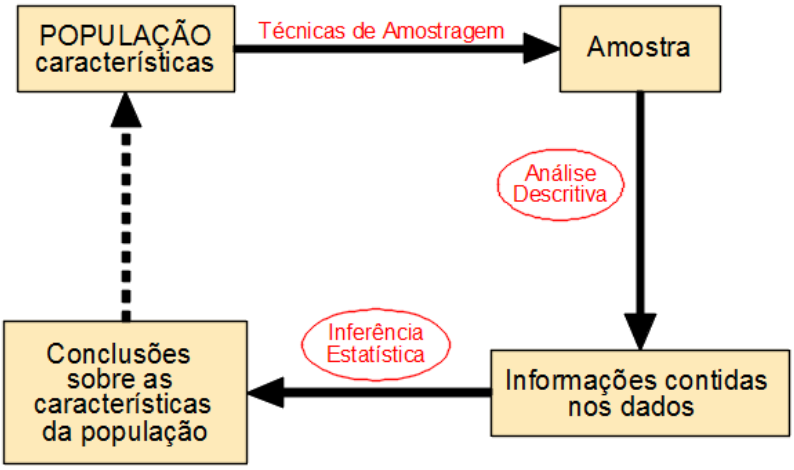

Figura 11: Etapas da análise estatística.
Fonte: Elaborada pelo autor

Conforme Giovanni & Bonjorno (1992, p. 300), "a estatística se inicia com a observação de comportamentos de grupos geralmente numerosos, que são chamados de população ou universo estatístico". A população é considerada a totalidade de observações individuais dentro de uma área de amostragem delimitada no espaço e no tempo, sobre as quais serão feitas inferências. Como em geral as populações são muito grandes, se faz necessário o uso de amostras para representá-las. Uma amostra estatística consiste em um subconjunto representativo de indivíduos retirados de uma população, a fim de que seu estudo estatístico possa fornecer informações importantes sobre aquela população. A amostra é sempre finita e quanto maior for a amostra, mais significativo é o estudo.

2.1.1 VARIÁVEL

De acordo com Smole & Diniz (2010, p.142), "a variável refere-se ao aspecto comum ao grupo que será investigado em uma pesquisa". Variável é a característica de interesse associada a uma população que pode ser observada ou medida em cada elemento pesquisado, ou seja, é uma função matemática definida na população. Como o nome diz, seus valores variam de elemento para elemento. As variáveis podem ser classificadas em variáveis quantitativas e variáveis qualitativas. Conhecer a classificação da variável estudada é uma das premissas básicas para a escolha do melhor teste estatístico a ser utilizado na análise dos dados.

Segundo Reis & Reis (2001), variáveis quantitativas são as características que podem ser medidas em uma escala quantitativa, apresentando valores numéricos. Podem ser

contínuas ou discretas. Variáveis quantitativas discretas são características mensuráveis relacionadas a situações limitadas, ou seja, resultados de contagens. Para as variáveis quantitativas discretas somente fazem sentido números inteiros. Variáveis quantitativas contínuas são aquelas avaliadas em números que são resultados de medições, onde valores fracionais fazem sentido. Usualmente devem ser medidas através de algum instrumento. As variáveis qualitativas (ou categóricas) são as características que não possuem valores quantitativos, mas, ao contrário, são definidas por categorias. Estas variáveis representam uma classificação dos indivíduos e podem ser nominais ou ordinais. A Figura 12 apresenta um fluxograma de classificação das variáveis baseado nos conceitos expostos acima.

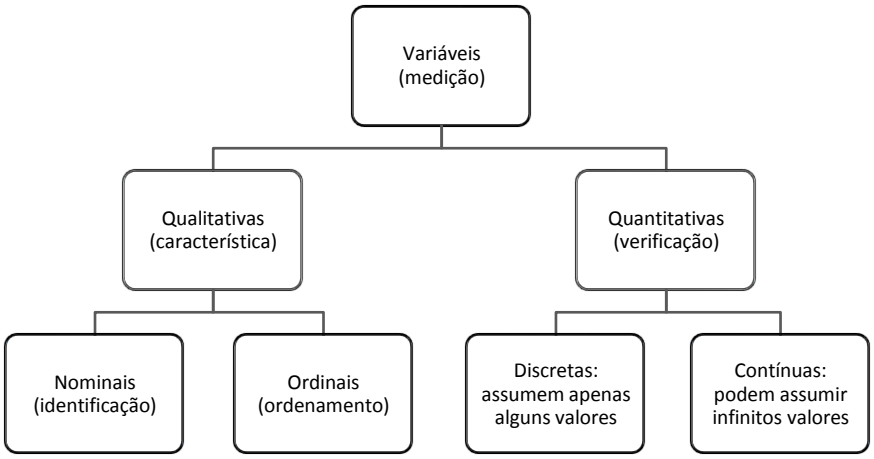

Figura 12: Fluxograma de classificação das variáveis.
Fonte: Elaborada pelo autor

De acordo com Costa & Souza (2011), uma variável aleatória é uma função mensurável que associa um número real a cada resultado individual. Seu resultado está diretamente associado ao resultado de uma experiência aleatória. Uma variável aleatória pode ser classificada em discreta ou contínua de acordo com seu espaço amostral. Uma variável discreta pode assumir diferentes valores, enquanto que a contínua encontra-se em intervalos determinados.

2.1.2 ESTATÍSTICA UNIVARIADA

A estatística univariada, indicada em situações nas quais as variáveis são independentes entre si, é uma técnica de análise que trabalha com uma variável isolada procurando fazer inferências sobre a realidade. Esta técnica inclui todos os métodos de estatística descritiva que permitem a análise de cada variável separadamente e, também,

métodos de estatística inferencial para determinada variável, podendo esta ser medida para uma ou mais amostras independentes. A análise de variância simples é um exemplo típico de um método de estatística univariada.

2.1.2.1 FREQUÊNCIAS

Conforme Giovanni & Bonjorno (1992), a frequência absoluta de um valor é o número de vezes que cada valor se repete. Frequência relativa é definida pelo quociente entre a frequência absoluta e o número de elementos da população e pode também ser dada na forma de porcentagem (%). A frequência acumulada é o total acumulado (soma) das frequências de cada classe.

2.1.2.2 DISTRIBUIÇÃO DE FREQUENCIAS

A distribuição de frequências de uma variável é descrita como um método utilizado para agrupar classes de modo a fornecer a quantidade de dados em cada classe. O objetivo é apresentar os dados, no inicio de uma análise estatística, de maneira resumida, permitindo extrair informação sobre seu comportamento de acordo com o perfil da distribuição de frequências.

Dependendo da quantidade de dados observados ou do tipo de variável, recomenda-se que os valores sejam agrupados em intervalos de classe. Isto é justificado visto que a grande quantidade de informações diferenciadas inviabiliza a construção de uma tabela contendo uma linha para cada valor. Desta forma, as frequências associam-se ao intervalo como um todo e não apenas a valores individuais (Costa & Souza, 2011).

“Uma das representações mais comuns e utilizadas de conjuntos de dados é a tabela de frequências e seu gráfico correspondente, o histograma. Uma tabela de frequências registra a frequência com que valores observados estão em certos intervalos, chamados classes”. (Issak & Srivastava, 1989, p. 10).

O histograma é o gráfico representativo da tabela de frequências. De acordo com Smole & Diniz (2010), elabora-se um histograma com a utilização de retângulos lado a lado. As áreas dos retângulos estão associadas às frequências de cada classe. No eixo vertical alturas dos retângulos são proporcionais às frequências e no eixo horizontal as larguras das bases estão relacionadas às amplitudes dos intervalos de classe.

Um histograma pode ser construído com o intuito de contemplar uma distribuição total ou parcial dos dados que se deseja detalhar. Em histogramas é possível visualizar toda a distribuição sem perda de detalhes quando são utilizados intervalos de classes regulares (Costa & Souza, 2011). A Figura 13 apresenta um exemplo de histograma, onde no eixo y situam-se as frequências e no eixo x as características/dados analisadas.

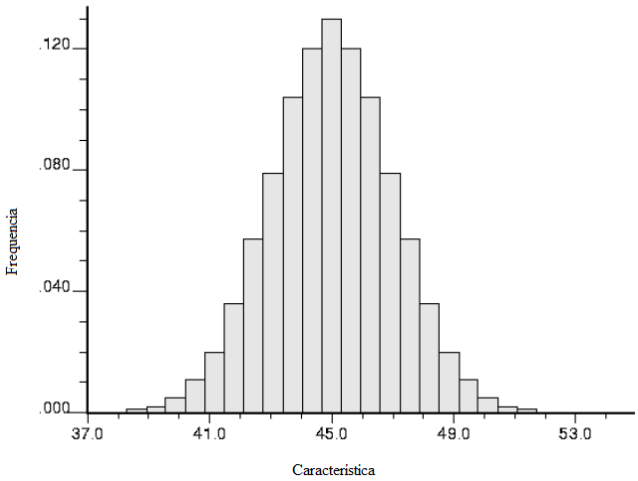

Figura 13: Exemplo de histograma para análise de dados.
Fonte: Elaborada pelo autor

2.1.2.3 MEDIDAS DESCRITIVAS

Após a sintetização dos dados sob a forma de tabelas, gráficos e distribuições de frequências é necessário o estudo dos valores que são característicos do fenômeno, ou seja, os valores que nos dão a melhor ideia de como a variável se distribui.

2.1.2.3.1 MEDIDAS DE TENDÊNCIA CENTRAL

De acordo com Smole & Diniz (2010), as medidas de tendência central são valores em torno dos quais os dados observados tendem a se agrupar. Por meio da utilização de medidas de tendência central é possível caracterizar o fenômeno pesquisado e compará-lo em diferentes populações. As medidas de tendência central são: moda, média aritmética e mediana.

- *Média Aritmética*: é, de forma geral, a mais importante de todas as medidas. A média artimética (x_m) dos valores x_1, x_2, ..., x_n trata-se do quociente entre a soma desses valores e o seu número total n. A equação (1) que rege a média aritmética é dada por:

$$x_m = \frac{x_1+x_2+\cdots+x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \qquad (1)$$

- *Mediana*: é o valor da variável que ocupa a posição central de um conjunto de dados ordenados quando dividido ao meio. Conforme Costa & Souza (2011), a mediana pode ser afetada por variações nos valores centrais da variável, o que indica uma desvantagem desta, ou seja, a mediana, mostra-se pouco sensível a valores extremos.

- *Moda*: como diz o próprio nome, moda é o valor (ou atributo) que ocorre com maior frequência. A função do cálculo da moda de um conjunto de dados é de obter uma forte tendência no conjunto de dados. Um conjunto de dados pode não ter moda (Correa, 2003).

A Figura 14 apresenta as relações das medidas de tendência central. Para distribuições simétricas, os valores de média, mediana e moda são iguais, para distribuições com assimetria positiva (para a direita) a moda possui o menor valor enquanto que a média possui o maior e para distribuições com assimetria negativa (para a esquerda) quem possui o menor valor é a média e o maior a moda (Costa & Souza, 2011).

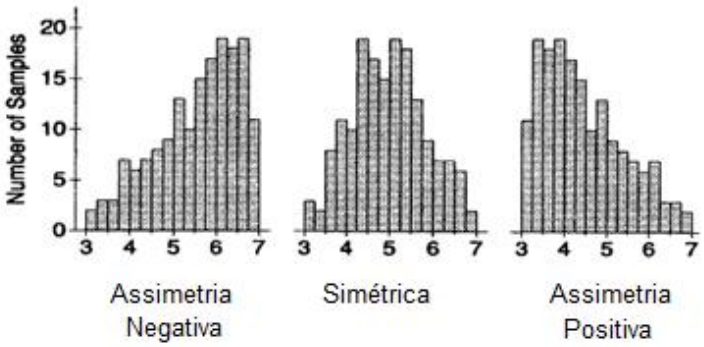

Figura 14: Relações presentes nas medidas de tendência central.
Fonte: Costa & Souza, 2011

2.1.2.4 MEDIDAS DE LOCALIZAÇÃO

Como medidas de localização serão descritos os quartis. Os quartis dividem a distribuição em quatro partes iguais. Os quartis são classificados entre 0 e 3, sendo: quartil 0 o mínimo, igual a 0%, quartil 1 igual a 25%, quartil 2 igual a 75% e quartil 3 o máximo, igual a 100%. O âmbito inter-quartil, que abrange as observações centrais, corresponde a 50% das observações totais e, desta forma, não incluem 25% das observações menores nem 25% das maiores.

2.1.2.5 MEDIDAS DE ESPALHAMENTO (DISPERSÃO)

De acordo com Correa (2003, p.59) "as medidas de dispersão servem para verificar a representatividade das medidas de posição". São medidas que indicam a semelhança dos dados, descrevendo, assim, o quanto estes distam do valor central, avaliando o grau de representação da média. Dentre as medidas de dispersão serão abordadas a variância e o desvio padrão.

- *Variância* (σ^2): relaciona os desvios em torno da média. Mais especificamente, é a diferença quadrática média entre os valores observados e sua média. É muito sensível a valores extremos e é medida na mesma unidade das amostras, porém ao quadrado (Costa & Souza, 2011). A variância está descrita na equação (2):

$$\sigma^2 = \frac{(x_1-x)^2+(x_2-x)^2+\cdots+(x_n-x)^2}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-x_m)^2}{n} \quad (2)$$

  Onde: (x_i-x_m) é igual à diferença entre cada valor x e a média da população.

- *Desvio padrão* (σ): é a mais importante das medidas de espalhamento. O desvio padrão determina a dispersão dos valores em relação à média e é calculado por meio da raiz quadrada da variância, conforme apresentado na equação (3). É mais frequentemente usado pois tem unidade igual à das amostras. O desvio padrão está descrito na equação (3):

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad (3)$$

  Onde: σ^2 é a variância.

2.1.2.6 MEDIDAS DE FORMA

As medidas de forma não deixam de, também, ser consideradas medidas de dispersão, porém relativas, ou seja, tratam-se de uma relação entre a dispersão absoluta e a média. Dentre as medidas de forma será abordado o coeficiente de variação nesta pesquisa.

- *Coeficiente de variação* (CV): fornece a variação dos dados obtidos em relação à média, ou seja, trata-se da relação entre o desvio padrão (σ) e a média x_m, conforme apresentado na equação (4). É geralmente expresso em percentagem e independe das unidades adotadas, permitindo, assim, comparar séries de valores que apresentam unidades de medida distintas. Quanto menor for o seu valor, mais homogêneos serão os dados. O coeficiente de variação é considerado baixo (apontando um conjunto de dados bem homogêneos) quando for menor ou igual a 25%.

$$CV = \frac{\sigma}{x_m} x\ 100\% \qquad (4)$$

Onde: σ é o desvio padrão e x_m a média aritmética.

2.2 ACURACIDADE E PRECISÃO DE UMA AMOSTRA

De acordo com Mônico *et. al.* (2009), toda e qualquer medida sempre está sujeita aos mais variados erros, que podem ser comuns, sistemáticos ou aleatórios e que, mesmo considerando diferenças entre a qualidade das grandezas, o valor verdadeiro é, normalmente, difícil de ser conhecido. Desta forma, a utilização do termo acurácia, dependendo da área de estudo, pode estar associada à qualidade de uma grandeza ou parâmetro estimado, assim como, com frequência semelhante, o termo precisão.

Desta forma, serão abordados os conceitos de precisão e acuracidade visto que estes, ao decorrer desta pesquisa, conceituarão grande parte da variabilidade dos dados, sendo considerados indicadores da qualidade dos levantamentos estatísticos realizados.

A acuracidade está relacionada à avaliação do erro de mensuração sendo, desta forma, uma propriedade exclusiva da média de um determinado erro. É incorreto incluir a noção de precisão na noção de acuracidade. A acuracidade pode ser, também, chamada de viés. Em outros termos, é a medida da diferença entre a média das estimativas e o estimador, ou seja, a maior ou menor aproximação do valor verdadeiro da variável que está sendo medida.

A precisão está relacionada ao grau de reprodutibilidade dos dados sendo, então, uma propriedade exclusiva da variância de um certo erro. Trata-se da medida da dispersão das estimativas em torno de um estimador verdadeiro e desconhecido, indicando quanto diferem entre si sucessivas medidas da mesma grandeza. Desta forma, o que está sendo buscado é um protocolo (desenho da amostragem) cujas medidas de interesse sejam tão consistentes quanto possível com outras amostras que sejam obtidas repetindo-se o mesmo protocolo.

De acordo com Silva (2010, p.12), é comum associar os conceitos de acuracidade e precisão com exemplos de tiros ao alvo. Na Figura 15 “as ilustrações indicam: (a) acuracidade sem precisão, (b) precisão sem acuracidade, (c) precisão e acuracidade e (d) ausência tanto de acuracidade quanto de precisão”. Estas indicações são uma forma de representação de diferentes relações entre precisão e acuracidade.

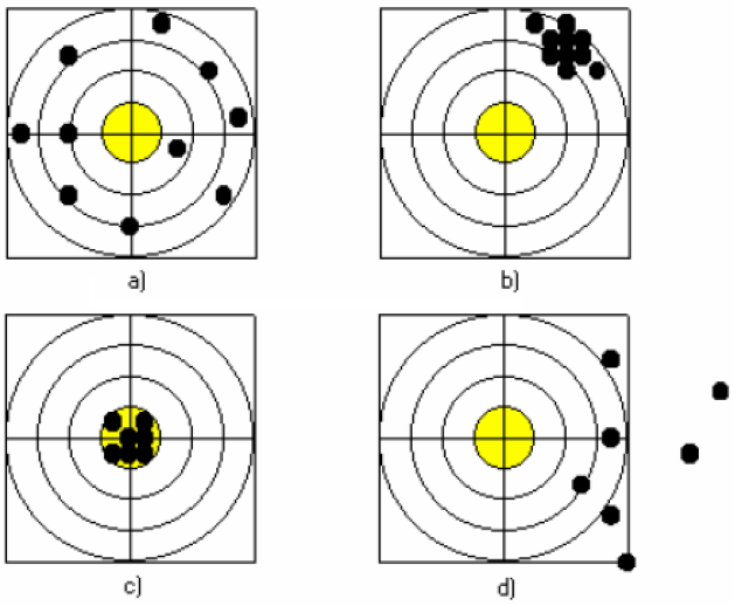

Figura 15: Relações entre precisão e acuracidade
Fonte: Silva, 2010

2.3 CONCEITOS DE AMOSTRAGEM

Na atualidade, a estatística com a utilização de técnicas de amostragem está inserida em muitos segmentos, influenciando a tomada de decisões. A amostragem é uma etapa de grande importância para o desenvolvimento de qualquer pesquisa, visto que determina informações sobre uma população em estudo. O processo de amostragem oferece menor custo, resultado em menor tempo, objetivos mais amplos e dados mais fidedignos. Em alguns casos é o único

processo praticável, especialmente quando falamos da mineração, onde as populações são muito grandes. Sendo assim, é possível relacionar a importância da amostragem à possibilidade de conhecimento de um fenômeno ao longo de espaço e/ou do tempo a partir de parte da população.

Na prática, o desenho da amostragem (desenvolvimento de um protocolo amostral) é fundamentalmente importante para controle dos erros cometidos. Isto ocorre, em especial, quando se amostra quantidades de massas muito pequenas com respeito ao "lote" que se deseja representar. Este lote pode significar um dia de produção da mina, um ano ou o depósito todo. Minnitt (2007) abordou este fato do ponto de vista de cada um dos erros que contribui para o erro total da amostragem e faz uma análise crítica das fórmulas propostas por Gy para determinação da representatividade da granulometria e dos teores. Pittard (1993) e Napier-Munn *et al*. (1996) exemplificam como estas fórmulas podem ser aplicadas para determinação das massas mínimas de amostras. Elas podem ser utilizadas na determinação de granulometria para atingir um erro máximo desejado em função do intervalo de confiança.

A metodologia exposta nesta bibliografia é bastante laboriosa, pois tem de coletar fragmentos grandes sobre correia parada e depois classificá-los. Esta serviu como ponto de partida para desenvolvimento da metodologia deste trabalho. Também, em Napier- Munn *et al.* (1996), encontra-se um exemplo prático para amostragens de fragmentos de tamanhos grandes (alimentação de britadores ou moinhos semiautógenos, por exemplo).

Na pesquisa desenvolvida, a importância da amostragem está ligada diretamente ao controle de processos, visto que a amostragem, neste caso, foi utilizada para fins de determinação de curvas granulométricas de alimentação de etapas de cominuição. De acordo com Silva (2010), um correto controle de qualidade na indústria mineral está embasado diretamente na amostragem, ou seja, tanto o protocolo quanto o procedimento de amostragem devem ser considerados acurado e preciso. Na Figura 16 tem-se uma representação de amostragem.

A amostragem é usualmente realizada em quatro etapas: (i) elaboração do plano de amostragem, que se fundamenta na determinação da qualidade necessária para a amostragem; (ii) obtenção da amostra, determinação da sequência e do número de coletas, que depende do tipo e da precisão; (iii) preparação da amostra, conjunto de operações visando à adequação da amostra, que envolvem a secagem, redução de tamanho, homogeneização e quarteamento, dentre outros processos e (iv) determinação de um parâmetro de qualidade, como, para o caso desta pesquisa, a obtenção da distribuição granulométrica do minério.

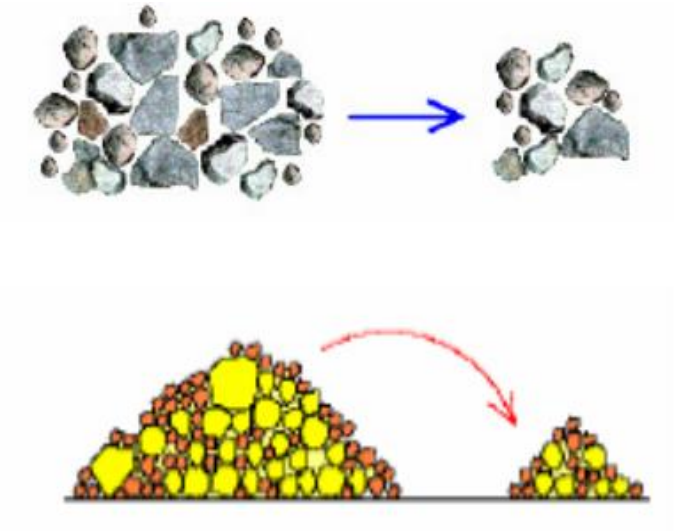

Figura 16: Representação da extração de uma amostra
Fonte: Silva, 2010

De acordo com Gy (1998), a amostragem pode ser considerada o elo mais fraco presente em uma estimativa de boa qualidade. Um dos objetivos da amostragem é a redução de massa de um lote L promovendo o mínimo de mudanças significativas neste lote. A base da Teoria de Gy está na divisão da amostragem em seus componentes menores para, então, descrever e solucionar individualmente os erros introduzidos em cada etapa.

A Teoria de Gy não é a única na literatura, porém é estruturada e aborda todos os aspectos da amostragem de sólidos particulados. Examina a variabilidade na amostragem e os desvios da média (viés ou *bias*), examina a mecânica para a obtenção de amostras; analisa variações de processo e sua relação com a amostragem, fornece um método para determinar o tamanho de uma amostra e introduz o princípio da amostragem correta. De acordo com a Teoria de Gy, a amostragem deve ser correta, o que significa que seja equiprovável. Isto tudo indica uma relação entre amostragem, heterogeneidade e homogeneização.

Segundo Chieregati (2007), um plano de amostragem pode ser considerado adequado quando conciliar custos de amostragem com a precisão em seus resultados, visto que custos e precisão são elementos diretamente proporcionais. Com relação aos erros de amostragem, estes estão associados à heterogeneidade do lote, considerada sua fonte principal, sendo a correta administração dos erros o objetivo da teoria, que analisa a possibilidade de eliminação dos os erros ou, ao menos, como reduzi-los.

2.3.1 REPRESENTATIVIDADE DE UMA AMOSTRA

De acordo com Góes *et. al.* (2004, p. 19), “o processo de amostragem consiste na retirada de quantidades moduladas de material (incrementos) de um todo que se deseja amostrar, para a composição da amostra primária ou global, de tal forma que esta seja representativa do todo amostrado”. Desta forma, é possível entender que o conceito de representatividade está diretamente ligado à necessidade de representação com efetividade e qualidade de um segmento ou grupo.

Para que uma amostra seja considerada correta, esta precisa, necessariamente, ser representativa. Uma amostra é representativa se as unidades que a constituem foram escolhidas por um processo tal que todos os membros da população tenham a mesma probabilidade de fazer parte da amostra. Desta forma, aplicando este conceito no desenvolvimento desta pesquisa, numa amostragem correta, todas as partes do minério que se deseja conhecer devem ter iguais oportunidades de seleção e incorporação na amostra parcial ou global da análise, ou seja, a amostragem deve ser equiprovável e, ainda, não degenerada, o que implica em não perder características da amostra retirada.

2.3.2 TIPOS DE AMOSTRAGEM

A maneira pela qual os incrementos são selecionados para a composição da amostra primária depende principalmente do tipo de material, de como ele é transportado e, também, do objetivo da amostragem. É necessário que o método de amostragem seja definido antes de se estabelecer a massa necessária para a amostra primária. Os tipos de amostragem estão classificados em: aleatória simples, estratificada e sistemática.

Segundo Góes *et. al.*, (2004, p. 23), quando se dispõe de pouca informação sobre o material a ser amostrado é necessário realizar uma amostragem aleatória. Em uma amostragem aleatória os incrementos são escolhidos de maneira que não segue nenhum padrão previamente especificado, fazendo com que todas as partes do material possuam a mesma probabilidade de participar da seleção.

Conforme Ferrari (2004), a amostragem sistemática ocorre, como diz a própria palavra, de forma sistêmica. Nesta amostragem os elementos da população já apresentam-se ordenados, dispensando, desta forma, um protocolo previamente determinado. Já a amostragem estratificada divide a população em subconjuntos e, a a partir destes, obtém uma amostragem proporcional. De acordo com Góes *et. al.* (2004), a amostragem estratificada

pode ser considerada uma extensão da amostragem sistemática, já que envolve uma divisão de acordo com determinadas características de interesse que serão amostradas.

2.3.3 ERROS DE AMOSTRAGEM

De acordo com Gy (1968), qualquer amostragem, até mesmo a mais simples, comporta uma série de erros. Alguns podem estar relacionados com a estrutura do minério, distribuição e textura e outros, outros são decorrentes das técnicas de amostragem e suas aplicações. Os conceitos dos erros da amostragem descritos abaixo estão baseados em Chieregati (2007) e El Hajj (2013).

A validação dos processos de amostragem e protocolos somente pode ser feito por meio de dados e técnicas matemáticas específicas. Segundo Gy (1998), todos os erros de amostragem provém da heterogeneidade do material, ou seja, a heterogeneidade é vista como única fonte de erros. Os erros de amostragem podem ser classificados em dois grupos: erros associados à heterogeneidade do material (Figura 17) e erros sistemáticos (Figura 18). A Figura 19 apresenta um fluxograma dos erros de amostragem quando relacionados à variabilidade em pequena escala.

São componentes dos erros associados à heterogeneidade: o erro fundamental de amostragem, o erro de flutuação de heterogeneidade (erro de integração) e o erro de segregação e grupamento. Quanto aos erros sistemáticos, estes incluem: o erro de delimitação, erro de extração do incremento e o erro de preparação (El Hajj, 2013).

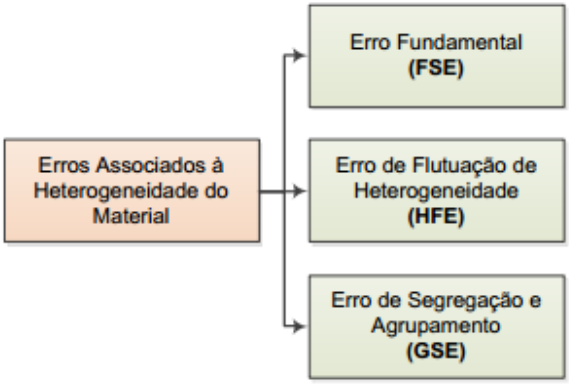

Figura 17: Erros associados à heterogeneidade do material
Fonte: El Hajj, 2013

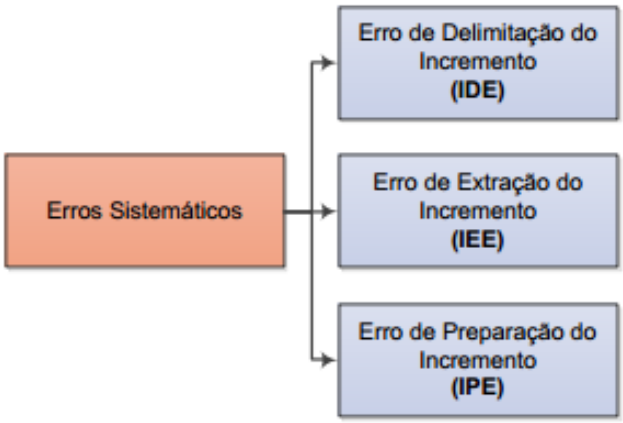

Figura 18: Erros sistemáticos
Fonte: El Hajj, 2013

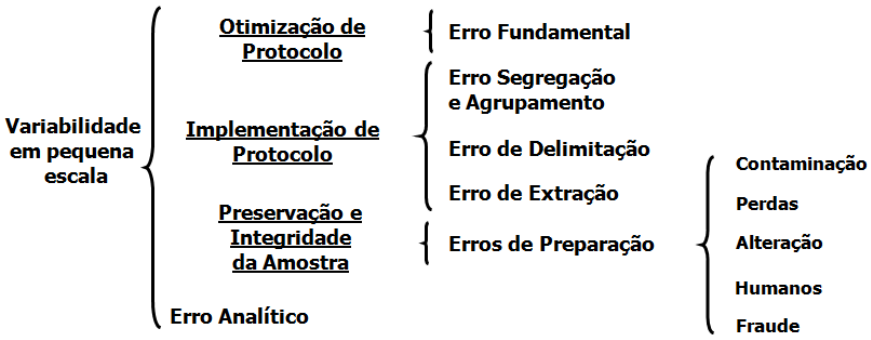

Figura 19: Erros de amostragem relacionados à variabilidade em pequena escala.
Fonte: Notas de Aula, Teoria da Amostragem de Gy.

2.3.3.1 ERROS ASSOCIADOS À HETEROGENEIDADE

2.3.3.2 ERRO FUNDAMENTAL DE AMOSTRAGEM

De acordo com El Hajj (2013), o erro fundamental da amostragem está relacionado à correta seleção dos incrementos quando escolhidos aleatoriamente. Este erro depende essencialmente da massa da amostra e, em menor magnitude, do material amostrado. Trata-se do menor erro existente quando uma amostra é coletada em condições ideais.

2.3.3.2.1 ERRO DE FLUTUAÇÃO DE HETEROGENEIDADE

É o erro resultante da heterogeneidade de distribuição de partículas, a longo prazo, no material. Este erro pode ser influenciado tanto pela heterogeneidade relacionadas ao tempo, como uma segregação de material, por exemplo, quanto pela introduzida por fenômenos

cíclicos. Com relação à heterogeneidade relacionada ao tempo, esta permite definir dois novos erros associados: o erro de variação de heterogeneidade de longo prazo e o erro de variação periódica de heterogeneidade. Já com relação à heterogeneidade cíclica, esta introduz o erro de variação de heterogeneidade a curto prazo. Desta forma, o erro de flutuação de heterogeneidade, também conhecido como erro de integração, é composto pela soma dos novos erros introduzidos pela heterogeneidade (Chieregati, 2007).

2.3.3.2.2 ERRO DE SEGREGAÇÃO E GRUPAMENTO

Trata-se do erro decorrente da heterogeneidade de distribuição. As variações de heterogeneidade distribucional permite com que os fragmentos se rearranjem, causando uma segregação. Este erro não possui expressão matemática e o valor máximo que pode atingir é igual ao valor.

Segundo Chieregati (2007), as diferenças que constituem composição, forma, densidade, dentre outros fatores, são aquelas que indicam maior incidência de diferença de segregação sendo que este tipo de heterogeneidade tem associado à si erros decorrentes do fator segregação (rearranjos) e do o fator grupamento (seletividade aleatória). Em termos estatísticos, ao coletar um incremento para formar uma amostra, estamos compondo uma amostra por grupos aleatórios de fragmentos. Isto permite dizer que quanto maior for o grupo, maior o erro que está sendo adicionado.

A segregação é decorrente da força da gravidade e ocorre em qualquer ambiente. O único método que dispomos para reduzir o fator de segregação é a homogeneização. Em decorrência disto podemos afirmar que a segregação é muito difícil de ser minimizada.

2.3.3.3 ERROS SISTEMÁTICOS

2.3.3.3.1 ERROS DE MATERIALIZAÇÃO

Os erros de materialização são compostos pela soma dos erros de delimitação com os erros de extração. Este tipo de erro pode ser encontrado em processos de amostragens envolvendo a mina, a planta de beneficiamento e, também, o laboratório de preparação. Afetam a precisão e a acuracidade. O erro de delimitação é resultante da eventual configuração incorreta da delimitação da dimensão dos fragmentos. Já o erro de extração está

relacionado com a tomada de decisões na amostragem e, consequentemente, com a retirada das amostras.

A única estratégia eficiente para a solução do problema de erros de materialização é a eliminação prévia destes dois erros (delimitação e extração). Isto pode se dar com o dimensionamento, fabricação, manutenção e utilização de amostradores que garantam a delimitação e extração dos incrementos de forma correta.

2.3.3.3.2 ERROS DE PREPARAÇÃO

São descritos pelas operações que os incrementos individuais ou a amostra estão sujeitos após sua extração do lote e antes da análise. O erro de preparação está relacionado às operações de redução de granulometria, homogeneização e quarteamento a que a amostra primária for submetida. Respeitando a integridade dos incrementos e da amostra, o erro de preparação pode ser mínimo.

2.3.3.4 ERRO TOTAL DE AMOSTRAGEM

De acordo com a Teoria de Gy, o erro total de amostragem é o somatório do erro de amostragem propriamente dita com o erro da amostra primária, para obtenção da amostra final. Como erro de amostragem propriamente dita entende-se o somatório dos erros de heterogeneidade e dos erros de materialização, enquanto que o erro da amostra primária é o erro de preparação (Yamamoto, 2011).

2.3.4 O CONCEITO DE HETEROGENEIDADE

Levando em consideração os conceitos da teoria de amostragem estudados, é possível dizer que não existe homogeneidade nesta teoria, sendo a heterogeneidade a única realidade disponível. A heterogeneidade pode ser definida como a ausência de homogeneidade e pode ser caracterizada como uma propriedade estrutural primária de qualquer material, não podendo ser ignorada. É prejudicial a qualquer processo, visto que estes são regulados de modo que o resultado otimizado seja função de uma entrada de composição pré-estabelecida. Existem dois tipos de heterogeneidade: a heterogeneidade de constituição e a heterogeneidade de distribuição.

A heterogeneidade de constituição está relacionada às diferenças entre unidades individuais que compõem o lote em estudo e pode ser definida como a heterogeneidade intrínseca do lote. Dizemos que um lote de material tem uma constituição homogênea quando todas as suas unidades são estritamente idênticas. Mistura e homogeneização não têm efeito sobre este tipo de heterogeneidade.

A heterogeneidade de distribuição está diretamente relacionada aos grupos individuais de fragmentos de um lote. Quando se considera um lote como uma série de grupos, é possível afirmar que, quando todos os grupos que compõem este lote possuem a mesma composição média, o lote possui distribuição homogênea. Caso contrário o lote será considerado heterogêneo (Chieregati, 2007, El Hajj, 2013).

2.3.5 O CONCEITO QA/QC

A amostragem adequada e os procedimentos de Garantia de Qualidade/Controle de Qualidade (QA/QC) são essenciais nos processos de avaliação de depósitos minerais. O conceito QA (*quality assurance*) está relacionado a um sistema de garantia de qualidade enquanto que o conceito QC (*quality control*) se relaciona com os procedimentos de controle de qualidade. O que este sistema busca é uma garantia de que seja obtido um número suficiente de medições a fim de garantir o controle e monitoramento da confiabilidade dos dados. Estão diretamente ligados à acuracidade e precisão.

2.4 GRANULOMETRIA

A granulometria pode ser definida como a distribuição da diversidade dos tamanhos dos grãos. Ela é expressa em porcentagem, ou seja, relaciona a distribuição de tamanho com suas respectivas porcentagens de ocorrência. Desta forma, conhecer a granulometria de um determinado material significa representá-lo com a utilização de uma curva. A determinação da curva granulométrica permite conhecer as características físicas do material desejado. Um dos métodos para determinação de uma curva granulométrica é o peneiramento.

2.5 COMINUIÇÃO

Uma partícula, no caso da mineração, pode ser considerada como um fragmento de rocha formado por minerais. Quando uma partícula é exposta a esforços mecânicos de maior

valor que sua resistência à ruptura, ocorre sua fragmentação (Neves, 2005). Dentre os esforços mecânicos aplicados, estão os normais (compressão ou tração) e os tangenciais (cisalhamento). Na mineração, após o desmonte de rochas, primeira fragmentação mecânica do processo, a redução de tamanho é seguida pelas atividades de cominuição.

Segundo Chaves & Peres (2003), "cominuição é o conjunto de operações de redução de tamanhos de partículas minerais, executado de maneira controlada e de modo a cumprir um objetivo pré-determinado". As atividades de cominuição, também conhecidas como britagem e moagem, são importantes sob diversos fatores, dentre os quais para: o manuseio do material, permitir o transporte contínuo e o tratamento do minério. A escolha entre a operação de britagem e moagem está diretamente ligada ao tamanho das frações. A britagem é a operação de cominuição utilizada para as partículas mais grosseiras, enquanto que a moagem se restringe às frações mais finas. Os conceitos acima expostos mostram a necessidade de conhecimento e controle de granulometria impostas ao processo.

2.5.1 BRITAGEM

"Em um processo de britagem, a distribuição de tamanhos, para um dado material e para uma dada história anterior da amostra em consideração, pode ser considerada como função apenas do mecanismo de quebramento" (Chaves & Peres, 2002, p. 187). A britagem, devido ao fato de estar relacionada às forças para originar a fragmentação do minério, necessita de blocos com maior área superficial para que o processo ocorra, ficando, assim, restrita às partículas de maiores tamanhos. Diversas variáveis podem afetar a eficiência e a produtividade dos britadores. Como exemplos de problemas operacionais podem ser citados: a presença de finos, durante a segregação do minério, quando acondicionados em pilhas e silos, o empolamento do material durante sua fragmentação e a presença de blocos maiores que o tamanho máximo suportado pelo britador, que acarreta em gargalos da produção, dentre outros.

De acordo com Neves (2005), as diferenças principais entre os equipamentos de britagem estão diretamente relacionados às diversas formas de aplicação das cargas e, também, ao tamanho das partículas. No caso de grossos, a energia necessária para a fragmentação de uma partícula é maior, o que faz com que a etapa exija equipamentos mais robustos e de grande porte. Já para os finos, o que é esperado é que os equipamentos sejam capazes de distribuir energia em um volume relativamente grande.

Os equipamentos de cominuição podem ser modelados. Segundo King (2001), a modelagem de equipamentos é uma representação matemática destes visando à melhoria de seus desempenhos. A amostragem granulométrica fornece as curvas de ajuste da modelagem. A partir disto são feitos simuladores que auxiliam no controle dos processos. De qualquer forma, todo equipamento necessita de uma equação matemática que o represente. Esta equação, em geral, é constituída de diversos parâmetros que tem de ser recalibrados em função das amostragens de granulometria em escala industrial.

2.5.1.1.1 BRITADORES GIRATÓRIOS E CÔNICOS

Britadores giratórios e cônicos são amplamente utilizados na indústria de mineração e agregados. Com as crescentes e recentes exigências relativas à utilização de material fragmentado, a previsão do desempenho de um britador, em termos de propriedades, tais como fluxo de massa, distribuição de tamanho do produto, consumo de energia como uma função das propriedades dos materiais, especificações da máquina e, ainda, condições de funcionamento destes equipamentos, está se tornando muito mais importante. Na Britagem de Conceição a etapa primária possui britadores giratórios e terciária cônicos.

2.5.1.1.2 PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DE BRITADORES CÔNICOS E GIRATÓRIOS

Nos britadores giratórios e cônicos as partículas são comprimidas e trituradas na câmara. O movimento dos britadores cônicos tem um componente relativamente vertical, enquanto que nos giratórios, o movimento da cabeça giratória é predominantemente horizontal. Com relação à fragmentação, os britadores possuem regulagem para a adequação do tamanho do produto desejado de acordo com suas especificações técnicas. Estas “saídas” são chamadas de APA, abertura posição aberta e APF, abertura posição fechada. Elas determinam o tamanho final do produto.

O processo de britagem é complexo e o desempenho do equipamento pode ser afetado por vários parâmetros, dentre os quais são citados: a distribuição de tamanho de material que alimenta o equipamento; a caracterização da quebra do material; os parâmetros do equipamento e a geometria do equipamento, tais como a distância que rola em torno do cone, e os perfis de revestimento. Até o momento, a busca de um modelo ideal para prever a desempenho dos britadores tem sido intensa, porém este modelo ainda não foi encontrado.

2.6 ANÁLISE DE IMAGENS

A fotografia pode ser definida como a técnica de criar imagens por exposição luminosa em uma superfície fotossensível gerando uma reprodução exata de um determinado elemento desejado. Com o passar do tempo a essência da forma de fazer fotografia não mudou, no entanto, os avanços tecnológicos vêm permitindo, cada vez mais, melhorar a qualidade da fotografia, aumentando sua resolução e definição, além da realidade das cores.

Uma imagem digital é uma imagem bidimensional, que emprega um código binário de modo a permitir o seu processamento, transferência, impressão ou reprodução. Uma imagem digital é composta de um número finito de elementos tendo cada elemento um valor e uma localização particular. Cada elemento da imagem é chamado de pixel.

A imagem fotográfica é obtida do mundo real através de câmeras ou sensores que captam luz. A fotografia contribui positivamente tanto no âmbito pessoal quanto profissional agregando uma série de possibilidades de produção de estudos detalhados e precisos. Com o advento da fotografia digital, foram criados aparelhos cada vez menores, mais simples de manipular e que produzem fotografias em alta qualidade, proporcionando um avanço rápido no âmbito da extração de imagens.

Os avanços na aquisição de imagem e tecnologia de armazenamento levaram a um enorme crescimento em bases de dados significativamente grandes e detalhados de imagem. As imagens, quando analisadas, podem revelar informações úteis para os usuários humanos. As técnicas de análise de imagens tem aumentado consideravelmente seu campo de aplicação com novos equipamentos e softwares. Nas ciências exatas, o termo "imagem" também pode ser entendido como a representação de um objeto com o uso de técnicas e ferramentas especiais. Desta forma, com a utilização de fotografias, torna-se possível obter medições dignas de confiança.

Atualmente, no âmbito da mineração, técnicas de análises de imagens podem ser de suma importância, permitindo um conhecimento prévio de determinada situação, podendo ser aplicada tanto na fase de extração quanto de beneficiamento. Um exemplo de utilização de análise de imagens de suma importância para a mineração está presente escopo desta pesquisa, onde, com a utilização de análises de imagens, objetiva-se determinar a granulometria de alimentação de etapas de britagem.

Além disso, o vasto conhecimento científico e tecnológico no que se refere à análise de imagens assegura o sucesso do uso destas junto à comunidade científica e acadêmica,

beneficiando a sociedade como um todo por meio do fornecimento de informações científicas, precisas e confiáveis.

Capítulo 3

3 METODOLOGIA

Este capítulo aborda as metodologias desenvolvidas nesta pesquisa. Para o desenvolvimento de ambas as metodologias apresentadas foi fundamental a utilização de técnicas de análise de imagens, a qual consistiu em filmar e/ou fotografar a pilha de material desmontado na lavra e as correias com o material britado na planta. Tanto a técnica de análise de imagens quanto os protocolos de amostragem desenvolvidos neste trabalho são específicos para esta pesquisa. A técnica de análises de imagens foi utilizada pelo fato de que seria muito difícil coletar grandes quantidades de amostras em alimentações de britagem e, também, por envolver blocos de tamanhos que inviabilizariam a técnica convencional de análise de distribuição granulométrica (peneiramento). Portanto, a metodologia foi desenvolvida para determinar as curvas de alimentação das etapas de britagem primária e terciária da britagem. Isto permite, futuramente, controlar a qualidade de desempenho dos britadores.

3.1 METODOLOGIA DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA PARA O ROM

A metodologia para análise granulométrica de ROM alimentado na etapa de britagem primária está baseada na coleta de material desmontado a partir de uma frente de lavra de itabirito friável (IF). O material foi carregado em um caminhão cuja balança mostrou uma massa de cerca de 259 toneladas. Este material foi basculado em um local seguro e sinalizado conforme normas de segurança da empresa mineradora, longe das frentes de operação.

No local basculado o material pôde permanecer estocado pelo período necessário para a realização dos trabalhos, sem interferências negativas na produção e fatores de segurança. Em média, os trabalhos puderam ser realizados em três dias. Neste local, em síntese, foi feita a homogeneização do material, seguida de divisão em pilhas, enquanto eram segregados blocos maiores (acima de 50cm) para mensuração por meio de análise de imagens. No final da divisão da pilha de 259 toneladas foram retiradas amostras (menores que 2,5cm) para análises via peneiramento.

Para a realização do trabalho a equipe mínima constou de três a quatro pessoas, onde duas executavam o trabalho em campo, enquanto uma permanecia monitorando o entorno (atentando aos sinais visuais e sonoros de perigo) e a outra operando a retroescavadeira.

A Figura 20 mostra o material basculado de ROM de IF, no local acima mencionado

que marca o início do processo de amostragem. Após o basculamento do material, os blocos maiores (denominados BM1) foram segregados com escavadeira. Isto foi feito revirando a pilha pelas beiradas, sendo aos poucos achatada. Os blocos grandes encontrados eram transportados para uma fileira longe da pilha basculada. Posteriormente, os blocos em fila, foram fotografados: uma foto de cada lateral do bloco e uma foto da parte superior, de topo. Cada foto continha um objeto de referência (dispositivo de escalonamento), neste caso uma trena e/ou uma bola alaranjada de 20cm de diâmetro.

Figura 20: Basculamento do ROM de IF.
Fonte: Fotografia tirada na Vale S.A.

Na Figura 21, aparece a fileira dos blocos maiores (BM1) segregados com escavadeira a partir da pilha basculada. A escavadeira fez com que o material basculado fosse revolvido e aos poucos achatado para que se iniciasse sua divisão em pilhas. A Figura 22 mostra alguns dos blocos maiores sendo fotografados (para análise de imagens).

Figura 21: Segregação dos blocos maiores (BM1).
Fonte: Fotografia tirada na Vale S.A.

Figura 22: Obtenção de imagens dos BM1 segregados.
Fonte: Fotografia tirada na Vale S.A.

A mensuração dos blocos maiores foi realizada com a utilização do Fiji, *software* livre. Abaixo segue a metodologia passo a passo para mensuração dos blocos. No Fiji, inicialmente, uma imagem deve ser aberta, conforme Figura 23. Após, uma linha é desenhada no objeto de referência (Figura 24). Esta linha serve para que a escala seja criada. No caso desta imagem, a escala segue a dimensão do diâmetro da bola alaranjada igual a 20cm.

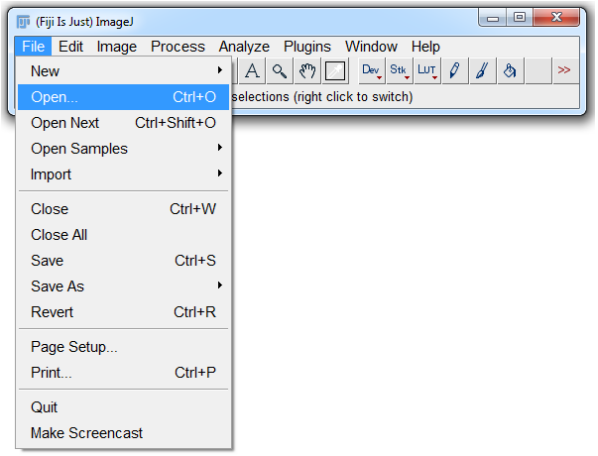

Figura 23: Abrindo uma imagem no Fiji.
Fonte: Elaborada pelo autor

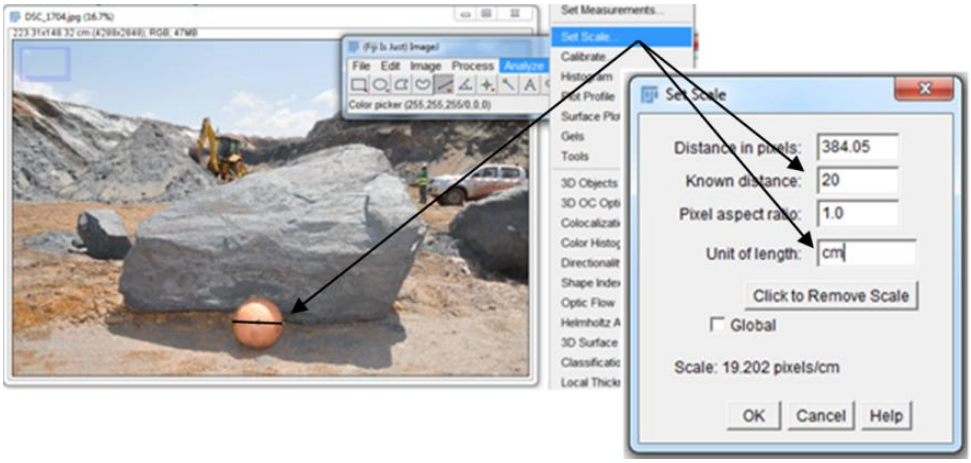

Figura 24: Escalonamento da imagem de acordo com a bola alaranjada.
Fonte: Elaborada pelo autor

Depois de escalonada a imagem, é realizada a mensuração do bloco. São desenhadas linhas para análise de tamanho. Com uso do comando "*analyze* > *measure*", uma tabela é gerada mostrando o comprimento destas linhas, dando as dimensões dos blocos. Este procedimento é mostrado na Figura 25.

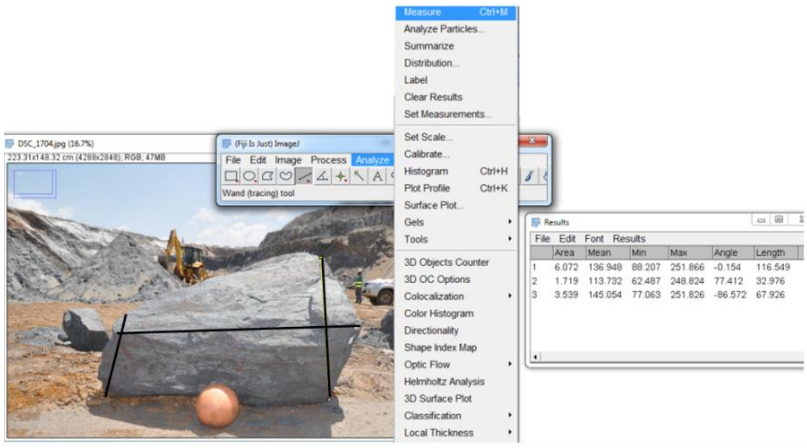

Figura 25: Mensuração de um bloco grande por Fiji.
Fonte: Elaborada pelo autor

A pilha restante, após ter sido realizada a segregação dos BM1, passou a ser denominada pilha original. Em seguida, esta pilha achatada foi demarcada para ser dividida em "quatro partes" (Figura 26). Cada um destes pedaços equivalem a aproximadamente 1/4 da massa da pilha original. A Figura 27 mostra o processo de formação destas quatro pilhas.

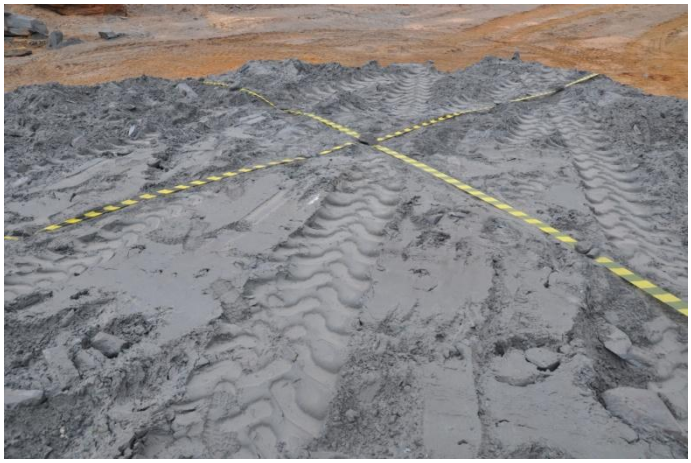

Figura 26: Demarcação da pilha original.
Fonte: Fotografia tirada na Vale S.A.

Figura 27: Formação das quatro primeiras pilhas.
Fonte: Elaborada pelo autor

Destas quatro pilhas, duas diagonalmente opostas foram homogeneizadas. Na Figura 28, pode ser observada a homogeneização seguida de achatamento destas duas pilhas. A partir deste momento, os trabalhos realizados passaram a ser desenvolvidos nelas. O fato de utilizar duas pilhas diagonalmente opostas minimiza os riscos de contaminação durante o processo de amostragem.

Figura 28: Homogeneização das duas pilhas diagonalmente opostas.
Fonte: Elaborada pelo autor

Depois de achatadas, estas duas pilhas foram divididas somente em duas partes. A divisão com respeito à pilha original ocorreu até que fosse obtida uma redução de massa de 1/32. No final, surgiram duas pilhas "gêmeas" que foram "esgotadas", visando à geração de duas curvas granulométricas a serem comparadas (verificação da reprodutibilidade). O termo "esgotar" significa, neste caso, que praticamente toda pilha final (1/32) foi amostrada.

Na Figura 29 está descrita a razão de redução de massa por meio de divisão em campo. Como pode ser observado, a primeira etapa de divisão da pilha original gerou quatro partes. As demais divisões foram feitas em duas partes, chegando a uma razão de redução máxima de 1/32 da pilha original.

$$1 \longrightarrow 1/4 \longrightarrow 1/8 \longrightarrow 1/16 \longrightarrow 1/32$$

Figura 29: Esquema de divisão (*split*) da pilha original.
Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 30, pode ser observado o fluxograma da amostragem de ROM em detalhe. Nesse está apresentada a pilha inicial, na qual os BM1 foram segregados dando origem à pilha original. A primeira divisão foi realizada em quatro fatias, formando as duas pilhas diagonalmente opostas. Após cada nova etapa de homogeneização, estas eram divididas até a razão 1/32 da pilha original. As duas pilhas geradas na razão 1/32 foram denominadas pilhas "gêmeas" que foram esgotadas. A partir destas duas pilhas gêmeas foram gerados resultados de granulometria em duplicatas para fins de verificação da reprodutibilidade do esquema de amostragem.

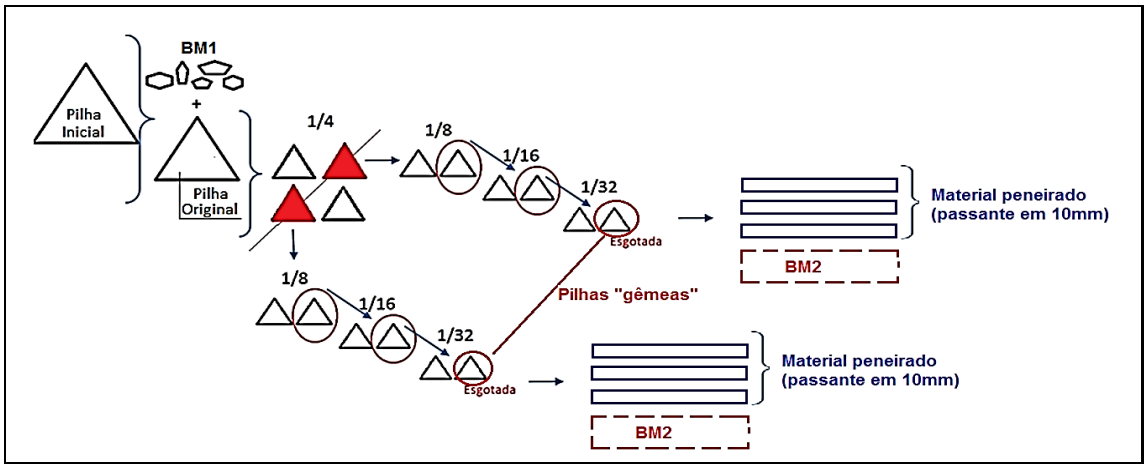

Figura 30: Fluxograma da amostragem de ROM.
Fonte: Elaborada pelo autor

De cada pilha equivalente a 1/32 da pilha original foram segregados todos os blocos maiores que restaram. Estes foram denominados BM2: blocos menores que 50cm e maiores que 2,5cm. Isto foi feito despejando o material desta pilha diretamente pela caçamba da escavadeira sobre uma peneira retangular de 25mm (peneira de alívio). Todos os BM2 foram fotografados e mensurados.

A Figura 31 mostra a sequência de formação das fileiras de material passante em 25mm e o inicio da segregação dos BM2. A Figura 32 mostra a formação final de três fileiras contendo material passante em 25 mm e de uma quarta contendo os blocos maiores que foram segregados (BM2).

Figura 31: Sequência de formação das fileiras de material passante em 25mm.
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 32: Esgotamento de uma pilha gêmea.
Fonte: Elaborada pelo autor

O material disposto, após passar pela peneira de alívio, foi novamente peneirado em 10mm em campo. Praticamente todo material foi passante em 10mm, resultando em uma massa de 60kg para uma das pilhas gêmeas e 65kg para a outra. Estas amostras foram acondicionadas em quatro sacos plásticos duplos (dois por pilha), identificados com: o código da pilha de origem, data da coleta e número da bancada. Cada saco continha aproximadamente 30kg, portanto, dois sacos corresponderam a um par de duplicatas a serem analisados em laboratório. Após homogeneização em divisor rotativo, cada uma das quatro amostras foi analisada via peneiramento para determinação de granulometria desde a faixa de 6,3mm até passante em 45µm.

O Fiji e o *Excel* foram utilizados para mensurar os BM2. Cada foto foi escalonada, porém o objeto de referência mudou, passou a ser uma barra com faixas em amarelo e preto de cerca de 20cm, conforme segue apresentado na Figura 33. Depois de escalonada a imagem, era desenhada uma *polyline* em volta de cada bloco para medir sua área (Figura 34). Conforme dito anteriormente, a mensuração se dá da mesma forma, com o comando "*analyze > measure*", que apresenta os resultados gerados em uma tabela. Esta tabela foi transferida ao excel. Por meio de filtros as áreas eram comparadas a malhas padrões de laboratório, simulando um peneiramento. Por exemplo, um bloco com área de 600cm², era classificado como passante em uma peneira quadrada de 40x40 (1.600cm²) e retido em uma peneira quadrada de 20x20cm (400cm²).

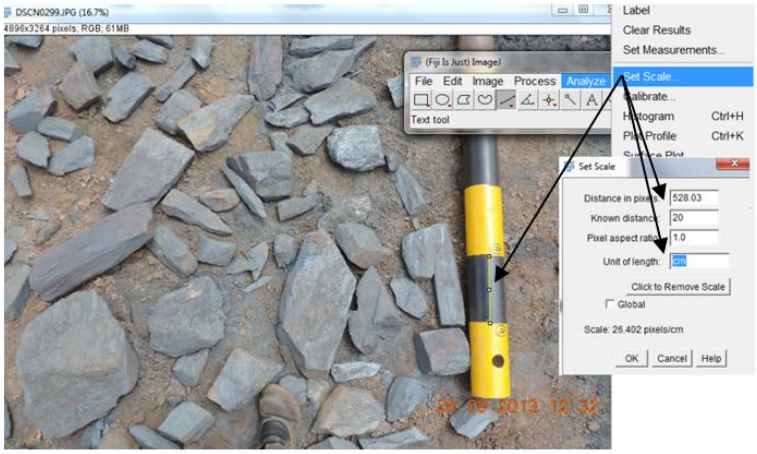

Figura 33: Escalonamento da imagem de acordo com a barra de referência.
Fonte: Elaborada pelo autor

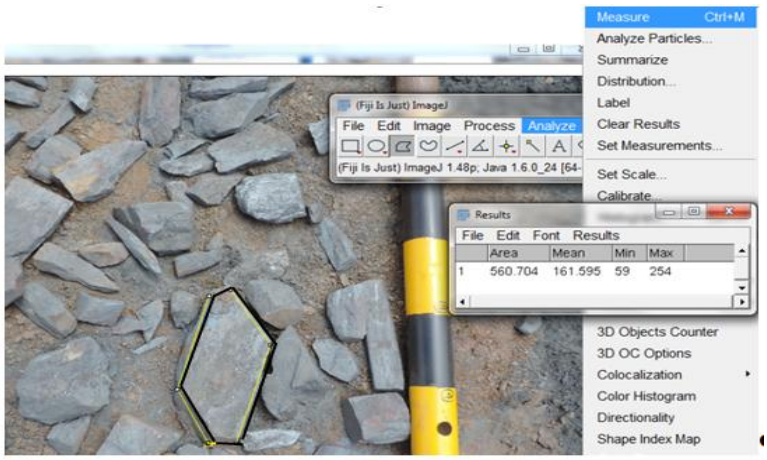

Figura 34: Definição da *polyline* do BM2 a ser mensurado e seu resultado.
Fonte: Elaborada pelo autor

3.2 METODOLOGIA PARA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO BLOCO III

A metodologia para análise granulométrica do material britado do Bloco III foi baseada na análise de imagens do material fragmentado com tamanho acima de 2,5cm localizados em correias transportadoras específicas. Foram realizados testes em dois dias diferentes: dia 21/01/2014 (Teste 1 - Granulado), que contemplou a passagem de itabiritos compactos e dia 04/02/2014 (Teste 2 - Fino), quando houve a passagem de itabiritos friáveis. Durante as filmagens as correias apresentavam-se em movimento.

Para dar início aos testes foi primeiramente definido o ponto de amostragem. A Figura 35 apresenta o fluxograma da usina de britagem com a indicação do ponto de amostragem dessa pesquisa, localizado na correia 3034. A correia 3025 recebe os produtos das britagens secundária e terciária e os encaminha ao peneiramento. O material +32mm (retido no

peneiramento) é direcionado para a correia 3034, denominada carga circulante. A carga circulante constitui a alimentação dos terciários, visto que possui, teoricamente, apenas material +32mm. Vale ressaltar que antes de alimentar a britagem terciária este material que passa pela correia 3034 é estocado em silos. Desta forma, é possível entender que a britagem terciária serve somente para britar a carga circulante do processo.

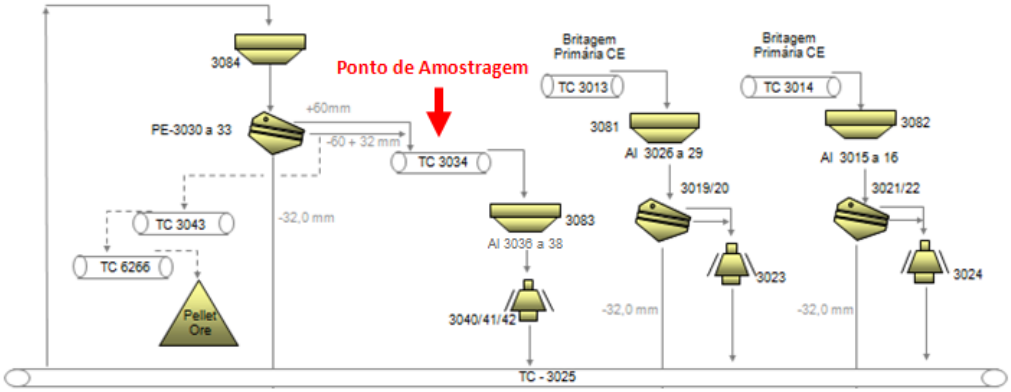

Figura 35: Fluxograma da usina e ponto de amostragem.
Fonte: Adaptada de Vale S.A. pelo autor

Após a realização dos vídeos, foram definidas as imagens que seriam extraídas das filmagens, sendo escolhidas aquelas que possuíam melhor nitidez para realização das mensurações. A mensuração dos fragmentos para esta amostragem foi realizada com a utilização do AutoCad, *software* de desenho, e do Excel. Vale salientar que a análise das imagens, também, poderia ter sido feita pelo Fiji, *software* livre, seguindo passos semelhantes aos já aplicados para análise do ROM.

Abaixo segue a metodologia descrita passo a passo. No *AutoCAD*, inicialmente, é necessário inserir a imagem na qual serão delimitadas as áreas dos blocos. Isto se dá com a utilização da rotina *Insert* > *Attach* (Figura 36). Esta rotina permitirá a inserção da imagem sobre a qual serão desenhados os blocos e, posteriormente, medidas as suas áreas.

É necessário que a escala de trabalho esteja definida em 1:1. A escala significa a existência de uma relação matemática entre as dimensões reais do objeto e as do desenho de acordo com o que segue representado em um mapa. Na prática, quando é criado um desenho no *AutoCAD*, ele deve ser feito com suas dimensões reais, o que chamamos de escala natural ou escala real. Na escala natural o tamanho do objeto representado no plano coincide com a realidade.

A escala de inserção (unidade de medida) também deve ser configurada. No caso dessa pesquisa, a unidade foi definida em milímetros (Figura 37). A alteração da configuração

de unidades pode ser realizada com o uso do comando *Units*, basta apenas digitar o comando e pressionar a tecla ENTER. A Escala de Inserção não muda nem define a unidade de medida do seu desenho. Ela serve para "informar" ao *AutoCAD* que o seu desenho está em determinada unidade (milímetro, centímetro, metro, entre outras).

Sendo assim, com a imagem configurada em 1:1 e em milímetros é possível escalonar a mesma de acordo com um objeto de referência. Para esta pesquisa, o objeto de referência é o rolete, que mede aproximadamente 10cm.

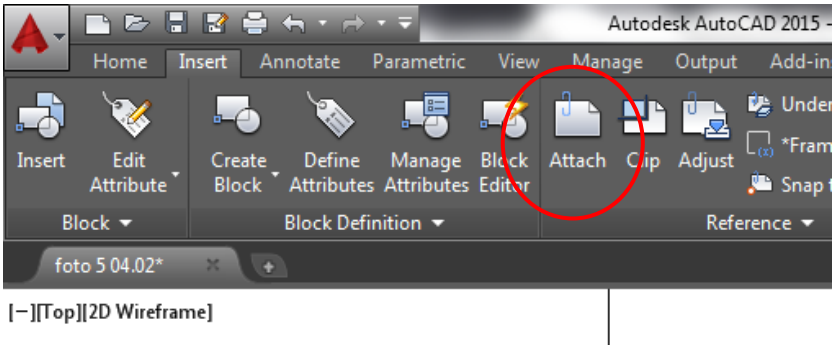

Figura 36: Inserindo uma imagem no Cad.
Fonte: Elaborada pelo autor

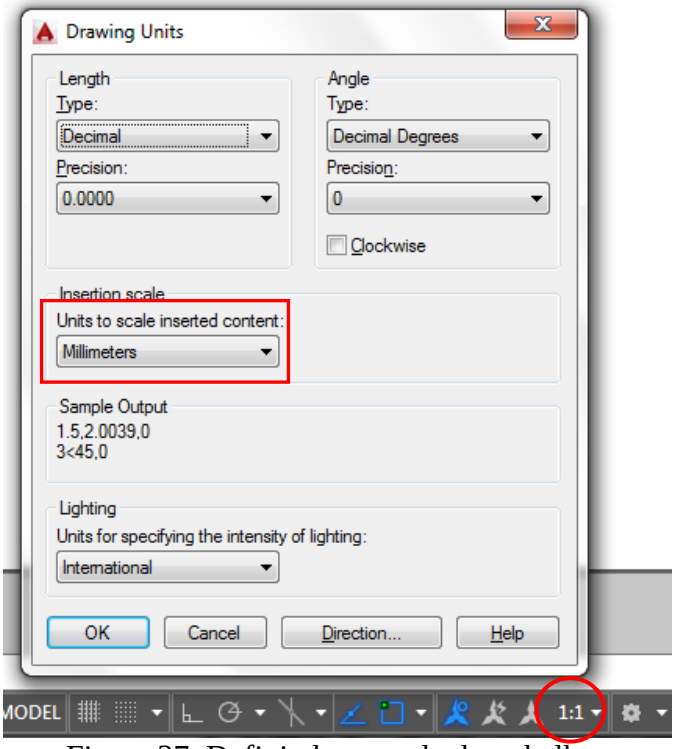

Figura 37: Definindo a escala de trabalho.
Fonte: Elaborada pelo autor

A partir de então uma linha é desenhada no objeto de referência para que toda a imagem/desenho seja redimensionado conforme as medidas reais. Para isto é utilizado o comando *Scale* onde, após desenhar uma linha de referência de medida no objeto de referência, é indicado qual o valor real do comprimento desta. Isto é possível em virtude de anteriormente ter deixado o arquivo de trabalho em 1:1. Para executar a rotina utiliza-se o comando *Scale* (SC) e a tecla ENTER é pressionada, seleciona-se os objetos que serão redimensionados e se pressiona a tecla ENTER, após um clique no ponto base e indicação que se deseja uma referência (digitar a letra R, de *reference*), pressionar a tecla ENTER, para então indicar a distância base seguida da desejada.

Depois de escalonada a imagem, foi desenhada uma *Polyline* em volta de cada fragmento para medir sua área. Para executar este comando basta apenas digitar PL (atalho de *Polyline*) e pressionar a tecla ENTER. O comando *Polyline* cria uma polilinha 2D, ou seja, uma sequencia de segmentos de linhas que compõe um objeto único.

A mensuração da área do bloco se dá com o comando *Area*, basta apenas digitar AA (atalho do comando) e pressionar a tecla ENTER. Cada *polyline* vai ter uma área em mm^2. O valor da área de cada um dos blocos foi transferido para uma planilha no *Excel*. Por meio de filtros as áreas eram comparadas a malhas previamente determinadas como padrão, simulando um peneiramento. Por exemplo, um fragmento com área de aproximadamente $40cm^2$, poderia ser classificado como passante em uma malha de 10,6x10,6cm ($113,1cm^2$) e retido em uma malha de 5,5x5,5cm ($29,9cm^2$).

Capítulo 4

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo estão descritas os resultados obtidos no desenvolvimento das metodologias apresentadas no Capítulo 3. Serão apresentadas as curvas granulométricas finais de cada metodologia proposta.

4.1 RESULTADOS DA METODOLOGIA DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA ROM

Após o basculamento do material e segregação dos blocos maiores, cada um deles foi mensurado por Fiji e classificado como passante e retido em malhas desde 160x80cm até 50x40cm. Os resultados estão apresentados na Tabela 3. Foram contabilizados 22 blocos no total.

Do resultado final da divisão da pilha original, os blocos abaixo de 40cm até 2,5cm, resultantes das pilhas correspondentes 1/32 (“A” e “B”), depois de mensurados por Fiji, foram classificados nas malhas: 40x20cm, 20x10cm, 10x5cm e 5x2,5cm. Os resultados dos blocos BM2 estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 3: Resultados para os blocos maiores que 50cm (BM1)

Número bloco	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**
Passante (cm)	160	160	100	100	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	60	50
Retido (cm)	80	80	60	60	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40

Tabela 4: Resultados para os blocos menores que 40cm e maiores que 2,5cm (BM2)

(cm)			**Número de Blocos**	
Passante	**Retido**	**Tamanho médio**	**Pilha “A”**	**Pilha “B”**
40	20	30	22	20
20	10	15	82	78
10	5	7,5	140	146
5	2,5	3,75	35	34
		Soma	279	278

As Tabelas 5 e 6 mostram os resultados das análises de laboratório via peneiramento das amostras de aproximadamente 30kg das duplicatas oriundas das pilhas “A” e “B”.

Tabela 5: Resultados das análises granulométricas de laboratório em duplicatas: pilha “A”

Malhas (mm)	**6,3**	**4,0**	**2,0**	**1,0**	**0,50**	**0,25**	**0,15**	**0,106**	**0,075**	**0,045**	**-0,045**
Fração Retida (%) dos pares das amostras	0,00	1,70	3,10	3,90	4,70	6,30	9,90	12,20	19,50	22,70	16,00
	0,00	1,60	3,10	4,10	4,60	6,20	10,30	12,40	18,50	22,60	16,60
Média aritmética (%)	0,00	1,65	3,10	4,00	4,65	6,25	10,10	12,30	19,00	22,65	16,30
Diferença Relativa (%)*	0,00	6,06	0,00	-5,00	2,15	1,60	-3,96	-1,63	5,26	0,44	-3,68

*com base na média dos pares de amostras

Tabela 6: Resultados das análises granulométricas de laboratório em duplicatas: pilha “B”

Malhas (mm)	**6,3**	**4,0**	**2,0**	**1,0**	**0,50**	**0,25**	**0,15**	**0,106**	**0,075**	**0,045**	**-0,045**
Fração Retida (%) dos pares das amostras	0,00	2,10	4,20	4,40	6,10	7,80	10,90	12,60	17,50	20,20	14,20
	0,00	2,60	4,10	5,00	5,90	7,70	10,80	12,50	17,00	20,20	14,20
Média aritmética (%)	0,00	2,35	4,15	4,70	6,00	7,75	10,85	12,55	17,25	20,20	14,20
Diferença Relativa (%)*	0,00	-21,28	2,41	-12,77	3,33	1,29	0,92	0,80	2,90	0,00	0,00

*com base na média dos pares de amostras

Como os blocos grandes foram medidos (análise de imagens) enquanto o material passante em 10 mm era analisado por peneiramento (base massa), foi necessário adotar uma fórmula de conversão de medidas dos blocos para volume. A fórmula aplicada foi: malha passante x malha retida x tamanho médio aritmético das malhas x número de blocos por classe de tamanho. Por exemplo, a classe de tamanho 160x80cm dos blocos BM1 (Tabela 3), possui volume equivalente a: 160 x 80 x ((160 + 80)/2) x 2 = 3,07m³.

O mais importante a ser observado para compositar os resultados em uma única curva de distribuição granulométrica é a fórmula escolhida para calcular o volume. Para calcular a massa retida em cada classe de tamanho foi adotada uma constante de densidade média do minério de 3t/m³. Qualquer constante utilizada não alteraria a proporção entre as frações.

As Tabelas 6 e 7 mostram o resultado da composição granulométrica final (incluindo os resultados de laboratório) para as pilhas “A” e “B” respectivamente. A massa do lote de cada classe de tamanho dos BM1 é igual à massa da amostra. Por outro lado, a massa do lote de cada classe de tamanho dos BM2 tem de ser igual à massa da amostra multiplicado por 32. Ou seja, foi assumido que a massa final de cada pilha gêmea (“A” e “B”) equivale 1/32 da massa da pilha original. Desta forma, presumindo-se que os erros de homogeneização e divisão foram desprezíveis, a fração retida da amostra em uma determinada classe de tamanho é igual aquela presente na pilha original. Vale salientar que cada uma das pilhas gêmeas, quando analisadas suas etapas de amostragem, deverá representar o lote (pilha inicial) como um todo, ou seja, cada uma das etapas de amostragem (BM1, BM2 e peneiramento) deverão, quando somadas, representar o lote de 259t.

Ainda, nas Tabelas 7 e 8, a massa do lote de cada classe de tamanho analisada em laboratório teve de ser recalculada da seguinte forma:

i-massa total da pilha inicial (basculada, balança caminhão) = 259t

ii-massa total dos blocos BM1 = 22t

iii-massa total dos blocos BM2A = 79,5t e BM2B = 74t

iv-massa total do lote do laboratório da pilha “A” = 259t - 22t - 79,5t = 157,5t

v-massa total do lote do laboratório da pilha “B” = 259t - 22t - 74t = 163t

vi-massa retrocalculada do lote para classe de tamanho

Exemplo: 4mm da pilha “A” = 1,65% x 157,5t / 100 = 2,60t

Tabela 7: Resultados da composição da curva granulométrica final da pilha “A”

COD	Malha (cm)			Núm. Blocos	Vol. (m^3)	Massa (t)		%	
	Passante	Retido	Tamanho Médio			Amostra	Lote	Retido	Retido Ac.
BM1	160	80	120	2	3,07200	9,2160	9,2160	0,0356	3,56%
BM1	100	60	80	2	0,96000	2,8800	2,8800	0,0111	4,67%
BM1	80	40	60	16	3,07200	9,2160	9,2160	0,0356	8,23%
BM1	60	40	50	1	0,12000	0,3600	0,3600	0,0014	8,37%
BM1	50	40	45	1	0,09000	0,2700	0,2700	0,0010	8,47%
BM2	40	20	30	22	0,52800	1,5840	50,6880	0,1957	28,04%
BM2	20	10	15	82	0,24600	0,7380	23,6160	0,0912	37,16%
BM2	10	5	7,5	140	0,05250	0,1575	5,0400	0,0195	39,11%
BM2	5	2,5	3,75	35	0,00164	0,0049	0,1575	0,0006	39,17%
Lab	0,63	0,4	0,515	----	----	----	2,5997	0,0100	40,17%
Lab	0,400	0,200	0,300	----	----	----	4,8843	0,0189	42,06%
Lab	0,200	0,100	0,150	----	----	----	6,3023	0,0243	44,49%
Lab	0,100	0,0500	0,075	----	----	----	7,3264	0,0283	47,32%
Lab	0,050	0,0250	0,038	----	----	----	9,8473	0,0380	51,12%
Lab	0,025	0,0150	0,020	----	----	----	15,9132	0,0614	57,27%
Lab	0,015	0,0106	0,013	----	----	----	19,3794	0,0748	64,75%
Lab	0,0106	0,0075	0,009	----	----	----	29,9357	0,1156	76,31%
Lab	0,0075	0,0045	0,006	----	----	----	35,6865	0,1378	90,08%
Lab	0,0045	0,0000	0,00225	----	----	----	25,6800	0,0992	100,00%
		Σ			**8,14214**	**24,42**	**259,00**	**1,00**	

Tabela 8: Resultados da composição da curva granulométrica final da pilha “B”

COD	Malha (cm)			Núm. Blocos	Vol. (m^3)	Massa (t)		%	
	Passante	Retido	Tam. Médio			Amostra	Lote	Retido	Retido Ac.
BM1	160	80	120	2	3,07200	9,2160	9,2160	0,0356	3,56%
BM1	100	60	80	2	0,96000	2,8800	2,8800	0,0111	4,67%
BM1	80	40	60	16	3,07200	9,2160	9,2160	0,0356	8,23%
BM1	60	40	50	1	0,12000	0,3600	0,3600	0,0014	8,37%
BM1	50	40	45	1	0,09000	0,2700	0,2700	0,0010	8,47%
BM2	40	20	30	20	0,48000	1,4400	46,0800	0,1779	26,26%
BM2	20	10	15	78	0,23400	0,7020	22,4640	0,0867	34,94%
BM2	10	5	7,5	146	0,05475	0,1643	5,2560	0,0203	36,97%
BM2	5	2,5	3,75	34	0,00159	0,0048	0,1530	0,0006	37,03%
Lab	0,63	0,4	0,515	----	----	----	3,8330	0,0148	38,51%
Lab	0,400	0,200	0,300	----	----	----	6,7689	0,0261	41,12%
Lab	0,200	0,100	0,150	----	----	----	7,6659	0,0296	44,08%
Lab	0,100	0,0500	0,075	----	----	----	9,7863	0,0378	47,86%
Lab	0,050	0,0250	0,038	----	----	----	12,6406	0,0488	52,74%
Lab	0,025	0,0150	0,020	----	----	----	17,6969	0,0683	59,57%
Lab	0,015	0,0106	0,013	----	----	----	20,4697	0,0790	67,47%
Lab	0,0106	0,0075	0,009	----	----	----	28,1356	0,1086	78,34%
Lab	0,0075	0,0045	0,006	----	----	----	32,9472	0,1272	91,06%
Lab	0,0045	0,0000	0,00225	----	----	----	23,1609	0,0894	100,00%
		Σ			**8,08**	**24,25**	**259,00**	**1,00**	

A Tabela 9 mostra os valores de massa retrocalculados dos lotes para todas as classes de tamanho das amostras analisadas em laboratório.

Tabela 9**:** Resultados das massas retrocalculadas dos lotes (laboratório)

	Malha (mm)	**4,0**	**2,0**	**1,0**	**0,50**	**0,25**	**0,15**	**0,106**	**0,075**	**0,045**	**-0,045**
A	Fração Ret. Média (%)	1,65	3,10	4,00	4,65	6,25	10,10	12,30	19,00	22,65	16,30
	Massa retrocalculada do lote (t)	2,60	4,88	6,30	7,33	9,85	15,91	19,38	29,94	35,69	25,68
B	Fração Ret. Média (%)	2,35	4,15	4,70	6,00	7,75	10,85	12,55	17,25	20,20	14,20
	Massa Retrocalculada do Lote (t)	3,83	6,77	7,67	9,79	12,64	17,70	20,47	28,14	32,95	23,16

A Tabela 10 mostra as frações retidas em massa, o retido acumulado e os erros (diferenças) encontrados entre as pilhas gêmeas “A” e “B”. A diferença absoluta foi calculada com base no valor retido de cada classe da pilha “A” menos o valor retido de cada classe da pilha “B”. A diferença relativa foi calculada com base na diferença absoluta dividia pela média do retido das pilhas “A” e ”B”.

Ainda, a Tabela 10 mostra que as diferenças absolutas não ultrapassaram o valor de ±2% (para o intervalo de confiança de 100%). As diferenças relativas foram de ±1%. Isto significa que a reprodutibilidade foi bastante elevada, embora fossem esperados erros

maiores, pois as etapas de amostragem em campo (homogeneização, divisão, análise de imagens) são muitas e envolvem um considerável grau de dificuldade.

Tabela 10**:** Determinação da reprodutibilidade do método

	Pilha "A"		Pilha "B"			
Tam. médio (cm)	**Retido**	**Retido Ac.**	**Retido**	**Retido Ac.**	**Diferença Absoluta**	**Diferença Relativa**
120,00	0,036	3,56%	0,036	3,56%	0,00%	0,00%
80,00	0,011	4,67%	0,011	4,67%	0,00%	0,00%
60,00	0,036	8,23%	0,036	8,23%	0,00%	0,00%
50,00	0,001	8,37%	0,001	8,37%	0,00%	0,00%
45,00	0,001	8,47%	0,001	8,47%	0,00%	0,00%
30,00	0,196	28,04%	0,178	26,26%	1,78%	0,10%
15,00	0,091	37,16%	0,087	34,94%	0,44%	0,05%
7,50	0,019	39,11%	0,020	36,97%	-0,08%	-0,04%
3,75	0,001	39,17%	0,001	37,03%	0,00%	0,03%
0,52	0,010	40,17%	0,015	38,51%	-0,48%	-0,38%
0,30	0,019	42,06%	0,026	41,12%	-0,73%	-0,32%
0,15	0,024	44,49%	0,030	44,08%	-0,53%	-0,20%
0,08	0,028	47,32%	0,038	47,86%	-0,95%	-0,29%
0,04	0,038	51,12%	0,049	52,74%	-1,08%	-0,25%
0,02	0,061	57,27%	0,068	59,57%	-0,69%	-0,11%
0,01	0,075	64,75%	0,079	67,47%	-0,42%	-0,05%
0,01	0,116	76,31%	0,109	78,34%	0,70%	0,06%
0,01	0,138	90,08%	0,127	91,06%	1,06%	0,08%
0,00	0,099	100,00%	0,089	100,00%	0,97%	0,10%
				Viés	**0,00%**	**-0,06%**
				Precisão	**±2%**	**±1%**

A Figura 38 mostra a redução das massas que ocorreu por meio das divisões sofridas pela pilha inicial. Ou seja, a Figura 38 mostra o protocolo de amostragem desenvolvido para análise granulométrica de ROM *in situ*. A Figura 39 mostra as curvas granulométricas finais obtidas para as duas pilhas gêmeas e o quanto elas se encontram próximas.

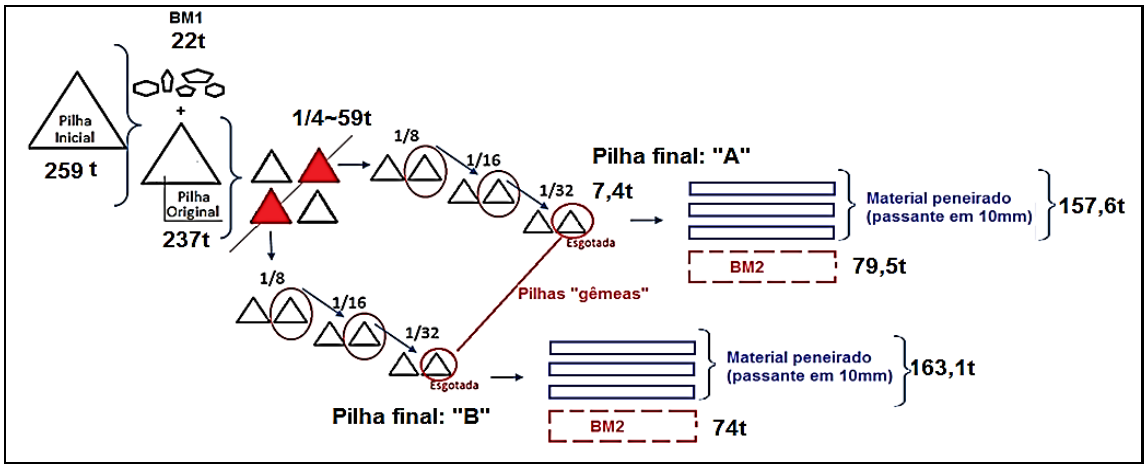

Figura 38: Protocolo de amostragem.
Fonte: Elaborada pelo autor

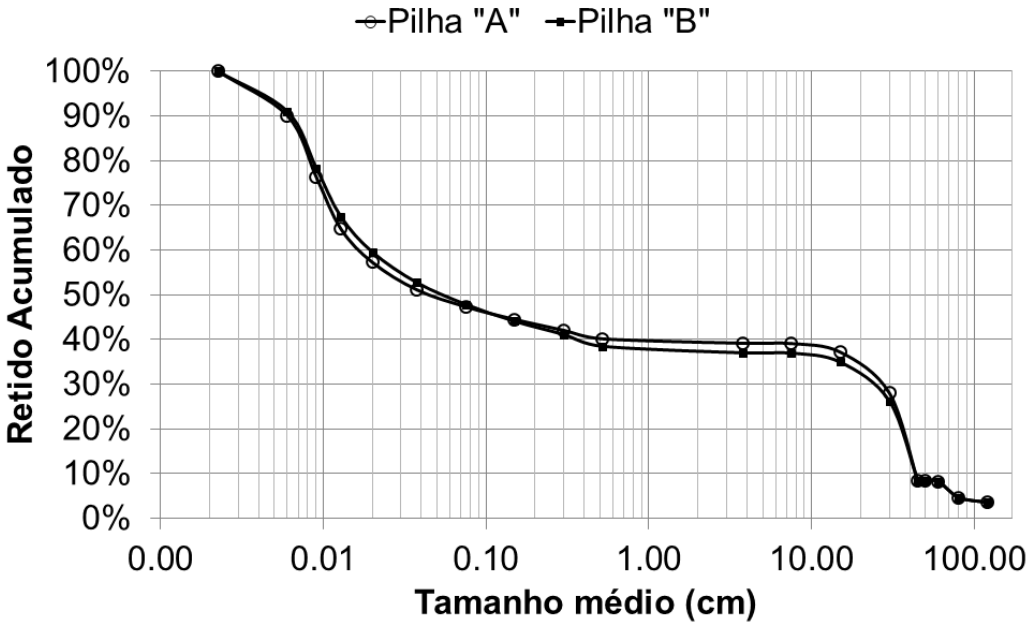

Figura 39: Curvas granulométricas finais para as duas pilhas gêmeas.
Fonte: Elaborada pelo autor

Com respeito à abertura (*gape*) dos britadores giratórios que processam o ROM, as curvas mostram que apenas 5% do material está retido em 1 metro. Isto significa que o tamanho máximo dos blocos de minério de itabirito friável, pós desmonte desta frente de lavra, atende às especificações técnicas (dimensionamento). Para APA e APF de 20cm e 14cm, as curvas mostram retidos de cerca de 35% e 39% respectivamente. Ou seja, apenas 4% do material ficou restrita a esta faixa de tamanho. Existe 35% do material que se encontra, portanto, retido em 20cm (APA).

De 0,4cm a 20cm (APA) a curva mostra um platô, o que significa que não há muita opção com respeito à configuração deste parâmetro com vistas à modificação da granulometria do produto. Portanto, se desejado um produto mais fino no primeiro estágio de britagem, outros parâmetros, tais como, geometria da câmara, excentricidade e peças de desgaste serão de maior relevância.

4.2 RESULTADOS DA METODOLOGIA DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO BLOCO III

Durante dois dias foram realizados testes no Bloco III. Os testes objetivaram a determinação de curva granulométrica da alimentação do britador terciário, utilizado unicamente para britar a carga circulante. Os ensaios foram baseados em análises de imagens do material fragmentado transportado sobre a correia 3034. As curvas finais produzidas pela

análise de imagens foram adquiridas por cortes (extração de fotos) aproximados a cada 30 segundos considerando filmagens de 2 minutos de duração.

O Teste 1 (granulado), foi realizado em 21 de janeiro de 2014, quando houve alimentação de itabirito compacto (material granulado) na usina de britagem. Neste dia estavam funcionando todos os britadores do Bloco III e a carga circulante excedeu o máximo permitido de 1.500 t/h. Para o Teste 1 foram utilizadas 4 imagens extraídas da filmagem das correias.

O Teste 2 (fino), foi realizado em 04 de fevereiro de 2014, quando houve alimentação de itabirito friável (material fino) na usina de britagem. Neste dia a produção estava estabilizada, o que possibilitou caracterizar as condições normais de operação da usina de Conceição. Durante a realização das filmagens estavam funcionando todos os britadores do Bloco III. Para os testes do dia 04 de fevereiro foram, também, utilizadas 4 imagens extraídas da filmagem das correias.

Em cada foto extraída do vídeo foram contabilizados 40 blocos. As fotos selecionadas foram aquelas que apresentaram melhor nitidez para que a *polyline* de determinação dos blocos fosse desenhada. Cada bloco foi escolhido aleatoriamente e teve sua área mensurada via *AutoCAD*. As Figuras 40 e 41 apresentam as imagens extraídas para a composição de cada um dos dois testes. Em cada uma das imagens foram desenhadas 40 *polylines* representando 40 blocos mensurados nesta pesquisa.

Figura 40: Definição das *polylines* dos 40 blocos das imagens do Teste 1 - Granulado (21.01.2014).
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 41: Definição das *polylines* dos 40 blocos das imagens do Teste 2 - Finos (04.02.2014).
Fonte: Elaborada pelo autor

Após mensuração das áreas dos blocos, as informações foram repassadas a uma planilha no Excel onde foi realizada uma análise estatística das áreas medidas obtendo os quartis. Os quartis determinados possibilitaram a criação de malhas de referência. As malhas de referência foram escolhidas em função da raiz quadrada da área de cada quartil. Ainda, as malhas de referência são equivalentes a uma malha quadrada para cada um dos tamanhos estipulados.

Nas Tabelas 11 a 14 estão apresentados os resultados por imagem do Teste 1 (granulado). Nas tabelas estão apresentadas as memórias de cálculo da mensuração de áreas, a definição dos quartis para criação da malha e o retido acumulado para geração das curvas de distribuição granulométrica. Nas amostragens do Teste 1 os blocos foram classificados como passante e retido em malhas quadradas desde 14,6x14,6cm até 2,5x2,5cm.

Tabela 11**:**Resultado da mensuração dos blocos e definição da malha da Foto 1 do Teste 1 (granulado)

Mensuração dos Blocos da Foto 1					Malha a partir dos quartis definidos [cm]						
N° Bloco	A[mm²]	A[cm²]	Malha [mm]	Malha [cm]		11.0	7.4	6.4	5.4	4.1	2.5
1	4976,127	49,76127	70,54166783	7,1	Análise do tamanho do bloco para composição da curva de distribuição granulométrica - % Retida Acumulada	0	0	1	1	1	1
2	9558,812	95,58812	97,76917459	9,8		0	1	1	1	1	1
3	12101,69	121,0169	110,0076652	11,0		0	1	1	1	1	1
4	4649,175	46,49175	68,18485829	6,8		0	0	1	1	1	1
5	4784,877	47,84877	69,17280535	6,9		0	0	1	1	1	1
6	4827,147	48,27147	69,47767411	6,9		0	0	1	1	1	1
7	5767,158	57,67158	75,9418093	7,6		0	1	1	1	1	1
8	3433,315	34,33315	58,59449889	5,9		0	0	0	1	1	1
9	3989,062	39,89062	63,15902311	6,3		0	0	0	1	1	1
10	2969,966	29,69966	54,49739443	5,4		0	0	0	1	1	1
11	6080,427	60,80427	77,97709535	7,8		0	1	1	1	1	1
12	7629,961	76,29961	87,34964739	8,7		0	1	1	1	1	1
13	2628,681	26,28681	51,27065925	5,1		0	0	0	0	1	1
14	4768,393	47,68393	69,05355313	6,9		0	0	1	1	1	1
15	2369,778	23,69778	48,68036976	4,9		0	0	0	0	1	1
16	2645,073	26,45073	51,43027027	5,1		0	0	0	0	1	1
17	3320,408	33,20408	57,62298066	5,8		0	0	0	1	1	1
18	4236,018	42,36018	65,08470097	6,5		0	0	1	1	1	1
19	4480,75	44,8075	66,93840452	6,7		0	0	1	1	1	1
20	5415,848	54,15848	73,59244526	7,4		0	0	1	1	1	1
21	5664,403	56,64403	75,26222625	7,5		0	1	1	1	1	1
22	2676,834	26,76834	51,73812907	5,2		0	0	0	0	1	1
23	4709,894	47,09894	68,62866457	6,9		0	0	1	1	1	1
24	2281,382	22,81382	47,7638179	4,8		0	0	0	0	1	1
25	1729,575	17,29575	41,58816057	4,2		0	0	0	0	1	1
26	5389,575	53,89575	73,41372351	7,3		0	0	1	1	1	1
27	6805,458	68,05458	82,49519925	8,2		0	1	1	1	1	1
28	2526,329	25,26329	50,26259743	5,0		0	0	0	0	1	1
29	1646,061	16,46061	40,57167978	4,1		0	0	0	0	0	1
30	1786,106	17,86106	42,26234613	4,2		0	0	0	0	1	1
31	2692,805	26,92805	51,89224605	5,2		0	0	0	0	1	1
32	3976,254	39,76254	63,05754673	6,3		0	0	0	1	1	1
33	3635,427	36,35427	60,29450058	6,0		0	0	0	1	1	1
34	11140,87	111,4087	105,5503202	10,6		0	1	1	1	1	1
35	7959,218	79,59218	89,21445006	8,9		0	1	1	1	1	1
36	3514,42	35,1442	59,28254043	5,9		0	0	0	1	1	1
37	5514,372	55,14372	74,25881968	7,4		0	1	1	1	1	1
38	3038,65	30,3865	55,12395033	5,5		0	0	0	1	1	1
39	3062,601	30,62601	55,34076888	5,5		0	0	0	1	1	1
40	3554,932	35,54932	59,62324882	6,0		0	0	0	1	1	1
Média	4598,446	45,98446	65,84929085	6,6	Σ	0	10	20	30	39	40
Mediana	4112,54	41,1254	64,12186204	6,4	% Retida Acumulada	0%	25%	50%	75%	98%	100%
Quartil 0 (0%)	1646,06	16,46	40,57	4,06							
Quartil 1 (25%)	2900,68	29,01	53,85	5,38							
Quartil 2 (50%)	4112,54	41,13	64,12	6,41							
Quartil 3 (75%)	5440,48	54,40	73,76	7,38							
Quartil 4 (100%)	12101,69	121,02	110,01	11,00							

Malha da Foto 1; Teste 1

Tabela 12: Resultado da mensuração dos blocos e definição da malha da Foto 2 do Teste 1 (granulado)

Mensuração dos Blocos da Foto 2					Malha a partir dos quartis definidos [cm]						
N° Bloco	A[mm²]	A[cm²]	Malha [mm]	Malha [cm]		14,6	7,1	6,2	5,4	4,5	2,5
1	21220,15	212,2015	145,6713774	14,6	Análise do tamanho do bloco para composição da curva de distribuição granulométrica - % Retida Acumulada	0	1	1	1	1	1
2	8423,015	84,23015	91,77698459	9,2		0	1	1	1	1	1
3	2086,907	20,86907	45,68267834	4,6		0	0	0	0	1	1
4	3813,338	38,13338	61,7522283	6,2		0	0	0	1	1	1
5	3203,056	32,03056	56,59555106	5,7		0	0	0	1	1	1
6	2320,078	23,20078	48,16718904	4,8		0	0	0	0	1	1
7	8723,052	87,23052	93,3972778	9,3		0	1	1	1	1	1
8	4440,416	44,40416	66,63644949	6,7		0	0	1	1	1	1
9	2037,294	20,37294	45,13639108	4,5		0	0	0	0	1	1
10	4224,097	42,24097	64,99305655	6,5		0	0	1	1	1	1
11	3904,974	39,04974	62,48978877	6,2		0	0	1	1	1	1
12	4402,142	44,02142	66,34864204	6,6		0	0	1	1	1	1
13	2741,116	27,41116	52,35566349	5,2		0	0	0	0	1	1
14	3121,063	31,21063	55,86647116	5,6		0	0	0	1	1	1
15	2262,092	22,62092	47,56145814	4,8		0	0	0	0	1	1
16	2036,75	20,3675	45,13036229	4,5		0	0	0	0	0	1
17	3484,638	34,84638	59,0308233	5,9		0	0	0	1	1	1
18	8308,223	83,08223	91,14945529	9,1		0	1	1	1	1	1
19	9364,195	93,64195	96,76876924	9,7		0	1	1	1	1	1
20	4564,936	45,64936	67,56431085	6,8		0	0	1	1	1	1
21	4725,984	47,25984	68,74579551	6,9		0	0	1	1	1	1
22	4474,474	44,74474	66,89150843	6,7		0	0	1	1	1	1
23	3043,107	30,43107	55,16435987	5,5		0	0	0	1	1	1
24	2410,645	24,10645	49,09831769	4,9		0	0	0	0	1	1
25	2472,129	24,72129	49,72050583	5,0		0	0	0	0	1	1
26	3056,617	30,56617	55,28668375	5,5		0	0	0	1	1	1
27	4737,758	47,37758	68,83137075	6,9		0	0	1	1	1	1
28	2517,464	25,17464	50,17433806	5,0		0	0	0	0	1	1
29	2655,143	26,55143	51,52807681	5,2		0	0	0	0	1	1
30	6613,774	66,13774	81,32511113	8,1		0	1	1	1	1	1
31	3460,927	34,60927	58,82964644	5,9		0	0	0	1	1	1
32	3150,717	31,50717	56,13125065	5,6		0	0	0	1	1	1
33	4235,394	42,35394	65,07990627	6,5		0	0	1	1	1	1
34	3166,742	31,66742	56,27381451	5,6		0	0	0	1	1	1
35	9390,052	93,90052	96,90228222	9,7		0	1	1	1	1	1
36	4456,6	44,566	66,75777033	6,7		0	0	1	1	1	1
37	5949,919	59,49919	77,13571546	7,7		0	1	1	1	1	1
38	3223,398	32,23398	56,77497864	5,7		0	0	0	1	1	1
39	8885,48	88,8548	94,26282459	9,4		0	1	1	1	1	1
40	9849,218	98,49218	99,24322748	9,9		0	1	1	1	1	1
Média	4928,927	49,28927	67,20581032	6,7	Σ	0	10	20	30	39	40
Mediana	3859,156	38,59156	62,12100853	6,2	% Retida Acumulada	0%	25%	50%	75%	98%	100%
Quartil 0 (0%)	2036,75	20,37	45,13	4,51							
Quartil 1 (25%)	2967,61	29,68	54,46	5,45							
Quartil 2 (50%)	3859,16	38,59	62,12	6,21							
Quartil 3 (75%)	5040,80	50,41	70,91	7,09							
Quartil 4 (100%)	21220,15	212,20	145,67	14,57							

Malha da Foto 2; Teste 1

Tabela 13: Resultado da mensuração dos blocos e definição da malha da Foto 3 do Teste 1 (granulado)

Mensuração dos Blocos da Foto 3					Malha a partir dos quartis definidos [cm]						
N° Bloco	A[mm²]	A[cm²]	Malha [mm]	Malha [cm]		12,8	6,6	5,5	4,5	3,5	2,5
1	2950,404	29,50404	54,31762421	5,4	Análise do tamanho do bloco para composição da curva de distribuição granulométrica - % Retida Acumulada	0	0	0	1	1	1
2	1206,756	12,06756	34,73839231	3,5		0	0	0	0	1	1
3	5408,441	54,08441	73,54210563	7,4		0	1	1	1	1	1
4	2262,029	22,62029	47,56079478	4,8		0	0	0	1	1	1
5	2108,051	21,08051	45,91351326	4,6		0	0	0	1	1	1
6	16399,57	163,9957	128,0608024	12,8		0	1	1	1	1	1
7	12311,76	123,1176	110,9583859	11,1		0	1	1	1	1	1
8	6682,992	66,82992	81,74957125	8,2		0	1	1	1	1	1
9	1927,393	19,27393	43,90208309	4,4		0	0	0	0	1	1
10	2291,527	22,91527	47,86990077	4,8		0	0	0	1	1	1
11	3817,624	38,17624	61,78692176	6,2		0	0	1	1	1	1
12	5283,126	52,83126	72,68511196	7,3		0	1	1	1	1	1
13	4866,069	48,66069	69,75721683	7,0		0	1	1	1	1	1
14	3065,743	30,65743	55,36915567	5,5		0	0	1	1	1	1
15	2798,732	27,98732	52,9030415	5,3		0	0	0	1	1	1
16	3642,081	36,42081	60,34965783	6,0		0	0	1	1	1	1
17	4852,674	48,52674	69,66113622	7,0		0	1	1	1	1	1
18	3962,277	39,62277	62,94662183	6,3		0	0	1	1	1	1
19	6206,596	62,06596	78,78195225	7,9		0	1	1	1	1	1
20	8112,363	81,12363	90,0686577	9,0		0	1	1	1	1	1
21	2532,669	25,32669	50,32562866	5,0		0	0	0	1	1	1
22	4160,659	41,60659	64,50317279	6,5		0	0	1	1	1	1
23	2878,055	28,78055	53,6475088	5,4		0	0	0	1	1	1
24	1949,393	19,49393	44,15192974	4,4		0	0	0	0	1	1
25	3581,954	35,81954	59,84943024	6,0		0	0	1	1	1	1
26	3946,453	39,46453	62,82080388	6,3		0	0	1	1	1	1
27	7029,792	70,29792	83,84385249	8,4		0	1	1	1	1	1
28	2893,523	28,93523	53,79147888	5,4		0	0	0	1	1	1
29	3702,4	37,024	60,84735245	6,1		0	0	1	1	1	1
30	1830,64	18,3064	42,78598018	4,3		0	0	0	0	1	1
31	1551,355	15,51355	39,38724921	3,9		0	0	0	0	1	1
32	2843,245	28,43245	53,32208642	5,3		0	0	0	1	1	1
33	1612,86	16,1286	40,1604233	4,0		0	0	0	0	1	1
34	1856,561	18,56561	43,08782891	4,3		0	0	0	0	1	1
35	1193,385	11,93385	34,5454078	3,5		0	0	0	0	0	1
36	1713,389	17,13389	41,3931045	4,1		0	0	0	0	1	1
37	1953,274	19,53274	44,19586406	4,4		0	0	0	0	1	1
38	3281,599	32,81599	57,28524592	5,7		0	0	1	1	1	1
39	2900,473	29,00473	53,85603587	5,4		0	0	0	1	1	1
40	3157,628	31,57628	56,19277445	5,6		0	0	1	1	1	1
Média	3918,138	39,18138	59,57289514	6,0	Σ	0	10	20	30	39	40
Mediana	3008,074	30,08074	54,84338994	5,5	% Retida Acumulada	0%	25%	50%	75%	98%	100%
Quartil 0 (0%)	1193,39	11,93	34,55	3,45							
Quartil 1 (25%)	2069,36	20,69	45,48	4,55							
Quartil 2 (50%)	3008,07	30,08	54,84	5,48							
Quartil 3 (75%)	4333,66	43,34	65,79	6,58							
Quartil 4 (100%)	16399,57	164,00	128,06	12,81							

Malha da Foto 3; Teste 1

Tabela 14: Resultado da mensuração dos blocos e definição da malha da Foto 4 do Teste 1 (granulado)

Mensuração dos Blocos da Foto 4					Malha a partir dos quartis definidos [cm]						
N° Bloco	A[mm²]	A[cm²]	Malha [mm]	Malha [cm]		11,8	6,6	5,5	4,8	3,9	2,5
1	3478,049	34,78049	58,97498453	5,9	Análise do tamanho do bloco para composição da curva de distribuição granulométrica - % Retida Acumulada	0	0	1	1	1	1
2	2026,906	20,26906	45,02117169	4,5		0	0	0	0	1	1
3	2651,255	26,51255	51,49033987	5,1		0	0	0	1	1	1
4	4574,274	45,74274	67,63338155	6,8		0	1	1	1	1	1
5	1717,741	17,17741	41,44564392	4,1		0	0	0	0	1	1
6	6945,753	69,45753	83,3411843	8,3		0	1	1	1	1	1
7	5026,858	50,26858	70,90034132	7,1		0	1	1	1	1	1
8	3145,697	31,45697	56,0865171	5,6		0	0	1	1	1	1
9	2560,003	25,60003	50,59647023	5,1		0	0	0	1	1	1
10	1665,791	16,65791	40,81409683	4,1		0	0	0	0	1	1
11	13896,27	138,9627	117,8824257	11,8		0	1	1	1	1	1
12	2145,859	21,45859	46,32341525	4,6		0	0	0	0	1	1
13	4358,901	43,58901	66,02197361	6,6		0	0	1	1	1	1
14	3570,93	35,7093	59,75725981	6,0		0	0	1	1	1	1
15	1794,096	17,94096	42,35676923	4,2		0	0	0	0	1	1
16	1752,826	17,52826	41,86676247	4,2		0	0	0	0	1	1
17	2751,416	27,51416	52,45393979	5,2		0	0	0	1	1	1
18	3246,673	32,46673	56,97958494	5,7		0	0	1	1	1	1
19	4141,019	41,41019	64,35075213	6,4		0	0	1	1	1	1
20	6405,778	64,05778	80,0361031	8,0		0	1	1	1	1	1
21	2433,885	24,33885	49,33441497	4,9		0	0	0	1	1	1
22	5324,326	53,24326	72,96797859	7,3		0	1	1	1	1	1
23	4915,494	49,15494	70,11058194	7,0		0	1	1	1	1	1
24	4012,224	40,12224	63,34212106	6,3		0	0	1	1	1	1
25	1839,116	18,39116	42,88491576	4,3		0	0	0	0	1	1
26	2642,528	26,42528	51,4055211	5,1		0	0	0	1	1	1
27	4144,845	41,44845	64,38046831	6,4		0	0	1	1	1	1
28	7771,348	77,71348	88,15524885	8,8		0	1	1	1	1	1
29	3578,89	35,7889	59,82382218	6,0		0	0	1	1	1	1
30	2762,616	27,62616	52,56058885	5,3		0	0	0	1	1	1
31	2939,491	29,39491	54,21707111	5,4		0	0	0	1	1	1
32	3259,958	32,59958	57,09603839	5,7		0	0	1	1	1	1
33	1497,068	14,97068	38,69196299	3,9		0	0	0	0	0	1
34	1523,777	15,23777	39,03559017	3,9		0	0	0	0	1	1
35	4683,629	46,83629	68,43704479	6,8		0	1	1	1	1	1
36	2392,119	23,92119	48,90929257	4,9		0	0	0	1	1	1
37	2911,481	29,11481	53,95814026	5,4		0	0	0	1	1	1
38	2662,692	26,62692	51,60127518	5,2		0	0	0	1	1	1
39	1927,091	19,27091	43,89864007	4,4		0	0	0	0	1	1
40	9876,405	98,76405	99,38010566	9,9		0	1	1	1	1	1
Média	3773,877	37,73877	59,11309851	5,9	Σ	0	10	20	30	39	40
Mediana	3042,594	30,42594	55,1517941	5,5	% Retida Acumulada	0%	25%	50%	75%	98%	100%
Quartil 0 (0%)	1497,07	14,97	38,69	3,87							
Quartil 1 (25%)	2330,55	23,31	48,26	4,83							
Quartil 2 (50%)	3042,59	30,43	55,15	5,52							
Quartil 3 (75%)	4412,74	44,13	66,42	6,64							
Quartil 4 (100%)	13896,27	138,96	117,88	11,79							

Malha da Foto 4; Teste 1

Nas Tabelas 15 a 18 estão apresentados os resultados por imagem do Teste 2 (finos). Estão apresentadas as memórias de cálculo da mensuração de áreas, a definição dos quartis para criação da malha e o retido acumulado para geração das curvas de distribuição

granulométrica. Os blocos foram classificados como passante e retido em malhas quadradas desde 14,8x14,8cm até 2,5x2,5cm.

Tabela 15: Resultado da mensuração dos blocos e definição da malha da Foto 1 do Teste 2 (finos)

Mensuração dos Blocos da Foto 1					Malha a partir dos quartis definidos [cm]						
N° Bloco	A[mm²]	A[cm²]	Malha [mm]	Malha [cm]		14,8	4,9	3,9	3,4	2,8	2,5
1	1367,128	13,67128	36,9746927	3,7	Análise do tamanho do bloco para composição da curva de distribuição granulométrica - % Retida Acumulada	0	0	0	1	1	1
2	887,1971	8,871971	29,78585403	3,0		0	0	0	0	1	1
3	2254,92	22,5492	47,48599583	4,7		0	0	1	1	1	1
4	2894,903	28,94903	53,80430001	5,4		0	1	1	1	1	1
5	2487,349	24,87349	49,87332554	5,0		0	1	1	1	1	1
6	1832,524	18,32524	42,80799224	4,3		0	0	1	1	1	1
7	898,068	8,98068	29,9677827	3,0		0	0	0	0	1	1
8	1750,218	17,50218	41,83560445	4,2		0	0	1	1	1	1
9	1229,596	12,29596	35,0655971	3,5		0	0	0	1	1	1
10	1681,409	16,81409	41,00498872	4,1		0	0	1	1	1	1
11	1092,545	10,92545	33,05366697	3,3		0	0	0	0	1	1
12	4245,752	42,45752	65,1594383	6,5		0	1	1	1	1	1
13	1117,83	11,1783	33,43397075	3,3		0	0	0	0	1	1
14	1130,898	11,30898	33,62882692	3,4		0	0	0	1	1	1
15	1873,03	18,7303	43,27851777	4,3		0	0	1	1	1	1
16	2441,677	24,41677	49,4133312	4,9		0	1	1	1	1	1
17	3287,682	32,87682	57,33831354	5,7		0	1	1	1	1	1
18	1081,126	10,81126	32,88048205	3,3		0	0	0	0	1	1
19	2431,958	24,31958	49,31488416	4,9		0	1	1	1	1	1
20	2270,335	22,70335	47,64803459	4,8		0	0	1	1	1	1
21	4743,385	47,43385	68,87223461	6,9		0	1	1	1	1	1
22	983,5382	9,835382	31,3614126	3,1		0	0	0	0	1	1
23	1009,834	10,09834	31,7778791	3,2		0	0	0	0	1	1
24	1271,32	12,7132	35,65558021	3,6		0	0	0	1	1	1
25	1360,708	13,60708	36,88777575	3,7		0	0	0	1	1	1
26	1610,991	16,10991	40,13714738	4,0		0	0	1	1	1	1
27	778,8533	7,788533	27,90794331	2,8		0	0	0	0	0	1
28	2113,949	21,13949	45,97770329	4,6		0	0	1	1	1	1
29	2337,393	23,37393	48,34659243	4,8		0	0	1	1	1	1
30	1383,167	13,83167	37,19094648	3,7		0	0	0	1	1	1
31	2271,584	22,71584	47,66113826	4,8		0	0	1	1	1	1
32	3564,528	35,64528	59,70366739	6,0		0	1	1	1	1	1
33	1135,718	11,35718	33,70041098	3,4		0	0	0	1	1	1
34	1323,531	13,23531	36,38036283	3,6		0	0	0	1	1	1
35	21756,25	217,5625	147,5000007	14,8		0	1	1	1	1	1
36	1268,981	12,68981	35,62275537	3,6		0	0	0	1	1	1
37	2837,126	28,37126	53,26468248	5,3		0	1	1	1	1	1
38	1029,469	10,29469	32,08533933	3,2		0	0	0	0	1	1
39	1061,929	10,61929	32,58724597	3,3		0	0	0	0	1	1
40	1271,108	12,71108	35,65259878	3,6		0	0	0	1	1	1
Média	2491,392	24,91392	44,79969323	4,5	Σ	0	10	20	30	39	40
Mediana	1497,079	14,97079	38,66404693	3,9	% Retida Acumulada	0%	25%	50%	75%	98%	100%
Quartil 0 (0%)	778,85	7,79	27,91	2,79							
Quartil 1 (25%)	1127,63	11,28	33,58	3,36							
Quartil 2 (50%)	1497,08	14,97	38,66	3,87							
Quartil 3 (75%)	2361,03	23,61	48,59	4,86							
Quartil 4 (100%)	28042,42	280,42	147,50	14,75							

Malha da Foto 1; Teste 2

Tabela 16: Resultado da mensuração dos blocos e definição da malha da Foto 2 do Teste 2 (finos)

Mensuração dos Blocos da Foto 2					Malha a partir dos quartis definidos [cm]						
N° Bloco	A[mm²]	A[cm²]	Malha [mm]	Malha [cm]		10,6	5,5	4,1	3,5	2,7	2,5
1	1718,946	17,18946	41,46017607	4,1	Análise do tamanho do bloco para composição da curva de distribuição granulométrica - % Retida Acumulada	0	0	1	1	1	1
2	899,2073	8,992073	29,98678542	3,0		0	0	0	0	1	1
3	1160,584	11,60584	34,06734067	3,4		0	0	0	0	1	1
4	1849,966	18,49966	43,01123109	4,3		0	0	1	1	1	1
5	1594,163	15,94163	39,92696708	4,0		0	0	0	1	1	1
6	2569,731	25,69731	50,69251128	5,1		0	0	1	1	1	1
7	1426,812	14,26812	37,77316905	3,8		0	0	0	1	1	1
8	1219,021	12,19021	34,9144798	3,5		0	0	0	0	1	1
9	1185,519	11,85519	34,43137232	3,4		0	0	0	0	1	1
10	1697,475	16,97475	41,20041869	4,1		0	0	0	1	1	1
11	1310,871	13,10871	36,20595669	3,6		0	0	0	1	1	1
12	1650,292	16,50292	40,62378244	4,1		0	0	0	1	1	1
13	2896,783	28,96783	53,82176883	5,4		0	0	1	1	1	1
14	1615,623	16,15623	40,19480688	4,0		0	0	0	1	1	1
15	2225,858	22,25858	47,17899851	4,7		0	0	1	1	1	1
16	5994,154	59,94154	77,42192067	7,7		0	1	1	1	1	1
17	5404,241	54,04241	73,51354093	7,4		0	1	1	1	1	1
18	3355,784	33,55784	57,92912825	5,8		0	1	1	1	1	1
19	3071,037	30,71037	55,41693423	5,5		0	1	1	1	1	1
20	6243,38	62,4338	79,01505996	7,9		0	1	1	1	1	1
21	2968,471	29,68471	54,48367187	5,4		0	0	1	1	1	1
22	9124,014	91,24014	95,51970477	9,6		0	1	1	1	1	1
23	1242,993	12,42993	35,25611011	3,5		0	0	0	1	1	1
24	1158,558	11,58558	34,03759245	3,4		0	0	0	0	1	1
25	718,1914	7,181914	26,79909327	2,7		0	0	0	0	0	1
26	848,8102	8,488102	29,13434743	2,9		0	0	0	0	1	1
27	11309,71	113,0971	106,3471194	10,6		0	1	1	1	1	1
28	4693,276	46,93276	68,50748499	6,9		0	1	1	1	1	1
29	2021,75	20,2175	44,9638755	4,5		0	0	1	1	1	1
30	1648,673	16,48673	40,60385942	4,1		0	0	0	1	1	1
31	828,7896	8,287896	28,78870612	2,9		0	0	0	0	1	1
32	1884,043	18,84043	43,40556301	4,3		0	0	1	1	1	1
33	2387,363	23,87363	48,86064981	4,9		0	0	1	1	1	1
34	1249,061	12,49061	35,34205003	3,5		0	0	0	1	1	1
35	1773,845	17,73845	42,11704287	4,2		0	0	1	1	1	1
36	5456,562	54,56562	73,86854202	7,4		0	1	1	1	1	1
37	4061,985	40,61985	63,7337038	6,4		0	1	1	1	1	1
38	1389,999	13,89999	37,28269035	3,7		0	0	0	1	1	1
39	803,423	8,03423	28,34471732	2,8		0	0	0	0	1	1
40	1029,025	10,29025	32,07842577	3,2		0	0	0	0	1	1
Média	2642,2	26,422	47,95653248	4,8	Σ	0	10	20	30	39	40
Mediana	1708,21	17,0821	41,33029738	4,1	% Retida Acumulada	0%	25%	50%	75%	98%	100%
Quartil 0 (0%)	718,19	7,18	26,80	2,68							
Quartil 1 (25%)	1237,00	12,37	35,17	3,52							
Quartil 2 (50%)	1708,21	17,08	41,33	4,13							
Quartil 3 (75%)	2994,11	29,94	54,72	5,47							
Quartil 4 (100%)	11309,71	113,10	106,35	10,63							

Malha da Foto 2; Teste 2

Tabela 17: Resultado da mensuração dos blocos e definição da malha da Foto 3 do Teste 2 (finos)

Mensuração dos Blocos da Foto 3					Malha a partir dos quartis definidos [cm]						
N° Bloco	A[mm²]	A[cm²]	Malha [mm]	Malha [cm]		8,0	4,8	4,2	3,8	3,1	2,5
1	2205,237	22,05237	46,95995315	4,7	Análise do tamanho do bloco para composição da curva de distribuição granulométrica - % Retida Acumulada	0	0	1	1	1	1
2	1763,053	17,63053	41,98872706	4,2		0	0	0	1	1	1
3	1761,739	17,61739	41,97307232	4,2		0	0	0	1	1	1
4	1362,75	13,6275	36,91544799	3,7		0	0	0	0	1	1
5	3696,404	36,96404	60,79805753	6,1		0	1	1	1	1	1
6	1366,848	13,66848	36,97090342	3,7		0	0	0	0	1	1
7	1751,361	17,51361	41,84926045	4,2		0	0	0	1	1	1
8	6429,479	64,29479	80,18403457	8,0		0	1	1	1	1	1
9	6082,243	60,82243	77,98873893	7,8		0	1	1	1	1	1
10	4780,119	47,80119	69,13840611	6,9		0	1	1	1	1	1
11	1224,509	12,24509	34,99298072	3,5		0	0	0	0	1	1
12	2282,761	22,82761	47,77825133	4,8		0	0	1	1	1	1
13	1786,421	17,86421	42,26606913	4,2		0	0	0	1	1	1
14	4052,31	40,5231	63,65775287	6,4		0	1	1	1	1	1
15	1481,25	14,8125	38,4870069	3,8		0	0	0	1	1	1
16	1885,184	18,85184	43,41870795	4,3		0	0	1	1	1	1
17	2249,638	22,49638	47,43034366	4,7		0	0	1	1	1	1
18	2276,63	22,7663	47,7140472	4,8		0	0	1	1	1	1
19	5683,593	56,83593	75,38960936	7,5		0	1	1	1	1	1
20	1305,372	13,05372	36,12993772	3,6		0	0	0	0	1	1
21	1541,338	15,41338	39,25987901	3,9		0	0	0	1	1	1
22	2435,717	24,35717	49,35298471	4,9		0	1	1	1	1	1
23	2565,311	25,65311	50,64889535	5,1		0	1	1	1	1	1
24	1335,927	13,35927	36,55032968	3,7		0	0	0	0	1	1
25	1850,573	18,50573	43,01828797	4,3		0	0	1	1	1	1
26	1438,214	14,38214	37,92379332	3,8		0	0	0	0	1	1
27	1749,693	17,49693	41,82933301	4,2		0	0	0	1	1	1
28	2180,465	21,80465	46,6954516	4,7		0	0	1	1	1	1
29	3462,736	34,62736	58,84501848	5,9		0	1	1	1	1	1
30	1020,265	10,20265	31,94158262	3,2		0	0	0	0	1	1
31	2730,661	27,30661	52,25572792	5,2		0	1	1	1	1	1
32	1784,653	17,84653	42,24515002	4,2		0	0	0	1	1	1
33	1384,983	13,84983	37,21535301	3,7		0	0	0	0	1	1
34	1390,265	13,90265	37,28625484	3,7		0	0	0	0	1	1
35	974,1897	9,741897	31,21201211	3,1		0	0	0	0	0	1
36	1822,205	18,22205	42,68729319	4,3		0	0	1	1	1	1
37	1861,968	18,61968	43,15052491	4,3		0	0	1	1	1	1
38	1816,209	18,16209	42,6170013	4,3		0	0	1	1	1	1
39	1534,16	15,3416	39,16835202	3,9		0	0	0	1	1	1
40	1764,164	17,64164	42,00194995	4,2		0	0	0	1	1	1
Média	2301,765	23,01765	46,44841209	4,6	Σ	0	10	20	30	39	40
Mediana	1801,315	18,01315	42,44153522	4,2	% Retida Acumulada	0%	25%	50%	75%	98%	100%
Quartil 0 (0%)	974,19	9,74	31,21	3,12							
Quartil 1 (25%)	1470,49	14,70	38,35	3,83							
Quartil 2 (50%)	1801,31	18,01	42,44	4,24							
Quartil 3 (75%)	2321,00	23,21	48,17	4,82							
Quartil 4 (100%)	6429,48	64,29	80,18	8,02							

Malha da Foto 3; Teste 2

Tabela 18: Resultado da mensuração dos blocos e definição da malha da Foto 4 do Teste 2 (finos)

Mensuração dos Blocos da Foto 4					Malha a partir dos quartis definidos [cm]						
N° Bloco	A[mm²]	A[cm²]	Malha [mm]	Malha [cm]		12,2	5,4	4,1	3,6	3,0	2,5
1	1907,041	19,07041	43,66968056	4,4	Análise do tamanho do bloco para composição da curva de distribuição granulométrica - % Retida Acumulada	0	0	1	1	1	1
2	1281,471	12,81471	35,79763959	3,6		0	0	0	0	1	1
3	14825,2	148,252	121,7587939	12,2		0	1	1	1	1	1
4	2822,727	28,22727	53,12934406	5,3		0	0	1	1	1	1
5	5483,51	54,8351	74,05072653	7,4		0	1	1	1	1	1
6	3873,857	38,73857	62,24031973	6,2		0	1	1	1	1	1
7	5742,565	57,42565	75,77971364	7,6		0	1	1	1	1	1
8	2936,625	29,36625	54,19063941	5,4		0	1	1	1	1	1
9	1712,898	17,12898	41,38716951	4,1		0	0	1	1	1	1
10	1986,942	19,86942	44,57512311	4,5		0	0	1	1	1	1
11	3478,376	34,78376	58,97775598	5,9		0	1	1	1	1	1
12	1143,451	11,43451	33,81495084	3,4		0	0	0	0	1	1
13	1322,862	13,22862	36,37116715	3,6		0	0	0	1	1	1
14	2149,193	21,49193	46,35938416	4,6		0	0	1	1	1	1
15	2883,53	28,8353	53,69851115	5,4		0	0	1	1	1	1
16	2921,541	29,21541	54,05127843	5,4		0	0	1	1	1	1
17	7292,36	72,9236	85,39531486	8,5		0	1	1	1	1	1
18	1318,651	13,18651	36,31324001	3,6		0	0	0	1	1	1
19	1215,154	12,15154	34,85906338	3,5		0	0	0	0	1	1
20	3148,555	31,48555	56,11198713	5,6		0	1	1	1	1	1
21	1961,909	19,61909	44,29343631	4,4		0	0	1	1	1	1
22	1308,664	13,08664	36,17545715	3,6		0	0	0	1	1	1
23	1145,186	11,45186	33,8405984	3,4		0	0	0	0	1	1
24	875,3598	8,753598	29,58648002	3,0		0	0	0	0	0	1
25	2098,912	20,98912	45,8138789	4,6		0	0	1	1	1	1
26	1566,481	15,66481	39,57879735	4,0		0	0	0	1	1	1
27	1364,978	13,64978	36,94560596	3,7		0	0	0	1	1	1
28	1145,312	11,45312	33,84246149	3,4		0	0	0	0	1	1
29	1409,199	14,09199	37,53929674	3,8		0	0	0	1	1	1
30	1125,985	11,25985	33,55569847	3,4		0	0	0	0	1	1
31	900,8003	9,008003	30,01333537	3,0		0	0	0	0	1	1
32	1174,231	11,74231	34,26705123	3,4		0	0	0	0	1	1
33	1043,824	10,43824	32,30826674	3,2		0	0	0	0	1	1
34	1893,686	18,93686	43,51649687	4,4		0	0	1	1	1	1
35	2975,67	29,7567	54,54970119	5,5		0	1	1	1	1	1
36	3067,53	30,6753	55,38528956	5,5		0	1	1	1	1	1
37	1424,759	14,24759	37,74598389	3,8		0	0	0	1	1	1
38	1662,193	16,62193	40,77000123	4,1		0	0	0	1	1	1
39	1496,215	14,96215	38,68094234	3,9		0	0	0	1	1	1
40	1281,94	12,8194	35,80418411	3,6		0	0	0	1	1	1
Média	2509,234	25,09234	46,91861916	4,7	Σ	0	10	20	30	39	40
Mediana	1687,545	16,87545	41,07858537	4,1	% Retida Acumulada	0%	25%	50%	75%	98%	100%
Quartil 0 (0%)	875,36	8,75	29,59	2,96							
Quartil 1 (25%)	1281,82	12,82	35,80	3,58							
Quartil 2 (50%)	1687,55	16,88	41,08	4,11							
Quartil 3 (75%)	2925,31	29,25	54,09	5,41							
Quartil 4 (100%)	14825,20	148,25	121,76	12,18							

Malha da Foto 4; Teste 2

Na Figura 42 segue apresentado o gráfico de distribuição de tamanhos dos blocos do Teste 1. No gráfico fica evidenciado a variabilidade nos tamanhos. Na Figura 43 é apresentado o gráfico composto pelas curvas de distribuição granulométrica da alimentação da britagem terciária para cada amostragem (foto) realizada no Teste 1. É possível observar que as maiores variações ocorrem, como esperado, nos maiores tamanhos (acima de 80mm).

Isto se dá devido a irregularidade dos blocos, já que são compostos por material mais compacto. Para os menores tamanhos, apesar da variação ocorrer, esta foi considerada desprezível visto que as curvas seguem uma mesma tendência. Entre 80mm e 100mm as curvas ficam muito próximas umas das outras, com retido acumulado em 80mm de aproximadamente 20%.

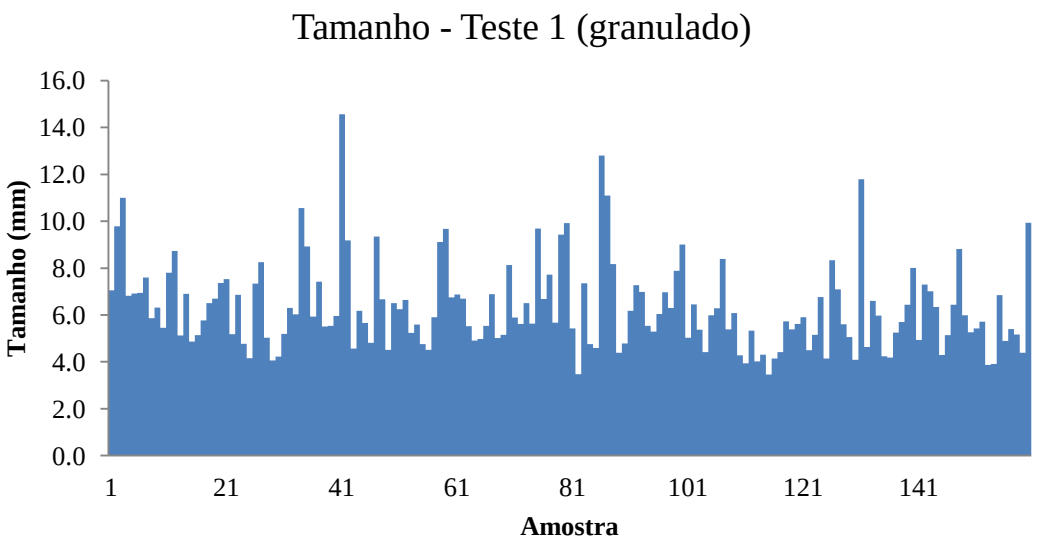

Figura 42: Distribuição dos tamanhos das amostras do Teste 1.
Fonte: Elaborada pelo autor

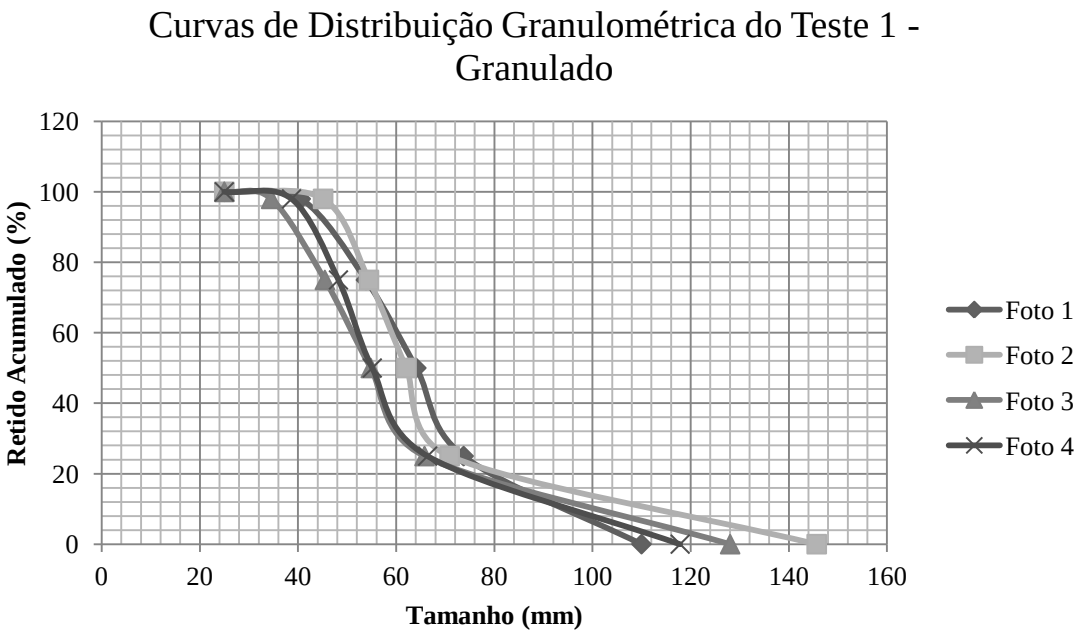

Figura 43: Curvas de Distribuição Granulométrica de Alimentação da Britagem Terciária de cada amostragem realizada no Teste 1.
Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 44 está apresentado o gráfico de distribuição de tamanhos dos blocos do Teste 2, evidenciando a variabilidade nos tamanhos. No entanto, esta variabilidade se torna relativamente menor quando comparado ao Teste 1. Na Figura 45 segue o gráfico composto pelas curvas de distribuição granulométrica da alimentação da britagem terciária para cada amostragem (foto) realizada no Teste 2. No gráfico, a variação entre as curvas para tamanhos abaixo de 50mm foi desprezível para as quatro imagens analisadas. Para os menores tamanhos todas as quatro curvas estão muito próximas umas das outras e seguem uma mesma tendência. As maiores variações ocorrem, como esperado, nos maiores tamanhos (acima de 50mm), devido a irregularidade dos blocos. Em 50mm as curvas possuem retido acumulado de, aproximadamente, 30%.

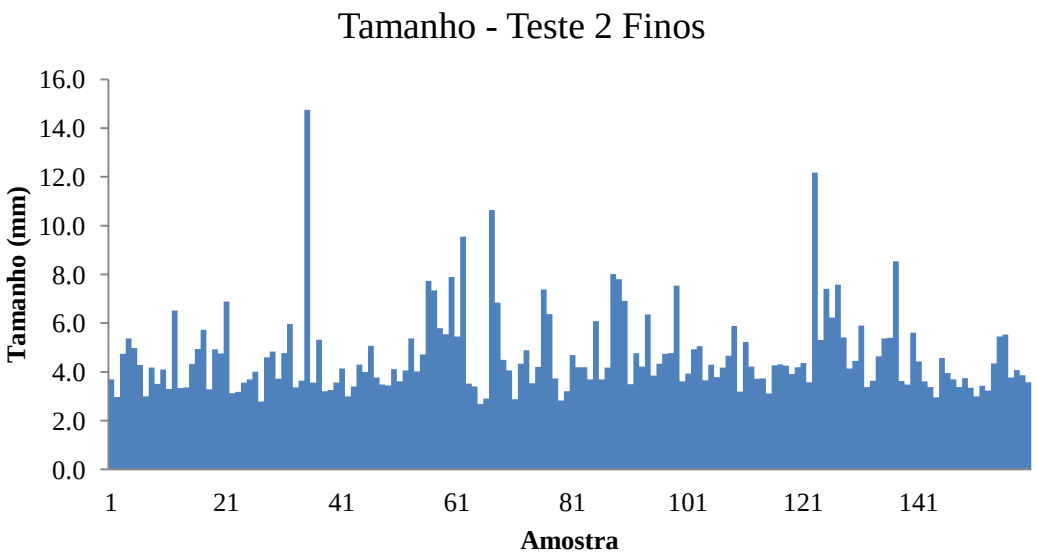

Figura 44: Distribuição dos tamanhos das amostras do Teste 2.
Fonte: Elaborada pelo autor

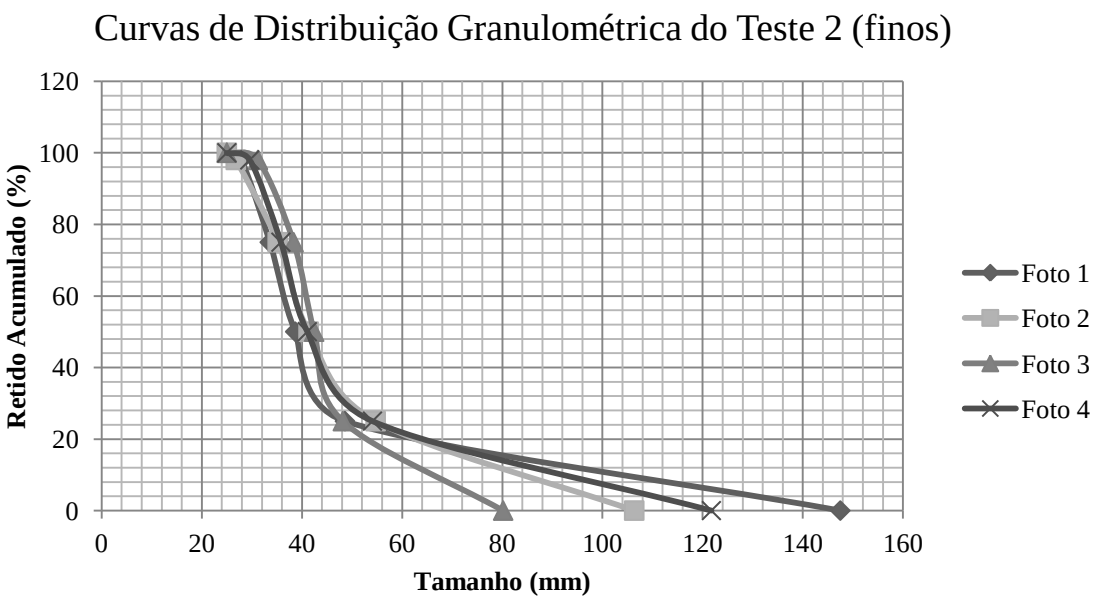

Figura 45: Curvas de Distribuição Granulométrica de Alimentação da Britagem Terciária de cada amostragem realizada no Teste 2.
Fonte: Elaborada pelo autor

As Tabelas 19 (Teste 1) e 20 (Teste 2) permitem a criação de um resumo estatístico dos valores médios dos dados obtidos nas amostragens realizadas. Neste resumo estão apresentados o desvio padrão, mostrando o quanto de variação ou "dispersão" existe em relação à média (ou valor esperado) e o coeficiente de variação. O coeficiente de variação fornece a variação dos dados obtidos em relação à média. Quanto menor for o seu valor, mais homogêneos serão os dados.

Em ambas as tabelas é possível observar que os maiores valores de coeficientes de variação estão localizados nos blocos de maiores tamanhos. Sendo assim, como esperado, a maior variabilidade ocorre no quartil superior (100%). Para as análises do Teste 1 a máxima variação ocorre para Q100 (12%) enquanto que a mínima em Q75 (5%). Já para as análises do Teste 2 a máxima ocorre para Q100 (25%) enquanto que a mínima em Q50 (4%). Com relação às áreas dos blocos e aos dos quartis Q0, Q25, Q50 e Q75, houve pequena variação quando comparados os testes, no entanto, é possível perceber que estas mantiveram uma maior tendência e menor variabilidade no Teste 2 quando comparado ao Teste 1, sendo, desta forma, mais acurada e precisa. Já para os maiores tamanhos, Q100, estas foram mais acuradas e precisas para o Teste 1. Isto pode ser compreendido novamente devido à heterogeneidade presente no depósito.

Tabela 19: Resumo estatístico das curvas de distribuição granulométrica geradas no Teste 1

FOTO	N° Blocos	Área média [cm²]	Q0	Q25	Q50	Q75	Q100	Mediana
1	40	45.98	4.06	5.38	6.41	7.38	11.01	41.13
2	40	49.29	4.51	5.45	6.21	7.09	14.57	38.59
3	40	39.18	3.45	4.55	5.48	6.58	12.81	30.08
4	40	37.74	3.87	4.83	5.52	6.64	11.79	30.43
	Média	43.05	3.97	5.05	5.91	6.92	12.54	35.06
	Desvio	5.50	0.44	0.44	0.48	0.38	1.54	5.64
	2Desvio	11.00	0.88	0.87	0.95	0.76	3.08	11.29
	3Desvio	16.50	1.32	1.31	1.43	1.14	4.61	16.93
	CV	13%	11%	9%	8%	5%	12%	16%

Tabela 20: Resumo estatístico das curvas de distribuição granulométrica geradas no Teste 2

FOTO	N° Blocos	Área média [cm²]	Q0	Q25	Q50	Q75	Q100	Mediana
1	40	24.91	2.79	3.36	3.87	4.86	14.75	14.97
2	40	26.42	2.68	3.52	4.13	5.47	10.63	17.08
3	40	23.02	3.12	3.83	4.24	4.82	8.02	18.01
4	40	25.09	2.96	3.58	4.11	5.41	12.18	16.88
	Média	24.86	2.89	3.57	4.09	5.14	11.89	16.74
	Desvio	1.40	0.19	0.20	0.16	0.35	3.66	1.28
	2Desvio	2.80	0.39	0.40	0.32	0.70	7.32	2.55
	3Desvio	4.20	0.58	0.59	0.48	1.05	10.99	3.83
	CV	6%	7%	6%	4%	7%	25%	8%

Diante do exposto acima, cada imagem gera uma curva de distribuição granulométrica que, juntas, originarão uma curva média dos ensaios do dia. As curvas finais (médias do dia) baseada em um teste em usina operando nas mesmas condições que a de Conceição e com material classificado como itabirito compacto. A curva de projeto foi fornecida pela Vale a partir de um ensaio onde foram utilizadas 5.000 toneladas de material.

A Figura 46 apresenta o gráfico contendo as curvas médias por teste e a curva de projeto. Os resultados dos dois testes mostraram grande variação na granulometria da alimentação dos britadores terciários. Isto já era esperado visto que um teste foi realizado com material friável enquanto outro ocorreu com granulado. É possível observar que a curva de projeto se aproximou da curva dos finos com retido acumulado em aproximadamente 90% (~30mm) e próximo a 15% (~70mm). Com relação ao material granulado, a curva de projeto se aproximou no retido acumulado entre 30 e 40% (~60mm), região de baixa variabilidade de dados.

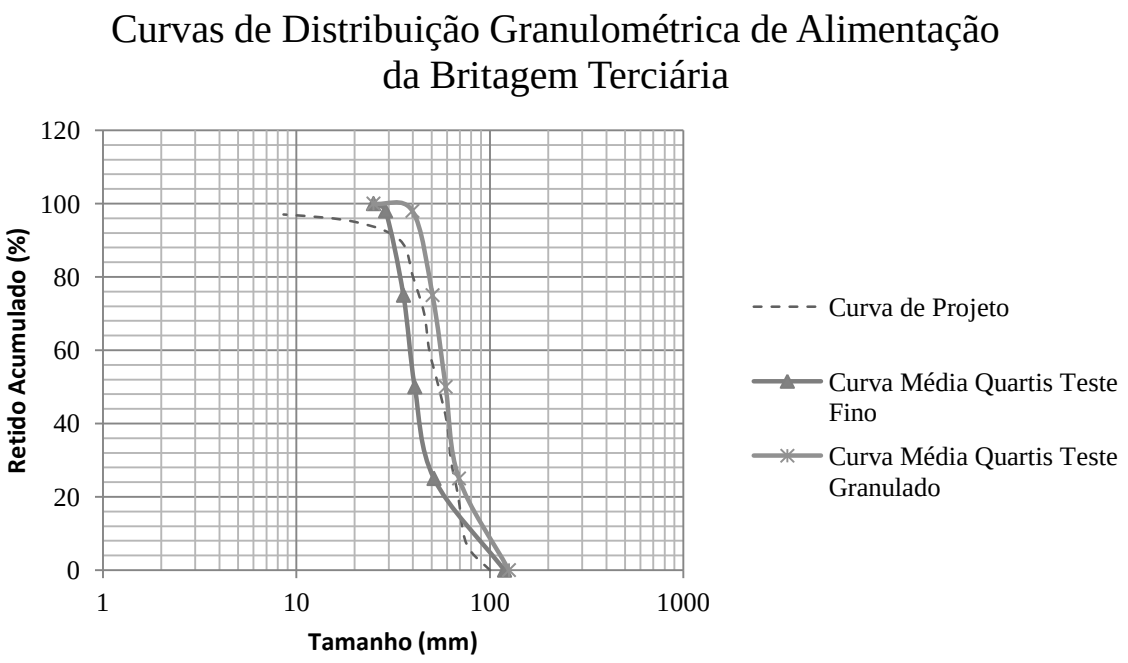

Figura 46: Curvas de Distribuição Granulométrica da Alimentação da Etapa de Britagem Terciária - Retido Acumulado (%) na malha (mm) para teste granulados e finos, em escala logarítmica.
Fonte: Elaborada pelo autor

Com relação à abertura dos britadores terciários que processam o minério, as curvas mostram que menos de 10% do material retido está acima de 1cm. Isto significa que o tamanho máximo dos blocos, tanto de itabirito friável quanto compacto, para esta operação, atende às especificações técnicas (dimensionamento).

As análises para ambas as curvas foram realizadas de acordo com as especificações técnicas dos equipamentos de britagem terciária, APA e APF, 63mm e 32mm. No Teste 1 (granulado), a curva média mostra retidos de aproximadamente 28% em APA e praticamente 100% em APF, ou seja, 72% do material ficou restrito a esta faixa de tamanho. Existe 100% do material, portanto, retido em APF. Isto confirma a hipótese de diminuição de produtividade, uma vez que todo o material que está sendo alimentado precisa, necessariamente, ser britado para atingir a granulometria desejada para a concentração do minério (32mm). No Teste 2 (fino), foram identificados retidos de cerca de 90% em APF e 16% em APA, estando 74% do material restrito a esta faixa de tamanho. A partir desta análise é possível perceber o impacto que esta operação sofre com a heterogeneidade do material.

Os resultados obtidos nesta pesquisa são entendidos como coerentes a partir do momento em que são relacionados com a heterogeneidade existente no depósito de

Conceição. As fotos 47 e 48 apresentam variabilidades de litologias. Na foto 47 está apresentado a presença de itabirito intercalado com xisto verde e na foto 48, itabirito com xisto decomposto, itabirito estéril no caso. A heterogeneidade do minério impacta diretamente na fragmentação do mesmo. Na maioria dos casos ocorre a geração de uma grande quantidade de finos, enquanto em outras o que ocorre é uma dominância de grosseiros com formação de muitos matacos (Fotos 49 e 50).

Figura 47: Intercalação de xisto verde em itabirito.
Fonte: Fotografia tirada na Vale S.A.

Figura 48: Itabirito estéril.
Fonte: Fotografia tirada na Vale S.A.

Figura 49: Pilha ROM com a presença de blocos de grande porte.
Fonte: Fotografia tirada na Vale S.A.

Figura 50: Evidência da presença de matacos no carregamento de equipamento para alimetação da britagem primária.
Fonte: Fotografia tirada na Vale S.A.

Com relação ao Teste 1 que ocorreu com material granulado, o ROM foi proveniente de frentes de lavra classificadas como IC. Para este tipo de material foi desenvolvido o Projeto Itabiritos, que estava em fase de implantação na época dos testes desta pesquisa. O Projeto Itabiritos foi desenvolvido devido a probabilidade de mudanças na curva

granulométrica do ROM para os próximos 5 anos. Essas mudanças estão previstas com base na composição litotípica e também nas amostragens realizadas pela Vale e pela Fundação Luiz Englert. A Figura 51 apresenta um fluxo esquemático do Projeto Itabiritos. A Figura 52 apresenta um gráfico mostrando a composição prevista da mina de Conceição entre o período de 2014 a 2018.

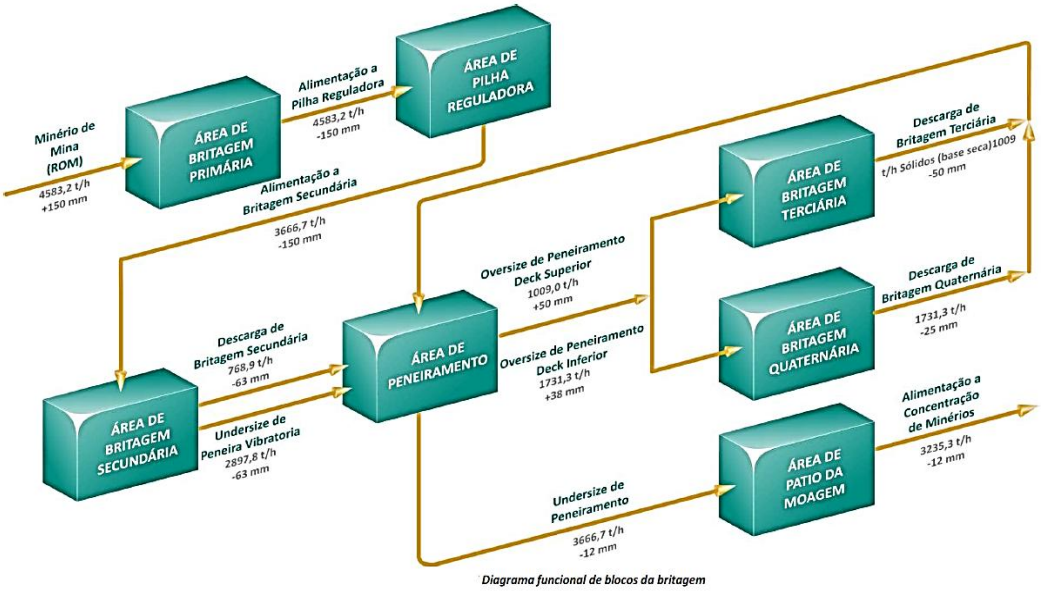

Figura 51: Fluxo esquemático do Projeto Itabiritos.
Fonte: Vale S.A.

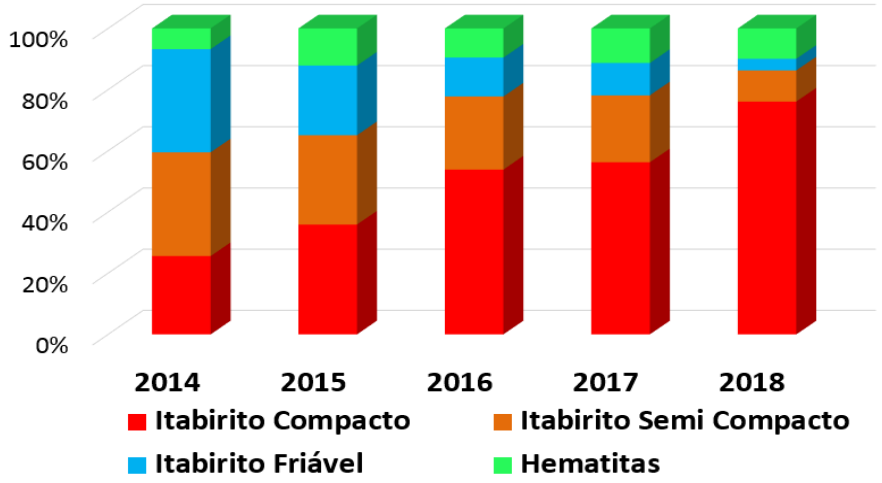

Figura 52: Composição da mina de Conceição.
Fonte: Vale S.A.

Na Figura 53 estão marcados em amarelo as frentes que alimentaram a britagem no Teste 1. Logo após segue a Tabela 21 apresentando em detalhes a origem e o destino das frentes que alimentaram a usina de conceição em 21 de janeiro de 2014 (Teste 1). A elipse em

vermelho dá destaque ao material alimentado na faixa de tempo que ocorreram as filmagens para extração das fotos consideradas como amostragem desta pesquisa. Com respeito à faixa específica do teste, o ROM teve origem na frente 1120, seguido da bancada 1015 e, após, da bancada 850, composta por material mais friável utilizado para "suavizar" a granulometria. Vale salientar que a bancada predominante durante o Teste foi a 1120. Na Figura 54 são mostrados em sequência os mapas (modelos de blocos com classificação litotípica) das referidas frentes enquanto que na Figura 55 segue a tabela litológica do complexo de Itabira.

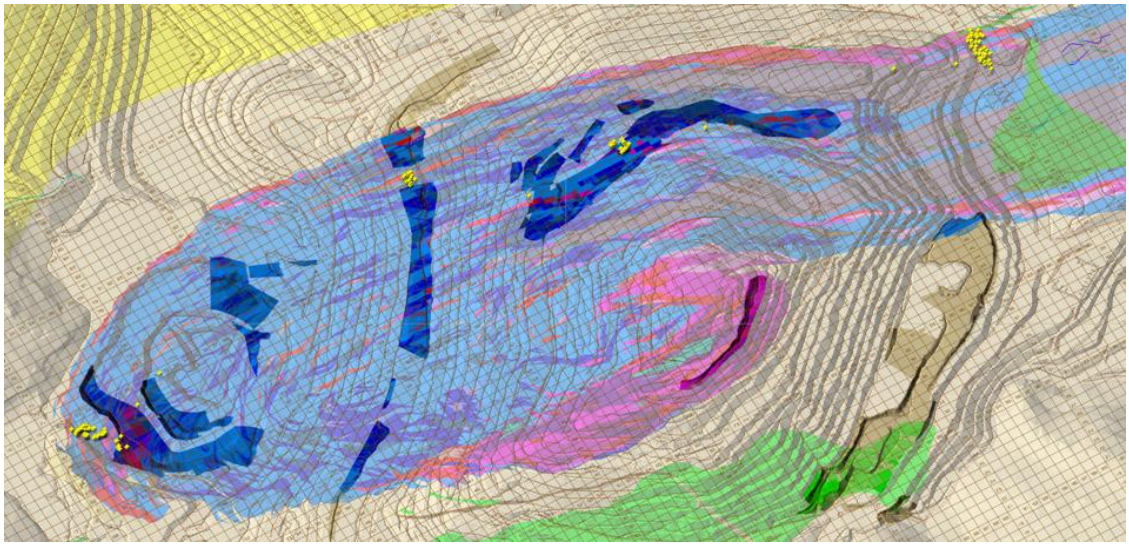

Figura 53: Frentes de lavra utilizadas para alimentação da britagem em 21.01.14 (Teste 1).
Fonte: Vale S.A.

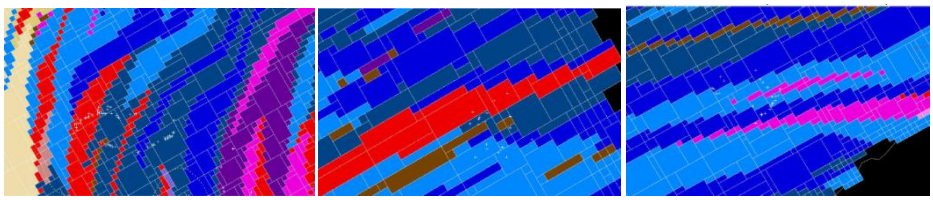

Figura 54: Mapeamento sequencial das frentes de bancada: ROM do teste de 21.01.14 - Bancada 1120(Hematita compacta + Itabirito compacto), Bancada 1015 (Hematita compacta + itabirito compacto + friável) e Bancada 850 (Itabirito semi-compacto + friável) respectivamente.
Fonte: Vale S.A.

Tabela Litólogica - Complexo Itabira								
Descrição	**Litologia**	**FeGl**	**MnGl**	**Fe +8mm**	**+8mm**	**-0.15mm**	**MgO**	**CaO**
Hematita Compacta	HC	>=63%	<0.5%		>=70%			
Hematita Friável	HF	>=63%	<0.5%		<70%	<60%		
Hematita Manganesífera	HMN	>=63%	>=0.5%					
Hematita Pulverulenta	HP	>=63%	<0.5%			>=60%	>=5%	>=5%
Itabirito Compacto	IC	% =< X <63	<0.5%		>=80%			
Itabirito Semi-Compacto	IS	% =< X <63	<0.5%	30% =< X <80%				
Itabirito Friável	IF	% =< X <63	<0.5%		<30%			
Itabirito Manganesífero	IMN	<63%	>=0.5%					
Itabirito-Hematítico	IH	% =< X <63	<0.5%	>=63%	>=30%			

Figura 55: Litologias do complexo de Itabira.
Fonte: Vale S.A.

Tabela 21 : Origem e o destino das frentes que alimentaram a usina em 21 de janeiro

PRODUÇÃO DAS MINAS PARA PILHA

Periodo para importação: 21/01/2014 a 21/01/2014

Complexo: CONCEICAO
Local Basculo:

Importar

Complexo	Dia	Hora	Região	Banco	X	Y	Material	Local	Bloco	Tipo_Local	FrenteLavra
CONCEICAO	21/jan	1	CE	1120	023	068	IT	BRIT-CE-IT	CE-023-068-1120/IT	Britador	1120-023-068
CONCEICAO	21/jan	1	CE	0865	078	069	IT	BRIT-CE-IT	CE-078-069-0865/IT	Britador	0865-078-069
CONCEICAO	21/jan	1	CE	0865	079	069	IT	BRIT-CE-IT	CE-079-069-0865/IT	Britador	0865-079-069
CONCEICAO	21/jan	2	CE	1120	023	068	IT	BRIT-CE-IT	CE-023-068-1120/IT	Britador	1120-023-068
CONCEICAO	21/jan	2	CE	0865	078	069	IT	BRIT-CE-IT	CE-078-069-0865/IT	Britador	0865-078-069
CONCEICAO	21/jan	2	CE	0865	079	069	IT	BRIT-CE-IT	CE-079-069-0865/IT	Britador	0865-079-069
CONCEICAO	21/jan	3	CE	1120	022	069	IT	BRIT-CE-IT	CE-022-069-1120/IT	Britador	1120-022-069
CONCEICAO	21/jan	3	CE	1120	025	065	IT	BRIT-CE-IT	CE-025-065-1120/IT	Britador	1120-025-065
CONCEICAO	21/jan	3	CE	1120	025	066	IT	BRIT-CE-IT	CE-025-066-1120/IT	Britador	1120-025-066
CONCEICAO	21/jan	4	CE	1120	022	069	IT	BRIT-CE-IT	CE-022-069-1120/IT	Britador	1120-022-069
CONCEICAO	21/jan	4	CE	1120	025	066	IT	BRIT-CE-IT	CE-025-066-1120/IT	Britador	1120-025-066
CONCEICAO	21/jan	5	CE	1120	023	069	IT	BRIT-CE-IT	CE-023-069-1120/IT	Britador	1120-023-069
CONCEICAO	21/jan	5	CE	0865	079	069	IT	BRIT-CE-IT	CE-079-069-0865/IT	Britador	0865-079-069
CONCEICAO	21/jan	5	CE	1120	024	065	IT	BRIT-CE-IT	CE-024-065-1120/IT	Britador	1120-024-065
CONCEICAO	21/jan	6	CE	1120	023	069	IT	BRIT-CE-IT	CE-023-069-1120/IT	Britador	1120-023-069
CONCEICAO	21/jan	6	CE	0865	079	069	IT	BRIT-CE-IT	CE-079-069-0865/IT	Britador	0865-079-069
CONCEICAO	21/jan	6	CE	0865	079	070	IT	BRIT-CE-IT	CE-079-070-0865/IT	Britador	0865-079-070
CONCEICAO	21/jan	8	CE	1120	023	069	IT	BRIT-CE-IT	CE-023-069-1120/IT	Britador	1120-023-069
CONCEICAO	21/jan	8	CE	0865	078	070	IT	BRIT-CE-IT	CE-078-070-0865/IT	Britador	0865-078-070
CONCEICAO	21/jan	9	CE	1120	023	069	IT	BRIT-CE-IT	CE-023-069-1120/IT	Britador	1120-023-069
CONCEICAO	21/jan	9	CE	0865	078	070	IT	BRIT-CE-IT	CE-078-070-0865/IT	Britador	0865-078-070
CONCEICAO	21/jan	10	CE	1120	024	069	IT	BRIT-CE-IT	CE-024-069-1120/IT	Britador	1120-024-069
CONCEICAO	21/jan	11	CE	1120	024	068	IT	BRIT-CE-IT	CE-024-068-1120/IT	Britador	1120-024-068
CONCEICAO	21/jan	11	CE	0865	077	070	IT	BRIT-CE-IT	CE-077-070-0865/IT	Britador	0865-077-070
CONCEICAO	21/jan	11	CE	0865	078	070	IT	BRIT-CE-IT	CE-078-070-0865/IT	Britador	0865-078-070
CONCEICAO	21/jan	12	CE	1120	023	068	IT	BRIT-CE-IT	CE-023-068-1120/IT	Britador	1120-023-068
CONCEICAO	21/jan	12	CE	1120	024	067	IT	BRIT-CE-IT	CE-024-067-1120/IT	Britador	1120-024-067
CONCEICAO	21/jan	12	CE	1120	024	068	IT	BRIT-CE-IT	CE-024-068-1120/IT	Britador	1120-024-068
CONCEICAO	21/jan	12	CE	0865	077	070	IT	BRIT-CE-IT	CE-077-070-0865/IT	Britador	0865-077-070
CONCEICAO	21/jan	12	CE	EST-IT-CE-36			OM	BRIT-CE-IT	EST-IT-CE-36/IT	Britador	EST-IT-CE-36

CONCEICAO	21/jan	13	CE	1120	024	067	IT	BRIT-CE-IT	CE-024-067-1120/IT	Britador	1120-024-067
CONCEICAO	21/jan	13	CE	1120	024	068	IT	BRIT-CE-IT	CE-024-068-1120/IT	Britador	1120-024-068
CONCEICAO	21/jan	13	CE	EST-IT-CE-36			OM	BRIT-CE-IT	EST-IT-CE-36/IT	Britador	EST-IT-CE-36
CONCEICAO	21/jan	14	CE	1120	024	067	IT	BRIT-CE-IT	CE-024-067-1120/IT	Britador	1120-024-067
CONCEICAO	21/jan	14	CE	EST-IT-CE-36			OM	BRIT-CE-IT	EST-IT-CE-36/IT	Britador	EST-IT-CE-36
CONCEICAO	21/jan	15	CE	1015	061	075	IT	BRIT-CE-IT	CE-061-075-1015/IT	Britador	1015-061-075
CONCEICAO	21/jan	15	CE	1120	024	067	IT	BRIT-CE-IT	CE-024-067-1120/IT	Britador	1120-024-067
CONCEICAO	21/jan	15	CE	EST-IT-CE-36			OM	BRIT-CE-IT	EST-IT-CE-36/IT	Britador	EST-IT-CE-36
CONCEICAO	21/jan	18	CE	1015	060	075	IT	BRIT-CE-IT	CE-060-075-1015/IT	Britador	1015-060-075
CONCEICAO	21/jan	18	CE	1015	061	075	IT	BRIT-CE-IT	CE-061-075-1015/IT	Britador	1015-061-075
CONCEICAO	21/jan	18	CE	0865	079	069	IT	BRIT-CE-IT	CE-079-069-0865/IT	Britador	0865-079-069
CONCEICAO	21/jan	19	CE	1015	060	075	IT	BRIT-CE-IT	CE-060-075-1015/IT	Britador	1015-060-075
CONCEICAO	21/jan	19	CE	EST-IT-CE-36			OM	BRIT-CE-IT	EST-IT-CE-36/IT	Britador	EST-IT-CE-36
CONCEICAO	21/jan	20	CE	EST-IT-CE-36			OM	BRIT-CE-IT	EST-IT-CE-36/IT	Britador	EST-IT-CE-36
CONCEICAO	21/jan	21	CE	1120	023	069	IT	BRIT-CE-IT	CE-023-069-1120/IT	Britador	1120-023-069
CONCEICAO	21/jan	22	CE	1015	061	076	IT	BRIT-CE-IT	CE-061-076-1015/IT	Britador	1015-061-076
CONCEICAO	21/jan	22	CE	1120	023	069	IT	BRIT-CE-IT	CE-023-069-1120/IT	Britador	1120-023-069
CONCEICAO	21/jan	22	CE	0850	082	068	IT	BRIT-CE-IT	CE-082-068-0850/IT	Britador	0850-082-068
CONCEICAO	21/jan	22	CE	EST-IT-CE-36			OM	BRIT-CE-IT	EST-IT-CE-36/IT	Britador	EST-IT-CE-36
CONCEICAO	21/jan	23	CE	1015	061	076	IT	BRIT-CE-IT	CE-061-076-1015/IT	Britador	1015-061-076
CONCEICAO	21/jan	23	CE	1120	023	069	IT	BRIT-CE-IT	CE-023-069-1120/IT	Britador	1120-023-069
CONCEICAO	21/jan	23	CE	EST-IT-CE-36			OM	BRIT-CE-IT	EST-IT-CE-36/IT	Britador	EST-IT-CE-36
CONCEICAO	21/jan	24	CE	1015	061	076	IT	BRIT-CE-IT	CE-061-076-1015/IT	Britador	1015-061-076
CONCEICAO	21/jan	24	CE	1120	024	068	IT	BRIT-CE-IT	CE-024-068-1120/IT	Britador	1120-024-068
CONCEICAO	21/jan	24	CE	0850	086	067	IT	BRIT-CE-IT	CE-086-067-0850/IT	Britador	0850-086-067

Na Figura 56 estão apresentadas a produção (ROM, t/h) em verde e a carga circulante (t/h) em azul algumas horas antes do teste. É possível observar que a produção máxima variou de, aproximadamente, 4.000t/h até 2.600t/h. A carga circulante, cujo valor máximo teórico permitido é de 1.500t/h, excedeu, chegando a 1.518t/h. Na Figura 56 está apresentada uma queda máxima na produção, atingindo 2.000t/h, enquanto que a carga circulante se mantinha em torno de 1.500t/h.

A elevada carga circulante nas etapas de britagem e, consequentemente, quedas na produção (ROM) com elevada quantidade de grosseiros (>31mm) têm sido contornados com a interrupção do basculamento dos caminhões no britador primário, visto que, em função da alta carga circulante, as pilhas pulmão tem atingido seu nível máximo de estocagem.

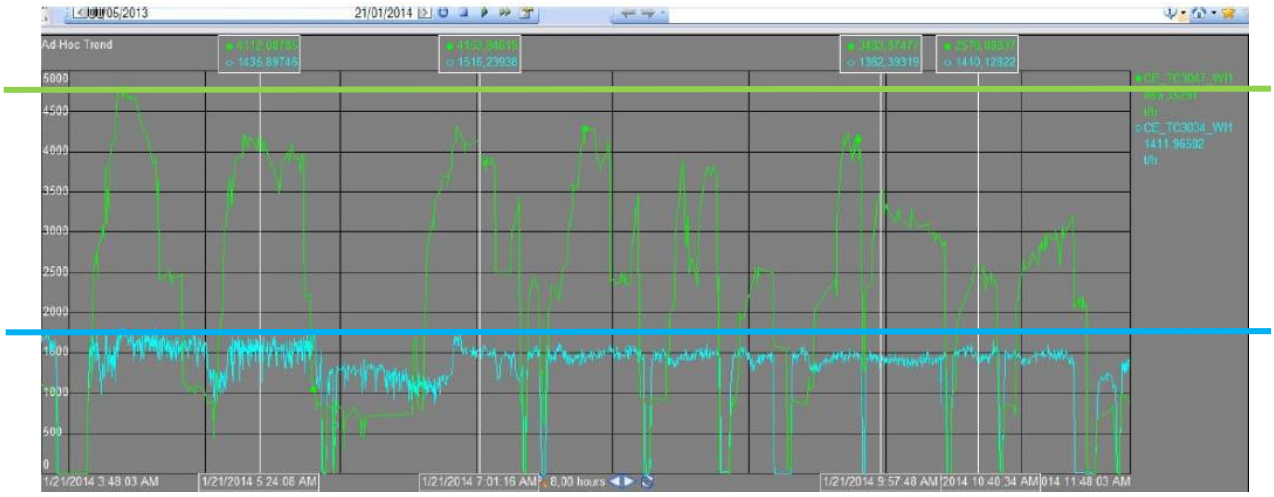

Figura 56: Dados sobre produção (ROM, t/h, em verde) versus carga circulante (correia 3034, t/h, em azul) algumas horas antes da realização da amostragem.
Fonte: Vale S.A.

As pilhas muito tempo paradas por gravidade ocasionam um espalhamento na base e segregação dos materiais (partículas) - mais grosseiros ficam no fundo, enquanto os finos mais acima e numa configuração, portanto, mais achatada e estratificada. Isto dificulta ainda mais o processo já que o material que poderá ser recuperado da pilha (perdas aqui também de produtividade), cuja base está constituída por material mais grosseiro, alimentará o britador secundário primeiramente por um bom tempo, baixando mais ainda a produtividade e aumentando a carga circulante. As pilhas ficam também expostas às chuvas, contribuindo na perda dos materiais mais finos.

Os materiais mais finos são alimentados depois dos grosseiros, sendo, provavelmente, o constituinte principal do produto secundário. Estes quando chegarem à fase de concentração poderão impactar a flotação (aumento da lama) e perda na recuperação. Isto tudo causa dificuldade na previsibilidade dos teores do produto final, nas taxas de recuperação e, enfim, controle operacional da fase de concentração (tais como, previsão do consumo de reagentes, água, dentre outros parâmetros de suma importância).

Na data do Teste 1, que ocorreu com material granulado, o ROM teve sua taxa mássica reduzida de 3952t/h para 784t/h. A granulometria +8mm chegou a atingir o valor de 46%, valor atípico que ocorreu apenas duas vezes na usina de Conceição. Este valor pode ser considerado como crítico atualmente, no entanto devido a previsão de mudanças na curva granulométrica do ROM para os próximos anos, pode vir a se tornar mais frequente.

Capítulo 5

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo estão descritas as considerações finais sobre as metodologias desenvolvidas para análise de distribuição granulométrica de ROM e do material fragmentado do Bloco III. Os resultados obtidos serão descritos, abrangendo todos os tópicos apresentados. Ao final, serão feitas as recomendações para trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES

Esta dissertação abordou conceitos relacionados à determinação de uma curva granulométrica para a alimentação de britadores primários e terciários em uma mina de ferro. Está diretamente relacionada à possibilidade de mudanças previstas nas propriedades da rocha, já que com o passar do tempo com o aprofundamento da cava o minério vem se tornando mais granulado e consequentemente mais resistente. Para contextualizar a pesquisa, primeiramente foi abordada a usina de britagem existente bem como a geologia do local. No entanto, o maior foco foi dado às metodologias desenvolvidas para determinar as granulometrias desejadas com utilização de análises de imagens como técnica de amostragem.

Para alcançar o objetivo de determinar curvas granulométricas utilizando a análise de imagens como técnica de amostragem foram realizadas duas sequências de etapas para cada metodologia proposta aplicada aos dois estudos de caso desta pesquisa. A primeira metodologia foi baseada na análise de ROM proveniente das frentes de lavra, material alimentado na etapa de britagem primária. A segunda metodologia foi baseada na análise de fragmentos +32mm que permaneciam no processo após a britagem secundária e que, consequentemente, eram encaminhados à britagem terciaria. Este material compõe a carga circulante, sendo a britagem terciária utilizada única e exclusivamente para britá-la.

As metodologias de análise de imagens como técnica de amostragem desenvolvidas nesta pesquisa podem ser consideradas de grande valia uma vez que forneceram os dados de granulometria propostos. Tratam-se de técnicas que podem ser utilizadas em usinas que não possuem amostrador na alimentação de suas etapas de britagem. No entanto, a precisão da amostragem está diretamente relacionada à variabilidade existente entre as partículas do lote e por isso pode ser variável. Assim, para que esta técnica tenha efeito, é necessário que seja

efetuada corretamente também sob o ponto de vista probabilístico. Cada partícula componente do lote deve possuir a mesma probabilidade de pertencer ao lote, o que não é tão simples.

Atualmente, apesar das técnicas de amostragem na área da mineração apresentar contínua melhoria nos últimos anos, a amostragem ainda não recebe o devido valor de importância, o que muitas vezes implica em uma coleta de amostras com graves erros sistemáticos, elevando seus custos de processos operacionais e acarretando em dificuldades na aceitação de produtos. Isto impacta diretamente na tomada de decisões na área de mineração, já que a avaliação dos dados deve, teoricamente, possuir um nível aceitável de representatividade.

Com relação à análise de ROM, a metodologia desenvolvida em campo mostra-se bastante laboriosa, bem como o protocolo amostral apresenta taxas de redução de massa elevadas. Por outro lado, utilizando-se da técnica de análise de imagens dos blocos maiores, foi possível estabelecer uma curva granulométrica de ROM com reprodutibilidade. Ainda, esta abrange uma ampla faixa de classes de tamanhos. Isto indica que, a despeito das muitas etapas de homogeneização e divisão envolvidas, os erros de viés e precisão (relativa = ±1%) resultantes frente à massa do lote retrocalculado de 259t foram desprezíveis.

As curvas granulométricas obtidas para o ROM mostraram que apenas 5% do material está retido em 1m, indicando que esta frente de lavra amostrada atende às especificações técnicas dos equipamentos de britagem primária. Ainda, foi identificado que 35% do material está retido em APA, sendo que 4% se encontra restrito a faixa de tamanho entre APA e APF. A identificação de um platô localizada abaixo de APA em ambas as curvas dá indícios de que, caso seja desejada uma granulometria mais fina do produto, parâmetros técnicos dos equipamentos de britagem devem ser considerados.

Com relação à análise do Bloco III, a metodologia desenvolvida em campo também se mostra bastante laboriosa. A análise foi realizada em dois testes, sendo o Teste 1 para material granulado e o Teste 2 para material friável. Ensaiar estes dois tipos de materiais é importante já que o minério, devido à necessidade de aprofundamento da cava, tende a se tornar mais compacto. Cada imagem analisada gerou uma malha criando, assim, uma curva de distribuição, enquanto que as quatro curvas geraram uma malha média a partir do cálculo da média dos quartis obtidos em cada uma das imagens. Em ambos os testes as curvas seguiram uma mesma tendência, garantindo, desta forma, a reprodutibilidade do ensaio. A curva gerada pela malha média foi comparada com a curva de projeto fornecida pela Vale.

Para o teste de material granulado foram geradas as malhas de: 11,00x4,06cm para a foto 1, 14,57x4,51cm para a foto 2, 12,81x3,45cm para a foto 3 e 11,79x3,87cm para a foto 4.

Desta forma, os tamanhos máximo e mínimo de partícula encontrados nesta análise são 145,67mm e 34,55mm, respectivamente. Na composição das curvas foi possível observar que a curva da Foto 3 esteve próxima da curva da Foto 4 no intervalo de tamanho entre 50mm e 80mm.

Conforme dito no capítulo anterior, as maiores variações ocorreram, como esperado, nos maiores tamanhos (acima de 80mm). Isto se dá devido à irregularidade dos blocos, já que são compostos por material mais compacto. As quatro curvas apresentaram o mesmo comportamento e as variações nos menores tamanhos foram consideradas desprezíveis. Entre 80mm e 100mm as curvas possuem retido acumulado variando entre 10% e 20%.

Para o teste de material fino foram geradas as malhas de: 14,75x2,79cm para a foto 1, 10,63x2,68cm para a foto 2, 8,02x3,12cm para a foto 3 e 12,18x2,96cm para a foto 4. Desta forma, os tamanhos máximo e mínimo de partícula encontrados nesta análise são 147,50mm e 26,80mm, respectivamente. As quatro curvas apresentaram o mesmo comportamento e as variações abaixo de 50mm foram desprezíveis.

As maiores variações ocorreram, também, como esperado, nos maiores tamanhos, porém neste caso acima de 50mm. Em 50mm o retido acumulado estava próximo a 30%, desta forma as maiores variações ocorreram com retido acumulado entre 0% e 30%. Entre 80mm e 150mm o retido acumulado variou entre 0% e aproximadamente 18%.

A criação do resumo estatístico de cada uma das fotos proporcionou uma análise nos valores médios obtidos, seguido da geração de uma curva média dos resultados por teste. As maiores variações que ocorreram nos maiores tamanhos, acima de 80mm para o Teste 1 e acima de 50mm para o Teste 2, foram confirmadas com a análise dos coeficientes de variação referentes a estes quartis. Os quartis superiores (100%), 12% para o Teste 1 e 25% para o Teste 2, foram os que indicaram a presença de dados menos acurados e precisos. Dentre os testes, os blocos maiores referentes ao Teste 2 foram considerados com maior variação. As análises de Q100 evidenciaram o fato de ocorrer heterogeneidade no conjunto, não permitindo, desta forma, prever o tamanho exato dos blocos maiores encaminhados à etapa de britagem terciária com regularidade.

A análise individual de cada uma das fotos do Teste 1 e do Teste 2 gerou uma malha de distribuição média que foi calculada a partir da média dos quartis conforme dito anteriormente. A curva média foi comparada com a curva de projeto fornecida pela Vale. Para o Teste 1 a malha de classificação média gerada foi de 12,54cmx3,97cm enquanto que para o Teste 2 a malha média foi de 11,89cmx2,89cm. Ambas as curvas seguiram um mesmo

comportamento, apesar de apresentarem diferença significativa na granulometria da alimentação dos britadores terciários para cada teste.

A curva que mais se aproximou com a curva de projeto foi a do teste de granulado. Isto é coerente uma vez que a curva de projeto foi elaborada com base em um teste em usina operando nas mesmas condições que a de Conceição, porém com material classificado como itabirito compacto. Já a curva do Teste 2, finos, esteve mais distante da de projeto, principalmente quando analisados os valores retidos acumulado acima de 20%. Ainda, com relação às curvas médias, as análises indicaram quantitativamente, a mesma quantidade de material localizado nas zonas de tamanhos entre APA e APF, no entanto, para o Teste 1, 100% do material foi considerado retido em APF. Isto permite identificar que existem impactos nesta operação unitária.

As análises das curvas geradas nesta pesquisa permite a identificação de um panorama inicial sobre possíveis mudanças na granulometria do ROM para os próximos anos. Isto é importante, pois permite maior conhecimento e entendimento do comportamento do material, minimizando possíveis ocorrências de perdas de produção significativas, aumentando, desta forma, a produtividade. Permite, também, que estudos sejam feitos para avaliar a previsão de paradas de britadores para quando a granulometria de ROM estiver mais fina. Existe ainda a possibilidade de desenvolver estudos sobre a necessidade de adequação com aumento no número de britadores terciários caso haja aumento de produção.

Todas as metodologias apresentadas nesta pesquisa foram desenvolvidas especialmente com intuito de proceder no futuro com a análise de materiais mais resistentes à quebra e de maior granulometria, tais como os itabiritos compactos. Elas se tornam de grande valia já que a tendência do material se tornar cada vez mais compacto aumenta com o aprofundamento da cava. Desta forma, o resultado desta pesquisa defende a amostragem com a utilização de análise de imagens uma técnica viável. Esta pesquisa, ainda, sugere que a utilização deste tipo de amostragem para fins de controle de produtividade seja realizada nos demais depósitos minerais da Vale S.A..

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões de trabalhos futuros estão:

- Amostragem nas etapas de britagem primária (produto), secundária (alimentação e produto) e britagem terciária (produto)

Implementar as metodologias desenvolvidas nesta pesquisa, ou ainda, metodologias de amostragem eficazes nas correias transportadoras de produto da britagem primária, alimentação e produto da britagem secundária e produto na britagem terciária. A partir das amostragens, analisar as implicações das grandezas dos erros mensurados sobre as etapas seguintes, avaliando os resultados em termos de granulometria e química (teor de ferro e impurezas). Isto permitirá a identificação dos potenciais de melhoria da planta de beneficiamento. Permitirá também determinar as relações existentes entre as análises de qualidade realizadas após o amostrador que se encontra no final do processo de britagem terciária e comparar, ainda, estes resultados com o estimado por trincheiras, validando todo o processo. Para avaliar o circuito como um todo, os dados desenvolvidos nesta dissertação também poderão ser utilizados.

- Estudo detalhado e aprofundado da amostragem no circuito de britagem (alimentação de produto)

Implementação de um estudo detalhado de amostragem via utilização de análise de imagens seguindo as metodologias desenvolvidas nessa pesquisa, porém com um aumento no número de amostras e variação de tempos de extração de imagens. Ainda, analisar estatisticamente os dados com a utilização da variografia para verificar a distribuição de tamanhos dos blocos. Isto permitirá avaliar o circuito como um todo com maior reprodutibilidade e confiabilidade nos resultados.

- Realização de um diagnóstico geral sobre a eficiência do Bloco III

Fazer um diagnóstico sobre o circuito de britagem, identificando os “gargalos”. Avaliar as consequências da ocorrência de gargalos, como por exemplo: aumento das massas e da granulometria de alimentação do terciário, diminuindo a eficiência global do circuito (Bloco III). Quando de posse das curvas granulométricas das alimentações e produtos de todas as etapas de britagem, é possível estudar a eficiência global do circuito do Bloco III. Propor soluções para aumento da eficiência global do circuito em questão, aumentando a capacidade (produtividade), reduzindo, sempre que possível, custos com consumo de energia e desgaste de peças.

- Comparativo entre a amostragem via análise de imagens com a amostragem via amostrador automático no produto da etapa de britagem terciária

Fazer um estudo comparativo entre os dois tipos de amostragem disponíveis no produto da etapa de britagem terciária: amostragem via utilização de análise de imagens e amostragem via utilização de amostrador automático com classificação granulométrica convencional, via peneiramento. Sugere-se que o estudo tenha como objetivo verificar a reprodutibilidade e a eficiência de ambos os métodos, além de avaliar as limitações e as vantagens da utilização de cada um dos tipos de amostragem.

- Estudo comparativo entre as usinas de processamento de minério

Identificar os tipos de minérios e sua rastreabilidade dentre as usinas do complexo de Itabira. Isto permite avaliar os potenciais ganhos de produção com relação ao destino dos materiais, uma vez que haja uma pré classificação quanto aos seus destinos finais para processamento. Este diagnóstico também permite prever paradas para manutenção preventivas diminuindo ocorrências de manutenções corretivas uma vez que permitiria que uma usina fosse utilizada, em situações previamente estabelecidas, para suprir a produção necessária.

Capítulo 6

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 3082: **Minérios de ferro-procedimentos de amostragem e preparação da amostra**. Rio de Janeiro, 2011.

ALMEIDA, T. **A perfilagem geofísica gama-gama em depósitos de ferro do quadrilátero ferrífero – uma ferramenta para medições de densidade de rocha**. 2011. 164 p. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia, PPGEM, UFRGS, Porto Alegre, 2011

CHAVES, A. P. **Teoria e Prática do Tratamento de minérios**. Volume 1. Signus editora, 2002, 142 p.

CHAVES, A. P. & PERES A. E. C. **Teoria e Prática do Tratamento de minérios**: Britagem, Peneiramento e Moagem. Volume 3. Signus editora, 2003, 129 p.

CHIEREGATI, A.C. **Reconciliação pró ativa em empreendimentos mineiros**. 2007. 205 p. Tese de doutorado. Escola Politécnica, USP, São Paulo, 2007.

CORREA, S. M. B. B. **Probabilidade e estatística**. 2ª ed. Belo Horizonte: PUC Minas Virtual, 2003, 116 p.

COSTA, J. F. L. C. & SOUZA, L. E. **Introdução à Geoestatística**. 2011. 30 p. Notas de Aula.

CPRM. **Folha SE.23-Z-D-IV (Itabira)**. Disponível em <http://www.cprm.gov.br/arquivos/pdf/itabira/itabira_geologia.pdf>

CPRM. **Carta geológica**. Disponível em <http://www.cprm.gov.br/arquivos/pdf/itabira/itabira_ctgeologica.pdf>

DORR, J. V. N. **Physiographic stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil**. Disponível em < http://pubs.usgs.gov/pp/0641a/report.pdf>

EL HAJJI, T. M. **Reconciliação ilusória: compensação de erros por amostragem manual**. 2013. 144 p. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica, USP, São Paulo, 2013.

FIGUEIRA, H. V. *et. al*. **Cominuição**: capítulo 2. Disponível em <http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2004-180-00.pdf>

FERRARI, F. Estatística básica. 2004. 33 p.

GIOVANNI, J.R. & BONJORNO, J.R. **Matemática 3**: geometria analítica, números complexos, polinômios, limites e derivadas, noções de estatística: 2° grau. São Paulo, FTD, 1992.

Góes, M.A.C. *et. al*. **Amostragem**: capítulo 2. Disponível em <http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2004-182-00.pdf>

Gy, P.M. Errors committed in size distribution. **Congress of Jamshedpur**, Indian Mining J., India, February, 1957.

Gy, P.M. **Sampling of particulate materials**: Theory and practice. 2nd ed. Elsevier, Amsterdam, 1982.

GRIGORIEFF, A. **Desenvolvimento de um novo protocolo de amostragem de carvão mineral**. 2002. 192 p. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia, PPGEM, UFRGS, Porto Alegre, 2002.

GRIGORIEFF; A. COSTA, J. F. L. C. & KOPPE, J. O problema de amostragem manual na indústria mineral. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, vol. 55, n° 3, p. 229-233, jul/set, 2002.

ISAAKS E. H. & SRIVASTAVA, R. M.. **An introduction to applied geoestatistics**. Oxford University Press, New York, 1989, 558 p.

KING, R.P. **Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems**. Butterworth-Heinemann, 2001, 403 p.

MINNITT, R. C. A. *et. al*. Part 1: Understanding the components of the fundamental sampling error: a key to good sampling practice. **The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, vol.107, p. 505-511, 2007.

MÔNICO, J. F. G. *et. al*. **Acurácia e precisão**: Revendo os conceitos de forma acurada. Disponível em < http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/bcg/article/view/15513/10363>

NAPIER-MUNN, T. J. *et. al*. **Mineral Comminution Circuits**: Their Operation and Optimisation, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, The University of Queensland, 1996, 413 p.

NEVES, P. B. **Características de fragmentação e microestruturais de rocha e seu comportamento na britagem para a produção de agregado**. 2005, 150 p. Dissertação de mestrado. UFRJ, Rio de Janeiro.

PITTARD, F.F. **Pierre Gy's sampling theory and sampling practice**: Heterogeneity, sampling correctness, and statistical process control, 2nd ed., CRC Press, 1993, 488 p.

PESTANA, D. & VELOSA, S. **Introdução à Probabilidade e à Estatística**. Volume I, 4ª edição, Fundação Calouste Gulbenkian, 2010.

REIS, E. A. Reis & REIS, I. A. **Análise descritiva de dados**: tabelas e gráficos. Disponível em <http://www.leg.ufpr.br/~silvia/CE055/rte0104.pdf>

SMOLE, K.S. & DINIZ, M.I. **Matemática ensino médio**. 6ª edição, São Paulo, Editora Saraiva, 2010.

SOUZA, M. L. & SOUZA, V. C. G. **Tópicos especiais na teoria de amostragem de Gy**. 2012. Notas de Aula.

YAMAMOTO, J. K. **Avaliação e classificação de reservas minerais**. São Paulo, Editora da Universidade, 2011, 227 p.